TESES E PROGRAMAS DE INVESTIGAÇÃO LNEC

COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DE PAREDES

Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação

Maria do Rosário da Silva Veiga

TESES E PROGRAMAS DE INVESTIGAÇÃO LNEC

COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DE PAREDES

Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação

Maria do Rosário da Silva Veiga

Licenciada em Engenharia Civil

69(043)/VEIm/COM

UNIVERSIDADE DO PORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA M
N.º 42438
CDU 69(043)
Data ___/___/19___

0037501

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil
para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Catalogado

LNEC • 1998

Teses e Programas de Investigação LNEC é uma colecção editorial do Laboratório Nacional de Engenharia Civil destinada a divulgar os trabalhos de investigação realizados no LNEC e de que resultaram Teses apresentadas em concurso para Investigador Auxiliar do LNEC, Teses de Doutoramento apresentadas em Universidades portuguesas e estrangeiras, e Programas de Investigação apresentados em concurso para Investigador Coordenador do LNEC.

Editado na mesma colecção:

TPI 7 PALMA, João C. — *Controlo da máquina assíncrona trifásica com ondulador de tensão: Desenvolvimento e simplificação de técnicas de controlo vectorial. (1996)*

TPI 8 MARECOS, Helena — *Contributo para a utilização de águas residuais tratadas para irrigação em Portugal. (1996)*

TPI 9 BAPTISTA, António M. — *Modèle non linéaire géométrique et matériel fondé sur l'analyse des déformations globales des sections: Application à l'étude de l'influence des défauts des profilés de construction métallique. (1996)*

TPI 10 HENRIQUES, Rui G. — *Os sistemas de informação geográfica e a modelação hidrológica no domínio das águas superficiais. (1996)*

TPI 11 LEITÃO, Teresa Eira — *Metodologias para a reabilitação de aquíferos poluídos. (1997)*

Copyright © Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Sector de Edições do CDIT
Av. Brasil, 101 - 1799 Lisboa Codex

Edição 1998

Tiragem: 100 exemplares

Palavras-chave: Revestimento de paredes / Argamassa / Fissuração / Tese
Mots clés: Enduit Mur / Mortier / Fissuration / Thèse
Keywords: Wall render / Mortar / Cracking / Thesis

CDU 693.695(043)
ISBN 972-49-1757-6

Impressão: Sector de Edições

COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DE PAREDES. CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DA SUA RESISTÊNCIA À FENDILHAÇÃO

RESUMO

A qualidade dos revestimentos de ligante mineral para paredes é um factor determinante para a salubridade, conforto, durabilidade e aspecto estético dos edifícios.

As funções exigidas a estes revestimentos implicam que estes possuam um conjunto de características nem sempre fáceis de compatibilizar. A susceptibilidade à fendilhação é um dos aspectos que mais influencia o seu comportamento, e também um dos mais difíceis de avaliar e de controlar, devido aos numerosos factores de que depende e à complexidade dos fenómenos envolvidos.

O presente estudo visa contribuir para um conhecimento mais profundo dos mecanismos que regem a susceptibilidade à fendilhação dos rebocos e fornecer ferramentas para a sua avaliação.

Para concretizar esse objectivo, estruturou-se o trabalho em dez capítulos; ao longo dos primeiros cinco identificam-se os aspectos fundamentais relacionados com o comportamento de rebocos e analisam-se os conhecimentos existentes sobre as matérias que os enquadram, focando com maior profundidade os que se relacionam com a fendilhação. Nos restantes capítulos, desenvolve-se uma metodologia para prever as tensões induzidas no seio da argamassa e na interface com o suporte devido à retracção restringida e para avaliar a resposta dos materiais envolvidos. Com base nos dados obtidos através da aplicação dessa metodologia a um conjunto, que se pretendeu relativamente vasto e diversificado, de argamassas de reboco, em diversas condições, elabora-se um critério de classificação de rebocos quanto à sua susceptibilidade à fendilhação. Paralelamente, estudam-se os outros aspectos considerados mais significativos do comportamento desses revestimentos. Finalmente, extraem-se conclusões e sugerem-se vias de desenvolvimento futuro do trabalho de investigação realizado.

PALAVRAS-CHAVE: Revestimentos; Rebocos; Paredes; Comportamento; Fendilhação; Impermeabilização; Argamassas; Compósitos; Fibras; Redes

PERFORMANCE OF RENDERING MORTARS. CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THEIR CRACKING RESISTANCE

ABSTRACT

The quality of wall renderings is an important factor to the salubrity, comfort, durability and aesthetic appearance of buildings.

The functions required from renderings ask for a group of characteristics that are not easily compatible with each other. The susceptibility to cracking is one of the aspects that hold a stronger influence on their performance, and one of the most difficult to evaluate and control, because of its dependence on several factors and of the complexity of the related phenomena.

The present study aims to contribute to a better knowledge of the mechanisms that rule the render susceptibility to cracking and to furnish tools for its evaluation.

To reach this purpose, the work was structured on ten chapters. Along the first five, the fundamental aspects related with the renders performance are identified and the existing knowledge about the matters that surround them are analysed, specially those about cracking.

On the remaining chapters, a methodology is developed to preview the stresses induced in the mortar and in the interface with the background due to the restrained shrinkage and to evaluate the answer of the implicated materials. Based on the date obtained through the application of this methodology to a group, which was intended to be numerous and diversified, of mortars in several conditions, a criterion is elaborated to classify renders as to their susceptibility to cracking.

Simoultaneously , other aspects also considered significant to the render behaviour, are studied. Finally, some conclusions are withdrawn and some development lines are suggested for the research work accomplished.

KEY-WORDS: Renders; Walls; Performance; Cracking; Waterproofing; Mortars; Composites; Fibres; Nets

COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DE PAREDES. CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DA SUA RESISTÊNCIA À FENDILHAÇÃO

ÍNDICE GERAL

Pág.

Resumo; palavras-chave I

Résumé; mots-clés II

Abstract; key-words III

Índice geral V

Índice do texto VII

Índice de quadros XV

Índice de figuras XVII

Prefácio XXIII

Agradecimentos XXV

Simbologia XXIX

Abreviaturas XXXIII

Capítulo 1 - Introdução 1

Capítulo 2 - Influência das características das argamassas no comportamento dos rebocos 11

Capítulo 3 - Fendilhação de rebocos 89

Capítulo 4 - Fendilhação de argamassas por retracção restringida 129

Capítulo 5 - Uso de fibras e redes como armaduras de rebocos 225

Capítulo 6 - Planeamento do estudo experimental 249

Capítulo 7 - Caracterização dos materiais 269

Capítulo 8 - Ensaios de comportamento em laboratório 303

Capítulo 9 - Ensaios complementares 417

Capítulo 10 - Conclusões 449

Anexo I - Fichas de Ensaio I.1

Anexo II - Projecto do aparelho de retracção restringida II.1

Anexo III - Fichas de aplicação dos revestimentos de paredes III.1

Anexo IV - Resultados dos ensaios preliminares para selecção das argamassas com

COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DE PAREDES. CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DA SUA RESISTÊNCIA À FENDILHAÇÃO

ÍNDICE DO TEXTO

Pág.

PARTE I - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 - INTERESSE E OBJECTIVOS DO TRABALHO 5

1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TEXTO 8

CAPÍTULO 2 - INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS NO COMPORTAMENTO DOS REBOCOS 11

2.1 - ASPECTOS FUNDAMENTAIS DO COMPORTAMENTO DE REBOCOS 13

2.1.1 - Regras de qualidade a verificar 13

2.1.2 - Trabalhabilidade 13

2.1.3 - Resistência à fendilhação 14

2.1.4 - Capacidade de impermeabilização em zona não-fendilhada 15

2.1.5 - Permeabilidade ao vapor de água 16

2.1.6 - Aderência ao suporte 20

2.1.7 - Resistência aos choques 22

2.1.8 - Compatibilidade com o suporte 23

2.1.9 - Aspecto estético 24

2.1.10 - Durabilidade 26

2.1.11 - Métodos de ensaio para a determinação das características referidas 27

2.2 - REBOCOS TRADICIONAIS 27

2.2.1 - Constituição 27

2.2.2 - Adjuvantes e aditivos 31

2.2.3 - Qualidade 37

2.3 - REBOCOS NÃO-TRADICIONAIS 40

2.3.1 - Tipos de produtos 40

2.4 - COMENTÁRIOS SOBRE A NORMALIZAÇÃO E A DOCUMENTAÇÃO NORMATIVA SOBRE REBOCOS 43

2.4.1 - Generalidades 43

2.4.2 - Normalização e outra documentação portuguesa 44

2.4.3 - Normalização e documentação normativa francesa 46

2.4.4 - Normalização e documentação normativa inglesa 53

2.4.5 - Normalização e documentação normativa alemã 58

2.4.6 - Normalização e documentação normativa austríaca 60

2.4.7 - Normalização e documentação normativa espanhola 61

2.4.8 - Normalização e documentação normativa italiana 62

2.4.9 - Normalização e documentação normativa europeia 62

2.4.10 - Normalização americana (Guia ACI) 65

2.4.11 - Aspectos a destacar das várias normalizações analisadas 67

CAPÍTULO 3 - FENDILHAÇÃO DE REBOCOS 89

3.1 - INTRODUÇÃO 91

3.2 - TIPOLOGIAS DE FENDILHAÇÃO DE REBOCOS 92

3.2.1 - Classificação segundo o aspecto e abertura das fendas 92

3.2.2 - Principais causas da fendilhação 96

3.2.3 - Principais efeitos da fendilhação 113

3.2.4 - Exigências de comportamento no que diz respeito à resistência à fendilhação de rebocos 114

3.3 - CRITÉRIOS PRÁTICOS DE AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À FENDILHAÇÃO DE REBOCOS 115

3.4 - COMPORTAMENTO À FENDILHAÇÃO DE REBOCOS TRADICIONAIS 119

3.5 - COMPORTAMENTO À FENDILHAÇÃO DE REBOCOS NÃO-TRADICIONAIS 120

CAPÍTULO 4 - FENDILHAÇÃO DE ARGAMASSAS POR RETRACÇÃO RESTRINGIDA 129

4.1 - INTRODUÇÃO 131
4.2 - RETRACÇÃO 132
4.2.1 - Enquadramento dos estudos sobre retracção 132
4.2.2 - Principais causas da retracção 133
4.2.3 - Retracção global 135
4.2.3 - Mecanismos de retracção por dessecação 142
4.2.5 - Mecanismos de retracção por hidratação 151
4.2.6 - Outros mecanismos de retracção 156
4.2.7 - Factores que influenciam a retracção. Estudos experimentais 156
4.2.8 - Formulação matemática da retracção 165
4.2.9 - Retracção restringida 173
4.3 - RELAXAÇÃO DE TENSÕES 174
4.3.1 - Teorias sobre relaxação de tensões 174
4.3.2 - Factores que influenciam a fluência e a relaxação 182
4.4 - FENDILHAÇÃO POR RETRACÇÃO RESTRINGIDA 187
4.4.1 - Teorias sobre fendilhação por retracção restringida 187
4.4.2 - Factores que influenciam a susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida 192
4.4.3 - Avaliação da susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida 198
4.4.4 - Influência do suporte 212
4.5 - CONCLUSÕES 215

CAPÍTULO 5 - USO DE FIBRAS E REDES COMO ARMADURAS DE REBOCO 225

5.1 - OBJECTIVOS DO USO DE ARMADURAS EM REBOCOS 227
5.1.1 - Mecanismos de actuação 227

5.1.2 - Fibras dispersas 232
5.1.3 - Redes 235
5.2 - FIBRAS E REDES MAIS USADAS EM REBOCOS 235
5.2.1 - Fibras 235
5.2.2 - Redes 240
5.3 - APLICAÇÃO DE FIBRAS E REDES EM REBOCOS 242

PARTE II - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 6 - PLANEAMENTO DO ESTUDO EXPERIMENTAL 251

6.1 - OBJECTIVO E ÂMBITO DO ESTUDO EXPERIMENTAL 253
6.2 - SELECÇÃO DOS MATERIAIS E CRITÉRIOS ADOPTADOS 256
6.2.1 - Critérios gerais 256
6.2.2 - Selecção dos constituintes das argamassas tradicionais 257
6.2.3 - Fibras 258
6.2.4 - Redes 258
6.2.5 - Rebocos não-tradicionais 258
6.2.6 - Composições das argamassas 258
6.3 - PARÂMETROS ANALISADOS 259
6.4 - PLANO DE ENSAIOS 260
6.4.1 - Ensaios de caracterização dos constituintes das argamassas 260
6.4.2 - Ensaios preliminares sobre as argamassas com fibras para seleccionar as fibras e dosagens mais adequadas 260
6.4.3 - Ensaios de envelhecimento das redes de fibra de vidro 261
6.4.4 - Ensaios de caracterização das argamassas 262
6.4.5 - Ensaios de comportamento em laboratório 262
6.4.6 - Ensaios na Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes (EENRevPa) 263
6.4.7 - Observações com microscópio electrónico de varrimento 264
6.5 - MODELO EXPERIMENTAL ADOPTADO 264
6.6 - EQUIPAMENTO UTILIZADO 267

CAPÍTULO 7 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....275

7.1 - DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS.....277

7.1.1 - Ligantes.....277

7.1.2 - Areia.....278

7.1.3 - Fibras.....279

7.1.4 - Redes.....280

7.2 - CONSTITUIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....286

7.2.1 - Definição da constituição dos rebocos tradicionais e das argamassas com fibras.....286

7.2.2 - Caracterização das argamassas em pasta.....287

7.2.3 - Caracterização das argamassas endurecidas.....290

7.3 - APRECIAÇÃO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....296

7.3.1 - Argamassas em pasta.....296

7.3.2 - Argamassas endurecidas.....298

7.3.3 - Apreciação geral.....301

CAPÍTULO 8 - ENSAIOS DE COMPORTAMENTO EM LABORATÓRIO.....307

8.1 - GENERALIDADES.....309

8.2 - DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO.....309

8.2.1 - Método usado para medição das forças devidas à retracção restringida.....309

8.2.2 - Método usado para medição das resistências à tracção e dos alongamentos na rotura.....311

8.2.3 - Método usado para medição das retracções livres.....312

8.2.4 - Grandezas relacionadas com o 1º critério de fissurabilidade: resistência à abertura da 1ª fenda.....313

8.2.5 - Grandezas relacionadas com o 2º critério de fissurabilidade: resistência à evolução da fendilhação.....316

8.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS.....318

8.3.1 - Resultados dos ensaios em vazio.....318

8.3.2 - Resultados dos ensaios de retracção restringida, resistência à tracção e retracção livre, no ambiente 1 318

8.3.3 - Avaliação da relaxação das argamassas no ambiente 1 338

8.3.4 - Avaliação da tenacidade e da ductilidade das argamassas no ambiente 1 344

8.3.5 - Apreciação dos resultados dos ensaios de comportamento à fendilhação no ambiente 1 357

8.3.6 - Resultados dos ensaios de retracção restringida, resistência à tracção e retracção livre, no ambiente 2 364

8.3.7 - Avaliação da relaxação das argamassas no ambiente 2 374

8.3.8 - Avaliação da ductilidade das argamassas no ambiente 2 377

8.3.9 - Apreciação dos resultados dos ensaios de comportamento à fendilhação no ambiente 2 384

8.3.10 - Resultados dos ensaios de retracção restringida e resistência à tracção sobre suporte absorvente 387

8.3.11 - Avaliação da ductilidade das argamassas aplicadas sobre suporte absorvente 398

8.3.12 - Apreciação dos resultados dos ensaios de comportamento à fendilhação das argamassas aplicadas sobre suporte absorvente 403

8.4 - APRECIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS 408

CAPÍTULO 9 - ENSAIOS COMPLEMENTARES 415

9.1 - ENSAIOS NA ESTAÇÃO DE ENSAIO NATURAL DE REVESTIMENTOS DE PAREDES DO LNEC (EENRevPa) 417

9.1.1 - Aplicações 417

9.1.2 - Ensaios de exposição natural 420

9.1.3 - Ensaios de aderência ao suporte 421

9.1.4 - Ensaios de choque de esfera e de punçoamento dinâmico 424

9.1.5 - Ensaios de avaliação da capacidade de impermeabilização 426

9.2 - OBSERVAÇÕES AO MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE VARRIMENTO (MEV) 434

9.2.1 - Amostras observadas 434
9.2.2 - Resultados das observações 435
9.2.3 - Conclusões das observações 440

CAPÍTULO 10 - CONCLUSÕES 447

10.1 - SÍNTESE CRÍTICA DOS RESULTADOS 449
10.2 - DESENVOLVIMENTO FUTURO DA INVESTIGAÇÃO NESTE DOMÍNIO 455
10.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS 458

ANEXO I - FICHAS DE ENSAIO I.1
ANEXO II - PROJECTO DO APARELHO DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA II.1
ANEXO III - FICHAS DE APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DE PAREDES. III.1
ANEXO IV - RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES PARA SELECÇÃO DAS ARGAMASSAS COM FIBRAS IV.1
ANEXO V - RESULTADOS DOS ENSAIOS COM OS APARELHOS VAZIOS V.1
ANEXO VI - RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS NOS APARELHOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA VI.1

ÍNDICE DE QUADROS

Pág.

2.1 - Permeabilidade ao vapor de água e coeficiente de capilaridade de rebocos (valores obtidos em estudos realizados no LNEC).....19
2.2 - Composições propostas para rebocos em bibliografia nacional 45
2.3 - Composições recomendadas para rebocos no DTU 26.1 francês..... 47
2.4 - Síntese da classificação e especificações para revestimentos monocamada estabelecidos pela documentação francesa 51
2.5 - Composições recomendadas para rebocos exteriores na BS 5262 inglesa 55
2.6 - Síntese das especificações para revestimentos de ligante mineral estabelecidos pela documentação alemã 59
2.7 - Síntese das composições recomendadas para rebocos exteriores na DIN alemã 59
2.8 - Exigências para os revestimentos de ligantes minerais consignadas no mais actual projecto de norma europeia de exigências 64
2.9 - Síntese das composições recomendadas para rebocos pelo Guia do ACI 67
3.1 - Critério de avaliação da susceptibilidade à fendilhação de argamassas de reboco.....117
3.2 - Fendilhação de rebocos tradicionais.....122
3.3 - Fendilhação de rebocos não-tradicionais 123
7.1 - Características do cimento II 32,5 utilizado.....277
7.2 - Características das areias utilizadas.....279
7.3 - Características das fibras seleccionadas.....280
7.4 - Características das redes seleccionadas 281
7.5 - Envelhecimento por ataque alcalino de redes de reforço de revestimentos de paredes..283
7.6 - Síntese dos ensaios de caracterização das argamassas em pasta. Ensaios no LERevPa 289
7.7 - Síntese dos ensaios de caracterização das argamassas em pasta. Ensaios na EENRevPa 294
7.8 - Síntese dos ensaios de caracterização das argamassas endurecidas. Ensaios em laboratório, ambiente 1 294
7.9 - Ensaios de caracterização das argamassas endurecidas. Ensaios em laboratório, ambiente 2 296

7.10 -Ensaios de caracterização das argamassas endurecidas. Ensaios na EENRevPa 296
8.1 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Ambiente 1 342
8.2 - Dados relativos à ductilidade das argamassas. Ambiente 1 355
8.3 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Ambiente 2 378
8.4 - Dados relativos à ductilidade das argamassas. Ambiente 2 385
8.5 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Suporte absorvente....398
8.6 - Dados relativos à ductilidade das argamassas. Suporte absorvente.....403
8.7 - Classificação CSAF/CREF 411
8.8 - Classificação das argamassas estudadas segundo os critérios CSAF/CREF e ε_r - E-E/Rt 411
9.1 - Aderência ao suporte das argamassas aplicadas em muretes.....423
9.2 - Choque de esfera e punçoamento dinâmico.....425
9.3 - Valores máximos da resistência eléctrica nos muretes revestidos com cada uma das argamassas, em Março/Abril e em Julho de 96.....432
10.1 - Classificação quanto à susceptibilidade à fendilhação de argamassas, baseada em ensaios de retracção restringida até 7 dias, em ambiente caracterizado por 23° C / 50% HR.....451
10.2 - Classificação da susceptibilidade à fendilhação das argamassas estudadas segundo os critérios CSAF/CREF e e_r - E-E/Rt.....451

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

2.1 - Humedecimento e secagem de um reboco poroso, de acordo com as condições climáticas 15

2.2 - Mecanismo de aderência mecânica de um reboco 20

2.3 - Perda de aderência de um reboco devido a movimentos diferenciais em relação ao suporte 22

2.4 - Efeito inestético dos escorrimentos de água da chuva e da poluição atmosférica em edifício de um bairro social de Lisboa 25

2.5 - Paramento rebocado e pintado com fantasmas 25

2.6 - Elementos arquitectónicos para minimizar o escorrimento da água pelas paredes 25

2.7 - Características das camadas sucessivas de um reboco correctamente doseado 30

2.8 - Fendilhação de um reboco 30

2.9 - Esquema do avanço do gelo numa camada de reboco adjuvado com um introdutor de ar: quando a água gela nos poros e capilares de maiores dimensões, as bolhas de ar aliviam a pressão local 32

2.10 -Efeito de um plastificante na pasta de cimento 34

2.11 - Exemplos de elementos secundários para reforço e protecção de rebocos recomendados nalguns dos documentos citados 71

3.1 - Microfendas em edifício em Oeiras 93

3.2 - Alguns exemplos de fendas médias em rebocos de edifícios.....94

3.3 - Alguns exemplos de grandes fendas em rebocos de edifícios.....95

3.4 - Fendas de retracção com malha muito larga 98

3.5 - Fendilhação a acompanhar as juntas em paredes de blocos de betão celular autoclavado revestidas com reboco tradicional 98

3.6 - Fendilhação devida a concentração de tensões junto a aberturas.....102

3.7 - Fenda parcialmente devida a corrosão de armadura metálica.....104

3.8 - Grande fenda horizontal devida a variações térmicas diferenciais entre a laje de betão e a parede de alvenaria, entre outros tipos de fendilhação 104

3.9 - Execução experimental de um reboco armado independente do suporte no LNEC com o objectivo de avaliar a sua viabilidade de uso em reabilitação 107

3.10 - Relação entre ε e σ_r/E 117

4.1 - Curva de retracção global obtida em ensaio de reboco pré-doseado ensaiado no LNEC 137

4.2 - Esquema da dessecação em reboco 141

4.3 - Esquema de um capilar saturado de água: a diferença de pressão de um lado e outro do menisco é equilibrada pela tensão superficial; as tensões na aresta têm que estar em equilíbrio 145

4.4 - Diferentes estados da água nos meios porosos 147

4.5 - Modelo da micro-estrutura da pasta de cimento segundo Feldman e Sereda 149

4.6 - Modelo simplificado da entrada e saída de água entre as camadas de gel de CSH 149

4.7 - Espessura da camada de ar adsorvida em função da humidade relativa, segundo Powers 150

4.8 - Modelo da micro-estrutura da pasta de cimento segundo Daimon e Kondo 150

4.9 - Descrição esquemática do modelo de Munique, segundo Wittmann 151

4.10 - Comparação entre os fenómenos de evaporação e de autodessecação correspondente à saída de um mesmo volume de água 155

4.11 - O surgimento de uma fenda anula a tensão que lhe é normal, mas mantém-se a fenda que lhe é paralela até que surja uma nova fenda com direcção aproximadamente perpendicular à primeira 188

4.12 - Esquema do processo de abertura de fendas numa camada de reboco, segundo Joisel 189

4.13 - Largura de uma fenda de retracção, segundo Joisel 190

4.14 - Esquema do processo de abertura de fendas em rebocos com mais que uma camada, segundo Joisel 190

4.15 - Ensaio de anel sobre argamassas de reboco realizado no LNEC 190

4.16 - Critério de Joisel: a fenda surge quando se intersectam as curvas e e F_r/M_t (exemplo extraído de ensaios realizados no âmbito deste trabalho 206

4.17 - Critério da energia dissipada de Sousa Coutinho: o comportamento à fendilhação é tanto melhor quanto maior for W_d 207

4.18 - Esquema de distribuições possíveis de tensões na espessura da camada, conforme o suporte e as condições de evaporação 213

5.1 - Diagramas de tensões de uma secção sujeita à flexão 229

5.2 - Curvas força-deslocamento típicas em tracção pura 230

5.3 - Deformação plástica da fibra na vizinhança de uma fenda 231
5.4 - Fibras usadas em argamassas 236
5.5 - Revestimento armado (corte)244
5.6 - Reboco armado na zona de transição entre materiais diferentes.....244
5.7 - Reforços nos ângulos dos vãos 244
5.8 - Reboco armado sobre fenda.....245
6.1 - Esquema do modelo experimental adoptado 266
6.2 - Exemplo de verificação da condição de abertura da 1ª fenda 266
6.3 - 2ª condição de susceptibilidade à fendilhação.....267
7.1 - Curvas granulométricas das areias utilizadas 279
7.2 - Redes. Aspecto geral dos provetes.....282
7.3 - Redes. Ensaio de tracção 282
7.4 - Redes. EAA.....282
7.5 - Redes. EN 282
7.6 - Evolução da resistência à tracção de redes, no sentido da teia (longitudinal), sujeitas a envelhecimento 284
7.7 - Imagens de observações com microscópio electrónico de varrimento de redes de fibra de vidro após envelhecimento artificial acelerado, segundo a técnica preconizada, durante 90 dias 285
7.8 - Avaliação da consistência das argamassas 288
7.9 - Avaliação da trabalhabilidade das argamassas 288
7.10 - Determinação das variações dimensionais por retracção.....291
7.11 - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico 291
7.12 - Ensaio de compressão 292
7.13 - Provetes de argamassa FV após ensaio de tracção, apresentando fendilhação múltipla.....292
7.14 - Provetes introduzidos na câmara climática para a 2ª fase do ambiente 2.....292
7.15 - Ensaio de aderência ao suporte 293
8.1 - Moldagem dos provetes nos aparelhos 310
8.2 - Preparação de provete da argamassa M2 (massa retirada da máquina de projectar)...310
8.3 - Fixação do transdutor de deslocamento 310
8.4 - Conjunto dos aparelhos colocados na horizontal (durante as 1ªs horas de medições).310

8.5 - Conjunto de provetes na vertical (2ª fase das medições) 310
8.6 - Ensaio de tracção 312
8.7 - Fenda obtida em ensaio de tracção e "alargada" até cerca de 1 mm 312
8.8 - Aparelho preparado para ensaio de retracção livre 313
8.9 - Provete em ensaio de retracção livre 313
8.10 - Preparação de provete de argamassa R2 para ensaio de retracção restringida 358
8.11 - Provete de argamassa FV após ensaio de tracção. Fendilhação múltipla 358
8.12 - Provete de argamassa R1 após ensaio de tracção: fendilhação múltipla 358
8.13 - Provete de argamassa R2 após ensaio de tracção: fendilhação múltipla e descolamento pela rede 358
8.14 - Provete de argamassa R3 após ensaio de tracção: fendilhação múltipla 358
8.15 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação, aplicados aos 7 dias 363
8.16 - Ensaio de retracção restringida no ambiente 2 366
8.17 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação, aplicados aos 28 dias 388
8.18 - Preparação de bases cerâmicas para os ensaios sobre suporte absorvente 390
8.19 - Preparação do aparelho de retracção restringida para ensaio sobre suporte absorvente 390
8.20 - Humedecimento do suporte (condição SH) 390
8.21 - Ensaio sobre suporte absorvente: aparelho na vertical, vista de trás 390
8.22 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação das argamassas aplicadas sobre suporte absorvente. Condições SA 406
8.23 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação das argamassas aplicadas sobre suporte absorvente. Condições SH 407
8.24 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação das argamassas aplicadas sobre suporte absorvente. Condições SH+RH 407
8.25 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação da argamassa P aplicada sobre suporte absorvente, com várias condições de cura 408
9.1 - Aplicação da argamassa R1 na EENRevPa (Inverno) 419
9.2 - Aplicação da argamassa P na EENRevPa (Verão) 419
9.3 - Colocação das sondas para medições com humidímetro, antes da aplicação da argamassa 428
9.4 - Provetes em exposição natural na EENRevPa 419

9.5 - Amassadura da argamassa FPP (aplicação de Inverno na EENRevPa).....420
9.6 - Aplicação da argamassa FPP na EENRevPa (Inverno).....420
9.7 - Aplicação da argamassa R1 na EENRevPa - colocação da rede.....420
9.8 - Aplicação da argamassa R1 na EENRevPa - 2ª demão de argamassa.....420
9.9 - Aspecto final do murete com as argamassas FPP (Inverno, lado esquerdo) e FV (Verão, lado direito).....422
9.10 - Ensaio de aderência num murete da EENRevPa.....422
9.11 - Ensaio de choque de corpo duro não cortante (10 J) num murete da EENRevPa.....424
9.12 - Aspecto geral de amostra do tipo P0.....435
9.13 - Aspecto geral de amostra do tipo P1.....435
9.14 - Aspecto geral de amostra do tipo P3.....435
9.15 - Cristais de etringite em amostra do tipo P1.....435
9.16 - Cristais de etringite em amostra do tipo.....435
9.17 - Gel em amostra do tipo P5.....435
9.18 - Aspecto geral de amostra do tipo PEV (murete Verão).....436
9.19 - Aspecto geral de amostra do tipo PEI (murete Inverno).....436
9.20 - Cristais de etringite em amostra do tipo PEV (murete, Verão).....436
9.21 - Cristais de etringite em amostra do tipo PEI (murete Inverno).....436
9.22 - Gel com pequenos cristais de etringite em amostra do tipo PEI (murete Inverno).....436
9.23 - Aspecto geral de amostra do tipo FV0. Distribuição das fibras.....437
9.24 - Aspecto geral de amostra do tipo FV5. Distribuição das fibras.....437
9.25 - Aspecto geral de amostra do tipo FV F/C.....437
9.26 - Aspecto geral de amostra do tipo FEV (murete Verão).....437
9.27 - Cristais de etringite em amostra do tipo FV F/C.....437
9.28 - Feixe de fibras de vidro em amostra do tipo FV3.....437
9.29 - Feixe de fibras de vidro em amostra do tipo FV F/C.....438
9.30 - Pormenor das fibras de vidro em amostra do tipo FV1.....438
9.31 - Pormenor de fibra de vidro em amostra do tipo FV0.....438
9.32 - Aspecto geral de amostra do tipo FA0. Distribuição das fibras.....438
9.33 - Aspecto geral de amostra do tipo FA5. Distribuição das fibras.....438
9.34 - Aspecto geral de amostra do tipo FEI (murete Inverno).....439
9.35 - Cristais de etringite em amostra do tipo FA1.....439

9.36 - Cristais de etringite em amostra do tipo FA1 439
9.37 - Cristais de etringite em amostra do tipo FEI (murete Inverno).....439
9.38 - Fibra de polipropileno em amostra do tipo FA0. Pormenor.....439
9.39 - Fibra de polipropileno em amostra do tipo FA0. Pormenor da extremidade.....439
9.40 - Fibra de polipropileno em amostra do tipo FA3. Pormenor da superfície de rotura...440
9.41 - Fibra de polipropileno em amostra do tipo FEI. Pormenor da extremidade.....440

PREFÁCIO

O trabalho sobre "O comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação", agora editado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, constituiu a dissertação apresentada pela engenheira Maria do Rosário da Silva Veiga, para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Com este estudo, a autora delineou respostas a um problema concreto da construção nacional, que se tem traduzido em diversas solicitações dirigidas ao LNEC na área dos revestimentos de paredes, a que se tem dedicado desde que iniciou a sua actividade neste Laboratório, em 1987.

Da primeira parte do trabalho destacam-se alguns aspectos tratados com particular profundidade: uma recolha crítica da normalização e documentação normativa nacional e internacional sobre rebocos; uma análise do estado da arte no que se refere a fendilhação de argamassas de reboco, em que se procuram integrar abordagens muito diversas desta temática; um levantamento da situação no que se refere ao uso de armaduras - de fibra de vidro e sintéticas - para melhorar a resistência à fendilhação de rebocos.

A segunda parte abrange os aspectos mais inovadores do estudo. Nela se define uma metodologia de avaliação da susceptibilidade à fendilhação de rebocos, que é aplicada a diversas composições de argamassas e testada em várias situações. São preparados ensaios específicos e é construído equipamento apropriado para o efeito. Os resultados permitem estabelecer uma classificação de rebocos quanto à susceptibilidade à fendilhação e abrem caminho para o estudo da influência de grande parte dos factores que podem influenciá-la. Apesar da variabilidade de resultados associada a materiais tão heterogéneos como são as argamassas, o vasto conjunto de ensaios realizados permitiu tirar algumas conclusões significativas, por exemplo sobre a importância do ambiente de cura - e a necessidade de definir criteriosamente ambientes de ensaio mais realistas que os preconizados nas normalizações actualmente em vigor -, sobre a eficácia do uso de fibras e redes como armadura de rebocos e sobre as vantagens do uso de resinas e de cal na sua composição.

O estudo pôs também em evidência a influência dos mesmos factores noutros aspectos importantes do comportamento de rebocos.

Embora sem negligenciar o rigor na definição das condições de ensaio e na condução dos ensaios e tratamento dos resultados, a autora desenvolveu o trabalho de forma prática e dirigida para a resolução de problemas com que tem sido confrontada ao longo da sua vida profissional. O tratamento do tema evidencia a profunda reflexão que estas matérias lhe têm merecido e a sua experiência directa nesta área, além do domínio das ferramentas experimentais disponíveis.

O trabalho conduziu a resultados práticos imediatos, estando as metodologias desenvolvidas a ser utilizadas e aprofundadas em estudos por contrato e de investigação.

Lisboa, Junho de 1998

José A. de Carvalho Lucas

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi elaborado no âmbito do protocolo de cooperação e acordo entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Instituições a quem manifesto o meu reconhecimento nas pessoas dos seus Directores, respectivamente Professor Doutor Marques dos Santos e Professor E. R. de Arantes e Oliveira.

Na realização do trabalho pude contar com valiosas colaborações, que muito agradeço. Na impossibilidade de o fazer de forma individual, gostaria contudo de salientar algumas das contribuições mais importantes:

- Dos meus orientadores científicos Professor Doutor Vítor Abrantes, da FEUP e Engº Carvalho Lucas, do LNEC, que, com sabedoria e amizade me orientaram e apoiaram.

- Do Chefe do Departamento de Edifícios do LNEC, Engº Vasconcelos Paiva, que muito contribuiu para a minha formação científica e cujo apoio constante foi um incentivo valioso.

- Do Chefe de Núcleo de Comportamento de Construções, Engº Pedro Pontífice de Sousa, que criou as condições necessárias para a realização do trabalho, em situações nem sempre fáceis, e cujo interesse e disponibilidade para troca de impressões constituíram uma inestimável ajuda.

- Da Engª Fernanda Carvalho, que me acompanhou ao longo de todo o trabalho, com amizade e sábios conselhos.

- Do técnico Joaquim Ranita, que coordenou e realizou a maior parte dos ensaios e cujo empenho inexcedível e muitos conhecimentos e experiência permitiram que a campanha experimental decorresse de forma tão rigorosa quanto possível.

- Dos Eng°s mecânicos João Viegas - que, de forma desinteressada e generosa, me ajudou na concepção e projecto do aparelho de retracção restringida - e Toco Emílio - que reviu o projecto final.

- Dos Eng°s electrotécnicos Tavares Cardoso, infelizmente desaparecido entretanto - que me ajudou a seleccionar o equipamento de aquisição de dados - e Almeida Garrett e Carlos Santos - que elaboraram o *software* de aquisição de dados.

- Da técnica Ana Paula Melo e do Dr. Santos Silva, que acompanharam as observações com microscópio electrónico e me ajudaram na interpretação das imagens.

- De tantos colegas que me apoiaram com amizade, conselhos, contactos e conhecimentos das suas áreas de especialidade, apesar de estarem, frequentemente, também eles sobrecarregados com trabalho.

- Do técnico de experimentação Paulo Reis, do desenhador Delmiro Matias, dos técnicos das oficinas de mecânica e de electricidade, e de tantos outros elementos do pessoal técnico do LNEC que, com a sua competência e empenho, tanto contribuíram para o trabalho realizado.

Não quero também deixar de dirigir uma palavra de agradecimento às firmas que forneceram gratuitamente os produtos para ensaio (cimento, cal, revestimentos pré-doseados, fibras, redes, adjuvantes, etc.), nalguns casos disponibilizando também máquinas de projecção e aplicadores.

Aos meus pais e

ao João, ao Diogo e ao André

SIMBOLOGIA

Alfabeto latino

A - Área da secção

Ap - Área da placa

C - Difusividade do material

C_0 - Fluência específica

C_d - Fluência de secagem

CSAF - Coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda

CREF - Coeficiente de resistência à evolução da fendilhação

D - Diâmetro

d - Distância entre fendas

d_r - Extensão na rotura (no momento da abertura da 1ª fenda)

E - Módulo de elasticidade

E_{eq} - Módulo de elasticidade equivalente

E_f - Módulo de elasticidade da fibra

E_m - Módulo de elasticidade da matriz

E_0 - Módulo de elasticidade assimptótico

F_C - Força de retracção restringida corrigida

F_r - Força de retracção restringida

$F_{r\,máx}$ - Força máxima de retracção restringida

F_{r0} - Força de retracção restringida antes do início do ensaio de tracção

F_t - Força de tracção

G - Energia de rotura

G_f - Energia de rotura por flexão

G_p - Energia de rotura por compressão

H - Humidade relativa do ar

h - Espessura

I - Teor de inertes

J - Função de fluência

J_b - Função de fluência básica

$K'c$ - Factor característico de abertura da 1ª fenda

l - Comprimento

l_{crit} - Comprimento crítico

L_f - Comprimento total de fendas

M - Peso molecular do líquido que enche o capilar

M_0 - Massa inicial

M_1 - Massa ao fim de um intervalo de tempo

M_t - Módulo de rotura à tracção

n - Porosidade

p_c - Pressão capilar

p_a - Pressão atmosférica

p_v - Tensão parcial de vapor

p_{vs} - Tensão de vapor correspondente à saturação

R - Constante dos gases perfeitos

R_c - Resistência à compressão

R_t - Resistência à tracção

r_m - Raio de curvatura do menisco

r_c - Raio do capilar

T - Temperatura absoluta

t - Tempo desde a moldagem

t_0 - Tempo desde o início da dessecação; tempo inicial

t_1 - Tempo ao fim de um intervalo de tempo

t' - Tempo desde o início da aplicação da força

V_c - Volume específico do líquido que enche o capilar

V_f - Teor volumétrico de fibras

$V_{f\,crit}$ - Volume crítico de fibras

Vs - Volume sólido

Wa - Peso da água adsorvida

Wd - Energia dissipada

W - Energia elástica

Alfabeto grego

α - ângulo de molhagem

β_c - coeficiente de variação da fluência com o tempo

Δl - Variação de comprimento

ΔV - Variação de volume

ΔP - Variação de pressão

δ - Deslocamento

δ_{ar} - Deslocamento antes da rotura

δ_0 - Deslocamento antes do início da tracção

ε - Deformação

ε_r - Retracção

ε_{rr} - Retracção restringida

ε_{ri} - Retracção dos inertes

$\varepsilon_{r\,arg}$ - Retracção da argamassa

ε_{rc} - Valor relativo da contracção de rotura

$\varepsilon_{r\infty}$ - Retracção final

ε_f - Deformação da fibra

ε_m - Deformação da matriz

ϕ - Potencial químico da água

Φ - Fluência

φ - Coeficiente de fluência

φ_0 - Coeficiente de fluência nominal nas condições iniciais de aplicação da força

γ - Tensão superficial na interface líquido-ar

γ_{sl} - Tensão superficial na interface sólido-líquido

γ_{sa} - Tensão superficial na interface sólido-ar

η_1 - Factor de eficiência de alinhamento

η_2 - Factor de eficiência de comprimento

η_r - Meio tempo de retracção quadrada

ν - Coeficiente de Poisson

π - Tensão dissipada

θ - Temperatura

σ - Tensão

σ_r - Tensão devida à retracção

σ_t - Tensão de tracção

σ_c - Tensão de compressão

σ_f - Tensão na fibra

σ_m - Tensão na matriz

σ' - Tensão medida

σ_b - Módulo de rotura

σ_{cu} - Tensão última no compósito

τ - Tensão de aderência

ψ - Relaxação

ABREVIATURAS

ag	- Água
ar	- Areia
AR	- Resistente aos álcalis
a/c	- Relação volume de água/volume de cimento
a/l	- Relação volume de água/volume de ligante
ACI	- American Concrete Institute
BRE	- British Research Establishment
ci	- Cimento
ca	- Cal aérea hidratada
CEN	- Comité Européen de Normalisation
ch	- Cal hidráulica
C_2 S	- Silicato bicálcico
C_3 S	- Silicato tricálcico
C_2A	- Aluminato bicálcico
C_3A	- Aluminato tricálcico
C_4 AF	- Aluminoferrato tetracálcico
CSH	- Silicatos de cálcio hidratados
CSTB	- Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CP	- Cimento portland
DH	- Documento de Homologação
EAA	- Envelhecimento artificial acelerado
EENRevPa	- Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes
EOTA	- European Organisation for Technical Approval
EN	- Envelhecimento natural
ETICS	- External Thermal Insulation Composite Systems
FEUP	- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IA	- Introdutor de ar
IST	- Instituto Superior Técnico
LERevPa	- Laboratório de Ensaio de Revestimentos de Paredes
LNEC	- Laboratório Nacional de Engenharia Civil

l/d	- Relação comprimento/diâmetro
PP	- Polipropileno
PVC	- Policloreto de vinilo
s/v	- Relação superfície exterior/volume
SA	- Suporte absorvente
SNA	- Suporte não-absorvente
SH	- Suporte humedecido
RH	- Revestimento humedecido
UEAtc	- União Europeia para a Apreciação Técnica na Construção
UV	- Raios ultra-violeta

PARTE I

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Interesse e Objectivos do Trabalho

1.2 - Organização do Texto

1.1 - INTERESSE E OBJECTIVOS DO TRABALHO

Os revestimentos exteriores de paredes têm geralmente, no tipo de construção que se pratica no nosso País, um papel importante na estanquidade à água da envolvente dos edifícios.

Ora, como é sabido, as infiltrações de água afectam gravemente a habitabilidade e o conforto dos edifícios. Cada vez mais, as populações exigem edifícios saudáveis e confortáveis para habitar e trabalhar e tão justas e razoáveis aspirações justificariam só por si um investimento na melhoria da estanquidade à água dos edifícios e portanto no desempenho dos revestimentos de paredes.

As razões económicas não são menos importantes, uma vez que, actualmente, na maioria dos países da Europa, os defeitos de estanquidade das fachadas constituem uma das principais causas de degradação dos edifícios e são, como tal, responsáveis por uma fatia significativa dos gastos com reparações. De facto, as infiltrações de água influenciam fortemente a durabilidade dos edifícios, uma vez que o contacto prolongado com a água e os ciclos humedecimento-secagem são factores de degradação das alvenarias e, frequentemente, também dos materiais estruturais.

Mas assegurar a durabilidade dos edifícios é um objectivo importante, não só pelas razões económicas referidas - relacionadas, fundamentalmente, com o aumento do custo da mão-de-obra - mas também por razões ecológicas - já que a tomada de consciência da limitação dos recursos de que dispomos impõe, também ela, a conservação do património construído.

Acresce que a penetração de água nas paredes afecta também, como se sabe, a condutibilidade térmica dos materiais que as constituem, nomeadamente dos isolantes nelas inseridos, reduzindo portanto o isolamento térmico global do edifício com as consequentes implicações ao nível do consumo de energia e do aumento da probabilidade de ocorrência de condensações.

Para além dos problemas relacionados com a estanquidade à água, é importante lembrar que os revestimentos de paredes - exteriores e interiores - condicionam fortemente o aspecto estético dos edifícios e do interior das habitações e locais de trabalho. Assim, todas as anomalias visíveis têm um impacte negativo na aparência geral das construções e, como tal,

afectam a qualidade de vida das populações. Esta é, também, uma razão importante para que o bom desempenho dos revestimentos de paredes seja um objectivo a atingir.

Em Portugal, os revestimentos exteriores de paredes mais utilizados são os constituídos por argamassas de ligantes minerais - fundamentalmente hidráulicos, mas também, por vezes, aéreos -, vulgarmente designados por rebocos. Os revestimentos interiores de paredes incluem também, frequentemente, uma camada de reboco. Esta preponderância é ainda mais marcada nos edifícios de habitação de baixo e médio custo, por se tratar de uma solução relativamente pouco onerosa, e que oferece um aspecto tradicional geralmente bem aceite. Tal situação é comum, aliás, em vários países da Europa.

A qualidade deste tipo de revestimentos é, portanto, um factor determinante para a salubridade, conforto, durabilidade e aspecto estético dos edifícios e, em particular, do Parque Habitacional.

Os rebocos, como todas as argamassas, embora ofereçam boas resistências à compressão e ao choque e sejam, potencialmente, materiais duráveis, têm um comportamento frágil quando sujeitos a esforços de tracção. Ora as condições normais de utilização dos rebocos comportam algumas causas dificilmente evitáveis de desenvolvimento de tensões de tracção, entre as quais se destaca a retracção das argamassas, parcialmente restringida pela aderência ao suporte. Estas tensões estão na origem de parte da fendilhação que neles ocorre e são particularmente difíceis de controlar, não só por dependerem de um grande número de factores, mas também por resultarem de fenómenos que se desenvolvem nas primeiras idades das argamassas, em que as suas características estão ainda em evolução rápida ao longo do tempo e não são passíveis de serem determinadas pelos métodos usuais, concebidos para argamassas endurecidas.

Assim, os revestimentos executados a partir de argamassas tradicionais são tendencialmente muito susceptíveis à fendilhação, que, como é sabido, favorece as infiltrações de água e tem um forte impacte negativo na estética dos edifícios. Esta situação tem-se agravado nos últimos anos, com a generalização da utilização do cimento portland como único ligante e com o uso de argamassas demasiado ricas em cimento, executadas muitas vezes com areias inadequadas e aplicadas, frequentemente, apenas numa camada demasiado espessa (além do crespido), sem cuidados de cura e sem respeitar prazos de secagem adequados.

O aparecimento de alvenarias não-tradicionais e a utilização de soluções de isolamento térmico pelo exterior fizeram surgir materiais de suporte com características próprias, muitas

vezes mais *fracos* e com menor estabilidade dimensional que os tradicionais. Esta situação reforça a necessidade de melhorar o comportamento das argamassas de revestimento no que diz respeito à resistência à fendilhação e de conhecer melhor a influência das suas características no comportamento dos rebocos.

Acresce que o clima do nosso País - e, em geral, dos países do Sul da Europa - é, durante grande parte do ano, particularmente severo para a cura dos rebocos, pelo que se justificam estudos que permitam um bom domínio dos mecanismos e dos factores de susceptibilidade à fendilhação, de forma a possibilitar a adopção de medidas eficazes.

O grande interesse que a reabilitação tem merecido recentemente em Portugal é também uma razão para aprofundar os estudos ligados à susceptibilidade à fendilhação por retracção de rebocos e às forças neles desenvolvidas devido à retracção restringida. Com efeito, um dos problemas que se levantam na reabilitação dos edifícios antigos é, frequentemente, a renovação dos rebocos exteriores e interiores; o desconhecimento das forças geradas nos revestimentos novos pode levar a seleccionar soluções que transmitam tensões elevadas a suportes eventualmente *fracos*, contribuindo assim para a aceleração dos processos de degradação das alvenarias.

Vários procedimentos têm sido experimentados, com o objectivo de melhorar a resistência à fendilhação das argamassas para revestimento de paredes, procurando, geralmente, a redução, quer da retracção, quer da rigidez. Como exemplos, referem-se a utilização de cimentos de menor retracção que o cimento portland, a recuperação do uso da cal como ligante, a inclusão de adjuvantes químicos (introdutores de ar, retentores de água, plastificantes, etc.) e de aditivos (micro-fíleres, resinas), a introdução de inertes leves e a incorporação de fibras disseminadas na argamassa, ou sob a forma de redes. A conjugação de diversos destes procedimentos permitiu a formulação de numerosos revestimentos não-tradicionais de ligantes minerais e de ligantes mistos (ligantes minerais e sintéticos). A definição de regras de execução e de disposições particulares, em vários países reunidas em documentos de carácter normativo, constituem também contributos importantes para a melhoria de comportamento deste tipo de revestimentos.

Nos últimos anos tem-se verificado, em diversos países da Europa, um incremento dos estudos sobre o comportamento de rebocos. No entanto, há aspectos que continuam a ser

avaliados de forma mais ou menos empírica e factores cuja influência não está ainda quantificada.

Com o presente estudo pretende-se desenvolver uma metodologia que permita prever as tensões induzidas no seio da argamassa e na interface com o suporte devidas à retracção restringida de rebocos e avaliar, de forma mais rigorosa e realista, a sua susceptibilidade à fendilhação devida a este fenómeno. Serão analisados alguns factores que influenciam o comportamento à fendilhação, entre os quais se salientam as condições climáticas e as técnicas de cura, a absorção de água do suporte, o tipo de ligante, a quantidade de água de amassadura e o tipo de areia. A utilização de fibras, disseminadas na argamassa ou sob a forma de redes, será também um aspecto a analisar. Com efeito, embora se usem fibras curtas, e mais frequentemente redes, no reforço de rebocos tradicionais e não-tradicionais, com o objectivo de controlar a fendilhação, esta utilização é ainda relativamente incipiente, e é mal conhecida a sua influência real.

Procurar-se-á, assim, lançar algumas bases que permitirão seleccionar, com melhor conhecimento de causa, argamassas de revestimento a utilizar em condições e suportes definidos e especificar procedimentos de aplicação e de cura.

Em última análise, este estudo, que terá em conta os materiais disponíveis no mercado nacional e os suportes, as condições climáticas e os métodos de aplicação existentes no nosso País, poderá contribuir para sensibilizar os técnicos, ao ajudar a libertar estas matérias do desencorajante empirismo de que se encontram ainda imbuídas na nossa construção. De facto, o meio técnico nacional encontra-se, de um modo geral, alheado dos problemas relacionados com as argamassas de revestimento, apenas aflorados nos currículos dos cursos de engenharia civil, e escassamente tratados na bibliografia nacional.

1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O trabalho está organizado em dez capítulos, agrupados em duas partes. A Parte I - Fundamentação Teórica -, inclui cinco capítulos, dos quais este é o primeiro.

Os capítulos 2 a 5 incluem o *estado da arte*. São fundamentalmente bibliográficos, mas incorporam também parte da experiência profissional da autora na temática em causa.

No capítulo 2 descrevem-se os aspectos mais relevantes do comportamento dos revestimentos de ligante mineral para paredes e faz-se uma análise da documentação normativa existente em Portugal, em vários outros países e a nível europeu sobre esta matéria, com particular relevo para as especificações de comportamento e recomendações para aplicação.

No capítulo 3 analisa-se a susceptibilidade à fendilhação de rebocos, referindo as principais tipologias de fendilhação e respectivas causas e os critérios práticos de avaliação, no que diz respeito a esta característica. Procurou-se focar os aspectos mais relacionados com a constituição e aplicação dos rebocos, ou seja, aqueles que poderão, eventualmente, ser melhorados através de um conhecimento mais completo dos mecanismos de fendilhação de argamassas.

O capítulo 4 é, talvez, o que melhor se adapta à designação de *estado da arte*, já que nele se procura fazer um historial do avanço dos conhecimentos nas matérias relacionadas com a fendilhação de argamassas por retracção restringida e das diversas teorias adiantadas pelos autores mais conhecidos. Dada a dispersão destas matérias na extensa bibliografia conhecida, pareceu-nos essencial analisar atentamente os vários ângulos de abordagem para estabelecer um enquadramento bem fundamentado para a parte experimental do trabalho.

No capítulo 5 aborda-se a utilização de fibras e redes como *armadura* de rebocos e referem-se os mecanismos que poderão levar a uma melhoria da resistência à fendilhação.

A Parte II - Desenvolvimento Experimental - agrupa os cinco capítulos finais.

Os capítulos 6 a 9, em que se descreve a campanha experimental realizada e os respectivos resultados e conclusões, constituem a parte inovadora do trabalho.

No capítulo 6 apresenta-se o planeamento do estudo experimental, referindo o programa experimental, o equipamento desenvolvido e as montagens concebidas especialmente para o estudo e os critérios utilizados na selecção de materiais.

Nos capítulos 7 a 9 descrevem-se os ensaios de caracterização e comportamento realizados, bem como as observações com microscópio electrónico de varrimento e analisam-se os resultados obtidos, com particular ênfase para a resistência à fendilhação.

Finalmente, no capítulo 10, faz-se uma síntese crítica dos resultados obtidos, analisa-se o grau de cumprimento dos objectivos do estudo, sintetizam-se as conclusões extraídas e sugerem-se vias de desenvolvimento futuro do trabalho de investigação realizado, definindo algumas das suas linhas passíveis de tratamento a curto prazo.

Em anexos, incluem-se Fichas de Ensaio com a descrição de alguns dos métodos de ensaio usados - Anexo I -, o projecto do aparelho desenvolvido para os ensaios de retracção - Anexo II -, fichas de aplicação dos revestimentos na Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes do LNEC (EENRevPa) - Anexo III -, o conjunto dos resultados dos ensaios preliminares sobre as argamassas com fibras - Anexo IV -, os resultados dos ensaios realizados com os aparelhos vazios, para controlo - Anexo V - e os resultados individuais dos ensaios com os aparelhos de retracção restringida - Anexo VI.

CAPÍTULO 2

INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS NO COMPORTAMENTO DOS REBOCOS

2.1 - Aspectos Fundamentais do Comportamento de Rebocos
2.2 - Rebocos Tradicionais
2.3 - Rebocos Não-Tradicionais
2.4 - Comentários Sobre a Normalização e a Documentação Normativa Sobre Rebocos
Bibliografia do Capítulo 2

2.1 - ASPECTOS FUNDAMENTAIS DO COMPORTAMENTO DE REBOCOS

2.1.1 - Regras de qualidade a verificar

Os rebocos têm como funções essenciais a **regularização** das imperfeições dos toscos das paredes, permitindo criar uma superfície uniforme, o **acabamento** dos paramentos e a **protecção** das alvenarias, formando uma barreira a acções externas potencialmente deteriorantes. No caso dos rebocos exteriores a função de protecção inclui, como um dos seus aspectos mais importantes, a **impermeabilização** das fachadas, ou seja prestar uma contribuição significativa para a estanquidade do conjunto tosco-revestimento [2.1 a 2.4]. De facto, estudos anteriores demonstraram o papel essencial do reboco na estanquidade de paredes de alvenaria de tijolo, tão características da nossa construção [2.5, 2.6].

Os revestimentos exteriores de paredes obtidos a partir de argamassas, para desempenharem adequadamente as funções que lhes são exigidas, devem satisfazer determinadas regras de qualidade, de que se destacam as relacionadas com os seguintes aspectos [2.1 a 2.4 e 2.7]: trabalhabilidade; resistência à fendilhação; capacidade de impermeabilização em zona não-fendilhada; permeabilidade ao vapor de água; aderência ao suporte; resistência aos choques; compatibilidade com o suporte; aspecto estético; durabilidade. No que se refere aos rebocos interiores, as regras de qualidade a satisfazer prendem-se com os mesmos aspectos - embora, por vezes, em graus diferentes e com importância relativa distinta -, se exceptuarmos a capacidade de impermeabilização em zona não-fendilhada, que deixa de se considerar significativa, excepto em casos especiais.

Nos itens seguintes procuram relacionar-se as regras de qualidade referidas com as características das argamassas.

2.1.2 - Trabalhabilidade

A argamassa de revestimento deve poder ser facilmente aplicada, de modo a obterem-se boas aderência e compacidade e bom rendimento, e deve poder ser trabalhada à superfície para que o aspecto final do reboco seja satisfatório. Esta característica da argamassa em pasta é mais importante do que pode parecer à primeira vista, já que muitos aspectos do

comportamento do reboco dependem de uma boa aplicação, que por sua vez só é possível se a argamassa tiver boa trabalhabilidade.

O aumento do teor de finos das areias usadas, o aumento do teor de ligante e o aumento da quantidade de água de amassadura são factores que permitem melhorar a trabalhabilidade, mas que têm consequências gravosas para outras características do reboco, como se referirá adiante. Assim, é preferível melhorar a trabalhabilidade através da mistura de cal ou da incorporação de adjuvantes apropriados (plastificantes e introdutores de ar).

2.1.3 - Resistência à fendilhação

Em grande parte, a resistência de um reboco à fendilhação é função, por um lado, da capacidade da argamassa para resistir às tensões de tracção nela induzidas pelo efeito da restrição da retracção - conferida, principalmente, pela aderência a um suporte relativamente rígido - e, por outro lado, da intensidade dessas tensões. Assim, a tendência para a fendilhação por retracção será tanto maior quanto mais elevada for a retracção e quanto maior for a relação módulo de elasticidade/resistência à tracção. Contudo, nas argamassas tradicionais estas características são interdependentes e o modo como se relacionam entre si é bastante complexo, o que dificulta a avaliação. Além disso, outros factores influenciam a susceptibilidade à fendilhação. Com efeito, uma boa aderência ao suporte - ao possibilitar uma distribuição de tensões mais eficiente - e um poder de retenção de água elevado - ao reduzir os riscos de dessecação prematura da argamassa - contribuem também para melhorar o comportamento à fendilhação.

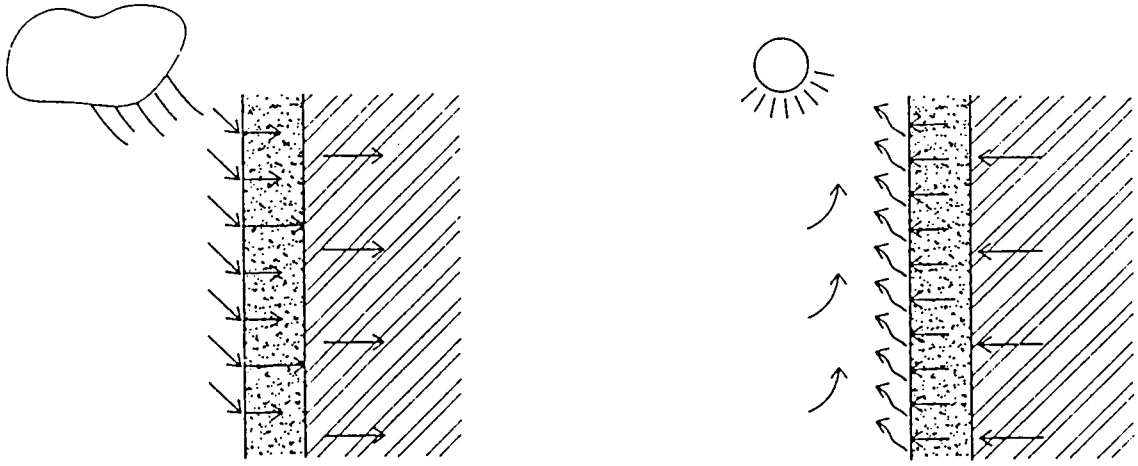
Existem, claro, outros factores, para além dos estritamente ligados às características da argamassa usada, que influenciam o comportamento à fendilhação do revestimento. Assim, o modo e as condições de aplicação, as características do suporte e os seus movimentos e deformações e, ainda, a cor e o grau de exposição aos agentes atmosféricos a que está sujeito o revestimento têm, naturalmente, uma grande importância no que diz respeito à ocorrência ou não de fendilhação no reboco.

Nos capítulos 3 e 4 serão abordados os vários mecanismos de fendilhação dos rebocos e as respectivas causas e efeitos, bem como os métodos que podem permitir o seu controlo. Aqui, limitar-nos-emos a acrescentar que, do conjunto de aspectos citados, acaba por ressaltar

que, nos rebocos tradicionais, uma retracção reduzida e um módulo de elasticidade baixo, em paralelo com uma boa aderência e uma retenção de água elevada, vão ser determinantes para o comportamento à fendilhação; de facto, sejam quais forem as causas e independentemente dos cuidados a tomar na aplicação e na preparação do suporte, é sempre preferível que as tensões induzidas por retracção sejam pouco importantes e que a capacidade de deformação do material permita dissipar as forças de tracção geradas por essa ou outras causas sem que se atinja a rotura.

2.1.4 - Capacidade de impermeabilização em zona não-fendilhada

A capacidade de impermeabilização do reboco é determinada, por um lado, pela capacidade de resistir à penetração até ao suporte da água proveniente do exterior e, por outro, pela capacidade de permitir a eliminação rápida por secagem da água em excesso, logo que surjam condições atmosféricas favoráveis (ver fig. 2.1).



a) b)

Fig. 2.1 - Humedecimento e secagem de um reboco poroso, de acordo com as condições climáticas
a) chuva: penetração da água b) sol: eliminação da água por evaporação

As argamassas, tal como, de um modo geral, os restantes constituintes das alvenarias, são materiais de porosidade aberta, onde a água pode penetrar principalmente por

permeabilidade ou por capilaridade, conforme a dimensão dos poros e dos capilares e a pressão da água [2.3, 2.5, 2.8].

A permeabilidade à água pode ser avaliada através de ensaios em que se determina a massa de água que penetra num provete do material sob a acção de uma pressão constante.

A capilaridade costuma ser quantificada através do *coeficiente de capilaridade*, característica do material dada pela massa de água absorvida por capilaridade num dado intervalo de tempo, por unidade de área da superfície do provete em contacto com a água, dividida pela diferença entre as raízes quadradas dos dois extremos do intervalo de tempo considerado : $C = (M_1-M_0)/[A.(\sqrt{t_1}-\sqrt{t_0})]$.

A capacidade de eliminação da água por secagem é, muitas vezes, avaliada através da *permeabilidade ao vapor de água* do material, ou seja, da massa de água que se difunde através do provete, por unidade de pressão estabelecida entre as duas faces, por unidade de tempo e por unidade de espessura do provete. De forma mais prática determina-se, por vezes, a *espessura da camada de ar de difusão equivalente* de uma camada do material em estudo com a espessura aplicada na prática (ou tão próxima dela quanto possível), ou seja, a espessura da camada de ar necessária para que a massa de água difundida através dela seja igual à difundida através da camada do material em estudo, no mesmo intervalo de tempo.

Aparentemente, uma permeabilidade e um coeficiente de capilaridade reduzidos e uma elevada permeabilidade ao vapor de água seriam, à partida, as características mais favoráveis para obter uma boa capacidade de impermeabilização em zona não-fendilhada. Mais uma vez, no entanto, nas argamassas tradicionais estas características são interdependentes, o que aumenta a complexidade da escolha do ponto de equilíbrio. De facto, principalmente no que se refere aos rebocos tradicionais, há uma tendência marcada para que a uma menor permeabilidade à água corresponda também uma menor permeabilidade ao vapor de água.

2.1.5 - Permeabilidade ao vapor de água

A água infiltrada através de fendas ou de zonas particulares, como remates, vãos, etc., a água absorvida pelo reboco e, ainda, a água que entra na execução das alvenarias e rebocos e não é necessária à hidratação, deve evaporar-se logo que as condições atmosféricas o

permitam. Uma elevada permeabilidade ao vapor de água - do reboco e, também, da eventual pintura sobre ele aplicada - é importante para que se verifique esta condição e é tanto mais importante quanto mais permeável à água for o revestimento.

Para além deste aspecto, que se considera relacionado, em última análise, com a capacidade de impermeabilização do revestimento, como se referiu em 2.1.4, a permeabilidade ao vapor de água influencia a higrometria interior. Com efeito, as actividades normais numa habitação, num local de trabalho, ou noutra construção ocupada por seres vivos provocam a libertação de vapor de água que, em determinadas condições termo-higrométricas dá origem a condensações, inicialmente nas superfícies mais frias e nos locais menos ventilados (vidros, caixas de estores, elementos de betão não revestido, interiores de roupeiros e paredes por detrás de armários, etc.) e atingindo depois, em condições particularmente desfavoráveis, as zonas correntes das paredes e tectos [2.9]. Estas condensações, que chegam a traduzir-se em escorrências que se confundem com infiltrações de água exterior, são desconfortáveis e insalubres e, se os acabamentos finais das paredes e tectos não contiverem agentes fungicidas, ou logo que estes deixem de ser eficazes, originam o aparecimento de fungos e bolores.

A prevenção destes fenómenos passa pelo isolamento térmico dos edifícios e pela correcção das pontes térmicas, pelo aquecimento do interior nos meses mais frios e pela ventilação adequada dos locais. No entanto, no tipo de construção habitual em Portugal, em que o isolamento térmico não é, tradicionalmente, muito forte e dado que o aquecimento nas épocas frias é escasso e intermitente, resulta que a eliminação para o exterior do vapor de água produzido é um factor importante para reduzir as condensações e a própria retenção da água no interior das alvenarias, com o consequente efeito de degradação progressiva. Os esquemas de ventilação natural através das aberturas da envolvente nem sempre são muito eficazes, já que, frequentemente, condicionantes arquitectónicas e urbanísticas limitam a verificação dos critérios mínimos exigíveis [2.10] e a ventilação forçada é, ainda, pouco comum. Assim, uma envolvente exterior permeável ao vapor de água surge como um factor significativo para o conforto termo-higrométrico na maioria dos edifícios de habitação e influencia também outros tipos de edifícios. Ou seja, no tipo de construção usual em Portugal, as alvenarias e, portanto, os toscos e os rebocos - quando for esta a composição da parede - devem, preferencialmente, ser permeáveis ao vapor de água.

As argamassas usadas em rebocos tradicionais são bastante permeáveis ao vapor de água. Com efeito, em ensaios realizados no LNEC sobre uma gama variada de argamassas com composições tradicionais de reboco [2.11 a 2.13] (ver Quadro 2.1 - coluna *espessura de ar de difusão equivalente* -, extraído da base de dados do DED/NCCt [2.14]), obtiveram-se valores que permitem, em termos médios, assimilar a difusão de vapor de água de uma camada de 1 cm de reboco à de uma camada de cerca de 10 cm de ar. As tintas de areia usadas vulgarmente no exterior têm permeabilidades que, para as espessuras de aplicação usuais, se traduzem em difusões equivalentes a camadas de ar com espessuras que oscilam entre 10 e 45 cm, conforme a sua composição (segundo dados obtidos no Núcleo de Química do LNEC), enquanto os revestimentos de impermeabilização de ligante sintético podem atingir 2 ou mesmo 3 m, também para as espessuras recomendadas [1].

Assim, nos revestimentos constituídos por reboco tradicional pintado, a tinta usada pode ser condicionante.

Por outro lado, o traço usado, o tipo de ligante (por exemplo cimento, cal aérea, cal hidráulica ou conjugações de dois destes ligantes), a areia utilizada, o tipo de cura, e vários outros factores influenciam também a permeabilidade ao vapor de água. Dos ensaios realizados parece poder concluir-se que as argamassas com alto teor de cimento e as argamassas com areia muito argilosa (areia *vermelha*) podem ser, de facto, significativamente menos permeáveis ao vapor de água. No entanto, verifica-se também que os ensaios adoptados são pouco sensíveis nesta gama de variação da permeabilidade ao vapor de água.

Os rebocos não-tradicionais do tipo monocamada apresentam também, de uma forma geral, permeabilidades ao vapor de água relativamente elevadas (da ordem de 1000 ng/m.s.Pa, correspondentes, para espessuras de 1 cm, a espessuras de camada de ar de difusão equivalente da ordem de 20 cm), e já que não necessitam de pintura e são, geralmente, aplicados em camada menos espessa, podem acabar por ser vantajosos deste ponto de vista. No entanto é conveniente verificar esta característica, pois determinadas composições podem originar permeabilidades ao vapor de água mais reduzidas.

Os revestimentos constituídos por argamassas aditivadas com resinas podem ser muito menos permeáveis ao vapor de água, tornando-se importante controlar esta característica.

---

[1] - Note-se que 2 m é o valor máximo que se considera admissível para um revestimento desse tipo [2.15]; no entanto há produtos no mercado com valores superiores.

Quadro 2.1 - Permeabilidade ao vapor de água e coeficiente de capilaridade de rebocos (valores obtidos em estudos realizados no LNEC)

Nome de código	Classificação	Composição	Traço - Tipo	Idade (dias)	Capilaridade ($g/dm^2.min^{1/2}$)	Capilaridade ($kg/m^2.h^{0.5}$)	Espessura da camada de ar de difusão equivalente a 1 cm de reboco (m)
A1	trad	ci:ar r	1:4	28	19,4	15,0	0,07
A2	trad	ci:ar c+r	1:4	28	12,5	9,7	-
A3	trad	ci:ar c	1:4	28	5,4	4,2	-
AP	trad	ci:ar r	1.3	28	3,9	3,0	0,17
BP	trad	ci:ar r	1:3	28	7	5,4	0,10
B1	trad	ci:ch:ar r	1:1:8	28	19,7	15,3	-
B2	trad	ci:ch:ar c+r	1:1:8	28	15,4	11,9	0,10
B3	trad	ci:ch:ar c	1:1:8	28	6,6	5,1	0,15
C1	trad	ch:ar r	1:4	28	18,7	14,5	-
C2	trad	ch:ar c+r	1:4	28	13,3	10,3	0,09
C3	trad	ch:ar c	1:4	28	9,4	7,3	-
RB	trad	ci:ca:ar r	1:1:5	28	19,3	15,0	-
CP	trad	ci:ca:ar r	1:1:6	28	6	4,7	0,09
D1	trad	ci:ca:ar r	1:1:6	28	18,3	14,2	0,10
DP	trad	ci:ca:ar r	1:1:6	28	12,8	9,9	0,11
FSBI	trad	ci:ca:ar c+r	1:1:6	28	12,6	9,8	-
FSBII	trad	ci:ca:ar c+r	1:1:6	28	12,7	9,8	-
FSBIV	trad	ci:ca:ar c+r	1:1:6	28	15,8	12,2	-
E1	trad	ci:ca:ar r	1:2:9	28	19,1	14,8	0,09
E2	trad	ci:ca:ar c+r	1:2:9	28	16,1	12,5	0,11
F1	trad	ci:ca:ar r	1:3:12	28	20	15,5	0,10
G1	trad	ci:ca:ar r	1:2:16	28	22,7	17,6	-
G2	trad	ci:ca:ar c+r	1:2:16	28	16,5	12,8	-
G3	trad	ci:ca:ar c	1:2:16	28	23	17,8	-
RA	trad	ci:ar r +IA	1:5+IA	28	8,3	6,4	-
RC	trad	ch:ar r +cvol	1:5 + 40% cvol	28	13,8	10,7	-
RD	trad	ci:ar r +IA	1:5+IA	28	7,1	5,5	-
RE	trad	ci:ar r +IA	1:5+IA	28	4,8	3,7	-
Misto1	não-trad	-	misto	28	0,4	0,3	0,21
Monoc1	não-trad	-	monocamada	28	2,3	1,8	0,12
Pré-dos-bra1	não-trad	-	pré-doseado	28	4,3	3,3	-
Pré-dos-ext1	não-trad	-	pré-doseado	28	2,9	2,2	-
Pré-dos-ext1	não-trad		pré-doseado	28	4,2	3,3	-

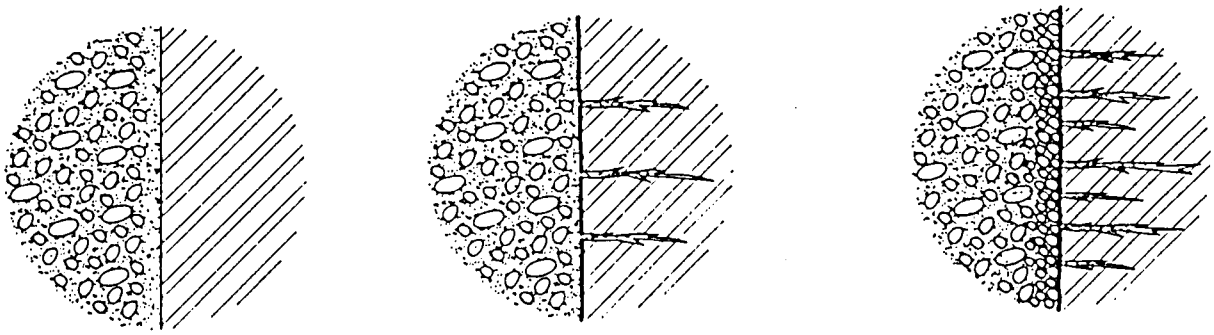
ci - cimento; ca - cal aérea; ch - cal hidráulica; ar - areia; ar r - areia do rio; Tejo; ar c+r - areia de Corroios e do rio Tejo (50% de cada); ar c - areia de Corroios; IA - introdutor de ar; trad - tradicional.

2.1.6 - Aderência ao suporte

Uma boa aderência ao suporte é fundamental para o cumprimento das funções de impermeabilização do revestimento e é condicionante para a sua durabilidade. Além disso influencia bastante a resistência à fendilhação, na medida em que condiciona a distribuição de tensões - geradas por movimentos diferenciais em relação ao suporte - na argamassa.

Esta característica é normalmente avaliada através de ensaios de arrancamento e quantificada pela tensão de aderência obtida nesses ensaios.

Nas argamassas tradicionais não-adjuvadas, a aderência processa-se por penetração capilar da água de amassadura nos poros do suporte, arrastando consigo os elementos mais finos da argamassa. Assim, para que a ligação seja boa, é necessário que as partículas finas formem com a água uma pasta capaz de penetrar facilmente na alvenaria, endurecendo em seguida rapidamente [2.3] (ver fig. 2.2). Portanto, a aderência aumenta com o teor de cimento e com a sua finura e é também maior para areias mais argilosas. Como se sabe, estes factores afectam as forças induzidas na argamassa, pelo que é difícil encontrar o justo ponto de equilíbrio. De uma forma ou outra é difícil ultrapassar valores de resistência ao arrancamento da ordem de 0,3 MPa, em aplicações sobre alvenaria de tijolo, obtendo-se frequentemente, para argamassas fracas, valores que apenas atingem 0,1 MPa (ver capítulo 3, quadro 3.2, extraído da base de dados do DED/NCCt [2.14]).



a) b) c)

Fig. 2.2 - Mecanismo de aderência mecânica de um reboco

a) suporte com coeficiente de absorção muito baixo: a aderência mecânica é quase nula; b) suporte com coeficiente de absorção médio: uma parte da leitança penetra nos poros e cristaliza aí; c) suporte com coeficiente de absorção muito alto: *bomba* grande parte da leitança e *desseca* a película de argamassa junto ao suporte, que fica *queimada* (sem água suficiente para a sua hidratação).

Nos revestimentos não-tradicionais é possível agir, através da introdução de adjuvantes, sobre a retenção de água da argamassa, a sua plasticidade e a sua adesividade, obtendo-se com alguma facilidade melhores aderências sem prejudicar as restantes características. Todavia, existem também adjuvantes que podem reduzir a aderência, como os introdutores de ar e os hidrófugos. Estes tipos de adjuvantes podem ser muito úteis - para actuar, no 1º caso, sobre a capilaridade, o módulo de elasticidade, e a resistência aos sais e ao gelo e no 2º sobre a resistência à penetração da água -, mas é necessário ter cuidado com os produtos empregues e com as dosagens respectivas que são, em geral, muito sensíveis. Nos produtos pré-doseados estes problemas estão, em princípio, resolvidos à partida.

Os revestimentos aditivados com resinas, devido à sua maior plasticidade e à adesividade conferida pelas resinas - que possibilita um mecanismo de aderência químico, por *colagem*, adicional à aderência mecânica já referida -, podem ter desempenhos muito superiores no que diz respeito à aderência, permitindo, por vezes, a aplicação sobre suportes particularmente difíceis, por muito lisos ou pouco absorventes. É o caso do betão moldado com cofragens metálicas ou dos paramentos revestidos de azulejos que se pretenda reabilitar por aplicação de reboco.

Como se referiu de passagem, a aderência ao suporte não depende exclusivamente da argamassa, mas também da natureza do suporte e da sua preparação. Assim, os suportes um pouco rugosos, por permitirem maior grau de *ligação mecânica*, são melhores que os lisos. Demasiada capacidade de absorção pode ser desfavorável por tender a dessecar rapidamente o revestimento, impedindo a hidratação dos seus constituintes e favorecendo a formação de uma interface pulverulenta. Do mesmo modo, uma absorção demasiado baixa pode impedir o mecanismo de penetração da aguada de cimento nos poros através do qual se processa, em larga medida, a aderência, no caso dos produtos sem adjuvantes *adesivos*. Muitas vezes é possível actuar sobre o suporte, melhorando as condições de aderência, por meios mecânicos - por exemplo picando-o para aumentar a rugosidade -, ou através da aplicação de primários. O simples humedecimento prévio (pulverização com água cerca de 24 h antes da aplicação) pode melhorar a aderência, evitando a absorção muito rápida da água da argamassa. Noutros casos, é preferível escolher um revestimento *melhorado*, que supere as dificuldades de aderência.

Para além de garantir a aderência no momento da aplicação é também importante garanti-la a longo prazo, sendo este um aspecto importante da durabilidade. Assim,

movimentos diferenciais entre o revestimento e o suporte - devidos, por exemplo, à retracção do reboco, à contracção do suporte por retracção hidráulica, à fluência do betão (no caso de paredes resistentes) ou à flecha originada por cargas transmitidas à parede -, pode dar origem a *descolamento* do revestimento. Nomeadamente, se o módulo de elasticidade do revestimento for muito superior ao módulo de elasticidade do suporte, o revestimento suportará as tensões de compressão mais fortes e, dada a sua pouca espessura, estará sujeito a fenómenos de encurvadura que originarão *descolamentos* localizados ou generalizados [2.3, 2.4] (ver fig. 2.3).

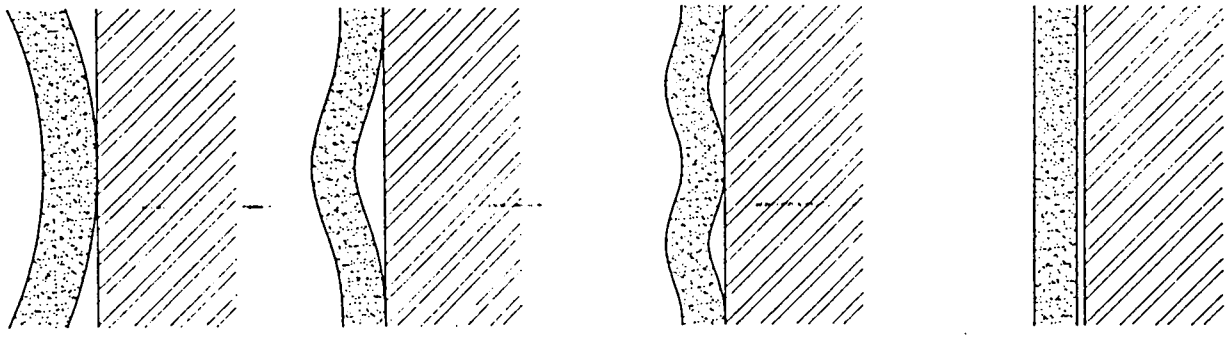


Fig. 2.3 - Perda de aderência de um reboco devido a movimentos diferenciais em relação ao suporte
a) retracção do reboco com aderência inferior à resistência à tracção; b) e c) dilatação do reboco ou retracção ou fluência do suporte (camada fina); d) dilatação do reboco ou retracção ou fluência do suporte (camada espessa e rígida).

2.1.7 - Resistência aos choques

A resistência aos choques pode ter alguma importância nos revestimentos de paredes, embora, de um modo geral, os revestimentos de ligantes minerais assegurem à partida resistências razoáveis, pelo menos quando aplicados sobre suportes tradicionais (alvenaria de tijolo, de blocos de betão de inertes correntes, de pedra, ou betão moldado). Os problemas só começam a pôr-se quando se trata de revestimentos aplicados com espessura reduzida, geralmente de ligante misto, ou de ligante hidráulico mas fortemente adjuvados, aplicados sobre suportes com pouca resistência aos choques, como os suportes isolantes (placas de poliestireno expandido moldado ou de lã mineral, ou, menos frequentemente, de outros materiais isolantes). Nesses casos o problema é geralmente resolvido com a aplicação de reforços de rede metálica, de fibra de vidro ou de um material sintético (poliéster,

polipropileno) ou ainda, mais raramente, com fibras dispersas na massa (ver capítulo 5). Estas soluções podem também usar-se quando, por qualquer razão relacionada com a utilização do edifício ou do espaço envolvente, é conveniente garantir resistências ao choque superiores às habituais, em toda a área ou em zonas delimitadas, mais sujeitas aos choques.

A resistência aos choques, quando há razão para admitir que possa ser insuficiente, pode ser avaliada através de ensaios de choque de corpo duro com determinadas energias e de ensaios de punçoamento dinâmico seguidos da observação das degradações provocadas no reboco aplicado sobre o suporte previsto.

2.1.8 - Compatibilidade com o suporte

A argamassa de revestimento deve poder ser aplicada em espessura suficiente para dissimular os defeitos da alvenaria de suporte e corrigir as suas irregularidades normais (compatibilidade geométrica). Deve aderir bem ao suporte, ter coeficiente de condutibilidade térmica idêntico ao do material de suporte e permitir que as trocas de humidade entre a alvenaria e o ar exterior se efectuem normalmente, e, portanto, necessita ter uma permeabilidade ao vapor de água suficiente (compatibilidade física). Deve ter características mecânicas bem adaptadas ao suporte: em particular, quando o revestimento é aplicado sobre um suporte de baixa resistência mecânica, não deve ser ele próprio muito *forte* nem muito rígido, para não transmitir tensões elevadas que possam deteriorar o suporte (compatibilidade mecânica). É também importante que haja boa compatibilidade química, ou seja que o revestimento tenha capacidade para resistir ao ataque dos sais eventualmente existentes no suporte (por exemplo sulfatos) e que, por outro lado, o reboco não contenha sais que, ao serem dissolvidos pela água (das chuvas, de condensações interiores, ou de outras proveniências) e transportados para o interior das alvenarias por capilaridade, tenham reacções nocivas com os materiais constituintes das alvenarias, contribuindo para a sua degradação química.

2.1.9 - Aspecto estético

O aspecto estético do revestimento exterior de paredes condiciona fortemente a aparência global de um edifício, portanto esta questão não pode ser, de forma nenhuma, negligenciada, tanto mais que é hoje generalizadamente aceite o papel significativo da estética na qualidade de vida das populações. O surgimento de fendilhação generalizada, ainda que muito fina, ou de fendas localizadas mas com expressão acentuada, é muito penalizador do ponto de vista estético, mesmo que sejam resolvidas as deficiências de estanquidade que advêm da fendilhação. Aliás, segundo alguns autores [2.16], a degradação do património construído faz hoje parte do conceito de *poluição urbana*, devido ao seu profundo *impacte* no ambiente urbano.

A fendilhação fina pode ser dissimulada *à posteriori* com recurso a um revestimento *curativo* de ligante sintético, eventualmente armado com uma rede adequada. No entanto, esta solução não está isenta de inconvenientes, entre os quais se conta a já referida redução da permeabilidade ao vapor de água da envolvente e o considerável acréscimo de custo do revestimento, quer em termos de material, quer, talvez principalmente, em termos de mão-de-obra e tempo de execução de obra. É também conveniente lembrar que o tempo de vida de um revestimento de ligante sintético é sempre inferior ao de um revestimento de ligante mineral, estimando-se normalmente durabilidades da ordem de 10 anos para os primeiros e da ordem de 50 anos ou mais para os segundos. Portanto, a renovação do aspecto conseguida com soluções desse tipo é sempre relativamente efémera e é preferível tomar medidas para evitar a fendilhação significativa do reboco.

As eflorescências, originando manchas esbranquiçadas nos paramentos, tanto mais visíveis quanto mais escura for a cor adoptada no acabamento, são também muito desagradáveis à vista (ver capítulo 3, fig. 3.8).

O efeito inestético dos *fantasmas*, que aparecem frequentemente quando o revestimento é aplicado numa única camada relativamente fina e a preparação do suporte não é suficiente para homogeneizar a absorção (por exemplo entre as juntas e os tijolos ou blocos), justifica também alguns cuidados para evitar estas manifestações (ver fig. 2.4). De facto, nem sempre a pintura consegue disfarçar as manchas e, no caso de revestimentos do tipo monocamada ou outros pigmentados na massa, nem existe esse recurso e é quase impossível anular o problema sem custos muito elevados.

Os efeitos da poluição atmosférica, com a consequente acumulação de sujidade na fachada, pode contribuir muito para o mau aspecto dos revestimentos, se não houver o cuidado de minimizar os seus efeitos. Assim, um revestimento muito liso numa fachada em que não seja favorecida a auto-lavagem pode adquirir um aspecto muito inestético devido aos escorrimentos de água da chuva, já que a água tende a arrastar a sujidade, formando manchas localizadas no *caminho*, tanto mais notórias quanto mais claro for o acabamento final (ver fig. 2.5). Um revestimento rugoso, ao distribuir mais a água de escorrimento pode evitar este desagradável efeito. Pormenores de projecto adequados, que minimizem o escorrimento da água pelas paredes, podem também evitar o aparecimento de manchas muito pronunciadas [2.17] (ver fig. 2.6).



Fig. 2.4 - Paramento rebocado e pintado com fantasmas.



Fig. 2.5 - Efeito inestético dos escorrimentos de água da chuva e da poluição atmosférica em edifício de um bairro social de Lisboa.

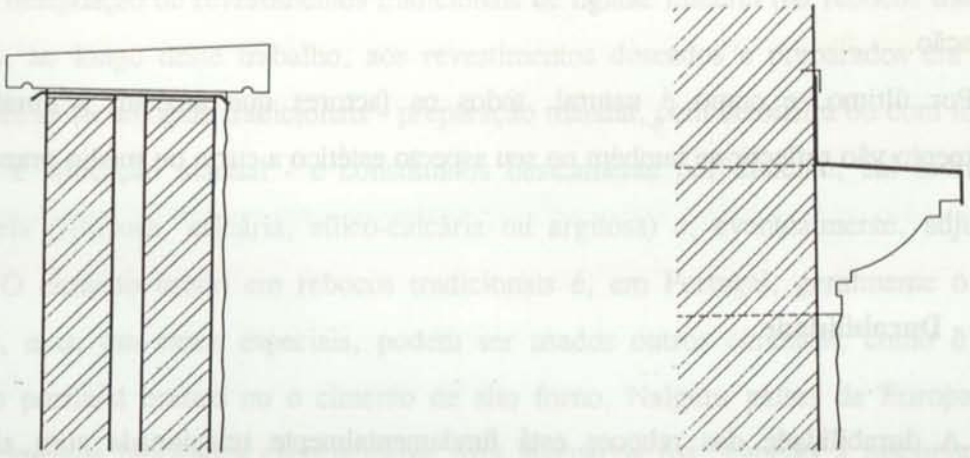


Fig. 2.6 - Elementos arquitectónicos para minimizar o escorrimento da água pelas paredes
a) capeamento de platibanda; b) pormenor de cornija e corte de escorrimento

Os revestimentos pigmentados na massa, entre os quais se contam os do tipo monocamada, apresentam ainda problemas adicionais, resultantes de variações na cor, juntas visíveis, manchas de sujidade, etc., originadas por variações na pressão da máquina de projectar ou na quantidade de água de amassadura, interrupções mal planeadas, sequência de trabalhos incorrecta ou falta de cuidado na preparação dos trabalhos.

A regularidade e planeza do revestimento e o seu acabamento final também devem merecer cuidados especiais e um escrupuloso respeito pelas regras da boa arte, já que podem ter grande impacte no aspecto geral do edifício. A rugosidade, a textura e o tipo de acabamento devem harmonizar-se com a idade e estilo do edifício e com o conjunto urbanístico em que este se insere. Assim, um revestimento fortemente adjuvado com resina (do tipo de ligante misto) e com areia fina, pode ter uma textura muito lisa, que não se compatibilize com uma urbanização envolvente com revestimentos exteriores constituídos por rebocos tradicionais, mas pode ser ideal para um edifício de escritórios, numa zona nova, conjugado, eventualmente, com revestimentos de outro tipo - pedra, revestimentos descontínuos não-aderentes ("bardages") metálicos, vidro, etc. -. Os revestimentos do tipo monocamada, geralmente importados de França ou Espanha, ou pelo menos importada a sua tecnologia, têm normalmente acabamentos muito rugosos, que podem também, em muitos casos, *chocar* com a arquitectura pensada para o edifício. Portanto, a preparação de produtos pré-doseados nacionais (monocamada ou não), em que os acabamentos finais possíveis sejam adaptados ao gosto e arquitectura nacionais, ou mesmo regionais, pode, na nossa opinião, ter sentido para além das considerações meramente económicas (e de curto prazo) com que frequentemente são avaliadas as hipóteses de desenvolvimento de tecnologias contra a sua importação.

Por último, e como é natural, todos os factores que afectam a durabilidade do revestimento vão reflectir-se também no seu aspecto estético a curto ou médio prazo.

2.1.10 - Durabilidade

A durabilidade dos rebocos está fundamentalmente relacionada com algumas das anomalias que os podem afectar, como sejam: a fendilhação; a penetração de água por capilaridade; as perdas de aderência, ainda que localizadas; o *esfarelamento* provocado por

dessecação prematura; o *corte* do suporte; o ataque de sais, nomeadamente sulfatos, existentes nos materiais que constituem as alvenarias, no ar ou na água (ver capítulo 3 - 3.2.2).

2.1.11 - Métodos de ensaio para a determinação das características referidas

Existem Projectos de Normas Europeias em fase adiantada de preparação que estabelecem métodos de ensaio para a determinação da maior parte das características referidas nos ítens anteriores [2.125N, 2.128N, 2.130N a 2.138N, 2,140N e 2.141N].

Conhecem-se também Normas estrangeiras, de diversos países, que estabelecem metodologias de ensaio [2.18, 2.84N, 2.104N a 2.106N] para as referidas determinações.

Os métodos de ensaio usados actualmente Portugal, no LNEC, para a determinação destas características encontram-se descritos num relatório [2.19] e em Fichas de Ensaio do LNEC [2.20] (ver Anexo I) e baseiam-se em normalização nacional, estrangeira e internacional em vigor.

2.2 - REBOCOS TRADICIONAIS

2.2.1 - Constituição

A designação de revestimentos tradicionais de ligante mineral (ou rebocos tradicionais) será dada, ao longo deste trabalho, aos revestimentos doseados e preparados em obra, de acordo com as tecnologias tradicionais - preparação manual, com betoneira ou com misturador mecânico e aplicação manual - e constituídos basicamente por cimento, cal hidráulica ou aérea, areia (siliciosa, calcária, sílico-calcária ou argilosa) e, eventualmente, adjuvantes e aditivos. O cimento usado em rebocos tradicionais é, em Portugal, geralmente o portland composto, mas, em casos especiais, podem ser usados outros cimentos, como o portland normal, o portland branco ou o cimento de alto forno. Nalguns países da Europa usam-se também cimentos fabricados especialmente para alvenarias (os "ciments à maçonner" ou os "masonry cements", franceses e ingleses respectivamente, que podemos designar por *cimentos*

de alvenaria), e, quando necessário, cimentos com composição estudada para melhorar a sua resistência à acção dos sulfatos (*cimentos resistentes aos sulfatos*).

As cais são por vezes usadas como ligantes, geralmente em complemento do cimento. Em Portugal são produzidas duas cais hidráulicas naturais, bastante usadas em rebocos interiores e menos em revestimentos exteriores, e nenhuma artificial. Existe fabrico industrial e artesanal de diversas cais aéreas, que são comercializadas para rebocos sob as seguintes formas: cal aérea hidratada em pó, cal aérea hidratada em pasta e cal aérea viva. Actualmente as cais aéreas têm um uso restrito em rebocos, embora, em nossa opinião, confiram características bastante favoráveis às argamassas de revestimento de paredes, desde que sejam de boa qualidade.

Os inertes usados em rebocos tradicionais no nosso país são geralmente areias naturais, extraídas do leito dos rios, ou de areeiros, de natureza siliciosa, calcária ou argilosa, com granulometrias muito variáveis, entre algumas dezenas de micrómetros e cerca de 5mm.

Os rebocos tradicionais são ainda, de longe, os revestimentos de paredes mais usados em Portugal em fachadas de edifícios de habitação e possivelmente também, embora de forma menos destacada, em edifícios de escritórios, edifícios comerciais e hotéis. De facto, quase só os edifícios de luxo recorrem a outros revestimentos, considerados *mais nobres*, como alguns revestimentos descontínuos não-aderentes sem e com isolamento incorporado ("bardages" e "vêtures"), os revestimentos de pedra, as fachadas-cortina de vidro ou os revestimentos de isolamento térmico pelo exterior; e quase só os edifícios fabris adoptam revestimentos considerados *menos nobres*, como os revestimentos descontínuos não-aderentes de fibrocimento ou de plástico, ou a pintura directa sobre a alvenaria. Por outro lado, os substitutos directos dos rebocos tradicionais, ou seja os produtos pré-doseados de ligante mineral ou misto, ocupam, por enquanto, uma parte diminuta do mercado, ao contrário do que sucede, já, noutros países da Europa.

Os rebocos tradicionais estão, como se referiu no ítem precedente, sujeitos a diversos tipos de disfunções. É difícil dosear uma argamassa de reboco de forma a que o revestimento resultante seja, em simultâneo, pouco susceptível à fendilhação, pouco permeável à água, bastante permeável ao vapor de água, bem aderente ao suporte...Esta dificuldade é ultrapassada, tradicionalmente, através da aplicação de várias camadas de reboco, com funções complementares [2.1 a 2.3].

Assim, o crespido (ou salpico, ou salpisco ou chapisco), destina-se a proporcionar boa aderência ao suporte, conferindo-lhe, por um lado, uma rugosidade que facilita a ligação mecânica, e por outro lado, favorecendo a homogeneização da absorção do suporte. Para cumprir esses objectivos a argamassa que o constitui deve ser muito rica em cimento, muito fluida, com alto teor de cargas grossas e aplicada de forma descontínua e rugosa.

As camadas de regularização ou de base têm como função assegurar a regularização do paramento e prestar o contributo mais significativo para a impermeabilização da parede. A espessura de cada camada não deve ultrapassar 20 mm, pelo que pode ser necessário aplicar mais que uma camada para garantir a conveniente regularização[2]. Estas camadas devem fendilhar pouco, ter uma boa capacidade de impermeabilização e uma boa capacidade de regularização, devendo, portanto, ser constituídas por uma argamassa pouco rica em cimento, compacta e com areia com teor significativo de grãos grossos. Se houver mais que uma camada, cada uma deve ter menor teor de cimento do que a que a antecede (*regra da degressividade do teor de cimento*), para que as tensões transmitidas durante a retracção não tendam a fendilhar a camada inferior e seja cada vez menor a susceptibilidade à fendilhação. Cada camada deve ser bem apertada durante a aplicação para melhorar a sua compacidade.

Por último, a camada de acabamento destina-se a proteger as camadas subjacentes e a conferir um acabamento adequado ao reboco, por ser a que fica directamente exposta. Assim, é importante que não fendilhe e a areia que a constitui deve ser crivada de forma a que a dimensão dos grãos corresponda ao acabamento pretendido. A argamassa que constitui esta camada deve ser mais *fraca* (menos rica em cimento) que a última camada de base, para respeitar a *regra da degressividade do teor de cimento* e assim melhorar o comportamento à fendilhação - que deve ser inexistente, ou pelo menos invisível - e ainda, facilitar a evaporação da água da chuva absorvida (ver fig. 2.7) [2.4].

Entre as várias camadas deve haver tempos de espera suficientes para que se possa processar a secagem e dar a maior parte da retracção. Só assim as camadas funcionarão plenamente e a respectiva retracção poderá ser relativamente independente. Deste modo, as fendas que se formarem apenas interessarão uma camada e não toda a espessura do revestimento.

---

[2] - Alguns autores consideram que deve haver sempre pelo menos duas camadas de base e designam-nas, respectivamente, por emboço e reboco [2.28]; no entanto sendo hoje, como já se referiu, habitual usar a designação *reboco* para o conjunto do revestimento, esta terminologia resulta pouco clara pelo que não a adoptaremos.

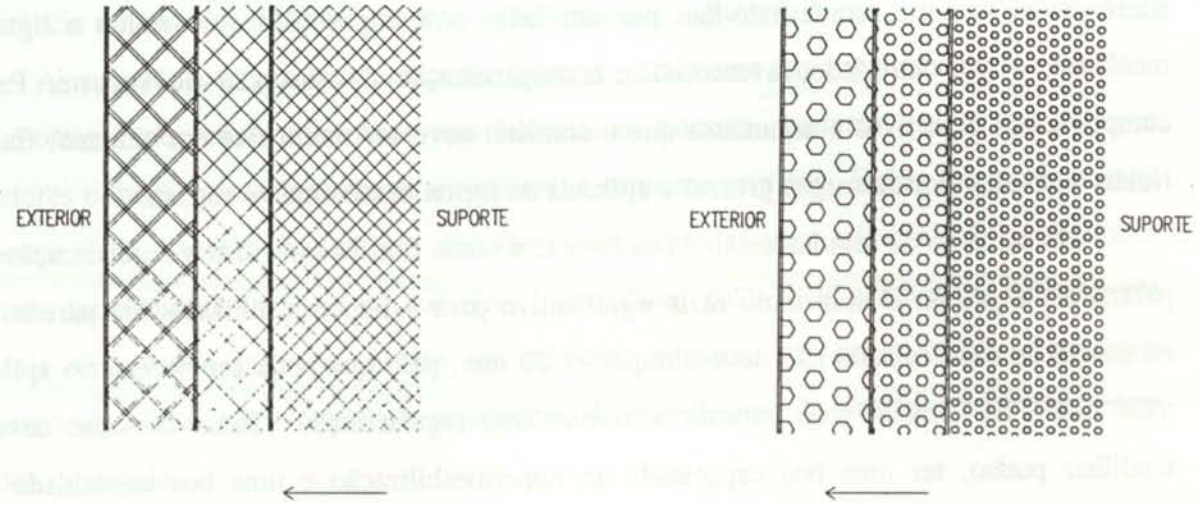


Fig. 2.7 - Características das camadas sucessivas de um reboco correctamente doseado

As vantagens inerentes a este procedimento são a menor largura das fendas e a pequena probabilidade de, em cada camada, elas se formarem em correspondência com a camada anterior. Como consequência, não só as fendas serão menos visíveis, mas também a capacidade de impermeabilização será menos afectada, já que os caminhos preferenciais de infiltração serão interrompidos (ver fig. 2.8).

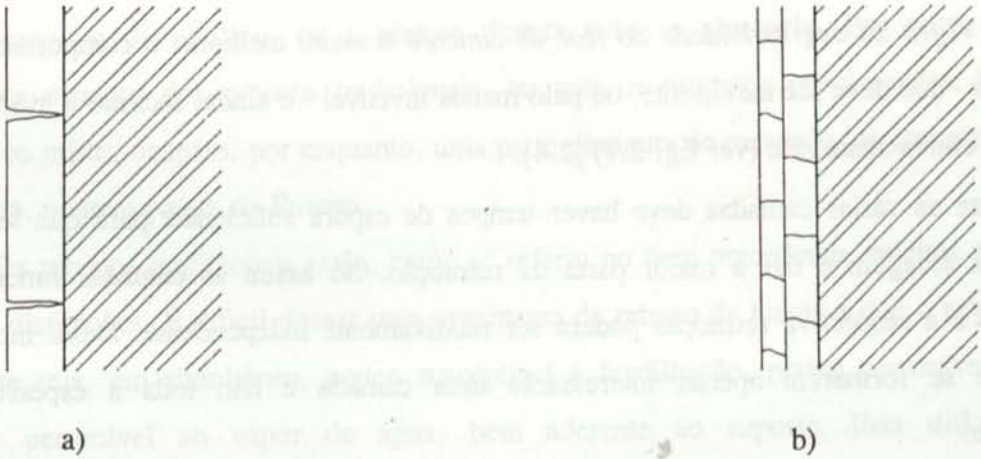


Fig. 2.8 - Fendilhação de um reboco

a) uma única camada espessa: fendas afastadas, de grande largura e profundidade; b) duas camadas de menor espessura: fendas mais próximas, finas e desencontradas.

2.2.2 - Adjuvantes e aditivos

Mesmo nos rebocos tradicionais preparados e doseados em obra, o uso de adjuvantes e aditivos pode melhorar, de forma significativa, algumas características dos revestimentos; no entanto, a experiência e o consequente domínio do seu uso no nosso País são relativamente baixos, se exceptuarmos os hidrófugos, com os quais se procura, muitas vezes sem sucesso, resolver os frequentes problemas de infiltrações de água do exterior. Assim, não se recomenda o uso de adjuvantes ou aditivos sem a realização de ensaios prévios - sobre a própria argamassa -, que possam fundamentar a sua adequabilidade.

De entre os adjuvantes considerados úteis para as argamassas de revestimento destacam-se os seguintes:

- Promotores de aderência [2.17, 2.21]

Geralmente constituídos por resinas, das quais as mais usadas são de acetato de polivinilo, polímeros acrílicos, de estireno-butadieno ou de látex, destinam-se a melhorar a aderência sem aumentar o teor de cimento. Geralmente, aumentam também a resistência à tracção simples e à tracção por flexão por melhorarem a ligação entre os grãos e contribuem para a redução do módulo de elasticidade.

Para além destes produtos, que se adicionam à argamassa no momento da sua preparação, geralmente diluídos na água de amassadura, existem também produtos promotores de aderência aplicáveis na superfície do suporte.

Alguns destes adjuvantes (de qualquer dos grupos referidos) perdem eficácia quando se verificam reumidificações posteriores do reboco.

- Hidrófugos de massa [2.4, 2.21, 2.22]

São geralmente constituídos por finas partículas insolúveis, em regra sais metálicos de ácidos orgânicos em emulsão (estearatos de cálcio, zinco, aluminio ou magnésio), a que se adicionam outros produtos tensoactivos. A sua dosagem nas argamassas de reboco não deve exceder os 2% da massa do cimento. Destinam-se a obturar os capilares e a impedir, pelo

menos parcialmente, a penetração de água ou a circulação de água no revestimento, por redução da tensão capilar no interior da argamassa.

Assim, estes adjuvantes reduzem a capilaridade da argamassa, melhorando a sua capacidade de impermeabilização. Quando existe fendilhação não têm, contudo, grande efeito. Podem limitar a aderência entre camadas e ao próprio suporte e influenciar negativamente a aderência das tintas e o seu efeito tem, nalguns casos, uma durabilidade limitada.

- Introdutores de ar [2.3, 2.21 a 2.24]

Provocam a formação na argamassa, durante a amassadura, de pequenas bolhas de ar fechadas, estáveis, de forma aproximadamente esférica e com diâmetros da ordem de 10 μm a 1 mm. Estas bolhas funcionam como um corte de capilaridade, melhorando a capacidade de impermeabilização do revestimento, a sua resistência ao gelo-degelo e a sua resistência aos sais, nomeadamente aos sulfatos. As bolhas de ar, relativamente compressíveis, permitem compensar o aumento de volume por congelação da água, efeito este que também contribui para melhorar a resistência ao gelo (ver fig. 2.9).

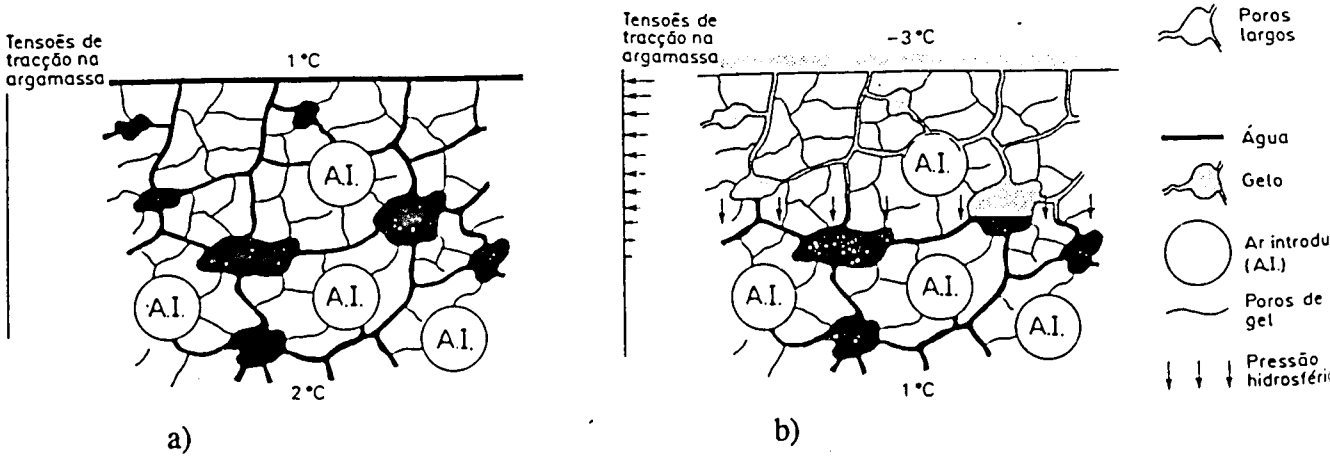


Fig. 2.9 - Esquema do avanço do gelo numa camada de reboco adjuvado com um introdutor de ar: quando a água gela nos poros e capilares de maiores dimensões, as bolhas de ar aliviam a pressão local.
a) temperatura exterior positiva: não há formação de gelo; b) temperatura exterior negativa: avanço da frente de gelo.

Tornam a argamassa mais homogénea e trabalhável e minimizam a exsudação, o que permite reduzir o teor de água de amassadura com vantagens para a resistência à fendilhação.

Reduzem a massa volúmica e o módulo de elasticidade, o que também contribui para melhorar o comportamento à fendilhação, embora tendam também a reduzir a resistência à tracção e à compressão. Por outro lado, podem afectar negativamente a aderência e exigem uma amassadura bem controlada, já que o seu efeito depende muito do modo, do tempo e da velocidade de amassadura. A dosagem é também uma operação delicada, porque o seu efeito varia com diversos factores, tais como a finura do cimento, o seu teor de álcalis, a natureza e granulometria dos inertes, etc., sendo assim difícil fixar as quantidades a usar em cada caso. O princípio de actuação destes adjuvantes baseia-se na formação de uma barreira insolúvel de iões (aniões, no caso dos produtos considerados actualmente mais eficientes) em torno das bolhas de ar formadas durante a amassadura, que impede a solução das bolhas pequenas e o crescimento das bolhas grandes e mantendo, assim, as bolhas com diâmetros pequenos, espaçamentos baixos e formas regulares e estáveis que conferem as características vantajosas referidas.

Os produtos mais usados para este fim são sais alcalinos solúveis em água (geralmente de sódio) de compostos orgânicos (resinas da madeira, ácido linhossulfonado, hidrocarbonetos sulfonados, ácidos gordos).

Estes adjuvantes são correntemente usados nos rebocos monocamada e são recomendados para rebocos tradicionais nalguns países, como por exemplo no Reino Unido.

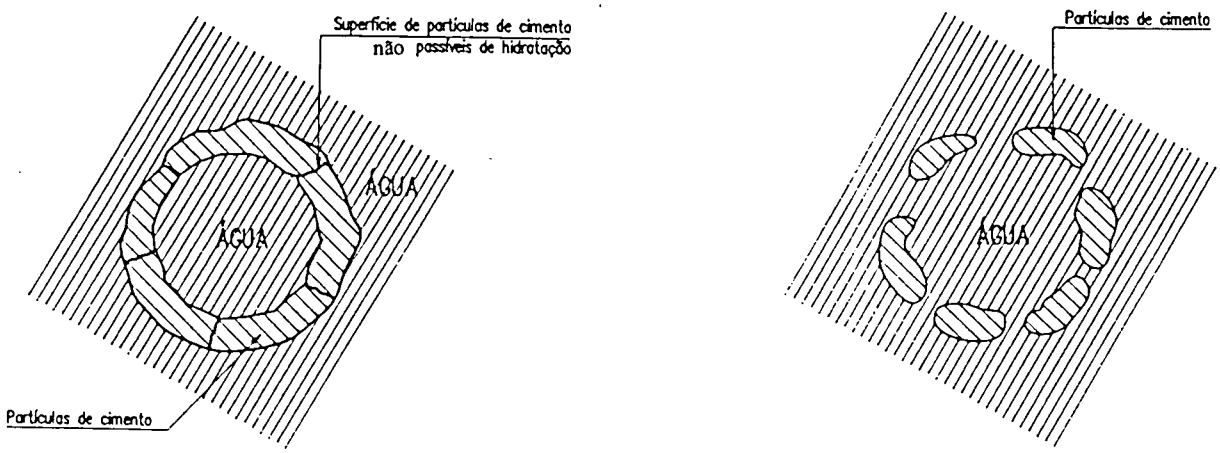
- Plastificantes [2.21 a 2.24]

Aumentam a trabalhabilidade da argamassa e diminuem a segregação, permitindo reduzir o teor de água de amassadura, e, eventualmente o teor de ligante, o que resulta numa menor retracção. São produtos pulverulentos extremamente finos, por exemplo argila coloidal, bentonite, cal gorda, calcário moído, produtos coloidais, acetatos de polivinilo ou estearatos.

O seu princípio de funcionamento baseia-se na dispersão das partículas do cimento na fase aquosa da argamassa, aumentando a sua superfície específica e facilitando a sua hidratação (ver fig. 2.10).

Como efeito secundário, podem retardar a presa e reduzir as resistências iniciais.

São tanto mais eficazes quanto mais fraca for a dosagem em cimento e quanto maior for o grau de finura da argamassa.



a) b)

Fig. 2.10 - Efeito de um plastificante na pasta de cimento.
a) partículas de cimento sem plastificante; b) dispersão das partículas de cimento por efeito da adição de um plastificante.

- Retentores de água [2.22]

Limitam os riscos de dessecação prematura da argamassa por absorção de água do suporte e por evaporação em tempo quente. Permitem, assim, que o revestimento tenha uma hidratação mais completa, tornando-o menos sensível às condições climáticas e aos suportes demasiado absorventes.

São geralmente derivados celulósicos e podem agir simultaneamente como agentes espessantes, modificando a reologia da argamassa fresca.

- Fungicidas [2.22]

Impedem a fixação de microrganismos (bolores, musgos, líquenes) na argamassa. No que se refere aos rebocos não pigmentados e destinados a serem pintados, é mais comum introduzir este tipo de adjuvantes na tinta. Antigamente, estes adjuvantes eram constituídos por compostos orgânicos de metais pesados, como o mercúrio e o estanho, mas actualmente estes produtos, perigosos para a saúde pública e para o ambiente, caíram em desuso e a nova geração de fungicidas é constituída por compostos orgânicos com base em heterociclos azotados.

- Pigmentos [2.21]

São geralmente óxidos metálicos (óxidos ou hidróxidos de ferro, de crómio, de cobalto ou de manganês) que se adicionam à argamassa em pequenas quantidades (inferiores a 10% relativamente à massa de ligante), para lhe conferir cor.

De entre os aditivos considera-se útil referir os seguintes:

- Fibras [2.21, 2.22]

As fibras usadas em revestimentos são normalmente fibras de vidro resistentes aos álcalis ou fibras de polipropileno fibrilado. As fibras de celulose também são, por vezes, usadas. Destinam-se principalmente a aumentar a resistência à tracção e a ductilidade do revestimento, melhorando assim a sua resistência à fendilhação, e a incrementar a sua resistência aos choques. Têm também influência na reologia da argamassa fresca (tixotropia, consistência) e podem influir no processo de hidratação e de carbonatação. Geralmente melhoram a coesão e a resistência à penetração de água.

O efeito das fibras disseminadas numa argamassa de revestimento e os seus mecanismos de funcionamento serão desenvolvidos adiante, no capítulo 5.

- Cargas leves [2.21, 2.22]

Os revestimentos com cargas leves são cada vez mais utilizados na Europa. As cargas mais frequentes são: o granulado de poliestireno expandido, a vermiculite expandida (obtida a partir de uma rocha micácea contendo silicatos de alumínio, ferro e magnésio), a perlite expandida (obtida a partir de uma rocha vulcânica siliciosa), a pedra pomes e os grânulos de vidro expandido.

As cargas leves diminuem o módulo de elasticidade do revestimento, a sua massa volúmica aparente e as suas resistências mecânicas. Permitem realizar rebocos muito deformáveis, e, consequentemente, mais adaptados a suportes de fracas resistências mecânicas, como é o caso das paredes de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado. Aumentam consideravelmente o teor de água de amassadura e aumentam também a retracção.

No entanto, estes inconvenientes aparentes não se traduzem obrigatoriamente em aumento da susceptibilidade à fendilhação, nomeadamente devido à redução do módulo de elasticidade e ao aumento da ductilidade. Como inconveniente mais grave têm a diminuição da resistência ao choque e à perfuração dos revestimentos. Podem também contribuir para o aumento da absorção de água, com a consequente diminuição da resistência à acção do gelo.

- Pozolanas naturais e artificiais [2.23, 2.25]

Segundo a definição do ACI (American Concrete Institute), referida por Dodson [2.23], as pozolanas são "materiais siliciosos ou aluminosos, que, muito finamente divididos e na presença de água, reagem quimicamente, a temperaturas ordinárias, com o hidróxido de cálcio livre do cimento hidratado, formando compostos com propriedades cimentícias" (nomeadamente CSH - silicatos de cálcio hidratados). Esta reacção designa-se por *pozolânica*.

As pozolanas podem ser naturais (alguns materiais de origem vulcânica como determinadas pedras-pomes e perlites) ou artificiais (como alguns subprodutos industriais: cinzas volantes, escórias de alto-forno, sílica-fumo).

As vantagens da sua utilização em argamassas de reboco prendem-se principalmente com a melhoria da resistência aos sulfatos e às reacções sílica-inertes. Com efeito, as reacções deste tipo, que dão origem à formação de compostos expansivos, podem ser altamente destrutivas para as argamassas de reboco (e de assentamento). Sulfatos solúveis encontram-se frequentemente em determinados materiais de suporte ou nalguns solos de fundação e encontram-se em concentrações bastante elevadas em paredes de muitos edifícios antigos. A água do mar tem também, entre outros sais, sulfatos em solução. As reacções sílica-inertes dão-se quando se utilizam inertes com determinadas formas de sílica activa na sua composição. Nalguns países, nomeadamente no Reino Unido, testam-se as areias a usar nas argamassas de revestimento e de assentamento, de forma a evitar os problemas referidos. No nosso País esses ensaios estão previstos para areias a usar em betões.

A melhoria do comportamento aos sulfatos e às reacções sílica-inertes conseguida pela adição de pozolanas tem várias explicações possíveis cuja importância relativa não reúne total consenso dos vários autores com trabalhos sobre o assunto. Uma causa sem dúvida relevante é a redução do teor dos constituintes do cimento que entram nas reacções destrutivas referidas, nomeadamente o aluminato tricálcico (C_3A), conseguida automaticamente devido à

substituição de parte do cimento por pozolanas, que não contêm esse composto. A diminuição do teor de hidróxido de cálcio livre, composto necessário às reacções expansivas com os sulfatos, também diminui o risco da formação de sulfoaluminato tricálcico. Por outro lado, a maior compacidade conseguida, quer devida à redução do hidróxido de cálcio (que, por ser solúvel, favorece a formação de poros), quer pelo efeito de fíler (ou seja, de preenchimento dos vazios pelos finos), dificulta, também, as reacções em causa, que exigem a presença de água.

A adição de pozolanas tem ainda outros efeitos favoráveis: melhora a trabalhabilidade e coesão da argamassa e, segundo alguns autores, reduz a retracção, provavelmente devido à combinação de parte da água livre através da reacção pozolânica, diminuindo, assim, a água evaporada que é responsável por parte da retracção.

Por outro lado, são possíveis alguns efeitos negativos, dos quais se destaca o frequente aumento do tempo de presa e, principalmente, o atraso das reacções de hidratação (entenda-se reacções de hidratação + reacção pozolânica), que podem obrigar a tempos de secagem superiores aos recomendados em condições normais. Como se sabe, o aumento dos tempos de execução tem consequências económicas e é normalmente considerado como grave desvantagem em obra.

Para que a utilidade dos adjuvantes e aditivos seja efectiva, é necessário, no entanto, não só aumentar a experiência do seu uso, para o que poderia contribuir a elaboração de regras de utilização, mas também implementar procedimentos de apreciação, certificação ou, de qualquer modo, de comprovação de qualidade e adequação ao uso que permitam mais confiança no emprego daqueles produtos.

2.2.3 - Qualidade

Os revestimentos tradicionais executados em, pelo menos, três camadas, de acordo com o referido atrás, se bem doseados e realizados com materiais de boa qualidade podem apresentar bons desempenhos. No entanto, a escolha dos materiais está muitas vezes dependente do que existe na zona. A areia é quase sempre comprada directamente a um areeiro local e geralmente não é lavada nem sujeita a nenhum tratamento para além de uma

crivagem grosseira, pois considera-se que o aumento de custo resultante não é admissível para a execução de rebocos. É armazenada ao ar livre, sem nenhuns cuidados especiais para evitar a sua molhagem ou secagem exagerada, o que dificulta qualquer controlo da água de amassadura.

As cais têm, geralmente, características desconhecidas e muitas vezes aleatórias. De facto, quer entre as de fabrico artesanal, quer entre as produzidas industrialmente existem certamente algumas de boa qualidade e muitas que não cumprem os requisitos mínimos exigidos pela normalização estrangeira sobre o assunto. Aliás, alguns ensaios realizados no LNEC, se bem que reduzidos, quer na quantidade quer na amostragem, permitiram verificar este facto [2.26]. No entanto, a verdade é que não existem em Portugal, tanto quanto se sabe, cais de qualidade certificada, ou pelo menos com a qualidade comprovada através de ensaios periódicos realizados em laboratório idóneo, como seria desejável.

Assim, os estudos que levam à definição de algumas dosagens consideradas mais adequadas perdem parte da sua eficácia, já que as argamassas fabricadas em obra podem ter areias, cais e quantidades de água muito diferentes das preconizadas.

Para contornar estas dificuldades seria desejável implementar procedimentos de certificação das cais e mesmo das areias, que poderiam ser seleccionadas por tipos e granulometrias, lavadas e embaladas, evitando-se assim grande parte dos inconvenientes apontados. O fabrico de cimentos mais adequados à preparação de argamassas para revestimento de paredes - por exemplo na linha dos "ciments à maçonner" ou dos "masonry cements", franceses e ingleses respectivamente, que podemos designar por *cimentos de alvenaria* -, seria também uma medida importante para um melhor comportamento dos rebocos.

Avançando um pouco mais na garantia de qualidade e na industrialização ou, pelo menos, racionalização da execução de revestimentos, poder-se-ia facilmente pensar na preparação de misturas pré-doseadas e pré-embaladas para cada camada e para os suportes mais correntes (como se faz nalguns países, como por exemplo na Inglaterra e na Suécia): alvenaria de tijolo, betão moldado em obra, alvenaria de blocos de betão celular autoclavado e dois ou três tipos de alvenarias antigas seriam, talvez, os principais a ter em conta. Crê-se que, numa primeira fase, os produtos podiam ser, muito simplesmente, misturas de cimento, cal e areia, usando materiais seleccionados e adequadamente doseados. A junção de alguns

adjuvantes e aditivos poderia ser feita gradualmente, à medida que o mercado evoluísse e a confiança se estabelecesse. Julga-se que tais produtos, de certo modo intermédios entre os rebocos tradicionais preparados e doseados em obra e os revestimentos pré-doseados mais elaborados e aplicáveis por projecção que existem actualmente, poderiam oferecer vantagens consideráveis em relação aos primeiros, sem atingirem os custos iniciais dos segundos, que limitam a sua aplicação em alguns tipos de obra.

Outra das dificuldades inerentes à utilização de rebocos tradicionais - e esta não seria resolvida com os produtos pré-doseados por camada preconizados - está nos prazos de realização das obras, geralmente apertados e sujeitos a multas, que levam muitas vezes à execução dos rebocos em condições climáticas desfavoráveis, e ao desrespeito sistemático pelos tempos de secagem do próprio suporte de alvenaria ou de betão e das várias camadas, antes da aplicação das camadas subsequentes e das pinturas; ou ainda, mais grave do que isso, à execução de camadas muito espessas, evitando o desdobramento em várias camadas de regularização e dispensando a aplicação da camada de acabamento, cuja falta é muitas vezes dissimulada pela aplicação final de tintas de grande poder de cobertura mas também, tendencialmente, muito impermeáveis ao vapor de água.

Reconhece-se que é difícil ultrapassar estes condicionalismos; no entanto, crê-se que, por vezes, um planeamento eficaz da obra poderia melhorar a situação. De qualquer modo, considera-se imperativo melhorar os revestimentos de ligante mineral e, se os problemas surgidos na prática actual com os tradicionais forem considerados, em muitos casos, intransponíveis, é necessário recorrer a revestimentos pré-doseados tão evoluídos quanto o necessário para corresponder às necessidades reais, ou, pelo menos, adaptar os revestimentos tradicionais às condições práticas, através do uso de adjuvantes e aditivos. Por exemplo, o uso de um retentor de água pode, eventualmente, contrabalançar os efeitos de um tempo demasiado quente e seco e de um suporte demasiado absorvente, enquanto uma resina, adicionada ao crespido pode melhorar a sua aderência a um suporte muito liso e pouco ou nada absorvente. Um introdutor de ar pode, em simultâneo, reduzir o módulo de elasticidade e aumentar a capacidade de impermeabilização de um revestimento, mas pode reduzir a sua resistência aos choques a um nível pouco satisfatório para algumas aplicações.

2.3 - REBOCOS NÃO-TRADICIONAIS

2.3.1 - Tipos de produtos

Os rebocos não-tradicionais têm, em geral, uma constituição mais ou menos semelhante aos tradicionais, com a diferença de que a dosagem é feita de acordo com uma *receita estudada*, os constituintes são seleccionados e a mistura é *corrigida* com adjuvantes e aditivos, muitas vezes em pequeníssimas doses, mas com efeito sensível.

De entre estes, pela sua popularidade entre nós, distinguem-se os revestimentos do tipo monocamada, que são formulados de tal modo que podem, com uma única camada, desempenhar as funções de um reboco tradicional aplicado em três camadas. São, além disso, pigmentados na massa, pelo que dispensam a aplicação de pintura. Aplicáveis por projecção, acrescentam assim às suas vantagens a grande rapidez de aplicação.

Como desvantagens, apresentam um custo inicial do material bastante superior aos tradicionais, a exigência de mão-de-obra treinada e a necessidade de um planeamento de obra rigoroso e de alvenarias bem desempenadas. Finalmente, como já foi referido, sendo a maioria dos produtos desse tipo comercializados em Portugal importados - ou, pelo menos, a respectiva tecnologia - de França, Espanha, ou mais raramente de Itália, conferem aos edifícios um aspecto final nem sempre concordante com o nosso gosto e compatível com a arquitectura envolvente. É frequente, por exemplo, apresentarem um acabamento bastante rugoso, de textura grossa e uma gama de cores relativamente restrita.

Alguns destes produtos são especialmente formulados para determinadas aplicações: por exemplo sobre suportes de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado, em revestimentos de isolamento térmico pelo exterior, ou em alvenarias antigas. Nestes casos, as suas características são adaptadas à utilização prevista, conseguindo-se aumentar a ductilidade, reduzir o módulo de elasticidade, aumentar a resistência ao choque, aumentar a capacidade de impermeabilização, etc., à custa da adição de resinas e adjuvantes vários, e incorporação de fibras ou redes.

Existem, contudo, produtos pré-doseados menos complexos que os monocamada, formulados no nosso País, que, sem terem algumas das vantagens dos monocamada, conseguem evitar algumas das principais desvantagens dos rebocos tradicionais. Assim, há produtos que não são pigmentados na massa, não permitindo, portanto, dispensar a pintura,

mas que, sendo aplicáveis por projecção e tendo um coeficiente de capilaridade muito mais baixo e uma menor susceptibilidade à fendilhação são, em muitos casos, uma opção a considerar se o seu custo for competitivo e se o seu aspecto final se aproximar do requerido. O facto de se tratar de produtos pré-doseados permite que estejam sujeitos a um controlo interno de qualidade que garanta a respectiva constância de qualidade e manutenção das características.

Existem também revestimentos pré-doseados formulados com o objectivo de proporcionar um complemento de isolamento térmico à envolvente. Para isso, a camada destinada a conferir isolamento térmico tem na sua constituição grande quantidade de cargas leves, geralmente granulado de poliestireno expandido. São revestimentos aplicáveis em três camadas, sendo a mistura para cada uma delas comercializada em embalagem separada, pronta a aplicar após amassadura com água. A primeira (sem cargas leves) é uma camada de aderência, destinada a promover a aderência ao suporte e aplicável manualmente ou por projecção. A segunda é a camada de isolamento, constituída por cimento e, eventualmente, cal, grande percentagem de cargas leves, cargas minerais em pequena quantidade e adjuvantes e aditivos. Esta camada tem massa volúmica muito baixa, da ordem de 200 a 250 kg/m^3. Pode ser aplicada em várias demãos se a sua espessura ultrapassar a considerada adequada pelo fabricante para uma demão, em geral 10 a 20 mm. Devido à sua constituição, esta camada é muito friável e pouco resistente aos choques. A terceira camada destina-se a proteger a camada de isolamento e a conferir ao paramento a necessária resistência mecânica. Para isso é, em geral, armada com uma rede de fibra de vidro ou sintética ou com fibras de vidro ou sintéticas incorporadas na massa. Mesmo assim, a resistência do paramento aos choques nem sempre é satisfatória, principalmente se atendermos a que, no nosso País, a maioria dos edifícios de habitação tem ainda uma envolvente pouco protegida (por áreas ajardinadas, por exemplo), sendo relativamente frequente a degradação de fachadas devido a acções humanas decorrentes de vandalismo ou de mera falta de cuidado.

Os revestimentos deste tipo são, além disso, bastante susceptíveis à fendilhação, devido à reduzida resistência mecânica inicial, se bem que os fabricantes tenham, ultimamente, melhorado o comportamento neste aspecto, através do uso de camadas de acabamento melhor armadas e com formulações mais sofisticadas.

Finalmente, é necessário ter em conta que os revestimentos de complemento de isolamento térmico descritos têm desempenhos térmicos limitados e proporcionais à respectiva

espessura, não atingindo nunca os valores de resistência térmica dos sistemas de isolamento térmico pelo exterior providos de uma camada contínua de isolante. O seu interesse está na possibilidade de conseguir alguma correcção térmica, em simultâneo com a renovação estética da fachada, com custos eventualmente inferiores ao de um sistema de isolamento térmico pelo exterior através de revestimento aplicado sobre isolante.

Outra classe de produtos com algum uso em Portugal é a dos revestimentos de ligante misto, que têm na sua constituição uma resina, geralmente acrílica, podendo ser aplicados em camada mais fina, e tornando-se mais elásticos e impermeáveis. São bastante caros, pelo que são empregues normalmente em pequenas áreas, para fins especiais. Têm também muita aplicação em revestimentos de isolamento térmico de fachadas pelo exterior (ETICS).

2.3.2 - Qualidade

Todos estes produtos não-tradicionais, de que não há suficiente experiência de uso no nosso País e cuja constituição não conhecemos, devem ter a sua qualidade comprovada, pois não basta que um produto seja designado, pelo seu fabricante, de monocamada e seja fabricado de acordo com uma fórmula estrangeira, para que sejam reais as vantagens e os bons desempenhos descritos. Para estes produtos, em que é importante avaliar não só as suas características e a sua manutenção ao longo do tempo, mas também a sua adequação ao fim em vista, a comprovação de qualidade deve ser feita através de um estudo de homologação e sancionada através de um Documento de Homologação do LNEC. As garantias são maiores se se tratar de uma Homologação com Certificação, já que estas implicam uma vigilância do controlo interno de qualidade da fábrica e a verificação periódica das características mais relevantes.

Mesmo os revestimentos fabricados em países estrangeiros e importados, ainda que possuam um Documento de Homologação passado pelo Instituto Homologador do país de origem, devem ser submetidos a um procedimento de Confirmação de Homologação, que culmina com um Documento de Homologação do LNEC. Este procedimento, aceite pelos Institutos europeus que fazem parte da União Europeia para a Apreciação Técnica na Construção (UEAtc) e regulado pela Regra R.04 [2.27], permite ao Instituto Confirmador

verificar que o produto comercializado no seu país é, de facto, idêntico ao homologado no país de fabrico e, ainda analisar a adaptação do produto ao mercado do seu país, despistando, nomeadamente, eventuais incumprimentos de regulamentação em vigor ou variações no comportamento devidas às diferenças climáticas ou a métodos construtivos e materiais de suporte diversos.

2.4 - COMENTÁRIOS SOBRE A NORMALIZAÇÃO E A DOCUMENTAÇÃO NORMATIVA SOBRE REBOCOS

2.4.1 - Generalidades

A normalização e regulamentação nacional sobre revestimentos de ligante mineral (e, aliás, sobre revestimentos em geral) pode considerar-se inexistente. De facto, os únicos documentos normativos relacionados com o assunto debruçam-se apenas sobre alguns dos constituintes, e dirigem-se sempre mais às aplicações em betão que às argamassas, e ainda menos às argamassas de revestimento. Existem, no entanto, documentos com especificações e recomendações para diversos tipos de revestimentos, dos quais se citam, em 2.4.2, alguns dos referentes a rebocos.

Encontram-se situações semelhantes à nossa noutros países europeus, nomeadamente na Espanha e na Itália. Contudo, em países como a França, o Reino Unido, a Alemanha e a Áustria existem conjuntos normativos coerentes sobre o assunto, abrangendo documentos relativos a especificações, a métodos de ensaio e a regras de aplicação. Faz-se também referência à documentação normativa dos EUA, onde um Guia preparado pelo ACI e um conjunto de normas ASTM constituem um quadro bastante completo.

A normativa europeia, em preparação pelo CEN, que poderia vir, de certo modo corrigir a nossa situação de omissão, vem apenas, crê-se, fragilizá-la ainda mais, como se procurará justificar na análise que se fará, em 2.4.9, do conjunto de Projectos de Norma disponíveis, em versões de que, previsivelmente, os textos finais se não afastarão já muito.

2.4.2 - Normalização e outra documentação portuguesa

A normalização nacional sobre revestimentos de ligante mineral para paredes refere-se sobretudo a alguns dos seus constituintes, nomeadamente: o cimento (NP EN 196.1 a 7, NP EN 196.21, NP 952, NP 2064, NP 2065 e NP 4326 [2.1N a 2.12N], E LNEC 64, E LNEC 65 e E LNEC 328, [2.13N a 2.15N]), as areias (NP 85, 86, 954, 955, 956, 957, 1379, 1380, 1381, 1382, 2106, 2107 [2.16N a 2.27N], E LNEC 251, 355, 373, e 415 [2.28N a 2.31N]), a água (E 372 [2.32N]) e os adjuvantes e aditivos (NP 4220 e NP 450 [2.33N e 2.34N], E 374, 375, 376 e 385 [2.35N a 2.38N]).

Em 1968 foram elaboradas no LNEC recomendações para a execução de revestimentos exteriores de argamassa [2.28] e têm-se preparado diversas Fichas de Ensaio para revestimentos de paredes, algumas aplicáveis a revestimentos de ligante mineral [2.20 e 2.29]. Duas publicações da série *Informação Técnica de Edifícios* [2.2, 2.30] e um *Curso* [2.31] referem-se à constituição e aplicação de rebocos e às regras de qualidade mais significativas que devem respeitar. Um documento recentemente publicado [2.19] estabelece os métodos de ensaio e as especificações a verificar pelos rebocos não-tradicionais para serem considerados adequados ao uso.

Apresentam-se no quadro 2.2 alguns dos traços volumétricos recomendados para os rebocos tradicionais na referida bibliografia nacional. Incluem-se os traços propostos nas recomendações citadas [2.28], apenas para os acabamentos mais usados no nosso País, ou seja os chamados *guarnecimentos de massa de areia* sob a forma de *roscone* ou de *esponjado* e, a itálico, as constituições referidas na ITE 24 [2.2], sem distinção de suportes e condições de exposição.

QUADRO 2.2 - Composições propostas para rebocos em bibliografia nacional (traços volumétricos) [2.2, 2.28]

TIPO DE SUPORTE	CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO	CRESPIDO		CAMADAS DE BASE (emboço e reboco)						CAMADA DE ACABAMENTO					
		ci:ar		ci:ar		ci:ca:ar		ch:ar		ci:ca:ar		ca:ar(pó de pedra)		ch:ar	
Materiais lisos, compactos e resistentes. Materiais de porosidade, compacidade e resistência média	Severa	1:1,5 a 2	*1:2*	1:3	-	1: 0,5: 4,5 1:1:6	*1:0,5:4 a 4,5* *1:1:5 a 6*	1:2	-	1: 0,5: 4,5 1:1: 6	*1:1:5 a 6* *1:2:8 a 9*	-	-	1:2	-
	Moderada e favorável			-		1: 0,5: 4,5 1:1: 6 1:2: 9		1:3		1:1: 6 1:2: 9		1:3		1:2 1:3 1:4	
Materiais porosos e de baixa resistência	Severa	1:2 a 3		-		1:1: 6		1:2		1:1: 6		-		1:2	
	Moderada e favorável			-		1:2: 9		1:3		1:2: 9		1:3		1:3 1:4	

ci - cimento; ch - cal hidráulica; ca - cal aérea; ar - areia

2.4.3 - Normalização e documentação normativa francesa

A França dispõe, há largos anos, de um conjunto normativo relativo a revestimentos de paredes de ligante mineral bastante completo, que tem sido recentemente actualizado de acordo com o avanço dos conhecimentos e o surgimento de novos produtos e que inclui um "DTU" [2.32], vários "Cahiers du CSTB" [2.7, 2.18 e 2.33 a 2.37] e diversas normas AFNOR [2.39N a 2.83N]. Estes documentos cobrem, no seu conjunto, os revestimentos tradicionais e não-tradicionais de ligante mineral.

O DTU 26.1, de Maio de 1990 [2.32], que substituiu o DTU 26.1 de Setembro de 1978, constitui um código de boa prática que define as regras de preparação e execução de revestimentos de cimento, cal e misturas de gesso e cal aérea sobre diversos tipos de suportes, novos ou antigos. É aplicável aos revestimentos doseados em obra e aos pré-doseados de composição semelhante (são expressamente excluídos os revestimentos monocamada). Neste documento são definidas as características que devem ter os materiais constituintes, geralmente com recurso a normas NF (para os cimentos e cais hidráulicas [2.39N a 2.44N], para a cal aérea [2.53N], para os inertes [2.56N] e para os adjuvantes [2.57N a 2.66N]), o estado a exigir e a preparação a dar aos vários tipos de suportes previstos, novos ou antigos e prescrições para a execução dos rebocos. Nas prescrições gerais (comuns a todos os rebocos) refere-se a regra da degressividade do teor de ligante e dão-se indicações sobre as condições climáticas de aplicação, os cuidados a ter em pontos singulares, a protecção dos rebocos frescos e focam-se, ainda, alguns aspectos relativos aos rebocos interiores. Nos capítulos seguintes estabelecem-se regras de execução dos revestimentos sobre os diversos suportes previstos, incluindo o número de camadas e as respectivas composições. No quadro 2.3 sintetizam-se as composições recomendadas para alguns dos suportes referidos no DTU (não nos pareceu relevante discriminar composições aplicáveis em suportes de uso muito limitado, actualmente, em Portugal, como sejam os painéis de aglomerados de fibras de madeira mineralizadas ou as redes metálicas). Para o suporte *alvenarias antigas* incluiram-se, a itálico, as composições recomendadas pela "École d'Avignon", referidas no Anexo 2 do DTU 26.1.

QUADRO 2.3 - Composições recomendadas para rebocos no DTU 26.1 francês [2.32]

CAMADA	SUPORTE	COMPOSIÇÃO	TRAÇO VOLUMÉTRICO (*)	DOSAGEM LIG:AR
1ª	Alvenaria de tijolo ou de blocos de betão	ci:ar	1:1,7 a 2	1:1,7 A 2
2ª		ci:ar	1:2 a 3	1:2 a 3
		ch:ar	1:2 a 2,5	1:2 a 2,5
		ci:ch:ar	1:3 a 5:3 a 10	1:0,75 a 2,5
		ci:ca:ar	1:0,5 a 1,5:3 a 5	1:1,5 a 2
3ª		ci:ar	1:3 a 4	1:3 a 4
		ch:ar	1:2,5 a 3,5	1:2,5 a 3,5
		ci:ch:ar	1:0,5 a 7,5:4 a 10	1:2,5 a 3,5
		ci:ca:ar	1:0,5 a 3:4 a 10	1:2 a 3,5
		ch:ca:ar	1:0,5 a 2,5:3 a 8	1:2 a 2,5
1ª	Igual, mas reboco projectado (em 2 camadas)	ci:ar	1:2 a 3	1:2 a 3
		ci:ch:ar	1:0,5 a 2,5:3 a 6	1:2
		ci:ca:ar	1:0,6 a 1,2:3 a 4	1:1,8 a 2
2ª		ch:ar	1:2 a 2,5	1:2 a 2,5
		ci:ch:ar	1:1 a 4:5 a 10	1:2 a 2,5
		ci:ca:ar	1:1 a 1,5:3,5 a 5	1:1,7 a 2
1ª	Betão moldado	ci:ar	1:2 a 2,5	1:2 a 2,5
1ª	Betão celular autoclavado	ci:ar	1:2 a 2,5	1:2 a 2,5
2ª		ci:ca:ar	1:4 a 10:10 a 20	1:1,7 a 2
		ch:ca:ar	1:0,5 a 1:3 a 4	1:2 a 2,5
3ª		ci:ca:ar	1:3 a 8:10 a 20	1:2 a 2,5
		ch:ca:ar	1:1 a 1,5:4 a 5,5	1:2 a 2,5
1ª	Alvenarias antigas	ci:ar	1:2,2 a 2,5 *(1:2,5)*	1:2,2 a 2,5 *(1:2,5)*
		ch:ar	1:2,2 a 2,5 *(1:2)*	1:2,2 a 2,5 *(1:2)*
		ca:ar	*(1:2)*	*(1:2)*
		ci:ch:ar	1:1,5 a 10:5 a 20 *(1:4:10)*	1:1,8 a 2,2 *(1:2)*
		ci:ca:ar	*(1:2,5:5)*	*(1:0,5)*
2ª		ch:ar	*(1:2,5 a 3,3)*	*(1:2,5 a 3,3)*
		ca:ar	*(1:2,5)*	*(1:2,5)*
		ci:ca:ar	1:1 a 3:5 a 10 *(1:1,5:5)*	1:2 a 2,5 *(1:2)*
		ci:ch:ar	1:2,5 a 7,5:10 a 20 *(1:3:10)*	1:2,5 a 3,5 *(1:2,5)*
		ci(pr):ch:ar	1:2 a 7:7 a 20 *(1:3:10)*	1:2,5 a 3,3 *(1:2,5)*
		ch:ca:ar	1:0,5 a 1,5:3 a 5,5 *(1:1,5:5)*	1:2 a 2,5 *(1:2)*
		ci(pr):ca:ar	1:3 a 7:7 a 20	1:2
3ª		ci:ca:ar	1:1,5 a 6:7 a 20 *(1:3:10)*	1:2 a 3,5 *(1:2,5)*
		ci:ch:ar	0 a 1:1 a 4:3 a 20 *(1:2:10)*	1:3 a 4 *(1:3,3)*
		ch:ca:ar	1:1 a 2,5:5,5 a 8 *(1:3:10)*	1:2 a 3 *(1:2,5)*
		ci(pr):ch:ar	1:2,5 a 5:10 a 20 *(1:2:10)*	1:2 a 4 *(1:3,3)*
		ci(pr):ca:ar	1:3 a 6:10 a 20 *(1:3:10)*	1:2 a 3 *(1:2,5)*

ci - cimento; ci(pr) - cimento pronto; ch - cal hidráulica; ca - cal aérea; ar - areia

* - Traços determinados admitindo que a areia se encontra seca e que são os seguintes os valores das massas volúmicas do cimento, cal aérea, cal hidráulica e areia, respectivamente: γ_{ci} = 1000 kg/m^3, γ_{ca} = 500 kg/m^3, γ_{ch} = 900 kg/m^3 e γ_{ar} = 1500 kg/m^3

Os traços indicados parecem bastante fortes, em comparação com os que costumamos recomendar no nosso País e com os que vemos em documentos de outras origens. No entanto, a diferença é menos acentuada se tivermos em conta que os traços referidos neste quadro são obtidos com a areia seca, enquanto é habitual, entre nós, determiná-los com a areia ligeiramente húmida, com um teor de água de 3 a 6%. A areia seca corresponde a maior volume, logo os traços do quadro 2.3, se convertidos ao teor de água de 3 a 6%, representam maior dosagem de areia que a indicada. Este fenómeno é designado no DTU por "foisonnement", ou seja, empolamento da areia com a água. Em termos comparativos, e *grosso modo*, cada valor indicativo da dosagem de areia pode subir entre 0,5 e 1 ponto, o que aproxima os traços dos recomendados no nosso País.

As Normas AFNOR aplicáveis são normas de definição e especificações e de ensaio dos constituintes [2.39N a 2.83N].

Os "Cahiers du CSTB" referem-se fundamentalmente aos revestimentos do tipo monocamada, usados em França desde a década de 70 e actualmente, sem dúvida, os revestimentos de ligantes minerais predominantes nesse País.

Até 1992 estes revestimentos foram considerados não-tradicionais e estiveram sujeitos aos procedimentos de concessão de "Avis Techniques" [3], com base nos Cahiers 1777, 1778 e 1779 [2.7, 2.18 e 2.37], relativos, respectivamente, a especificações e condições de aplicação, classificação e comportamento e a métodos de ensaio. A partir desse ano (depois de terem sido elaborados "Avis Techniques" para dezenas de produtos diferentes), os revestimentos monocamada correntes, aplicáveis sobre suportes também considerados correntes, deixaram de ser considerados não-tradicionais em França e passaram a estar sujeitos a um procedimento de certificação sujeito a um regulamento [2.35]. Os referidos "Cahiers" foram então substituídos por outros documentos, actualizados de acordo com os novos procedimentos e também com a experiência adquirida até então e com estudos de investigação entretanto realizados. Assim, encontram-se actualmente em vigor o Cahier 2477 [2.33] - que substitui o Cahier 1777 - e o Cahier 2669-4 [2.34], em substituição dos Cahiers 1777 e 1779. Na prática não houve, contudo, alterações significativas nos métodos de ensaio nem nas condições de

[3] - A obtenção de "Avis Technique" não é obrigatória em França para que os produtos não-tradicionais possam ser aplicados, ao contrário do que acontece em Portugal com os documentos correspondentes - Documentos de Homologação do LNEC -, mas o sistema de seguros vigente para a construção tornou essa obtenção necessária, na prática, em muitos casos.

emprego e de aplicação. O Cahier 1778 não foi formalmente substituído, mas a sua terminologia está desactualizada face ao novo quadro podendo considerar-se parcialmente substituído pelo Cahier 2401 [2.36], que define uma nova classificação, bastante completa, para os revestimentos monocamada, designada classificação MERUC. Por outro lado, o *regulamento particular e técnico* para a certificação dos revestimentos monocamada [2.35] compila a informação contida nos dois documentos citados, além de incluir a descrição dos procedimentos necessários à concessão do Certificado e de referir as exigências relativas ao controlo interno de qualidade e as especificações mínimas exigíveis aos revestimentos do tipo referido.

Os documentos citados, se bem que preparados, como se disse, para os revestimentos do tipo monocamada, são em muitos casos aplicáveis, com as devidas adaptações, aos revestimentos de ligante mineral em geral. Por exemplo, no Cahier 2401 refere-se que *as classes de características foram prolongadas para lá dos limites habituais de variação dos revestimentos de impermeabilização pré-doseados, de forma a poder englobar o conjunto dos revestimentos de ligantes hidráulicos.*

A classificação MERUC, estabelecida em 1990 pelo CSTB, permite informar os utilizadores, de um modo simples e prático, sobre as características de um revestimento monocamada que mais influenciam o seu comportamento. É, de certo modo, um sistema pioneiro para os revestimentos de paredes, embora sejam já adoptados para outros produtos sistemas semelhantes (por exemplo, para os revestimentos delgados de piso foi definida a classificação UPEC e para os isolantes a classificação ISOLE). Na classificação MERUC as letras significam, respectivamente, **massa volúmica, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão, retenção de água e capilaridade**, características estas determinadas após 28 dias de secagem, em condições definidas. Cada uma destas características pode variar do nível 6 - nível geralmente mais próximo do atribuível aos revestimentos tradicionais - ao nível 1 - em princípio correspondente aos produtos mais elaborados. Exceptua-se desta regra a retenção de água, em que o índice 1 é o de menor desempenho.

A classificação MERUC foi construída com base em cerca de duas décadas de actividade do CSTB na homologação e apreciação de revestimentos do tipo monocamada, fundindo a experiência adquirida através da observação dos revestimentos aplicados, dos

resultados dos ensaios realizados e de diversos projectos de investigação nesse domínio, alguns dos quais constituíram teses de mestrado e de doutoramento [2.8, 2.22, 2.38[4], 2.39]. Ainda assim, falta nesta classificação o símbolo relativo à resistência à fendilhação, característica essa para a qual não foi ainda possível estabelecer um critério considerado fiável. O critério referido no Cahier 1778 [2.7], em vigor até ao advento da classificação MERUC, baseado na conjugação da retracção, do módulo de elasticidade e da resistência à flexão e que se apresenta no Quadro 3.1 (ver capítulo 3), é actualmente considerado pouco adequado, uma vez que se tem verificado que o comportamento à fendilhação obtido na prática nem sempre corresponde à classificação resultante da aplicação do critério.

Os franceses têm, assim, um sistema bastante completo, mas não estático; pelo contrário, encontra-se ainda em aperfeiçoamento. Neste momento, os critérios de classificação e as especificações adoptados podem sintetizar-se no Quadro 2.4.

[4] - Paulina Faria, na época bolseira do LNEC, fez no CSTB a parte experimental da tese de Mestrado, que apresentou no IST em 1993.

QUADRO 2.4 - Síntese da classificação e especificações para revestimentos monocamada estabelecidos pela documentação francesa

TIPO DE ENSAIO	CARACTERÍSTICA (métodos de ensaio descritos no Cahier 2669-4 [2.34])	SÍMBOLO	CLASSIFICAÇÃO MERUC [2.36]	ESPECIFICAÇÃO MÍNIMA PARA APRESENTAÇÃO AO COMITÉ DE ATRIBUIÇÃO DO CERTIFICADO [2.33]	ESPECIFICAÇÕES ADICIONAIS PARA DETERMINADAS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO [2.32]
ENSAIOS SOBRE O PRODUTO ENDURECIDO INCLUÍDOS NA CLASSIFICAÇÃO MERUC	Massa volúmica aparente (mva)	M	**M1**: mva < 1200 kg/m³ **M2**: mva entre 1000 e 1400 kg/m³ **M3**: mva entre 1200 e 1600 kg/m³ **M4**: mva entre 1400 e 1800 kg/m³ **M5**: mva entre 1600 e 2000 kg/m³ **M6**: mva > 1800 kg/m³	-	Para aplicação em tempo frio: M3 a M6
	Módulo de elasticidade dinâmico (me)	E	**E1**: me < 5000 MPa **E2**: me entre 3500 e 7000 MPa **E3**: me entre 5000 e 10000 MPa **E4**: me entre 7500 e 14000 MPa **E5**: me entre 12000 e 20000 MPa **E6**: me > 16000 MPa	E ≤ 4	Em parede muito exposta a choques: E ≥ E3 Para aplicar revestimentos cerâmicos colados: E ≥ E4
	Resistência à tracção por flexão (rt)	R	**R1**: rt < 1,5 MPa **R2**: rt entre 1,0 e 2,0 MPa **R3**: rt entre 1,5 e 2,7 MPa **R4**: rt entre 2,0 e 3,5 MPa **R5**: rt entre 2,7 e 4,5 MPa **R6**: rt > 3,5 MPa	-	Em parede muito exposta a choques: R ≥ R3 Para aplicar revestimentos cerâmicos colados: R ≥ R4
	Retenção de água (ra)	U	**U1**: ra < 78 % **U2**: ra entre 72 % e 85 % **U3**: ra entre 80 % e 90 % **U4**: ra entre 86 % e 94 % **U5**: ra entre 91 % e 97 % **U6**: ra entre 95 % e 100 %	U ≥ 3	Para aplicar em tempo muito quente e seco: U5 ou U6
	Coeficiente de Capilaridade (cc)	C	**C1**: cc < 1,5 kg/dm².min$^{1/2}$ **C2**: cc entre 1,0 e 2,5 " **C3**: cc entre 2 e 4 " **C4**: cc entre 3 e 7 " **C5**: cc entre 5 e 12 " **C6**: cc > 10 "	C ≤ 3	Para aplicar em parede muito exposta à chuva: C1 ou C2

QUADRO 2.4 (continuação) - Síntese da classificação e especificações para revestimentos monocamada estabelecidos pela documentação francesa

TIPO DE ENSAIO	CARACTERÍSTICA (métodos de ensaio descritos no Cahier 2669-4 [2.34])	SÍMBOLO	CLASSIFICAÇÃO MERUC [2.36]	ESPECIFICAÇÃO MÍNIMA PARA APRESENTAÇÃO AO COMITÉ DE ATRIBUIÇÃO DO CERTIFICADO [2.35]	ESPECIFICAÇÕES ADICIONAIS PARA DETERMINADAS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO [2.32]
ENSAIOS SOBRE O PRODUTO EM PASTA	Sensibilidade às variações do teor de água de amassadura	-	-	Determinar as quantidades máx. e mín. em que é ainda utilizável tendo em conta a consistência	-
	Sensibilidade ao modo de amassadura	-	-	Diferença entre as massas volúmicas medidas com as duas velocidades extremas previstas < 400 kg/m³	-
	Estabilidade do ar introduzido	-	-	Diferença entre as massas volúmicas medidas logo após amassadura e 30min mais tarde < 100 kg/m³	-
OUTROS ENSAIOS SOBRE O PRODUTO ENDURECIDO	Permeabilidade ao vapor de água	-	-	-	-
ENSAIOS SOBRE MAQUETAS ANTES E APÓS CICLOS DE ENVELHECIMENTO	Permeabilidade à água	-	-	débito de água < 1ml/cm² em 48 h	-
	Aderência ao suporte	-	-	rotura coesiva, em pelo meno 80 % da área	-
	Compatibilidade com suportes pouco resistentes	-	-	revestimento com espessura normal: não provocar fendilhação sensível no suporte; revestimento com sobreespessura: limitação da fendilhação no suporte (fraca abertura)	-
	Resistência aos choques de corpo duro (10J)	-	-	-	-

2.4.4 - Normalização e documentação normativa inglesa

A Inglaterra tem um conjunto de "British Standards" (BS) que fixam métodos de ensaio [2.84N] e características dos constituintes [2.85N a 2.99N], estabelecem regras para a aplicação em obra dos rebocos [2.17] e estabelecem especificações, no caso das argamassas pré-doseadas [2.40 e 2.41].

A BS 5262:1991 [2.17] é aplicável a revestimentos de ligante mineral sobre todos os tipos comuns de suportes, novos ou antigos, com exclusão de revestimentos para tanques ou outros equipamentos destinados a conter líquidos. Nele se descrevem os principais constituintes a empregar, com referência, em quase todos os casos, às BS aplicáveis (para os cimentos [2.85N a 2.89N]; para as cais [2.90N]; para as areias [2.91N]; para os pigmentos [2.92N]; para os adjuvantes [2.93N, 2.94N]; para a água [2.95N]; e para armaduras metálicas [2.96N a 2.99N]).

Há referência explícita ao uso de fibras naturais, minerais e sintéticas. Os adjuvantes - nomeadamente os plastificantes, os hidrófugos, os retentores de água e os promotores de aderência -, são considerados constituintes normais das argamassas tradicionais. Os vários tipos de suportes considerados são amplamente descritos e classificados de acordo com as características mais relevantes para a aplicação dos revestimentos. Referem--se, também pormenorizadamente, as acções de preparação do suporte convenientes para cada um dos tipos definidos, incluindo o tratamento de aderência (crespido, camada adesiva, picagem, aplicação de rede metálica). São discriminados os critérios de selecção do reboco a usar, no que se refere à composição, número e espessura das camadas, acabamentos, técnicas de coloração e de execução de efeitos ornamentais. As condições de exposição e a protecção dos revestimentos das acções climáticas com recurso a elementos arquitectónicos apropriados são também objecto de descrição detalhada. Os aspectos mais relevantes do comportamento dos revestimentos são abordados e são discriminados os principais factores que os condicionam: resistência à fendilhação e à microfendilhação, comportamento ao fogo, resistência à penetração de água, resistência à acção dos sais solúveis, efeitos da poluição atmosférica, comportamento à acção do gelo, propriedades térmicas e acústicas e durabilidade. As várias fases da aplicação são pormenorizadamente descritas, bem como os cuidados de manutenção e as eventuais acções de reparação a realizar ao longo do tempo de vida útil do revestimento.

No documento em questão destaca-se a preocupação de adaptar o revestimento ao suporte e às condições de exposição.

No quadro 2.5 sintetizam-se as dosagens definidas na BS 5262 para os vários tipos de suporte e as exposições consideradas.

As especificações estabelecidas na BS 4721:1981 e na BS 5838:Part 1:1980 [2.40, 2.41] para misturas para argamassas e argamassas pré-doseadas de revestimento de paredes referem-se aos respectivos constituintes, mais uma vez com referência a normas BS de características, ou a declarações escritas do fabricante atestando a boa qualidade dos produtos (caso dos adjuvantes não cobertos pelas BS) e à preparação das misturas, em laboratório e em obra. São definidas *proporções nominais* em volume dos principais constituintes, que devem satisfazer valores especificados de consistência, tempos de presa, retenção de água, teor de ar introduzido e resistência à compressão aos 28 dias, determinados em laboratório. O cumprimento das especificações - que pode implicar ajustamentos das dosagens reais em relação às nominais - permite a classificação numa classe de exigências ("designation class"). São incluídas em anexo notas sobre a selecção e uso de rebocos pré-doseados e misturas para argamassas de revestimento.

QUADRO 2.5 - Composições recomendadas para rebocos exteriores na BS 5262 inglesa (traços volumétricos) [2.17]

SUPORTE	CAMADA	TIPO DE ACABAMENTO	COMPOSIÇÃO	EXPOSIÇÃO		
				Severa (*)	Moderada (*)	Abrigada (*)
Denso, forte, liso	Base	talochado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:0,5 a 1:4 a 6 (1:2,5 a 3) 1:3 a 6 1:2,5 a 5	1:0,5 a 1:4 a 6 (1:2,5 a 3) 1:3 a 6 1:2,5 a 5	1:0,5 a 1:4 a 6 (1:2,5 a 3) 1:3 a 6 1:2,5 a 5
		raspado ou texturado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:0,5 a 1:4 a 6 (1:2,5 a 3) 1:3 a 6 1:2,5 a 5	1:0,5 a 1:4 a 6 (1:2,5 a 3) 1:3 a 6 1:2,5 a 5	1:0,5 a 1:4 a 6 (1:2,5 a 3) 1:3 a 6 1:2,5 a 5
		rugoso	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:0,25 a 0,5:3 a 4,5 (1:2,5 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,25 a 0,5:3 a 4,5 (1:2,5 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,25 a 0,5:3 a 4,5 (1:2,5 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5
		projectado seco	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:0,25 a 0,5:3 a 4,5 (1:2,5 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,25 a 0,5:3 a 4,5 (1:2,5 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,25 a 0,5:3 a 4,5 (1:2,5 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5
	Acabamento	talochado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5
		raspado ou texturado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5
		rugoso	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5
		projectado seco	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5

ci - cimento; cia - cimento de alvenaria; ca - cal aérea; ar - areia; plast - plastificante
* - Quando existe mais que um ligante dá-se entre parêntesis a dosagem ligante:areia

QUADRO 2.5 (continuação) - Composições recomendadas para rebocos exteriores na BS 5262 inglesa (traços volumétricos) [2.17]

SUPORTE	CAMADA	TIPO DE ACABAMENTO	COMPOSIÇÃO	EXPOSIÇÃO		
				Severa (*)	Moderada (*)	Abrigada (*)
Moderadamente forte, poroso	Base	talochado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:0,5 a 1:4 a 6 (1:2,5 a 3) 1:3 a 6 1:2,5 a 5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5
		raspado ou texturado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5
		rugoso	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5
		projectado seco	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5
	Acabamento	talochado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5
		raspado ou texturado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5
		rugoso	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5
		projectado seco	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5	1:0,5:4 a 4,5 (1:2,7 a 3) 1:3 a 4 1:2,5 a 3,5

ci - cimento; cia - cimento de alvenaria; ca - cal aérea; ar - areia; plast - plastificante
* - Quando existe mais que um ligante dá-se entre parêntesis a dosagem ligante:areia

QUADRO 2.5 (continuação) - Composições recomendadas para rebocos exteriores na BS 5262 inglesa (traços volumétricos)[2.17]

SUPORTE	CAMADA	TIPO DE ACABAMENTO	COMPOSIÇÃO	EXPOSIÇÃO		
				Severa (*)	Moderada (*)	Abrigada (*)
Moderadamente fraco, poroso	Base	talochado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5
		raspado ou texturado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5
		projectado seco	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5
	Acabamento	talochado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5
		raspado ou texturado	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5	1:1 a 2:5 a 9 (1:2,5 a 3) 1:5 a 8 1:4 a 6,5
		projectado seco	ci:ca:ar ci:ar+plast cia:ar+plast	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5	1:1:5 a 6 (1:2,5 a 3) 1:5 a 6 1:4 a 5

ci - cimento; cia - cimento de alvenaria; ca - cal aérea; ar - areia; plast - plastificante
* - Quando existe mais que um ligante dá-se entre parêntesis a dosagem ligante:areia

2.4.5 - Normalização e documentação normativa alemã

A Alemanha tem normas DIN de características dos constituintes [2.100N, 2.101N], de métodos de ensaio das argamassas e dos constituintes [2.103N, a 2.106N] e de exigências a satisfazer e de regras de execução para revestimentos de ligante mineral [2.43] e revestimentos de ligante sintético [2.107N].

A DIN 18 550 [2.42, 2.43] abrange os revestimentos de ligante mineral exteriores e interiores para paredes e tectos, pré-doseados ou a misturar em obra, aplicáveis sobre diversos suportes, entre os quais se incluem o betão, as alvenarias de tijolo ou de blocos de betão e divisórias interiores. Os revestimentos aplicáveis sobre materiais isolantes não são incluídos (excepto no que se refere ao betão leve). Consideram-se incluídos na norma revestimentos de isolamento térmico complementar constituídos por argamassas leves e revestimentos especiais resistentes ao fogo.

Na DIN 18 550 parte 1 define-se a terminologia relativa aos rebocos exteriores e interiores e as exigências a fixar, de acordo com a aplicação prevista. Na DIN 18 550 parte 2 estabelecem-se regras para a preparação e aplicação dos rebocos. Na parte 1 definem-se as características dos materiais constituintes, por vezes com recurso a normas DIN - caso do cimento [2.102N] e da cal [2.103N] -, outras vezes com base na própria DIN 18 550 - caso das areias e dos adjuvantes e aditivos - indicam-se as operações necessárias à preparação dos suportes, referem-se os tipos de armaduras e de redes para melhoria de aderência que devem ser usadas em alguns casos e estabelecem-se exigências para revestimentos exteriores e interiores no caso geral e em diversos casos especiais. Finalmente, seleccionam-se os sistemas de revestimento a usar em paredes exteriores, paredes interiores e tectos. Na parte 2 da mesma DIN definem-se regras e exigências relativas à constituição das argamassas a usar e à sua aplicação.

Nos quadros 2.6 e 2.7 sintetizam-se, respectivamente, as exigências definidas nesta DIN e os sistemas previstos e respectivos traços, para rebocos exteriores, nos casos que se consideraram relevantes para o nosso tipo de construção.

QUADRO 2.6 - Síntese das especificações para revestimentos de ligante mineral estabelecidos pela normalização alemã [2.42]

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICAÇÃO MÍNIMA	ESPECIFICAÇÕES ADICIONAIS
Aderência ao suporte	suficiente em relação ao suporte e às camadas intermédias	-
Resistência à compressão (Rc)	adequada ao suporte e localização	Argamassas de alta resistência: Rc ≥ 2,5 MPa; Argamassas para revestimento interior: Rc ≥ 1,0 MPa Argamassas de cal moderadamente hidráulica: Rc ≥ 1,0 MPa Argamassas de gesso: Rc ≤ 2,0 Argamassas de cal hidráulica ou de cimento de alvenaria: Rc ≤ 2,5 Argamassas de cimento: Rc ≤ 10
Resistência ao desgaste	adequada ao suporte e localização	Argamassas para revestimento interior com resistência melhorada ao desgaste: composições indicadas na norma
Condições de superfície	adequada ao suporte e localização	-
Coeficiente de capilaridade (w)	-	$w.sd \leq 0,2$ kg/m.h^{0,5} $w \leq 0,5$ kg/m^2.h^{0,5}
Permeabilidade ao vapor de água (sd)*	sd ≤ 2,0 m	sd ≤ 2,0 m
Resistência às acções climáticas	argamassas com as composições indicadas na norma ou prova de boa resistência	-

* - Embora a característica referida na norma seja a permeabilidade ao vapor de água a especificação é feita em termos de *espessura da camada de ar de difusão equivalente (sd)*, que mede o inverso da permeância e não a permeabilidade.

QUADRO 2.7 - Síntese das composições recomendadas para rebocos exteriores na DIN alemã [2.42]

CAMADA	COMPOSIÇÃO	TRAÇO (volumétrico) *	DOSAGEM LIG: AREIA
BASE	ci:ca:ar ci:ca:ar ci:ca:ar ci:ca:ar ci:ch:ar ci:ch:ar	0:1:3 a 4 0:1:3 a 4 + adj 1:1,5 a 2:9 a 11 1:1,5 a 2:9 a 11 + adj 0:1:3 a 4 0:1:3 a 4 + adj	1: 3 a 4
ACABAMENTO	ci:ca:ar ci:ca:ar ci:ca:ar ci:ca:ar ci:ch:ar ci:ch:ar	0:1:3 a 4 0:1:3 a 4 + adj 1:1,5 a 2:9 a 11 1:1,5 a 2:9 a 11 + adj 0:1:3 a 4 0:1:3 a 4 + adj	-
CAMADA ÚNICA	ci:ca:ar	1:0 a 0,25: 3 a 4	-

ci - cimento; ci(pr) - cimento pronto; ch - cal hidráulica; ca - cal aérea; ar - areia; adj - adjuvante

* - Traços determinados admitindo os seguintes valores para as massas volúmicas do cimento, cal aérea, cal hidráulica e areia de, respectivamente: γ_{ci} = 1000 kg/m^3, γ_{ca} = 500 kg/m^3, γ_{ch} = 800 a 1000 kg/m^3 (conforme se trate de cal com menor ou maior hidraulicidade) e γ_{ar} = 1500 kg/m^3

Como se vê pela análise do quadro 2.7 a filosofia da DIN é muito diferente da do DTU francês e da BS inglesa, verificando-se, nomeadamente, que são propostas composições muito menos diversificadas que nos documentos referidos e que não há distinções conforme o tipo de suporte. Por outro lado, e embora tal não seja visível no quadro muito simplificado apresentado, são em geral recomendadas composições para o conjunto das duas camadas (base + acabamento) e as dosagens são muito dependentes da utilização prevista, variando, por exemplo, conforme se destinem a revestimentos exteriores ou interiores de paredes, a revestimentos de tectos e ainda a revestimentos para determinados usos especiais. Vale ainda a pena referir que a camada de aderência, mineral ou orgânica, é recomendada, sendo no entanto a sua aplicação considerada como preparação do suporte e não como uma camada integrante do revestimento. Outras alternativas, como picagem do suporte ou aplicação de redes metálicas apropriadas, são, de resto, apresentadas em paralelo. Os adjuvantes fazem parte de algumas das composições prescritas, nomeadamente para conseguir revestimentos com características melhoradas de impermeabilização. Finalmente, admite-se que as exigências mínimas, nalguns casos, podem ser atingidas com uma única camada (além do crespido ou outro tratamento adequado do suporte).

Estabelecem-se especificações relativas à granulometria da areia para cada uma das camadas.

Argamassas com composições diferentes das indicadas, feitas em obra ou pré-doseadas em fábrica, são admitidas, desde que se prove verificarem as especificações de adequabilidade ao uso ("suitability requirements") descritas na DIN 18 557 [2.106N].

2.4.6 - Normalização e documentação normativa austríaca

Na norma austríaca ONORM B 3346 [2.44] são definidas as condições de uso, as exigências e as regras de aplicação para a execução de revestimentos de ligante mineral para paramentos exteriores e interiores de paredes. Estão incluídos os monocamada, os revestimentos delgados e os estuques de gesso, mas não os revestimentos específicos para renovação, isolamento acústico ou para aplicação sobre suporte isolante para constituição de sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior (ETICS). Define-se a terminologia relativa a estes revestimentos e às suas técnicas de aplicação e descrevem-se as características

das argamassas a usar, dos seus constituintes e dos materiais de reforço e de suporte, nalguns casos remetendo para as respectivas normas austríacas de exigências [2.108N a 2.122N]. São amplamente descritos os agentes de promoção de aderência (adjuvantes, primários, argamassas especiais) e os diversos materiais para reforço (redes de fibra de vidro e metálicas) e suporte secundário (redes metálicas, painéis de gesso, placas de aglomerado de partículas ou de fibras de madeira, etc.). As exigências a satisfazer pelo suporte e as respectivas tolerâncias e métodos de medida, são exaustivamente descritos em capítulo próprio, para o caso geral e especificamente para cada um dos tipos de suporte abrangidos pelo documento. Os trabalhos de preparação do suporte, incluindo os pré-tratamentos destinados a garantir aderência apropriados a cada tipo de suporte, são também tratados neste capítulo. As regras de aplicação dos revestimentos, as condições climáticas a respeitar, as camadas e respectivos tempos de secagem e os trabalhos complementares a executar são referidos. Finalmente, estabelecem-se especificações para o revestimento acabado, que são particularmente rigorosas no que diz respeito aos ítens que influenciam o aspecto estético, como a planeza, a verticalidade e a rectidão das arestas, e de carácter sobretudo qualitativo no que se refere aos restantes aspectos. Neste documento não são recomendados traços de argamassas a usar e, tanto quanto foi possível averiguar, não existem outros documentos austríacos de carácter normativo que refiram composições quantificadas de argamassas de revestimento.

2.4.7 - Normalização e documentação normativa espanhola

Em Espanha existem normas UNE de características e ensaios dos constituintes das argamassas e dos elementos de alvenaria. Tal como a portuguesa, a normalização espanhola neste domínio não inclui normas ou documentos normativos que estabeleçam especificações e regras de aplicação para rebocos. No que se refere aos revestimentos pré-doseados, com destaque para os revestimentos tipo monocamada, são, como no nosso País, abrangidos pelo procedimento de homologação ("Documento de Idoneidad Tecnica"), da responsabilidade do IETcc ("Instituto de Ciências de la Construccion Eduardo Torroja").

2.4.8 - Normalização e documentação normativa italiana

A situação em Itália é semelhante à que se encontra em Espanha e Portugal, ou seja, existem normas UNI de características e ensaios dos constituintes dos rebocos, nomeadamente para o cimento, a cal e a areia, e ainda normas de ensaios para as argamassas, mas não se conhecem documentos normativos com especificações e regras de aplicação para rebocos. Os revestimentos pré-doseados em fábrica são, também em Itália, sujeitos a homologação ("Certificato di Idoneitá Tecnica") pelo ICITE ("Istituto Centrale per l'Industrializzazione e la Tecnologia Edillizia").

2.4.9 - Normalização e documentação normativa europeia

Encontram-se em preparação várias normas europeias no CEN ("Comité Européen de Normalisation") relativas a rebocos, sendo uma de exigências [2.45], várias de ensaios [2.123N a 2.141N] e uma com regras de concepção e execução [2.46]. Preparam-se também normas complementares relativas a elementos acessórios, como redes metálicas e perfis protectores de arestas de paredes [2.142N e 2.143N].

Uma grande parte dos projectos de normas de ensaio reúnem já, neste momento, um razoável consenso dos peritos dos países participantes, após muitas sessões de trabalho em que se foram fazendo acertos. No entanto, embora as normas em vias de aprovação sejam já em grande número, é preciso notar que os ensaios menos correntes e, principalmente, mais *de desempenho*, se encontram bastante atrasados, não tendo sido ainda possível concordar em métodos de ensaio para avaliar, por exemplo, a *durabilidade* [2.136N] e a *capacidade de impermeabilização à água da chuva* [2.137N]. No que se refere à susceptibilidade à fendilhação, não houve, tanto quanto se julga saber, nenhuma tentativa de definir um ensaio apropriado.

Por outro lado, a norma de exigências está longe de reunir a aprovação dos peritos dos países participantes; parece ter-se optado por eliminar as exigências em relação às quais o consenso se afigurava difícil, o que pode ser uma atitude pragmática, mas resultou, crê-se, num empobrecimento do documento. Acresce que, sendo os revestimentos de paredes de

ligante mineral, nos países mais activos/fortes do grupo, obtidos com produtos pré-doseados em fábrica, foi muito maior o esforço desenvolvido para melhorar o projecto de norma para este tipo de produtos do que para os rebocos tradicionais, que constituem a maior fatia dos rebocos no nosso País. Além disso, nesses países, há indícios da criação de *marcas* nacionais, com base na respectiva normalização pré-existente, que, sendo, provavelmente, mais exigentes que a *marcação CE* (resultante da comprovação de conformidade com as normas EN), terão tendência para se sobrepor a esta. Para Portugal tal situação é muito desfavorável, já que, não tendo normalização própria já aprovada, está impossibilitado, pelas regras da CE, de a promulgar neste momento e, se não forem tomadas rapidamente medidas adequadas, ficamos totalmente sujeitos à *não exigência* das normas EN que venham a sair.

Os ensaios e exigências propostos pelo CEN para os rebocos são os que se compilam no quadro 2.8.

As exigências propostas não contemplam aspectos tão importantes do comportamento dos revestimentos como a susceptibilidade à fendilhação, a aderência ao suporte e a resistência ao choque. Quanto à capacidade de impermeabilização, embora se estabeleça uma classificação com base no coeficiente de capilaridade, esta afigura-se insuficiente, já que, na prática, se verificou que ficam enquadrados na classe *sem exigências*, todos os revestimentos tradicionais - com coeficientes de capilaridade variáveis entre 3 e 17 $kg/m^2.h^{1/2}$ - e, ainda, parte dos revestimentos pré-doseados fabricados no nosso País e testados no LNEC, apesar de estes apresentarem características de impermeabilização claramente superiores aos tradicionais - valores da ordem de 2,0 a 3,5 $kg/m^2.h^{1/2}$ (ver quadro 2.1). Acresce ainda que o estabelecimento de uma classificação abrangente que não tem em conta o número de camadas e as espessuras normais dos revestimentos que são, naturalmente, diferentes para os revestimentos tradicionais - aplicáveis em, pelo menos, 3 camadas, como foi referido e com espessuras totais da ordem de 25 a 30 mm - e os monocamada - aplicáveis em camada única e com espessuras da ordem de 10 mm - também não parece muito correcta em termos de avaliação da capacidade de impermeabilização.

QUADRO 2.8 - Exigências para os revestimentos de ligantes minerais consignadas no mais actual projecto de norma europeia de exigências [2.45]

CARACTERÍSTICA	CLASSIFICAÇÃO	MÉTODO DE ENSAIO	EXIGÊNCIA	
			GP (1)	Outros (1)
Massa volúmica aparente (Kg/dm^3)	-	prEN 1015-10	-	LW: ≤ 1,3
Resistência à compressão - Rc (MPa)	CS I - Rc 0,4 a 2,5 CS II - Rc 1,5 a 5,0 CS III - Rc 3,5 a 7,5 CS IV - Rc > 6	prEN 1015-11	-	-
Absorção de água por capilaridade - C ($kg/m^2.h^{1/2}$)	W0 - sem exigências W1 - C ≤ 2,0 W2 - C ≤ 1,0	prEN 1015-18	W0-W2	LW, CR: W0-W2 OC: W1-W2 T1, T2: W1 R: Q > 0,3 kg/m^2 (2) P < 5 mm (3)
Factor de permeabilidade ao vapor de água (4)	-	prEN 1015-19	-	R, T1, T2: < 12
Condutibilidade térmica (W/(m.K))	T1: λ ≤ 0,1 T2: λ ≤ 0,2	prEN em preparação	-	T1: λ ≤ 0,1 T2: λ ≤ 0,2
Combustibilidade	A - não-combustível B - não facilmente combustível	prEN em preparação	-	LW, T1: B

1 - Designações das argamassas de revestimento, de acordo com as propriedades ou objectivo de aplicação:
GP - Aplicações gerais (general purpose); LW - Leve (lightweight); CR - Colorida (coloured rendering); OC - Monocamada (one coat); R - Renovação (renovation); T - Isolamento térmico (thermal insulating).

2 - Q - Quantidade de água absorvida por capilaridade ao fim de 24 h.

3 - P - Profundidade de penetração da água.

4 - O *Factor de permeabilidade ao vapor de água* não está definido nem na prEN 998-1, nem na prEN 1015-19, devendo tratar-se de lapso, para o qual já foi alertado o grupo de trabalho.

A prEN que define regras de concepção e execução [2.46] - de que se conhece um primeiro "draft", de Julho de 1996 - é, por outro lado, pelo menos na sua versão actual, um documento bastante completo, aparentemente baseado na BS inglesa [2.17] e na DIN alemã [2.42], já aqui analisadas. É aplicável a revestimentos de ligante mineral e misto sobre todos os tipos comuns de suportes, novos ou antigos, com exclusão de revestimentos para tanques ou outros equipamentos destinados a conter líquidos. Definem-se os princípios essenciais a ter em conta na concepção e descrevem-se os principais constituintes a empregar, com referência, em quase todos os casos, às ENV aplicáveis (ENV 197-1:1992 e ENV 413-1:1994 para os cimentos [2.144N e 2.145N]; ENV 459-1:1993 para cais [2.146N]; ENV em preparação para as areias e inertes leves [2.147N e 2.148N], ENV 934-3 para os adjuvantes [2.149N] e para as armaduras e elementos de protecção e fixação metálicos [2.150N e 2.151N]). As características da água de amassadura, dos pigmentos, das fibras - metálicas, minerais e poliméricas - e das armaduras não-metálicas são sucintamente referidas na norma de concepção e execução.

Os vários tipos de suportes considerados são descritos e classificados de acordo com as características mais relevantes para a aplicação dos revestimentos. Referem-se, também pormenorizadamente, as acções de preparação do suporte convenientes para cada um dos tipos definidos, incluindo o tratamento de aderência (crespido, camada adesiva, picagem, aplicação de rede metálica) e os principais cuidados a ter com cada um. São discriminados os critérios de selecção do reboco a usar, no que se refere à composição, número e espessura das camadas, acabamentos, técnicas de coloração e de execução de efeitos ornamentais. As condições de exposição e a protecção dos revestimentos das acções climáticas com recurso a elementos arquitectónicos apropriados são também objecto de descrição detalhada. Os aspectos mais relevantes do comportamento dos revestimentos são abordados e são discriminados os principais factores que os condicionam: resistência à fendilhação, comportamento ao fogo, resistência à penetração de água, resistência à acção dos sais solúveis, efeitos da poluição atmosférica, comportamento à acção do gelo, propriedades térmicas e acústicas e durabilidade. A preparação das misturas, a aplicação e a cura são pormenorizadamente descritas, bem como os cuidados de manutenção e as eventuais acções de reparação a realizar ao longo do tempo de vida útil do revestimento.

Neste documento não são definidas dosagens mas fazem-se recomendações gerais sobre o tipo de misturas a usar em diversas situações.

2.4.10 - Normalização americana (Guia ACI)

Os Estados Unidos têm documentação normativa muito completa no que se refere aos rebocos. Existe um Guia ACI, preparado pelo Comité 524 em 1993 [2.21], relativo a revestimentos de ligante mineral com base em cimento portland, com recomendações para preparação de especificações de projecto. Existem também muitas normas ASTM ("American Society for Testing and Materials") de características dos diversos constituintes e de ensaios dos constituintes e das argamassas. Uma ASTM de especificações para aplicação de revestimentos com base em cimento portland [2.153N] e regras de aplicação em obra de revestimentos de paredes e tectos [2.154N] completam um conjunto normativo que se afigura exaustivo.

Embora o objectivo anunciado do Guia ACI seja a recomendação de exigências mínimas para revestimentos sobre suportes contínuos ou descontínuos de nível satisfatório, trata-se de um documento bastante completo, quando comparado mesmo com os documentos mais detalhados europeus. No seu âmbito incluem-se os rebocos pré-doseados, mas excluem-se os produtos modificados com resinas (revestimentos de ligante misto) ou com base em resinas e os produtos aplicáveis sobre isolante (ETICS). São referidas as propriedades desejáveis numa argamassa de reboco, quer no estado fresco quer endurecido, descrevem-se os materiais constituintes - cimento, cal, areia, água, adjuvantes e aditivos, fibras e promotores de aderência - e as características que se lhes devem exigir, quase sempre citando normas ASTM aplicáveis [2.155N a 2.166N]. Segue-se uma descrição pormenorizada dos suportes constituídos por redes metálicas e dos acessórios (metálicos ou plásticos, nomeadamente de PVC) - na maior parte dos casos também com referência a normas ASTM aplicáveis [2.167N a 2.171N] - a usar para melhorar o comportamento do reboco, contribuindo para a protecção de cantos, arestas, peitoris, etc. ou para um escoamento das águas controlado de forma a limitar os riscos de deterioração da parede. São feitas diversas considerações para a concepção dos rebocos, nomeadamente no que diz respeito a juntas, barreiras de impermeabilização a colocar eventualmente, espaçamentos de barras em suportes descontínuos, espessuras adequadas para aplicação em paredes e em tectos, etc. A aplicação em suportes descontínuos metálicos é objecto de um capítulo separado, assim como a preparação das superfícies de suportes contínuos (betão e os vários tipos de alvenarias), para que ofereçam boas condições de aderência. São apresentadas recomendações para a preparação das argamassas, quer no que diz respeito às amassaduras, quer à dosagem. São transcritos no Guia os quadros com proporções de misturas da ASTM C 926 [2.153N] e do UBC (Uniform Building Code) [2.154N]. São feitas recomendações para aplicação das diversas camadas, incluindo os tempos de secagem entre elas e descrevem-se os vários tipos de acabamentos, referindo técnicas de coloração e de execução de texturas. São referidos os cuidados a ter para garantir a cura em condições satisfatórias. São descritos os ensaios a efectuar sobre os materiais e as verificações a fazer em obra sobre o reboco aplicado, para avaliar a sua qualidade. Finalmente, são recomendadas técnicas de reparação parcial e total e descritos os principais utensílios e equipamentos usados na aplicação de rebocos.

No quadro 2.9 sintetizam-se as especificações americanas de misturas para argamassas de reboco exterior e interior [2.21].

QUADRO 2.9 - Síntese das composições recomendadas para rebocos pelo Guia do ACI [2.21]

TIPO DE SUPORTE	CAMADA	COMPOSIÇÃO (1)	TRAÇO	DOSAGEM LIG:AR
Baixa absorção (elementos cerâmicos densos e lisos)	1ª	ci:ca:ar ci:ci(alv):ar ci:ci(r):ar	1:0 a 0,75:2,5 a 7 1:1 a 2:5 a 12 1:1:5 a 8	1:2,5 a 4 1:2,5 a 4 1:2,5 a 4
	2ª	ci:ca:ar ci:ci(alv):ar ci(alv):ar ci:ci(r):ar ci(r):ar	1:0 a 1,5:3 a 12,5 1:1 a 2:6 a 15 1:3 a 5 1:1:6 a 10 1:3 a 5	1:3 a 5 1:3 a 5 1:3 a 5 1:3 a 5 1:3 a 5
Alta absorção (alvenaria de blocos de betão ou de tijolo poroso)	1ª	ci:ca:ar ci(alv):ar ci(r):ar	1:0,75 a 1,5:4,5 a 10 1:2,5 a 4 1:2,5 a 4	1:2,5 a 4 1:2,5 a 4 1:2,5 a 4
	2ª	ci:ca:ar ci:ci(alv):ar ci(alv):ar ci(r):ar	1:0 a 1,5:3 a 12,5 1:1 a 2:6 a 15 1:3 a 5 1:3 a 5	1:3 a 5 1:3 a 5 1:3 a 5 1:3 a 5
Redes metálicas	1ª	ci:ca:ar ci:ci(alv):arci(alv):ar ci:ci(r):ar	1:0 a 1,5:2,5 a 10 1:1 a 2:5 a 12 1:2,5 a 4 1:1:5 a 8	1:2,5 a 4 1:2,5 a 4 1:2,5 a 4 1:2,5 a 4
	2ª	ci:ca:ar ci:ci(alv):ar ci(alv):ar ci:ci(r):ar ci(r):ar	1:0 a 1,5:3 a 12,5 1:1 a 2:6 a 15 1:3 a 5 1:1:6 a 10 1:3 a 5	1:3 a 5 1:3 a 5 1:3 a 5 1:3 a 5 1:3 a 5
Sem distinção de suporte (2) (3)	*1ª*	*ci:ar(+plast)* *ci:ca:ar*	*1:4* *1:1:8*	*1:4* *1:4*
	2ª	*ci:ar(+plast)* *ci:ca:ar*	*1:5* *1:1:9*	*1:5* *1:4,5*
	3ª (4)	*ci:ar(+plast)* *ci:ca:ar*	*1:3* *1:1:6*	*1:3* *1:3*

1 - designações: ci - cimento ; ci(alv) - cimento de alvenaria; ci(r) - cimento com resina; ch - cal hidráulica; ca - cal aérea; ar - areia; plast - plastificante

2 - *dosagens a itálico: UBC [2.151N]; estas dosagens não têm distinção do suporte, portanto podem ser consideradas como idênticas para todos os tipos de suporte*

3 - *as dosagens indicadas pelo UBC para cal e areia são máximos considerados admissíveis (ou seja podem-se usar menores quantidades de cal e de areia, portanto traços mais fortes)*

4 - *o UBC admite uma camada de acabamento mais rica em ligante que as camadas que a antecedem, o que contraria a regra da degressividade do teor de ligante, que, no entanto, é referida no Guia.*

2.4.11 - Aspectos a destacar das várias normalizações analisadas

Como principais aspectos a destacar dos documentos normativos com regras de aplicação e exigências analisados - o DTU 26.1 francês, a BS 5262 inglesa, a DIN 18 550 alemã, a ONORM B 3346 austríaca, a prEN europeia para concepção, preparação e aplicação de rebocos europeia (documento de trabalho) e o Guia do ACI americano - referem-se os seguintes:

- Os documentos analisados abrangem os revestimentos doseados em obra, com constituintes que podem incluir: cimento, cal (hidráulica ou aérea, em pó ou em pasta), ou eventualmente outros ligantes minerais, areia e alguns adjuvantes - entre os quais os pigmentos minerais - e alguns aditivos - entre os quais as fibras. Os inertes leves e as pozolanas apenas vêm referidos nalguns documentos (a BS, a DIN, a prEN e o Guia do ACI). Normalmente, são também abrangidos os rebocos pré-doseados em fábrica, mas de composição e aplicação idêntica aos doseados em obra, o que exclui os *monocamada* (com excepção da ONORM e da prEN, que os incluem). Nalguns casos são abrangidos os revestimentos com base em gesso, para paramentos exteriores ou interiores (DTU, DIN e ONORM). Os revestimentos com resinas em quantidade suficiente para serem considerados de ligante misto e os revestimentos leves de isolamento térmico apenas são incluídos nalguns casos (ONORM e prEN), o mesmo acontecendo com os revestimentos de protecção contra o fogo (DIN), enquanto os revestimentos aplicáveis sobre isolante (nos sistemas ETICS ou noutras aplicações) e os revestimentos de isolamento acústico ou outros destinados a aplicações específicas são sempre excluídos.

- Em todos os casos, de forma mais ou menos completa são descritas as características exigíveis aos constituintes dos rebocos, frequentemente remetendo para normas de características desses materiais.

- Os suportes, respectivas características relevantes para aplicação do revestimento e tratamentos a executar antes da aplicação do reboco, são objecto de descrições mais ou menos completas em todos os documentos. Em geral são abrangidos os suportes de betão, de alvenarias de tijolo e blocos de betão de inertes correntes ou leves e de betão celular autoclavado, alguns tipos de painéis, as redes e os fasquiados metálicos ou de madeira. As alvenarias antigas são também previstas nalguns casos. Prevê-se sempre a limpeza cuidada, a correcção de defeitos de planeza e a realização de operações de garantia de boa aderência, através da aplicação de uma camada de aderência, do tipo crespido ou primário com características de adesividade conferidas por resinas, ou através de outras técnicas, como o uso de redes metálicas ou a criação de rugosidades por exemplo por *picagem*. O humedecimento leve dos suportes absorventes antes da

aplicação do revestimento, pelo menos em tempo quente, é quase sempre preconizado, exceptuando-se o Guia ACI que não refere essa questão. Para os suportes novos é recomendado, de um modo geral, um período de espera de, pelo menos, 1 mês, antes da aplicação do revestimento. A ONORM prevê mesmo 8 semanas a 80 dias. O Guia ACI apenas estabelece o período de espera de 1 mês para os suportes de betão novo.

- As regras de aplicação constituem um capítulo importante em todos os documentos referidos. As condições atmosféricas em que, de um modo geral, se considera deverem evitar-se as aplicações de rebocos, ou, pelo menos, tomar precauções especiais, são as seguintes:
  - períodos de gelo e, em geral, temperaturas inferiores a 5°C (DTU, DIN, ONORM, Guia ACI);
  - temperaturas superiores a 30°C (DTU);
  - vento quente e seco (DTU).

- Os cuidados a ter com as juntas do suporte, com as zonas de vãos e outras aberturas, com as ligações entre materiais diferentes e com outros pontos singulares do suporte ou do revestimento são consignados também em quase todos os documentos (exceptua-se a DIN que não refere este aspecto), normalmente com prescrição de uso de perfis apropriados ou redes de reforço.

- Normalmente são preconizadas as seguintes camadas, para além da preparação do suporte que em geral inclui uma camada de aderência (crespido ou camada adesiva): camada de base (uma ou mais, conforme a espessura necessária) e camada de acabamento (que pode ser substituída, nalguns casos, por outro tipo de revestimento decorativo). É sempre referida a regra da degressividade do teor de ligante. Geralmente são recomendados tempos de secagem mínimos entre camadas (variáveis entre 2 e 14 dias conforme as camadas e os documentos) excepto na norma austríaca e no Guia ACI, que prevêem, como alternativa, a possibilidade da técnica de aplicação designado na ONORM por "wet on wet" e no Guia ACI por "double back application" e que consiste em aplicar uma camada sobre a anterior ainda fresca, apenas com resistência suficiente para a suportar.

- São quase sempre preconizados cuidados com a cura do revestimento após aplicação, consistindo em humedecimento periódico por pulverização ligeira com água ou em cobertura com folhas ou membranas apropriadas para evitar a dessecação demasiado rápida, excepto na BS, em que não se refere essa questão.

- A descrição de elementos secundários destinados a melhorar o desempenho dos rebocos é, quase sempre, bastante completa: armaduras metálicas, sintéticas ou minerais, nalguns casos perfis de aresta, de junta, de peitoril (DTU francês, prEN europeia, Guia ACI), ou, ainda elementos arquitectónicos de protecção (BS, ONORM, prEN) (ver fig. 2.11).

- Especificações da argamassa e do revestimento aplicado aparecem nalguns casos. Frequentemente, optou-se por especificações fundamentalmente qualitativas complementadas por recomendações relativas às composições e traços a usar, para cada tipo de suporte e para as diferentes localizações e condições de exposição (ver quadros 2.2, 2.3, 2.5, 2.7 e 2.9).

  As exigências mais generalizadas são as que incidem no aspecto final - planeza, regularidade, ausência de manchas, homogeneidade de coloração e textura - e na aderência ao suporte. Outras exigências, entre as quais a capacidade de impermeabilização, a resistência à fendilhação, a resistência ao efeito dos sais, do gelo e da poluição atmosférica, a resistência aos efeitos do clima, a resistência ao desgaste e a permeabilidade ao vapor de água, são citadas nalguns dos documentos.

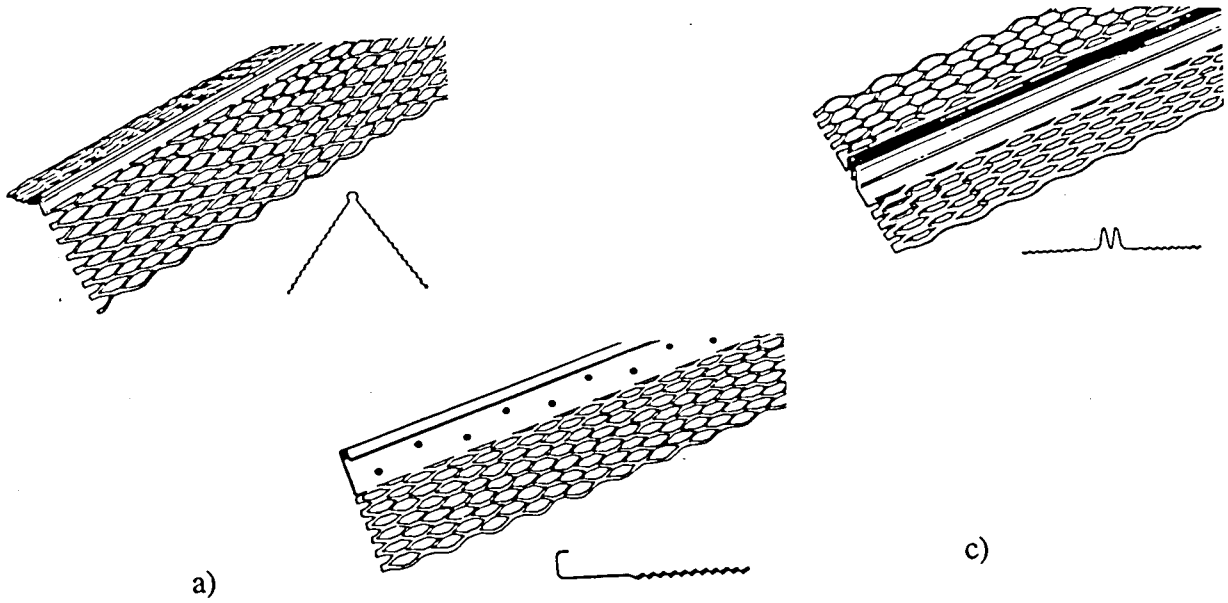


Fig. 2.11 - Exemplos de elementos secundários para reforço e protecção de rebocos recomendados nalguns dos documentos citados.
a) perfil de aresta; b) perfil de extremo de reboco; c) perfil de junta de dilatação.

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 2

[2.1] - LUCAS, J. Carvalho - **Revestimentos para paramentos interiores de paredes de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado. Vol I.** Lisboa, LNEC, 1986. Tese para obtenção do grau de especialista e acesso à categoria de Investigador Auxiliar do LNEC.

[2.2] - LUCAS, J. Carvalho - **Classificação e descrição geral de revestimentos para paredes de alvenaria ou de betão.** Lisboa, LNEC, 1990. ITE 24.

[2.3] - LOGEAIS, L. - **L'étanchéité à l'eau des façades lourdes.** Qualité-Construction, Édition E. G., 1988.

[2.4] - THOMASSON, F. - **Les enduits monocouches à base de liants hydrauliques.** Paris, Unitecna France, septembre 1982.

[2.5] - PAIVA, J. Vasconcelos - **Humidade nas edificações.** Lisboa, LNEC, 1969. Tese para obtenção do grau de especialista e acesso à categoria de Investigador Auxiliar do LNEC.

[2.6] - SOUSA, Hipólito; CARVALHO, Fernanda; ABRANTES, VÍTOR - **Rain watertightness of single-leaf and cavity walls.** "In" International Symposium on Moisture Problems in Building Walls, Proceedings. Porto, September 1995, págs. 556-567.

[2.7] - CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB) - **Note d'information sur les caractéristiques et le comportement des enduits extérieurs d'imperméabilisation de murs à base de liants hidraulyques.** Cahiers du CSTB, Paris, (230), Cahier 1778, juin 1982.

[2.8] - MALATRAIT, M., C. - **Les échanges liant, eau, air, dans le cas des enduits d'imperméabilisation et décoration de façades. Thèse.** CSTB. Paris, 1989.

[2.9] - HENRIQUES, Fernando M. A. - **Humidade em paredes.** Edifícios, Série Conservação e Reabilitação. Lisboa, LNEC, 1995. 2ª edição.

[2.10] - VIEGAS, João - **Ventilação natural de edifícios de habitação.** Edifícios, Série Conforto Ambiental. Lisboa, LNEC, 1995.

[2.11] - VEIGA, Maria do Rosário; CARVALHO, Fernanda - **Argamassas de revestimento na reabilitação do património urbano.** "In" 2º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Comunicações. Lisboa, LNEC, Junho/ Julho de 1994. Vol. I, págs. 195-206.

[2.12] - VEIGA, M. Rosário - **Caracterização experimental de argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos.** Relatório. Lisboa, LNEC, Dezembro de 1993.

[2.13] - VEIGA, M. Rosário; CARVALHO, Fernanda R. - **Caracterização experimental de argamassas com cal hidráulica para revestimento de paredes.** Relatório. Lisboa, LNEC, Março de 1994.

[2.14] - GONÇALVES, Teresa - **Desenvolvimento de uma Base de Dados para revestimentos de paredes de ligantes minerais. Lisboa, LNEC, 1996.** Trabalho no âmbito do 5º Curso de Mestrado em Construção do IST.

[2.15] - VILHENA, António; VEIGA, M. Rosário - **Bases para a homologação de revestimentos de impermeabilização de ligantes sintéticos para paramentos exteriores de paredes.** Relatório. Lisboa, LNEC, Julho de 1995.

[2.16] - ABRANTES, Vítor; CALEJO, Rui. - **Memorando sobre Manutenção e Reabilitação de Edifícios,** "In" Manutenção e Reabilitação de Edifícios, Textos de apoio às 4ªs Jornadas de Construções Civis, Secção de Construções Civis da FEUP, Porto, FEUP, Maio de 1996.

[2.17] - BRITISH STANDARD INSTITUTION (BSI) - **Code of practice for external renderings.** London, BSI, 1991. BS 5262:1991.

[2.18] - CSTB - **Modalités d'essais des enduits extérieurs d'imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques.** Cahiers du CSTB, Paris, (230), Cahier 1779, juin 1982.

[2.19] - VILHENA, António; VEIGA, M. Rosário - **Bases para a homologação de revestimentos pré-doseados de ligante mineral com base em cimento.** Relatório. Lisboa, LNEC, Outubro de 1995.

[2.20] - LUCAS, J. Carvalho; PAIVA, J. Vasconcelos - **Fichas de ensaio de revestimentos de paredes com base em ligantes sintéticos.** Lisboa, LNEC, Dezembro de 1980. Relatório.

[2.21] - ACI COMMITTEE 524 - **Guide to Portland Cement Plastering.** American Concrete Institute (ACI) Materials Journal, Jan.-Feb. 1993, págs. 69-93.

[2.22] - TAMIN, P. F. - **Étude du comportement mécanique des revêtements de façade. Enduits.** Thèse de doctorat. Paris, École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), décembre 1986.

[2.23] - DODSON, V. - **Concrete admixtures.** Structural Engineering Series. Van Nostrand Reinhold. New York, 1990.

[2.24] - TAYLOR, G. D. - **Construction Materials.** Longman Scientific & Technical. London, 1991.

[2.25] - COUTINHO, A. S. - **Fabrico e propriedades do betão.** Vol. I. Lisboa, LNEC, 1988.

[2.26] - CARVALHO, Fernanda - **Comportamento mecânico de alvenarias. Influência de alguns parâmetros nas suas resistências à compressão e ao corte.** Lisboa, LNEC, Maio de 1990. Tese para obtenção do grau de Especialista e acesso à categoria de Investigador Auxiliar do LNEC.

[2.27] - UNIÃO EUROPEIA PARA A APRECIAÇÃO TÉCNICA NA CONSTRUÇÃO (UEAtc) - **Regra UEAtc relativa à confirmação de homologação.** Lisboa, LNEC, Novembro de 1995 (tradução do documento do Secretariado Geral da UEAtc, de Abril de 1994).

[2.28] - GONÇALVES, A. S.; GOMES, Ruy J. - **Revestimentos exteriores de argamassa.** Lisboa, LNEC, 1968.

[2.29] - LNEC - **Revestimentos de paredes. Ensaio de arrancamento por tracção.** Lisboa, LNEC, Abril de 1986. FE Pa 36.

[2.30] - LUCAS, J. Carvalho - **Exigências funcionais de revestimentos de paredes.** Lisboa, LNEC, 1990. ITE 25.

[2.31] - VEIGA, M. Rosário; LUCAS, J.Carvalho; PAIVA, J.V., FARIA, P.; DUARTE, J.P. - **Curso de especialização sobre revestimentos de paredes. 1º Módulo.** Lisboa, LNEC, Novembro de 1990.

[2.32] - GROUPE DE COORDINATION DES TEXTES TECHNIQUES - **Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne. Cahier des clauses techniques.** Paris, CSTB, Cahiers du CSTB, (309), Cahier 2413, mai 1990. Document Technique Unifié (DTU) nº 26.1.

[2.33] - COMISSION CHARGÉE DE FORMULER DES AVIS TECHNIQUES (CCFAT) - **Enduits extérieurs d'imperméabilisation de mur à base de liant hydraulique. Cahier des prescriptions techniques d'emploi et de mise en oeuvre.** Cahiers du CSTB, Paris, (317), Cahier 2477, mars 1991.

[2.34] - CSTB - **Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation. Modalités d'essais.** Cahiers du CSTB, Paris, (341), Cahier 2669-4, juillet-août 1993.

[2.35] - CSTB - **Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation. Réglement particulier. Réglement technique.** CSTB, Paris, octobre 1992.

[2.36] - CCFAT - **Classifications des caractéristiques des enduits d'imperméabilisation de façades.** Cahiers du CSTB, Paris, (307), Cahier 2401, mars 1990.

[2.37] - CSTB - **Conditions d'emploi et de mise en oeuvre des enduits d'imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques faisant l'objet d'un avis technique.** Cahiers du CSTB, Paris, (230), Cahier 1777, juin 1982.

[2.38] - FARIA, Paulina. - **Revestimentos de impermeabilização de paredes à base de ligantes minerais. Modelização experimental de revestimentos aplicados sobre um suporte.** Tese de Mestrado. Lisboa, IST e LNEC, 1993.

[2.39] - OUZIT, M. - **Contribution à l'étude du comportement mécanique des enduits de façade à base de liants hydrauliques.** Thèse de doctorat. Paris, 1990.

[2.40] - BSI - **Specification for ready-mixed building mortars.** London, BSI, 1986. BS 4721:1981 (1986).

[2.41] - BSI - **Specification for dry-packaged cementitious mixes. Part 2. Pré-packed mortar-mixes.** London, BSI, 1980. BS 5838:1980

[2.42] - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG (DIN) - **Plaster. Terminology and requirements.** Berlin, DIN, January 1985. DIN 18 550 - Part 1.

[2.43] - DIN - **Plaster. Plasters made of mortars containing mineral binders. Application.** Berlin, DIN, January 1985. DIN 18 550 - Part 2.

[2.44] - OSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (ONORM) - **Rendering and plastering mortar. Directives for use and process.** Wien, ONORM, November 1993. ONORM B 3346.

[2.45] - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) TC 125 WG2/TG1 - **Specification for mortar for masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar.** Brussels, January 1995. PrEN 998-1 (documento de trabalho).

[2.46] - CEN TC 125 JWG5 - **The design, preparation and application of external renderings.** Brussels, July 1996. PrEN (documento de trabalho).

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR DO CAPÍTULO 2

(NORMAS REFERIDAS NO TEXTO)

[2.1N] - INSTITUTO PORTUGUÊS DE QUALIDADE (IPQ) - **Métodos de ensaios de cimentos. Determinação das resistências mecânicas.** Lisboa, IPQ, 1990. NP EN 196.1.

[2.2N] - IPQ - **Métodos de ensaios de cimentos. Análise química de cimentos.** Lisboa, IPQ, 1990. NP EN 196.2.

[2.3N] - IPQ - **Métodos de ensaios de cimentos. Determinação do tempo de presa e da expansibilidade.** Lisboa, IPQ, 1990. NP EN 196.3.

[2.4N] - IPQ - **Métodos de ensaios de cimentos. Determinação quantitativa dos constituintes.** Lisboa, IPQ, 1990. NP EN 196.4.

[2.5N] - IPQ - **Métodos de ensaios de cimentos. Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos.** Lisboa, IPQ, 1990. NP EN 196.5.

[2.6N] - IPQ - **Métodos de ensaios de cimentos. Determinação da finura.** Lisboa, IPQ, 1990. NP EN 196.6.

[2.7N] - IPQ - **Métodos de ensaios de cimentos. Métodos de colheita e preparação de amostras de cimento.** Lisboa, IPQ, 1990. NP EN 196.7.

[2.8N] - IPQ - **Métodos de ensaios de cimentos. Determinação do teor em cloretos, dióxido de carbono e álcalis do cimento.** IPQ, 1990. NP EN 196.21.

[2.9N] - INSPECÇÃO GERAL DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS E INDUSTRIAIS (IGPAI) - **Cimento Portland normal. Determinação do teor em magnésio. Processo complexométrico.** Lisboa, IGPAI, 1973. NP 952.

[2.10N] - IPQ - **Cimentos. Definições, composição, especificações e critérios de conformidade.** Lisboa, IPQ, 1991. NP 2064.

[2.11N] - IPQ - **Cimentos. Condições de fornecimento e recepção.** Lisboa, IPQ, 1991. NP 2065.

[2.12N] - IPQ - **Cimentos brancos. Composição, tipos, características e verificação da conformidade.** Lisboa, IPQ, 1996. NP 4326.

[2.13N] - LNEC - **Cimentos. Determinação da massa volúmica.** Lisboa, LNEC, 1979. Especificação LNEC E 64.

[2.14N] - LNEC - **Cimentos. Determinação da superfície específica Blaine.** Lisboa, LNEC, 1980. Especificação LNEC E 65.

[2.15N] - LNEC - **Cimentos. Preparação da pasta normal.** Lisboa, LNEC, 1979. Especificação LNEC E 328.

[2.16N] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Pesquisa da matéria orgânica pelo processo do ácido titânico.** Lisboa, IGPAI, 1964. NP 85.

[2.17N] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Determinação do teor em partículas muito finas e matérias solúveis.** Lisboa, IGPAI, 1972. NP 86.

[2.18N] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias.** Lisboa, IGPAI, 1973. NP 954.

[2.19N] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Determinação da baridade.** Lisboa, IGPAI, 1973. NP 955.

[2.20N] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Determinação dos teores em água total e em água superficial.** Lisboa, IGPAI, 1973. NP 956.

[2.21N] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Determinação dos teores em água superficial de areias.** Lisboa, IGPAI, 1973. NP 957.

[2.22N] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Análise granulométrica.** Lisboa, IGPAI, 1976. NP 1379.

[2.23N] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Determinação do teor de partículas friáveis. Lisboa,** IGPAI, 1976. NP 1380.

[2.24N] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Ensaio de reactividade potencial com os álcalis do ligante. Processo da barra de argamassa.** Lisboa, IGPAI, 1976. NP 1381.

[2.25N] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Determinação do teor de álcalis solúveis. Processo por espectrofotometria de chama.** Lisboa, IGPAI, 1976. NP 1382.

[2.26N] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Determinação do teor em sulfatos.** Lisboa, IGPAI, 1984. NP 2106.

[2.27N] - DIRECÇÃO GERAL DE QUALIDADE (DGQ) - **Areias para argamassas e betões. Determinação do teor em sulfuretos.** Lisboa, DGQ, 1984. NP 2107.

[2.28N] - LNEC - **Inertes para argamassas e betões. Ensaios de reactividade com os sulfatos em presença de hidróxido de cálcio.** Lisboa, LNEC, 1985. Especificação LNEC E 251.

[2.29N] - LNEC - **Inertes para argamassas e betões: Classes granulométricas.** Lisboa, LNEC, 1990. Especificação LNEC E 355.

[2.30N] - LNEC - **Inertes para argamassas e betões. Características e verificação da conformidade.** Lisboa, LNEC, 1993. Especificação LNEC E 373.

[2.31N] - LNEC - **Inertes para argamassas e betões: Determinação da reactividade potencial com os alcalinos: análise petrográfica.** Lisboa, LNEC, 1993. Especificação LNEC E 415.

[2.32N] - LNEC - **Água de amassadura para betões: Características e verificação da conformidade.** Lisboa, LNEC, 1993. Especificação LNEC E 372.

[2.33N] - IPQ - **Pozolanas para betão. Definições, especificações e verificação da conformidade.** IPQ, 1993. NP 4220.

[2.34N] - IPQ - **Cinzas volantes para betão. Definições, exigências e controlo de qualidade.** IPQ, 1995. NP 450.

[2.35N] - LNEC - **Adjuvantes para argamassas e betões: Características e verificação da conformidade.** Lisboa, LNEC, 1993. Especificação LNEC E 374.

[2.36N] - LNEC - **Escória granulada de alto-forno moída para betões: Características e verificação da conformidade.** Lisboa, LNEC, 1993. Especificação LNEC E 375.

[2.37N] - LNEC - **Fíler calcário para betões: Características e verificação da conformidade.** Lisboa, LNEC, 1993. Especificação LNEC E 376.

[2.38N] - LNEC - **Fíler calcário para betões: Determinação do valor do azul de metileno.** Lisboa, LNEC, 1993. Especificação LNEC E 385.

[2.39N] - ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR) - **Liants hydrauliques. Guide d'utilisation des ciments.** Paris, AFNOR, août 1985 NF P 15-010.

[2.40N] - AFNOR - **Ciments à maçonner.** Paris, AFNOR, octobre 1969 NF P 15-307.

[2.41N] - AFNOR - **Ciments naturels.** Paris, AFNOR, octobre 1964 NF P 15-308.

[2.42N] - AFNOR - **Chaux hydrauliques naturelles XHN.** AFNOR, octobre 1969 NF P 15--310.

[2.43N] - AFNOR - **Chaux hydrauliques artificielles XHA.** Paris, AFNOR, octobre 1969 NF P 15-312.

[2.44N] - AFNOR - **Liants hydrauliques. Ciment prompt naturel.** Paris, AFNOR, avril 1991 NF P 15-314.

[2.45N] - AFNOR - **Technique des essais. Essai de prise.** Paris, AFNOR, mai 1964 NF P 15-431.

[2.46N] - AFNOR - **Technique des essais. Essai de retrait et de gonflement.** Paris, AFNOR, juillet 1963 NF P 15-433.

[2.47N] - AFNOR - **Méthodes d'essais des ciments. Détermination des résistances mécaniques.** Paris, AFNOR, mars 1990. NF EN 196-1.

[2.48N] - AFNOR - **Méthodes d'essais des ciments. Analyse chimique des ciments. Determination des résistances mécaniques.** Paris, AFNOR, mars 1990. NF EN 196-2.

[2.49N] - AFNOR - **Méthodes d'essais des ciments. Determination du temps de prise et de stabilité.** Paris, AFNOR, mars 1990. NF EN 196-3.

[2.50N] - AFNOR - **Méthodes d'essais des ciments. Determination quantitative des constituants.** Paris, AFNOR, juillet 1990. NF P 15-474.

[2.51N] - AFNOR - **Méthodes d'essais des ciments. Determination de la finesse.** Paris, AFNOR, août 1990. NF EN 196-6.

[2.52N] - AFNOR - **Méthodes d'essais des ciments. Determination de la teneur en chlorures, en dioxyde de carbone et d'alcalis dans les ciments.** AFNOR, août 1990. NF EN 196-21.

[2.53N] - AFNOR - **Chaux aériennes éteintes pour le bâtiment. Spécifications.** Paris, AFNOR, juin 1981. NF P 15-510.

[2.54N] - AFNOR - **Chaux aériennes éteintes pour le bâtiment. Determination de la teneur en dioxyde de carbone.** Paris, AFNOR, juin 1981. NF P 15-512.

[2.55N] - AFNOR - **Chaux aériennes éteintes pour le bâtiment. Essais d'expansion.** Paris, AFNOR, juin 1981. NF P 15-513.

[2.56N] - AFNOR - **Granulats. Vocabulaire. Définitions et classifications.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-101.

[2.57N] - AFNOR - **Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Définition classification et marquage.** Paris, AFNOR, août 1989. NF P 18-103.

[2.58N] - AFNOR - **Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Hauts réducteurs d'eau.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-330.

[2.59N] - AFNOR - **Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Accélérateurs de prise sans chlore.** Paris, AFNOR, decembre 1986. NF P 18-331.

[2.60N] - AFNOR - **Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Accélérateurs de durcissement sans chlore.** Paris, AFNOR, decembre 1986. NF P 18-332.

[2.61N] - AFNOR - **Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Fluidifiants.** Paris, AFNOR, decembre 1986. NF P 18-333.

[2.62N] - AFNOR - **Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Hydrofuges de masse.** Paris, AFNOR, decembre 1986. NF P 18-334.

[2.63N] - AFNOR - **Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Plastifiants.** Paris, AFNOR, decembre 1986. NF P 18-335.

[2.64N] - AFNOR - **Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Réducteurs d'eau.** Paris, AFNOR, decembre 1986. NF P 18-336.

[2.65N] - AFNOR - **Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Retardateurs de prise.** Paris, AFNOR, mars 1990. NF P 18-337.

[2.66N] - AFNOR - **Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Entraineurs d'eau.** Paris, AFNOR, decembre 1986. NF P 18-338.

[2.67N] - AFNOR - **Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-555.

[2.68N] - AFNOR - **Granulats - Determination de la masse volumique absolue des fines.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-558.

[2.69N] - AFNOR - **Granulats - Determination de la masse volumique des sables et gravillons dans l'huile de parafine.** Paris, AFNOR, juin 1992. NF P 18-559.

[2.70N] - AFNOR - **Granulats - Analyse granulométrique par tamisage.** Paris, AFNOR, septembre 1990. NF P 18-560.

[2.71N] - AFNOR - **Granulats - Determination de la teneur en soufre total.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-582.

[2.72N] - AFNOR - **Granulats - Determination de la teneur en chlore. Méthode par dissolution.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-583.

[2.73N] - AFNOR - **Granulats - Réactivité potentielle de type alcali-silice.** Paris, AFNOR, decembre 1991. NF P 18-584.

[2.74N] - AFNOR - **Granulats - Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin. Essai sur mortier.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-585.

[2.75N] - AFNOR - **Granulats - Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin. Essai sur mortier.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-585.

[2.76N] - AFNOR - **Granulats - Mise en évidence de la matières organiques par colorimétrie.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-586.

[2.77N] - AFNOR - **Granulats - Réactivité potentielle de type alcali-silice et alcali-silicate. Teste cinétique. Méthode chimique.** Paris, AFNOR, setembre 1992. NF P 18-589.

[2.78N] - AFNOR - **Granulats - Determination de la propreté superficielle.** Paris, AFNOR, setembre 1990. NF P 18-591.

[2.79N] - AFNOR - **Granulats - Essai au bleu de méthylène. Méthode de la tache.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-592.

[2.80N] - AFNOR - **Granulats - Sensibilité au gel.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-593.

[2.81N] - AFNOR - **Granulats - Valeur de bleu de méthylène. Méthode turbidimétrique.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-595.

[2.82N] - AFNOR - **Granulats - Détermination de la propreté des sables. Équivalent de sable a 10% de fines.** Paris, AFNOR, decembre 1990. NF P 18-597.

[2.83N] - AFNOR - **Granulats - Équivalent de sable.** Paris, AFNOR, decembre 1991. NF P 18-598.

[2.84N] - BRITISH STANDARD INSTITUTION (BSI) - **Methods of testing mortars, screeds and plasters.** London, BSI, 1980. BS 4551:1980.

[2.85N] - BSI - **Specification for Portland cement.** London, BSI, 1991. BS 12:1991.

[2.86N] - BSI - **Specification for masonry cement.** London, BSI, 1995. BS 5224:1995.

[2.87N] - BSI - **Specification for sulphate-resisting Portland cement.** London, BSI, 1991. BS 4027:1991.

[2.88N] - BSI - **Specification for Portland blast-furnace cement.** London, BSI, 1991. BS 146:1991.

[2.89N] - BSI - **Specification for high alumina cement.** London, BSI, 1972. BS 915:Part 2: 1972 (1983).

[2.90N] - BSI - **Specification for building lime.** London, BSI, 1995. BS 890:1995.

[2.91N] - BSI - **Specification for building sands from natural sources. Sands for external renderings, internal plastering with lime and portland cement, and floor screeds.** London, BSI, 1976. BS 1199:1976.

[2.92N] - BSI - **Specification for pigments for Portland cement and Portland cement products.** London, BSI, 1975. BS 1014:1975.

[2.93N] - BSI - **Bonding agents for use with gypsum plasters and cement.** London, BSI, 1989. BS 5270:Part 1:1989.

[2.94N] - BSI - **Mortar plasticizers. Specification for air-entraining (plasticising) admixtures.** London, BSI, 1986. BS 4887:Part 1:1986

[2.95N] - BSI - **Methods of tests for water for making concrete (including notes on the suitability of the water).** London, BSI, 1980. BS 3148:1980.

[2.96N] - BSI - **Specification for uncoated expanded carbon steel sheets for general purposes.** London, BSI, 1987. BS 405:1987.

[2.97N] - BSI - **Specification for zinc coated hexagonal steel wire netting.** London, BSI, 1983. BS 1485:1983.

[2.98N] - BSI - Steel lathing **for internal plastering and external rendering. Specification for expanded metal and ribbed lathing.** London, BSI, 1987. BS 1369:1987.

[2.99N] - BSI - **Specification for testing zinc coatings on steel wire and for quality requirements.** London, BSI, 1990. BS 443:1982 (1990).

[2.100N] - DIN - **Building lime; terminology, requirements, supply, inspection.** Berlin, DIN, 1986. DIN 1060 - Part 1.

[2.101N] - DIN - **Portland, iron Portland, blastfurnace and trass cement; terminology, components, requirements, delivery.** Berlin, DIN, 1990. DIN 1164 - Part 1.

[2.102N] - DIN - **Building lime; methods of physical tests.** Berlin, DIN, 1982. DIN 1060 - Part 3.

[2.103N] - DIN - **Determination of shrinkage and expansion on small specimens.** Berlin, 1985. DIN 52 450.

[2.104N] - DIN - **Testing of mortars containing mineral binders; general, sampling, test mortar.** Berlin, 1982. DIN 18 555 Part 1.

[2.105N] - DIN - **Testing of mortars containing mineral binders; hardened mortars; determination of flexural strength, compressive strength and bulk density.** Berlin, 1982. DIN 18 555 Part 3.

[2.106N] - DIN - **Suitability tests for plaster mortars containing mineral binders.** Berlin, 1982. DIN 18 557.

[2.107N] - DIN - **Synthetic resin plasters. Terminology, requirements, application.** Berlin, 1985. DIN 18 558.

[2.108N] - ONORM - **Gypsum for building purposes; requirements, characteristic performance, testing.** Wien, 1993. ONORM B 3321-2.

[2.109N] - ONORM - **Ready-mixed dry mortars for plastering; specifications and test methods.** Wien, 1993. ONORM B 3340.

[2.110N] - ONORM - **Gypsum-based dry mix mortars for plastering; rules for application.** Wien, 1993. ONORM B 3414.

[2.111N] - ONORM - **Textile glass scrim for outer wall thermal insulation systems with adhesion pwer fabricated of polystyrene particle foam and thin-wall plaster; marking of conformity.** Wien, 1993. ONORM B 6122.

[2.112N] - ONORM - **Clay pellet lathing; quality requirements and test specifications.** Wien, 1993. ONORM B 3645.

[2.113N] - ONORM - **Gypsum plasterboards; types, requirements, testing.** Wien, 1985. ONORM B 3410.

[2.114N] - ONORM - **Materials for thermal and/or acoustic insulation in building construction. Wood wool insulating boards WW and multilayered wood wool boards - Marking of conformity.** Wien, 1985. ONORM B 6021.

[2.115N] - ONORM - **Materials for thermal and/or acoustic insulation in building construction. Wood shaving boards WS and multilayered wood shaving boards - Marking of conformity.** Wien, 1985. ONORM B 6022.

[2.116N] - ONORM - **Reed lathing, reed maths.** Wien, 1982. ONORM B 3642.

[2.117N] - ONORM - **Solid and hollow bricks; requirements and tests, marking of conformity.** Wien, 1981. ONORM B 3200.

[2.118N] - ONORM - **Hollow building blocks.** Wien, 1981. ONORM B 3206.

[2.119N] - ONORM - **Concrete; production and quality control.** Wien, 1992. ONORM B 4200-10.

[2.120N] - ONORM - **Lightweight concrete; production and quality control.** Wien, 1993. ONORM B 4200-11.

[2.121N] - ONORM - **Gas aerated concrete blocks; quality requirements and test specifications.** Wien, 1993. ONORM B 3209.

[2.122N] - ONORM - **Jacket blocks; quality requirements and test specifications. Marking of conformity.** Wien, 1993. ONORM B 3208.

[2.123N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis).** Brussels, January 1995. PrEN 1015-1.

[2.124N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-2.

[2.125N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).** Brussels, January 1995. PrEN 1015-3.

[2.126N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 4: Determination of consistence of fresh mortar (by plunger penetration).** Brussels, January 1995. PrEN 1015-4.

[2.127N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 5: Determination of workability (cohesiveness) of freshly mixed mortar.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-5.

[2.128N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-6.

[2.129N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 7: Determination of air content of fresh mortar.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-7.

[2.130N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-8.

[2.131N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 9: Determination of workable life and correction time of fresh mortar.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-9.

[2.132N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 10: Determination of bulk density of hardened mortar.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-10.

[2.133N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-11.

[2.134N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 12: Determination of adhesion of hardened rendering and plastering mortars.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-12.

[2.135N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 13: Determination of dimensional stability of hardened mortars.** Brussels, February 1993. PrEN 1015-13 (documento de trabalho).

[2.136N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 14: Determination of durability of hardened mortars.** Brussels, February 1993. PrEN 1015-14 (documento de trabalho).

[2.137N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 15: Determination of driving rain resistance of rendering mortars.** Brussels, June 1990. PrEN 1015-15 (documento de trabalho).

[2.138N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 16: Determination of modulus of transversal strain, elastic modulus and the Poisson's ratio.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-16.

[2.139N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 17: Determination of water and/or acid-soluble chloride content of fresh and hardened mortars.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-17.

[2.140N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 18: Determination of water absortion coefficient due to capillary action of hardened rendering mortar.** Brussels, February 1995. PrEN 1015-18.

[2.141N] - CEN - **Methods of test for mortar for masonry. Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars.** Brussels, March 1995. PrEN 1015-19.

[2.142N] - CEN - **Specification for metal beads and lath. Part 1: Internal plastering. Definitions. requirements. Test methods.** Brussels, October 1995. PrEN (documento de trabalho).

[2.143N] - CEN - **Specification for beads and lath. Part 2: External rendering. Definitions. requirements. Test methods.** Brussels, October 1995. PrEN (documento de trabalho).

[2.144N] - CEN - **Cement. Composition, specification and conformity criteria.** Brussels. ENV 197-1.

[2.145N] - CEN - **Masonry cement. Composition, specification and conformity criteria.** Brussels. ENV 413-1 (documento de trabalho).

[2.146N] - CEN - **Building lime. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria.** Brussels, 1994. ENV 459-1.

[2.147N] - CEN - **Aggregates for mortar.** Brussels, ENV, (documento de trabalho).

[2.148N] - CEN - **Lightweight aggregates. Concrete and mortar.** Brussels, ENV (documento de trabalho).

[2.149N] - CEN - **Admixtures for mortar.** Brussels, ENV 934-3.

[2.150N] - CEN - **Screws and bolt fixings.** Brussels, ENV (documento de trabalho).

[2.151N] - CEN - **Soft fixings and ancillary components.** Brussels, ENV (documento de trabalho).

[2.152N] - CEN - **Washers, ancillary angles and brackets.** Brussels, ENV (documento de trabalho).

[2.153N] - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) - **Specification for aplication of portland cement-based plaster**. ASTM, Philadelphia. ASTM C 926.

[2.154N] - UNIFORM BUILDING CODE (UBC), Chapter 47. **Installation of wall and ceilings coverings**. - International Conference of Building Officials, 1991.

[2.155N] - ASTM - **Specification for masonry cement.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 91.

[2.156N] - ASTM - **Specification for Portland cement.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 150.

[2.157N] - ASTM - **Specification for blended hydraulic cements.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 595.

[2.158N] - ASTM - **Specification for finishing hydrated lime.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 206.

[2.159N] - ASTM - **Specification for hydrated lime for masonry purposes.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 207.

[2.160N] - ASTM - **Specification for aggregate for masonry mortar.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 144.

[2.161N] - ASTM - **Specification for aggregate for job-mixed Portland cement-based plasters.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 897.

[2.162N] - ASTM - **Specification for air-entraining admixtures for concrete.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 260.

[2.163N] - ASTM - **Specification for chemical admixtures for concrete.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 494.

[2.164N] - ASTM - **Specification for bounding compounds for interior plastering.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 631.

[2.165N] - ASTM - **Specification for surface-applied bonding agents for exterior plastering.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 932.

[2.166N] - ASTM - **Specification for pigments for integrally colored concrete.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 979.

[2.167N] - ASTM - **Specification for general requirements for steel sheet, zinc coated (galvanized) by the hot-dip process.** ASTM, Philadelphia. ASTM A 525.

[2.168N] - ASTM - **Specification for zinc coated (galvanized) carbon steel wire.** ASTM, Philadelphia. ASTM A 641.

[2.169N] - ASTM - **Specification for methal lath.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 847.

[2.170N] - ASTM - **Specification for welded wire lath.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 933.

[2.171N] - ASTM - **Specification for woven wire plaster base.** ASTM, Philadelphia. ASTM C 1032.

CAPÍTULO 3

FENDILHAÇÃO DE REBOCOS

3.1 - Introdução

3.2 - Tipologias de Fendilhação de Rebocos

3.3 - Critérios Práticos de Avaliação da Susceptibilidade à Fendilhação de Rebocos

3.4 - Comportamento à Fendilhação de Rebocos Tradicionais

3.5 - Comportamento à Fendilhação de Rebocos Não-Tradicionais

Bibliografia do Capítulo 3

3.1 - INTRODUÇÃO

Actualmente, uma grande percentagem das anomalias verificadas em edifícios é constituída por anomalias nas alvenarias e destas a maioria são defeitos de estanquidade, dos quais a fatia mais larga se deve a fendilhação da alvenaria, ou do reboco. Segundo estudos do "Bureau Securitas", realizados em França entre 1983 e 1986, cerca de 85,4% das anomalias detectadas em alvenarias consistem em fendilhação, sendo que 49% originam infiltrações de água do exterior e 36,4% são não-infiltrantes. As infiltrações devidas a outras causas, que não a fendilhação, constituem apenas cerca de 8,6% dos casos analisados. Ainda de acordo com o mesmo estudo, cerca de 15% da fendilhação visível em fachadas de alvenaria rebocada (com rebocos tradicionais ou não-tradicionais com base em cimento ou em cimento e cal) é devida apenas ao reboco (constituição e aplicação), enquanto aproximadamente 14% se podem imputar ao revestimento e ao suporte, em simultâneo [3.1].

Estes valores dão uma ideia da importância da fendilhação em fachadas e, em particular, da incidência da fendilhação de rebocos no panorama geral francês de patologia não-estrutural em edifícios. Acresce que em França são usados sistematicamente os rebocos não-tradicionais, nomeadamente os monocamada[1], enquanto em Portugal os rebocos tradicionais - que, pelo menos tal como são, em geral, executados actualmente, parecem apresentar maior tendência para fendilhar, - ocupam ainda, de longe, a maior faixa de mercado. Assim, parece razoável admitir que a fendilhação atribuível aos rebocos constitui, no nosso País, uma percentagem da fendilhação total de fachadas não inferior à obtida para o caso francês, no estudo referido.

Embora em Portugal não existam, tanto quanto se sabe, estatísticas elaboradas sobre patologia em edifícios que permitam avaliar com rigor o impacte da fendilhação de rebocos, de alguns estudos já efectuados ressalta também um peso elevado das intervenções de reparação em revestimentos exteriores e interiores de paredes [3.2, 3.3]. A fendilhação em paredes aparece, por si só, como uma anomalia muito frequente e, curiosamente, com um peso quase tão significativo em patologia de edifícios, como em *repatologia* de edifícios [3.4], ou seja, estas anomalias voltam a repetir-se poucos anos depois da realização de obras de

[1] - O CSTB francês estima em cerca de 80% a quota de mercado dos monocamada em relação ao mercado total de rebocos em França, como nos foi dito por um dos seus Chefes de Divisão (Christian Lejeune), em reunião que decorreu no LNEC em 1994.

reabilitação. De facto, a análise de uma amostra de 44 edifícios degradados de Lisboa, apenas 1 ano após a realização de obras de reabilitação através do RECRIA, indica que 64% apresenta fendilhação generalizada nas paredes exteriores [3.5]. Outros autores [3.3, 3.4], analisando amostras de edifícios também limitadas (382 situações de patologia, em edifícios com mais de 20 anos no 1° caso e 543 edifícios particulares vistoriados pela Câmara Municipal de Lisboa, no 2° caso), acentuam a predominância de anomalias relacionadas com manifestações de humidade (cerca de 40%), das quais é lícito crer que uma parte significativa será devida a fendilhação em paredes exteriores. Freitas e Viegas da Silva referem ainda que cerca de 20% das anomalias observadas se situam nas paredes de fachada e cerca de 5% nas paredes interiores. João Appleton [3.6] refere também a fendilhação em paredes de alvenaria, e, entre esta, a fendilhação devida ao mau funcionamento dos rebocos, como uma das anomalias precoces - surgidas, muitas vezes, durante os primeiros 2 anos de vida - muito frequentes em edifícios de habitação.

Apesar da não representatividade das amostras tratadas e da falta de estudos estatísticos, parece ser incontestável a forte incidência da fendilhação em paredes na patologia de edifícios de habitação no nosso País.

Neste capítulo, abordar-se-á de forma sintética a fendilhação de rebocos e as suas causas principais, com maior incidência na fendilhação devida aos próprios rebocos. Pretende-se situar a importância da constituição do reboco e da sua aplicação no problema da qualidade dos edifícios e não aprofundar o tema da fendilhação de alvenarias, que já foi objecto de vários estudos, quer na Europa, quer em Portugal [3.1, 3.7, 3.8].

3.2 - TIPOLOGIAS DE FENDILHAÇÃO DE REBOCOS

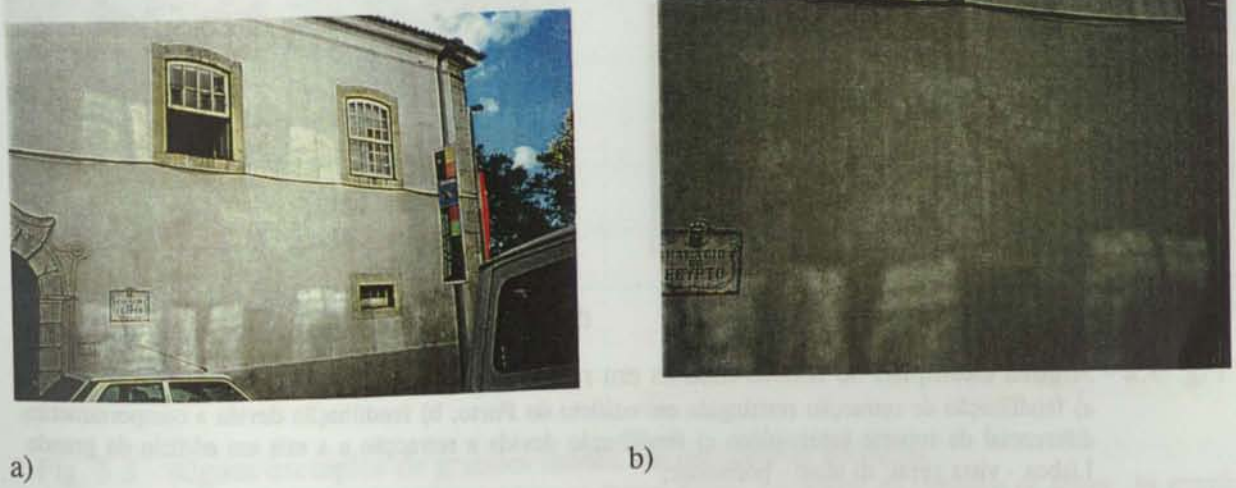
3.2.1 - Classificação segundo o aspecto e abertura das fendas

A Norma Francesa NF P 84-401 [3.9] estabelece uma classificação da fendilhação de rebocos, baseada na abertura das fendas. A cada um dos tipos definidos, Logeais [3.1] associa, predominantemente, determinadas causas:

- Microfendas

São aberturas lineares com largura inferior a 0,2 mm, que nos rebocos tomam, normalmente, a forma de uma rede.

Quando são superficiais (não penetrando mais de 1 mm no revestimento) e formam uma malha irregular que se inscreve em quadrados com menos de 200 mm de lado, está-se perante um caso particular de microfendilhação, que os franceses designam por "faiençage" e que é normalmente devida à retracção diferencial da camada de acabamento, em relação à camada subjacente, o que origina tensões de tracção na camada exterior. Este tipo de microfendilhação, que podemos designar por *rendilhada* ou *mapeada* pode ser provocada por uma dosagem demasiado forte da camada superficial do revestimento, por uma concentração exagerada do teor de finos, ou por um alisamento demasiado prolongado e apertado, que fez vir à superfície a leitança de cimento (ver fig. 3.1).



a) b)

Fig. 3.1 - Microfendas em edifício em Oeiras
a) vista geral; b) pormenor

- Fendas médias

São aberturas lineares com largura compreendida entre 0,2 mm e 2 mm. Estas fendas interessam normalmente toda a camada, ou mesmo todo o revestimento e podem ter causas muito variadas, entre as quais se incluem: a retracção da argamassa de revestimento,

restringida pela aderência ao suporte; a dilatação do suporte; o comportamento termo-higrométrico diferente de dois materiais justapostos revestidos em continuidade (ver fig. 3.2).



a)



b)



c)



d)

Fig. 3.2 - Alguns exemplos de fendas médias em rebocos de edifícios
a) fendilhação de retracção restringida em edifício do Porto; b) fendilhação devida a comportamento diferencial de suporte heterogéneo c) fendilhação devida a retracção e a sais em edifício da grande Lisboa - vista geral; d) idem - pormenor;

- Fracturas ou grandes fendas

Consistem em descontinuidades cuja largura ultrapassa 2 mm. Afectam normalmente toda a espessura da parede ou do pano de parede e podem ter causas muito diversas, entre as quais se incluem a deformação dos elementos estruturais do suporte e o efeito de sais expansivos ou do gelo.

Este tipo de fendas não são, normalmente, da responsabilidade do revestimento. Exceptua-se o caso dos revestimentos demasiado ricos aplicados sobre suportes de fraca

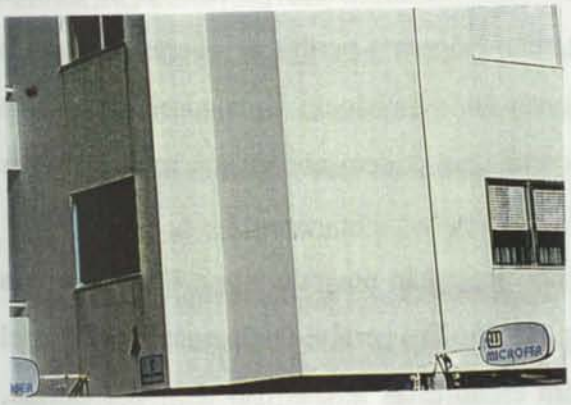
resistência mecânica, em que as forças transmitidas ao suporte, devido à retracção restringida de rebocos demasiado *fortes*, provocam a fendilhação da alvenaria (ver fig. 3.3).



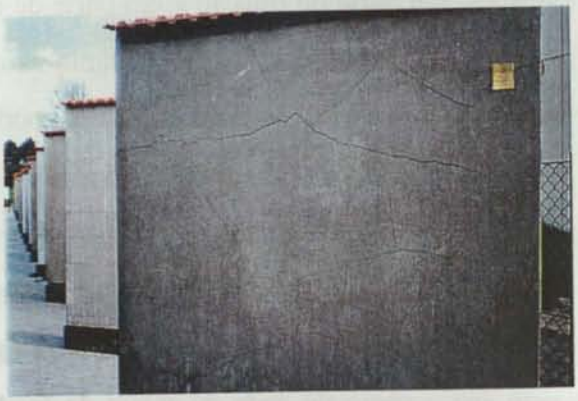
a)



b)



c)



d)

Fig. 3.3 - Alguns exemplos de grandes fendas em rebocos de edifícios
a) grande fenda em edifício antigo em Oeiras devido a cedência do elemento de apoio; b) grande fenda em edifício antigo no Seixal devido a rotação da parede; c) grande fenda em edifício do Porto devido a flecha de parede em consola; d) grandes fendas - do revestimento e da alvenaria - em murete no LNEC devido à transmissão de tensões de retracção restringida de um reboco *forte* a uma alvenaria *fraca*.

As características da fendilhação - padrão, localização, comprimento, largura, profundidade e frequência das fendas - são geralmente indicadores da sua causa ou da origem de tensões concentradas. Por exemplo, o *esboroamento* dos bordos da fenda indica, normalmente, que se trata de uma fenda activa; deslocamentos relativos no plano dos dois bordos de uma fenda evidenciam transferência de tensões do suporte [3.10].

3.2.2 - Principais causas da fendilhação

As causas mais importantes de fendilhação de rebocos podem distribuir-se do seguinte modo:

a) Causas atribuíveis ao reboco

Incluem-se neste ítem os tipos de fendilhação que se considera poderem ser evitados com a melhoria da constituição do reboco e da composição das camadas.

a1) Fendilhação por retracção

A restrição da retracção do reboco pelo suporte, geralmente mais rígido, dá origem a tensões, em parte de tracção e em parte de corte, no plano de aderência. As tensões de tracção tendem a causar fendilhação, enquanto as de corte dão origem a perdas de aderência entre o reboco e o suporte. As duas anomalias podem ocorrer em simultâneo. Uma aderência forte e uniforme favorece a distribuição das tensões de corte, que podem absorver a totalidade das tensões geradas pela retracção [3.10].

É um tipo de fendilhação muito frequente na construção nova do nosso País, devido a deficiências da composição do reboco ou da sua aplicação. Em geral é facilmente identificável pelo seu aspecto de *rede* ou *mapa* de fendas. Com efeito estas fendas não têm, por norma, direcção definida e vão abrindo, sucessivamente, segundo direcções aproximadamente perpendiculares, formando um padrão de polígonos de malha mais ou menos larga (ver figs. 3.1, 3.2 a, c e d) e 3.3 d)). A malha é tanto mais larga e as fendas são tanto mais abertas e profundas quanto mais rígido for o revestimento e mais espessa a camada. Por vezes surgem malhas secundárias no interior da malha mais marcada.

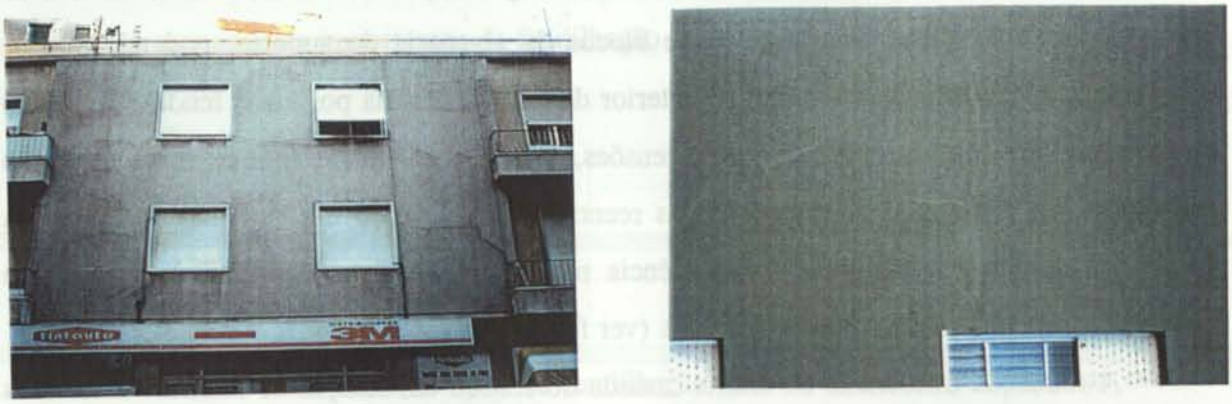
Nalguns casos este tipo de fendilhação toma outras formas: pode ser constituída por fendas isoladas, finas, de direcção aleatória, quando o reboco é relativamente dúctil e, embora as tensões geradas possam ser suficientes para a abertura de fendas, estas não têm tendência a propagar-se, por dissiparem muita energia. Pode também surgir sob a forma de poucas fendas largas e profundas, geralmente com direcção vertical ou horizontal, quando o reboco é

bastante rígido e tem resistência à tracção elevada, casos em que tende a formar-se uma malha tão larga que as fendas parecem isoladas (ver fig. 3.4). Por vezes, ainda, as fendas acompanham o contorno das juntas entre blocos da alvenaria do suporte, podendo surgir, nalguns casos, fendilhação mais fina no interior da malha definida por essas fendas. Estes são os casos em que existem outras fontes de tensões, associadas às juntas (por exemplo retracção das juntas, ou dilatação dos blocos, juntas reentrantes originando um aumento de espessura localizado do reboco, ou ainda má aderência nas juntas) que se adicionam às tensões de retracção, tornando essas faixas mais fracas (ver fig. 3.5).

A retracção diferencial da última camada do reboco em relação às camadas anteriores pode dar origem a uma microfendilhação de malha muito fina. As microfendas formadas são geralmente muito delgadas e superficiais mas podem evoluir para fendas de retracção significativas (fendas médias).

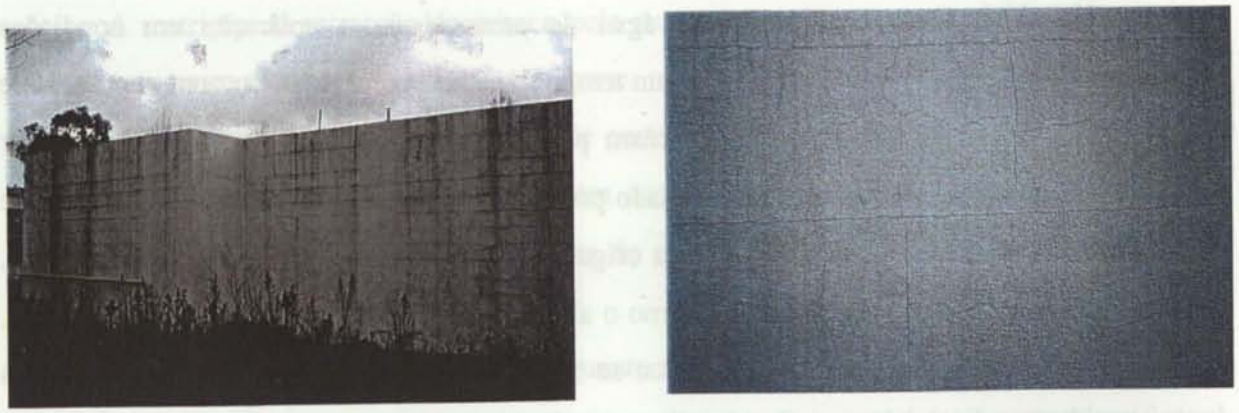
Uma forte dosagem em ligante, o uso de areias com alto teor de finos, a aplicação de camadas muito espessas, o excesso de água de amassadura, a aplicação em condições climáticas desfavoráveis, nomeadamente com tempo muito quente e seco, ou com vento forte e seco, são algumas das condições que tornam provável o aparecimento de fendilhação por retracção restringida. O alisamento demasiado prolongado e apertado, que faz vir à superfície a leitança do cimento, está muitas vezes na origem de microfendilhação mapeada fina; assim, deve evitar-se o alisamento à colher e mesmo o alisamento à talocha, embora menos perigoso, deve ser moderado. Deve, também, evitar-se uma secagem demasiado rápida das várias camadas. O respeito pelos tempos de secagem das várias camadas e o cumprimento da *regra da degressividade do teor de ligante* (ver capítulo 2 - 2.2) contribuem para melhorar a aderência e reduzir os efeitos da retracção.

A fendilhação por retracção - ou mais propriamente por retracção restringida, já que não é a deformação que provoca a rotura mas sim as tensões geradas pela restrição, total ou parcial, da deformação - será analisada em pormenor no capítulo 4.



a) b)

Fig. 3.4 - Fendas de retracção com malha muito larga
a) edifício em Lisboa; b) edifício no Porto (fendas tratadas)



a) b)

Fig. 3.5 - Fendilhação a acompanhar as juntas em paredes de blocos de betão celular autoclavado revestidas com reboco tradicional
a) construção para ensaios no LNEC; b) pormenor de murete no LNEC

a2) Fendilhação devida a deficiente adaptação ao suporte

Se o módulo de elasticidade do revestimento é superior ao do suporte, quando se dá a fluência do suporte devido à acção das cargas permanentes ou a sua deformação devido a sobrecargas ou a cargas acidentais, há transferência de tensões de compressão para o revestimento, que podem levar à sua rotura, geralmente antecedida de perda de aderência [3.1].

Nos casos em que o suporte tem resistência mecânica inferior ao reboco, pode acontecer que as tensões de tracção geradas no seio do revestimento devido, por exemplo, à retracção restringida, sejam transmitidas ao suporte, provocando a rotura daquele por compressão e corte. Esta situação encontra-se frequentemente nas aplicações de rebocos correntes sobre suportes de alvenaria de betão celular autoclavado, ou sobre algumas alvenarias antigas. Essas fendas reflectem-se, inevitavelmente, no reboco (ver fig. 3.3 d). De facto, só em condições muito especiais o reboco é capaz de resistir à fendilhação do suporte - utilização de armaduras, incorporação de resinas, disposições construtivas apropriadas - e nesses casos não há, à partida, a transmissão de tensões de que estamos a falar.

Nestes casos, as fendas interessam o revestimento e o suporte, são, portanto, profundas e largas e têm direcções aleatórias ou seguindo o contorno das juntas.

Para evitar estas anomalias é necessário, ao seleccionar o revestimento, ter em conta as características mecânicas do suporte: se se optar por um reboco tradicional, a mistura usada (dosagem e natureza dos constituintes) deve garantir uma boa compatibilidade mecânica com o suporte, o que implica, normalmente, ser mais fraco, ou, pelo menos, menos rígido; uma alternativa é escolher um reboco não-tradicional em que o suporte em causa faça parte do seu campo de aplicação.

a3) Fendas devidas ao gelo

Embora este problema seja, normalmente, considerado secundário em Portugal, a verdade é que existem zonas do País em que se verificam temperaturas inferiores a 0°C em certos períodos do ano, principalmente durante a noite, pelo que o seu tratamento não deve ser negligenciado.

A transformação em gelo da água absorvida por um material, com o consequente aumento de volume, pode provocar a fendilhação desse material. Este risco só será sério se as condições atmosféricas propícias à congelação ocorrerem quando o material estiver saturado, ou quase saturado [3.1, 3.11, 3.12]. Em zonas frias e húmidas, rebocos muito absorventes estão sujeitos a este efeito, principalmente se a sua coesão for fraca.

Por outro lado, a congelação da água absorvida pelo suporte pode também fendilhá-lo, acarretando a fendilhação do reboco que o reveste, seguida normalmente de descolamento e queda, numa fase posterior. A alvenaria de tijolo furado afectada por esta anomalia adquire

um aspecto folheado característico [3.1]. Nalguns países, a susceptibilidade ao gelo dos tijolos é limitada pela normalização em vigor. Em Portugal essa limitação apenas existe para tijolos maciços, através das especificações da Norma NP 80, enquanto as normalizações francesa e italiana impõem restrições à susceptibilidade ao gelo para elementos cerâmicos para alvenaria corrente, através da limitação do coeficiente de saturação - caso da normalização italiana - ou através da avaliação da perda de massa em ensaios de gelo-degelo - caso da normalização francesa [3.13]. O projecto de Norma Europeia de especificações para tijolos [3.14] define três classes de resistência ao gelo, relacionadas com a exposição da parede (exposição *passiva*, *moderada* e *severa*). O método de ensaio a usar encontra-se ainda em estudo. No que se refere aos blocos de betão, o projecto de Norma Europeia [3.15] apenas propõe que seja declarada pelo fabricante a resistência ao gelo, com base na experiência existente.

Para evitar esta anomalia é importante, em zonas cujas condições climáticas tornem possível o surgimento deste fenómeno, seleccionar rebocos com reduzida absorção de água - relativamente compactos e coesos ou com adjuvantes que reduzam a absorção. Como já foi referido no capítulo 2, o uso de um adjuvante introdutor de ar pode ser também bastante eficaz, já que as micro-bolhas de ar aliviam a pressão hidráulica causada pelo avanço da frente de gelo na argamassa.

b) Causas atribuíveis à deficiente concepção e aplicação

Incluem-se neste ítem os tipos de fendilhação que se considera poderem ser evitados através de cuidados particulares na concepção e aplicação do revestimento.

b1) Fendilhação devida a misturas cimento-gesso

A reacção do gesso com alguns componentes do cimento, na presença de água, pode dar origem à formação de um sal muito expansivo, que provoca, normalmente, o destacamento e a fendilhação do reboco [3.1, 3.16, 3.17]:

sulfato de cálcio (gesso) + aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer + água $\Rightarrow$ sulfoaluminato tricálcico hidratado (etringite, correntemente designada por sal de Candlot)

Estas reacções acontecem com frequência quando se usam misturas de gesso e cimento

para colmatação de roços, para definição dos pontos e mestras, etc., com o objectivo de acelerar a presa.

Em Portugal aplicam-se com frequência, actualmente, estuques de gesso sobre rebocos de cimento. No entanto, tanto quanto se julga saber, esta prática não tem dado origem a casos significativos de degradação do revestimento por produção de etringite, certamente porque, tratando-se de revestimentos adequados apenas a locais secos, só acidentalmente ou por curtos períodos de tempo se encontram na presença de água.

Assim, este tipo de fendilhação pode ser facilmente evitado eliminando o uso de misturas de cimento e gesso realizadas em obra.

b2) Fendas devidas a concentração de tensões junto a aberturas

Estas fendas surgem em ângulos de vãos ou partindo de outras aberturas e devem-se a concentração de tensões nesses pontos (ver figs. 3.2 d, 3.3 a, 3.4 a, 3.6 e 3.8). São mais frequentes nos casos em que os movimentos diferenciais revestimento/suporte são particularmente significativos, como nos revestimentos de isolamento térmico e nos revestimentos com inertes leves, ou então em revestimentos muito rígidos [3.1]). Podem geralmente ser evitadas usando reforços de ângulo, por exemplo de rede de fibra de vidro com protecção anti-alcalina do tipo indicado na fig. 5.7, ou de rede metálica protegida contra a corrosão. São normalmente fendas oblíquas médias, e, em geral, interessam só o revestimento.

BIBLIOTECA F.E. PORTO

b3) Fendas devidas à corrosão de elementos metálicos

Por vezes são usados reforços do revestimento em arestas salientes ou noutros pontos singulares em que seja necessário melhorar a resistência aos choques. Estes reforços, quando exteriores, são muitas vezes metálicos e a sua protecção anti-corrosiva nem sempre é suficiente. O mesmo pode acontecer com algumas redes metálicas usadas como armadura de rebocos. Por exemplo a galvanização simples pode revelar-se insuficiente, já que a argamassa, muito mais permeável à água e ao ar que o betão, e recobrindo o elemento metálico apenas em camada muito fina, não constitui protecção significativa, facto ainda mais acentuado pela carbonatação, geralmente rápida. Outros elementos metálicos podem estar, por diversas razões, inseridos em rebocos. Os óxidos resultantes da corrosão do aço são expansivos,

provocando o destacamento e fendilhação do revestimento. Estas fendas são, em geral, facilmente identificáveis, por acompanharem a localização do elemento metálico e serem visíveis manchas acastanhadas de *ferrugem* nos seus bordos e na superfície que as rodeia (ver fig. 3.7).

A adequada protecção contra a corrosão dos elementos metálicos inseridos em argamassa é, assim, condição necessária para evitar este tipo de anomalia.



a)



b)



c)



d)

Fig. 3.6 -Fendilhação devida a concentração de tensões junto a aberturas

c) Causas atribuíveis ao suporte

Incluem-se neste ítem os tipos de fendilhação que se considera que apenas pode ser eliminada através de actuação sobre a execução do próprio suporte. É certamente a mais importante, devido à sua expressão e consequências. No entanto, não foi muito desenvolvida neste trabalho, por sair fora do seu âmbito.

c1) Fendas devidas a deslocamentos do suporte

Deslocamentos do suporte - assentamentos diferenciais das fundações, flechas excessivas das vigas dos lintéis ou dos pavimentos transmitidas às paredes, deformações de paredes estruturais - são uma das principais causas de fendilhação de alvenarias. Como é sabido, devido à evolução dos materiais usados nos elementos estruturais dos edifícios - nomeadamente o aumento da resistência e a melhoria da tecnologia do betão armado - e das técnicas de cálculo, que permitem uma avaliação cada vez mais exacta das tensões instaladas, projectam-se e constroem-se elementos estruturais cada vez mais esbeltos vencendo vãos cada vez maiores. Nestas condições, as flechas e deformações resultantes são também grandes e, quando transmitidas às paredes ultrapassam, muitas vezes, a capacidade resistente das alvenarias, normalmente frágeis. Os limites impostos às deformações pelos regulamentos actuais são insuficientes para impedir esta fendilhação, se não forem tomadas medidas para dessolidarizar os elementos estruturais das alvenarias, ou para, de qualquer modo, impedir a transmissão de tensões excessivas [3.7].

Nas zonas de ligação das paredes de material argiloso com as vigas e lajes de betão armado, a dilatação diferencial entre os elementos de materiais diferentes dá origem a uma fendilhação inclinada, simétrica em relação ao meio da parede. Esta fendilhação resulta do deslocamento relativo, na horizontal, entre os elementos, que provoca tensões de corte no revestimento que lhes está aderente [3.1]. A fendilhação pode também provocar o desligamento entre os elementos de materiais diferentes - tomando a forma de uma fenda na ligação entre esses elementos - ou concentrar-se nas secções mais enfraquecidas da parede [3.7] (ver fig. 3.8).



Fig. 3.7 - Fenda parcialmente devida a corrosão de armadura metálica



Fig.3.8 - Grande fenda horizontal devida a variações térmicas diferenciais entre a laje de betão e a parede de alvenaria, entre outros tipos de fendilhação

As deformações dos elementos estruturais e das alvenarias, pelas razões apontadas ou por outras, podem originar a fendilhação do reboco, que nos casos mais graves surge na sequência da fendilhação do próprio suporte. As fendas formadas são normalmente de grande abertura e profundidade e a sua localização e orientação são as decorrentes dos deslocamentos do suporte (ver fig. 3.3 a, b, e c e 3.8).

Os produtos de argila, em que se incluem os tijolos tão usados nas nossas alvenarias, são obtidos por cozedura a altas temperaturas, ficando, por vezes, bastante ávidos de água. Em contacto com a atmosfera húmida tendem a atingir um estado de equilíbrio com ela, absorvendo água, o que envolve aumento de volume.

Naturalmente, se este fenómeno, que se vai dando ao longo do tempo, tomar proporções significativas após a aplicação do reboco, leva à produção de tensões de tracção naquele, e, consequentemente, à possibilidade de surgimento de fendilhação. Esta fendilhação é, em geral, multidireccional na parte corrente do revestimento, de tipo semelhante à ocasionada pela retracção do reboco. Pode distinguir-se desta pelo facto de não surgir predominantemente nas paredes mais expostas ao sol, verificando-se antes a tendência contrária [3.1].

Para evitar este tipo de anomalia é necessário limitar a dilatação com a humidade dos tijolos e também a sua absorção de água. Existem já alguns estudos que permitem prever o comportamento de determinadas produções nacionais de tijolos no que diz respeito à estabilidade dimensional com a água líquida e sob a forma de vapor [3.18], e a generalização da certificação dos tijolos - de acordo com normas nacionais e normas europeias recentemente

aprovadas - contribuirá, certamente, para um melhor conhecimento e controlo dessas características dos suportes. A normalização francesa prevê ensaios acelerados de expansão, em água a ferver e em autoclave, e impõe limites máximos para os valores neles obtidos [3.13]. O projecto de Norma Europeia de especificações para tijolos [3.14] define exigências idênticas às da Norma Francesa. É também importante evitar o humedecimento prolongado das alvenarias, protegendo-as eficazmente das infiltrações da água da chuva e tomando as medidas necessárias para eliminar ou, pelo menos, limitar as condensações.

c2) Fendas devidas a reacções com sais existentes no suporte

Por vezes as alvenarias, ou outros materiais constituintes das paredes, contêm sais solúveis, que, em presença de água, podem ser transportados para o reboco e reagir com os componentes deste. Os sais que mais correntemente dão origem a estas anomalias são os sulfatos, que, por reacção com o aluminato tricálcico do cimento, produzem o já referido sulfoaluminato tricálcico hidratado, ou etringite. Na realidade, a etringite é um produto normal da hidratação do cimento e a sua formação só é perigosa na presença de hidróxido de cálcio livre, caso em que cristaliza sob a forma de fibras muito curtas (da ordem de poucos micrómetros), que absorvem água e expandem. Por outro lado, na ausência de hidróxido de cálcio livre, a etringite cristaliza sob a forma de fibras bem desenvolvidas, com comprimentos da ordem de 100 μm, que não absorvem água e não expandem [3.19].

Os sulfatos mais solúveis e, portanto, quimicamente mais agressivos, são o sulfato de magnésio (sal de Epsom) e o sulfato de sódio (sal de Glauber) - com solubilidades, de, respectivamente, cerca de 300 e 400 g/l -, enquanto o sulfato de cálcio (gesso) representa um risco menor, dada a sua menor solubilidade - cerca de 1 g/l) [3.20].

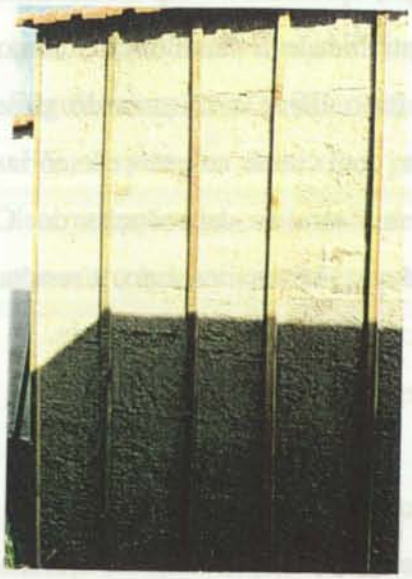
Os cristais formados nestas reacções, com aumento de volume, depositam-se, frequentemente, entre o revestimento e o suporte, provocando o descolamento do reboco e a sua consequente fendilhação. Podem também formar-se no seio do revestimento, onde, ao expandir, provocam fendilhação. Esta reacção pode ainda dar-se com a argamassa das juntas de assentamento, provocando expansão destas e favorecendo a desintegração da argamassa [3.7].

Para limitar os riscos de reacções expansivas é conveniente impedir o humedecimento frequente e prolongado do suporte, quer por penetração através do revestimento, quer por

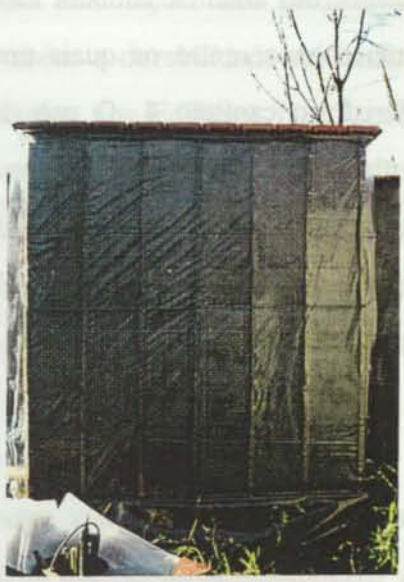
ascensão capilar, quer ainda devido a condensações internas [3.12]. No entanto, nem sempre é fácil conseguir esta protecção.

Outra medida a tomar consiste em usar elementos de alvenaria com baixo teor de sais solúveis. No caso dos tijolos a normalização nacional e também a de outros países europeus impõe limites aos teores de sais, avaliados através de ensaios adequados [3.13]. O projecto de Norma Europeia de especificações para tijolos [3.14] define três classes de teores de sais solúveis activos (sulfatos de magnésio, de sódio e de potássio), relacionadas com o risco de saturação da parede e prevê um método de ensaio para a sua determinação. No que se refere aos blocos de betão, o projecto de Norma Europeia [3.15] apenas propõe que sejam declarados pelo fabricante os teores de sais solúveis activos. Deve também ser verificado o teor de sulfatos das areias a usar nas argamassas das juntas e dos próprios rebocos, sempre que o seu comportamento não seja conhecido, pois podem também ser fonte de sais perniciosos. Estes podem ainda ser provenientes do solo de fundação, ou da própria água das chuvas, mas estes casos, embora mais difíceis de controlar, parecem ser menos frequentes.

As alvenarias antigas, por vezes impregnadas de vários tipos de sais, incluindo sulfatos, constituem um caso difícil de contornar. Uma solução possível consiste em fixar uma rede metálica (protegida contra a corrosão) sobre a alvenaria e aplicar então o reboco, que ficará aderente à rede. Assim, as perdas de aderência em relação à alvenaria, resultantes da cristalização dos sais expansivos, não provocarão, tão facilmente, a fendilhação do reboco. A intercalação de uma barreira estanque - por exemplo uma folha de polietileno - entre o suporte e a rede pode tornar esta solução mais eficaz, se a redução da permeabilidade ao vapor de água da parede, do lado interior, não constituir inconveniente importante. Em casos mais graves pode ser necessário aplicar a rede dessolidarizada do suporte e fixada a ele por uma estrutura intermédia, constituindo o que se pode designar por *suporte secundário* do revestimento. A lâmina de ar definida por essa estrutura (constituída, por exemplo, por réguas de madeira ou metálicas) e que pode ser ventilada, impede a passagem dos sais dissolvidos da alvenaria para o reboco [3.21] (ver fig. 3.9).



a)



b)



c)



d)

Fig. 3.9 - Execução experimental de um reboco armado independente do suporte no LNEC com o objectivo de avaliar a sua viabilidade de uso em reabilitação.
a) aspecto da estrutura intermédia; b) aspecto da rede aplicada sobre a folha de polietileno; c) aplicação da 1ª camada do reboco; d) acabamento da 2ª camada do reboco.

Quando as medidas preconizadas não forem possíveis, ou forem consideradas insuficientes, há que executar o reboco com um *cimento resistente aos sulfatos*, que, devido a uma composição especial - menor teor de C_3A -, é menos susceptível de reagir com os sulfatos

[3.12, 3.17, 3.22]. Contudo, este tipo de cimento não é ainda fabricado no nosso País, o que dificulta consideravelmente o seu uso. O cimento aluminoso, por vezes recomendado para o mesmo fim, além de também não ser fabricado em Portugal, apresenta outros inconvenientes para rebocos, entre os quais uma provável maior susceptibilidade à fendilhação, como se referirá no capítulo 4. O uso de cimento de alto-forno (tipo III) e a mistura do cimento portland composto (tipo II), normalmente usado em rebocos, com cinzas volantes e escórias de alto forno, com o fim de melhorar a resistência aos sais através da redução do C_3A, experimentada em estudos do LNEC [3.23, 3.24], não conduziu, até ao momento, a resultados suficientemente bons para poder ser recomendado.

d) Causas atribuíveis ao reboco e ao suporte

Incluem-se neste ítem os tipos de fendilhação que se considera poderem ser eliminados através de actuação conjunta sobre a constituição e execução do suporte e do reboco.

d1) Fendas devido a comportamentos diferenciais de suportes heterogéneos

No nosso País este tipo de anomalia verifica-se principalmente no caso, por enquanto ainda frequente, de paredes de enchimento de alvenaria de tijolo contornadas por uma estrutura de betão que fica à face da parede, sendo este suporte heterogéneo revestido em continuidade. O comportamento diferente, do ponto de vista termo-higrométrico, bem como do ponto de vista da retracção e da fluência e, ainda, mecânico (no que se refere à deformação sob cargas), dá origem ao surgimento de tensões de corte entre os dois materiais que se transmitem ao reboco, podendo provocar fendilhação deste, ao longo das ligações (ver fig. 3.2 b, 3.8).

Para evitar estas anomalias em paramentos exteriores de paredes, podem tomar-se três tipos de medidas:

1. Marcar a junta entre os dois materiais diferentes, executando uma alheta no revestimento (interessando toda a espessura), que é depois preenchida com cordão de empanque e mastique.

2. Evitar a heterogeneidade, aplicando elementos cerâmicos de recobrimento das secções de betão; esta medida tem vantagens adicionais do ponto de vista térmico, pois contribui para reduzir as pontes térmicas e para a homogeneização das solicitações nos elementos de betão, melhorando assim o conforto e salubridade e também a durabilidade do betão. O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios [3.25] prevê, aliás, disposições deste tipo, para reduzir o *factor de concentração de perdas* necessário à determinação do coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente. Exige, por outro lado, disposições construtivas que garantam a sua estabilidade: de facto, as faixas de elementos cerâmicos aplicados pelo exterior dos pilares apoiam, geralmente, nos pavimentos, mas devem também ser fixados aos pilares em pontos intermédios.

3. Armar o revestimento com uma rede de fibra de vidro protegida contra os álcalis, incorporada na camada de base do revestimento (ou na camada única, no caso dos monocamada), e ultrapassando a junta para os dois lados em pelo menos 150 mm (ver Capítulo 5 - fig. 5.6). Esta medida torna-se mais eficaz se o revestimento for dessolidarizado do suporte na zona da junta, por interposição de uma faixa de material fino, elástico e imputrescível, como por exemplo uma tira de poliester não-tecido.

Em paramentos interiores de paredes a medida 3 é a mais indicada das referidas. A utilização de perfis de recobrimento, ou de alhetas, a dissimular os desligamentos entre materiais diferentes é também uma solução a encarar.

Outras situações de suportes heterogéneos que possam originar anomalias verificam-se por vezes noutros países da Europa, onde se usam paredes com panos de composições diferentes. Por exemplo, a associação de um pano exterior em blocos de betão e um pano interior em alvenaria de tijolo, se não forem tomadas algumas precauções (por exemplo interposição de uma camada resiliente entre esse pano e a última laje, que absorva a deformação) pode dar origem a fendas horizontais, geralmente na ligação da parede com a última laje, ou na parede do último piso. De facto, a dilatação do pano interior e retracção do exterior, pode originar o levantamento da última laje (pouco carregada) pelo pano interior, que aumenta de altura, originando assim tensões de tracção no pano exterior da parede [3.1]. No entanto este tipo de paredes não é, tanto quanto se sabe, usado no nosso País, pelo que não são

de temer estas anomalias.

d2) Fendas devidas a absorção excessiva do suporte

Se o suporte é muito absorvente e não se faz um humedecimento prévio suficiente, pode haver uma dessecação prematura do revestimento ("grillage", ou *queima* do reboco), que pode provocar descolagem e fendilhação, principalmente se a espessura de aplicação for pequena [3.1]. Estes factores juntam-se, por vezes, nas aplicações sobre alvenarias de betão celular autoclavado, material que é, simultaneamente, bastante absorvente[2] e pode favorecer a aplicação em espessuras reduzidas, por dar origem a paramentos planos e desempenados.

Para evitar este tipo de fendilhação recomenda-se o uso de um revestimento com uma boa retenção de água, em camadas com espessura adequada e, sempre que possível, o humedecimento do suporte previamente à aplicação do revestimento. No entanto, é preciso ter em conta que, por vezes, estes suportes são também dimensionalmente instáveis com o teor de água, e portanto um humedecimento exagerado pode ser nocivo. A utilização de crespidos especiais adjuvados ou de primários adaptados a esta situação é também uma boa alternativa.

d3) Fendas devidas a variações dimensionais diferenciais entre o reboco e o suporte

As variações térmicas diferenciais entre o reboco e o suporte ao qual está aderente provocam tensões de tracção e de compressão, com carácter cíclico, que podem levar à fendilhação do reboco. A amplitude destas tensões depende da variação de temperatura, dos coeficientes de dilatação térmica dos materiais de suporte e de revestimento, dos módulos de elasticidade e, ainda, da capacidade de relaxação de tensões dos materiais em presença. Os choques térmicos constituem o caso mais gravoso, já que a rapidez de actuação da solicitação reduz a possibilidade de relaxação.

Por exemplo, os revestimentos aplicados sobre isolante, sujeitos a choques térmicos importantes devido à resistência térmica do isolante, ficam sujeitos a dilatações/contracções consideráveis. As redes metálicas dessolidarizadas do suporte (e a ele fixas por uma estrutura intermédia) e usadas como suporte secundário de rebocos (ver fig. 3.9) podem ter movimentos

[2] - Na realidade, segundo o DH 383 [3.26], os valores da absorção de água por capilaridade da produção actual em Portugal de betão celular autoclavado da marca YTONG são inferiores aos do tijolo corrente, ao contrário do que acontecia antigamente, mas a experiência existente não é ainda suficiente para poder afirmar que este problema deixou de existir.

de origem térmica de amplitude relativamente elevada, especialmente se a estrutura intermédia for metálica [3.1, 3.11].

A escolha de cores escuras para o paramento piora este efeito, por vezes de forma muito significativa. De facto, medições feitas no LNEC mostram que a temperatura superficial atingida por um paramento (revestimento aplicado sobre isolante) exposto ao Sol pode variar de 45 a 70° C quando a cor usada passa de branco a castanho escuro[3] [3.27]. Dados franceses [3.1] indicam também variações de temperatura da ordem de 20°C entre revestimentos de cor branca e escura, expostos ao Sol, constituídos por materiais não-isolantes.

Uma característica importante deste tipo de fendilhação é o facto de a sua largura variar com a temperatura, abrindo no Verão e fechando no Inverno. No entanto, se os rebocos tiverem os movimentos restringidos (enquadrados por elementos rígidos), pode não ser visível esta variação.

Alguns materiais de suporte - como as alvenarias de blocos de betão de inertes leves, de blocos de betão celular autoclavado ou de blocos sílico-calcários e as placas de aglomerado de fibras de madeira mineralizadas - são particularmente susceptíveis de sofrerem variações dimensionais significativas por alterações do seu teor de água (molhagem/secagem). Este fenómeno é ainda significativo, embora se verifique uma tendência para melhorar a estabilidade dimensional destes elementos.

Os rebocos aplicados sobre estes suportes ficam, assim, sujeitos a movimentos cíclicos, o que pode provocar a sua fendilhação, que muitas vezes segue o contorno das juntas entre blocos.

Uma medida preconizada para controlar a fendilhação nestas situações consiste em dividir o suporte em painéis (com dimensões da ordem de 5m), contornados por juntas elásticas e executar o reboco esquartelado do mesmo modo, com juntas coincidentes com as do suporte, posteriormente preenchidas com empanque e mastique, ou com perfis de junta apropriados [3.11]. Para evitar as juntas no reboco pode-se optar, sempre que os movimentos não assumam amplitudes muito grandes, por aplicá-lo em continuidade, armando a zona de ligação com uma faixa de rede de fibra de vidro, de forma idêntica à preconizada em d1,

[3] - Estes valores foram obtidos em revestimentos delgados de ligantes mistos aplicados sobre isolante, o que conduz, naturalmente, a temperaturas superficiais mais altas e também a maiores diferenças entre cores mais e menos absorventes. Por outro lado, os painéis estavam na horizontal, podendo existir situações mais desfavoráveis de painéis na vertical.

medida 3. O Documento de Homologação DH 383, do LNEC, relativo a um sistema de construção de paredes de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado [3.26], prevê disposições construtivas deste tipo.

A utilização de rebocos muito dúcteis (com adição de resinas) ou a incorporação de armaduras de rede de fibra de vidro, ou de fibras dispersas na massa, podem também ser alternativas viáveis para estes casos.

d4) Fendas devidas à retracção do suporte

Este problema - que, em rigor, poderia ser incluído no ítem anterior -, surge por vezes com suportes bastante sujeitos à retracção, nomeadamente no caso de paredes de betão moldado em obra, ou de alvenaria de blocos de betão [3.1] (ver fig. 2.3. b)

No caso de paredes de enchimento não é provável que se verifiquem problemas em zona corrente, pois apenas a retracção diferencial entre a parede e o reboco pode dar origem a tensões que serão, em todo o caso, de compressão (excepto se a retracção do reboco for superior à do suporte, caso em que estamos, no fundo, no caso de fendilhação por retracção do reboco), que provocarão assim mais facilmente descolamentos que fendilhação do reboco. Por outro lado, a retracção diferencial entre a alvenaria e a estrutura pode dar origem a fendilhação nas ligações, acompanhando o seu contorno.

Os suportes de betão moldado em obra, pelo contrário, tendem a fendilhar em zona corrente, devido a poderem sofrer variações dimensionais por retracção de secagem consideráveis, a que se adicionam variações por fluência. Têm, por outro lado, menores valores de retracção diferencial em relação aos restantes elementos da estrutura.

Para minorar as consequências da retracção dos suportes de alvenaria de blocos de betão, que se tornam cumulativas com a fluência das argamassas das juntas, é conveniente respeitar os prazos de secagem dos materiais, principalmente no caso de blocos de betão de inertes leves (com retracção, em princípio, superior) e evitar a sua exposição à chuva, durante o período de espera em estaleiro; de facto, a absorção de água, provocando dilatação, que depois se anularia durante a secagem, iria ampliar o efeito da retracção, após aplicação.

As normas actualmente em vigor em França, no Reino Unido e nos Estados Unidos limitam os valores da retracção de secagem (e da dilatação com a água) dos blocos de betão a valores que oscilam entre 0,30 mm/m e 0,65 mm/m conforme a origem da norma e a técnica

de ensaio [3.13].

No que se refere às paredes de betão moldado em obra é fundamental respeitar um prazo de secagem adequado - que depende das condições atmosféricas e de ventilação, e da espessura da parede - antes da aplicação do reboco.

Se se tratar de paredes estruturais, solidárias com a laje, a retracção diferencial entre os dois elementos pode dar origem a tensões horizontais importantes, susceptíveis de provocar, em casos extremos, fendas verticais.

As causas apontadas não constituem, naturalmente, uma listagem exaustiva das causas possíveis de fendilhação de rebocos.

É importante ter em conta que muitas destas causas são acumuláveis. Assim, embora determinados tipos de fendilhação possam ser, inicialmente, pouco gravosos do ponto de vista das exigências funcionais globais da parede - nomeadamente se se tratar de fendilhação não-infiltrante - podem criar pontos fracos que reduzem a resistência do reboco a outras acções, ou a outros ciclos da mesma acção. É por exemplo frequente verificar-se a evolução gradual, de ano para ano, de microfendilhação devida a retracção do reboco ou a variações térmicas diferenciais, para uma fendilhação que se torna cada vez mais larga e infiltrante.

3.2.3 - Principais efeitos da fendilhação

Quando ocorrem fendas, principalmente em rebocos densos e impermeáveis, a água tem um caminho fácil para entrar e ficar retida no plano de contacto revestimento-suporte ou penetrar no suporte, conforme a absorção deste. No primeiro caso, a água retida provoca perda de aderência, permite que, se a temperatura descer abaixo de 0°C, se forme gelo na interface, e favorece a acção destrutiva dos sais solúveis que podem estar presentes na água ou no material de suporte. No segundo caso, as infiltrações de água no suporte são factor de insalubridade do edifício, aceleram a degradação da alvenaria e podem atingir o paramento interior do edifício, provocando perdas de aderência e deterioração do revestimento interior, em particular se este for de gesso, ou de outro material pouco resistente à água.

A fendilhação dos rebocos é, assim, gravemente nociva para a salubridade do ambiente interior dos edifícios e para a durabilidade das paredes, além de prejudicar o seu aspecto estético. As consequências psicológicas para os utentes não são também desprezáveis,

verificando-se que a existência de fendilhação visível transmite uma sensação de degradação e até, por vezes, de insegurança.

Em última análise - embora tal não seja, felizmente, frequente -, o surgimento de fendas de largura e expressão importante em rebocos, aliada à perda de aderência que muitas vezes antecede a fendilhação, pode potenciar o desprendimento de placas de argamassa com dimensões e peso que as tornem perigosas para as pessoas que circulem nas proximidades, nomeadamente se os desprendimentos se derem em andares elevados.

Algumas das Exigências Essenciais definidas pela Directiva dos Produtos da Construção [3.28] são, portanto, afectadas por este tipo de anomalias: a Exigência Essencial 3 - Higiene, Saúde e Ambiente -, a Exigência Essencial 4 - Segurança na Utilização - e a Exigência Essencial 6 - Economia de Energia e Isolamento Térmico.

3.2.4 - Exigências de comportamento no que diz respeito à resistência à fendilhação de rebocos

Os rebocos devem ter características que lhes permitam resistir sem fendilhar a pequenos movimentos do suporte e às tensões neles instaladas em consequência das restrições impostas aos seus movimentos, nomeadamente aos resultantes da retracção, das variações de temperatura ou do teor de água.

Não se exige que resistam sem fendilhar a movimentos significativos do suporte, designadamente aos que dão origem a fendilhação do próprio suporte [3.12].

De um modo geral, as tensões induzidas num reboco pelas acções a que nos estamos a referir dependem da amplitude dos movimentos que ocorreriam se não houvesse restrições, do grau de restrição dos movimentos, do módulo de elasticidade da argamassa e da sua capacidade de relaxação de tensões, e, ainda, da velocidade dos movimentos. Na realidade, quanto mais rápida for a deformação imposta - por retracção restringida do revestimento, por variação de temperatura ou do teor de água, por deformação do suporte, etc. - maior é a probabilidade de fendilhação. Como se explicará no capítulo 4, este facto deve-se, possivelmente, à actuação da relaxação de tensões e à consequente redução do módulo de deformação do material.

Os rebocos devem ainda resistir sem fendilhar às acções climáticas normais, como o

tempo húmido e frio, que pode originar a formação de gelo, e às acções químicas a que é normal estarem sujeitos.

Assim, os rebocos a seleccionar para uma determinada obra devem ter uma boa capacidade para acomodar as deformações a que vão estar, previsivelmente, sujeitos e devem ser bem adaptados aos suportes que se destinam a revestir. De facto, a interacção do revestimento com o suporte e as ligações químicas e mecânicas que com ele estabelece influenciam decisivamente o processo de hidratação e, portanto, a constituição da argamassa endurecida, além de estabelecerem o modo como são transmitidas as tensões entre os dois materiais. Além disso, não devem ser excessivamente absorventes, nem muito impermeáveis ao vapor de água, para reduzirem a quantidade e o tempo de permanência de água no seu interior, ou no interior do suporte, não prejudicando o desempenho e não favorecendo fenómenos físicos (gelo) ou químicos (reacções com sais) destrutivos.

As especificações devem incluir as acções necessárias à preparação do suporte, as disposições construtivas mais adequadas a cada caso e as medidas a tomar para garantir as condições de cura, quando tal se verifique necessário. O planeamento da obra deve ter em conta a necessidade de respeitar os prazos de secagem do suporte e das várias camadas e de eventuais tempos de espera para que as condições climáticas não sejam excessivamente desfavoráveis.

3.3 - CRITÉRIOS PRÁTICOS DE AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À FENDILHAÇÃO DE REBOCOS

Os critérios conhecidos de avaliação da susceptibilidade à fendilhação de argamassas referem-se essencialmente à fendilhação por retracção restringida e serão descritos em pormenor no capítulo 4. Aqui, descreveremos apenas os dois critérios que, tanto quanto sabemos, têm sido usados na avaliação e classificação de rebocos, embora com reconhecidas limitações de eficácia e rigor.

De facto, as causas de fendilhação e os factores que influenciam o fenómeno são tão numerosos e complexos que é difícil avaliar, com base num critério único e tendo apenas em conta as características do revestimento, a sua maior ou menor tendência para fendilhar sob as acções a que está sujeito durante a sua vida útil.

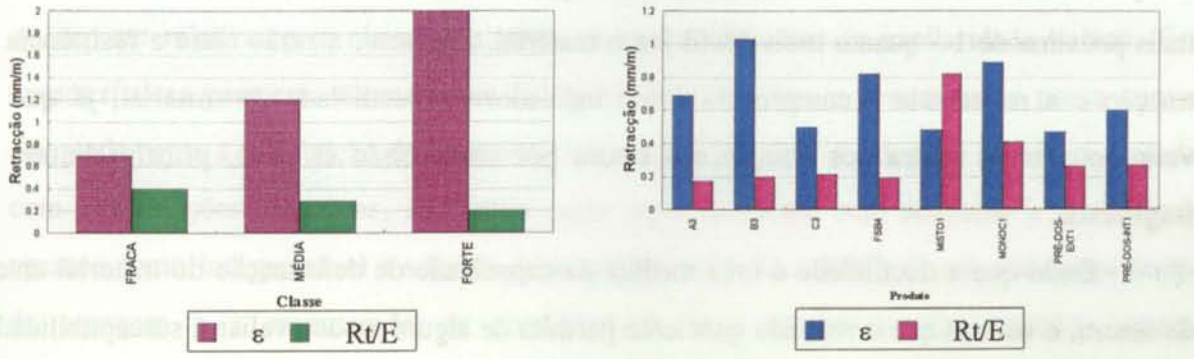
a) **Critério baseado na relação entre a *retracção* (ε_r), o *módulo de elasticidade dinâmico* (*E*) e a *relação módulo de elasticidade dinâmico / resistência à tracção por flexão* (E/R_t)**

Este critério - que designaremos por ε_r - E - E/R_t , desenvolvido e aplicado pelo CSTB durante vários anos [3.29], foi também usado pelo LNEC em estudos de homologação e apreciações preliminares de revestimentos pré-doseados de ligante mineral. Baseia-se no princípio de que a tendência para a fendilhação é tanto maior quanto maior for a tensão de tracção desenvolvida na argamassa devido à retracção restringida e quanto menor for a sua capacidade para lhes resistir. Ora, quanto maior for a retracção e o módulo de elasticidade, maior é a tensão de tracção induzida. Por outro lado, quanto maior for a resistência à tracção, maior é a capacidade de resistir, sem fendilhar, às tensões geradas.

Admitindo que, para não haver fendilhação, tem que ser $\varepsilon_r \leq R_t/E$ ao longo do tempo durante o qual se prolonga a retracção e que, quanto maior for o afastamento entre as duas curvas ($\varepsilon(t)$ e $R_t(t)/E(t)$ maior é o *coeficiente de segurança* em relação à fendilhação por retracção, parece lógico que a resistência à fendilhação possa ser, de certo modo, avaliada de acordo com conjuntos de patamares daqueles parâmetros, num momento convencional. Partindo deste princípio, o CSTB definiu o critério que se sintetiza no quadro 3.1. Faz-se notar que, de acordo com os patamares fixados para as várias classes, em todas elas se verificaria intersecção das curvas acção/resistência, ou seja, se se admitisse a lei referida acima tal como foi escrita, mesmo os revestimentos com *fraca susceptibilidade à fendilhação* poderiam facilmente fendilhar por retracção restringida (ver fig.3.10). Na verdade, foram certamente tidos em conta, de forma empírica, factores não quantificados explicitamente, entre os quais se contam a relaxação da argamassa durante o período relativamente longo de actuação da acção *retracção restringida*, o facto de a restrição não ser, possivelmente, total, permitindo uma parcela do deslocamento o facto de as condições climáticas e de cura não serem, provavelmente, tão severas como as de laboratório.

QUADRO 3.1 - Critério de avaliação da susceptibilidade à fendilhação de argamassas de reboco [3.29]

CARACTERÍSTICA (aos 28 dias)	CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO		
	Fraca susceptibilidade à fendilhação	Média susceptibilidade à fendilhação	Forte susceptibilidade à fendilhação
Retracção de secagem $\Delta l/l$ (mm/m)	$\Delta l/l \leq 0,7$	$0,7 < \Delta l/l < 1,2$	$\Delta l/l \geq 1,2$
Módulo de elasticidade E (MPa)	$E \leq 7000$	$7000 < E < 12000$	$E \geq 12000$
Módulo de elasticidade / Resistência à tracção por flexão E/R_t	$E/R_t \leq 2500$	$2500 < E/R_t < 3500$	$E/R_t \geq 3500$



a) b)

Fig. 3.10 - Relação entre ε_r e R_t/E

a) nas várias classes definidas no critério (limites inferiores)

b) em vários rebocos testados no LNEC (ver quadros 3.2 e 3.3)

Este critério, embora tenha, à partida, uma base lógica, provou ser excessivamente simplista e não permitir uma classificação correcta de alguns tipos de revestimentos pré--doseados. Trata-se, afinal, de um critério semi-empírico, que enferma dos defeitos próprios dessa categoria de critérios: tendo sido definido - e experimentado - para um determinado tipo de revestimentos - os monocamada da 1ª geração - não interpreta igualmente bem o comportamento de outros tipos de revestimentos. Nomeadamente, os revestimentos com inertes leves parecem escapar claramente a esta classificação. Com efeito, as suas retracções elevadas colocam-nos em geral na classe de *forte susceptibilidade à fendilhação* embora muitos deles tenham, na prática, um bom comportamento no que se refere a este aspecto.

Por outro lado, o critério não tem sensibilidade suficiente para os revestimentos tradicionais,

tradicionais, que, devido ao seu alto módulo de elasticidade, são também, em geral, classificados como de *forte susceptibilidade à fendilhação*, sem permitir distinguir entre os que se comportam relativamente bem, se forem respeitadas as regras da boa arte na sua dosagem e aplicação, dos que estão, pela sua composição, quase condenados a fendilhar (ver quadros 3.2 e 3.3).

b) Critério baseado na relação entre a resistência à tracção (R_t) e a resistência à compressão (R_c)

Numa argamassa, como é sabido, a resistência à tracção é muito inferior à resistência à compressão, sendo no entanto a relação entre aqueles dois valores (R_t/R_c) tanto maior - tanto mais próxima de 1 - quanto mais dúctil for o material. De facto, a razão entre a resistência à tracção e a resistência à compressão é um indicador da ductilidade do material, já que a variação entre a rotura por tracção e a rotura por compressão se deve, principalmente, à fragilidade.

Dado que a ductilidade é uma medida da capacidade de deformação do material antes da rotura, é natural que o referido quociente permita de algum modo avaliar a susceptibilidade à fendilhação por retracção, ou seja, a capacidade de o revestimento acomodar sem rotura as deformações impostas pelos mecanismos da retracção restringida.

No entanto, qualquer avaliação será sempre feita em termos relativos, não se conhecendo nenhuma escala ou classificação feita para nenhum grupo de revestimentos ou de argamassas com base naquela relação. De qualquer modo, o facto de não entrar em linha de conta com o valor da retracção é, naturalmente, uma limitação considerável à eficácia e principalmente à generalidade deste critério, referido, contudo, por alguns autores, como Thomasson [3.30] - que afirma que a relação R_t/R_c pode variar entre 0,1 (para os revestimentos tradicionais mais frágeis) e 0,4 para alguns monocamada - e Peroni [3.31], que considera que as argamassas a usar em reabilitação de edifícios antigos, devem ter relações R_t/R_c tão próximas de 1 quanto possível (ver quadros 3.2 e 3.3).

c) Outros critérios

Outros critérios, nomeadamente com base em ensaios de retracção restringida,

estudados para cimentos, betões e argamassas mais ricas, mas nalguns casos também para rebocos, não têm sido, tanto quanto se sabe, usados sistematicamente para a avaliação da susceptibilidade à fendilhação de rebocos. Como já foi referido, será feita uma análise aprofundada desses critérios no capítulo 4.

3.4 - COMPORTAMENTO À FENDILHAÇÃO DE REBOCOS TRADICIONAIS

As argamassas tradicionais para reboco são particularmente susceptíveis à fendilhação por retracção. De facto, como já foi referido, é difícil dosear argamassas de forma a obter, em simultâneo, retracções e módulos de elasticidade reduzidos, resistências à tracção e aderências ao suporte relativamente elevadas e ainda manter coeficientes de capilaridade baixos. Estas características parecem, contudo, ser indispensáveis para que o revestimento possa cumprir adequadamente a sua função de impermeabilização de paredes. A adopção de várias camadas, com constituições diferentes, cada uma delas particularmente bem adaptada a uma função, aparece como indispensável à solução deste problema [3.32 a 3.34]. O respeito pelos tempos de secagem e a manutenção de condições de cura favoráveis são também aspectos fundamentais a ter em conta. No entanto, a constituição das argamassas a usar tem variáveis sobre as quais é possível trabalhar para optimizar o comportamento à fendilhação, sem desprezar os outros aspectos importantes do comportamento dos revestimentos de paredes.

A aplicação dos dois critérios referidos em 3.3. a e 3.3. b a várias argamassas tradicionais de reboco estudadas no LNEC [3.23, 3.24 e 3.35 a 3.38] permitiu obter os valores e classificações sintetizados no quadro 3.2, extraído da base de dados de revestimentos de paredes de ligantes minerais do DED/NCCt [3.39].

De acordo com o critério ε_r - E - E/R_t todas as argamassas constantes do quadro e em que se dispõe de valores para todos os parâmetros do critério são incluídas na classe *forte susceptibilidade à fendilhação*, devido à alta relação E/R_t. No entanto, com composições e características tão diversificadas, existem certamente grandes diferenças na sua susceptibilidade à fendilhação. A prática mostra, por exemplo, que as argamassas bastardas de cimento e cal aérea, como as argamassas dos tipos D, E, F e G, fendilham, em princípio, muito menos que as que têm o cimento como único ligante, como as argamassas dos tipos A e

B.

Segundo o critério R_t/R_c é visível que as argamassas de cimento e cal aérea são mais dúcteis que as restantes, notando-se, além disso, maior ductilidade nas de menor teor de cimento.

3.5 - COMPORTAMENTO À FENDILHAÇÃO DE REBOCOS NÃO-TRADICIONAIS

Nos rebocos não-tradicionais a formulação é optimizada de acordo com objectivos específicos do revestimento em causa. Nomeadamente, os rebocos monocamada para edifícios com paredes de betão ou de alvenarias correntes têm em geral, na sua composição, adjuvantes que lhes garantem uma maior impermeabilidade à água em zona corrente e um módulo de elasticidade baixo em simultâneo com resistências à tracção relativamente elevadas. Além disso são, geralmente, menos sensíveis à sucção do suporte e às variações de temperatura e humidade na altura da aplicação, devido aos adjuvantes retentores de água que são, também, constituintes habituais destes revestimentos.

A aplicação dos dois critérios referidos em 3.3. a e 3.3. b a vários revestimentos pré--doseados deste tipo estudados no LNEC permitiu obter os valores e classificações sintetizados no quadro 3.3, extraído da base de dados de revestimentos de paredes de ligantes minerais do DED/NCCt [3.39].

Verifica-se que, de acordo com o critério ε_r - E - E/R_t, o revestimentos do tipo *misto* (com o ligante constituído por cimento e resina) e os do tipo *monocamada* incluídos no quadro se enquadram na classe de *média susceptibilidade à fendilhação*, enquanto os do tipo *reboco pré-doseado* são classificados como de *forte susceptibilidade à fendilhação*.

De acordo com o critério R_t/R_c, todos os revestimentos incluídos no quadro parecem apresentar uma ductilidade superior à dos rebocos tradicionais só de cimento e areia.

A aderência ao suporte é, no entanto, nitidamente superior à das argamassas tradicionais constantes do quadro 3.2, apenas com a excepção de um pré-doseado para paramentos interiores.

Faz-se notar que os rebocos não-tradicionais constantes do quadro 3.3 são *pesados*, como se pode ver pelas respectivas massas volúmicas, não representando, portanto, todos os produtos deste tipo.

Os revestimentos com cargas leves têm retracções elevadas, devido à

compressibilidade dos inertes leves, e têm, em geral, fracas resistências mecânicas. Assim, embora os módulos de elasticidade sejam reduzidos, o critério de susceptibilidade à fendilhação do CSTB conduz, quase sempre, a classificações de *forte susceptibilidade à fendilhação*. Na realidade, porém, a prática e estudos de investigação realizados têm mostrado que alguns destes revestimentos têm boa resistência à fendilhação [3.40].

Os revestimentos aplicáveis sobre isolante - em ETICS (sistemas de isolamento térmico pelo exterior por revestimento aplicado sobre isolante) ou em alvenarias isolantes (constituídas, por exemplo, por blocos de poliestireno expandido servindo de cofragem perdida a um núcleo de betão, como o sistema "Isorast") - estão sujeitos a solicitações particularmente severas, quer devido à menor (em geral) estabilidade dimensional do suporte isolante, quer devido aos choques térmicos mais fortes a que está sujeito. Assim, é natural que os revestimentos que se destinam a esse tipo de aplicações sejam formulados de forma a apresentarem características especialmente boas no comportamento à fendilhação. Na maioria dos casos, os produtos usados são de ligante misto, ou seja, têm uma proporção significativa de resina na sua composição, o que permite que esta seja considerada como ligante, em paralelo com o cimento. Trata-se de revestimentos de espessura inferior aos revestimentos minerais - espessuras da ordem de 3 a 5 mm contra espessuras de cerca de 5 a 15 mm - mas mais elásticos e bastante *duros* (com resistência ao choque elevada, apesar da pequena espessura e do baixo módulo de elasticidade). No entanto, actualmente existem já no mercado diversos sistemas que incluem revestimentos minerais, embora a proporção de resina seja sempre relativamente elevada em relação aos produtos aplicáveis sobre alvenarias ou betão. Com estes produtos os riscos de fendilhação são maiores, mas conseguem-se resistências ao choque significativamente superiores e maiores durabilidades, além de que têm melhor comportamento ao fogo. O recurso generalizado a armaduras de redes de fibra de vidro ou de outros materiais e, nalguns casos, à incorporação de fibras, de vidro ou sintéticas (ver capítulo 5), prende-se também com a necessidade de melhorar a resistência à fendilhação e a resistência ao choque [3.41 a 3.43].

Os revestimentos a aplicar sobre alvenarias de betão celular autoclavado estão, também, sujeitos a solicitações bastante severas, por razões semelhantes (embora a escala mais reduzida) aos aplicáveis sobre isolante. Portanto, é também conveniente, nestes casos, a opção por revestimentos especialmente formulados para o efeito, ou por revestimentos monocamada que se verifique estarem adaptados a essa utilização [3.26].

Quadro 3.2 - Parâmetros ligados à susceptibilidade à fendilhação de rebocos tradicionais

Nome código	Composição	Traço	Idade (dias)	Massa volúmica (endurecido) (kg/m3)	Retracção (mm/m)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	E/Rt	Resistência à compressão (MPa)	Rt/Rc	Suporte	Aderência a seco (MPa)
A1	ci:ar r	1:4	28	1771	0,40	0,9	5532	6147	3,1	0,29	tijolo	0,07
A2	ci:ar c+r	1:4	28	1861	0,51	1,2	7035	5863	4,5	0,27	tijolo	0,38
A3	ci:ar c	1:4	28	1936	0,69	1,7	9805	5768	6,9	0,25	-	-
AP	ci:ar r	1.3	28	2031	0,54	4,1	-	-	14,4	0,28	betão	0,11
AP	ci:ar r	1.3	28	2031	0,54	4,1	-	-	14,4	0,28	fibrocimento	0,12
BP	ci:ar r	1:3	28	1965	0,55	3,1	-	-	10,7	0,29	fibrocimento	0,24
BP	ci:ar r	1:3	28	1965	0,55	3,1	-	-	10,7	0,29	betão	0,30
B1	ci:ch:ar r	1:1:8	28	1696	0,55	0,5	2691	5382	1,7	0,29	tijolo	0,30
B2	ci:ch:ar c+r	1:1:8	28	1851	0,53	0,7	3746	5351	2,5	0,28	tijolo	0,30
B3	ci:ch:ar c	1:1:8	28	1910	1,03	1,1	5426	4933	4,3	0,26	tijolo	0,32
C1	ch:ar r	1:4	28	1694	0,23	0,2	3027	15135	0,6	0,33	-	-
C2	ch:ar c+r	1:4	28	1795	0,44	0,3	1134	3780	1,1	0,27	-	-
C3	ch:ar c	1:4	28	1873	0,50	0,5	2332	4664	1,7	0,29	-	-
CP	ci:ca:ar r	1:1:6	28	1934	0,37	1,5	-	-	4,1	0,37	betão	0,21
CP	ci:ca:ar r	1:1:6	28	1934	0,37	1,5	-	-	4,1	0,37	fibrocimento	0,15
D1	ci:ca:ar r	1:1:6	28	1756	0,30	0,7	4770	6814	2,1	0,33	tijolo	0,10
DP	ci:ca:ar r	1:1:6	28	1840	0,25	1,2	-	-	3,7	0,32	fibrocimento	0,21
DP	ci:ca:ar r	1:1:6	28	1840	0,25	1,2	-	-	3,7	0,32	betão	0,13
FSBI	ci:ca:ar c+r	1:1:6	28	1835	0,74	1,0	5370	5370	3,0	0,33	-	-
FSBII	ci:ca:ar c+r	1:1:6	28	1825	0,45	1,0	5290	5290	2,4	0,42	-	-
FSBIV	ci:ca:ar c+r	1:1:6	28	1835	0,82	0,8	4090	5113	2,0	0,40	-	-
E1	ci:ca:ar r	1:2:9	28	1716	0,26	0,5	3400	6800	1,0	0,50	tijolo	0,05
E2	ci:ca:ar c+r	1:2:9	28	1820	0,51	0,7	4810	6871	1,6	0,44	tijolo	0,09
F1	ci:ca:ar r	1:3:12	28	1738	0,45	0,5	3010	6020	0,9	0,56	tijolo	0,05
G1	ci:ca:ar r	1:2:16	28	1825	0,44	0,3	-	-	0,9	0,37	-	-
G2	ci:ca:ar c+r	1:2:16	28	1894	0,52	0,6	-	-	1,1	0,53	tijolos edif. ant.	0,08
G3	ci:ca:ar c	1:2:16	28	1737	1,40	0,4	-	-	1,1	0,37	-	-

ci - cimento; ca - cal aérea; ch - cal hidráulica; ar - areia; ar r - areia do rio Tejo; ar c+r - areia de Corroios e do rio Tejo (50% de cada); ar c - areia de Corroios; IA - introdutor de ar

Quadro 3.2 - Parâmetros ligados à susceptibilidade à fendilhação de rebocos tradicionais (continuação)

Nome código	Composição	Traço	Idade (dias)	Massa volúmica (endurecido) (kg/m3)	Retracção (mm/m)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	E/Rt	Resistência à compressão (MPa)	Rt/Rc	Suporte	Aderência a seco (MPa)
RB	ci:ca:ar r	1:1:5	28	1785	0,52	1,1	13000	11818	3,4	0,32	-	-
RA	ci:ar r +IA	1:5+IA	28	1467	0,45	0,8	6000	7500	2,0	0,40	-	-
RC	ch:ar r +cvol	1:5 + 40% cvol	28	1518	0,07	0,2	-	-	0,2	1,00	-	-
RD	ci:ar r +IA	1:5+IA	28	1562	0,38	1,4	21000	15000	4,2	0,33	-	-
RE	ci:ar r +IA	1:5+IA	28	1522	0,29	1,1	7000	6364	3,1	0,35	-	-

ci - cimento; ca - cal aérea; ch - cal hidráulica; ar - areia; ar r - areia do rio; Tejo; ar c+r - areia de Corroios e do rio Tejo (50% de cada); ar c - areia de Corroios; IA - introdutor de ar

Quadro 3.3 - Parâmetros ligados à susceptibilidade à fendilhação de rebocos não-tradicionais

Nome código	Tipo	Idade (dias)	Massa volúmica (endurecido) (kg/m3)	Retracção (mm/m)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	E/Rt	Resistência à compressão (MPa)	Rt/Rc	Suporte	Aderência a seco (MPa)
Misto1	misto	28	1745	0,48	8,2	10 000	1220	20,9	0,39	fibrocimento	0,58
Misto1	misto	28	1745	0,48	8,2	10 000	1220	20,9	0,39	betão	1,23
Monoc1	Monocamada	28	1615	0,89	3,3	8103	2455	9,3	0,35	betão liso	0,60
Monoc1	Monocamada	28	1615	0,89	3,3	8103	2455	9,3	0,35	tijolo	0,78
Pré-dos-bra1	Pré-doseado	28	1736	0,73	2,44	9065	3715	7,12	0,34	tijolo	0,51
Pré-dos-bra1	Pré-doseado	28	1714	0,84	2,72	10179	3742	8,56	0,32	tijolo	0,56
Pré-dos-ext1	Pré-doseado	28	1521	-	1,5	-	-	3,4	0,44	-	-
Pré-dos-ext1	Pré-doseado	28	1541	-	1,4	-	-	3,3	0,42	-	-
Pré-dos-ext1	Pré-doseado	28	1741	0,47	2,7	10300	3815	7,5	0,36	tijolo	0,49
Pré-dos-int1	Pré-doseado	28	1464	-	0,7	-	-	1,4	0,50	-	-
Pré-dos-int1	Pré-doseado	28	1511	-	1	-	-	2,3	0,43	-	-
Pré-dos-int1	Pré-doseado	28	1692	0,60	1,6	5900	3688	4,5	0,36	tijolo	0,31

ci - cimento; ch - cal hidráulica; ca - cal aérea; ar - areia

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 3

[3.1] - LOGEAIS, L. - **L'étanchéité à l'eau des façades lourdes.** Qualité-Construction, Édition E. G., 1988.

[3.2] - ABRANTES, V.; CALEJO, R. - **Planeamento das acções de manutenção em parques habitacionais.** "In" 2° ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Comunicações. Lisboa, LNEC, Junho/ Julho de 1994. Vol. I, págs. 913-923.

[3.3] - MARTINS DE FREITAS, A. H.; VIEGAS DA SILVA, M. M. - **Levantamento, análise e diagnóstico do estado de degradação do Parque Imobiliário de Lisboa.** "In" 2° ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Comunicações. Lisboa, LNEC, Junho/ Julho de 1994. Vol. I, págs. 813-822.

[3.4] - CALEJO, R. - **Projecto e diagnóstico de patologias em edifícios,** "In" Manutenção e Reabilitação de Edifícios, Textos de apoio às 4ªs Jornadas de Construções Civis, Secção de Construções Civis da FEUP, Porto, FEUP, Maio de 1996.

[3.5] - CANHA DA PIEDADE, A. - **Tópicos para uma política de conservação e reabilitação de edifícios,** "In" Manutenção e Reabilitação de Edifícios, Textos de apoio às 4ªs Jornadas de Construções Civis, Secção de Construções Civis da FEUP, Porto, FEUP, Maio de 1996.

[3.6] - APPLETON, J. - **Patologia precoce dos edifícios.** "In" 2° ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Comunicações. Lisboa, LNEC, Junho/ Julho de 1994. Vol. I, págs. 823-833.

[3.7] - LUCAS, J. Carvalho - **Revestimentos para paramentos interiores de paredes de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado. Vol. II. Betão celular autoclavado. Fissuração de paredes de alvenaria em geral. Fissuração de paredes de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado no nosso país.** Lisboa, LNEC, 1986. Tese para obtenção do grau de especialista e acesso à categoria de Investigador Auxiliar do LNEC.

[3.8] - BONSHOR, R. B.; BONSHOR, L. L. - **Cracking in buildings.** London, British Research Comunications Ltd., 1996.

[3.9] - AFNOR - **Peintures et vernis. Façades. Revêtements à base de polymères utilisés en refection des façades en service. Définitions et vocabulaire.** AFNOR, juin 1989. NF P 84-401.

[3.10] - ACI COMMITTEE 524 - **Guide to Portland Cement Plastering.** ACI Materials Journal, Jan.- Feb. 1993, págs. 69-93.

[3.11] - BSI - **External rendered finishes. Code of practice.** London, BSI, 1976. BS 5262:1976.

[3.12] - LUCAS - **Revestimentos tradicionais com base em argamassas de ligantes hidráulicos para impermeabilização de paramentos exteriores de paredes.** Lisboa, LNEC. Relatório não publicado.

[3.13] - CARVALHO, Fernanda - **Comportamento mecânico de alvenarias. Influência de alguns parâmetros nas suas resistências à compressão e ao corte.** Lisboa, LNEC, Maio de 1990. Tese para obtenção do grau de Especialista e acesso à categoria de Investigador Auxiliar do LNEC.

[3.14] - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) TC 125 WG1/TG1 - **Specification for masonry units. Part 1: Clay masonry units.** Brussels, July 1996. PrEN 771-1 (documento de trabalho).

[3.15] - CEN TC 125 WG1/TG3 - **Specification for masonry units. Part 3: Aggregate concrete masonry units.** Brussels, July 1996. PrEN 771-3 (documento de trabalho).

[3.16] - COUTINHO, A. S. - **Fabrico e propriedades do betão.** Vol. I. Lisboa, LNEC, 1988.

[3.17] - NEVILLE, A. M. - **Properties of concrete.** Sir Isaac Pitman and Sons, Ltd.. London, 1968.

[3.18] - MENDES DA SILVA, J. A. R.; ABRANTES, VÍTOR; TRINDADE DIAS, C.; BAIO, A.; ALMEIDA, J. V. - **Dimensional variation and water absortion of clay bricks. An experimental aproach.** "In" International Symposium on Moisture Problems in Building Walls, Proceedings. Porto, September 1995, págs. 127-136.

[3.19] - COLLEPARDI, M. - **Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings.** Materials and Structures, 23, 1990, págs. 81-102.

[3.20] - TAYLOR, G. D. - **Construction Materials.** Longman Scientific & Technical. London, 1991.

[3.21] - VEIGA, M.Rosário; PAIVA, J.V. - **Recomendações preliminares para reparação de paramentos afectados na Fortaleza de Santa Maria.** Nota Técnica. Lisboa, LNEC, Setembro de 1988.

[3.22] - BRAGA, M. Olinda - **Os cimentos. Panorama actual e tendências de evolução.** Lisboa, LNEC, 1990. Informação Técnica de Materiais de Construção, ITMC 12.

[3.23] - VEIGA, M. Rosário; APPLETON, João - **Acções de apoio ao projecto de reabilitação do Moinho das Mouriscas.** Relatório. Lisboa, LNEC, Maio de 1992.

[3.24] - VEIGA, M. Rosário; APPLETON, João; AGUIAR, J. - **Colaboração na reabilitação do Forte de S. Bruno. Documento 2.** Relatório. Lisboa, LNEC, Janeiro de 1996.

[3.25] - |P| - Leis, decretos, etc. - **Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. (Decreto-Lei nº 40, de 6 de Fevereiro de 1990).** Lisboa, Diário da República, 1990.

[3.26] - LNEC - **YTONG. Sistema de construção de paredes de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado.** Lisboa, LNEC, Dezembro de 1993. DH 383.

[3.27] - PINA DOS SANTOS, C. - **Temperaturas superficiais em maquetas experimentais de revestimentos de coberturas.** Lisboa, LNEC, 1988. Relatório.

[3.28] - |P| - Leis, decretos, etc. - **Transposição para a legislação portuguesa da directiva nº 89/106/CEE, de 21 de Dezembro de 1989, do Conselho das Comunidades Europeias (Directiva dos produtos da construção (CPD) (Decreto-Lei nº 113/93, de 10 de Abril e Portaria nº 566/93).** Lisboa, Diário da república, 1993.

[3.29] - CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB) - **Note d'information sur les caractéristiques et le comportement des enduits extérieurs d'imperméabilisation de murs à base de liants hidraulyques.** Cahiers du CSTB, Paris, (230), Cahier 1778, juin 1982.

[3.30] - THOMASSON, F. - **Les enduits monocouches à base de liants hydrauliques.** Paris, Unitecna France, septembre 1982.

[3.31] - PERONI, S. et als - **Lime based mortars for the repair of ancient masonry and possible substitutes.** Rome. October 1981, págs. 63-93.

[3.32] - LUCAS, J. Carvalho - **Revestimentos para paramentos interiores de paredes de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado. Vol I.** Lisboa, LNEC, 1986. Tese para obtenção do grau de especialista e acesso à categoria de Investigador Auxiliar do LNEC.

[3.33] - LUCAS, J. Carvalho - **Classificação geral de revestimentos para paredes de alvenaria ou de betão.** Lisboa, LNEC, 1990. ITE 24.

[3.34] - CANHA DA PIEDADE, A.; PROENÇA, M. - **Utilização de revestimentos de argamassas hidráulicas - tradicionais e não-tradicionais - em obras de reabilitação de edifícios.** Edificando, 1993, págs. 29-32.

[3.35] - CARVALHO, Fernanda; VEIGA, M. Rosário - **Caracterização de argamassas de reboco para a pousada de S. Francisco em Beja.** Relatório. Lisboa, LNEC, Outubro de 1993.

[3.36] - VEIGA, M. Rosário - **Caracterização experimental de argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos.** Relatório. Lisboa, LNEC, Dezembro de 1993.

[3.37] - VEIGA, M. Rosário; CARVALHO, Fernanda R. - **Caracterização experimental de argamassas com cal hidráulica para revestimento de paredes.** Relatório. Lisboa, LNEC, Março de 1994.

[3.38] - VEIGA, Maria do Rosário; CARVALHO, Fernanda - **Argamassas de revestimento na reabilitação do património urbano.** "In" 2º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Comunicações. Lisboa, LNEC, Junho/ Julho de 1994. Vol. I, págs. 195-206.

[3.39] - GONÇALVES, Teresa - **Desenvolvimento de uma Base de Dados para revestimentos de paredes de ligantes minerais. Lisboa, LNEC, 1996.** Trabalho no âmbito do 5º Curso de Mestrado em Construção do IST.

[3.40] - TAMIN, P. F. - **Étude du comportement mécanique des revêtements de façade. Enduits.** Thèse de doctorat. Paris, Ècole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), décembre 1986.

[3.41] - UNION EUROPÉENNE POUR L'AGRÉMENT TECHNIQUE DANS LA CONSTRUCTION (UEATc) - **Directives UEATc pour l'agrément des complexes d'isolation extérieure des façades avec enduit mince sur isolant en polystyrène expansé.** Paris, Cahiers du CSTB, 1988. Livraison 293, Cahier 2289.

[3.42] - UEAtc - **Guide technique UEAtc pour l'agrément des systèmes d'isolation extérieure des façades avec enduit minéraux.** Paris, Cahiers du CSTB, 1992. Livraison 331, Cahier 2602.

[3.43] - EUROPEAN ORGANIZATION FOR TECHNICAL APPROVALS (EOTA) - **Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering.** EOTA, Brussels, 1996. Documento de trabalho (Draft ETAG nº 9).

CAPÍTULO 4

FENDILHAÇÃO DE ARGAMASSAS POR RETRACÇÃO RESTRINGIDA

4.1 - Introdução

4.2 - Retracção

4.3 - Relaxação de Tensões

4.4 - Fendilhação por Retracção Restringida

4.5 - Conclusões

Bibliografia do Capítulo 4

4.1 - INTRODUÇÃO

Os revestimentos de ligantes minerais para paredes, como todas as argamassas, sofrem variações dimensionais por retracção desde o momento em que são aplicados até à estabilização, que se admite correntemente ocorrer, em termos médios e para efeitos práticos, em idade próxima dos 28 dias. Essas variações, provocadas por um conjunto de fenómenos físico-químicos ao nível da fase *evolutiva* da argamassa - a matriz de cimento -, são restringidas pela fase *estável* - os inertes - e, em geral, também pelo suporte ao qual o revestimento está aderente, nos casos correntes em que este é muito mais rígido. Desenvolvem-se, assim, tensões de tracção no seio da argamassa, num período em que as suas características mecânicas se encontram ainda em evolução.

A susceptibilidade dos rebocos à fendilhação por retracção durante este período depende, portanto, da evolução da retracção no tempo, mas também, em grande parte, da evolução no tempo da sua deformabilidade - caracterizada, em primeira análise, pelo módulo de elasticidade E(t) - e da sua resistência à tracção $R_t(t)$. Verifica-se, no entanto, que as tensões induzidas por retracção restringida são muito inferiores às correspondentes a uma deformação imposta da mesma magnitude aplicada instantaneamente, o que indica que a relação entre a retracção e o campo de tensões resultante não depende apenas da lei que rege a evolução do módulo de elasticidade (ou, no caso plano, da matriz de rigidez) da camada.

As condições atmosféricas, que condicionam a evaporação e a absorção do suporte com o qual está em contacto, influenciam, naturalmente, a retracção e a cinética de hidratação da argamassa de reboco, e, consequentemente, também a evolução das suas características mecânicas, nomeadamente a resistência à tracção e o módulo de elasticidade.

Nestas condições, a avaliação da susceptibilidade à fendilhação de um reboco surge como uma matéria complexa, que parece exigir, em primeiro lugar, um conhecimento profundo das várias características em jogo, das leis que as regem e dos factores que as influenciam. Muitos investigadores se têm dedicado a estudos nessa área, quer no que se refere às pastas de cimento, betões e argamassas em geral, quer no que se refere especificamente aos revestimentos de ligantes minerais para paredes, o que tem permitido avançar nos conhecimentos nesse domínio. Nos ítens seguintes procurar-se-á dar uma ideia da evolução dos conhecimentos sobre os fenómenos que se consideram mais determinantes para a previsão da fendilhação por retracção de rebocos e apresentar-se-á uma síntese da situação

actual e dos problemas que se consideram em aberto.

4.2 - RETRACÇÃO

4.2.1 - Enquadramento dos estudos sobre retracção

Os elementos de argamassa e de betão de cimento estão sujeitos a variações de volume, desde a amassadura até ao estado limite de equilíbrio com o ambiente, a temperatura constante e na ausência de cargas exteriores aplicadas. Estas variações, resultantes da interacção de vários fenómenos, traduzem-se, geralmente, em contracções durante a maior parte desse período; no entanto, nalguns períodos da vida da argamassa ou do betão e em determinadas condições de humidade ambiente, o efeito final dos fenómenos envolvidos pode ser de expansão.

Alguns autores usam a designação de retracção para estas variações, mesmo quando se verifica inversão de sinal, outros preferem reservar o termo retracção para a contracção e designar por expansão ou empolamento as variações dimensionais positivas. Aqui, optaremos por usar o termo retracção no sentido mais lato, e distinguir, quando necessário, entre contracção e expansão.

O conhecimento do fenómeno da retracção e da sua evolução é extremamente importante para controlar as suas causas e tentar minimizar os seus efeitos, que vão desde a microfendilhação e fendilhação de elementos de argamassa e de betão - com as consequências habituais de perda de capacidade de impermeabilização e redução de durabilidade, entre outras - até, no caso do betão pré-esforçado, à redução do efeito do pré-esforço - com consequências ao nível da estabilidade estrutural. O reconhecimento dessa importância levou a que diversos investigadores se tenham dedicado ao seu estudo, desde Freyssinet, nos anos 20, que é geralmente citado como iniciador dos estudos neste domínio, sendo referido, por exemplo, por Sousa Coutinho, Joisel, Tamin e Malatrait [4.1 a 4.5]. Apesar disso, a retracção, devido à sua complexidade e à multiplicidade de factores que a influenciam, é ainda um fenómeno incompletamente conhecido, não quantificável com rigor - excepto, eventualmente, nalguns casos muito bem definidos em que foi possível estabelecer fórmulas empíricas - e com efeitos pouco previsíveis.

4.2.2 - Principais causas da retracção

Os investigadores que publicaram estudos sobre retracção parecem concordar em que as suas principais causas são as seguintes [4.1 a 4.4 e 4.6] :

a) Dessecação

A saída de água para o exterior, dos capilares e, depois, dos poros de menores dimensões, que vários autores designam por *dessecação*, dá origem a retracção (contracção) acompanhada de redução de massa (correspondente à perda de água), que, segundo Baron [4.6], pode atingir 22% da pasta de cimento. A dessecação deve-se, principalmente, à evaporação e à absorção por outros elementos em contacto, nomeadamente, no caso dos revestimentos de paredes, pelo suporte [4.1, 4.3].

A retracção por dessecação é parcialmente reversível, ou seja, se o elemento sujeito a dessecação for mergulhado em água, os capilares voltam a encher e é parcialmente recuperado o volume perdido, como se explicará em 4.2.7.

b) Hidratação (retracção endógena ou autogénea)

Os fenómenos de hidratação do cimento contribuem para a retracção global, devido aos novos compostos formados, à exotermia de algumas das reacções químicas e à autodessecação gerada pelo consumo de água dos poros nas reacções.

Tamin [4.3] designa a contribuição para a retracção dos fenómenos de hidratação do cimento, por retracção autogénea, ou endógena, independentemente da sua sobreposição e interacção com as outras causas de retracção.

Segundo Sousa Coutinho [4.1], a retracção autogénea é a variação de volume sofrida pela argamassa ou pelo betão na ausência de trocas de humidade com o exterior, a temperatura constante e na ausência de cargas externas. As condições necessárias à retracção autogénea entendida deste modo afastam-se das condições reais em que os rebocos são aplicados, pelo que a concepção de Tamin nos parece mais útil neste estudo. Assim, optaremos por designar como retracção de hidratação toda a parcela de retracção decorrente das reacções de

hidratação, incluindo componentes de *autodessecação* e componentes de origem *química*.

A retracção por hidratação, devido à importância da componente química, tem um coeficiente de reversibilidade reduzido, quando se imerge em água o elemento de argamassa.

c) Carbonatação

A retracção por carbonatação deve-se à combinação do bióxido de carbono da atmosfera com os componentes hidratados do cimento, especialmente com o hidróxido de cálcio, que origina produtos sólidos, como o carbonato de cálcio, cujo volume total é inferior à soma dos volumes dos componentes do cimento que entraram na reacção, mas cuja massa é superior. Estas reacções dão-se com libertação de água.

A velocidade de carbonatação é influenciada pela higrometria do ar, verificando-se um máximo a 50% HR [4.1]. Propaga-se em profundidade a velocidade decrescente, uma vez que a permeabilidade ao bióxido de carbono diminui com a carbonatação.

Os rebocos estão muito sujeitos à carbonatação, pois as pequenas espessuras com que são aplicados e a sua elevada permeabilidade aos gases favorecem a combinação com o bióxido de carbono do ar.

A retracção por carbonatação soma-se à parcela irreversível da retracção, ou seja não há recuperação das dimensões iniciais por imersão em água ou colocação em atmosfera húmida.

Estas três causas principais da retracção - dessecação, hidratação e carbonatação - sobrepõem-se e interagem entre si. Assim, a retracção global não é uma mera soma de efeitos parciais, já que a secagem modifica o valor das deformações endógenas, alterando a cinética dos processos de hidratação.

Apesar dos efeitos destes factores serem, por vezes, contraditórios, a sua acumulação resulta quase sempre em contracção.

4.2.3 - Retracção global

A retracção global dá-se, assim, por dessecação, por hidratação e por carbonatação, ao longo de todo o período de vida da argamassa, verificando-se uma interacção contínua entre os vários fenómenos. No entanto, a preponderância de cada um deles varia com a idade: a dessecação é muito mais sensível, podendo considerar-se que comanda a retracção global, logo após o início de presa - período em que a retracção por dessecação é muito superior à retracção por hidratação - e após endurecimento - quando a hidratação se encontra, praticamente, terminada e dá já origem a poucas deformações. Logo após o fim de presa é importante a interacção entre os dois fenómenos. As variações dimensionais devidas à hidratação são preponderantes durante o endurecimento. Finalmente, a retracção por carbonatação vai-se dando ao longo da vida da argamassa, tornando-se sensível tanto mais cedo quanto maior for a relação superfície/volume (s/v) do elemento, quanto mais permeável ao ar for a argamassa e quanto mais favoráveis forem as condições ambientes para a combinação do bióxido de carbono do ar com o hidróxido de cálcio do cimento.

O estudo da retracção desde a moldagem é difícil, já que implica a realização de medições de variações dimensionais em provetes ainda não endurecidos, com coesão muito fraca, em que qualquer manipulação e o próprio atrito nas paredes do molde podem falsear os resultados. No entanto, desde há quase 100 anos que diversos investigadores têm vindo a fazer estudos dessa natureza, usando para isso três tipos de métodos:

- Medição de variações volumétricas de provetes inseridos num líquido e envolvidos em material muito elástico, em aparelhos do tipo volumenómetro.
  Estes métodos apenas permitem estudar a retracção por hidratação. A membrana envolvente dos provetes é permeável à água quando se quer estudar apenas a influência das reacções químicas de hidratação, sem interferência da dessecação e da autodessecação, e impermeável quando se pretende evitar as trocas com o exterior, e estudar os fenómenos de autodessecação. Em ambos os casos está-se em presença de uma situação artificial, sem correspondência prática directa. Além disso, não é possível estudar o efeito das variações higrotérmicas ambientes e a dilatação do líquido usado, por efeito do calor de hidratação, pode introduzir erros consideráveis nos resultados.

Dispositivos deste tipo foram usados por Le Châtelier, em 1898, citado por Sousa Coutinho e por L'Hermite [4.1, 4.7] e depois por Del Campo, citado por Tamin [4.3].

- Medição de variações unidimensionais de provetes no próprio molde, à superfície, através do acompanhamento da variação de distância entre duas marcas metálicas fixas na superfície livre dos provetes, ou com extensómetros colados também na superfície livre de provetes prismáticos.

  Estes métodos permitem medir a retracção global, mas têm a desvantagem de medir variações numa face e não no eixo, onde seriam, à partida, mais significativas. Com efeito, a superfície livre é mais afectada pela carbonatação e sofre a influência dos factores climáticos, nomeadamente da velocidade do ar, de forma mais intensa que o interior do provete. Por outro lado, a face exterior tem a vantagem de ser a zona menos afectada pelo atrito no fundo do molde.

  Foram realizadas medições deste tipo por L'Hermite [4.7], Vironnaud e Lefèvre [4.8] e por Saito, Kawamura e Arakawa [4.9].

- Medição de variações unidimensionais de provetes em moldes providos de dispositivos que permitem medir os deslocamentos relativos dos extremos, segundo o eixo longitudinal (extremos móveis, hastes que se deslocam ou inclusões na argamassa ou betão ligados a comparadores ou a transdutores de deslocamento).

  Estes métodos permitem também estudar a retracção global. A sua principal desvantagem é a dificuldade de anular o atrito no fundo (e por vezes nos lados) do molde.

  Os investigadores que procuraram estudar a retracção mais recentemente têm usado dispositivos deste tipo, como Baron [4.6], Wittmann, referido por Tamin [4.3], Détriché [4.10], Tamine [4.3], Benaissa e Morlier [4.11], Ossa e David [4.12] e Boulay e Paties [4.13].

As medições realizadas pelos vários investigadores que se dedicaram a estes estudos dão origem a curvas do tipo representado na fig. 4.1 e permitem distinguir várias fases no desenvolvimento da retracção global [4.1, 4.3, 4.4, 4.6, 4.8, 4.14], com as características que a seguir se descrevem.

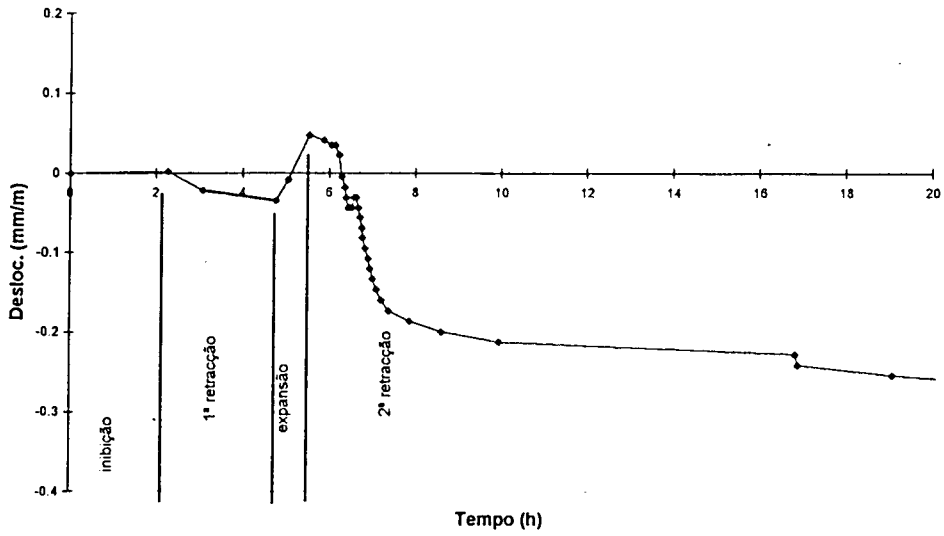


Fig. 4.1 - Curva de retracção global obtida em ensaio de reboco pré-doseado ensaiado no LNEC

a) 1ª Fase ou Fase de inibição [4.1]

Tem lugar logo após a moldagem e a sua duração depende da relação a/c. Détriché [4.11], nas suas experiências com pastas puras de cimento e com argamassas, em provetes com 15 mm de espessura, em ambiente caracterizado por 22°C/50%HR, obteve durações entre 1 e 6 horas para esta fase.

A película de água que se forma à superfície devido ao assentamento das partículas sólidas - água de exsudação -, permite substituir totalmente a água que sai para o exterior (por evaporação ou absorção) e a água mobilizada para as reacções de hidratação. Enquanto o fluxo de água de exsudação for superior à soma dos fluxos dispendidos, as variações dimensionais mantêm-se nulas. No fundo, durante este período tudo se passa como se o provete estivesse conservado em água, não havendo, portanto, retracção por dessecação. Apenas se manifesta a retracção química provocada pela formação de hidratos, que mobiliza água imediatamente substituída por água proveniente da camada superficial. A penetração desta água entre os grãos sólidos pode mesmo, nalguns casos, provocar alguma expansão.

Esta água de exsudação, que sai sem provocar diminuição de volume e sem introduzir

tensões na pasta, é designada por *água livre* por alguns autores, como Mamillan [4.14] e Tamin [4.3].

b) 2ª Fase, Retracção plástica [4.1, 4.4], ou 1ª Retracção [4.12, 4.15]

Esta fase, que dura apenas algumas horas, inicia-se logo que desaparece a camada de água superficial, o que pode acontecer antes do início de presa ou durante a presa, conforme a/c e as condições ambientes. A água que se evapora e a que é consumida nas reacções de hidratação é extraída da pasta, originando rápidas variações dimensionais, acompanhadas de perda de peso. Esta água, extraída dos capilares e poros, com indução de tensões na massa, é designada por alguns autores por *água ligada* [4.14][1].

Wittmann [4.16] mostrou experimentalmente que a acção da pressão capilar está na origem da maior parte da retracção plástica.

Durante esta fase, as variações de peso mantêm-se sensivelmente constantes, enquanto a velocidade de retracção vai diminuindo, facto que pode ser explicado pela diminuição de deformabilidade da argamassa, à medida que prossegue a presa.

Quanto maior for a/c, mais tarde se inicia a retracção plástica e, portanto, menor é o seu valor máximo, devido à menor deformabilidade.

Varia também sensivelmente com a composição do cimento: Segundo Ossa e David [4.12], os cimentos com maior teor de aluminato tricálcico (C_3A) apresentam valores baixos na retracção plástica, chegando por vezes a entrar quase directamente na 3ª fase. Pelo contrário, os cimentos com cerca de 15% de C_3A e mais ricos em álcalis (Na_2O e K_2O) apresentariam os maiores valores de retracção plástica.

A velocidade da retracção nesta fase é tanto maior quanto maior for a velocidade de evaporação da água interna [4.12] e quanto maior for a quantidade de água perdida por absorção dos elementos em contacto [4.1, 4.12].

Assim, os factores que aumentam a retracção plástica são os seguintes:

[1] - Contrapondo às duas formas de presença da água na pasta de cimento já citadas - água livre e água ligada - é ainda usualmente referida a *água fixa* [4.14], ou *água adsorvida*, que depende da higrometria exterior, assegurando o equilíbrio entre o exterior e o interior do material.

- Factores que favorecem a evaporação

  - grande velocidade do ar;
  - baixa humidade relativa do ar;
  - temperatura elevada da argamassa.

- Factores que favorecem a absorção pelo suporte

  - alta absorção do suporte.

- Factores que favorecem a permeabilidade da mistura e, portanto, a exsudação

  - relação a/c elevada[2];
  - dosagem de cimento reduzida;
  - superfície específica do cimento baixa e consequente menor viscosidade da pasta.

Este tipo de retracção é particularmente significativo no caso dos rebocos. De facto, a sua relação s/v muito grande favorece a acção intensa da evaporação e as condições de aplicação e as limitações de prazo e custo não permitem, normalmente, garantir uma cura adequada. Pelo contrário, há frequentemente exposição ao sol e ao vento, situação que também tende a fomentar altas taxas de evaporação.

Por outro lado, os suportes sobre os quais são habitualmente aplicados os rebocos apresentam porosidade aberta, com grande poder de sucção da água da argamassa. Segundo Détriché, Grandet e Maso [4.17], no momento do contacto, o diâmetro médio dos capilares do suporte, seco ou fracamente humedecido, é, em geral, inferior ao dos capilares da argamassa aplicada. Nestas condições, a água dos capilares da argamassa vai deslocar-se, progressivamente, para o suporte, *empurrada* por uma pressão motriz resultante da diferença entre a sucção do suporte e a retenção da argamassa.

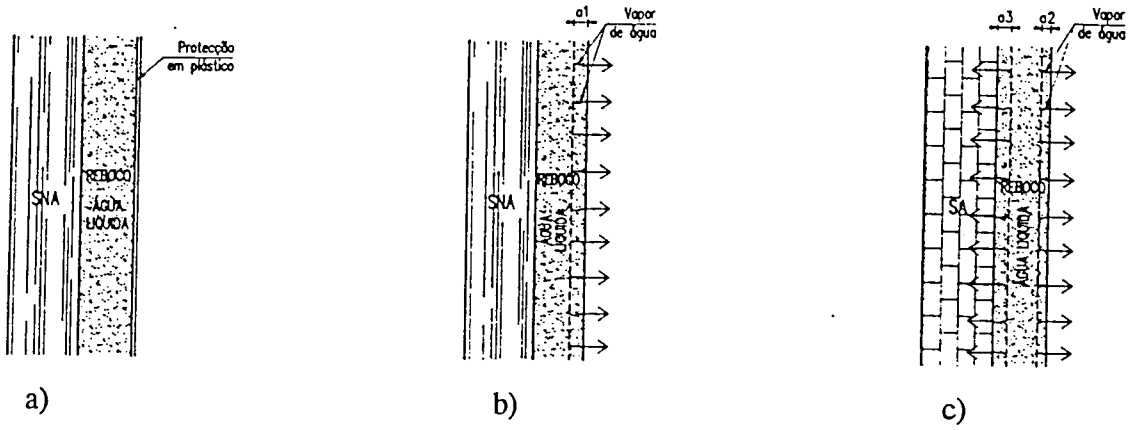
[2] - A relação a/c tem efeitos contraditórios na retracção plástica já que, se por um lado favorece a permeabilidade da mistura e portanto a rapidez de perda de água, por outro atrasa o início da retracção plástica e diminui o seu valor final. Este segundo efeito deve-se a que, quanto maior for a quantidade de água na pasta, mais tempo é possível compensar os *gastos* internos e externos sem recorrer à água dos poros.

Ainda segundo Détriché [4.10], a presença de um suporte absorvente (SA) diminui a parcela de dessecação por evaporação, mas aumenta a perda de água total, pelo menos tendo em conta a forte capacidade de absorção dos suportes mais correntes (ver fig. 4.2). De facto, a sucção surge como o mecanismo predominante de dessecação em idades jovens, principalmente em camadas muito delgadas, e é particularmente sensível por ter efeito a muito curto prazo, de forma muito concentrada nas primeiras horas de vida da argamassa, em que esta se encontra muito deformável. Em camadas mais espessas, a sucção é retardada e vai actuar numa estrutura já em vias de endurecimento. Assim, dá origem a menor retracção mas implica solicitações mecânicas mais importantes [4.10, 4.18, 4.19].

Por último, a prática de trabalhar a superfície final para assegurar um acabamento liso aumenta a segregação, e, ao trazer à superfície uma massa com maior concentração de finos e de água, facilita a evaporação.

As tensões que se geram devido a estes fenómenos conduzem facilmente à fendilhação, se não forem tomadas precauções especiais, porque a argamassa tem uma coesão muito fraca nesta fase e portanto tem uma capacidade resistente quase nula. Um certo aperto da argamassa neste período - com uma talocha envolvida em material absorvente - e alguns cuidados para evitar a rápida perda de água com o consequente desenvolvimento de tensões na argamassa - humedecimento do suporte antes da aplicação e manutenção de condições de cura favoráveis, através do humedecimento periódico do revestimento ou da protecção com uma folha de polietileno ou outro material impermeável ao vapor de água ou de um material humedecido - deverão permitir evitar este tipo de fendilhação.

A história da argamassa nesta fase e, em particular, a cinética de dessecação - que condiciona, por sua vez, o processo de hidratação e as tensões residuais -, influenciam decisivamente o seu comportamento mecânico futuro. Assim, a importância do conhecimento do que se passa nesta fase ultrapassa a questão mais imediata de evitar a fendilhação superficial a curto prazo. De facto, diversas anomalias dos rebocos - deficiências de aderência, fraca capacidade de impermeabilização, fendilhação - podem ter origem numa hidratação incompleta do ligante.



a) b) c)

Fig. 4.2 - Esquema da dessecação em reboco a) aplicado sobre suporte não-absorvente (SNA) e protegido da evaporação; b) aplicado sobre suporte não-absorvente; c) aplicado sobre suporte absorvente (SA)

c) 3ª Fase ou Fase de expansão [4.3]:

Esta fase inicia-se logo a seguir ao fim de presa e dura várias horas. As experiências realizadas por Détriché sobre pastas puras de cimento apontam para que a fase de expansão tenha lugar entre a oitava e a décima sexta hora de idade [4.10], enquanto para Ossa e David [4.12] pode levar entre 10 e 20 horas, para a maioria dos cimentos, a 20°C, podendo alcançar um máximo de 0,4 x 10^{-3} (para a/c=0,27). No entanto, de acordo com este autor, para cimentos ricos em C_3A e com pouco gesso, pode não se observar expansão. Em argamassas e betões também é frequente não ser observável expansão.

A 3ª fase é caracterizada por pequenas variações dimensionais, que podem ser positivas ou negativas, mas resultam, geralmente, em pequenas expansões. Resulta da sobreposição da contracção devida à dessecação, com a expansão química que normalmente se verifica neste período, causada pelas reacções de hidratação (os fenómenos de exotermia e formação de etringite, e, mais para o fim, a própria estruturação da pasta com os consequentes aumentos das superfícies específicas [4.9, 4.12]). No caso dos revestimentos de paredes não é provável que a influência do calor de hidratação seja sensível, mas a expansão de origem química, muitas vezes ligada ao gesso que se adiciona ao clínquer, já pode ser significativa. Alguns autores pensam que a quantidade de cal livre que permanece não hidratada após o fim de presa influencia a expansão, o mesmo acontecendo com o teor de sulfato e de aluminato (a expansão aumenta com a quantidade de SO_3 e de AlO_3).

d) 4ª Fase, Retracção de secagem ou Retracção hidráulica [4.1, 4.4] ou 2ª Retracção [4.12, 4.15]:

Esta fase dá-se durante o endurecimento, resulta predominantemente dos fenómenos endógenos da hidratação e caracteriza-se por deformações muito mais lentas, praticamente independentes da relação a/c e também pouco dependentes das condições ambientes. Devido à sua natureza, as variações dimensionais não são acompanhadas de perda de massa, pelo menos de forma sensível.

De acordo com Ossa e David [4.12], o valor máximo da retracção de secagem de uma pasta de cimento, com relação a/c compreendida entre 0,25 e 0,30, a uma temperatura de 20°C e protegida da evaporação, pode atingir, ao fim de 7 dias, $1,5 \times 10^{-3}$. A velocidade deste tipo de retracção é tanto maior quanto menor é a duração da expansão e quanto menor é a relação a/c, pois, ao iniciar mais cedo, actua sobre uma argamassa mais deformável. Teores mais altos de aluminato, de magnésio e de álcalis e a maior finura do cimento, também parecem provocar um incremento da velocidade da retracção de secagem.

De um modo geral, pode dizer-se que a 2ª fase, que se desenvolve antes e durante a presa, é comandada, essencialmente, pela dessecação. A 4ª fase, que se manifesta durante o endurecimento, está fundamentalmente ligada às reacções de hidratação do cimento e também aos efeitos da carbonatação. A 3ª fase resulta da interacção dos dois tipos de fenómenos.

Pode também afirmar-se que a maior parcela da retracção é provocada por dessecação, enquanto uma parcela menor se deve às reacções de hidratação. No entanto, as parcelas de tensões geradas por cada um dos dois principais fenómenos que influem na retracção estão na proporção inversa, como se verá adiante (ver capítulo 8, gráfs. 8.1 a 8.6, entre outros).

4.2.3 - Mecanismos de retracção por dessecação

A retracção por dessecação resulta, fundamentalmente, do movimento da água na estrutura porosa da argamassa.

Os poros que resultam dos espaços intergranulares da pasta fresca, por evaporação da

água em excesso, têm diâmetros da ordem de 10^{-5} a 10^{-4} mm [4.4] e são correntemente designados por poros capilares. O movimento da água através deles é regido pela teoria do movimento dos líquidos em tubos capilares. No entanto, a porosidade da argamassa é, em média, mais fina. Os poros de menores dimensões, ou micro-poros (com diâmetros $< 10^{-5}$ mm), são vazios do gel, em que os movimentos de água se dão, principalmente, por difusão (adsorção e desadsorção de água). Existem, também, vazios de maiores dimensões, os macro-poros, com diâmetros da ordem de 10^{-3} mm ou superiores, que podem ter origens idênticas aos poros capilares, mas também podem resultar de introdutores de ar ou de cargas leves ou, ainda, de bolhas de ar originadas por um aperto deficiente do reboco. Nestes poros de maiores dimensões, a água movimenta-se por permeabilidade, quando sujeita a pressão exterior.

A explicação dos processos físicos da contracção volumétrica que designamos por retracção por dessecação é dada, actualmente, por três teorias complementares [4.1, 4.3], correspondentes a três situações diferentes de água na pasta: água nos poros capilares; água adsorvida; água nos micro-poros. São estas:

a) Depressão capilar

Este é o mecanismo melhor estabelecido da retracção por dessecação. Freyssinet, nos anos 20, foi o primeiro a estudar uma teoria termodinâmica para interpretar a retracção, e explica-a num estudo publicado em 1933, referido por Sousa Coutinho e por Tamin [4.1, 4.3]. A teoria de Freyssinet foi retomada e desenvolvida por vários autores, como Joisel e L'Hermite [4.2, 4.7].

Admite que os poros abertos da argamassa podem ser considerados como uma rede, mais ou menos complexa, de capilares de dimensões variáveis que se entrecruzam, e como tal são-lhes aplicáveis, após as adaptações necessárias, as leis básicas do movimento de líquidos em tubos capilares [4.20]. Assim, coexistem, em equilíbrio hídrico na argamassa, uma fase líquida e uma fase gasosa. A diminuição da higrometria ambiente provoca uma depressão capilar que deve ser equilibrada por uma compressão da fase sólida.

O modelo baseia-se nas equações de Kelvin e de Laplace que traduzem a condição de equilíbrio entre a água capilar e a atmosfera ambiente [4.1, 4.3]. Na interface líquido-vapor

verifica-se um rearranjo das moléculas de modo a minimizar as forças de atracção entre elas (que, no interior, estão em equilíbrio).

O equilíbrio pressupõe que a água capilar não se escoa e não evapora.

Para que não haja escoamento da água capilar, devem verificar-se as duas leis de Laplace. Com efeito, a diferença de pressão entre a atmosfera e a água capilar (p_a-p_c) deve ser equilibrada pela resultante da tensão superficial γ na interface água-ar (menisco), ou seja:

$$p_a\text{-}p_c = 2\gamma/r_m \quad (1^a \text{ Lei de Laplace}) \tag{4.1}$$

em que r_m é o raio de curvatura médio do menisco.

Tratando-se de um líquido que molha as paredes do capilar, se admitirmos que este é cilíndrico, o menisco formado é côncavo, semi-esférico, e tem raio r_m igual ao raio r_c do capilar.

Esta diferença de pressão é equivalente a uma compressão aplicada à parede do capilar, tanto maior quanto maiores forem a tensão superficial do líquido (que depende do teor de sais solúveis) e a curvatura do menisco (ver fig. 4.3).

O menisco deve ficar ligado à parede do capilar, o que implica o equilíbrio das tensões superficiais das três interfaces em presença: sólido, água e ar (ver fig. 4.3), ou seja:

$$\gamma.\cos\alpha = \gamma_{sl} + \gamma_{sa} \qquad (2^a \text{ Lei de Laplace}) \tag{4.2}$$

em que α é o ângulo de molhagem e γ_{sl} e γ_{sa} são as tensões superficiais nas interfaces, respectivamente, sólido-líquido e sólido-ar.

Para que a água capilar não se evapore, os potenciais químicos do vapor de água acima do menisco e da água capilar têm que ser os mesmos, ou seja as respectivas pressões parciais de vapor têm que verificar a equação de Kelvin:

$$p_a\text{-}p_c = RT/MV_e.\log (H/100) \qquad (\text{Lei de Kelvin}) \tag{4.3}$$

Em que:

R - constante dos gases perfeitos

T - temperatura absoluta

M - peso molecular do líquido que enche o capilar

V_e - volume específico do mesmo líquido

H - humidade relativa do ar

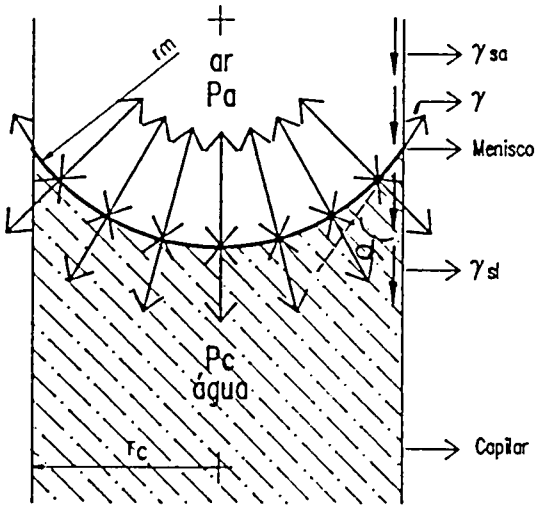


Fig. 4.3 - Esquema de um capilar saturado de água: a diferença de pressão de um lado e outro do menisco é equilibrada pela tensão superficial; as tensões na aresta têm que estar em equilíbrio.

A humidade relativa do ar é definida como a relação entre a massa de vapor de água existente num dado volume de ar e a massa de vapor de água que nele existiria se o ar estivesse saturado nas mesmas condições de pressão e temperatura [4.20], ou, o que é o mesmo, como a relação entre as respectivas tensões de vapor:
tensão de vapor da atmosfera acima do menisco côncavo - p_a - e tensão de vapor acima de uma superfície plana - p_{vs} -, que é a tensão de vapor correspondente à atmosfera saturada, à temperatura considerada:

$$H = 100\ (p_a/p_{vs}) \qquad (4.4)$$

Assim, a cada higrometria corresponde um raio de curvatura limite dos meniscos, r_m , e o enchimento de líquido em todos os capilares com diâmetro r_c, igual ou inferior a r_m, por condensação do vapor de água atmosférico. Quanto maior for H, maior é o raio r_c dos capilares saturados.

Os cálculos feitos sobre as expressões enunciadas permitem verificar que, como se afirmou no início de a), o equilíbrio implica a existência de tensões de tracção na água capilar

e de compressão na fase sólida, facto que dá origem à diminuição do volume aparente da peça de argamassa ou de betão.

Na verdade, porém, o líquido dos poros capilares não é um meio contínuo e homogéneo e assim, apesar de ter algum significado físico, este modelo não é exacto, já que não se verificam os pressupostos das leis em que se baseiam (4.1, 4.3, 4.4). Pelo contrário, encontram-se diversas limitações, entre as quais:

- a água dos poros capilares é mais densa junto às paredes do capilar, logo não constitui um meio homogéneo;

- o líquido dos poros capilares é submetido às forças de Van der Walls provenientes das paredes sólidas, forças essas que têm um raio de acção da ordem de 10^{-5} mm e apenas seriam negligenciáveis se o diâmetro dos poros capilares fosse superior a 10^{-3} mm, quando, na realidade, é de uma ordem dez a cem vezes inferior; os micro-poros, como já foi referido, têm raios médios ainda inferiores.

O modelo dá uma ideia parcial do que se passa, do ponto de vista termodinâmico, na retracção por dessecação, mas são necessários modelos complementares para quantificar os vários parâmetros em jogo.

O mecanismo da retracção por depressão capilar aplica-se melhor durante a retracção plástica que durante a retracção no produto endurecido, porque antes da presa grande parte dos capilares são macro-poros, com dimensão superior ao micrómetro [4.12].

Podemos considerar, como Wittmann [4.16], que este mecanismo actua logo após a fase de inibição (quando se esgota a água de exsudação). À medida que a superfície seca, os meniscos formam-se entre as partículas próximas da superfície e produz-se uma compressão sobre as paredes dos poros capilares e uma tracção na água neles contida. Se o processo não for excessivo e não originar fendas, pode contribuir para uma compactação benéfica da argamassa ou betão frescos. Em seguida, a fase líquida *rompe* e a água fica alojada nos estreitos espaços entre as partículas (ver fig. 4.4).

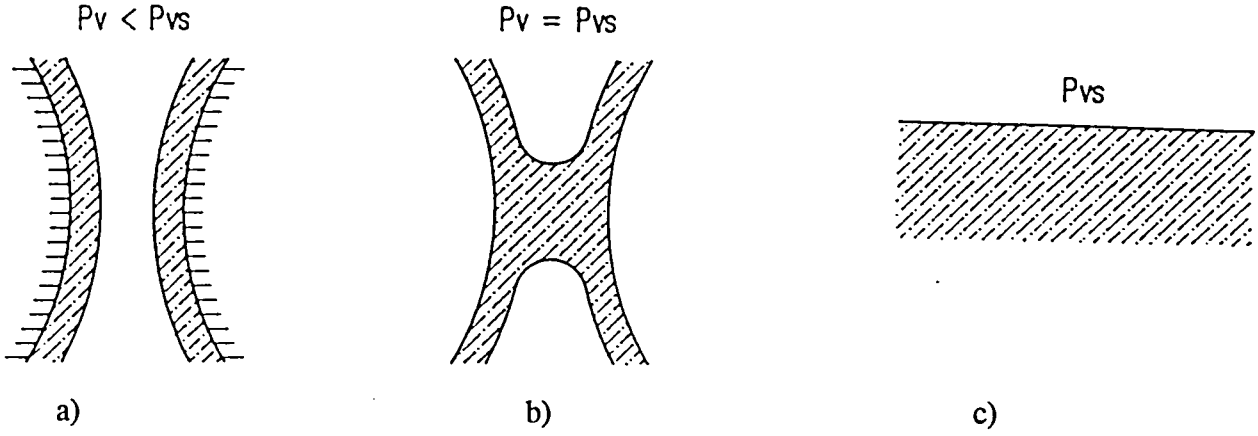


Fig. 4.4 - Diferentes estados da água nos meios porosos
a) água adsorvida; b) água capilar; c) água livre

b) Variação da tensão superficial

Este mecanismo explica a retracção através do comportamento da estrutura microporosa do cimento hidratado. As partículas sólidas de cimento, por serem muito divididas, têm uma superfície específica importante e ficam sujeitas a forças mútuas de atracção que produzem compressão no sólido. Estas forças sólido-sólido são contrariadas pela presença de moléculas de água adsorvida. Uma parte dos poros da pasta de cimento endurecida tem dimensões inferiores a 10^{-5} mm (micro-poros). Assim, uma parte não desprezável da água evaporável da pasta não constitui uma fase autónoma, mas está em interacção com a fase sólida através das forças à distância entre as partículas sólidas. Ou seja, nem sempre se encontra sob a forma de água capilar, mas também sob a forma de água adsorvida (ver fig. 4.4). Quanto maior for a pressão de vapor na atmosfera, maior é também a quantidade de moléculas adsorvidas na superfície do sólido, e, em consequência, são maiores as forças de repulsão que se opõem às forças de atracção entre as partículas sólidas, resultando um predomínio da expansão sobre a contracção. A *adsorção* de moléculas de água produz uma diminuição da tensão superficial. Por outro lado, a tensão superficial é aumentada por *desadsorção*. Deste modo se obtém uma variação da tensão hidrostática de compressão aplicada ao sólido, que é, portanto, função da quantidade de água adsorvida na superfície do sólido, ou da pressão de vapor da atmosfera [4.1].

Para fracas humidades relativas (inferiores a 40 ou mesmo 50%), a retracção é proporcional à variação de energia superficial do filme de água adsorvido, e este é o mecanismo principal de retracção. A partir destas higrometrias a condensação capilar torna-se

cada vez mais significativa e os mecanismos do movimento da água nos poros alteram-se [4.4, 4.16, 4.20].

Powers desenvolveu um modelo baseado na termodinâmica da água adsorvida [4.21] que explica a retracção e a fluência através da expulsão e reentrada da água nas estreitas aberturas, em forma de cunha, do gel que constitui a pasta de cimento endurecida. Esses movimentos da água seriam gerados, no caso da fluência, pela actuação de uma carga exterior e, no caso da retracção, por variações da humidade relativa.

Como se vê, este mecanismo admite também grande influência da higrometria ambiente no desenvolvimento da retracção.

c) Variação da pressão de disjunção [4.3, 4.4]

Sousa Coutinho [4.1] e L'Hermite [4.7] referem-se a este mecanismo como retracção devida à água zeolítica.

Grande parte dos sais que constituem o cimento hidratado são formados por cristais de estrutura lamelar. Isto passa-se, por exemplo, com os silicatos de cálcio hidratados (CSH) com o aluminato tetracálcico hidratado e com o sulfoaluminato de cálcio. Entre essas lamelas aloja-se água zeolítica, sob a forma de água *adsorvida*, que entra ou sai conforme a pressão de vapor, ou seja, conforme a humidade relativa ambiente, modificando a distância entre as lamelas. Estas variações repercutem-se em toda a estrutura do betão ou argamassa, que assim contrai ou expande.

Esta teoria foi inicialmente proposta por Bernal, Jeffrey e Taylor em 1952, citados por Sousa Coutinho [4.1], que fizeram estudos sobre a estrutura lamelar dos cristais de cimento hidratado e sobre a relação entre essa estrutura, a água zeolítica que a pasta de cimento hidratado pode conter e a retracção. Mais recentemente, a mesma teoria foi explorada em estudos de Feldman e Sereda [4.22], que supuseram a pasta de cimento endurecida constituída por uma estrutura lamelar irregular (ver fig. 4.5). A água seria então expulsa e readmitida entre as lamelas pelas variações de pressão do vapor de água, gerando retracção, ou pela acção de uma carga externa, dando origem ao fenómeno de fluência (ver fig. 4.6).

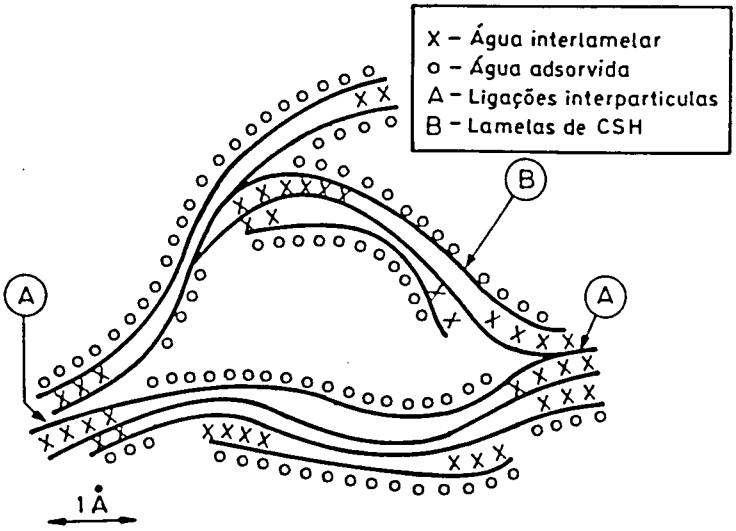


Fig. 4.5 - Modelo da micro-estrutura da pasta de cimento segundo Feldman e Sereda.

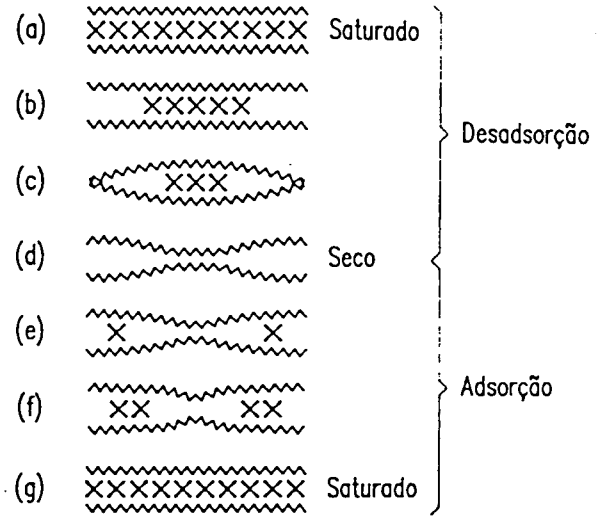


Fig. 4.6 - Modelo simplificado da entrada e saída de água entre as camadas de gel de CSH.

Devido à pequena dimensão das suas partículas, a pasta de cimento endurecida pode ser considerada um sistema coloidal. Em consequência, a interacção entre superfícies tem um papel importante. Segundo Feldman e Sereda, estas forças são perpendiculares às lamelas de CSH que formam, em grande parte, o gel do cimento, e resultam da combinação das forças de Van der Waals com as forças eléctricas entre lamelas separadas por lâminas de água adsorvida e ainda com as forças estruturais atribuídas à interacção das camadas líquidas que sofrem alterações de estrutura nas superfícies de contacto com as lamelas sólidas. São ainda as variações da higrometria ambiente que geram estas forças, cuja resultante é geralmente repulsiva.

Esta teoria baseia-se numa interpretação microscópica da retracção, recorrendo a forças intermoleculares, enquanto os dois mecanismos anteriores recorrem a forças macroscópicas.

Para humidades relativas elevadas, este mecanismo seria predominante. Dá-se condensação capilar e há modificação do potencial químico do líquido dos capilares, que impõe uma certa estrutura às moléculas de água. Forma-se uma dupla camada eléctrica (ou seja de iões positivos do lado do líquido e negativos do lado da solução), perto da superfície [4.4, 4.16].

Segundo Bazant, referido por Malatrait [4.4], a uma temperatura dada, a espessura da camada adsorvida é função da humidade relativa (ver fig. 4.7).

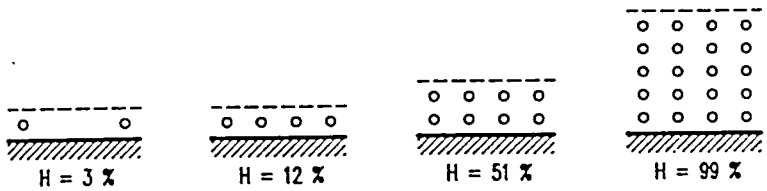


Fig. 4.7 - Espessura da camada de ar adsorvida em função da humidade relativa, segundo Powers

Powers [4.21] afirma que, para humidades relativas próximas de 100%, a adsorção de água na pasta de cimento pode interessar até 5 camadas moleculares de água. Mas a espessura do filme líquido é limitada pelo espaço entre lâminas sólidas. Daqui surge o conceito de adsorção restringida desenvolvido por Powers e retomado por Bazant, segundo o qual a pressão na camada de adsorção restringida tenderia a separar as superfícies sólidas.

Alguns autores admitem que nalguns poros - com raios da ordem de grandeza da zona de influência das forças superficiais - podem coexistir meniscos (água capilar) e água adsorvida e portanto a pressão de disjunção pode ser integrada no mecanismo de depressão capilar, como termo correctivo nas equações que regem aquele mecanismo.

Os dois últimos mecanismos descritos explicam a retracção através da secagem do gel do cimento. Recentemente, alguns investigadores propuseram modelos para a microestrutura da pasta de cimento endurecida, que procuram unificar os mecanismos de tensão superficial e de pressão de disjunção numa só teoria.

O modelo de Daimon e Kondo [4.23], ilustrado pela fig. 4.8, sugere diferentes tipos de poros - poros intergel, poros intercristalites e poros intracristalites - aos quais corresponderiam diferentes situações da água, que se encontraria fisicamente adsorvida na superfície das partículas de gel no interior dos poros intercristalite (como sugeria Powers) e teria a forma de água zeolítica (à maneira de Feldmann e Sereda), entre as lamelas que constituem os poros intracristalites. O modelo de Munique, introduzido por Wittmann

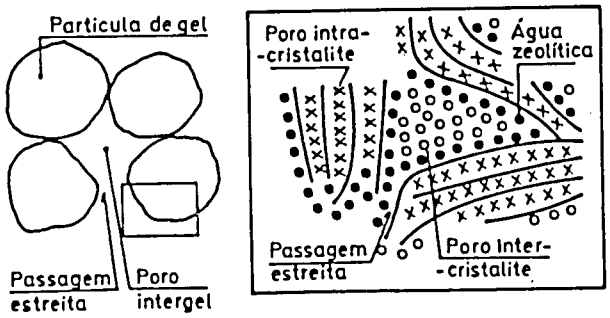


Fig. 4.8 - Modelo da micro-estrutura da pasta de cimento segundo Daimon e Kondo

[4.16] e ilustrado pela fig. 4.9, admite que, na gama das baixas humidades relativas (inferiores a 40% ou 50%), as variações dimensionais de retracção são proporcionais às variações de energia superficial e, portanto, também às variações de tensão superficial. Nessa zona, o mecanismo de tensão superficial seria preponderante. Quando a humidade relativa sobe acima de 50%, algumas superfícies são separadas pela pressão de disjunção, originando uma expansão adicional do sistema, sem correspondência na variação da energia superficial e o mecanismo predominante começaria, gradualmente, a ser o da pressão de disjunção.

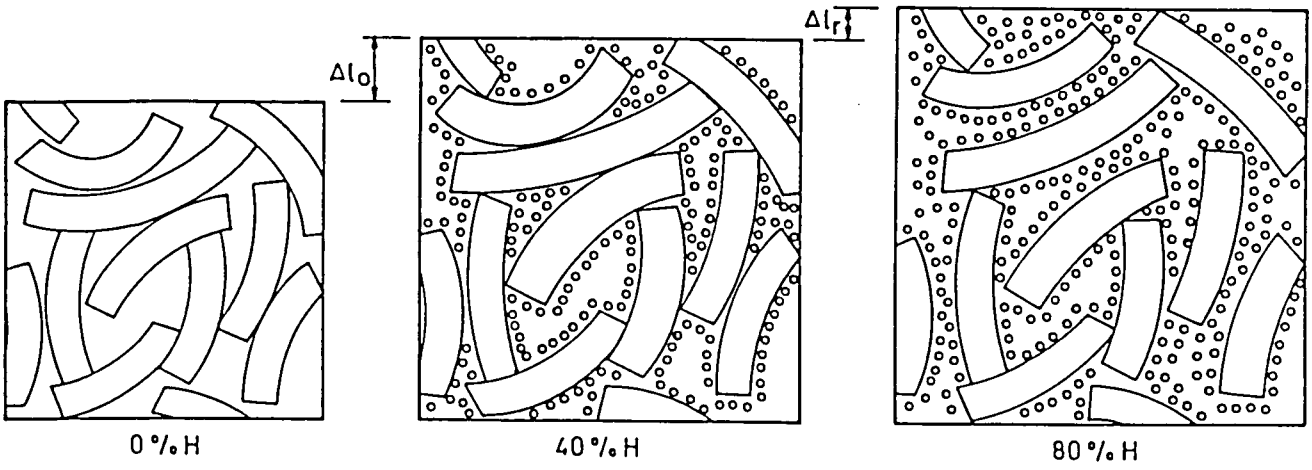


Fig. 4.9 - Descrição esquemática do modelo de Munique, segundo Wittmann

Na verdade, o conhecimento da verdadeira microestrutura da pasta do cimento e do papel da água adsorvida parecem ser ainda questões em aberto, longe de obterem consenso por parte dos investigadores.

4.2.5 - Mecanismos de retracção por hidratação

Le Châtelier, citado por Sousa Coutinho [4.1] e L'Hermite [4.7], demonstrou, através de uma experiência simples, que o volume absoluto dos componentes hidratados do cimento é inferior à soma do volume dos componentes anidros com a água que com eles reage. Esta contracção, que se dá com autodessecação, é tanto maior quanto menor for a relação a/c, desde que esta seja suficiente para a hidratação completa do cimento.

Pode-se considerar que a retracção de hidratação é constituída por uma componente de **origem química**, devida ao menor volume dos hidratos em relação aos constituintes anidros mais água, que coexiste com uma componente provocada por **autodessecação**, ou seja, por mecanismos de depressão capilar gerados em paralelo pelo *gasto* interno de água para a hidratação.

Ebensperger *et al* [4.15] estimam que, para a hidratação completa do cimento de uma argamassa ou betão, é necessário um teor ponderal de água de amassadura de aproximadamente 40%, dos quais cerca de 25% se combinam quimicamente com os constituintes do cimento, dando origem aos hidratos e sendo os restantes 15% constituídos por água evaporável. Estes autores procuraram medir a retracção de hidratação de origem química - usando provetes inseridos em água em invólucros não-impermeabilizados - e a retracção provocada por autodessecação - usando provetes selados inseridos em água, em aparelhos do tipo volumenómetro. Segundo estes autores a hidratação completa conduziria a uma retracção química interna da ordem de 6 a 7%. A retracção de hidratação de origem química dependeria da quantidade de cimento e da relação a/c. De facto, relações a/c inferiores a 0,40 originariam hidratação incompleta do cimento, que teria como consequência natural uma menor retracção química.

Embora os ensaios realizados por estes investigadores permitam medir estas duas componentes, a verdade é que, na prática, nenhuma das situações criadas nos ensaios - provetes selados, sem trocas com o exterior, ou provetes não-selados imersos em água, portanto com possibilidade de substituição total da água consumida na hidratação, sem recurso à água dos capilares - tem correspondência com uma situação real, nomeadamente no caso dos rebocos. Na verdade, dada a quantidade de parâmetros em jogo e a mais que provável interdependência dos dois mecanismos referidos é muito difícil estabelecer qualquer correlação entre os valores obtidos nos ensaios descritos e as situações reais.

a) Retracção química

Wittmann [4.16] refere os seguintes fenómenos como contribuindo para a retracção química:

- **Retracção devida às reacções de hidratação**

Se os principais constituintes do cimento portland (CP) reagirem com a água, a pasta de cimento sofrerá uma variação de volume de cerca de 7% (valor coincidente com os resultados obtidos por Ebensperger [4.15]), que se pode exprimir pela relação aproximada

$$100\ mm^3\ CP + 125\ mm^3\ H_2O \Rightarrow 209\ mm^3 + \Delta V$$

A variação de volume devida às reacções de hidratação é proporcional ao grau de hidratação.

- **Retracção devida ao calor de hidratação**

Quando o cimento reage com a água há libertação de calor. Dos componentes principais do CP, o aluminato tricálcico (C_3A) parece ter o maior calor específico de hidratação - 207 cal/g, segundo Wittmann [4.16] - enquanto o silicato bicálcico (C_2S) terá o menor - 62 cal/g, de acordo com o mesmo autor. Em média, o valor para o CP será de 110 cal/g, embora seja variável com a composição de cada cimento. A libertação de calor é particularmente intensa durante a presa. Em elementos com baixa relação s/v (o que não é, normalmente, o caso dos revestimentos de paredes), este calor não pode dissipar-se rapidamente e pode produzir uma expansão considerável. Em seguida, quando a taxa de hidratação se reduz, dá-se contracção térmica, que pode causar fendilhação. L'Hermite mediu aumentos de temperatura devidos ao calor de hidratação que atingiram 50° C, em provetes espessos (prismas de 1000 x 1000 x 4000 mm e de 70 x 70 x 280 mm) [4.7].

- **Retracção devida às reacções de *desidratação***

Alguns dos produtos de hidratação não são estáveis com as variações de humidade relativa. Assim, em condições de secagem, alguns hidratos perdem água de hidratação, com variação de volume, geralmente contracção.

- **Retracção devida à cristalização**

Os primeiros produtos de hidratação cristalizam nos espaços cheios de água, entre partículas sólidas. Após a formação do esqueleto sólido, os cristais que se formam com o prosseguir da hidratação já não têm espaços vazios suficientes e exercem uma pressão interna que pode causar uma expansão moderada.

- **Retracção devida a *conversão***

Alguns hidratos, especialmente os aluminatos, têm tendência a evoluir para formas mais estáveis, dando origem a variações de volume, que podem ser bastante sensíveis no caso de cimentos aluminosos.

- **Retracção por carbonatação**

Embora tenha sido tratada até aqui como um tipo de retracção à parte pode também ser considerada uma forma de retracção química. Por fidelidade ao texto de Wittmann e por simplicidade, optou-se por incluí-la nesta alínea.

O hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento pode reagir com o bióxido de carbono do ar, com libertação de água, que evapora, verificando-se uma contracção. Em 4.2.2 c) foram já referidos alguns aspectos importantes deste mecanismo.

Ossa afirma que a carbonatação já contribui para a 1ª retracção [4.7]. Delcelier e Lejeune [4.25] constataram a maior sensibilidade das argamassas de revestimento à carbonatação, em relação aos betões, devido à maior relação s/v (superfície livre / volume). Estes investigadores verificaram, para provetes de 1 cm de espessura, um aumento de massa desde a primeira semana, a 90% de HR. A 65% de HR as variações de massa foram mais sensíveis, enquanto a 15% de HR não se observaram variações de massa, parecendo indicar que a reacção de carbonatação só se dá na presença de alguma humidade ambiente.

Ensaios no âmbito deste trabalho, realizadas no Laboratório de Ensaios de Revestimentos de Paredes do LNEC (LERevPa), indicam que, em ambiente condicionado a 23°C e 50% HR, em provetes de 20 mm de espessura, já existe carbonatação significativa, em toda a espessura, cerca de 1 mês após a desmoldagem.

b) Retracção por autodessecação

Um mecanismo correntemente aceite para a retracção por hidratação pressupõe aquilo que Buil, referido por Tamin [4.3] e Ebensperger [4.15], designa por autodessecação, que consiste no seguinte: durante a hidratação, há uma diminuição do volume absoluto total, devido à contracção de Le Châtelier. Se não houver comunicação com água exterior (ou se esta for insuficiente), esta contracção implica gasto de água dos capilares, que é substituída por uma bolha gasosa (ver fig. 4.10). Este fenómeno provoca uma diminuição da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a pasta, que se traduz na formação de meniscos, para restabelecer o equilíbrio. Como resultado, gera-se tracção na água e compressão no esqueleto sólido e verifica-se uma diminuição do volume aparente.

Assim, o fenómeno da autodessecação parece ser em tudo idêntico ao já descrito fenómeno da dessecação. As saídas de água dos capilares e poros, quer para o exterior, por evaporação ou absorção do suporte (dessecação), quer para o interior, para as reacções de hidratação (autodessecação), originariam variações de tensões idênticas e, em consequência, deformações idênticas. Mais precisamente, a retracção provocada pela contracção de Le Châtelier envolvendo um determinado volume de água combinada seria igual à retracção causada pela saída para o exterior de um volume igual de água.

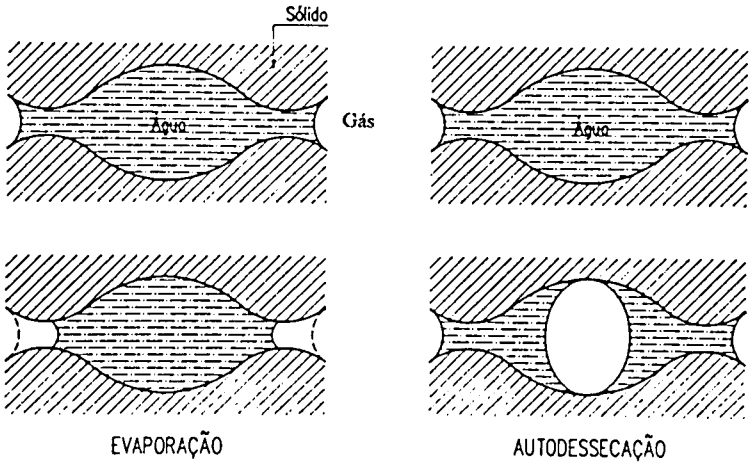


Fig. 4.10 - Comparação entre os fenómenos de evaporação e de autodessecação correspondente à saída de um mesmo volume de água

4.2.6 - Outros mecanismos de retracção

Os mecanismos referidos em 4.2.4 e 4.2.5 procuram explicar a retracção através da microestrutura da pasta de cimento, apresentando modelos ditos de *ciência dos materiais*. De facto, como refere Garboczi [4.24], se à escala dos nanómetros o gel do cimento é um compósito de partículas e micro-poros - como consideram os mecanismos da tensão superficial e da pressão de disjunção - e à escala dos micrómetros é um compósito de produtos de hidratação, partículas não-hidratadas e porosidade capilar - como se admite no mecanismo de depressão capilar - também é verdade que, à escala dos milímetros, a argamassa é um material heterogéneo e os inertes, os poros e as bolhas de ar, e, ainda, as microfendas eventualmente resultantes das tensões geradas na matriz desempenham um papel importante na retracção global medida.

Recorrendo à formulação de *leis dos materiais* e a métodos numéricos avançados, como a análise por elementos finitos, vários investigadores procuraram ter em conta esses aspectos da estrutura da argamassa, que Wittmann [4.16] considerou de nível médio.

Finalmente, a previsão da retracção e a análise dos seus efeitos deve poder ser feita de forma simplificada, procedendo, de novo, a uma *re-homogeneização* do elemento e usando valores médios. Ainda segundo Wittmann [4.16], partindo dos modelos dos níveis micro e médio, deverá ser possível estabelecer *modelos de engenharia*, de nível macro. É para este último nível que pretendemos, afinal, contribuir com a parte experimental deste trabalho.

Estes outros níveis de teorias de retracção serão abordados ao longo dos ítens seguintes.

4.2.7 - Factores que influenciam a retracção. Estudos experimentais

Vimos que os mecanismos de retracção são devidos, fundamentalmente, aos movimentos da água no interior e entre o interior e o exterior do elemento de argamassa, de forma a ser atingido o equilíbrio termodinâmico. Assim, é natural que as condições higrométricas e térmicas ambientes influenciem decisivamente as variações volumétricas. Mas é igualmente óbvio que estas variações também dependem fortemente das constantes elásticas da pasta de cimento e dos inertes - módulo de elasticidade, ou, mais propriamente, módulo de

deformação - e da sua capacidade de relaxação de tensões, que definem a maior ou menor compressibilidade da argamassa, e portanto a sua resposta às forças geradas pelos movimentos referidos, sempre de algum modo restringidos.

Vários investigadores estudaram experimentalmente o efeito dos vários factores na retracção de elementos de argamassa e de betão:

- **Condições ambientes**

A humidade relativa e a temperatura do ar, a velocidade do ar e, ainda, o tipo de cura nos primeiros dias de vida do elemento encontram-se entre os factores mais determinantes da grandeza e forma das curvas de retracção, principalmente na fase de retracção plástica.
As experiências de Vironnaud e Lefèvre [4.8], de Joisel [4.2] e de L'Hermite [4.7], continuadas depois por muitos outros investigadores, mostraram que, para humidades relativas mais baixas, a retracção é mais elevada e, também, mais rápida, atingindo um andamento assimptótico mais cedo. Segundo Joisel estas diferenças são mais sensíveis para as higrometrias altas, já que para as higrometrias baixas alguns factores influem em sentido contrário - por exemplo, verifica-se um aumento da concentração da solução que tem como consequência a diminuição da tensão de vapor e uma certa travagem da retracção -, portanto as variações são menores.
Delcelier e Lejeune [4.25] fizeram ensaios de retracção a longo prazo (até aos 500 dias), de argamassas bastardas de cimento e cal hidráulica, só de cal hidráulica e só de cimento, em ambientes de 15%, 65% e 90% de humidade relativa e verificaram que, para todos os materiais, há uma fase inicial em que a retracção é maior a 15% HR, intermédia a 65% HR e menor a 90% HR. No entanto, a partir de alguns meses de idade, a retracção a 65% HR torna-se superior à retracção a 15% HR. Assim, a retracção final máxima verifica-se para a humidade relativa de 65%, com valores da ordem de 0,75 a 1 mm/m. Uma explicação possível desta aparente inversão poderá ser a carbonatação, que é quase insensível a 15% de HR, como estes autores constataram através das variações ponderais.

Joisel considera que a elevação da temperatura aumenta a retracção, embora este factor pareça menos importante. Na verdade, o factor *temperatura do ar* surge, na prática,

associado ao factor *humidade relativa do ar*.

Vários investigadores demonstraram que a velocidade de circulação de ar à superfície tem grande influência na retracção.
Vironnaud e Lefèvre [4.8] concluíram que a protecção inicial contra a ventilação atrasa o início da retracção plástica e reduz o valor da retracção final, mas, assim que se interrompe a protecção, surge um período crítico, com uma taxa de retracção muito rápida, em que são grandes os riscos de fendilhação.
Mais recentemente, Ossa e David [4.12] puseram também em evidência, nos seus ensaios, a importância das condições higrométricas e a marcada influência da velocidade do ar na retracção plástica e verificaram que uma velocidade do ar de 8 m/s pode aumentar o respectivo valor cerca de dez vezes.

As experiências de L'Hermite [4.7] e de Mamillan [4.14] mostraram a influência na retracção da conservação inicial e prolongada dentro de água e das embebições periódicas das peças em água, alternadas com períodos de secagem. Os estudos mostraram que a conservação inicial em água permite reduzir o valor da retracção, contada a partir da desmoldagem, embora com o tempo a diferença tenda a esbater-se. As embebições periódicas em água de peças secas ao ar mostraram uma recuperação total da massa inicial e uma redução imediata e substancial - mas não total - da retracção de secagem.
L'Hermite concluiu que o *coeficiente de reversibilidade* é inferior a 1 (da ordem de 0,33 a 0,7 para H=50%), ou seja, mantém-se uma retracção residual. Por outro lado, a amplitude do movimento vai-se reduzindo com a continuação dos ciclos e o avanço do endurecimento. Na verdade, a argamassa, quando seca ao ar é submetida a tensões de compressão locais, que originam deformações plásticas irreversíveis. Se se mergulhar a peça em água após algum tempo de secagem ao ar, as ligações cristalinas que se formam com o prosseguimento da hidratação tendem a preencher parte dos vazios e a reduzir o diâmetro dos poros, a água entra neles e as forças de Van der Waals tendem a aumentar os poros mais finos. O resultado é um empolamento. No entanto, a contracção nunca é totalmente anulada, devido às deformações plásticas irreversíveis referidas atrás, e também devido às parcelas de retracção por hidratação e por carbonatação, em que a causa da retracção não é a perda de água.

Segundo Joisel [4.2] a secagem ao ar logo após a amassadura dá origem a uma retracção extremamente rápida que pode conduzir à fendilhação em poucas horas.

Ensaios realizados no âmbito deste trabalho corroboram parte destas conclusões: a retracção das argamassas de reboco ensaiadas é maior e mais rápida a humidades relativas mais baixas, mas volta a diminuir quando a humidade relativa do ar desce abaixo de um certo limite (ver capítulo 8 - gráfs. 8.25, 8.27, 8.29 e 8.69); as molhagens periódicas permitem a recuperação de parte das variações dimensionais, mas mantém-se uma deformação residual (ver capítulo 8 - 8.3.10).

- **Natureza do ligante**

Em 1938 Carlson, citado por Sousa Coutinho [4.1], procurou estudar a influência dos vários componentes do cimento, moldando barras de componentes puros e efectuando medições da variação do comprimento ao longo do tempo em várias condições de cura. Concluiu que, dos componentes ensaiados, o C_3A era o que apresentava maior retracção, enquanto o aluminato bicálcico (C_2A) mostrava maior estabilidade dimensional. Ensaios realizados por Sousa Coutinho [4.26, 4.27] confirmaram estes resultados e mostraram que o aluminoferrato tetracálcico (C_4AF) tem ainda maior retracção (cerca de 10 vezes o dos silicatos) que o C_3A (cerca do dobro do dos silicatos).
Segundo Joisel [4.2], a retracção hidráulica é tanto mais rápida quanto mais rápida for a hidratação, portanto quanto mais C_3A e silicato tricálcico (C_3S) tiver o cimento usado, embora o valor final não varie muito.

O uso de cimentos expansivos para diminuir a retracção, experimentado por alguns investigadores [4.9], não parece dar resultados muito significativos e exige um grande domínio de toda a cinética da retracção e da hidratação do cimento para não se correr o risco de piorar o comportamento final. Este controlo não é, pensa-se, razoavelmente previsível em rebocos correntes, em que as condições de cura mantêm um elevado grau de imprevisibilidade, mesmo que alguns cuidados sejam observados.
Os cimentos aluminosos também têm dados origem a resultados contraditórios [4.26, 4.27].

L'Hermite [4.7] e Joisel [4.2] consideram que, para o mesmo cimento, a retracção aumenta com a superfície específica, ou seja, com a finura, podendo estas variações atingir os 30%. Détriché [4.17] admite que a natureza do ligante, nomeadamente a sua finura, condiciona a dimensão dos primeiros capilares formados e a cinética de hidratação e de evolução da rede de capilares. Um cimento mais fino implica uma maior retenção de água na pasta, portanto uma dessecação inicial mais lenta, mas provocando maiores retracções e prosseguindo durante mais tempo, devido aos capilares mais finos e em maior número. A cal hidráulica, normalmente com maior superfície específica, pode, assim, dar origem a argamassas com retracção superior ao cimento.

Ossa e David [4.12] também põem em evidência a maior amplitude e velocidade da retracção plástica de cimentos com superfícies específicas maiores. Por outro lado, a fase de expansão teria amplitude e duração menores e a retracção de secagem voltaria a ter valor e velocidade superiores.

Os ensaios realizados por Delcelier e Lejeune [4.25] mostraram valores inferiores da retracção para as argamassas só de cal hidráulica e também, de um modo geral, para as argamassas bastardas de cimento e cal hidráulica, em relação às argamassas só de cimento.

Em ensaios realizados recentemente no LNEC [4.28 a 4.31] obtiveram-se retracções superiores para as argamassas bastardas de cimento e cal hidráulica em relação às só de cimento e um pouco menores para as argamassas só de cal hidráulica; as argamassas bastardas com cal aérea apresentaram, por outro lado, retracções em geral mais lentas que as restantes argamassas, embora o valor final não seja muito diferente (ver capítulo 3, quadro 3.2).

- **Natureza do inerte**

Em argamassas e betões a retracção é influenciada, não só pelas características da sua *fase activa* - a pasta de cimento - mas também pelas características elásticas da *fase passiva* -o inerte - que vai ficar sujeito a tensões de compressão pela retracção da pasta envolvente ou, eventualmente, a tensões de tracção correspondentes a expansão da pasta.

Troxell, Raphael e Davis, referidos por Sousa Coutinho [4.1], estudaram o fenómeno da retracção de argamassas e betões a longo prazo. Num estudo publicado em 1958 estes investigadores divulgaram curvas de retracção ao longo de 30 anos de betões com inertes

de diferentes naturezas petrográficas. Verificaram que ao fim desse tempo a retracção prosseguia ainda e que, nas condições do estudo, o seu valor podia variar com a natureza do inerte, por exemplo de cerca de 0,5 x 10^{-3} para um betão com inerte de quartzo e de calcário para valores mais de duas vezes superiores para betão com inerte de godo ou grés.
Os estudos de Delcelier e Lejeune [4.25] indicam um aumento da retracção com a inclusão de inertes leves (mais deformáveis), o que está de acordo com as ideias geralmente aceites. No entanto, outros investigadores apresentam resultados contrários [4.9].
Tamin [4.3] estudou a evolução da retracção livre em rebocos monocamada, verificando que esta é mais acentuada para os rebocos *leves* que para os *pesados*, devido à menor restrição conferida pelos inertes leves, mais compressíveis.

Uma maior superfície específica dos inertes, ou seja, uma maior finura, aumenta também a retracção, segundo L'Hermite.
Ensaios realizados recentemente no LNEC [4.29 a 4.31] com argamassas de reboco executadas com areias usadas em rebocos na região de Lisboa mostram que a retracção aumenta quando se aumenta a percentagem de areia argilosa e com maior teor de finos (areia *amarela de Corroios*) em relação à areia de natureza siliciosa e menor grau de finura (areia *do rio Tejo*).

- **Composição quantitativa da argamassa**

L'Hermite [4.7] e Vironnaud [4.8] consideram que, no início de presa, a retracção aumenta de forma aproximadamente proporcional à dosagem de cimento. Além do aumento da retracção de hidratação, dá-se também um incremento da retracção por dessecação. Détriché [4.10, 4.17] admite que, quando aumenta a dosagem de cimento, aumenta a proporção de capilares mais finos na pasta, em relação ao volume total de vazios e aumenta, portanto, a retenção de água e a retracção provocada por idêntica perda de água. Também segundo este autor, a dosagem de cimento influencia, principalmente, a retracção de secagem.

No que diz respeito à dosagem de água, L'Hermite [4.7] considera que uma maior relação a/c atrasa o início da retracção plástica, e, em consequência, diminui o seu valor máximo,

uma vez que esta não pode prolongar-se muito, devido à presa, que a bloqueia parcialmente. Esta conclusão parece estar em contradição com a ideia normalmente aceite de que o aumento de água de amassadura origina um incremento da retracção.

Vironnaud [4.8] conclui que o aumento de a/c até um determinado limite faz aumentar a retracção final, mas a partir de um certo valor o excesso de água acaba por formar uma película de protecção que atrasa o efeito da ventilação, acabando por diminuir a retracção.

Também Détriché [4.10] constata que o aumento da relação a/c, a partir de um certo limite, origina uma maior duração da fase de inibição, logo um atraso do início da retracção plástica e uma menor amplitude desta. No entanto, segundo este autor, a maior dosagem de água conduz ao aumento da velocidade da retracção plástica e pode originar gradientes de deformação superiores aos limites admissíveis para o material num dado momento.

Ebensperger [4.15] considera que relações a/c inferiores a 0,40 resultam em retracções químicas menores, mas devido à incompleta hidratação do cimento. Pelo contrário, com relações a/c maiores que 0,40 é provável que a hidratação seja completa e, nesse caso, a retracção química será tanto mais rápida quanto maior for a/c. A retracção por autodessecação aumenta também, segundo este autor, com a relação a/c, já que o gel é mais poroso, a interacção entre as partículas é menor e a matriz mais débil, logo as pressões internas geram maiores contracções. Estas conclusões parecem estar em contradição com as anteriores, no entanto é de notar que Ebensperger se refere apenas à retracção por hidratação, e em condições ambientes obrigatoriamente muito artificiais para possibilitar o isolamento deste tipo de retracção.

A influência da relação a/c na retracção é, portanto, bastante complexa. Em síntese, parece poder concluir-se, dos vários estudos analisados, que um aumento desta relação (a partir de 0,40) provoca uma redução do valor da retracção plástica mas também um incremento da sua velocidade; por outro lado, verifica-se um aumento do valor da retracção de secagem. Estudos realizados no LNEC [4.28] e os ensaios realizados no âmbito deste trabalho (ver capítulo 7 - quadro 7.8 e capítulo 8 - gráf. 8.30) mostram pequena variação da retracção com o teor de água, quando as medições são feitas a partir da desmoldagem (após se ter dado a maior parte da retracção plástica), mas redução da retracção total, quando as leituras se fazem desde a moldagem.

- **Resinas**

De um modo geral, os estudos publicados parecem indicar uma ligeira diminuição da retracção com a adição à argamassa ou ao betão de polímeros, do tipo látex com base em estireno-butadieno (SBR) [4.32, 4.33] ou do tipo resinas acrílicas ou acrílicas estirenadas [4.28, 4.34 a 4.36]. Do ponto de vista da retracção, as maiores vantagens deste tipo de aditivos parecem estar na menor velocidade da retracção e na menor sensibilidade à higrometria ambiente. Ou seja, embora em atmosfera húmida não se revelem grandes diferenças, em atmosfera seca já se notam reduções significativas da retracção.

- **Fibras e redes**

De um modo geral, a inclusão de fibras dispersas na matriz, metálicas, sintéticas, ou minerais, reduz a retracção, devido a um efeito de restrição, embora haja algumas contradições entre os vários autores que estudaram esta influência [4.37 a 4.41], já que o ar introduzido na amassadura com as fibras e eventuais zonas mais porosas na ligação fibra-matriz, entre outros aspectos, podem ter o efeito contrário. O tipo de fibra, a relação comprimento/diâmetro, o volume de fibras e os tratamentos superficiais estão entre a grande quantidade de factores que influenciam a retracção das argamassas e betões com fibras, tornando difícil estabelecer conclusões gerais.

As redes metálicas e as redes de fibra de vidro, constituindo, de modo semelhante, restrições à retracção, parecem contribuir também para a sua redução.

Os ensaios realizados no âmbito deste trabalho nem sempre corroboraram a tendência para uma redução da retracção final com a incorporação de fibras dispersas e de redes no reboco (ver capítulo 7 - quadro 7.8 e capítulo 8 - gráfs. 8.25 e 8.26).

- **Outros aditivos e adjuvantes**

Segundo Joisel [4.2], a maior parte dos aditivos e adjuvantes solúveis aumentam a retracção, por aumentarem a concentração do líquido intersticial, e portanto a sua tensão superficial. Entretanto, as escórias e as pozolanas têm álcalis não-solúveis que tendem a *absorver* e a *insolubilizar* os álcalis solúveis do cimento, portanto reduzem a retracção

(para igual finura).

No entanto, a informação disponível é por vezes contraditória no que diz respeito à influência dos adjuvantes e de alguns aditivos, nomeadamente das pozolanas naturais e artificiais, na retracção [4.42]. É possível que essa influência dependa mais da quantidade de água de amassadura a usar e dos mecanismos de secagem do que directamente dos adjuvantes e aditivos. Assim, o estudo destas influências para as argamassas de reboco apenas tem sentido se for feito com base nas dosagens, teores de água e condições de aplicação específicas das argamassas usadas para esse fim, e não nos parece particularmente útil desenvolver aqui as conclusões - por vezes, como se disse, contraditórias -, de estudos realizados para situações muito diferentes.

- **Espessura do elemento**

Sendo originada, fundamentalmente, pelos movimentos da água na argamassa ou no betão, a retracção é, em grande parte, regulada pelas leis de secagem destes materiais porosos. Um dos corolários desta afirmação é a importância da espessura da camada no desenvolvimento da retracção ao longo do tempo. Os rebocos, por serem aplicados em camada fina sobre um suporte geralmente absorvente, oferecem uma superfície muito extensa às perdas de água por evaporação e por sucção. Estão, nessa medida, em condições extremamente desfavoráveis para sofrer retracção.

As experiências de Vironnaud [4.8] e de Détriché [4.10, 4.43] evidenciaram o aumento da retracção quando diminui a espessura do elemento (e, portanto, aumenta a relação s/v). Détriché considera que existe uma espessura crítica, que conduz à máxima retracção: para valores inferiores, a dessecação dá-se demasiado cedo, impedindo a total hidratação do cimento e diminuindo, assim, a retracção de hidratação, enquanto para valores superiores ficará sempre, no interior do elemento, água *encerrada*, que será utilizada numa estruturação progressiva do material, o que se traduz numa menor retracção por dessecação.

Chern e Young [4.37] também estudaram a influência da forma dos provetes na retracção, tendo concluído que uma maior relação s/v dá origem a uma retracção mais rápida, com estabilização mais cedo. Estes autores relacionam a velocidade de retracção com as teorias da difusão - linear, de Picket, e não-linear, de Bazant e outros.

- **Contacto com suporte poroso**

Détriché, Gallias, Grandet e Maso [4.43], e, mais tarde, Paulina Faria [4.19], ao realizarem ensaios sobre argamassas aplicadas em espessura fina sobre suportes porosos e não-porosos, mostraram que o contacto com uma superfície absorvente aumenta a retracção nos primeiros dias mas diminui a sua amplitude a longo prazo. Verificaram também que a sucção inicial acelera a hidratação e o desenvolvimento das características mecânicas. A resistência à tracção por flexão e o módulo de elasticidade atingem valores superiores, para uma determinada idade, em igualdade de condições da higrometria exterior. Aliás, uma estruturação e rigidificação mais rápida da pasta de cimento pode explicar os menores valores da retracção a longo prazo.

Ensaios realizados no âmbito deste trabalho confirmaram estas conclusões (ver capítulo 8 - gráfs. 8.12, 8.14, 8.17 e 8.91 a 8.94 e quadros 8.1 e 8.5).

4.2.8 - Formulação matemática da retracção

Vários foram os autores que tentaram formular matematicamente a retracção de argamassas e betões, de forma a tornar previsível o seu valor em cada momento, conhecidos os parâmetros que mais influem naquele fenómeno.

Na maioria dos casos as formulações publicadas são de tipo empírico, procurando-se chegar a expressões que se adaptem aos resultados experimentais já obtidos e usando parâmetros também determinados experimentalmente. Outros casos há em que se procurou estabelecer expressões matemáticas teóricas, a partir das causas da retracção e dos mecanismos conhecidos.

As expressões do primeiro tipo são muito úteis para alguns casos bem tipificados, em que todos os factores são controlados. No entanto, as expressões conhecidas foram, em geral, obtidas para betões com composições e condições de cura bem definidas, e não para rebocos, com composições, métodos de aplicação e condições de cura variáveis de país para país e, mesmo, de localidade para localidade. De um modo geral, as expressões constantes da literatura indicam variações exponenciais ou hiperbólicas com o tempo.

As expressões do segundo tipo baseiam-se em teorias que se sabe serem ainda

incompletas e implicam a determinação de muitas grandezas e coeficientes complexos, que constituem outras tantas fontes de imprecisão. Referem-se a seguir, muito sinteticamente, algumas das expressões matemáticas deduzidas para a retracção por um conjunto diversificado de autores, passíveis de serem incluídas nos dois tipos referidos.

a) Expressões fundamentalmente empíricas

I

Segundo Joisel [4.2], que cita um estudo de M. Venuat publicado em 1960, a função que melhor se adapta à curva de evolução da retracção com o tempo, ε_r , de um provete prismático de dimensões 40 mm x 40 mm x 160 mm de uma argamassa normalizada, mantido desde o momento da moldagem numa atmosfera de 20°C/50% HR, é dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r\infty} \{1-[1/(1+t)^{0,2}.1,03^t]\} \qquad (4.5)$$

em que t é o tempo em dias desde o início da secagem ao ar e $\varepsilon_{r\infty}$ é a retracção ao fim de um período infinito de tempo, ou seja o limite para que ela tende ao fim de um período suficientemente longo. Para a argamassa referida este valor é de cerca de 0,8 mm/m.

Esta fórmula, de natureza empírica, apenas pretende adaptar-se aos resultados obtidos experimentalmente, não recorrendo ao mecanismo do fenómeno. A partir dela e da compreensão da influência de alguns factores foram deduzidas correcções a introduzir na função inicial, para obter a evolução da retracção em prismas de diferentes dimensões - e, portanto, com relações s/v e velocidades de evaporação diferentes -, com dimensões máximas de inerte diferentes, com outras dosagens de cimento e sujeitos a humidades relativas ambientes com valores diversos.

II

L'Hermite [4.7] propõe para a retracção uma lei do tipo:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r\infty} (1-e^{-t}) \qquad (4.6)$$

em que $f(t_0,t,h,H)$, com t_0 - idade no início da dessecação (colocação em ambiente não-saturado) e h - espessura do elemento.

III

Em 1971 o ACI recomendava a seguinte expressão para a previsão da variação da retracção com o tempo (referido por Tamin [4.3]):

$$\varepsilon_r(t)=\varepsilon(28).[(t-t_0)/[35+(t-t_0)]] \quad (4.7)$$

IV

O último modelo do CEB-FIP (Comité Europeu do Betão - Federação Internacional do Pré-esforço), recomendado recentemente pelo ACI, para prever a retracção de elementos de betão, é o CEB MC 90 (CEB-FIP model code de 1990) [4.44], que propõe a seguinte equação simplificada:

$$\varepsilon_r(t,t_0)=\varepsilon_{r0}.\beta_r(t-t_0) \quad (4.8)$$

em que $\varepsilon_{r0}=\varepsilon'_r(R_c).\beta_{RH}$ e β_r e β_{RH} são coeficientes que dependem da humidade ambiente e das condições de hidratação do cimento.

Nesta equação a influência da composição do betão é dada de forma muito indirecta, apenas pela resistência à compressão R_c, e por um coeficiente que se introduz no cálculo da função $\varepsilon'_r(R_c)$ e que depende da rapidez de presa do cimento. Este facto é a causa de consideráveis desvios em relação aos resultados experimentais, quando nos afastamos das composições com base nas quais foi determinado o coeficiente.

V

Tamin [4.3] concluiu que a expressão que melhor se adaptava à curva experimental obtida nos seus ensaios de retracção restringida unidimensional de rebocos monocamada era do tipo:

$$\varepsilon_r(t)=[1-e^{a(t+b)}].\varepsilon_r(28) \qquad (4.9)$$

para $3\leq t\leq 28$ dias. Entre 1 e 3 dias a retracção observada era muito irregular, e não lhe foi possível estabelecer uma expressão com significado.

b) Expressões com componente teórica relevante

VI

Hobbs [4.45] considerou as argamassas e betões como materiais difásicos, constituídos por matriz *(m)* e inertes *(i)* e estabeleceu expressões que permitem determinar várias propriedades, entre as quais a retracção volumétrica do *compósito*, a partir da concentração volumétrica de inertes D_i e dos *coeficientes de compressibilidade K* - determinados a partir do módulo de elasticidade E e do coeficiente de Poisson ν: $K=E/3(1-2\nu)$ - da matriz (K_m) e dos inertes (K_i):

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{rm} - \{[(\varepsilon_{rm}-\varepsilon_{ri})D_i.2K_i] / [(K_m+K_i+D_i(K_i-K_m)]\} \qquad (4.10\ a)$$

Se $\varepsilon_{ri}=0$ (pressuposto bastante razoável já que, de facto, a retracção dos inertes pode, em geral, considerar-se nula em relação à retracção da matriz):

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{rm} - \{ \varepsilon_{rm}D_i.2K_i / [K_m+K_i+D_i(K_i-K_m)]\} \qquad (4.10\ b)$$

Se, além de $\varepsilon_{ri}=0$, se admitir que $K_i \Rightarrow \infty$ (pressuposto, a nosso ver, já menos razoável no caso dos rebocos):

$$\varepsilon_r=\varepsilon_{rm}[(1-D_i)/(1+D_i)] \qquad (4.10\ c)$$

VII

Détriché e Maso [4.46] partem também de um modelo difásico da argamassa, constituída por matriz (*m*) e inertes (*i*) para estabelecer expressões que permitem prever a retracção de uma argamassa a partir do conhecimento da retracção potencial da pasta pura

(matriz). Este modelo admite que a retracção potencial da pasta, à temperatura θ, $\varepsilon_{rm}(t,H,\theta)$, é contrariada pelos inertes, verificando-se, assim, uma retracção efectiva da pasta intergranular inferior à retracção da matriz - $\varepsilon_{rmi}(t) < \varepsilon_{rm}(t)$. A pasta ficaria sujeita a tracção e os inertes a compressão, de tal modo que a tracção na pasta seria equilibrada pelo campo de tensões nos inertes:

$$\int_A \sigma_{tm}(t)\, d_{Am} = \int_A \sigma_{ci}(t)\, d_{Ai} \qquad (4.11\ a)$$

em que A é a área da secção do elemento de argamassa,
de onde se tira que $\sigma_{tm}(t).A_m = \sigma_{ci}(t).A_i$ ou,

$$\sigma_{tm}(t).(1-\alpha) = \sigma_{ci}(t)\alpha \qquad (4.11\ b)$$

Se admitirmos que $\varepsilon_{ri} = \varepsilon_{rmi} = \varepsilon_{rarg}$, ou seja, que não há rotura, e ainda que $\varepsilon_{rarg}/\varepsilon_{rm}$ é independente do tempo, acabamos por obter:

$$\varepsilon_{rarg}/\varepsilon_{rm} = 1/[1+B\alpha/(1-\alpha)] \qquad (4.11\ c)$$

em que $B = [E_i/(1-2\nu_i)].[(1-2\nu_m)/E_m]$

Segundo os autores, a expressão é válida para inertes correntes, não-porosos, mas não para inertes leves, devido à absorção de água que os caracteriza e que altera o processo de hidratação.

Estes investigadores comparam o desenvolvimento da retracção a um ensaio de tracção da pasta intergranular, a uma velocidade muito lenta, mas com níveis de carga não-negligenciáveis. As tracções originam fendilhação da matriz, a que se segue uma redistribuição das tensões e uma certa libertação das contracções.

VIII

Bazant estabeleceu equações constitutivas para a retracção e a fluência de argamassas [4.47 e 4.48]. Embora no caso da fluência os resultados tenham mostrado boa concordância

com várias propriedades observadas e com os resultados obtidos experimentalmente, no caso da retracção, em que a variação de humidade nos poros adquire grande importância, os resultados foram menos animadores. De facto, o estado de humidade altamente não-uniforme na secção de uma argamassa durante a secagem provoca estados de tensão que podem conduzir a micro-fendilhação, o que dificulta muito o estabelecimento de leis matematicamente rigorosas para a evolução da retracção.

Assim, Bazant procurou expressões mais simples para uso nos casos de estruturas de tipo conhecido, com recurso a fórmulas algébricas [4.49] e estabeleceu o conhecido modelo BP (Bazant-Panula) de previsão da retracção, considerado um dos mais rigorosos modelos simplificados actuais [4.50, 4.51]:

$$\varepsilon_r(t,t_0)=\varepsilon_{r\infty}K_h S(t') \qquad (4.12\ a)$$

Em que t'(tempo de cura)=t(tempo total)-t_0(início de cura); K_h é um coeficiente que dá a influência da humidade relativa do ar e $\varepsilon_{r\infty}$ é uma característica do material que depende de vários parâmetros, entre os quais o módulo de elasticidade na idade t, a difusividade do material e as características geométricas da secção (nomeadamente a relação s/v); S(t') é uma função que dá a forma da curva.

Depois de analisar várias formas possíveis, Bazant escolheu como mais adequada a curva do tipo

$$S(t')=[t'/(\eta_r+t')]^{1/2} \qquad (4.13\ a)$$

em que η_r é um parâmetro que representa o tempo em que $S^2=1/2$, também chamado *meio tempo de retracção quadrada* ("shrinkage square half-time"). η_r depende da forma e dimensões da secção e da difusividade, *C(t)*, do material.

Nesta expressão o efeito da hidratação na diminuição da retracção é expresso de dois modos: o módulo de elasticidade *E(t)* aumenta e *C(t)* diminui. Com efeito, como a fonte da retracção é, em grande parte, a tensão de compressão na microestrutura sólida da pasta de cimento, produzida pela tensão capilar e pela tensão superficial, é natural que a retracção seja proporcional a *1/E*. Por outro lado, como a retracção está sempre ligada aos movimentos da água, é, naturalmente, tanto maior quanto mais fáceis forem esses movimentos e, portanto,

quanto maior for a difusividade *C(t)* em cada momento.

Ou ainda, de forma mais elaborada:

$$\varepsilon_r(t,t_0)=\varepsilon_{r\infty}K_hS(i) \qquad (4.12\ b)$$

em que *i* é um coeficiente de temperatura baseado na energia de activação da migração de humidade e S(i) dá a forma da curva e é do tipo:

$$S(i)=\tanh(i/\eta_r)^{1/2} \qquad (4.13\ b)$$

IX

Han e Lytton [4.52] estabeleceram equações que permitem calcular a retracção por dessecação a partir da humidade relativa do ar, usando o conceito de potencial químico da água. O objectivo era calcular a retracção livre teórica e, comparando-a com a retracção medida, determinar a retracção impedida, que iria induzir tensões na argamassa ou no betão. Estes investigadores partiram da hipótese de que a retracção de secagem é originada pelo movimento da água na argamassa, que, por sua vez, é controlado pelo potencial químico da água, que actua como motor do movimento. O potencial químico está relacionado com a humidade relativa do ar através da Lei de Kelvin (equação 4.3). Han e Lytton admitiram a contribuição dos três mecanismos principais para a retracção de secagem: depressão capilar, tensão superficial e pressão de disjunção. No seu modelo fizeram intervir apenas a primeira e a última, por considerarem que a humidade relativa no interior do betão raramente se encontra a valores inferiores a 50%, limite a partir do qual o efeito do segundo mecanismo é predominante sobre o terceiro. Na verdade, esta hipótese não é válida para rebocos que, dadas as suas condições de exposição e de cura e a sua pequena espessura, facilmente atingem humidades relativas muito baixas, pelo menos no nosso País. Partindo da expressão de Powers para a diminuição de volume devido à pressão de disjunção [4.21], e admitindo uma expressão semelhante para a variação por tensão hidrostática, estes autores chegaram à seguinte equação:

$$\Delta V/V = (k+1).\beta\int_0^{\phi} W_a/V_s d\phi \qquad (4.14\ a)$$

em que $\phi = p_c - p_a$ é o potencial químico da água, W_a a massa de água adsorvida, V_s o volume sólido e k e β são coeficientes, destinados a terem em conta, respectivamente, a geometria dos poros e a compressibilidade do material.

Considerando que a extensão linear é cerca de 1/3 da variação volumétrica e fazendo intervir o teor de inertes i e as suas constantes elásticas através da função λ e ainda a porosidade n, os autores obtêm, após algumas simplificações que permitem resolver a integração:

$$\varepsilon_r = \lambda.n.a.\ln(1+\phi/a) \qquad (4.14\ b)$$

em que a é uma constante determinada experimentalmente.

A análise de Han e Lytton tem, sem dúvida, o mérito de procurar estabelecer equações a partir das causas da retracção, e das relações teóricas que é possível deduzir das leis que regem o fenómeno. No entanto, a sua aplicação prática é, como se vê, difícil e sujeita a muitos erros, dada a quantidade de constantes e parâmetros a determinar experimentalmente e as lacunas e imprecisões que sabemos ainda existirem no conhecimento dos mecanismos da retracção por dessecação. Por outro lado, para a resolução do problema equacionado pelos autores, este seria apenas um passo, subsistindo ainda, crê-se, muitas dificuldades:

- a retracção calculada por este modelo é apenas a retracção por dessecação, deixando de fora a retracção por hidratação e por carbonatação;

- a influência do mecanismo de tensão superficial não é, como foi dito, tido em conta;

- admitindo que se obtém a retracção livre teórica (a que poderíamos chamar retracção livre potencial), e que portanto, por subtracção da retracção medida, facilmente calcularíamos a retracção impedida, geradora de tensões, mantem-se o problema da determinação da relação constitutiva que permitiria calcular as tensões a partir das deformações impostas.

4.2.9 - Retracção restringida

Quando uma peça de argamassa seca naturalmente ao ar, fica sujeita à retracção, que é mais rápida nas superfícies em contacto com o ar e mais lenta nos pontos mais afastados da superfície livre, devido à diferente velocidade de secagem. A retracção diferencial entre zonas da mesma peça origina um estado de tensão tal que, em condições normais, a superfície fica sujeita à tracção - por tender a contrair e ter essa deformação parcialmente restringida pelas zonas adjacentes - enquanto a parte interna é comprimida. As tensões resultantes são tanto mais elevadas quanto menor for a relação s/v da peça.

Por razões semelhantes, os inertes, principalmente os maiores e menos compressíveis, constituem também restrições à retracção da pasta de cimento - a fase *activa* da argamassa - e ficam sujeitos a tensões de compressão, determinando, por outro lado, o surgimento de tensões de tracção na pasta envolvente.

Os revestimentos de paredes constituídos por argamassas são aplicados sobre um suporte, em geral muito mais rígido, ao qual ficam aderentes. À medida que se dá a secagem da argamassa, vai-se desenvolvendo a retracção - normalmente em condições bastante desfavoráveis: evaporação rápida, sucção do suporte - que é restringida pela aderência ao suporte, induzindo tensões na argamassa.

Assim, por diversos motivos, as peças de argamassa ficam sujeitas a estados de tensão resultantes da retracção restringida. Quase sempre são estas tensões e não as retracções efectivas (deformações) que podem dar origem a fendilhação, portanto são estes os valores que interessa conhecer para a evitar. De facto, as medições da retracção efectiva dão-nos pouca informação sobre a grandeza e distribuição das tensões e a passagem dos diagramas de distribuição da retracção para os de tensão não é ainda totalmente conhecida. Numa obra cuja 1ª edição data de 1974 [4.1], Sousa Coutinho afirma que os conhecimentos existentes nesse momento não permitiam fazer essa transformação. Com efeito, as constantes elásticas determinadas pelos processos usuais não são válidas neste caso, por causa da dissipação de tensões devida ao fenómeno da relaxação. Ou seja, as solicitações (deformações impostas) são aplicadas de forma tão lenta - ao ritmo da retracção - que a relaxação tem uma influência determinante no estado de tensão produzido. Por outro lado, essas *constantes* elásticas são, afinal, muito variáveis com o tempo.

A determinação das tensões induzidas por retracção restringida implica, assim, o

conhecimento da capacidade de relaxação da argamassa ou do betão. Este factor pode ter maior peso que a grandeza da retracção na susceptibilidade à fendilhação da argamassa ou do betão. É ainda necessário ter em conta que, se a tensão instalada na argamassa varia com o tempo, devido à variação da retracção e do módulo de elasticidade e à influência da relaxação, a resistência à tracção da argamassa também é função do tempo, dependendo, nomeadamente, do grau de hidratação.

4.3 - RELAXAÇÃO DE TENSÕES

4.3.1 - Teorias sobre relaxação de tensões

A relaxação é, por definição, a diminuição no tempo da tensão provocada por uma deformação imposta constante, quando se mantém essa deformação por um período considerável de tempo.

A fluência é a variação no tempo da deformação de um elemento sujeito a tensão constante, aplicada durante um período considerável de tempo [4.1, 4.53].

Na realidade, dever-se-ia antes recorrer ao conceito de variação de tensão no tempo, independentemente da deformação, ou de variação de deformação no tempo, independentemente da tensão aplicada, para poder pensar nos casos práticos em que há, afinal, variação quer da tensão, quer da deformação ao longo do tempo, como é o caso da retracção restringida das argamassas de reboco.

A relaxação é, em geral, favorável ao funcionamento dos elementos de argamassa ou de betão, já que permite aliviar as tensões provocadas por variações de volume, como as originadas pela retracção restringida e as de origem térmica. Segundo Sousa Coutinho [4.1], o *tempo de relaxação* - tempo necessário para que a tensão diminua para *1/e* do seu valor original (sendo *e* a base dos logaritmos naturais) - dá uma medida da fragilidade do material. De facto, como mostraremos adiante (ver capítulo 8), se não houvesse dissipação de tensões por relaxação e a relação entre a deformação imposta por retracção impedida e a tensão induzida na argamassa fosse regulada pela lei de Hooke, as tensões surgidas seriam enormes e as argamassas tradicionais nunca poderiam funcionar como revestimentos de paredes, já que

fendilhariam sempre excessivamente.

Por outro lado, a fluência é geralmente considerada como desfavorável, originando flechas e outros deslocamentos superiores aos estimados.

No entanto, a fluência e a relaxação são dois aspectos de um mesmo fenómeno: a dissipação de energia de deformação em energia interna. Têm as mesmas causas e as leis de variação com os diferentes parâmetros que as afectam são idênticas [4.1, 4.53].

Klug e Wittman [4.53] consideram que é a fluência da argamassa - ou seja, a sua deformação ao longo do tempo (para além da deformação elástica), quando sujeita a uma tensão aplicada por um período considerável de tempo - que provoca, afinal, a relaxação de tensões. Assim, os dois fenómenos estariam intimamente relacionados e seria possível estabelecer uma correlação matemática entre eles.

Estes investigadores estabeleceram expressões que permitem obter funções de fluência através de ensaios de relaxação e vice-versa. Tomando $\Phi(t)=\varepsilon(t)/\varepsilon(0)$ como função de fluência e $\Psi(t)=\sigma(t)/\sigma(0)$ como função de relaxação, e introduzindo algumas hipóteses simplificativas, chegaram a expressões do tipo exponencial e do tipo hiperbólico:

$$\Phi(t)=1+\Phi'_{\infty}.(1-\Sigma_{i=1}^{n}e^{-c_i.t}) \tag{4.15}$$

ou

$$\Phi(t)=1+\Phi'_{\infty}.[c.t/(1+c.t)] \tag{4.16}$$

e

$$\Psi(t)=\Psi'_{\infty}+(1-\Psi_{\infty}).\Sigma_{i=1}^{n}e^{-x_i.t}) \tag{4.17}$$

ou

$$\Psi(t)=(1+\Psi'_{\infty}.x.t)/(1+x.t) \tag{4.18}$$

em que c e x são coeficientes a determinar experimentalmente e Φ'_{∞} e Ψ'_{∞} representam os valores para que tendem as parcelas não-instantâneas de, respectivamente, $\Phi(t)$ e $\Psi(t)$.

Mas também:

$$\Phi(t)=1+[(1-\Psi_{\infty})/\Psi_{\infty}].(1-e^{-\Psi_{\infty}xt}) \tag{4.19}$$

ou

$$\Phi(t)=1+t/[1/(x.(1-\Psi_\infty))+(\Psi_\infty/((1-\Psi_\infty).t)] \quad (4.20)$$

e

$$\Psi(t)=(1/\Phi_\infty)+(1-1/\Phi_\infty)e^{-c.\Phi_\infty.t} \quad (4.21)$$

ou

$$\Psi(t)=(1+c.t)/(1+C.\Phi_\infty t) \quad (4.22)$$

em que $C=\Psi.x$

Klug e Wittman verificaram ainda que a rapidez de decrescimento da tensão em ensaios de relaxação é muito superior à velocidade de aumento da deformação, em ensaios de fluência. No entanto, encontram-se na bibliografia muito mais dados experimentais de fluência de argamassas e betões do que relativos à relaxação, talvez porque os ensaios de fluência são mais fáceis de realizar e também devido à necessidade que sempre se sentiu de prever os efeitos negativos da fluência. Entre os poucos ensaios de relaxação realizados, vale a pena referir os de Sousa Coutinho, que realizou ensaios de relaxação de argamassas moldadas em anéis metálicos, com a retracção restringida [4.26, 4.27]. Na realidade, estes ensaios não são de relaxação pura, já que a deformação imposta não é constante, antes vai aumentando com o tempo, mas é possível pôr em evidência a variação de tensão independentemente da variação da deformação, ainda que de forma qualitativa. Por outro lado, quando os ensaios são prolongados após se verificar, na prática, a estabilização da retracção livre, é possível, sem muito erro, considerar o ensaio de relaxação pura a partir daí. Ou seja, obter a função de relaxação a partir de, por exemplo, 28 dias, com uma aproximação aceitável. Outros ensaios de retracção restringida realizados mais recentemente e a que nos referiremos mais adiante, por permitirem uma avaliação da relaxação, podem também ser considerados *ensaios indirectos* de relaxação.

Do mesmo modo, e provavelmente pelas mesmas razões, não se encontram na literatura formulações matemáticas completas sobre a relaxação, embora existam muitas sobre a fluência.

Considerando provada a relação existente entre os dois fenómenos, vamos debruçar-nos sobre os estudos de fluência de argamassas e admitir a viabilidade de extrapolação da informação obtida para a relaxação.

Segundo Sousa Coutinho [4.1], o fenómeno da fluência começou a ser estudado talvez por Louis Vicat, em 1831. No entanto, terá sido Freyssinet, no início do século XX, o primeiro a estudar com profundidade a fluência, realizando ensaios e interpretando-os sob um ponto de vista científico e formulando hipóteses explicativas. Posteriormente, outros investigadores têm estudado a fluência, quer do ponto de vista experimental, quer analítico.

Várias teorias explicativas têm sido delineadas, mas a maioria delas não consegue abarcar a totalidade dos aspectos de tão complexo fenómeno e não resiste a testes específicos realizados para as confirmar [4.54].

Sousa Coutinho [4.1] admite quatro mecanismos fundamentais que actuariam em simultâneo: **escorregamento cristalino; movimento da água adsorvida pelos produtos da hidratação do cimento; escoamento viscoso; aumento da solubilidade dos componentes do cimento devido às tensões a que estão sujeitos.**

O 1º mecanismo pode ser responsável por uma das parcelas não-reversíveis da fluência e consiste na existência de deslocamentos atómicos por difusão, devido à acção de uma carga actuando durante um período de tempo suficientemente longo. Como os átomos estão animados de movimentos de oscilação em torno da sua posição de equilíbrio devido à agitação térmica, é natural que a temperatura influencie a fluência, através deste mecanismo, já que é, naturalmente, no instante em que um átomo deslocado se afasta mais de um dos seus vizinhos que é mais provável a rotura da ligação, que se traduz, ao nível macroscópico, em deformação de fluência.

O 2º mecanismo estaria relacionado com o movimento da água nos poros da argamassa ou betão e é descrito de formas diferentes por diversos investigadores.

Segundo Freyssinet este movimento seria regulado por leis idênticas às aplicáveis à retracção por depressão capilar: as leis de Laplace e de Kelvin. Freyssinet considerava que a imposição de tensões ao material teria como consequência deformar os capilares, e portanto alterar a curvatura dos meniscos. Assim, segundo este investigador, a fluência seria uma retracção amplificada por uma carga. No entanto, os ensaios realizados não confirmam esta teoria. Nomeadamente, uma argamassa sem água evaporável sofre fluência e, por outro lado, verifica-se que é idêntica a perda de água numa argamassa livre ou carregada.

Alguns investigadores, entre os quais Powers [4.21], defendem que apenas a água

adsorvida na superfície do material poroso cristalino que constitui o cimento hidratado dá origem a fenómenos de fluência, ao movimentar-se.

Sereda e Feldman [4.22] admitem que é a água zeolítica interlamelar que tem tendência a sair sob o efeito da carga, mas de forma muito lenta, por se encontrar bloqueada entre as lamelas.

Bazant [4.54] defende a teoria segundo a qual a fluência de secagem é essencialmente devida ao fluxo de microdifusão local de água, entre os macro-poros e poros capilares e os micro-poros do gel do cimento, que facilitaria o escorregamento de partículas de gel de cimento. Estes movimentos seriam, todavia, afectados por um coeficiente de viscosidade. Segundo esta teoria a fluência de secagem seria equivalente a uma retracção induzida pela tensão.

Este mecanismo, sob qualquer das suas formas, sugere uma ligação entre fluência e retracção. Sugere, além disso, um grau de reversibilidade bastante superior ao que normalmente se associa à fluência. De qualquer modo, ainda que parte da fluência seja devida a este mecanismo, é certo que há fluência na ausência de movimento da água.

O 3º mecanismo, segundo Sousa Coutinho da autoria de Lynam, explica a fluência através do escorregamento muito lento das partículas umas sobre as outras, quando as forças de Van der Waals que actuam nas suas superfícies são reduzidas. O cimento endurecido comportar-se-ia, assim, como um líquido viscoso, cujo coeficiente de viscosidade aumentaria com o tempo. Estes movimentos dariam origem a uma parcela irreversível da fluência. Este mecanismo também apresenta discrepâncias em relação às verificações experimentais realizadas.

Finalmente, o 4º mecanismo indicado por Sousa Coutinho, já referido por este autor em trabalhos realizados na década de 60, explica a fluência através do aumento da solubilidade, devido à tensão, dos sais que constituem parte dos componentes não-hidratados do cimento. Estes sais, ao dissolverem-se em maior quantidade na água, originariam uma redução do volume do elemento. Depois, cristalizariam nos espaços livres, sem aumento de volume. Esta parcela de fluência seria também irreversível [4.1].

Vários investigadores têm proposto leis, geralmente do tipo hiperbólico, exponencial

ou potencial, para descrever a fluência ao longo do tempo. Referem-se a seguir, de forma muito sintética, algumas das expressões propostas, das quais a maioria são de carácter empírico, enquanto outras recorrem, parcialmente, à compreensão do fenómeno.

I

Lee, em 1951, referido por Sousa Coutinho [4.1]:

$$\varepsilon(t')=\varepsilon_{\infty}[1-e^{-F(t')}] \tag{4.23}$$

II

L'Hermite, em 1957, também referido por Sousa Coutinho [4.1]:

$$\varepsilon(t')=\varepsilon_0+(\varepsilon_{\infty}-\varepsilon_0)[1-e^{-[K1.\log((t0+t')/t0)+K2t']}] \tag{4.24}$$

em que ε_0 é a deformação instantânea do betão devida à aplicação da carga, t' é o tempo de carga, t_0 a idade no momento da carga e $K1$ e $K2$ são coeficientes a determinar experimentalmente e que têm em conta as características do betão e da atmosfera de conservação.

III

O Eurocódigo 2 [4.55] propõe a seguinte formulação simplificada para cálculo da fluência de estruturas de betão armado e de betão armado e pré-esforçado:

$$J(t',t_0)= (1/E_{28})+\varphi(t',t_0)/E_{28} \tag{4.25}$$

com o coeficiente de fluência $\varphi(t',t_0)$ dado por:

$$\varphi(t',t_0)=\varphi_0.\beta_c(t-t_0) \tag{4.26}$$

em que t_0 é a idade no momento da aplicação da carga, φ_0 é o coeficiente de fluência nominal nas condições iniciais de aplicação da carga (dependente da humidade relativa do ar, da forma e dimensões do provete, da resistência do betão, da idade, etc.) e β_c é um coeficiente que traduz a variação do coeficiente de fluência com o tempo, que depende também de alguns dos

factores referidos.

Nestas condições, a deformação de fluência ε_f é dada por:

$$\varepsilon_f(t,t_0) = \sigma(t_0).\varphi(t,t_0)/E_{28} \qquad (4.27)$$

IV

O último modelo do CEB-FIP, também recomendado pelo ACI, é o CEB MC 90 (CEB-FIP model code de 1990) [4.44]. Este modelo admite que a extensão ε_σ, sob o efeito de uma carga permanente, , é constituída pela soma de uma parcela *elástica instantânea*, ε_i , que é função do módulo de elasticidade instantâneo $E(t_0)$, com uma parcela de *escoamento*, ε_f , no momento $t>t_0$, dependente do módulo de elasticidade instantâneo aos 28 dias E_{28} e afectada pelo coeficiente de fluência $\varphi(t,t_0)$:

$$\varepsilon_\sigma(t,t_0)=\varepsilon_i(t_0)+\varepsilon_f(t,t_0) \qquad (4.28\ a)$$

em que

$$\varepsilon_i(t_0)=\sigma(t_0)/E(t_0) \qquad (4.29)$$

e

$$\varepsilon_f(t,t_0)=[\sigma(t_0)/E_{28}].\varphi(t,t_0) \qquad (4.30)$$

Ou seja

$$\varepsilon_\sigma(t,t_0)=\sigma(t_0).J(t,t_0) \qquad (4.28\ b)$$

em que a função de fluência

$$J(t,t_0)=[1/E(t_0)]+[\varphi(t,t_0)/E_{28}] \qquad (4.31)$$

Este modelo simplificado inclui fórmulas para calcular o módulo de elasticidade instantâneo aos 28 dias e em função de t, o coeficiente de fluência (que varia em função da humidade relativa do ar, da forma e dimensões da secção e da resistência do betão) e os parâmetros necessários à previsão da influência do tipo de cimento e da temperatura.

Muller [4.44], analisa a fiabilidade deste modelo para diversos tipos de histórias de carregamentos. A relaxação é uma das histórias de carregamento consideradas, para a qual este autor admite uma fiabilidade aceitável do modelo CEB MC 90.

V

Bazant, em colaboração com outros investigadores, estabeleceu equações constitutivas para a fluência, que dividiu em fluência básica (fluência sem variação de humidade) e fluência de secagem (adicional de fluência devida às variações de humidade), analisando e equacionando matematicamente vários dos factores que mais afectam este tipo de deformação das argamassas e betões [4.54 e 4.56 a 4.58]. Estas equações constituem já um aperfeiçoamento do conhecido modelo BP (Bazant-Panula) e são, essencialmente, as seguintes:

Fluência básica:

$$J_b(t,t_0,\sigma)=q1+F(\sigma)+C_0(t,t_0) \tag{4.32}$$

Fluência total:

$$J(t,t_0,\sigma)=q1+F(\sigma)[C_0(t,t_0)+C_d(t,t',t_0).G(\sigma)+C_p(t,t',t_0)] \tag{4.33}$$

em que

$$q1 = 1/E_0 = 1/1{,}5E_{28} \quad \text{e} \quad E_{28}=57000(R'_c)^{1/2} \text{ (fórmula do ACI)} \tag{4.34}$$

e $J(t,t_0,\sigma)$ representa a função de fluência, ou seja, a deformação no momento t causada por uma tensão uniaxial unitária σ, actuando desde o momento t_0 ; $J_b(t,t_0,\sigma)$ a função de fluência básica; $C_0(t,t_0)$ representa a fluência específica e depende da extensão viscoelástica e da extensão viscosa da argamassa, que variam com a composição; C_d depende principalmente da retracção $\varepsilon_{r\infty}$ e da humidade relativa do ar e C_p do grau de hidratação no momento da aplicação da carga; $F(\sigma)$ traduz a dependência não linear do estado de tensão e $G(\sigma)$ a variação não-linear mais forte da fluência de secagem.

O coeficiente de fluência é dado por:

$$\varphi(t,t_0)=E(t_0).J(t,t_0)-1 \tag{4.35}$$

Embora Bazant preveja fórmulas para determinar todos os seus parâmetros apenas a partir da composição do betão e da sua resistência à compressão característica R'_c, ele faz notar que o cálculo desses parâmetros está sujeito a grande imprecisão e é fonte de desvios importantes, pelo que é aconselhável recorrer a determinações experimentais de algumas características mais influentes, como o módulo de elasticidade E_{28}. A realização de ensaios de curto prazo de fluência permite também ajustar os parâmetros, eliminando, segundo este autor, a maior parte dos erros.

Bazant estabeleceu ainda equações simplificadas [4.49, 4.59 e 4.60] para casos de carga conhecidos. Uma das simplificações é a conhecida fórmula da dupla potência, que para o caso de aplicação da carga na fase inicial da secagem (em que se enquadra o caso dos rebocos) é:

$$J(t,t_0)=(1/E_0)+(\varphi'/E_0).(t_0)^{-m}.[(t-t_0)^n+b(t-t_0)^{c.d.n}] \tag{4.36}$$

em que φ' e b são coeficientes dependentes de $t-t_0$. e c, d, m e n são constantes determinadas experimentalmente.

Bazant adverte que as expressões que permitem calcular os parâmetros incluídos nas suas equações são válidas apenas para betões de composições relativamente padronizadas, o que exclui, naturalmente, as argamassas de reboco.

Apesar disso, estas equações podem ser úteis para mostrar as formas prováveis das curvas de fluência e ainda para pôr em evidência os factores que a influenciam.

4.3.2 - Factores que influenciam a fluência e a relaxação

Muitos autores estudaram experimentalmente a influência de diversos factores na fluência:

- **Humidade**

Sousa Coutinho [4.1] afirma que a fluência do betão durante a secagem é 2 a 4 vezes superior à do mesmo betão conservado em água. Os seus ensaios de relaxação [4.26] mostram o mesmo efeito.

Após secagem, quando se atinge de novo o equilíbrio, pelo contrário, quanto menor for a humidade relativa do ar *(H)*, menor é a fluência. Este último efeito é assinalado por diversos autores, desde os anos 60, referidos por Bazant em [4.54] e pode ser explicado com o aumento dos coeficientes de viscosidade devido à redução do teor de humidade. No entanto, Sousa Coutinho [4.1] defende a opinião contrária, baseando-se em resultados experimentais de outros investigadores. Esta discrepância estará, certamente, relacionada com os parâmetros que se fizeram variar. De facto, nos resultados analisados por Sousa Coutinho, os provetes foram sujeitos aos ambientes com diferentes graus de humidade a partir dos 28 dias, idade em que foram carregados. Parece-nos possível que a hidratação não tivesse ainda terminado e que a resistência do betão tenha baixado tanto com o condicionamento mais seco, que esse factor se tenha sobreposto a H.

Segundo Bazant [4.49], a fluência aumenta com os movimentos da água e portanto sofre um agravamento durante o período de secagem, razão pela qual ele introduz a parcela de *fluência de secagem*, designada por C_d (ver expressão 4.33). Por outro lado, a redução do teor de água tende a diminuir a fluência, efeito dado pela parcela negativa C_p (ver expressão 4.33). Estes efeitos seriam mais lentos que a retracção (cerca de 10x no 1º caso e 100x no 2º), portanto poder-se-ia considerar que a fluência não afecta a retracção, embora afecte, consideravelmente, as tensões induzidas por retracção.

Assim, Bazant considera que as variações de humidade aumentam a fluência durante a secagem, sendo esse aumento tanto mais pronunciado quanto menor for H, mas que, após atingido o equilíbrio, a fluência aumenta com H .

- **Temperatura e variação de temperatura**

Sousa Coutinho considera que, devido ao 1º mecanismo (ver 4.3.1), a fluência aumenta com o aumento de temperatura.

Segundo Bazant, na *fluência básica* a temperatura tem dois efeitos antagónicos: o aumento

de temperatura aumenta a taxa de hidratação, dando origem a uma redução da fluência; por outro lado o aumento de temperatura causa, directamente, um aumento da velocidade de fluência, e, portanto, um aumento da fluência num dado instante. O efeito da temperatura na *fluência de secagem* é de natureza bastante diferente, actuando essencialmente através da perda de humidade originada pelo aquecimento. Nestas condições, o aumento da temperatura traduz-se em aceleração da perda de água e portanto aceleração da fluência numa 1ª fase e, depois de atingido o equilíbrio, numa redução, devido ao teor de água inferior. Em conclusão, o aquecimento acelera a fluência, mas também acelera a hidratação, que por sua vez tende a reduzir a fluência [4.58].

Variações de temperatura súbitas darão origem a significativos aumentos temporários da fluência, que Bazant designa por *fluência térmica transitória* e que procura explicar pela aceleração da microdifusão da água devido ao aumento de temperatura [4.58].

- **Tempo de secagem anterior ao carregamento**

A fluência diminui quando aumenta o tempo de secagem (e o grau de hidratação) anterior à aplicação da carga. Esta influência verifica-se numa fase inicial e continua a fazer-se sentir a longo prazo [4.1]. No caso dos rebocos aplicados e secos ao ar, este intervalo pode considerar-se nulo, o que pode ampliar muito a fluência, mas, por outro lado, há uma diminuição com o tempo da carga aplicada.

- **Natureza do ligante e composição da argamassa ou do betão**

Segundo Sousa Coutinho [4.1], a fluência é afectada pelos mesmos factores que influem na resistência, mas de modo contrário. Ou seja, o C_3S, responsável pela maior parte da resistência inicial do betão, limita a fluência, principalmente numa primeira fase, enquanto a substituição de parte do cimento por pozolanas diminui a tensão de rotura e aumenta a fluência.

A influência dos adjuvantes parece, também, actuar do mesmo modo: quando contribuem para aumentar a resistência da argamassa ou do betão diminuem também a sua fluência.

A natureza do inerte exerce um efeito importante sobre a fluência, não só através do seu módulo de elasticidade, mas também da natureza da sua superfície, que condiciona a

ligação com a matriz. De facto o escorregamento inerte-ligante contribui certamente para a fluência. Além disso, é ainda possível que a absorção de água do inerte influa também nos resultados, alterando os movimentos de água no interior do material.

Como se vê pelas equações estabelecidas, Bazant [4.49] considera que a *fluência básica* (sem trocas de humidade), depende, principalmente de um parâmetro que designa por *módulo assimptótico* E_0, e que depende, naturalmente, da composição da argamassa ou do betão e também do tempo de carregamento: por exemplo, para t=0,001 dias (1,44 minutos) seria igual a $E_{estático}$, enquanto para $t=10^{-7}$ dias (0,0086 s) seria igual ao $E_{dinâmico}$ e seria tanto mais baixo quanto maior fosse o tempo de carregamento.

Assim, sendo os rebocos realizados com argamassas fracas, este facto deverá contribuir para fluências (e relaxações) elevadas.

- **Dimensões, forma e difusividade**

Os efeitos destes factores estão interrelacionados: Quanto mais maciça for a peça (menor relação s/v) e menor a difusividade da argamassa ou betão, e portanto mais difíceis forem os movimentos da água e a secagem, menos importante é a fluência de secagem, e maior é a predominância da fluência básica.

Experiências realizadas por Sousa Coutinho mostraram que, quando a carga é aplicada no início da secagem, a fluência é tanto maior quanto menor for a secção; pelo contrário, quando a carga é aplicada depois de ter decorrido a maior parte da secagem, a fluência é tanto maior quanto maior for a secção. A explicação para este facto está, certamente, no maior teor de água existente no segundo caso no interior do elemento de maior espessura e, possivelmente, também no seu estado de hidratação mais atrasado.

Estes factores devem também contribuir para a existência de fluências elevadas nas argamassas de reboco.

- **Carbonatação**

Experiências realizadas por Sousa Coutinho [4.1] mostram que a carbonatação faz diminuir a fluência, ou, mais propriamente, uma peça carbonatada no momento do carregamento sofrerá menor fluência que uma não carbonatada. Por outro lado, experiências dos mesmos

autores com provetes protegidos da carbonatação e expostos ou não ao ar com bióxido de carbono a partir do momento do carregamento parecem sugerir que, durante o processo de carbonatação, a fluência aumenta consideravelmente.

- **Grandeza da tensão aplicada**

A *fluência básica* (sem secagem) é quase linearmente dependente da tensão aplicada até cerca de 0,3 da resistência. A partir dessa ordem de grandeza a dependência é não-linear. Bazant atribui esse efeito, que é dado por $F(\sigma)$ nas equações (4.32) e (4.33), não a processos de difusão molecular, mas antes, quase inteiramente, a microfendilhação e considera mesmo que a microfendilhação (ou fendilhação), nomeadamente devida à retracção, é uma causa da *fluência de secagem* não menos importante que a variação de humidade [4.50].

Sousa Coutinho também refere esse aspecto, acentuando que a partir de um terço a metade da tensão de rotura começa a multiplicação de defeitos ou microfendas, que se propagam à medida que a tensão aumenta.

A secagem introduz um factor adicional de dependência da tensão, não-linear, mesmo a baixas tensões, descoberto por L'Hermite, em 1960 e referido por Bazant [4.49]. Este efeito pode também ser introduzido nas equações de Bazant por uma função $G(\sigma)$ que multiplica C_d (equação 4.33).

- **Variações cíclicas de parte da carga**

Segundo Bazant, variações cíclicas de uma parte da carga têm como efeito uma aceleração da fluência [4.49].

A maioria dos estudos de fluência efectuados recorreram a ensaios de compressão e referem-se, portanto, à fluência em compressão. A fluência em tracção é mais difícil de modelizar experimentalmente, mas é também muito importante, por intervir nos processos de fendilhação de argamassas e betões devido à retracção, ao calor de hidratação de grandes massas e a outras situações de variações de temperatura. No caso da retracção restringida de argamassas de reboco também é este o tipo de fluência que intervém.

Ensaios realizados por Sousa Coutinho [4.27] parecem indicar que a fluência em tracção é superior à fluência em compressão (cerca de 1,5 vezes), mas que varia de igual forma com os diversos parâmetros.

Os factores que afectam a relaxação deverão ser os mesmos que afectam a fluência, já que os dois fenómenos têm as mesmas causas e estão intimamente relacionados.

4.4 - FENDILHAÇÃO POR RETRACÇÃO RESTRINGIDA

4.4.1 - Teorias sobre fendilhação por retracção restringida

Segundo Détriché, citado por Ouzit [4.18], as deformações por retracção durante a presa e endurecimento da argamassa são de ordem 10 vezes superior às variações dimensionais de origem térmica, o que dá uma ideia da importância do fenómeno da retracção restringida como gerador de tensões. Na realidade, a retracção restringida é uma causa importante de fendilhação dos rebocos, com as consequências inevitáveis de redução da capacidade de impermeabilização, de redução da durabilidade, e de degradação estética.

De acordo com a teoria da rotura de Griffith, os sólidos contêm um grande número de pequenos defeitos, que, sob a influência de uma solicitação exterior, provocam concentrações de tensões. Nos materiais frágeis essas tensões não se dissipam facilmente, e dão origem a micro-fendas que podem propagar-se até à rotura, quando o estado de equilíbrio energético conduz a essa situação. Esses defeitos não são geralmente macroscópicos, mas encontram-se a uma escala atómica, ou compreendida entre a atómica e a macroscópica, como a microfendilhação, nas argamassas de reboco. Por esta razão, as tensões de rotura dos materiais frágeis são inferiores, em pelo menos uma ordem de grandeza, às previsíveis através das forças de ligação dos átomos, principalmente nos materiais heterogéneos. Também por essa razão, provetes maiores apresentam, em geral, tensões de rotura inferiores, uma vez que é maior a probabilidade de se encontrarem defeitos [4.61, 4.62]. Assim, no caso das argamassas, as tensões de rotura por tracção previsíveis seriam da ordem de: $R_t \approx 10^{-1}E$, enquanto as que se verificam na prática são da ordem de $R_t \approx 10^{-4}E$ [4.19].

Sousa Coutinho [4.1] considera que, numa argamassa sujeita a retracção restringida, se verifica uma redistribuição das tensões nas ligações internas, da qual resulta o aumento da intensidade das forças a que estão sujeitas as ligações mais fortes (com maior energia). A concentração de tensões num número cada vez menor de ligações, em consequência da cedência das ligações mais fracas, conduz à rotura progressiva. Assim, é possível a rotura a tensão constante, se esta for prolongada durante bastante tempo.

Por outro lado, as argamassas mais **dúcteis** (ou, talvez com mais propriedade, menos **frágeis**) podem dissipar parte destas tensões por deformação após o limite elástico, aumentando, assim, a resistência à fendilhação.

Segundo Joisel [4.2], é o seguinte o mecanismo de propagação de uma fenda por retracção restringida, numa peça de volume semi-infinito limitado por uma superfície plana em contacto com a atmosfera:

Uma fenda forma-se quando o esforço de tracção provocado pela retracção origina uma tensão com o valor da tensão de rotura R_t.

Antes do aparecimento da primeira fenda, a tensão de tracção distribui-se de forma aproximadamente igual em todas as direcções, portanto a primeira fenda forma-se com direcção aleatória e anula a tensão perpendicular a ela (ver fig. 4.11). Como se mantém a tensão que lhe é paralela, há condições para se formar uma segunda fenda perpendicular à primeira. Deste modo, as fendas tendem a surgir perpendiculares umas às outras, segundo uma quadrícula.

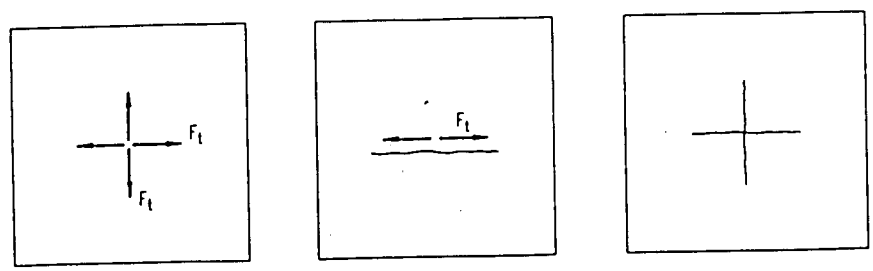


Fig. 4.11 - O surgimento de uma fenda anula a tensão que lhe é normal, mas mantém-se a tensão que lhe é paralela até que surja uma nova fenda, com direcção aproximadamente perpendicular à primeira

Quando se forma uma fenda, a tensão de tracção F_t anula-se nesse ponto e vai aumentando de zero até voltar a atingir o valor R_t a uma distância *dl* da primeira que pode ser

determinada por equilíbrio entre as tensões de tracção e as tensões de corte (ver fig. 4.12) ao longo da superfície definida pelo fim da fenda:

$$\sigma_t.h1=(\tau/2).d1, \text{ de onde } d1=2(\sigma_t/\tau).h1 \approx 2.h1 \qquad (4.37)$$

Ora, não se pode produzir uma fenda se a tensão de tracção σ_t for inferior a R_t. Por outro lado, se duas fendas distam entre si de menos de 2d1, não se pode produzir nenhuma fenda entre elas. Por essa razão, a distância máxima entre duas fendas paralelas é da ordem de d1 a 2d1 (ou seja, pode variar entre o dobro e o quádruplo da sua profundidade).

Assim, forma-se uma rede de fendas segundo uma malha de dimensão 2h1 a 4h1.

Ao fim de algum tempo, uma das fendas atinge uma profundidade h2 superior a h1. Nessa altura, inicia-se uma rede de fendas sobreposta à primeira, mas de malha maior, da ordem de 2h2 a 4h2 (ver fig. 4.12). Por este processo podem sobrepor-se várias malhas de fendas, com dimensões de malha e profundidades sucessivamente maiores. Frequentemente notam-se, distintamente, duas destas redes: a maior e uma outra mais fina e mais densa.

Se a camada de argamassa estiver aderente a outra camada ou a um suporte de massa semi-infinita - caso dos revestimentos de paredes - o traçado da rede de fendas depende também da aderência τ (tensão de corte na superfície limite). Por equilíbrio de forças tem-se que:

$$d = 2(R_t/\tau).h \qquad (4.38)$$

Pela razão já indicada no caso anterior, a distância entre duas fendas, e portanto também a dimensão da malha, deve estar compreendida entre d e 2d.

Por considerações de equilíbrio, Joisel conclui que a largura li da fenda formada em qualquer ponto da sua profundidade hi é dada por (ver fig. 4.13):

$$li=\{[(1+\nu)R_t]/M_t\}.hi \qquad (4.39\ a)$$

em que M_t é o módulo de rotura à tracção e ν o coeficiente de Poisson.

À superfície, seria, assim,

$$l=\{[(1+\nu)R_t]/M_t\}.h \qquad (4.40\ b)$$

Para uma argamassa de reboco tradicional esta fórmula conduziria a larguras de fenda da ordem de alguns micrómetros, apenas dependente da relação R_t/M_t da argamassa e da espessura da camada.

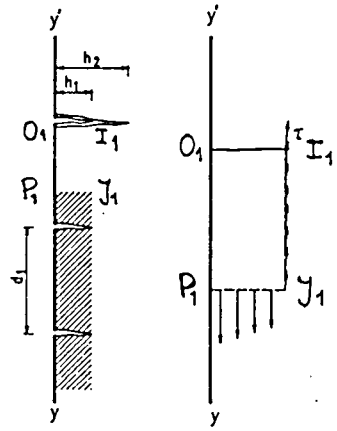


Fig. 4.12 - Esquema do processo de abertura de fendas numa camada de reboco, segundo Joisel

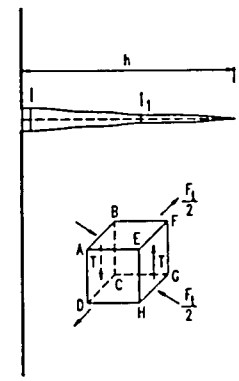


Fig. 4.13 - Largura de uma fenda de retracção, segundo Joisel

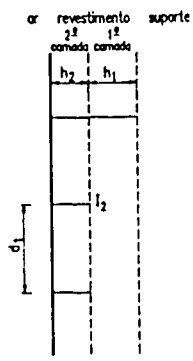


Fig. 4.14 - Esquema do processo de abertura de fendas em rebocos com mais que uma camada, segundo Joisel

De acordo com a expressão (4.38), a rede de fendas de retracção que atravessam um revestimento depende da sua resistência à tracção, da sua aderência ao suporte ou à camada que a antecede e da sua espessura h. Finalmente, o traçado da rede depende também da retracção livre (que Joisel designa por *retracção potencial* ε_p, por ser a que existiria se não houvesse restrição) que condiciona a força de tracção F_t e, portanto, o módulo de rotura e a largura l das fendas.

Se se conhece a espessura h de um revestimento, a dimensão mínima d da sua malha é característica da sua aderência ao suporte. Segundo Joisel, essa dimensão é da ordem de $2h$ a $4h$ para uma aderência perfeita - $\tau/R_t=1$ -, de 6h a 12h para uma aderência média - $\tau/R_t=1/3$ - e de 12h a 24h para uma aderência medíocre - $\tau/R_t=1/6$.

A largura das fendas que atravessam o reboco é tanto mais importante e, portanto, a rede tanto mais acentuada quanto:

- maior for a retracção $\varepsilon_{r\infty}$
- maior for a resistência à tracção do revestimento R_t (e, em consequência, menor for R_t/M_t, admitindo a hipótese de Joisel de que M_t cresce mais depressa que R_t)
- menor for a aderência τ
- maior for a espessura h

Normalmente, como $\tau<R_{tp}$, há descolamento junto aos bordos das fendas, reduzindo as zonas que suportam as tensões máximas e dando origem à formação de outras fendas, mais finas. Assim surge, normalmente, uma rede de fendas correspondente à espessura do reboco (ou da camada), que é predominante, e uma outra rede interior e mais fina, correspondente a fendas de menor profundidade.

Num revestimento em várias camadas, as primeiras fendas surgem na camada exterior e param na superfície de contacto com a camada subjacente. Depois, aparece uma fenda na camada interior, que, ao encontrar a camada exterior aumenta progressivamente de largura sem aumentar de profundidade. Durante este tempo pode produzir-se uma segunda fenda. Ao fim de um certo tempo, algumas fendas formadas na camada mais interior prolongam-se pela camada exterior e, como adquirem maior profundidade, atingem também maior largura. São estas, portanto, as mais visíveis (ver fig. 4.14).

Esta teoria, de nível macro, permite explicar a forma geral da fendilhação de rebocos devido à retracção restringida, mas omite alguns aspectos importantes: o cálculo da força de tracção provocada pela retracção restringida exige que se tenha em conta a relaxação e, portanto, afasta-se muito do que é assumido nesta teoria; quer a força de tracção induzida quer a resistência à tracção da argamassa variam com o tempo e não se conhece à partida qual o momento mais desfavorável, logo aquele em que se dá a rotura.

Os trabalhos de Tamin [4.3] mostram o papel importante da relaxação de tensões na tendência à fendilhação de rebocos monocamada. Os ensaios unidimensionais de retracção restringida que realizou indicam tensões desenvolvidas muito inferiores às que se obteriam se a relação entre tensões e deformações fosse dada pelo módulo de elasticidade do material. Apoiada em observações ao microscópio electrónico de varrimento, Tamin atribui a forte relaxação nas argamassas fracas dos rebocos monocamada, não apenas aos mecanismos descritos por outros autores - escorregamentos de partículas nos espaços interlamelares (ver 4.3.1) -, mas também à microfendilhação que se formaria na pasta, sobretudo em idades muito jovens da argamassa. Aliás, Bazant também refere este efeito (ver 4.3.2). Estas microfendas permitiriam dissipar parte das tensões e seriam depois parcialmente colmatadas no prosseguimento da hidratação, por recristalização, que criaria novas ligações entre partículas. Mais tarde, quando o material se torna mais indeformável, se o estado de tensão se mantiver elevado, a microfendilhação pode tornar-se mais perigosa, pois cria condições para a concentração de tensões nessas zonas, que tende a provocar a propagação das fendas e a sua ramificação. Se esta rede de microfendas consegue evoluir até se tornar contínua, atinge um estado limite de instabilidade e qualquer pequeno aumento de tensão origina a rotura.

Os trabalhos de Tamin, tal como os de Sousa Coutinho, indicam que, em argamassas de baixa resistência mecânica e porosidade relativamente elevada, como é o caso dos materiais em estudo, as tensões realmente instaladas são da ordem de um décimo das tensões calculadas em regime elástico, o que mostra até que ponto pode ser sensível a influência dos parâmetros de relaxação no comportamento à fendilhação de rebocos.

Ouzit [4.18] e, mais tarde, Paulina Faria [4.19], baseiam-se na mesma ideia mas acrescentam-lhe um conceito novo: o de gradiente de tensão na espessura, devido, por um lado, às diferentes condições de dessecação existentes nas duas faces da camada de reboco e através da sua espessura, originando retracção diferencial e, por outro lado, à existência de um suporte numa das faces, que restringe a retracção de forma assimétrica.

4.4.2 - Factores que influenciam a susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida

Alguns autores estudaram a influência de vários factores na susceptibilidade à fendilhação de argamassas e betões, chegando às seguintes conclusões:

- **Humidade ambiente**

Sousa Coutinho [4.26, 4.27] considera que, quanto menor é a humidade relativa do ambiente, maior é a susceptibilidade à fendilhação; de facto, parecem **diminuir as tensões desenvolvidas** por retracção restringida (apesar de as retracções serem superiores); mas, por outro lado, **reduz-se a tensão de rotura**, devido a duas causas: insuficiente hidratação e formação de gradientes de retracção no interior da peça. Segundo este autor, os gradientes de retracção são, na maioria das vezes, os responsáveis pela fendilhação.

Bascoul, Détriché e Ramoda [4.63] concluiram, dos ensaios de flexão a três pontos com deslocamento controlado que realizaram, que a conservação ao ar implica **diminuição da resistência à abertura de fendas**, devido às tensões já instaladas durante a dessecação. No entanto, a diminuição da resistência pode ser compensada por um **aumento da ductilidade** e conduzir a energias equivalentes em obra. Ou seja, se a exposição ao ar predispõe a uma abertura de fenda mais precoce, pode não diminuir a resistência global à sua propagação. Por outro lado, a existência de vento pode provocar o bloqueio da hidratação e originar mesmo microfendilhação superficial, diminuindo sensivelmente os níveis de resistência.

- **Natureza do ligante**

Segundo Sousa Coutinho, quanto **maior for a resistência mecânica do cimento, maior é a sua susceptibilidade à fendilhação** [4.27]. Os ensaios deste investigador mostraram que os cimentos mais susceptíveis à fendilhação não são os de maior retracção, mas sim aqueles em que as **tensões desenvolvidas são maiores e mais rápidas**. De facto, se a evolução das tensões for muito rápida, não há tempo para a relaxação actuar e o risco de fendilhação é muito maior. Assim, o cimento aluminoso apresenta a mais baixa retracção e parece ser,

nitidamente, o mais susceptível à fendilhação. Por outro lado, o cimento natural apresenta a retracção mais elevada e as menores tensões máximas.

Também Joisel [4.2] considera que são os **cimentos mais fortes** que dão origem a argamassas com **menor resistência à fendilhação**. Com efeito, a maior resistência à tracção significa, segundo este investigador, uma maior relação R_t/M_r, se for válida a regra do aumento mais rápido do módulo de rotura potencial defendida por este autor. Pelas razões indicadas em 4.4.1, para igual retracção um ligante originará uma fendilhação tanto maior quanto maior for a sua resistência à tracção. Em certos casos, mesmo que a retracção seja maior, um ligante com menor resistência à tracção pode ter melhor resistência à fendilhação. Esta é uma das razões que justificam que determinadas cais hidráulicas e certos cimentos naturais que apresentam grande retracção originem menos fendilhação por retracção que alguns cimentos portland, de maior resistência à tracção. As argamassas adjuvadas com introdutor de ar podem dar origem a um fenómeno semelhante: maior retracção mas menor fissurabilidade. Assim, é importante escolher cimentos com baixas resistências mecânicas, mas que não aumentem excessivamente as retracções e conduzam a uma boa trabalhabilidade e, em consequência, a uma boa aderência da argamassa, sem aumento da dosagem. As cais mais ou menos hidráulicas, os cimentos naturais e os cimentos com mistura de escórias e pozolanas (e, pelas mesmas razões, provavelmente os cimentos de fíleres e os chamados cimentos de alvenaria) seriam os melhores ligantes para rebocos. Além da sua menor resistência mecânica em relação ao cimento portland, estes ligantes apresentam, de um modo geral, uma superfície específica Blaine mais elevada - cerca de 7 000 cm^2/g para a cal hidráulica e 10 000 para a cal *gorda*, contra 3 000 para um CPN -, facto que permite uma boa trabalhabilidade e boa aderência, mantendo as dosagens baixas, factores que jogam a favor da menor susceptibilidade à fendilhação.

Ainda de acordo com Joisel, os cimento de presa lenta seriam menos susceptíveis à fendilhação por retracção que os de presa mais rápida com idênticas retracção e resistência à tracção a longo prazo, já que o módulo de rotura que intervém no momento de aparecer uma fenda é tanto menor quanto mais lenta for a aplicação da tensão originada pela retracção. Assim, os cimentos de presa lenta *adaptar-se-iam* melhor à retracção, devido à sua maior relaxação.

Baron [4.6] concluiu que a susceptibilidade à fendilhação de um cimento aumentava com o

teor de aluminatos, o **teor de álcalis**, o **teor de magnésio** e a **finura** do cimento.

Bascoul, Détriché e Ramoda [4.63], usando os parâmetros *factor característico do nascimento de uma fenda a partir de um entalhe,* K'_c -, parâmetro relacionado com o valor máximo de esforços susceptíveis de serem suportados - e *energia de rotura* G_F - grandeza relacionada com a ductilidade do material -, concluíram que a resistência à propagação de fendas e os níveis de resistência atingidos estão intimamente relacionados com o tipo de ligante usado, e explicam-se pela natureza e textura dos diferentes hidratos formados. Os seus estudos indicaram que os valores de K'_c e G_F **são menos favoráveis** - K'_c máximos e G_F mínimos - para um **cimento aluminoso** e para um **cimento portland de presa rápida e resistência mínima aos 28 dias de 45 MPa,** em seguida para um cimento branco, depois para um cimento com fíleres calcários e para um cimento com escórias de alto forno e, finalmente, com valores muito mais favoráveis, para uma mistura de cal aérea com o cimento portland de presa rápida. Esta variação parece indicar, também, uma relação entre resistência mecânica e resistência à propagação de fendas: os ligantes com **maior resistência mecânica** dariam origem a argamassas com **maior susceptibilidade à fendilhação**.

- **Composição da argamassa**

Quanto **maior for a dosagem de cimento, maior a susceptibilidade à fendilhação** da argamassa [4.2]: a relaxação diminui e a retracção aumenta, dando origem a maiores tensões, que o aumento da resistência não chega para compensar. Por outro lado, a permeabilidade ao vapor de água diminui, provocando maiores gradientes de tensão, com a consequente diminuição da força de rotura.

Quanto **menor for a dosagem de água de amassadura,** maiores as tensões máximas e menor a relaxação. No entanto, como as resistências à rotura também aumentam muito, Sousa Coutinho considera que acabam por **fendilhar menos**. É claro que esta conclusão só é válida até um determinado limite de redução da água de amassadura, que permita uma boa hidratação e uma trabalhabilidade suficiente [4.26].

Quanto **menor for a máxima dimensão do inerte, maior é a susceptibilidade à**

fendilhação. A explicação pode estar no facto de que, quando a dimensão do inerte aumenta, a retracção evolui de forma mais lenta, portanto há mais possibilidade de dissipação de tensões. Pelo contrário, para dimensões do inerte menores, a tensão máxima mantém-se constante durante mais tempo, podendo dar origem a rotura [4.26].
Joisel [4.2] atribui grande importância a uma boa granulometria do inerte, com uma percentagem de finos razoável, para **melhorar a aderência**, factor que considera essencial para controlar a fendilhação. Segundo este autor, a **finura dos inertes** é condição importante para ter uma boa trabalhabilidade, essencial à aderência ao suporte.

Estudos de Détriché e Ramoda [4.64] indicam que, quando aumenta a concentração de cimento na matriz, ou seja, diminui a relação a/c, aumenta a resistência à propagação de fendas. No entanto, esta relação inverte-se quando a concentração de cimento ultrapassa um determinado limite (χ=ci/(ci+ag) >0,45), já que a água deixa de ser suficiente para a trabalhabilidade, os espaços intergranulares degradam-se, aumenta o ar introduzido e verifica-se uma diminuição de compacidade, que se traduz em redução da resistência mecânica e da resistência à propagação de fendas. Segundo estes autores, K'_c e G_F variam mais depressa que a resistência à flexão, portanto a susceptibilidade à fendilhação é mais sensível a estes factores que a resistência à flexão. Este efeito mais marcado dever-se-ia à blocagem dos inertes às fendas, perturbando bastante o seu caminho e aumentando a energia consumida.

- **Resistência à rotura**

De acordo com Sousa Coutinho e com outros investigadores mais recentes, a relaxação tem uma influência determinante na susceptibilidade à fendilhação de argamassas e, quanto **maior é a resistência à tracção, menor é a relaxação**, portanto **a tensão desenvolvida aumenta**. Se este incremento da tensão predominar sobre o aumento da resistência à tracção, a resistência mecânica será prejudicial à resistência à fendilhação por retracção.

- **Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água**

Quanto **menor for o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água maior a**

susceptibilidade à fendilhação, por aumentarem os **gradientes de retracção e de tensão** na espessura da secção. Outros factores actuam paralelamente - e, segundo alguns investigadores, no mesmo sentido - já que os menores coeficientes de permeabilidade ao vapor de água correspondem, em geral, às argamassas mais ricas, mais compactas e portanto também com maiores resistências.

- **Aderência ao suporte**

Joisel [4.2] dá grande importância a este aspecto. De facto, na sua teoria de abertura de fendas, o valor da aderência influencia decisivamente a largura das fendas e o respectivo afastamento. A aderência depende da natureza e preparação do suporte, mas também da trabalhabilidade da argamassa - da sua plasticidade e retenção de água - que, por sua vez, está relacionada com o teor e a finura do ligante e com a granulometria do inerte, nomeadamente com a proporção de finos.

Autores mais recentes [4.18, 4.19] consideram também que a aderência ao suporte tem um papel decisivo na distribuição de tensões na argamassa e, portanto, na possibilidade de abertura de fendas.

- **Espessura**

Sousa Coutinho [4.26, 4.27] conclui, com base no critério do valor relativo da contracção de rotura (ver 4.4.3), que as **maiores espessuras aumentam a susceptibilidade à fendilhação**, por aumentarem os gradientes de humidade e portanto de retracção e de tensão na espessura do provete.

Joisel [4.2] também considera que as **secções mais espessas** apresentam **maior susceptibilidade à fendilhação**, embora se baseie fundamentalmente na largura das fendas: de acordo com a sua teoria do mecanismo de abertura das fendas, a largura destas é proporcional à espessura da camada, portanto convém diminuir essa espessura. No entanto, esta teoria tem, como se disse, algumas limitações e não tem em conta a influência da absorção de água pelo suporte e os gradientes de humidade na espessura.

Também Ouzit [4.18] e Paulina Faria [4.19], nos seus trabalhos sobre rebocos monocamada, concluiram que as **camadas mais espessas** são **mais susceptíveis à**

fendilhação, devido aos maiores gradientes de tensão.

Esta tendência - maior espessura, maior susceptibilidade à fendilhação - é certamente invertida a partir de situações limite, em que uma dessecação demasiado rápida prejudica gravemente a hidratação e provoca gradientes de tensão muito elevados.

As conclusões mais recentes sobre as causas da fendilhação por retracção restringida de rebocos indicam que os materiais com **maior capacidade de relaxação** de tensões resistem melhor à fendilhação. Mostram também que os materiais **mais dúcteis** se comportam melhor sob este aspecto. De facto, a rotura é um fenómeno consumidor de energia, que é aumentada por fenómenos que se traduzem em aumentos da ductilidade (ou da pseudo-ductilidade) do material, como: a fendilhação múltipla, a plastificação localizada nos bordos da fenda, o atrito entre os grãos, etc.

4.4.3 - Avaliação da susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida

4.4.3.1 - Tipos de ensaios usados

Durante os últimos sessenta anos, reconhecendo a importância da fendilhação por retracção restringida nos elementos de argamassa e de betão, vários investigadores tentaram modelar experimentalmente esse mecanismo e desenvolveram ensaios de retracção restringida.

Segundo Sousa Coutinho [4.1], os primeiros estudos em que se tentou medir as tensões desenvolvidas nas argamassas e betões devido à retracção restringida, terão sido realizados em 1934, pelos investigadores suecos Werner e Giertz-Hedstrom, que realizaram ensaios com cilindros de pasta de cimento moldados em torno de uma vara metálica, à qual ficavam aderentes. Grzybowski [4.65] refere os ensaios de anel de Carlson e Reading, realizados entre 1939 e 1942.

Outros ensaios de susceptibilidade à fendilhação por retracção têm sido desenvolvidos por diversos investigadores, no âmbito de estudos sobre revestimentos de paredes, sobre betões e argamassas ou sobre compósitos de argamassas com fibras, embora, até ao momento, tanto quanto se sabe, nenhum deles tenha obtido consenso suficiente para ser encarada a sua transformação em norma de ensaio de rebocos nem a sua utilização em especificações.

Com base nos ensaios desenvolvidos, foram estabelecidos critérios, mais ou menos complexos, de susceptibilidade à fendilhação de argamassas e betões.

Podemos classificar os ensaios realizados por diversos autores, desde 1934 até aos nossos dias, nos seguintes tipos:

a) Ensaios qualitativos uniaxiais [4.8]

Vironnaud e Lefèvre [4.8] avaliaram a susceptibilidade à fendilhação de argamassas através do tempo de fendilhação de provetes paralelepipédicos, com uma das dimensões fortemente predominante (1,00 m x 0,10 m x espessura variável), sujeitos a retracção restringida, desde a moldagem, por aderência a um suporte rugoso de betão, em determinadas condições de temperatura, humidade e velocidade de circulação de ar (vento). Para produzir rotura, indispensável a este critério, estes investigadores tinham que recorrer a condições particularmente severas, nomeadamente no que diz respeito a *velocidade do ar*. Este critério é meramente qualitativo e a sua aplicação restringe-se à avaliação em condições suficientemente severas para provocarem a rotura, por vezes difíceis de conseguir. Finalmente, não é totalmente convincente que o *tempo de fendilhação* esteja directamente relacionado com a *probabilidade de fendilhação*.

No entanto, Paillère e Serrano, e Orr e Haigh, mais tarde, citados por Tamin [4.3] retomaram o critério do *tempo de fendilhação* em ensaios unidimensionais. Penev e Kawamura [4.66] referem-se também ao *tempo de fendilhação*, relacionando-o com a resistência pós-fendilhação.

Ong e Paramasivan [4.67] observaram *padrões de fendilhação* em provetes prismáticos de argamassa de 0,10 m x 0,10 m x 1,50 m.

b) Ensaios qualitativos de placa [4.8, 4.67 a 4.71]

De modo semelhante ao usado nos ensaios unidimensionais, Lefèvre e Vironnaud [4.8] avaliaram a susceptibilidade à fendilhação e a influência de vários factores comparando *tempos e padrões de fendilhação* de placas de argamassa com 0,50 m x 0,50 m x 0,02 m, sujeitas à retracção restringida por aderência a um suporte de betão.

Ong e Paramasivan [4.67] observaram *padrões de fendilhação*, não só em provetes prismáticos, como referido em a), mas também em placas de 1,50 m x 0,50 m x 0,075 m, curadas ao ar e sujeitas a retracção restringida por inclusão de armaduras de rede metálica e por ligação com conectores a suportes metálicos. Estes investigadores compararam afastamentos médios entre fendas e larguras máximas de fendas, fazendo variar a percentagem volumétrica de armadura, a sua posição na secção e o nº de ligadores (grau de restrição).

Para estudar a susceptibilidade à retracção plástica, Senbetta e Bury [4.68] compararam *padrões de fendilhação* e *áreas de fendilhação* aproximadas de placas de argamassa, com cerca de 1,00 m x 1,00 m x 0,02 m, com diferentes adjuvantes, em condições bem definidas de temperatura, humidade e velocidade do ar.

Kheder *et als.* [4.69, 4.70] mediram espaçamentos e larguras de fendas em paredes de argamassa restringidas por bases de betão armado, com secções de 0,50 m x 0,10 m e altura variável entre 2,50 m e 5,00 m, colocadas no exterior em exposição natural, com quantidades de armadura variáveis.

Siviero e Forin [4.71] analisaram a influência da inclusão de fibras sintéticas (acrílicas, de polipropileno e de nylon), na fendilhação por retracção plástica em elementos de betão ou argamassa, estudando placas de betão de 0,50 m x 0,50 m x 0,04 m e de argamassa de 0,32 m x 0,25 m x 0,04 m, com diferentes quantidades e tipos de fibra e em condições variáveis de temperatura, humidade e velocidade de ar. Os parâmetros comparados foram a distribuição da fendilhação (análise visual) e a *densidade de fendilhação*, ou seja a relação L_f/A_p (comprimento total de fendas/área da placa).

Soroushian *et als.* [4.72] usaram ensaios do mesmo tipo para avaliar o efeito de fibras de polipropileno, em percentagens e comprimentos variáveis, na redução da fendilhação por retracção plástica em betão. Em placas de cerca de 0,50 m x 0,80 m x 0,04 m, sujeitas a condições pré-definidas de temperatura, humidade e velocidade de ar, observaram e registaram o *tempo de formação da primeira fenda*, a *área de fendilhação* e a *máxima largura de fenda*, chegando a resultados relativos que permitiram concluir sobre as vantagens do uso de fibras de polipropileno para controlar a retracção plástica em elementos de betão.

Tamim *et als.* [4.73] realizaram ensaios semelhantes para comparar a susceptibilidade à fendilhação por retracção plástica em betões de diferentes resistências. Usaram placas de 0,90 m x 0,60 m x 0,30 m, moldadas em aglomerado de madeira bastante rígido, sujeitos a diferentes condições de temperatura, humidade e velocidade de ar. Foram observados e

comparados, também, os *tempos de início de fendilhação*, a *área de fendilhação* e o *número de fendas*. As conclusões apontaram para um aumento da susceptibilidade à fendilhação por retracção plástica nos betões de alta resistência, apesar de sofrerem menores taxas de evaporação, por terem menor teor de água de amassadura e serem mais impermeáveis.

Estes ensaios são, naturalmente, os que melhor simulam as condições reais e são qualitativamente interessantes. No entanto, apresentam grandes dificuldades quando se pretende obter resultados quantitativos. Na verdade, apenas têm sido usados para avaliar padrões de fendilhação e não para determinar tensões, tanto quanto se sabe.

c) Ensaios de anel [4.1, 4.7, 4.26, 4.27, 4.38 a 4.40, 4.65, 4.74 a 4.76]

Este tipo de ensaios, usados por diversos investigadores, revelaram-se muito práticos e úteis, principalmente no estudo da susceptibilidade à fendilhação de cimentos, por ser relativamente simples obter resultados quantitativos - os valores das deformações do anel metálico são facilmente transformáveis em tensões na argamassa - para além de proporcionarem também resultados qualitativos - padrões de fendilhação - bastante significativos e fáceis de interpretar.

Têm, contudo, desvantagens grandes no caso particular das argamassas de reboco: a primeira e porventura mais grave é a reduzida intensidade das tensões originadas para dimensões dos anéis facilmente realizáveis na prática. Com efeito, para os módulos de elasticidade de argamassas fracas, do tipo que se preconiza para rebocos, as tensões calculadas em regime elástico, para anéis com diâmetros até 2 m, não ultrapassam os 2,5 MPa, que, se tivermos em conta a relaxação, se reduzem a valores incapazes de provocar fendilhação (ver fig. 4.15). A segunda desvantagem é a dificuldade de relacionar os valores de tensões medidos por este método e os induzidos na realidade, em aplicações com formas geométricas totalmente distintas, e com valores do módulo de elasticidade e da resistência à tracção obtidos em provetes com formas muito diferentes. Este último factor reduz consideravelmente, a nosso ver, a utilidade dos parâmetros de relaxação determinados a partir de ensaios de anel.

BIBLIOTECA F.E. PORTO

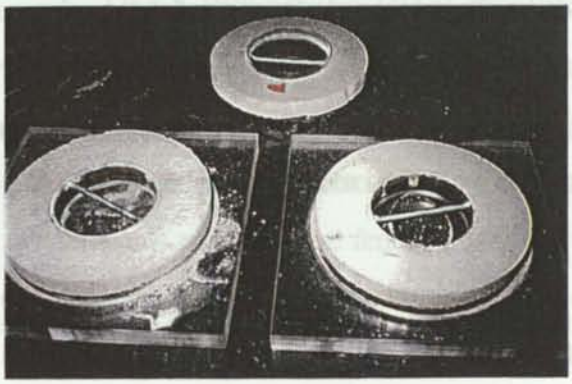


Fig. 4.15 - Ensaio de anel sobre argamassas de reboco realizado no LNEC (não se verificou fendilhação, portanto o ensaio foi inútil!)

Sousa Coutinho [4.1, 4.26 e 4.27] e L'Hermite [4.7] usaram anéis metálicos que serviram de molde a anéis de argamassa os quais, ao tenderem a diminuir de volume durante a secagem, têm essa deformação parcialmente impedida pelo anel metálico. As deformações do anel metálico, medidas por cordas vibrantes, eram transformadas em tensões, através de fórmulas da elasticidade.

Mais recentemente, diversos investigadores realizaram ensaios muito semelhantes aos de Sousa Coutinho e L'Hermite com o objectivo de avaliar o efeito no controlo da fendilhação por retracção restringida de fibras dispersas incorporadas em argamassas [4.38 a 4.40, 4.65, 4.74 e 4.76] e de adjuvantes redutores de retracção [4.75].

Swamy e Stavrides [4.38] e, já nesta década, Wang *et als.* [4.74], usaram anéis metálicos com cerca de 0,5 m de diâmetro exterior e calcularam as tensões na argamassa e registaram os tempos e padrões de fendilhação.

Grzybowski *et als.* [4.65] Sarigaphuti *et als.* [4.40] e Shah *et als.* [4.75] realizaram ensaios com anéis metálicos com diâmetros de cerca de 0,30 m e Sarvaranta [4.39] usou anéis ainda menores, com cerca de 0,20 m de diâmetro.

Bentur e Mindess [4.76] propõem também ensaios de anel para a avaliação da eficácia da incorporação de fibras curtas em argamassas para o controlo da fendilhação por retracção restringida.

d) Ensaios quantitativos uniaxiais [4.3, 4.7, 4.66, 4.67 e 4.77 a 4.79]

Os ensaios uniaxiais com medição das tensões induzidas por retracção restringida têm sido usados recentemente por alguns investigadores para avaliar a susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida de argamassas. Recorrem a dispositivos semelhantes aos usados para os ensaios de medição uniaxial da retracção, referidos em 4.2.3, mas com a possibilidade de bloquear a deformação e medir a força resultante - que é transmitida a uma

célula de força -, ou, em alternativa, de anular as deformações de retracção, impondo deslocamentos iguais e de sentido contrário, medindo também a força necessária para o conseguir. Estes ensaios permitem, assim, obter curvas de evolução ao longo do tempo da força gerada no provete pela restrição da retracção, desde a moldagem.

É um método quantitativo, que permite medir forças directamente, em condições que podem simular bastante bem as condições reais, com a importante limitação de se tratar de um ensaio unidimensional e não no plano. Os ensaios incidem sobre provetes com formas paralelepipédicas ou em haltere, que podem facilmente ser usadas em ensaios complementares - por exemplo de tracção, de retracção livre e de determinação do módulo de elasticidade -, o que reduz a imprecisão na determinação dos vários parâmetros em jogo. Por outro lado, são ensaios de manipulação delicada e que exigem equipamento com alguma complexidade. Uma outra desvantagem é, mais uma vez, a dificuldade em obter condições de rotura em argamassas pobres, com provetes de dimensões praticáveis. Contudo, a interpretação dos resultados, mesmo sem rotura, já apresenta algum interesse, uma vez que é possível comparar curvas de forças com curvas de resistências e, ainda, com curvas de forças teóricas, calculadas a partir do módulo de elasticidade e da retracção determinados em ensaios paralelos.

L'Hermite [4.7] fez já ensaios deste tipo nos anos 70, em que mediu a força gerada em provetes de betão com a retracção restringida recorrendo a um dinamómetro e, paralelamente, a retracção livre em prismas do mesmo material sujeitos a idênticas condições ambientes. Verificou que as forças obtidas eram sensivelmente inferiores às que resultariam do cálculo a partir da Lei de Hooke e que se observava queda de tensão significativa ao fim de algum tempo, facto que indicava o efeito da relaxação.

Tamin [4.3] realizou um importante conjunto de ensaios sobre rebocos monocamada com um dispositivo do mesmo tipo, em que a medição de forças era já realizada através de um transdutor de força. Os resultados obtidos permitiram-lhe, também, confirmar o significativo efeito da relaxação de tensões e avaliar a sua ordem de grandeza.

Dupin e Détriché [4.78] ensaiaram rebocos tradicionais e não-tradicionais, usando um dispositivo constituído por um molde, com uma das extremidades fixas e outra móvel, esta última ligada a um transdutor de força. Um transdutor de deslocamento permitia detectar as variações de comprimento, que eram imediatamente anuladas através de uma força de tracção exercida no provete (com comprimento de 0,40 m e secção de 0,08 m x 0,015 m) com um macaco hidráulico também acoplado ao conjunto. Os deslocamentos e as forças eram

registados em contínuo. O andamento dos dois tipos de curva e os momentos de fendilhação permitiram tirar conclusões sobre o comportamento relativo das várias argamassas de reboco estudadas.

Ackers e Partl [4.77] estudaram os efeitos da retracção e das variações dimensionais de origem térmica em elementos prefabricados de compósitos de cimento com fibras. Para isso usaram um aparelho que permitia bloquear os deslocamentos e medir as forças geradas, através de um transdutor de força, em provetes paralelepipédicos com comprimento de 0,40 m e secção de 0,035 m x 0,006 m. Em paralelo, com um aparelho semelhante mas com a extremidade livre, efectuaram medições de retracção livre. Estes ensaios, por serem realizados sobre provetes endurecidos, são mais simples que os anteriormente citados, em que se procura acompanhar os fenómenos que estão na origem da fendilhação por retracção restringida, desde a moldagem da argamassa. Os resultados obtidos nestes ensaios permitiram comparar os níveis de tensões atingidos em provetes novos e envelhecidos e o andamento das respectivas curvas, assim como as tensões de rotura.

Penev e Kawamura [4.66] usaram um método semelhante para estudar a rotura, por retracção restringida, de misturas de solo-cimento. O ensaio realizado por estes investigadores consistiu em simular as condições de restrição da retracção impondo, lentamente, degraus de força de tracção e medindo os deslocamentos obtidos e a abertura da fenda provocada num provete de forma paralelepipédica na zona central, com 0,40 m de comprimento e secção central de 0,10 m x 0,07 m. Trata-se de um ensaio de fluência sob forças de tracção crescentes. As deformações por retracção livre eram medidas noutros provetes. Os resultados obtidos permitiram tirar várias conclusões sobre a propagação das fendas e o modo e energia de rotura dos materiais ensaiados.

Taves [4.79] procurou simular a retracção restringida, desde a moldagem, em argamassas de reboco através de ensaios de tipo bastante diferente dos descritos acima: realizou ensaios de fluência em compressão sobre provetes cilíndricos de 0,05 m de diâmetro e cerca de 0,25 m de altura, usando um equipamento de fluência provido de uma alavanca com os provetes sujeitos a uma força de compressão fixa numa das extremidades, regulada através de pesos suspensos na outra. Uma das dificuldades do método foi a selecção das forças de compressão a usar, já que com compressões elevadas as argamassas mais fracas eram *esmagadas*, enquanto com compressões reduzidas as argamassas mais fortes sofriam deslocamentos tão pequenos que dificilmente podiam ser medidos com a exactidão exigida.

Assim, foi necessário escolher compressões diferentes para os diferentes materiais testados, fixando não a força absoluta mas a força em relação à força de rotura por compressão (1/8 e 1/4 da força de rotura). Este facto dificultou consideravelmente a interpretação dos resultados. No entanto, as conclusões extraídas foram, ainda assim, interessantes, indiciando um aumento da fluência nas argamassas com maior proporção de cal em relação à totalidade do ligante e com o nível de carga aplicada (em relação à carga de rotura do material em causa).

4.4.3.2 - Critérios desenvolvidos

Joisel [4.2] define a seguinte condição de fendilhação por retracção impedida: **a rotura tem lugar no instante *t* em que as curvas $\varepsilon_{rr}(t)$ e $(R_t/M_t)(t)$ se intersectam, ou seja, quando** $\varepsilon_{rr}=R_t/M_t$ (ver fig. 4.16).

Nesta expressão ε_{rrr}, R_t e M_t são, respectivamente, a retracção restringida, a resistência à tracção e o módulo de rotura à tracção nas condições de tempo de aplicação da carga reais. A retracção restringida $\varepsilon_{rr}(t)$ é menor que a retracção livre ε_r, já que os cristais continuaram a formar-se nos poros não contraídos, mas, provavelmente, tem um valor muito próximo. Actua como uma deformação imposta que gera tensões. $R_t(t)$ é a resistência à tracção no tempo t; quanto maior for t, mais R_t se aproxima do valor da resistência à tracção sob carga lenta que, por sua vez, é menor que a resistência à tracção sob carga rápida (a que se mede correntemente em laboratório). $M_t(t)$ é o módulo de rotura potencial à tracção no instante t; é menor que o módulo de elasticidade e aproximadamente igual ao módulo de rotura no instante t - ou seja, o módulo de elasticidade secante no instante t, sob carga aplicada durante o tempo t - e, quando t é relativamente grande, aproxima-se do módulo de rotura sob carga lenta.

Joisel justifica já através da existência de relaxação a diminuição da resistência à tracção e do módulo de rotura quando diminui a velocidade de aplicação da carga e considera que o módulo de rotura diminui mais depressa que a resistência à tracção, o que implica que, quanto mais lenta for a carga, maior é, em princípio, a relação R_t/M_t, apesar de R_t também diminuir. Por esta razão, conclui que **a probabilidade de surgimento de fendas devido à retracção restringida é maior quando a resistência à tracção é maior** - o que constitui, aparentemente, um paradoxo, mas concorda com as ideias actuais sobre fendilhação de

rebocos. Esta probabilidade aumenta também quando aumenta a retracção máxima e, ainda, quando aumenta a velocidade da retracção.

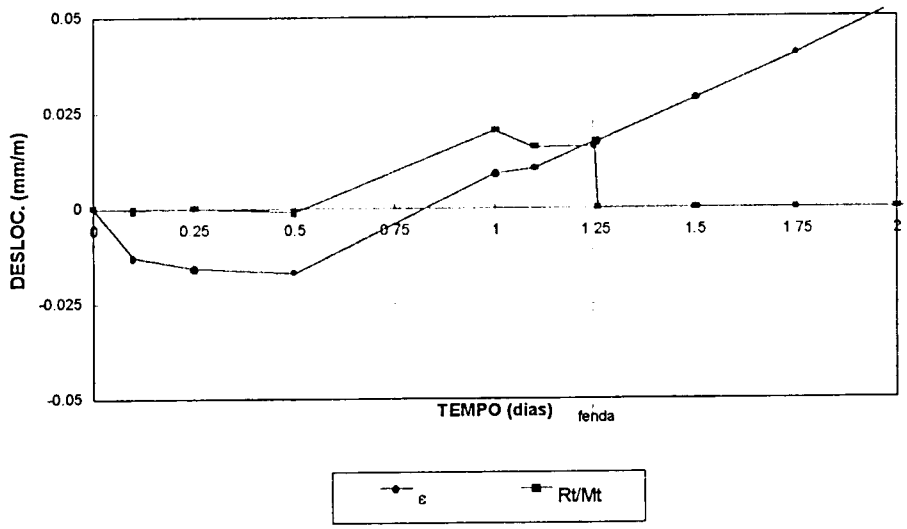


Fig. 4.16 - Critério de Joisel: a fenda surge quando se intersectam as curvas ε e F_r/M_t (exemplo extraído de ensaios realizados no âmbito deste trabalho)

Sousa Coutinho [4.26] propõe o seguinte critério para avaliação da susceptibilidade à fendilhação de um cimento:

Um cimento é tanto mais susceptível à fendilhação quanto menor for o seu *valor relativo da contracção de rotura* e_{rc}. Esta grandeza, expressa em %, é definida por:

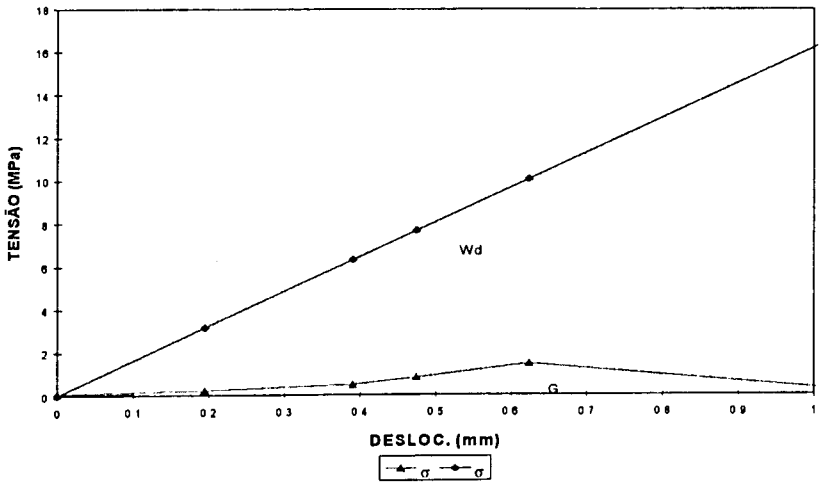
$$e_{rc}=\varepsilon_r/\varepsilon_{r\infty} \tag{4.41}$$

Ou seja, ε_{rc} é o valor da percentagem da retracção livre ε_r em relação à retracção final $\varepsilon_{r\infty}$ a que corresponde a rotura do provete, em condições bem definidas. Ou ainda, o valor relativo da retracção livre medido num provete, quando se dá a rotura de um provete idêntico sujeito a retracção restringida. O valor relativo da retracção livre é calculado em função da retracção *final*, determinada num momento a definir convencionalmente, por exemplo, aos 90 dias.

Este critério tem uma desvantagem muito importante para argamassas de reboco: pressupõe um ensaio de retracção restringida com rotura, o que nem sempre acontece. De facto, tendo sido

estabelecido para classificar cimentos, é praticável com pastas de cimento, muito mais susceptíveis à fendilhação que as argamassas, nomeadamente as argamassas pobres usadas em rebocos. Com esse tipo de argamassas não é, em geral, possível obter rotura nos ensaios propostos por Sousa Coutinho. Com efeito, este investigador nem sempre obteve rotura nos seus *ensaios de anel* com argamassas 1:1, enquanto com argamassas 1:3 nunca o conseguiu [4.26].

Além deste critério, que considera o mais fiável, Sousa Coutinho analisa ainda outros critérios. Um deles é baseado na teoria da rotura por energia de deformação. Sousa Coutinho considera a *energia de rotura crítica* do material, ou *energia potencial* do material na rotura G, a energia W_d dissipada durante a produção das condições que levaram à rotura, a velocidade de dissipação dessa energia dW_d/dt e a temperatura θ. O *ensaio do anel* desenvolvido por este investigador permite determinar as grandezas de que depende a energia de rotura. Com efeito, a partir do conhecimento da retracção livre de um provete calcula-se facilmente a energia que seria armazenada num instante dado se toda a deformação fosse transformada em tensão elástica: $W=\sigma\varepsilon/2=E\varepsilon^2/2$ (ver fig. 4.17).



G: área definida pela curva σ' Wd: área definida pelas curvas σ e σ'

Fig. 4.17 - Critério da energia dissipada de Sousa Coutinho: o comportamento à fendilhação é tanto melhor quanto maior for W_d

Na realidade, a tensão instalada não é σ (tensão calculada) mas σ' (tensão medida), que dá origem à energia potencial G (ver a mesma figura). Assim, a energia dissipada deve ser $W_d=W-G$. A partir do diagrama de W_d é possível determinar a sua derivada.

O facto de os resultados dos ensaios de Sousa Coutinho mostrarem que W_d é muito maior que G, e que a relação σ'/ε é muito inferior ao módulo de elasticidade da argamassa no instante em causa, mostra a grande influência da dissipação de tensões por relaxação e a importância do seu conhecimento.

Segundo Sousa Coutinho, esses resultados mostram também que, quando a velocidade de aplicação da energia, ou seja de desenvolvimento da retracção, é superior à velocidade de dissipação de parte dessa energia pela argamassa, as tensões desenvolvidas vão crescendo até atingirem um limite, que é a tensão de rotura, em que se produz uma fenda. Se, pelo contrário, a velocidade de desenvolvimento da retracção for inferior à velocidade de dissipação de energia, então as tensões vão diminuindo, conservando-se, provavelmente, sempre abaixo da tensão de rotura.

Assim, as grandezas W_d, dW_d/dt e G, seriam também passíveis de ser utilizadas na avaliação da susceptibilidade à fendilhação de argamassas: **A maiores W_d e dW_d/dt e menores G deveriam corresponder melhores comportamentos à fendilhação.**

Este investigador analisou também critérios baseados na tensão desenvolvida: admitiu que, **quanto menor for σ'/ε_r , menor é a susceptibilidade à fendilhação.** Esta relação pode ser interpretada como um *módulo de elasticidade equivalente*, que determina as tensões que se desenvolvem no seio da argamassa.

Um outro critério, baseado na relação σ'/R_t , que é, de certo modo, o inverso de um *coeficiente de segurança*, implica que **quanto menor for a tensão desenvolvida por retracção restringida, em relação à tensão de rotura determinada num ensaio rápido de tracção por flexão sobre um provete do mesmo material e conservado nas mesmas condições, menor é a susceptibilidade à fendilhação da argamassa.**

Sousa Coutinho não conseguiu verificar na prática, de forma conclusiva, os três últimos critérios referidos, não os considerando, assim, muito fiáveis.

Por último, este investigador estabeleceu ainda um critério baseado na **relação entre a extensão elástica restringida ε_r', correspondente a σ', e a extensão de fluência ε_f, que relaciona com a tensão de rotura.** Admitiu que este critério seria válido para avaliar a susceptibilidade à fendilhação de argamassas e betões. No entanto, tem a desvantagem de implicar a realização de ensaios de fluência extremamente longos (Sousa Coutinho escolheu,

convencionalmente, 40 dias!), além dos ensaios de retracção restringida e de retracção livre, para cada argamassa ou betão a ensaiar.

Baron [4.6] relacionou a susceptibilidade à fendilhação com a velocidade da 2ª retracção, defendendo que, **quanto maior fosse o declive da curva de retracção na fase de endurecimento, maior seria a probabilidade de fendilhação**. Esta relação dever-se-ia aos gradientes de tensão gerados no elemento.

Skellariou, referido por Tamin [4.3], relacionou o **tempo de fendilhação** em ensaios unidimensionais com o **calor de hidratação** e usou este valor como critério de avaliação da susceptibilidade à fendilhação. O calor de hidratação varia com a **velocidade da 2ª retracção** e está relacionado com a cinética de hidratação e portanto com o desenvolvimento das características mecânicas.

Ranc, Guyot e Coll, em 1982, citados por Tamin [4.3], definiram um coeficiente $\varnothing$ que mostra a posição da curva de resistência à tracção em relação à curva de tensão de tracção desenvolvida:

$$\varnothing=(R_t-\sigma)/\sigma \qquad (4.42)$$

em que R_t e σ são, respectivamente, a resistência à tracção e a tensão de tracção no instante t e σ pode ser dado por:

$$\sigma=\int_0^t d\varepsilon_r/dt.M\ dt \qquad (4.43\ a)$$

em que $d\varepsilon_r/dt$ é a derivada parcial da retracção em relação ao tempo e M é o módulo de rotura no instante t.

Quando $\varnothing>0$, o material seria pouco susceptível à fendilhação. Pelo contrário, quando $\varnothing<0$, o material teria tendência para fendilhar.

Estes critérios, com excepção dos de Sousa Coutinho, não têm em conta, pelo menos

explicitamente, a dissipação de tensões por relaxação e o papel do desenvolvimento de micro-fendilhação interna. Nenhum dos critérios referidos propõe qualquer distinção entre os riscos de microfendilhação interna e de fendilhação. Finalmente, nenhum dos critérios entra em conta com a distribuição de tensões favorecida pela aderência ao suporte.

Os trabalhos de Tamin [4.3], mostram o papel importante da relaxação de tensões na tendência à fendilhação de rebocos monocamada. Os ensaios unidimensionais de retracção restringida que realizou indicam tensões desenvolvidas muito inferiores às que se obteriam se a relação entre tensões e deformações fosse dada pelo módulo de elasticidade do material. Com efeito, as tensões em cada momento em regime elástico seriam dadas pela seguinte expressão:

$$\sigma(t)=\int E(t)\, d\varepsilon \qquad (4.44\ b)$$

Entretanto, as tensões em regime viscoelástico regem-se pela expressão:

$$\sigma'(t)=\int \psi(t,t_0)\, d\varepsilon(t_0) \qquad (4.45)$$

em que $\psi(t,t_0)$ representa a função de relaxação. Apoiada em observações ao microscópio electrónico de varrimento, Tamin atribui a forte relaxação das argamassas que constituem os rebocos monocamada, em grande parte, à microfendilhação que se iniciaria nos pontos mais fracos, sobretudo em idades muito jovens da argamassa. Estas microfendas permitiriam dissipar parte das tensões e seriam depois parcialmente colmatadas no prosseguimento da hidratação, por recristalização, que criaria novas ligações entre partículas. Admitiu ainda que mais tarde, quando o material se torna mais indeformável, se o estado de tensão se mantiver elevado, a microfendilhação pode tornar-se mais perigosa, pois permite a concentração de tensões nessas zonas, que, - principalmente nos materiais menos dúcteis, portanto com menos capacidade de dissipar essas tensões -, tende a provocar a propagação das fendas e a sua ramificação. Se esta rede de microfendas evoluir até se tornar contínua, atinge um estado de instabilidade e qualquer pequeno aumento de tensão origina a rotura.

As observações de Tamin parecem confirmar algumas teorias de investigadores anteriores: as zonas de ligação da matriz aos inertes - *auréola de transição* -, no caso dos

inertes correntes, não-porosos, são, frequentemente, zonas mais fracas, com maior concentração de água, logo constituem uma zona provável de início de fenda (por descolagem matriz/inerte); nos rebocos leves ou semi-pesados, as bolhas de ar constituem zonas preferenciais de início de redes de fendas.

Tamin concluiu que os rebocos com maior capacidade de repartição de tensões por microfendilhação resistem melhor às solicitações de tracção. No entanto, os rebocos fracos com presa lenta, como é frequentemente o caso dos monocamada leves, são bastante susceptíveis à fendilhação durante os primeiros dias, devido à sua baixa resistência mecânica nessa fase. Por outro lado, os revestimentos tradicionais fortes desenvolvem resistências iniciais elevadas, o que impede a microfendilhação, reduzindo a relaxação de tensões e aumentando a possibilidade de fendilhação, já numa fase mais avançada dos processos de retracção e endurecimento. Os rebocos semi-pesados seriam, assim, os mais resistentes à fendilhação por retracção restringida.

Ouzit [4.18] estudou a evolução no tempo da retracção restringida de rebocos monocamada, acompanhando as deformações na face livre e na interface com o suporte durante o endurecimento e a evolução simultânea das características mecânicas. Estabeleceu um critério de susceptibilidade à fendilhação baseado na **comparação das curvas de evolução da retracção restringida com a deformação potencial na rotura. Admitiu que o risco de fendilhação existe quando as duas curvas se interceptam.**

Neste método, a retracção restringida é calculada a partir da deformação medida na superfície livre e da flecha medida no momento da desmoldagem. No entanto, a deformação potencial na rotura é determinada em ensaios de tracção por flexão em várias idades, o que fragiliza o critério. Com efeito, não se sabe até que ponto são significativos os valores de deformações obtidos em ensaios rápidos e, além disso, um ensaio de flexão só será representativo da solicitação a que está sujeita a secção nos casos em que o tipo de reboco, a espessura da camada e a absorção do suporte conduzam a deformações muito diferentes nas duas faces, gerando tensões de sinais contrários.

4.4.4 - Influência do suporte

O suporte tem uma influência simultaneamente mecânica e física sobre o reboco aplicado sobre ele.

A aderência ao suporte é, como se referiu, a causa mais importante de restrição da retracção do reboco, portanto tem um papel significativo no estado de tensão que se cria no seio da argamassa.

Por outro lado, a absorção do suporte influi decisivamente no processo de dessecação e portanto na cinética da retracção e da hidratação da argamassa nas primeiras horas após a aplicação, condicionando assim a evolução das suas características mecânicas: um suporte poroso (com porosidade aberta) e seco tende a dessecar rapidamente a argamassa, que adquire cedo resistências e módulos de elasticidade elevados, mas estabiliza rapidamente; a aplicação sobre um suporte impregnado de água pode ter um efeito inverso, funcionando como um depósito que vai fornecendo água à argamassa, à medida que ela vai evaporando ou sendo consumida nas reacções de hidratação.

Ouzit [4.18] procurou estudar a influência mecânica do suporte, ou seja o modo como a aderência afecta os parâmetros da susceptibilidade à fendilhação dos rebocos, nomeadamente a microfendilhação que se desenvolve nos primeiros dias. Este autor usou o conceito de deformação diferencial entre a face livre do provete e a face aderente ao suporte para definir o diagrama de tensões na espessura da camada. O equilíbrio de uma camada de reboco não seria dado pelas expressões de Joisel, já que a resultante não estaria na superfície de contacto, mas algures no interior da secção, originando um momento flector (ver fig. 4.18 a e b).

Ouzit fez ensaios de rebocos monocamada e tradicionais aplicados em suportes não-absorventes (moldes metálicos), portanto as deformações diferenciais determinadas não são extrapoláveis para os suportes absorventes correntes, em que se podem supor outras distribuições de tensões (ver fig. 4.18). De facto, as deformações diferenciais e a consequente distribuição de tensões na secção não são características do reboco mas sim do conjunto suporte/reboco, o que torna a análise muito mais complexa e variável. Destes ensaios concluiu-se que as fendas podem iniciar-se quer na face livre, propagando-se depois em direcção ao suporte, quer na interface com o suporte, caso em que a rotura se daria por perda de aderência.

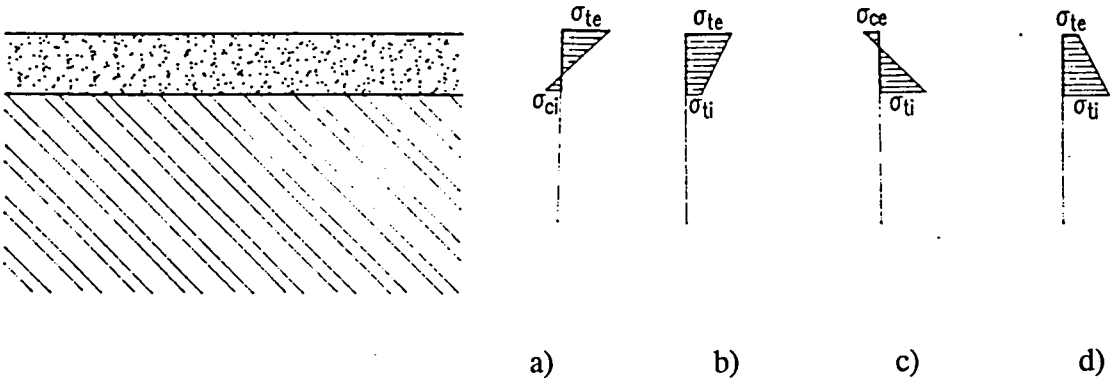


Fig. 4.18 - Esquema de distribuições possíveis de tensões na espessura da camada, conforme o suporte e as condições de evaporação
a) suporte pouco absorvente e reboco espesso: evaporação com contracção na face livre e empolamento com compressão na interface; b) suporte pouco absorvente: predomínio da evaporação sobre a sucção; c) suporte muito absorvente e protecção da evaporação: sucção com contracção na interface e empolamento na face livre; d) suporte muito absorvente: predomínio da evaporação sobre a sucção.

Détriché, Gallias, Grandet e Maso [4.17, 4.80, 4.81] estudaram a evolução das características mecânicas e a evolução da retracção restringida de argamassas em contacto com um suporte absorvente. No momento da aplicação, os capilares mais finos do suporte *sugam* a água dos capilares mais grossos da argamassa, sendo a pressão ΔP que provoca o movimento regulada pela Lei de Laplace:

$$\Delta P = 2\gamma \cos \alpha(1/r_{cs}-1/r_{ca}) \qquad (4.46)$$

em que γ é a tensão superficial do líquido intersticial da argamassa, α o ângulo entre o menisco formado pelo líquido e a parede do poro e r_{cs} e r_{ca} são os raios dos capilares, respectivamente do suporte e da argamassa de reboco ($r_{cs} < r_{ca}$).

O raio médio dos capilares da argamassa é, neste processo, uma função decrescente do tempo, uma vez que a passagem de água para o suporte e para a atmosfera e a progressão da hidratação, são causas de redução desse raio.

Este movimento prossegue enquanto existem no suporte capilares não-saturados de raio inferior aos da argamassa e provoca um aperto mecânico das partículas sólidas desta por acção da depressão capilar (retracção quase imediata) seguida da aceleração da cristalização dos hidratos, devida ao aumento da concentração dos iões dissolvidos. Com a absorção de água, há uma rápida diminuição do raio médio dos capilares da argamassa, enquanto os do suporte

tendem a aumentar e a velocidade de absorção anula-se ao fim de 2 ou 3 horas. Pode, mesmo, inverter-se o sentido do movimento da água, se as condições atmosféricas forem propícias.

Aqueles autores concluiram que durante a primeira hora se verifica uma rigidificação apenas devida à dessecação, sem influência da presa, visto verificar-se em misturas só de areia e água de modo idêntico ao das misturas com cimento. Em seguida, nas misturas com cimento, inicia-se a influência das reacções de hidratação que são aceleradas quando existe contacto com um suporte absorvente, devido, segundo os autores, ao aumento da velocidade de cristalização dos iões dissolvidos provocado pela rápida redução da relação a/c. Assim verifica-se, numa 1ª fase, um aumento de rigidez por aperto mecânico e, numa 2ª fase, uma aceleração da presa por aumento da concentração dos iões dissolvidos. Segundo estes investigadores, a retracção de uma argamassa em contacto com um suporte poroso praticamente estabiliza após os primeiros 3 dias, enquanto que, em contacto com um suporte não-poroso, sofre um aumento inicial durante a 1ª semana, seguido de uma queda, talvez devido ao efeito de tensões internas, eventualmente microfendas provocadas pelo desenvolvimento intenso e tardio da retracção. Além disso, as argamassas em contacto com um suporte poroso atingem valores significativos do módulo de deformação longitudinal muito cedo (com cerca de 1 dia), que varia depois pouco, enquanto em contacto com um suporte não-poroso os valores a 1 dia são mais baixos mas crescem depois mais rapidamente, resultando os valores finais bastante próximos. Parece lógico supor que as tensões desenvolvidas nas argamassas acompanhem a evolução destes factores e cresçam mais rapidamente quando a argamassa está em contacto com um suporte poroso que no caso de contacto com um suporte não-poroso. Ensaios realizados no âmbito deste trabalho corroboram parcialmente estas conclusões (ver capítulo 8, gráfs. 8.12, 8.14, 8.16, 8.91 e 8.92).

A relação entre a espessura do suporte e a espessura do reboco influencia muito a aceleração da presa - que é tanto maior quanto maior for esta relação - e a homogeneidade da rigidificação, verificando-se grandes variações na secção quando o suporte tem espessura nitidamente inferior ao reboco.

Os estudos referidos indicam também que o humedecimento habitual do reboco durante a aplicação não é suficiente para repor a água consumida pela sucção do suporte e que o humedecimento do suporte que se realiza na prática antes da aplicação do reboco representa apenas cerca de um décimo da capacidade de absorção de um suporte corrente (por exemplo alvenaria de tijolo ou de blocos de betão de inertes correntes), pelo que está longe de anular a

influência da sucção.

Os ligantes com maior superfície específica apresentam maior retenção de água e são, portanto, menos sensíveis a este efeito de sucção. A rigidificação mais lenta dá origem a um material mais deformável. Assim, todos os factores que contribuem para um aumento da superfície específica, como o tipo de ligante, o aumento do teor de ligante e a granulometria mais fina da areia, tendem a aumentar a retenção de água e, portanto, a tornar a dessecação mais lenta, mas a retracção mais elevada.

O diâmetro dos capilares e a cinética da sua evolução constituem os parâmetros essenciais da dessecação. Todos os factores que vão modelar a textura porosa inicial influenciam directamente o comportamento da argamassa durante toda a sua vida. O tipo de porosidade do suporte também influencia a evolução da rigidificação: os poros maiores produzem uma rigidificação inicial maior, enquanto os poros de menores dimensões exercem uma sucção mais contínua e prolongada e uma rigidificação maior na 2ª fase. Esta influência é tanto mais pronunciada quanto mais delgada é a camada de reboco. Com efeito, a quantidade de água absorvida pelo suporte é aproximadamente a mesma qualquer que seja a espessura da argamassa - já que depende da diferença de secção dos capilares do revestimento e do suporte - portanto, quanto mais delgada for a camada, maior é a parcela da água total que é absorvida. No entanto, nas camadas mais espessas acentua-se o efeito da retracção diferencial entre a face livre e a face em contacto com o suporte, geradora de gradientes de tensões que podem, nalguns casos, ser críticas.

Os trabalhos de Paulina Faria [4.19], que usou um método semelhante ao de Ouzit mas adaptando-o à introdução de suportes absorventes, mostram que estas diferenças de retracção entre faces são sobretudo críticas nos rebocos monocamada leves, aplicados sobre suportes porosos, já que as variações dimensionais são muito acentuadas - as cargas leves, muito compressíveis, não constituem restrições tão fortes como os inertes correntes - e a resistência mecânica é fraca. Seriam menos importantes nos rebocos pesados e aplicados em camada delgada.

4.5 - CONCLUSÕES

A revisão de conhecimentos sobre estas matérias permitiu-nos concluir que a

susceptibilidade à fendilhação de argamassas de reboco depende de um grande número de factores, alguns relacionados com as condições de aplicação - condições climáticas, modo de aplicação, cura, espessura -, outros com o suporte - absorção, rugosidade, espessura -, outros com a composição da própria argamassa - tipo e dosagem de ligante, tipo de inerte, relação a/c, trabalhabilidade, adjuvantes e aditivos. Estes factores têm pesos diferentes nas várias idades da argamassa.

Embora a influência qualitativa de cada um dos factores já esteja estabelecida de modo relativamente consensual, a sua quantificação está ainda longe de ser um facto. Muitos critérios foram definidos, geralmente com base experimental, mas, para o caso dos rebocos, todos eles se têm revelado inadequados ou insuficientes para possibilitar uma avaliação prática e objectiva desta característica, cuja importância para a qualidade dos rebocos é reconhecida.

Os critérios mais completos baseiam-se em ensaios que permitem determinar as tensões geradas em camadas delgadas de argamassa pela retracção restringida e compará-las com as resistências à tracção no mesmo instante, determinadas em condições tão realistas quanto possível. A capacidade de relaxação de tensões da argamassa é, sem dúvida, um aspecto determinante, por condicionar as tensões máximas efectivas e o respectivo tempo de actuação. A ductilidade não parece, no entanto, ser menos significativa e, no momento da tensão máxima, pode determinar a abertura, ou não, da fenda ou a sua propagação ou estabilização.

Os ensaios realizados com rebocos indicam, de um modo geral, que a 1ª semana de vida da argamassa, com especial destaque para a fase de endurecimento, é fundamental para o comportamento a longo prazo do revestimento. Com efeito, segundo autores como Tamin e Ouzit, se a microfendilhação desenvolvida nesta fase for controlada, contribuindo para relaxar as tensões sem se ramificar excessivamente e sem fragilizar a secção, permitindo uma subsequente colmatação no decurso da cristalização, o comportamento posterior será, provavelmente, bom. Pelo contrário, se se verificar uma microfendilhação tardia, gerada por retracções numa argamassa já muito rígida, e eventualmente agravada por deformações diferenciais muito grandes entre as duas faces em determinados momentos, a camada ficará muito fraca e as fendas abrir-se-ão mais tarde sob a acção de pequenos acréscimos de carga.

A distribuição das tensões na secção do reboco pode ser, nalguns casos, muito importante. No entanto, esta distribuição depende das características do suporte e das espessuras relativas do suporte e da camada de reboco em contacto com ele. Assim, embora

este aspecto deva ser considerado em diagnóstico, não pode facilmente ser tido em conta, com rigor, na avaliação e classificação de argamassas de reboco, já que tal corresponderia a analisar todas as situações possíveis dentro do campo de aplicação do reboco. Uma análise da influência dos tipos de suportes previstos para o reboco em causa, será, talvez, uma abordagem mais realista.

Parece útil tentar melhorar os critérios a usar, tendo como base uma compreensão segura e alargada dos fenómenos envolvidos, por um lado e, por outro, um bom conhecimento das condições específicas em que são aplicados e das funções que se exigem aos rebocos no nosso País.

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 4

[4.1] - SOUSA COUTINHO, A. S.; GONÇALVES, A. - **Fabrico e propriedades do betão.** Vol. III. Lisboa, LNEC, 1994.

[4.2] - JOISEL, A. - **Fisuras e grietas en morteros y hormigones. Sus causas y remedios.** Barcelona, Editores técnicos asociados, S. A., 1965.

[4.3] - TAMIN, P. F. - **Étude du comportement mécanique des revêtements de façade. Enduits.** Thèse de doctorat. Paris, Ècole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), décembre 1986.

[4.4] - MALATRAIT, M. C. - **Les échanges liant, eau, air, dans le cas des enduits d'imperméabilisation et décoration de façades. Thèse.** CSTB. Paris, 1989.

[4.5] - FREYSSINET, E. - **Relations entre les déformations et la constituation des ciments et des matériaux de structure colloidale.** Texto manuscrito de 1926-1929, publicado em "Travaux", Tomo II, 1966, pág. 884. (Em 4.1 e 4.4).

[4.6] - BARON, J. - **Fissuration du béton par hydratation localement différée du ciment.** Paris, Ministère de l'Équipement et du Logement, Laboratoire des Ponts et Chaussées, Mai 1971.

[4.7] - L'HERMITE, R. - **Expériences et théories sur la technologie du béton. Deuxiéme partie. Déformation du béton sans charge (retrait et gonflement).** Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics (TBTP), nº 375, Septembre 1979.

[4.8] - VIRONNAUD, L. - **Le premier âge du béton (variations linéaires au cours du premier jour).** Annales de l'ITBTP, nº 154, octobre 1960.

[4.9] - SAITO, M.; KAWAMURA, M.; ARAKAWA, S. - **Role of aggregate in the shrinkage of ordinary Portland and expansive cement concrete.** Cement and Concrete Composites, nº 13, 1991, págs. 115-121.

[4.10] - DÉTRICHÉ, C. H. - **Analyse expérimentale du retrait de couches minces de mortier. Mesure depuis le moulage.** Matériaux et Constructions, vol.11, nº 64.

[4.11] - BENAISSA, A.; MORLIER, P.; VIGUIER, C.; CHAUVIN, J. - **Cinétique de déssication et retrait du béton de sable.** Annales de l'ITBTP, 504, juin 1992, págs. 42-52.

[4.12] - OSSA, M. M.; DAVID, D. J. - **Efecto de las adiciones pozolánicas en la retracción de pastas y morteros de cemento en sus primeras edades.** Materiales de Construcción, vol. 42, nº 125, enero/febrero/marzo 1992, págs.37-63.

[4.13] - BOULAY, C.; PATIES, C. - **Mesure des deformations du béton au jeune âge.** RILEM, Materials and Structures, nº 26, 1993, págs. 307-311.

[4.14] - MAMILLAN, M. - **Déssication et retrait des bétons et mortiers sous vide et à différentes hygrometries.** Annales de l'ITBTP, nº 246, juin 1968, pág. 851.

[4.15] - EBENSPERGER, M., L.; BREITENBUCHER; SPRINGENSHMID, R. - **Cambios volumétricos a edad temprana en el hormigón debido a la retracción química del cemento.** Materiales de Construcción, vol. 41, nº 224, octubre/noviembre/diciembre 1991.

[4.16] - WITTMANN, F.H. - **Creep and shrinkage mechanisms.** In [4.47], págs. 129-161.

[4.17] - DÉTRICHÉ, C.; GRANDET, J.; MASO, J. - **Dessication des mortiers d'enduit.** Matériaux et Constructions, vol.16, nº94, 1983, págs. 251-258.

[4.18] - OUZIT, M. - **Contribution à l'étude du comportement mécanique des enduits de façade à base de liants hydrauliques.** Thèse de doctorat. Paris, 1990.

[4.19] - FARIA, P. - **Revestimentos de impermeabilização de paredes à base de ligantes minerais. Modelização experimental de revestimentos aplicados sobre um suporte.** Tese de Mestrado. Lisboa, IST e LNEC, 1993.

[4.20] - PAIVA, J. V. - **Humidade nas edificações.** Lisboa, LNEC, 1969. Tese para obtenção do grau de especialista e acesso à categoria de Investigador Auxiliar do LNEC.

[4.21] - POWERS, T.C. - **The thermodynamics of volume change and creep.** Materials and Structures, 1968, vol. 1, págs. 487-507.

[4.22] - FELDMAN, R.F.; SEREDA, P.J. - **A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties.** Materials and Structures, 1968, vol. 1, págs. 509-20.

[4.23] - DAIMON, M.; ENEIN, S.;HOSAKA, G.; GOTO, S.; KONDO, R. - **Pore structure of calcium silicate hydrate in hydrated tricalcium silicate.** Journal of the American Ceramics Society, 1974, vol. 60, págs. 110-4.

[4.24] - GARBOCZI, E. J.; BENTZ, D. P. - **Modelling of the microstruture and transport properties of concrete.** Elsevier, Great Britain, 1996. Construction and building materials, vol. 10, nº 5, págs. 293-300.

[4.25] - DELCELIER, P.; LEJEUNE, C. - **Contribuition à la connaissance de la stabilité dimensionnelle et pondérale des mortiers.** Paris, CSTB, Cahiers du CSTB. Octobre 1971. Cahier 1063.

[4.26] - SOUSA COUTINHO, A. - **A fissurabilidade dos cimentos, argamassas e betões, por efeito da sua contracção.** LNEC, 1954, Memória nº 57.

[4.27] - SOUSA COUTINHO, A. - **The influence of the type of cement on its cracking tendency.** LNEC, 1964, Memória nº 216.

[4.28] - VEIGA, M.Rosário; LUCAS, J.Carvalho - **Apreciação preliminar duma argamassa adjuvada com PAVICRIL 415 para revestimento de paredes.** Relatório. Lisboa, LNEC, Agosto, de 1989.

[4.29] - VEIGA, M. Rosário - **Caracterização experimental de argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos.** Relatório. Lisboa, LNEC, Dezembro de 1993.

[4.30] - VEIGA, M. Rosário; CARVALHO, Fernanda R. - **Caracterização experimental de argamassas com cal hidráulica para revestimento de paredes.** Relatório. Lisboa, LNEC, Março de 1994.

[4.31] - VEIGA, Maria do Rosário; CARVALHO, Fernanda - **Argamassas de revestimento na reabilitação do património urbano.** "In" 2º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Comunicações. Lisboa, LNEC, Junho/ Julho de 1994. Vol. I, págs. 195-206.

[4.32] - SAUCIER, F.; BORDELEAU, D.; PIGEON, M. - **Retrait et adérence du béton modifié au latex.** RILEM, Materials and Structures, nº. 23, 1990, págs. 267-276.

[4.33] - MIRZA, J.; DURAND, B. - **Effect of curing on some properties of cementitious mortars with and without polymer modifications.** "In" Durability of Building Materials and Components. Quebec, Canada, E & FN Spon, 1993.

[4.34] - OHAMA, Y. ET ALS - **Properties of polymer-modified mortars using styrene-butyl acrylate latexes with various monomer ratios.** ACI Materials Journal, January-February 1991, págs. 56-61.

[4.35] - SALOMON, M.; MAJCHERCZYK - **Les mortiers à base de polymères sous forme d'émulsion.** Annales de l'ITBTP, nº 492, série Matériaux 80, mars-avril 1991, págs. 26-35.

[4.36] - ATZENI, C.; MASSIDA, A.; SANNA, U. - **Dimensional variations, capillary absorption and freeze-thaw resistance of repair mortars admixed with polymers.** Cement and Concrete Research, vo. 23, 1993, págs. 301-308.

[4.37] - CHERN, J.C.; YOUNG, C. - **Study of factors influencing drying of steel fiber reinforced concrete.** ACI, Materials Journal, March-April 1990, págs 123-129.

[4.38] - SWAMY, R., N.; STAVRIDES, H.; - **Influence of fiber reinforcement on restrained shrinkage and cracking.** American Concrete Institute, ACI journal, March 1979, págs. 443-460.

[4.39] - SARVARANTA, L. - **Characterization methods for polypropylene fibre-reinforced cement mortar composites.** Espoo, Technical Research Centre of Finland (VTT), 1993. VTT publications, 136.

[4.40] - SARIGHAPHUTI, M.; SHAH, S. P.; VINSON, K.D. - **Shrinkage Cracking and Durability Characteristics of Cellulose Fiber Reinforced Concrete.** ACI Materials Journal, July-August 1993.

[4.41] - CABRILLAC, R. - **Étude comparative des bétons de fibres métalliques, de verre et de bambou.** Annales de l'ITBTP, nº 504, série béton 290, juin 1992, págs. 18-24.

[4.42] - BROOKS, J. J.; NEVILLE, A. - **Creep and shrinkage of concrete as affected by admixtures and cement replacement materials. "In" Creep and shrinkage of concrete: effect of materials and environment**, págs. 19-36. ACI, Detroit, Marwan A. Daye, C.C. Fu Editors, 1992.

[4.43] - DÉTRICHÉ, C.; GALLIAS, J.; GRANDET, J.; MASO, J. - **Mouvements d'eau, hydratation et comportement mécanique des mortiers d'enduit.** Matériaux et Constructions, vol.17, nº100, 1984?, págs. 297-302.

[4.44] - MULLER, H. S. - **New prediction models for creep and shrinkage of concrete. "In" Creep and shrinkage of concrete: effect of materials and environment**, págs. 19-36. ACI, Detroit, Marwan A. Daye, C.C. Fu Editors, 1992.

[4.45] - HOBBS, D. W. - **The dependence of the bulk modulus, Young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration.** Matériaux et Constructions, vol. 4, nº 20, 1971, págs.107-114.

[4.46] - DÉTRICHÉ, C. H.; MASO, J. C. - **Modèle de calcul du retrait des mortiers en couches minces.** Matériaux et Constructions, vol. 13, nº.77, 1980.

[4.47] - BAZANT, Z.P.; WITTMANN, F.H. - **Creep and shrinkage in concrete structures.** John and Wiley and sons, Chichester-NewYork-Brisbane-Toronto-Singapore, 1982.

[4.48] - BAZANT, Z. P. - **Mathematical models for creep and shrinkage of concrete.** "In" [4.20A], págs. 163-256.

[4.49] - BAZANT, Z., P. - **Practical formulation of shrinkage and creep of concrete.** Matériaux et Constructions, vol.9, nº 54, págs.395-406.

[4.50] - BAZANT, Z.P.; PANULA, L. - **Practical prediction of time-dependent deformations of concrete. Part 1 - Shrinkage.** RILEM, Materials and Structures, 11, nº 65, 1978, págs. 307-316.

[4.51] - BAZANT, Z.P.; KIM, J.K.; PANULA, L. - **Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 1-Shrinkage.** Materials and Structures, 24, 1991, págs. 327-345.

[4.52] - HAN, Y.; LYTTON, R.L. - **Theoretical Prediction of drying shrinkage of concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, November 1995, págs. 204-205.

[4.53] - KLUG, P.; WITTMANN, F. - **The correlation between creep deformation and stress relaxation in concrete.** Matériaux et Constructions, vol.3, n°14, 1970, págs. 75-80.

[4.54] - BAZANT, Z., P. - **Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism.** Matériaux et Constructions, vol.18, n°103, págs.1-20.

[4.55] - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - **Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1 - General rules and rules for buildings.** Brussels, 1992. ENV 1992-1-1. Pré-norma europeia.

[4.56] - BAZANT, Z. P.; KIM, JOON-KOO - **Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 2 - Basic creep.** RILEM, Materials and Structures, n°. 24, 1991, págs. 409-421.

[4.57] - BAZANT, Z., P.; KIM, JOONG-KOO -**Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 3-Creep and drying.** RILEM, Materials and Structures, 25,1992, págs.21-28.

[4.58] - BAZANT, Z., P.; KIM, JOONG-KOO -**Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 4-Temperature effects.** RILEM, Materials and Structures, 25,1992, págs.84-94.

[4.59] - BAZANT, Z., P.; KIM, JOONG-KOO -**Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 6-Simplified code-type formulation.** RILEM, Materials and Structures, 25,1992, págs.219-223.

[4.60] - BAZANT, Z. P.; XI, Y.; BAWEJA, S.- **Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 7 - Short form of BP-KX model, statistics and extrapolation of short-time data.** RILEM, Materials and Structures, n°. 26, 1993, págs. 567-574.

[4.61] - BRANDT, A. M. - **Cement-based composites. Materials, Mechanical properties and performance.** London, E & FN SPON, 1995.

[4.62] - ASHBEE, K. - **Fundamental principles of fiber-reinforced composites.** Lancaster, Pennsylvania, USA, Technomic Publishing Company, Inc., 1989.

[4.63] - BASCOUL, A.; DETRICHE, CH., H.; RAMODA, S. - **Influence de la nature de la phase liante et des conditions de cure sur la résistance à la propagation de fissures des mortiers.** RILEM, Materials and Structures, 24, 1991, págs. 129-136.

[4.64] - DETRICHE, C., H.; RAMODA, S. - **Influence de la composition volumique des mortiers sur leur résistance à la propagation des fissures.** RILEM, Materials and Structures, 22, 1989, págs. 206-211.

[4.65] - GRZYBOWSKI, M.; SHAH, P. - **Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete.** ACI Materials Journal, March-April 1990, págs. 138-148.

[4.66] - PENEV, D.; KAWAMURA, M. - **A laboratory device for restrained shrinkage fracture of soil-cement mixtures.** RILEM. Materials and Structures, 25, 1992, págs.115-120.

[4.67] - ONG, K., C., G.; PARAMASIVAM, P. - **Cracking of ferrocement due to restrained shrinkage.** England, Elsevier Science Publishers. Cement and Concrete Composites, 12, 1990, págs. 9-17.

[4.68] - SENBETTA, E.; BURY, A., M. - **Control of plastic shrinkage cracking in cold weather.** Concrete International, March 1991, págs 49-53.

[4.69] - KHEDER, G., F; AL-RAWI, R., S.; AL-DHAHI, J., K. - **A study of the behaviour of volume change cracking in base restrained walls.** Materials and srtructures, 27, 1994, págs. 383-392.

[4.70] - KHEDER, G., F; AL-RAWI, R., S.; AL-DHAHI, J., K. - **Study of the behaviour of volume change cracking in base restraint concrete walls.** ACI Materials Journal, March-April 1994, págs. 150-157.

[4.71] - SIVIERO, E.; FORIN, M. - **Use of acrylic fibers to reduce plastic shrinkage in concrete structures.** RILEM, Barcelona, Setembro 1993.

[4.72] - SOROUSHIAN, P.; MIRZA, F.; ALHOZAIMY, A. - **Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber reinforced concrete.** ACI Materials Journal, September-October 1995, págs. 553-560.

[4.73] - TAMIM *et als.* - **Plastic shrinkage cracking of normal and high strength concrete: a comparative study.** ACI Materials Journal, January-February 1996, págs. 36-40.

[4.74] - WANG, Y.; LI, V., C.; BACKER, S. - **Tensile properties of synthetic fiber reinforced mortar.** England, Elsevier Science Publishers. Cement and Concrete Composites, 12, 1990, págs. 29-40.

[4.75] - SHAH, S. P.; KARAGULER, M. E.; SARIGAPHUTI, M. - **Effects of shrinkage-reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete.** ACI Materials Journal, May-June 1992, págs. 289-295.

[4.76] - BENTUR, A.; MINDESS, S. - **Fibre reinforced cementitious composites.** Elsevier Applied Science, London and New York, 1990.

[4.77] - ACKERS, S.,A.,S.; PARTL, M. - **Hygral and thermal expansion/shrinkage properties of asbestos-free fibre cement.** England, Elsevier Science Publishers. Cement and Concrete Composites, 12, 1990, págs. 19-27.

[4.78] - DUPIN, I.; DÉTRICHÉ, C. H. - **Analyse expérimentale des effets du retrait empêché sur des couches minces de mortier.** Revue Technique du bâtiment et des constructions industrielles, n° 124, janvier-février 1988, págas. 37-43.

[4.79] - TAVES, L. - **An analysis of creep and shrinkage in mortars.** Journal of Testing and Evaluation, vol. 22, n° 6, November 1994, págs. 548-555.

[4.80] - DETRICHE, C. H.; GALLIAS, J. L.; MASO, J. C. - **Influence des paramètres de mise en oeuvre et de composition sur le comportement des mortiers d'enduit.** Matériaux et Constructions, vol.18, n° 105, 1985, págs. 193-200.

[4.81] - DÉTRICHÉ, C. H.; GRANDET, J. - **Influence de la suction des suports poreux sur la prise et la résistance au cisaillement des mortiers moulés à leur contact.** Matériaux et Constructions, vol 14, n° 80, págs. 91-102.

CAPÍTULO 5

USO DE FIBRAS E REDES COMO ARMADURAS DE REBOCO

5.1 - Objectivos do Uso de Armaduras em Rebocos

5.2 - Fibras e Redes Mais Usadas em Rebocos

5.3 - Aplicação de Fibras e Redes em Rebocos

Bibliografia do Capítulo 5

5.1 - OBJECTIVOS DO USO DE ARMADURAS EM REBOCOS

5.1.1 - Mecanismos de actuação

A incorporação de fibras em argamassas e betões tem geralmente como objectivos principais aumentar a resistência à tracção, à flexão e ao choque do material e incrementar a sua ductilidade (ver figs. 5.1 e 5.2) [5.1 a 5.3].

A contribuição para o controlo da fendilhação da matriz - resultante do aumento da ductilidade e também, por vezes, do incremento da resistência à tracção - é um dos efeitos mais significativos da utilização de fibras dispersas em materiais de cimento. Esse efeito é obtido através do atraso da abertura da 1ª fenda, da redução substancial da largura das fendas, e da formação de fendilhação múltipla [5.4 a 5.9].

É normalmente aceite que o comportamento mecânico do compósito, quando sujeito a tensão uniaxial e no estado de pré-fendilhação, se rege pelas chamadas *leis das misturas* [5.1 a 5.3], que, baseando-se nos conceitos da resistência dos materiais, estabelecem que as suas propriedades mecânicas são uma *média ponderada* das propriedades dos seus componentes individuais. Assim, a aplicação das leis das misturas ao cálculo do módulo de elasticidade e da resistência à tracção (tensão de 1ª fenda) do compósito resulta nas seguintes expressões:

$$E_c = E_f V_f + E_m (1-V_f) \tag{5.1}$$

(Por se admitir $\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f = \varepsilon$)

$$\sigma_c = \sigma'_f V_f + \sigma_m (1-V_f) \tag{5.2}$$

(Por equilíbrio de forças)

Em que *E, V, ε,* e σ representam, respectivamente, o módulo de elasticidade, o volume (ou antes o teor volumétrico, já que é referido à unidade), a extensão e a tensão e os índices *c, f* e *m* se referem, respectivamente, ao compósito, à fibra e à matriz.

Admite-se que

$$\sigma'_f = E_f \varepsilon \tag{5.3}$$

(tensão na fibra para a extensão correspondente à 1ª fenda da matriz)

e que

$$\varepsilon = \varepsilon_m = \sigma_m / E_m \qquad (5.4)$$

Tendo em conta os efeitos da orientação das fibras e do seu comprimento, sob a forma de factores de eficiência - η_1 e η_2 que tomam o valor 1, respectivamente, para fibras alinhadas e para fibras contínuas -, estas expressões tomam a forma mais geral:

$$E_c = \eta_1 \eta_2 E_f V_f + E_m (1-V_f) \qquad (5.1')$$

$$\sigma_c = \eta_1 \eta_2 \sigma'_f V_f + \sigma_m (1-V_f) \qquad (5.2')$$

Com a incorporação de fibras, a resistência à flexão da argamassa sofre, em princípio, uma variação bastante superior à resistência à tracção pura. Com efeito, num compósito de cimento, o lado das tracções dos diagramas de tensões e de deformações da secção de uma viga sujeita à flexão é muito diferente do lado das compressões, tornando-se, assim, inadequada a teoria correntemente usada para a determinação das tensões máximas. Devido ao comportamento dúctil à tracção da argamassa reforçada com fibras, a área de tracções do diagrama aumenta, e o eixo neutro desloca-se no sentido das compressões (ver fig. 5.1).

Estas características dos compósitos de cimento com fibras devem-se, principalmente, a um comportamento quase-plástico quando sujeitos à tracção, como resultado da extensão elástica, do arrancamento das fibras e dos fenómenos de fendilhação múltipla.

Por equilíbrio de forças e momentos no diagrama simplificado da fig. 5.1 c), é possível concluir-se que, teoricamente [5.1 a 5.3]:

$$\sigma_b = 2{,}44\ \sigma_{cu} \qquad (5.5)$$

em que σ_b é a tensão de tracção fictícia, que, num diagrama convencional, idêntico a 5.1 a), conduziria a um momento resistente igual ao do correspondente ao diagrama 5.1 c).

Nesse caso, se a tensão última do compósito, σ_{cu}, é incrementada, σ_b sofre, teoricamente, o mesmo incremento ampliado por um factor de 2,44.

Na realidade, a expressão (5.5) está sujeita a factores de eficiência mais diversificados

e complexos que as expressões (5.1) e (5.2), pelo que é muito difícil prever o valor da tensão σ_b.

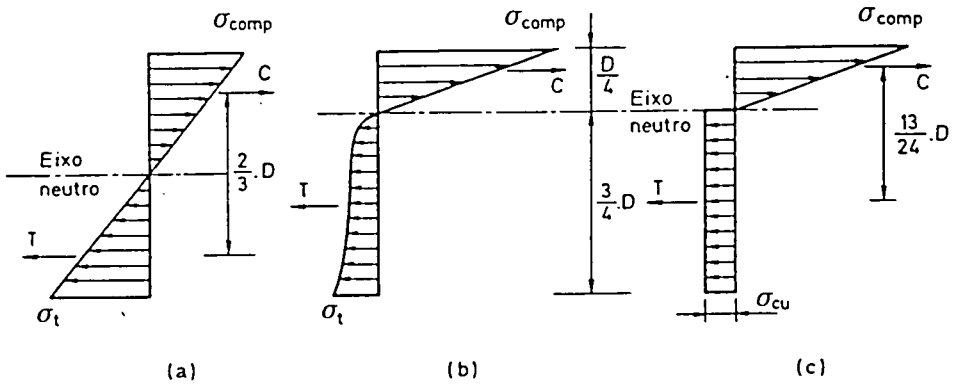


Fig. 5.1 - Diagramas de tensões de uma secção sujeita à flexão

(a) Material elástico (argamassa antes da fendilhação); (b) Material elástico à compressão e quase-plástico à tracção (possível diagrama real de uma argamassa com fibras após fendilhação); (c) Material elástico à compressão e plástico à tracção (diagrama ideal de argamassa com fibras após fendilhação)

No entanto, o incremento da resistência à tracção, quer pura quer à flexão, só se verifica se as fibras apresentarem módulos de elasticidade superiores ao da matriz, as respectivas dosagens forem relativamente elevadas, e os seus comprimentos permitirem uma ancoragem eficiente na matriz.

Os parâmetros da fibra que influem no comportamento do compósito são, essencialmente, os seguintes:

- resistência à tracção, módulo de elasticidade e extensão na rotura
- aderência à matriz (formato, estado de superfície, ligação química)
- comprimento (l), diâmetro (d) e relação l/d
- orientação da fibra (definida, aleatória no plano ou aleatória no espaço)

O comprimento crítico (l_{crit}) é o comprimento mínimo da fibra que permite que, num compósito, a tensão na fibra atinja a sua resistência à rotura. Ou seja, é mobilizada a resistência à tracção total da fibra num ponto. O valor deste parâmetro depende da relação

entre a resistência à tracção da fibra e a sua aderência à matriz.

O volume crítico de fibras (V_{fcrit}) num compósito é o volume mínimo de fibras que, após a abertura da 1ª fenda, é capaz de suportar a totalidade da força que o compósito suportava antes da fendilhação (ver fig. 5.2). Este valor depende, não só da relação entre a resistência à tracção da fibra e da matriz, mas também da relação *l/d* da fibra e da aderência desta à matriz e é, para compósitos de matriz cimentícia correntes, da ordem de 1 a 3% [5.1].

A orientação da fibra é um factor tão influente que o coeficiente de eficiência η_l estimado por diversos autores e referido por Bentur e Mindess [5.1] é da ordem de 1/2 a 1/3 para orientação aleatória no plano e de 1/5 a 1/6 para orientação aleatória no espaço.

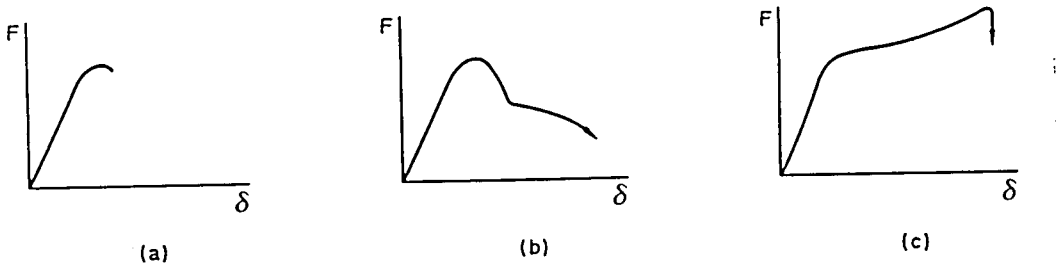


Fig. 5.2 - Curvas força-deslocamento típicas em tracção pura
a) argamassa sem fibras (V_f=0); b) argamassa com fibras (V_f<V_{fcrit}); c) argamassa com fibras ($V_f \geq V_{fcrit}$)

Os mecanismos possíveis de rotura do compósito, variáveis com estes parâmetros, são, em síntese, os seguintes [5.10]:

- quando $V_f < V_{fcrit}$: rotura das fibras logo a seguir à matriz, uma vez que estas não podem suportar a carga total (ver fig. 5.2 b); não existe melhoria da resistência à tracção, mas sim da tenacidade;

- quando $V_f > V_{fcrit}$: existem condições para ocorrer fractura múltipla e o material passa a comportar-se, não como frágil, mas sim como dúctil (ou, como referem alguns autores, como pseudo-dúctil, já que o aumento da deformação se deve, afinal, a microfendilhação) (ver fig. 5.2 c); neste caso podem distinguir-se duas situações diferentes:

- quando $l < l_{crit}$: o mecanismo mais provável é o arrancamento das fibras, o que resulta num incompleto aproveitamento da sua resistência à tracção, mas aumenta a ductilidade do material; este mecanismo ocorre quando a força resultante da ligação da fibra à matriz (aderência + atrito) é inferior à resistência à tracção da fibra; a consequência é o escorregamento da fibra, até ao seu arrancamento;

- quando $l > l_{crit}$: é provável a rotura das fibras, ou seja, após a rotura da matriz, dá-se a transferência total da carga para as fibras; existe um aproveitamento completo da resistência à tracção das fibras, mas a rotura final é mais frágil que no caso anterior.

Esta última situação é, em teoria, a mais favorável, embora no caso dos rebocos pareça ter um interesse limitado, já que não é admissível que se atinja um estado de fendilhação suficientemente avançado para que seja mobilizada a resistência última da fibra, pelo menos se estivermos a trabalhar com fibras de baixo módulo de elasticidade. No entanto, este mecanismo também só ocorre na prática se a fibra for contínua (como é o caso das redes) ou se a fibra for frágil, porque no caso das fibras dispersas dúcteis existe sempre arrancamento. De facto, quando a fibra é traccionada, a contracção do seu diâmetro associada ao efeito de Poisson, elevada nas fibras muito extensíveis, origina perda de ligação com a matriz e facilita o escorregamento (ver fig. 5.3).

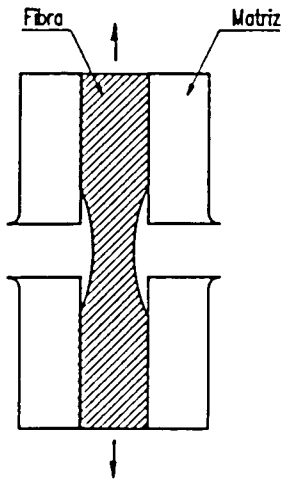


Fig. 5.3 - Deformação plástica da fibra na vizinhança de uma fenda

Alguns autores [5.11, 5.12, 5.13] consideram de grande interesse a mistura de mais que um tipo de fibras, com características diferentes - por exemplo fibra de vidro e fibra de polipropileno fibrilada - em que, por exemplo, um aumenta a resistência à tracção, retardando o aparecimento da 1ª fenda e outro aumenta a energia de rotura, permitindo controlar a fendilhação, através da redução da abertura das fendas e do impedimento da sua propagação.

5.1.2 - Fibras dispersas

As fibras dispersas são, em princípio, tanto mais eficientes quanto maior for o seu comprimento e menor o seu diâmetro. No entanto, nas argamassas de reboco, se as técnicas de amassadura e de aplicação forem as usuais (amassadura em betoneira ou em máquina de projecção e aplicação manual ou por projecção mecânica seguida de alisamento manual), não é possível aumentar muito o comprimento (ir além de cerca de 10 mm) nem usar diâmetros muito reduzidos, sob pena de obter uma miscibilidade fraca e uma trabalhabilidade deficiente.

A aderência à matriz é, também, uma característica da fibra que influencia muito o comportamento da argamassa armada. Os fabricantes usam tratamentos superficiais ou agem sob o formato das fibras, para a melhorar química ou mecanicamente. Alguns procedimentos químicos podem reduzir a miscibilidade das fibras na argamassa a níveis incompatíveis com uma boa trabalhabilidade e aumentar a absorção de água da argamassa, o que, no caso dos rebocos, tem, como se sabe, diversos inconvenientes. Os métodos mecânicos, ou seja a alteração da secção da fibra para melhorar a sua ancoragem à matriz, podem dar bons resultados para os rebocos.

Quando se utilizam fibras dispersas para reforçar argamassas de reboco é pouco provável conseguir um aumento efectivo da resistência à tracção, e, mesmo, da resistência à tracção por flexão, devido a diversos factores, de que se destacam os referidos a seguir.

- São relativamente baixos (inferiores a 1% em volume em relação ao volume total de argamassa) os teores de fibras que é possível incorporar na prática, quer por razões de trabalhabilidade e de aplicabilidade, quer devido aos métodos de mistura e amassadura actualmente disponíveis em estaleiro. Assim, é previsível que o volume de fibras, em relação ao volume total do compósito, seja inferior a V_{fcrit}..

- Os métodos de aplicação conduzem a orientações aleatórias das fibras, resultando em factores de eficiência η_1 relativamente baixos.

- Os comprimentos de fibras que permitem uma boa trabalhabilidade são por vezes inferiores aos comprimentos críticos, dando assim origem a factores de eficiência η_2

também reduzidos.

- A reduzida compacidade da matriz geralmente obtida nas argamassas fracas, com areias grossas, usadas em revestimentos de paredes, dificulta a aderência das fibras. Assim, a rotura do compósito dá-se quase sempre por arrancamento das fibras, sem se atingir a resistência última destas.

No entanto, é expectável obter melhorias significativas na ductilidade do material, permitindo assim melhorar o seu comportamento à fendilhação (ver fig. 5.2).

Com efeito, vários estudos têm procurado demonstrar que argamassas e betões reforçados com pequenas dosagens de fibras (da ordem de 0,1 a 0,5%, em relação ao volume total de argamassa ou betão), ainda que de baixo módulo de elasticidade, apresentam comportamentos significativamente melhorados à fendilhação devida à retracção e, também, às variações diferenciais de temperatura [5.4, 5.5, 5.8, 5.10 e 5.14].

As fibras conferem uma restrição adicional da retracção, em parte pelo aumento da fase estável da argamassa, e em parte devido a alterações da cinética de hidratação. O comportamento dúctil da argamassa permite a redução da largura das fendas formadas, bem como a possibilidade de se atingir um estado de fendilhação múltipla da matriz, sem anulação da resistência. Por último, na argamassa jovem, em que se desenvolvem tensões resultantes da retracção restringida, as características mecânicas encontram-se ainda em evolução, pelo que a adição de fibras, mesmo de baixo módulo e em pequenas dosagens, pode traduzir-se num aumento efectivo dessas características numa 1ª fase, evitando uma fendilhação precoce [5.4].

Note-se que algumas das características que concorrem para uma reduzida eficiência no que diz respeito à resistência à tracção são, à partida, favoráveis ao aumento da ductilidade da argamassa e, portanto, também à melhoria do seu comportamento à fendilhação, como é o caso da imperfeita aderência das fibras à matriz, que contribui para uma rotura por arrancamento das fibras, mais dúctil que a rotura em que se atinge a resistência última destas, e como é também o caso da provável redução do módulo de elasticidade do produto endurecido resultante da aplicação da lei das misturas (expressões 5.1 e 5.1').

Devido ao aumento da tenacidade do material, espera-se também uma melhoria da resistência à fadiga, isto é, a redução da fissurabilidade sob cargas cíclicas. Assim, é previsível um melhor comportamento face às solicitações térmicas e higrotérmicas que actuam

periodicamente sobre os rebocos e que tantas vezes, ao adicionarem-se, com efeito dinâmico, às tensões já instaladas, acabam por despoletar a fendilhação.

A melhoria da resistência aos choques, conseguida pela grande capacidade de absorção de energia evidenciada nos gráficos da fig. 5.2, e o aumento da resistência ao desgaste, são também características favoráveis que parece razoável esperar com base em diversos estudos realizados [5.5, 5.8, 5.10, 5.13, 5.15, 5.16].

É ainda previsível a ocorrência de alterações nas características da argamassa em pasta, e na sua reologia, dependentes, principalmente, da forma e das propriedades superficiais das fibras usadas, que influenciarão, de modo ainda não determinado, o comportamento a médio prazo dos revestimentos.

Convém deixar bem claro que uma parte das vantagens que se podem obter com a adição de fibras a uma argamassa de reboco são sensíveis numa fase pós-fendilhação. De facto, a microfendilhação da matriz é um dos principais mecanismos que concorrem para o efeito de ductilidade no comportamento à tracção do material. Esta hipótese de partida parece ser contraditória com a melhoria da resistência à fendilhação que se pretende conseguir. No entanto, são os conceitos de fendilhação e de microfendilhação que estão aqui em causa e que parecem exigir uma redefinição. Assim, considerar-se-á abrangida pelo conceito de fendilhação a abertura de fendas capazes de comprometerem o comportamento do revestimento, ou seja, de afectarem a sua capacidade de impermeabilização e o seu aspecto. Por outro lado, designar-se-á por micro-fendilhação o surgimento de fissuras internas de diâmetro muito pequeno, invisíveis a olho nu, que, embora reduzam significativamente a capacidade resistente da matriz, não afectam a capacidade de impermeabilização nem o aspecto do revestimento e não atingem um estado de instabilidade que provoque a sua evolução, podendo mesmo vir a ser colmatadas mais tarde, por recristalização. Esta distinção entre conceitos está subjacente ao trabalho de alguns autores sobre a melhoria do comportamento à fendilhação das argamassas e betões com fibras, já que recomendam estes materiais para aplicações que incluem revestimentos de paredes, paredes ou revestimentos de reservatórios e painéis de fachada [5.5 a 5.8].

5.1.3 - Redes

As redes são mais eficientes que as fibras dispersas como reforço de argamassas de reboco, conseguindo-se melhorias na resistência à fendilhação sensivelmente superiores às obtidas com igual volume de fibras dispersas da mesma natureza [5.17]. Como se verá no capítulo 8, os ensaios realizados no âmbito deste trabalho confirmam esta conclusão, que é, de resto, facilmente explicável: com efeito, as fibras que constituem as redes são contínuas e portanto têm sempre comprimento superior ao *comprimento crítico*, logo o mecanismo de rotura por arrancamento das fibras é eliminado; em segundo lugar, estão orientadas segundo o plano em que se exercem as forças principais de tracção, sendo-lhes aplicável, assim, um coeficiente de alinhamento, η_l, igual a 1; finalmente, a sua forma garante, à partida, uma aderência à matriz razoável - desde que a dimensão da malha seja adequada à granulometria do reboco, permitindo uma boa incorporação - pois possibilita uma ancoragem mecânica [5.18]. Assim, a resistência das fibras da rede é melhor aproveitada, ou seja, são solicitadas até forças mais próximas da sua resistência à rotura.

Por outro lado, os aspectos ligados à reologia e à melhoria da permeabilidade ao vapor de água não são alterados em relação à argamassa sem fibras, pelo que não haverá melhorias no que diz respeito a essas características.

Sendo eliminado o mecanismo de rotura por arrancamento das fibras, é também eliminado o seu contributo para a ductilidade do compósito. Ou seja, é expectável uma melhoria da resistência à abertura da 1ª fenda, mas a melhoria do comportamento pós-fendilhação será a devida ao mecanismo de fendilhação múltipla.

5.2 - FIBRAS E REDES MAIS USADAS EM REBOCOS

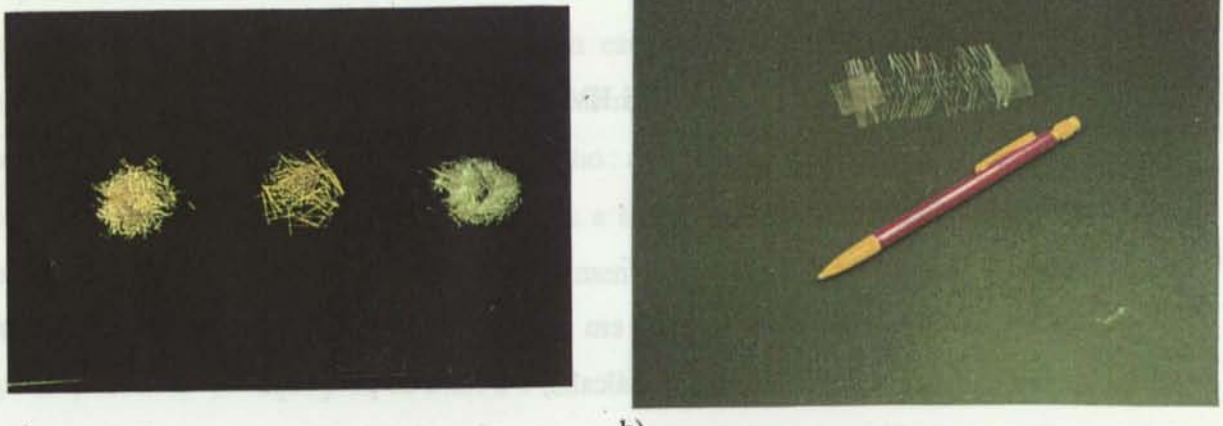
5.2.1 - Fibras dispersas

As fibras dispersas mais usadas em reforço de rebocos são a fibra de vidro, principalmente a do tipo *AR* (resistente aos álcalis) e a fibra de polipropileno fibrilada (ver fig. 5.4). A utilização de fibras em rebocos tradicionais não está difundida no nosso País, mas são comercializados, no mercado nacional, rebocos não-tradicionais que incorporam fibras destes

tipos. Estes dois tipos de fibras têm características muito diferentes entre si e o seu modo de actuação é também diferente.

As fibras de vidro usadas actualmente (a partir da década de 70) no reforço de argamassas e betões - *fibra de vidro Cem-FIL*, considerada resistente aos álcalis, ou *AR* - têm, devido à sua constituição, uma boa resistência aos álcalis do cimento, por terem uma percentagem de silicato de zircónio elevada (cerca de 16% [5.1, 5.19]) enquanto as anteriormente usadas para esse fim não tinham este composto, como a *fibra de vidro A*, essencialmente constituída por silicatos de sódio e cálcio [5.3] (não utilizada actualmente em matriz cimentícia) e a *fibra de vidro E*, que tem como constituintes principais os silicatos de boro [5.3, 5.13]. A fibra de vidro E - embora mais estável que a fibra A em matriz de cimento -, sofre um rápido processo de deterioração, com perda de resistência, de peso e de diâmetro dos filamentos, devido à quebra das ligações Si-O-Si do vidro pelos iões OH^- da solução alcalina; a fibra de vidro AR é quimicamente mais estável (as ligações Zr-O são apenas ligeiramente atacadas pelos iões OH^-), mas sofre, mesmo assim, perdas de resistência e de ductilidade significativas. Ensaios realizados no British Research Establishment (BRE) por Majumdar e Laws [5.13] sobre uma primeira geração destas fibras mostram perdas de resistência de compósitos de cimento reforçados com 4% em volume de fibra de vidro AR, à tracção e à flexão, da ordem de 15 a 20% após 1 ano de envelhecimento natural e da ordem de 40 a 50% após 5 anos de envelhecimento natural (num clima inglês), que, no entanto, parecem, em seguida, estabilizar, com resistências residuais bastante elevadas [5.1].

As fibras AR são caras e difíceis de fabricar, devido às elevadas temperaturas que é necessário atingir para as trabalhar.



a) b)

Fig. 5.4 - Fibras usadas em argamassas a) de vidro AR; b) de polipropileno fibrilada

A fibra de vidro, como reforço de argamassas de reboco, apresenta as seguintes vantagens:

- incombustibilidade;
- elevada resistência à tracção e elevado módulo de elasticidade, que permitem, com teores volumétricos apropriados, melhorar as características de pré-fendilhação da matriz;
- ligação fibra-matriz bastante boa (da ordem de 3 MPa [5.3]), o que melhora a eficiência do compósito (embora reduza a sua ductilidade);
- boa resistência aos raios ultra-violeta (UV) do Sol;
- não-favorecimento do crescimento de fungos ou de outros microorganismos.

Por outro lado, apresenta os seguintes inconvenientes principais:

- susceptibilidade ao ataque pelos álcalis do cimento;
- susceptibilidade à degradação por atrito;
- dificuldade de mistura na argamassa.

As fibras de polipropileno (PP) são também muito usadas, na sua forma fibrilada, em argamassas e betões e apresentam como principais vantagens [5.3, 5.10]:

- baixo custo;
- inércia química aos álcalis e aos ácidos e, portanto, aos compostos do cimento e dos restantes materiais que constituem, habitualmente, as paredes;
- hidrofobia (portanto não absorção de água, a não ser que o tratamento de superfície tenha outras características);
- não-favorecimento do crescimento de fungos ou de outros microorganismos;
- boa ligação mecânica da fibra à matriz de cimento, originada pela fibrilação, apesar da reduzida ligação química;
- boa miscibilidade na argamassa.

Por outro lado, como principais desvantagens, podem-se considerar as seguintes:

- combustibilidade;
- baixo módulo de elasticidade, o que vai implicar o não aumento da tensão de abertura da 1ª fenda, pelo menos na argamassa endurecida;
- má aderência dos monofilamentos à matriz.
- susceptibilidade ao ataque dos raios UV do Sol.

Estes inconvenientes são ultrapassáveis: com efeito, a combustibilidade da fibra não afecta de forma significativa a reacção ao fogo da argamassa, pelo menos nas baixas dosagens usadas em rebocos (0,3% a 1% em volume, em relação ao volume total de argamassa); ensaios realizados no âmbito deste trabalho mostraram que a classe de reacção ao fogo, determinada segundo a Especificação LNEC 365-1990 [5.20], da argamassa armada com 1% de fibras de PP é igual à da matriz, ou seja M0 (ver capítulo 7, parágrafo 7.2.3). A incorporação na matriz de argamassa reduz também a susceptibilidade ao ataque dos raios UV, e se for aplicada uma pintura sobre o reboco, como é frequentemente o caso quando se trata de rebocos tradicionais, o risco é ainda menor. A má aderência dos monofilamentos é ultrapassada, em geral, através do processo de fibrilação da matriz, que consiste em produzir rasgos no sentido longitudinal no filme de polipropileno, durante o processo de fabrico, de modo que a fibra fica com o aspecto de uma pequeníssima rede, que abre quando é misturada na argamassa (ver fig. 5.4). Este processo permite melhorar a ligação fibra-matriz por um mecanismo de ancoragem mecânica e dá origem a argamassas trabalháveis e homogéneas, com alguma introdução de ar. No que se refere ao baixo módulo de elasticidade (da ordem de 5000 MPa), se pode ser considerado um inconveniente no que diz respeito ao comportamento anterior à abertura da 1ª fenda, é, por outro lado, uma vantagem para o comportamento posterior, já que contribui para o aumento da ductilidade da argamassa armada.

Fibras de poliéster e de outros plásticos são também usadas nalguns casos.

As fibras naturais, como as de celulose, de coco, de sisal, etc., são usadas em países onde existem em abundância, como o Brasil e alguns países africanos e asiáticos, embora coloquem problemas complexos, nomeadamente de durabilidade.

As fibras de amianto tiveram grande utilização em compósitos de matriz de cimento, e foram também usadas nalguns rebocos não-tradicionais, pelo menos em França, nos anos 70. No entanto, como é sabido, estas fibras têm hoje o seu uso restringido por razões ecológicas e

de saúde pública.

As fibras de aço são também usadas no reforço de argamassas, mas não se conhecem aplicações em rebocos, tradicionais ou não-tradicionais. A necessidade de protecção anti--corrosiva eficaz - já que as argamassas de reboco têm uma espessura reduzida e elevada permeabilidade ao ar, pelo que não protegem por si - torna-as, de qualquer modo, pouco competitivas.

As fibras referidas podem dividir-se em dois grupos quanto ao papel que exercem num compósito de matriz de argamassa [5.21]:

- As fibras de módulo de elasticidade muito superior ao da matriz (fibras de vidro, de amianto, de aço e de alguns tipos de plástico) podem aumentar a resistência à tracção e à flexão do compósito e o seu módulo de elasticidade. Sob a solicitação de tracção, admite-se que o compósito se deforma em conjunto, até à rotura da matriz. Nesse momento a força é transferida para as fibras, que, se $V_f > V_{fcrit}$ continuarão a deformar-se até à sua rotura - se $l > l_{crit}$ - ou até ao seu arrancamento - se $l < l_{crit}$ - e consequente rotura do compósito.

- As fibras de módulo de elasticidade de ordem de grandeza idêntico ao da matriz, ou até inferior (como as fibras plásticas mais comuns e as fibras vegetais), não alteram a resistência nem o módulo de elasticidade da matriz antes da sua rotura, mas podem aumentar significativamente a tenacidade do compósito e a sua energia de rotura.

Em ambos os casos é previsível um aumento significativo da tenacidade e da energia absorvida na rotura. A energia é dissipada pela deformação da matriz e das fibras e, se ocorrer fendilhação múltipla, pela formação das superfícies de rotura e ainda pela separação fibra-matriz e pelo atrito no escorregamento das fibras na matriz.

Quer num caso quer noutro, não é provável o aumento da resistência à compressão do compósito, sendo, pelo contrário, possível a sua redução, já que muitas vezes a incorporação de fibras torna a argamassa mais porosa. No entanto, o comportamento à compressão, após rotura, é diferente, sendo maior a energia de rotura absorvida.

Prevê-se sempre um aumento considerável da resistência ao choque, devido à

quantidade de energia absorvida na rotura da ligação fibra-matriz, no arrancamento das fibras e na própria vibração das fibras [5.21].

Finalmente, a introdução de fibras pode aumentar a permeabilidade ao ar das argamassas (devido a um possível incremento da porosidade), o que pode contribuir para acelerar a sua carbonatação.

5.2.2 - Redes

A análise da situação europeia no que se refere à utilização de redes em revestimentos de ligante mineral permitiu concluir que as mais usadas na prática são as redes de fibra de vidro com protecção anti-alcalina (geralmente por recobrimento de resina acrílica ou de PVC) e as redes metálicas com protecção anti-corrosiva. Estas últimas têm um funcionamento comparável à das armaduras de aço dos betões, e não serão desenvolvidos os seus mecanismos de actuação no âmbito deste trabalho.

Em Portugal são também estes os tipos de redes usados em obra, em rebocos tradicionais e não-tradicionais, com o objectivo de aumentar a resistência à fendilhação.

As redes de fibra de vidro são fabricadas a partir de fibra de vidro E, pouco resistente ao ataque dos álcalis, e recebem depois, na fase final do processo de fabrico, uma protecção anti-alcalina que consiste num revestimento de resina vinílica ou acrílica ou, ainda, de policloreto de vinilo (PVC). Esta protecção tem uma eficácia limitada. A rede incorporada em argamassa, em ambiente húmido, vai perdendo resistência ao longo do tempo.

Os ensaios de envelhecimento artificial acelerado (EAA) realizados com o fim de avaliar a durabilidade das redes para aplicação em rebocos mostram perdas de resistência da ordem de 50% [5.2 e 5.22 a 5.24]. A correlação entre o efeito desses ensaios - que consistem na imersão de provetes de rede em solução alcalina com composição definida durante períodos que vão de alguns dias até 3 meses, conforme o tipo de solução e a temperatura a que decorre o ensaio [5.25 a 5.28] - e o envelhecimento natural em ambiente exterior (EN) ainda não está estabelecida de forma satisfatória, uma vez que são poucos os dados sobre envelhecimento natural. Um estudo de Komlos [5.28] indica que um EAA durante 3 meses a 50°C poderia ser equivalente a 20 anos de EN no clima do Reino Unido e a 30 anos no clima da Checoslováquia. Estudos realizados no LNEC [5.22] conduziram a resultados mais

preocupantes, uma vez que se obtiveram, ao fim de três anos de EN por incorporação em argamassa de reboco e exposição ao ambiente natural na Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes do LNEC (EENRevPa), perdas de resistência de cerca de 75% a 100% das obtidas num ensaio de EAA por imersão em solução alcalina durante 3 meses, à temperatura de 23°C, realizado segundo as Directivas UEAtc [5.25, 5.26], o que poderia significar uma correlação de apenas cerca de 3 ou 4 anos de EN para o ensaio de EAA. Os ensaios de Majumdar e Laws [5.13] mostram também correlações muito baixas para ensaios de EAA à temperatura ambiente e EN, parecendo indicar que 1 ano de EAA produz efeitos quase tão gravosos como 3 anos de EN. Estas discrepâncias tão acentuadas reflectem, por um lado, a grande diversidade de métodos de envelhecimento e de ensaios para testar os seus efeitos, e, ainda, de composições possíveis da matriz; por outro lado, estão também relacionadas com a insuficiência de dados disponíveis sobre o envelhecimento natural, que levam, pela sua própria natureza, muitos anos a recolher. Pode concluir-se que todos estes ensaios são ainda pouco fiáveis para prever o comportamento a longo prazo de compósitos de fibra de vidro com matriz cimentícia, embora tenham certamente valor comparativo.

Embora em muito menor escala, usam-se também nalguns países redes mistas de fibra de vidro e de poliaramida (conhecida pelo nome comercial de *Kevlar*). Procura-se, com esta mistura, aumentar a resistência à tracção a longo prazo da rede, já que a fibra de vidro, mesmo com as protecções usadas, é atacada pelos álcalis do cimento, enquanto a poliaramida é inerte. Contudo, os preços muito elevados daquele material tornam este tipo de soluções pouco competitivas.

Redes de polipropileno, de poliéster e de poliamida também surgem nalguns casos, nomeadamente em revestimentos não-tradicionais relativamente leves, já que são redes de baixa resistência mecânica e grande deformabilidade, pelo menos nos casos conhecidos.

Recentemente, tem-se conhecimento do desenvolvimento de estudos para uso de redes de polietileno de alta densidade[1], com objectivos semelhantes aos das redes metálicas: aumento da resistência do reboco e reforço da própria parede, através da melhoria do funcionamento conjunto alvenaria-revestimento. Estas redes, cuja rigidez obriga à fixação mecânica à parede, como acontece com as redes metálicas, não têm as desvantagens destas últimas no que diz respeito a corrosão ou outras formas de ataque químico. O objectivo dos estudos em curso é essencialmente a reabilitação de paredes antigas, muito fracas ou fendilhadas.

1 - Estudos no âmbito da RILEM, em colaboração com uma empresa do Reino Unido.

5.3 - APLICAÇÃO DE FIBRAS E REDES EM REBOCOS

As fibras dispersas são mais fáceis de aplicar que as redes de fibras da mesma natureza, mas menos eficientes. No entanto, têm problemas de miscibilidade com a argamassa que é preciso resolver. Por outro lado, as redes têm custos de mão-de-obra mais elevados, já que levam mais tempo a colocar e exigem a aplicação em duas demãos da camada que se destinam a armar.

O modo de aplicação de um reboco *armado* com fibras não tem, em princípio, nenhuma diferença do modo de aplicação de um reboco não-armado. No caso dos revestimentos pré-doseados com fibras, estas costumam estar já misturadas com os constituintes secos da argamassa, que tem também os adjuvantes necessários à boa miscibilidade das fibras. No caso dos rebocos doseados em obra, as fibras são adicionadas durante a amassadura, nuns casos no início, com os constituintes ainda secos, mas, mais frequentemente, no fim, ou depois da adição de uma parte da água, para facilitar a mistura e evitar a degradação das fibras. Esta operação pode ser delicada, porque existe a possibilidade de formação de *grumos* se as fibras forem em quantidade excessiva, tiverem dimensões inadequadas (demasiado compridas ou finas) ou se o seu tratamento superficial dificultar a sua miscibilidade. A utilização de adjuvantes (um plastificante, por exemplo) pode reduzir este inconveniente e permitir a incorporação de uma dosagem superior de fibras.

Para actuar como reforço do reboco, a rede deve ser bem incorporada na camada a armar, entre duas demãos. A sua aplicação deve obedecer à seguinte sequência de operações: aplicação da 1ª demão da camada de revestimento a armar; aplicação da rede, bem plana, sobre esta demão ainda fresca; passagem da colher sobre a rede, de forma a facilitar a sua incorporação na massa; após secagem parcial da 1ª demão, aplicação da 2ª demão sobre a rede (ver figs. 5.5 a 5.8).

Quando a rede se destina a armar rebocos aplicados sobre fendas isoladas de largura significativa, é mais eficiente dessolidarizar o revestimento da base nessa zona através da interposição de uma tira de papel *Kraft* ou de polietileno e em seguida aplicar o revestimento *em ponte*, como se vê na fig. 5.8 b.

Dada a relativa morosidade da sua aplicação o reforço com redes de rebocos aplicados

sobre suportes correntes só é normalmente recomendado em zonas limitadas do paramento que se consideram particularmente sujeitas a fendilhação, como sejam:

- as zonas heterogéneas do suporte revestidas em continuidade (ligações alvenaria--estrutura) (ver fig. 5.6), onde os diferentes coeficientes de dilatação térmica e os diferentes estados de carga e módulos de deformação tendem a provocar deslocamentos diferenciais e, portanto, tensões;
- os vértices dos vãos (que são pontos de concentração de tensões) (ver fig. 5.7);
- zonas do suporte superficialmente fendilhadas (ver figs. 5.8a e 5.8b);
- zonas em que seja necessário fazer enchimentos localizados, usando camadas de reboco mais espessas que em zonas adjacentes.

Nestes casos a rede deve ser incorporada entre duas demãos da camada de base.

- camadas de acabamento, aplicadas sobre bases já existentes e fendilhadas ou com comportamento mal conhecido, ou, de um modo geral, quando se quer garantir um paramento sem nenhuma fendilhação superficial.

Neste caso, a rede deve ser incorporada entre duas demãos da camada de acabamento.

As fibras dispersas estão, em princípio, mais vocacionadas para aplicação em zona corrente do paramento: pode justificar-se o seu uso sempre que se pretenda garantir o não surgimento de fendilhação, por razões, por exemplo, de assegurar a estanquidade ou garantir um aspecto mais cuidado. Pode também ser recomendado o seu uso em rebocos fracos (por exemplo por conterem muitas cargas leves ou por serem muito delgados) para melhorar a sua resistência ao choque e ao desgaste.

Naturalmente, as redes podem também ser usadas com estes últimos objectivos.

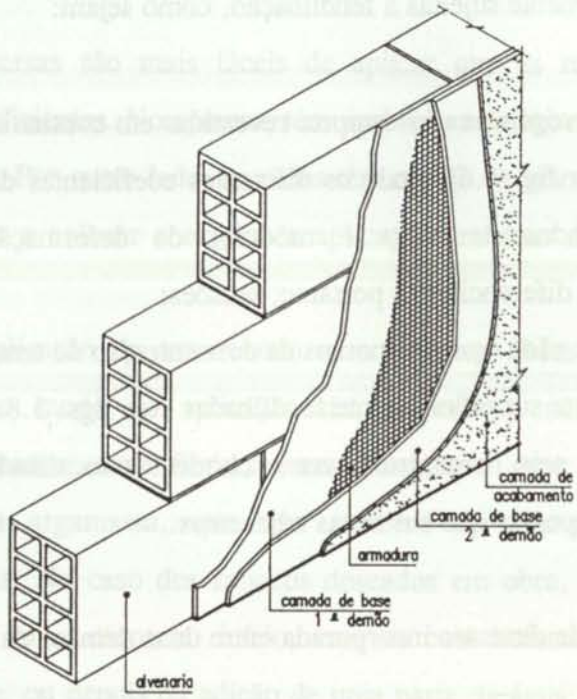


Fig. 5.5 - Revestimento armado (corte)

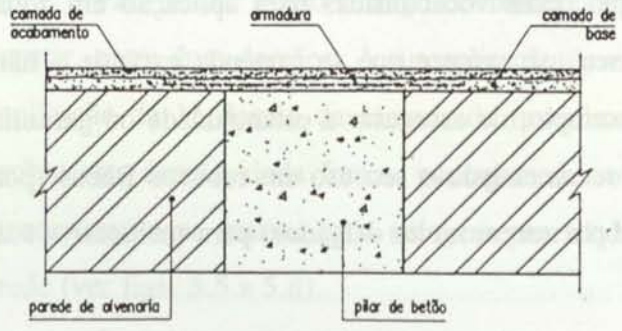


Fig. 5.6 - Reboco armado na zona de transição entre materiais diferentes

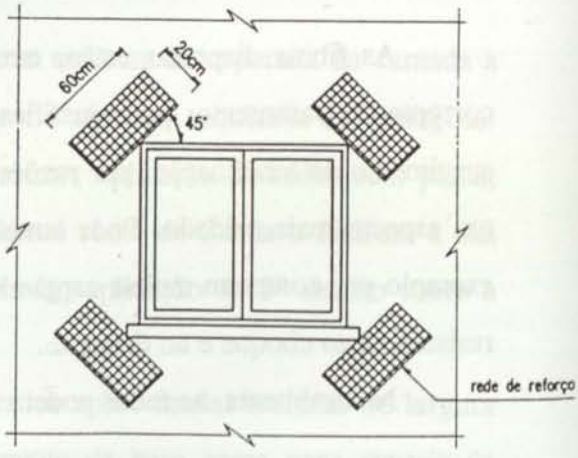


Fig. 5.7 - Reforços nos ângulos dos vãos

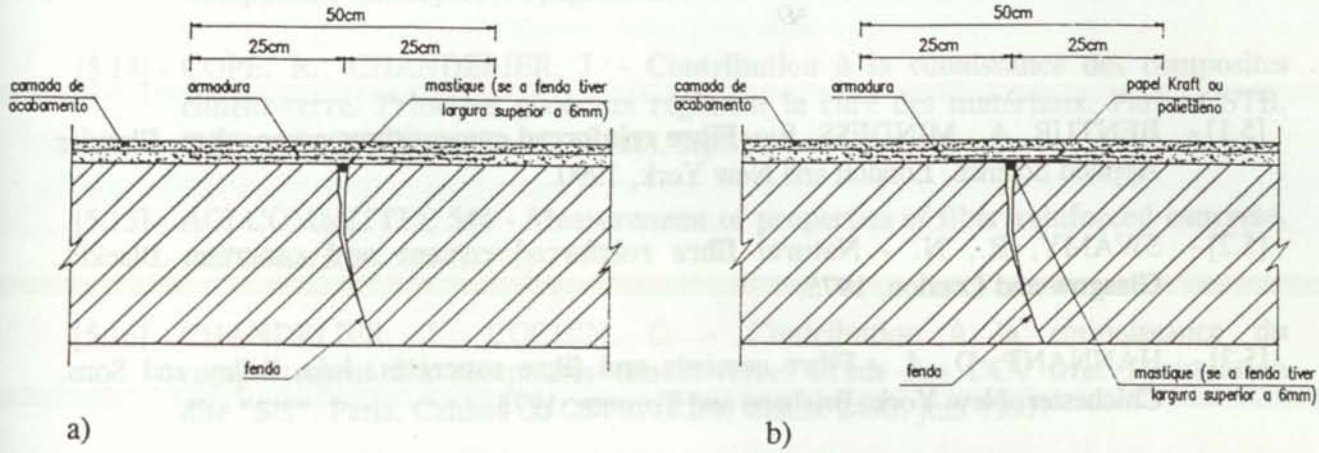


Fig. 5.8 - Reboco armado sobre fenda
a) aderente; b) com interposição de uma folha dessolidarizante

As armaduras constituídas por redes ou por fibras dispersas podem ter outras aplicações em revestimentos de paredes, nomeadamente como parte de sistemas de revestimento mais complexos e como armadura de rebocos tradicionais ou não-tradicionais, aplicados sobre suportes dimensionalmente instáveis.

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 5

[5.1] - BENTUR, A.; MINDESS, S. - **Fibre reinforced cementitious composites.** Elsevier Applied Science, London and New York, 1990.

[5.2] - SWAMY, R., N. - **Natural fibre reinforced cement and concrete.** Blackie, Glasgow and London, 1975.

[5.3] - HANNANT, D., J. - **Fibre cements and fibre concretes.** John Wiley and Sons, Chichester, New York, Brisbane and Toronto, 1978.

[5.4] - SWAMY, R., N.; STAVRIDES, H.; - **Influence of fiber reinforcement on restrained shrinkage and cracking.** American Concrete Institute, ACI journal, March 1979, págs. 443-460.

[5.5] - SARIGHAPHUTI, M.; SHAH, S. P.; VINSON, K.D. - **Shrinkage Cracking and Durability Characteristics of Cellulose Fiber Reinforced Concrete.** ACI Materials Journal, July-August 1993.

[5.6] - HERMANN, K. - **Le béton de fibres de verre.** Bulletin du ciment, 60° ano, n° 9, septembre 1992.

[5.7] - MEYER, B. - **Les bétons de fibres.** Bulletin du ciment, 59° ano, 22, octobre 1991.

[5.8] - SOROUSHIA, P.; KHAN, A.; HSU, J. - **Mechanical Properties of Concrete Materials Reinforced with polypropylene or plyethylene fibers.** ACI Materials Journal, Nov.-Dec. 1992, págs. 535-540.

[5.9] - NANNI, A.; MEAMARIAN, N. - **Distribution and opening of fibrillated plypropylene fibers in concrete.** Cement and concrete composites, 13, 1991, págs. 107-114.

[5.10] - SARVARANTA, L. - **Characterization methods for polypropylene fibre-reinforced cement mortar composites.** Espoo, Technical Research Centre of Finland (VTT), 1993. VTT publications, 136.

[5.11] - V., C.; BACKER, S. - **Tensile properties of synthetic fiber reinforced mortar.** England, Elsevier Science Publishers. Cement and Concrete Composites, 12, 1990, págs. 29-40.

[5.12] - XU, G.; HANNANT, D. J. - **Synergistic Interaction Between Fibrillated Polypropylene Networks and Glass Fibres in a Cement-Based Composite.** Elsevier Science Publishers, U.K. Cement and concrete composites, 13, 1991, págs. 95-106.

[5.13] - MAJUMDAR, A., J.; LAWS, V. - **Fibre cement composites: research at BRE.** Composites, January 1979, págs.19-27.

[5.14] - COPÉ, R.; CHANDELIER, J. - **Contribution à la conaissance des composites ciment-verre. Principes généraux régissant la cure des matériaux.** Paris, CSTB, Cahiers du CSTB. Cahier 2513 (322), sept.1991.

[5.15] - ACI COMMITTEE 544 - **Measurement of properties of fiber reinforced concrete.** ACI Materials Journal, July 1978.

[5.16] - CHANDELIER, J.; COCHIN, C. - **Contribution à la connaissance du comportement des composites ciment-verre. Étude des CCV avec formulation dite "5/5".** Paris, Cahiers du CSTB, (320), Cahier 2498, juin 1991.

[5.17] - SHAH, S.P. - **New reinforcing materials in concrete.** ACI Journal, May 1974, págs.257-262.

[5.18] - BRANDT, A. M. - **Cement-based Composites. Materials, mechanical properties and performance.** E & FN SPON, London, 1995.

[5.19] - SCARINCI, G.; FESTA, D.;SORARÚ, G.,D.; GRASSI, G.; STAFERI, L.; BADINI, C. - **Nuove fibre di vetro resistenti agli alcali per rinforzo di cemento Portland.** Il cemento, 2, 1990, págs.79-86.

[5.20] - LNEC - **Segurança contra incêndio. Reacção ao fogo dos materiais de construção. Critérios de classificação.** Lisboa, LNEC, 1990. Especificação LNEC E 365-1990.

[5.21] - AGOPYAN, V. - **O emprego de materais fibrosos na construção civil. "In" Simpósio Internacional sobre materais reforçados com fibras para construção civil. Anais.** S. Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Julho de 1993, págs. 11 a 25.

[5.22] - VEIGA, M. Rosário - **Evolução com o tempo das características mecânicas de redes de fibra de vidro utilizadas como armadura de argamassas de reboco.** "In" 2º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Comunicações. Lisboa, LNEC, Junho/ Julho de 1994. Vol. II, págs. 673-684.

[5.23] - VEIGA, M. Rosário - **Comportamento de argamassas armadas com fibras em revestimento exteriores de paredes. Relatório final do Projecto PBIC/C/CTM/1408/92.** Procº 083/14/10790. Lisboa, LNEC, Julho de 1996. Relatório 192/96 - NCCt.

[5.24] - PIRIE B., J.; GLASSER, F. P.; SCHMIDT-HENCO, C.; AKERS, A., S. - **Durability studies and characterization of the matrix and fibre-cement interface of asbestos-free fibre-cement products.** Cement & Concrete Composites, 12, 1990, págs. 233-244.

[5.25] - UNION EUROPÉENNE POUR L'AGRÉMENT TECHNIQUE DANS LA CONSTRUCTION (UEAtc) - **Directives UEAtc pour l'agrément des complexes d'isolation extérieure des façades avec enduit mince sur isolant en polystyrène expansé.** Paris, Cahiers du CSTB, 1988. Livraison 293, Cahier 2289.

[5.26] - UEAtc - **Guide technique UEAtc pour l'agrément des systèmes d'isolation extérieure des façades avec enduit minéraux.** Paris, Cahiers du CSTB, 1992. Livraison 331, Cahier 2602.

[5.27] - EUROPEAN ORGANIZATION FOR TECHNICAL APPROVAL (EOTA) - **Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering.** Draft ETAG n. 9, March 1996.

[5.28] - KOMLOS et als. - **Accelerated alkaliresistance tests of glass fibres.** "In" Materials Engineering 1990, vol. n°3, pp. 813-820.

PARTE II

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 6

PLANEAMENTO DO ESTUDO EXPERIMENTAL

6.1 - Objectivo e Âmbito do Estudo Experimental

6.2 - Selecção dos Materiais e Critérios Adoptados

6.3 - Parâmetros Analisados

6.4 - Plano de Ensaios

6.5 - Modelo Experimental Adoptado

6.6 - Equipamento Utilizado

Bibliografia do Capítulo 6

6.1 - OBJECTIVO E ÂMBITO DO ESTUDO EXPERIMENTAL

A campanha experimental realizada abrangeu ensaios em laboratório, ensaios na Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes (EENRevPa) e observações com microscópio electrónico de varrimento sobre um conjunto de 16 argamassas usadas em revestimentos de paredes.

Nesse conjunto procurou-se incluir argamassas tradicionais bastante usadas em rebocos no noso País, argamassas de fabrico industrial de comportamento conhecido e argamassas com fibras, com redes e com uma resina, seleccionadas de acordo com os critérios descritos em 6.2.

As argamassas estudadas foram as seguintes:

- argamassa P (padrão) - 1:4 (ci:ar); a/c=1,15
- argamassa FV (com fibra de vidro) - 1:4 + 0,3% fv; a/c=1,15
- argamassa FPP (com fibra de polipropileno) - 1:4 + 1% fpp; a/c=0,97
- argamassa R1 - 1:4 + rede fv malha 10 mm x 10 mm incorporada; a/c=1,15
- argamassa R2 - 1:4 + rede fv malha 4,5 mm x 4,5 mm incorporada; a/c=1,15
- argamassa R3 - 1:4 + rede pp malha 4 mm x 4 mm incorporada; a/c=1,15
- argamassa M1 - pré-doseada tipo monocamada
- argamassa M2 - pré-doseada
- argamassa M3 - pré-doseada
- argamassa M4 - pré-doseada para paramentos interiores
- argamassa PR - argamassa aditivada com resina acrílica (ligante misto); a/c=0,40 (argamassa patenteada)
- argamassa CA (com cal aérea) - 1:1:6 (ci:ca:ar); a/l=1,32
- argamassa CH (com cal hidráulica) - 1:4 (ch:ar); a/l=1,67
- argamassa Pa - 1:4; a/c=1,30
- argamassa Pac - 1:4 (ci:ar_{Corr}); a/c=1,09
- argamassa P3 - 1:3 (ci:ar); a/c=0,84

As notações usadas têm os seguintes significados: ci - cimento; ar - areia do rio Tejo; ar_{Corr} - areia amarela de Corroios; ca - cal aérea hidratada em pó; ch - cal hidráulica; a/c -

relação ponderal água/cimento; a/l - relação ponderal água/ligante; ci:ar - traço volumétrico cimento:areia; 0,3%f - teor volumétrico de fibra em relação ao volume total de argamassa em pasta.

Os teores de água indicados são os usados nos ensaios de laboratório. Nas aplicações em murete as dosagens de água foram deixadas ao critério dos aplicadores e foram, portanto, diferentes (ver capítulo 7, quadro 7.7).

Estas argamassas foram objecto de um vasto conjunto de ensaios de caracterização e de comportamento.

Os ensaios de comportamento tiveram como objectivo principal avaliar a susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida das argamassas e verificar a influência nessa característica de vários factores, relacionados, quer com a composição da argamassa, quer com as condições de aplicação. Adicionalmente, procurou-se também avaliar a capacidade de impermeabilização, a resistência ao choque, a aderência e o aspecto final do revestimento e ainda verificar o comportamento ao fogo, a permeabilidade ao vapor de água e a compatibilidade com o suporte.

Parte das medições e determinações realizadas foram repetidas em diversas condições de cura, que procuraram reproduzir condições preconizadas em documentos normativos ou de ocorrência habitual em obra:

1. ambiente de conservação caracterizado por 23±2°C / 50±5%HR até ao ensaio - ambiente preconizado nas técnicas de ensaio usadas até ao presente [6.1]; este condicionamento foi adoptado nos ensaios de caracterização e de comportamento em laboratório, sobre as 16 argamassas seleccionadas;

2. ambiente de conservação caracterizado por 23±2°C / 95±5%HR durante 7 dias e por 23±2°C / 65±5%HR durante os restantes dias até ao ensaio - condicionamento proposto nas prENs 1015-10, 1015-11, 1015-16 e 1015-18 [6.2 a 6.5]; este condicionamento, conseguido com protecção com folhas de polietileno durante os primeiros 7 dias, corresponde também a uma das curas recomendadas para obra, quando o tempo está quente e seco, em vários documentos normativos estrangeiros [6.6 a 6.8]; foi adoptado nos ensaios

de caracterização e de comportamento em laboratório, sobre parte das argamassas: P, FV, M1 e CA;

3. ambiente de conservação caracterizado por 23±2°C / 50±5%HR até ao ensaio e pulverização com água 2 vezes por dia, a partir das primeiras **24 h** - uma das curas recomendadas para obra, quando o tempo está quente e seco, em vários documentos normativos estrangeiros [6.6 a 6.8]; este condicionamento foi adoptado nos ensaios de comportamento em laboratório, sobre parte das argamassas: P, FV, FPP, M1, CA e Pa;

4. ambiente de conservação caracterizado por 23±2°C / 50±5%HR até ao ensaio e pulverização com água 2 vezes por dia, a partir das primeiras **2h**; este condicionamento foi adoptado em ensaios de comportamento, em laboratório, sobre a argamassa P;

5. ambiente exterior de Inverno, caracterizado pelas condições de temperatura e humidade que se descrevem em 7.2.4 - condições existentes na EENRevPa no Inverno em que foram feitas as aplicações, sem cuidados de cura; este ambiente foi adoptado em ensaios de caracterização e ensaios de comportamento sobre os painéis aplicados de parte das argamassas: P, FPP, R2 e CA[1].

6. ambiente exterior de Verão, caracterizado pelas condições de temperatura e humidade que se descrevem em 7.2.4 - condições existentes na EENRevPa no Verão em que foram feitas as aplicações, sem cuidados de cura; este ambiente foi adoptado em ensaios de caracterização e ensaios de comportamento sobre os painéis aplicados sobre parte das argamassas: P, FV, R1 e CA[1].

Realizaram-se ainda os ensaios de comportamento de algumas argamassas, aplicadas sobre um suporte absorvente, para verificar a influência desse factor, que corresponde à situação mais comum (reboco aplicado sobre alvenarias de tijolo ou de blocos de betão, por exemplo):

---

[1] - Estas argamassas aplicadas nos muretes têm constituição idêntica às executadas em laboratório e referida no início do capítulo, com excepção da dosagem de água, que, no caso das aplicações em murete foi escolhida livremente pelos aplicadores e que se mediu e registou (ver capítulo 7, quadro 7.7).

7. aplicações sobre placa cerâmica com coeficiente de absorção idêntico ao dos tijolos habitualmente usados em alvenarias no nosso País; estas condições foram adoptadas nos ensaios de comportamento em laboratório, sobre parte das argamassas, conservadas nos ambientes 3 e 4: P, FV, FPP, M1, CA, Pa.

6.2 - SELECÇÃO DOS MATERIAIS E CRITÉRIOS ADOPTADOS

6.2.1 - Critérios gerais

A selecção dos materiais utilizados no estudo teve em conta as respectivas características técnicas, a sua disponibilidade no mercado nacional e a sua tradição de uso em rebocos, em Portugal e noutros países da União Europeia. O seu custo e a sua maior ou menor facilidade de utilização, tendo em conta os processos normais de preparação e aplicação em obra, foram também aspectos tidos em conta, principalmente na selecção das argamassas armadas com fibras e redes e na ponderação de outras soluções não-tradicionais.

As composições das argamassas tradicionais a utilizar no estudo foram seleccionadas com base na experiência já adquirida no LNEC sobre rebocos tradicionais, através de estudos experimentais e observações em obra. A quantidade de água de amassadura das argamassas ensaiadas em laboratório foi definida com base na avaliação da trabalhabilidade, através de aplicações experimentais em tijolos, como se descreve em 7.2.1. Os rebocos não-tradicionais pré-doseados foram seleccionados com base em estudos anteriores realizados no LNEC, que incluíram também campanhas experimentais e visitas a obras e ainda visitas às fábricas onde são produzidos. Nestes casos, a dosagem em água foi a definida pelo fabricante.

A selecção da composição das argamassas com fibras foi realizada com base nos resultados da campanha experimental referida em 6.4.2. Foram seleccionadas as argamassas FV03 (argamassa com fibra de vidro AR, em teor volumétrico de 0,3% do total de argamassa em pasta) e FPPA1 (argamassa com fibra de polipropileno fibrilado, em teor volumétrico de 1% do total da argamassa em pasta), que passaram a ser designadas, ao longo do trabalho, por FV e FPP, respectivamente. Verificou-se que estas argamassas apresentam boas características de trabalhabilidade, plasticidade e homogeneidade; as variações dimensionais, o módulo de

elasticidade e o coeficiente de capilaridade parecem indiciar um comportamento mais favorável que o da argamassa P (de igual composição, no que diz respeito aos constituintes sólidos, mas sem fibras); o comportamento ao fogo e a aderência ao suporte não são afectados negativamente pela adição das fibras.

6.2.2 - Selecção dos constituintes das argamassas tradicionais

O cimento II 32,5 é o mais usado actualmente em rebocos e, de um modo geral, em alvenarias, tendo-se por isso optado pela sua utilização. O cimento tipo I foi uma alternativa também considerada, dado oferecer a vantagem de uma constituição mais homogénea e menos variável, no entanto considerou-se que a sua utilização retiraria alguma aplicação prática ao estudo, já que não é actualmente usado em rebocos excepto em casos isolados e tem características diferentes e, em princípio, menos favoráveis ao seu comportamento. Além disso, o seu fornecimento é quase exclusivamente a granel, o que limita, à partida, a possibilidade do seu uso em rebocos.

A areia seleccionada foi a *areia do rio Tejo,* muito usada em rebocos na região de Lisboa (geralmente misturada com uma areia de areeiro, a areia *amarela de Corroios*). De acordo com a experiência adquirida no LNEC ao longo de vários estudos, a areia do rio *Tejo*, de natureza predominantemente siliciosa e naturalmente lavada, apresenta características relativamente constantes e granulometria adequada. A areia amarela de *Corroios*, não-lavada e com um teor elevado de partículas argilosas é muito apreciada pelos aplicadores por conferir à argamassa maior plasticidade e trabalhabilidade e foi usada para analisar a influência do tipo de areia, na argamassa Pac.

A cal aérea hidratada, de fabrico industrial, escolhida para este estudo, tem vindo a ser usada em estudos de rebocos no LNEC e verificou-se apresentar características consentâneas com normalização estrangeira existente [6.10] e ter condições de fabrico que permitem alguma confiança na constância dessas características.

A cal hidráulica seleccionada foi objecto de um estudo do LNEC para verificação da sua adequabilidade para aplicação em argamassas de reboco [6.11] e é muito usada no nosso País em rebocos, quer exteriores quer interiores.

6.2.3 - Fibras dispersas

As fibras de vidro AR e as fibras de polipropileno fibrilado foram seleccionadas com base nas suas características técnicas, na sua disponibilidade no mercado nacional e nos resultados do estudo preliminar referido em 6.4.2. Incluem-se, além disso, nos tipos de fibras mais usados em rebocos a nível europeu (ver capítulo 5).

6.2.4 - Redes

Tendo em conta a tradição de uso em Portugal e na Europa (ver capítulo 5) e as suas características técnicas, considerou-se suficiente estudar o efeito das redes de fibra de vidro com as duas gamas de dimensão de malha mais usadas em obra e ainda o de uma rede de polipropileno, para ter um grau de comparação com uma rede muito mais deformável.

6.2.5 - Rebocos não-tradicionais

Os rebocos não-tradicionais usados, quer os pré-doseados quer o de ligante misto (aditivado com resina acrílica), são fabricados e comercializados no nosso País e foram objecto de homologação ou de apreciação preliminar no LNEC para verificação da sua adequabilidade à utilização em revestimento de paredes.

6.2.6 - Composições das argamassas

A argamassa de cimento e areia com traço 1:4, escolhida como argamassa padrão (P), apresenta o traço mais usado em rebocos no nosso País. Com efeito, muitas visitas a obras e conversas informais com encarregados e aplicadores permitiram-nos chegar a esta conclusão. Embora esta composição não seja recomendada pelo LNEC e não se considere, à partida, como tendo características muito favoráveis, é aquela cujo comportamento real e a longo

prazo se conhece melhor, dada a frequência da sua utilização em obra nas últimas décadas. Assim, pareceu-nos a mais adequada para termo de comparação.

Outras composições foram adoptadas para análise da influência de vários factores da composição das argamassas, que geralmente se considera afectarem o comportamento dos rebocos. Assim, a argamassa de cimento e areia com traço 1:3 é também frequentemente utilizada em rebocos e o aumento do teor de água de amassadura - como adoptado na argamassa Pa - é correntemente usado para melhorar a trabalhabilidade da argamassa e a rentabilidade da aplicação. Os traços adoptados para as argamassas com cal aérea hidratada e de cal hidráulica são, também, traços relativamente correntes em rebocos no nosso País, e já objecto de estudos no LNEC [6.11 a 6.13].

6.3 - PARÂMETROS ANALISADOS

Analisou-se a influência na susceptibilidade à fendilhação e, em alguns casos, nos outros aspectos importantes do comportamento dos revestimentos referidos no capítulo 2 (ver 2.1) - trabalhabilidade, capacidade de impermeabilização, permeabilidade ao vapor de água, aderência ao suporte, resistência ao choque, compatibilidade com o suporte, reacção ao fogo, aspecto -, dos seguintes factores:

a) Factores de composição

- incorporação de fibras dispersas (fibra de vidro AR - FV; fibra de PP - FPP)
- incorporação de redes (rede de fibra de vidro com 2 aberturas de malha diferentes - R1 e R2; rede de polipropileno - R3)
- teor de água de amassadura (2 relações a/c: P e Pa)
- teor de cimento (2 dosagens: P e P3)
- tipo de ligante (cimento - P, Pa e P3; cimento e cal aérea - CA; cal hidráulica - CH)
- tipo de areia (areia de rio - siliciosa, lavada: P; areia de areeiro - com teor de argila elevado, não-lavada: Pac)
- incorporação de resina (PR)
- composição industrializada (pré-doseados: M1, M2, M3 e M4)

b) Factores de aplicação

- condições de cura (6 condições de cura)
- absorção do suporte (absorvente e não absorvente)

6.4 - PLANO DE ENSAIOS

6.4.1 - Ensaios de caracterização dos constituintes das argamassas

Os principais constituintes das argamassas - cimento, cal aérea, cal hidráulica, areia, fibras, resina - foram objecto de ensaios de caracterização.

6.4.2 - Ensaios preliminares sobre as argamassas com fibras para seleccionar as fibras e dosagens mais adequadas

Foi realizada uma campanha de ensaios sobre argamassas com fibras dispersas incorporadas, com o objectivo de seleccionar os tipos de fibras mais viáveis de entre as disponíveis e as dosagens mais adequadas ao fim em vista. As fibras testadas foram: uma fibra de vidro AR, duas fibras de polipropileno fibriladas e uma fibra acrílica. Os comprimentos das fibras incorporadas variaram entre 5 e 18 mm, conforme os existentes de cada tipo no mercado. Testaram-se três dosagens diferentes de cada, definidas do seguinte modo: determinou-se experimentalmente a máxima dosagem de cada fibra passível de ser facilmente incorporada na massa com amassadura e aplicação pelos métodos correntes (amassadura em misturador mecânico ou em betoneira e aplicação manual); fixaram-se em seguida, para cada fibra, duas dosagens inferiores a esse máximo. A viabilidade de aplicação de cada argamassa foi verificada através da aplicação em tijolos, que foram posteriormente usados para determinação da aderência. Analisaram-se, em cada caso, as principais características obtidas para as argamassas, de forma a poder concluir sobre a sua viabilidade e definir a dosagem mais vantajosa. Deu-se particular relevo aos seguintes aspectos: trabalhabilidade da argamassa

(facilidade de amassadura e de aplicação e alisamento do paramento), comportamento ao fogo, absorção de água e aderência ao suporte.

Os resultados dos referidos ensaios encontram-se no Anexo IV deste trabalho. Uma descrição mais detalhada desses ensaios e das conclusões extraídas encontra-se num relatório do LNEC previamente publicado [6.14].

6.4.3 - Ensaios de envelhecimento das redes de fibra de vidro

Estudou-se a durabilidade face à acção dos álcalis das redes de fibra de vidro caracterizadas. De facto, como foi referido no capítulo 5, existem poucos dados concretos sobre esta característica, que se considera muito importante para o fim em vista. A rede de polipropileno foi também incluída nesta campanha de ensaios, embora este material seja considerado não atacável pelos álcalis, para despistar outras causas eventuais de ataque. Considerou-se também interessante usar os resultados obtidos com esta rede como termo de comparação em relação aos obtidos com redes de fibra de vidro.

Para avaliar a durabilidade das armaduras de rede incorporadas em argamassas realizaram-se ensaios de envelhecimento artificial acelerado (EAA) e ensaios de envelhecimento natural (EN). Estes últimos tiveram como objectivo fundamental aferir, até certo ponto, os resultados dos ensaios de EAA. Estabelecer uma correlação ficará fora das possibilidades deste estudo, já que será necessário ensaiar muito mais redes e *coleccionar* determinações ao longo de muito mais anos para que tal seja possível. Os resultados obtidos durante este estudo serão, contudo, o ponto de partida para essa *colecção*.

6.4.4 - Ensaios de caracterização das argamassas

Fez-se uma caracterização completa das 16 argamassas seleccionadas, com realização dos ensaios correntemente efectuados no LNEC com esse fim. A conservação e ensaios decorreram no ambiente 1, que é o ambiente actualmente usado no LNEC para ensaios de revestimentos de paredes [6.1].

Fez-se também a caracterização, no ambiente 2, de algumas das argamassas seleccionadas - P, FV, M1 e CA -, com o objectivo de avaliar a influência do ambiente de cura nas principais características das argamassas de reboco.

Procurou-se ainda caracterizar algumas das argamassas - P, FV, FPP, R1, R2 e CA -, conservadas em exposição natural na EENRevPa, em condições idênticas àquelas a que estiveram sujeitas as argamassas que lá foram aplicadas.

6.4.5 - Ensaios de comportamento em laboratório

Os ensaios realizados em laboratório destinaram-se, essencialmente, a avaliar a susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida.

Para isso considerou-se fundamental determinar os parâmetros da argamassa que parecem influir mais directamente na susceptibilidade à fendilhação, e a sua variação ao longo do tempo.

Assim, mediram-se e registaram-se em contínuo, ao longo de períodos de tempo considerados adequados para o fim em vista:

- as tensões geradas no seio da argamassa pela restrição da retracção;
- a resistência à tracção e alongamento na rotura da argamassa sujeita às tensões residuais devidas à retracção restringida;
- a retracção livre desde a moldagem.

A partir das curvas assim obtidas determinaram-se ainda:

- a relaxação;

- o módulo de rotura em tracção lenta;
- a deformação na rotura;
- a energia de rotura;
- o *coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda CSAF* em relação à rotura por retracção restringida;
- o *coeficiente de resistência à evolução da fendilhação* por retracção restringida *CREF*.

Estes ensaios foram realizados sobre as 16 argamassas nas **condições de cura 1** referidas em 6.1 e sobre **suporte não-absorvente**; foram também efectuados, sobre 6 argamassas - P, FV, FPP, M1, M2, CA -, nas **condições de cura 2** sobre **suporte não-absorvente**; realizaram-se ainda sobre algumas argamassas aplicadas em **suporte absorvente** (situação 7) nas **condições de cura 1 e 3** - argamassas P, FV, FPP, M1, CA, Pa - e **condições de cura 4** - argamassa P.

A realização dos ensaios nas diversas situações referidas teve como objectivo a análise da influência das condições de cura e da existência de um suporte absorvente nas características estudadas.

6.4.6 - Ensaios na Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes (EENRevPa)

Parte das argamassas seleccionadas foram aplicadas em muretes de alvenaria de tijolo construídos para o efeito na EENRevPa, nas faces Norte e Sul (ver capítulo 9, ítem 9.1). Para algumas delas fizeram-se aplicações no Inverno e no Verão, com o objectivo de avaliar as diferenças de comportamento ocasionadas pelas condições climáticas no momento da aplicação. As fichas destas aplicações constituem o Anexo III deste trabalho.

Os painéis realizados foram os seguintes:

P^V, P^I, FV^V, FPP^I, $R1^V$, $R2^I$, CA^V, CA^I

As notações ^{V} e ^{I} indicam, respectivamente, aplicações no Verão e aplicações no Inverno.

Foram moldados provetes das argamassas aplicadas, com massa recolhida à saída da betoneira - que foram conservados na própria EENRevPa, no mesmo ambiente das aplicações dos muretes - para determinar as características mais relevantes, como referido em 6.3.3.

Nos diversos painéis fizeram-se os seguintes ensaios e determinações:

- trabalhabilidade e facilidade de aplicação e de acabamento da argamassa;
- observações periódicas, para detecção e registo de eventual fendilhação ou outras anomalias;
- medições dos tempos de molhagem e de secagem do suporte sujeito à chuva, através da instrumentação da interface suporte-revestimento;
- aderência ao suporte;
- choques de corpos duros não-cortantes de 3J e de 10J;
- punçoamento dinâmico.

6.4.7 - Observações com microscópio electrónico de varrimento

Observaram-se com microscópio electrónico de varrimento amostras das argamassas P, FV e FPP, com os seguintes objectivos:

- avaliar a influência das condições de aplicação e de cura na microestrutura das argamassas;
- observar a homogeneidade da distribuição das fibras na matriz;
- observar a ligação fibras-matriz;
- observar o estado de superfície das fibras nas zonas de rotura por tracção.

6.5 - MODELO EXPERIMENTAL ADOPTADO

Considerou-se que os ensaios de retracção restringida uniaxiais seriam os que melhor se adaptariam ao estudo da fendilhação por retracção restringida de argamassas de revestimento, tendo em conta que a determinação de parâmetros de relaxação com razoável

equivalência na prática é importante para que estes estudos possam passar, a curto prazo, do domínio quase exclusivamente experimental para o domínio do cálculo.

O modelo experimental adoptado para a avaliação da susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida consistiu em: impedir a retracção desde a moldagem da argamassa até à estabilização, em provetes unidimensionais preparados de modo tão semelhante quanto possível com o processo de aplicação de uma argamassa de revestimento e medir as forças $F_r(t)$ geradas; em paralelo, medir a retracção livre $\varepsilon_r(t)$ em provetes iguais; determinar, nos provetes sujeitos à retracção restringida, a resistência à tracção pura, $R_t(t)$.

Este modelo, que se esquematiza na fig. 6.1, não corresponde totalmente à situação real. De facto, nas situações reais, a retracção não está totalmente impedida (já que a ligação ao suporte tem um certo grau de elasticidade), as tensões são geralmente distribuídas e não concentradas nos extremos e existe um gradiente de tensões na espessura do revestimento. No entanto, esta análise permite avaliar a maior ou menor tendência para a fendilhação por retracção restringida; os parâmetros determinados para o material podem, com alguns cuidados, ser extrapolados para um reboco real, aplicado sobre uma parede real, e constituir dados a introduzir num programa que simule as variações originadas por diferentes condições de fronteira (aderência, rigidez relativa do suporte, por exemplo); as forças medidas podem, ainda, dar indicações importantes sobre a ordem de grandeza das forças geradas em rebocos e transmitidas a alvenarias.

Com base neste modelo e nos parâmetros assim determinados, definiram-se dois critérios principais de fissurabilidade:

1º critério (ver fig. 6.2):

É condição de abertura da primeira fenda ser $\mathbf{F_r(t) \geq R_t(t)}$, ou, o que é o mesmo, $\mathbf{CSAF \leq 1}$, sendo CSAF um ***coeficiente de segurança*** à abertura da 1ª fenda definido por: $CSAF = R_t(t) / F_r(t)$.

Este critério está muito relacionado com o módulo de elasticidade e com a capacidade de relaxação da argamassa ao longo do tempo. De facto, a força *Fr(t)* gerada na argamassa resulta de tensões $\sigma'_r(t)$, tais que:

$$\sigma'_r(t) = E_{cq}(t) . \varepsilon_r(t) \quad < \quad \sigma_r(t) = E(t) . \varepsilon_r(t) \tag{6.1}$$

$$\text{logo } \sigma'_r(t) = \sigma_r(t) - \pi(t) \tag{6.2}$$

Nestas expressões $\sigma_r(t)$ representa a tensão calculada admitindo um comportamento elástico instantâneo, caracterizado pelo módulo de elasticidade instantâneo $E(t)$, $\sigma'_r(t)$ representa a tensão resultante da força $F_r(t)$ medida no ensaio, mais próxima do comportamento real e $\pi(t)$ dá uma medida da tensão dissipada, e portanto da capacidade de relaxação. A relação entre a tensão medida $\sigma'_r(t)$ e a retracção livre $\varepsilon_r(t)$ pode ser descrita por um módulo variável com o tempo, que engloba o efeito da relaxação e que, por simplicidade, designaremos por *módulo de elasticidade equivalente* $E_{eq}(t)$.

2º critério (ver fig. 6.3):

Quanto menor for o ***Coeficiente de Resistência à Evolução*** *da Fendilhação* por retracção restringida, **CREF,** definido como a relação $\mathbf{G/F_{r\ máx}}$, maior é a tendência para a evolução da micro-fendilhação até se atingir o ponto de instabilidade que conduz à rotura.

Com efeito, quanto maior for a área G definida pela curva F_r / δ relativamente à força provocada pela retracção restringida, maior é a energia exigida pelo processo de evolução da micro-fendilhação surgida na argamassa - na sequência da não verificação do 1º critério - até atingir o ponto de instabilidade, portanto este processo torna-se menos provável.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios realizados sobre as 16 argamassas, estabeleceram-se valores limites que definem classes.

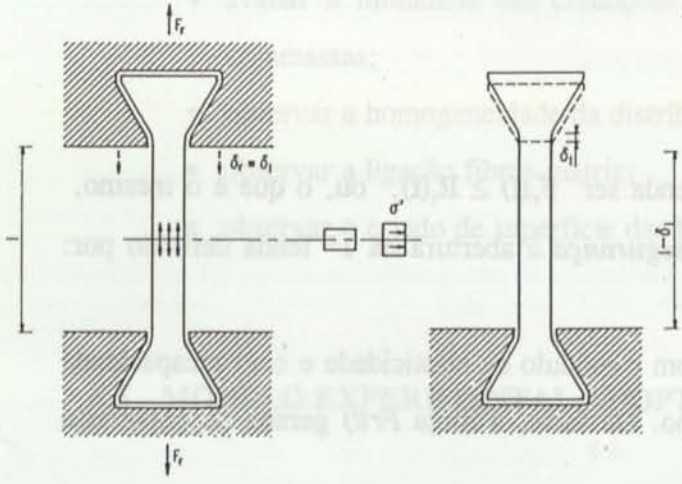


Fig. 6.1 - Esquema do modelo experimental adoptado

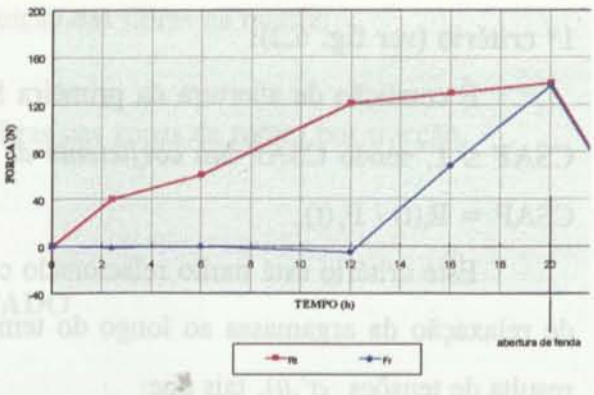
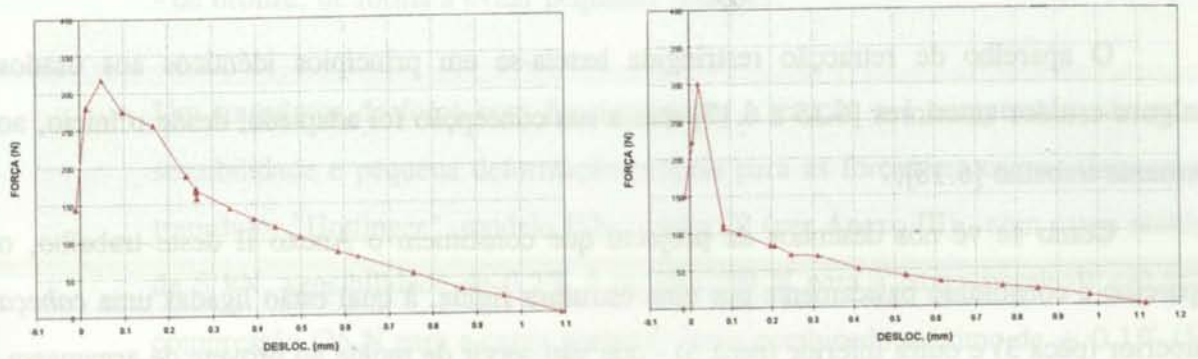


Fig.6.2 - Exemplo de verificação da condição de abertura da 1ª fenda (extraído do presente estudo)



a) b)

Fig. 6.3 - 2ª condição de susceptibilidade à fendilhação (exemplo extraído do presente estudo): para a mesma (aproximadamente) força máxima, a evolução da fendilhação é mais provável para a menor energia de rotura (caso a).

6.6 - EQUIPAMENTO UTILIZADO

Os ensaios necessários às determinações referidas em 6.4.5, correspondentes ao modelo experimental descrito em 6.5, exigiram a concepção e construção de equipamento específico.

Assim, desenvolveu-se um dispositivo capaz de restringir a retracção e medir as forças provocadas, desde a moldagem, num provete de argamassa com uma forma geométrica que permitisse o uso de provetes iguais para determinar a resistência à tracção, a retracção livre e o módulo de elasticidade[2]. O sistema concebido pode também, com alterações simples, ser utilizado para efectuar aquelas determinações, com a vantagem de manter exactamente a forma dos provetes e permitir a realização de medições desde a moldagem, o que não seria possível se se recorresse a equipamento convencional. O sistema de aquisição dos dados obtidos pelo aparelho foi também estudado.

[2]- O projecto do aparelho foi elaborado com o apoio do Engº mecânico João Viegas, Assistente de Investigação do Departamento de Edifícios (DED) do LNEC e com a supervisão do Engº mecânico Toco Emílio, Investigador-Coordenador do Centro de Projecto e Construção de Equipamento (CPCE) do LNEC.

a) Descrição do aparelho

O aparelho de retracção restringida baseia-se em princípios idênticos aos usados nalguns estudos anteriores [6.15 a 6.17] mas a sua concepção foi adaptada, desde o início, ao presente trabalho [6.18].

Como se vê nos desenhos de projecto que constituem o Anexo II deste trabalho, o aparelho é constituído basicamente por uma estrutura rígida, à qual estão ligadas uma *cabeça* superior (peça 3) e outra inferior (peça 5) - que vão servir de molde ao provete de argamassa. A cabeça inferior está fixa à estrutura, enquanto a superior desliza longitudinalmente, sendo este movimento regulado por um parafuso de fixação (peça 10). Entre a cabeça superior e o parafuso de fixação intercalou-se um transdutor de força (peça 22) que mede, em cada momento, a força transmitida pelo provete.

À medida que se vão desenvolvendo os fenómenos que dão origem à retracção, a argamassa vai transmitindo ao transdutor, através da cabeça superior, a força gerada pela restrição do deslocamento longitudinal. Esta acção é equivalente à aplicação de um deslocamento imposto de valor idêntico e sinal contrário à retracção.

Assim, para desempenhar as funções referidas, o aparelho foi construído com os seguintes elementos:

- Uma estrutura suficientemente rígida, já que pequenos deslocamentos ou rotações tenderão a alterar significativamente as tensões geradas. Para isso, usaram-se perfis em U aparafusados - peças 1 e 2 (ver Anexo II) -, formando três lados de um rectângulo cuja quarta aresta é constituída pela cabeça inferior.

- Cabeças capazes de funcionar como peças de molde dos provetes e de impedir os deslocamentos longitudinais, transmitindo a força gerada ao transdutor, sob a forma de tracção pura. Para conseguir este objectivo projectaram-se as peças 3 e 5, de aço inoxidável, já que as tolerâncias dimensionais necessárias à função de molde tornavam pouco aconselhável a cadmiagem ou zincagem recomendada para a maioria das outras peças. A cabeça inferior, fixa à estrutura lateral por aparafusamento, tem o seu posicionamento bem definido na montagem por cavilhas de posicionamento (peças 11). A cabeça superior, por sua vez, tem deslocamento

longitudinal sem atrito, guiado por duas corrediças laterais - peças 4 (ver Anexo II) - de bronze, de forma a evitar pequenas rotações.

- Um transdutor de força com funcionamento à tracção e à compressão, de grande sensibilidade e pequena deformação própria para as forças em causa. Usou-se um transdutor "Hottinger", modelo U2a, - peça 22 (ver Anexo III) - com carga nominal de 5 kN, sensibilidade de 0,2% à tracção (10 N para a carga nominal) e 0,5% à compressão (25 N para a carga nominal), erro combinado máximo de $\pm$ 0,1% (5 N para a carga nominal) e deslocamento inferior a 0,1 mm (para a carga nominal). O transdutor foi montado com rótulas em ambas as extremidades para centragem automática da força transmitida, e para evitar a introdução de forças transversais e momentos flectores. Para reduzir a deformação própria inerente ao funcionamento do transdutor criou-se a possibilidade de o fazer trabalhar na gama mais favorável deste ponto de vista, e não obrigatoriamente a partir do zero, através da introdução de molas - peças 21 (ver Anexo II) -, capazes de transmitir uma força inicial regulável pelo parafuso de fixação - peça 10 (ver Anexo II). Os rolamentos de contacto angular - peça 14 (ver Anexo II) - introduzidos no encastramento do parafuso no apoio superior permitem a transmissão integral da reacção axial para o parafuso, impedindo a introdução de momentos parasitas.

- Um transdutor de deslocamento capaz de medir os deslocamentos entre a cabeça superior - única peça móvel a que o provete fica directamente ligado -, e os lados fixos da estrutura. Com efeito, apesar de se ter procurado evitar a ocorrência de deslocamentos do sistema que funciona como molde, sabe-se que não é possível eliminá-los completamente: as deformações internas do transdutor e a deformabilidade das restantes peças que transmitem a força à estrutura, cuja rigidez também não é, por sua vez, infinita, tenderão sempre a dissipar uma parcela da força provocada pela retracção, já que diminuem o grau de restrição. Portanto, é importante conhecer, em cada momento, a grandeza do deslocamento existente na realidade entre as duas extremidades do provete, para poder quantificar o erro assim introduzido. Para resolver esse problema aplicou-se um transdutor de deslocamento do tipo LVDT ("linearly variable displacement transducer"), entre a cabeça superior

e os lados fixos da estrutura, através de peças em I. O transdutor de deslocamento seleccionado foi um "Sangamo", modelo DF1, com um campo de medida de 1 mm, linearidade da ordem de 0,1% e coeficiente de temperatura inferior a 0,01% / °C.

O protótipo do aparelho, construído nas oficinas do LNEC, foi testado e corrigidas as deficiências encontradas, relacionadas com forças de atrito que contribuíam para dissipar parte das forças [6.13].

Foram construídos mais cinco aparelhos, por uma empresa especializada, passando a dispor-se, assim, de uma bateria de seis dispositivos idênticos, que permitiu testar igual número de provetes em cada ensaio.

b) Descrição do equipamento de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados preconizado para o conjunto de seis aparelhos tem a possibilidade de ler em simultâneo, com periodicidade programável, os seis transdutores de forças e so seis transdutores de deslocamento indutivos e armazenar os valores em memória durante um período de tempo razoável, já que não é conveniente disponibilizar um microcomputador em permanência para ensaios com duração forçosamente elevada.

Foi seleccionado o sistema HP 75000 da "Hewlett Packard", com uma configuração que lhe confere as seguintes características:

- possibilidade de armazenamento local até 1 Mb e de passagem para disquete;
- sistema operativo que lhe permite o funcionamento sem necessidade de um computador auxiliar;
- conversor analógico-digital com 5 1/2 dígitos e 13 kHz;
- canais de medida para termopares;
- 8 canais de extensometria (350 Ohms).

A aquisição de dados foi feita através de "software" [3] que permite o registo das forças e dos deslocamentos medidos pelos transdutores, sempre que a variação daquelas grandezas

[3] - O referido "software" foi preparado para o efeito, pelos Engenheiros Almeida Garrett (Investigador-Coordenador) e Carlos Santos (Bolseiro de Investigação), do CPCE do LNEC.

ultrapassa valores especificados, que foram fixados, para este estudo, em 5 N e 0,005 mm.

O equipamento foi testado antes do início dos ensaios, tendo-se procurado minimizar o atrito no suporte e acertado os tempos necessários aos vários procedimentos, para os homogeneizar. Foram também realizadas medições com os aparelhos *em vazio*, para obter os valores a descontar quando se colocam os aparelhos na vertical, correspondentes ao peso da *cabeça* que fica suspensa do transdutor e para verificar a repetibilidade do ensaio (ver Anexo V).

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 6

[6.1] - VILHENA, António; VEIGA, M. Rosário - **Bases para a homologação de revestimentos pré-doseados de ligante mineral com base em cimento.** Relatório. Lisboa, LNEC, Outubro de 1995.

[6.2] - CEN TC 125 WG2/TG2 - **Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-10.

[6.3] - CEN TC 125 WG2/TG2 - **Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.** Brussels, January 1995. PrEN 1015-11.

[6.4] - CEN TC 125 WG2/TG2 - **Methods of test for mortar for masonry - Part 16: Determination of modulus of transversal strain, elastic modulus and the Poisson's ratio of hardened mortar.** Brussels, June 1990. PrEN 1015-16.

[6.5] - CEN TC 125 WG2/TG2 - **Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened rendering mortar.** Brussels, February 1995. PrEN 1015-18.

[6.6] - GROUPE DE COORDINATION DES TEXTES TECHNIQUES - **Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne. Cahier des clauses techniques.** Paris, CSTB, Cahiers du CSTB, (309), Cahier 2413, mai 1990. Document Technique Unifié (DTU) nº 26.1.

[6.7] - DIN - **Plaster. Plasters made of mortars containing mineral binders. Application.** Berlin, DIN, January 1985. DIN 18 550 - Part 2.

[6.8] - ACI COMMITTEE 524 - **Guide to Portland Cement Plastering.** ACI Materials Journal, Jan.-Feb. 1993, págs. 69-93.

[6.9] - INSTITUTO PORTUGUÊS DE QUALIDADE (IPQ) - **Cimentos. Definições, composição, especificações e critérios de conformidade.** Lisboa, IPQ, 1991. NP 2064.

[6.10] - CARVALHO, Fernanda - **Comportamento mecânico de alvenarias. Influência de alguns parâmetros nas suas resistências à compressão e ao corte.** Lisboa, LNEC, Maio de 1990. Tese para obtenção do grau de Especialista e acesso à categoria de Investigador Auxiliar do LNEC.

[6.11] - VEIGA, M. Rosário; CARVALHO, Fernanda R. - **Caracterização experimental de argamassas com cal hidráulica para revestimento de paredes.** Relatório. Lisboa, LNEC, Março de 1994.

[6.12] - VEIGA, M. Rosário - **Caracterização experimental de argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos.** Relatório. Lisboa, LNEC, Dezembro de 1993.

[6.13] - VEIGA, Maria do Rosário; CARVALHO, Fernanda - **Argamassas de revestimento na reabilitação do património urbano.** "In" 2º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Comunicações. Lisboa, LNEC, Junho/ Julho de 1994. Vol. I, págs. 195-206.

[6.14] - VEIGA, M. Rosário - **Comportamento de argamassas armadas com fibras em revestimentos exteriores de paredes. Caracterização dos constituintes e das argamassas. Critérios de selecção.** Relatório. Lisboa, LNEC, Fevereiro de 1994.

[6.15] - TAMIN, P. F. - **Étude du comportement mécanique des revêtements de façade. Enduits.** Thèse de doctorat. Paris, École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), décembre 1986.

[6.16] - PENEV, D.; KAWAMURA, M. - **A laboratory device for restrained shrinkage fracture of soil-cement mixtures.** RILEM. Materials and Structures, 25, 1992, pp. 115-120.

[6.17] - DUPIN, I.; DÉTRICHÉ, C. H. - **Analyse expérimentale des effets du retrait empêché sur des couches minces de mortier.** Revue Technique du bâtiment et des constructions industrielles, Paris, nº 124, janvier-février 1988, pp. 37-43.

[6.18] - VEIGA, M. Rosário - **Aparelho para medição de tensões originadas pela restrição da retracção em argamassas para revestimento de paredes. Concepção, projecto e testes realizados.** Relatório. Lisboa, LNEC, Janeiro de 1994.

CAPÍTULO 7

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

7.1 - Descrição e Caracterização dos Constituintes das Argamassas

7.2 - Constituição e Caracterização das Argamassas

7.3 - Apreciação dos Resultados da Caracterização das Argamassas

Bibliografia do Capítulo 7

7.1 - DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS

7.1.1 - Ligantes

O principal ligante usado nas argamassas foi o cimento portland composto, classe 32,5 (II 32,5). As suas características, que, com excepção da massa volúmica aparente, foram determinadas no Núcleo de Aglomerantes e Betões do Departamento de Materiais de Construção do LNEC, sintetizam-se no Quadro 7.1 onde se indicam também as Normas e documentos normativos em que se basearam os ensaios [7.1 a 7.7] e os valores especificados na NP 2064 [7.8] para o tipo de cimento usado.

Quadro 7.1 - Características do cimento II 32,5 utilizado

CARACTERÍSTICAS	IDADE	RESULTADOS		DOCUMENTO NORMATIVO	ESPECIFICAÇÃO	OBSERVAÇÕES
		1º Lote	2º Lote			
Massa volúmica aparente (kg/m^3)	-	980	980	Relatório LNEC	-	-
Massa volúmica das partículas (kg/m^3)	-	3 000	3040	E 64	-	-
Superfície específica Blaine (cm^2/g)	-	3 690	3 460	E 65	-	-
Resistência à tracção por flexão (MPa)	2 7 28	1,9 3,7 5,5	2,7 4,0 5,4	NP EN 196-1	-	-
Resistência à compressão (MPa)	2 7 28	8,3 19,7 30,1	14,6 24,2 35,2		≥ 16 ≥ 32,5	O cimento usado na 1ª fase apresenta resistência inferior à especificada aos 28 dias
Expansibilidade (mm)	-	1	2,5	NP EN 196-3	≤ 10	-
Princípio de presa	-	2h 45	2h 20		≥ 60 min	-
Teor de sulfatos (%)	-	2,84	2,6	NP EN 196-2	≤ 3,5 *	-
Teor de cloretos (%)	-	0,02	0,01	NP EN 196-21	≤ 0,10	-

* - só para II 32,5 R.

Utilizou-se cimento de dois lotes diferentes: um nos ensaios preliminares das argamassas com fibras e o outro nos restantes ensaios. Assim, apesar dos dois lotes terem características distintas, esse facto não afecta a possibilidade de comparação entre os resultados obtidos, já que só vão ser comparadas argamassas preparadas com o mesmo lote de cimento.

Na argamassa CA usou-se uma cal aérea hidratada em pó, de fabrico industrial nacional, com massa volúmica aparente de 400 kg/m^3 . Na argamassa CH usou-se uma cal hidráulica natural nacional, com massa volúmica aparente de 790 kg/m^3. Estas cais foram já usadas em diversos estudos de rebocos no LNEC, como referido em 6.6.2, não se tendo, por isso, considerado necessário realizar mais ensaios de caracterização. As massas volúmicas aparentes foram determinadas segundo o método preconizado em relatório do LNEC [7.1]

Na argamassa PR usou-se uma resina acrílica de poliacrilato co-estireno, com massa volúmica de 1000 kg/m^3 e pH de 9,8. Os métodos de ensaio usados nestas determinações foram os descritos nas Fichas de Ensaio do LNEC FE Pa 05, FE Pa 06 e FE Pa 12, que constam do Anexo I.

7.1.2 - Areia

A areia utilizada na maioria das argamassas (todas com excepção da Pac, da PR e das pré-doseadas) foi *areia do rio Tejo*, com uma curva granulométrica que se representa na fig. 7.1, em que também se indicam os limites superior e inferior preconizados pela Norma inglesa BS 1199:1976 [7.9].

Na argamassa Pac usou-se *areia amarela de Corroios*, cuja curva granulométrica está também representada na fig. 7.1.

As restantes características das areias apresentam-se no quadro 7.2.

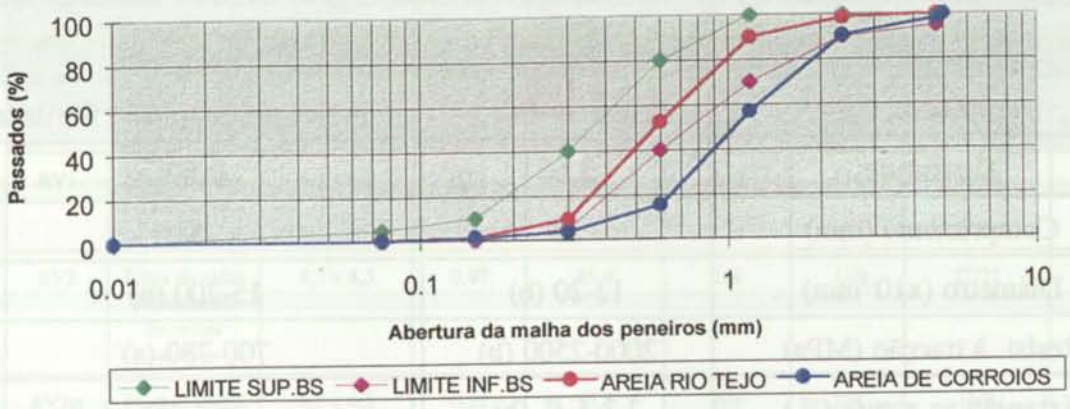


Fig. 7.1 - Curvas granulométricas das areias utilizadas

Quadro 7.2 - Características das areias utilizadas

TIPO DE AREIA	BARIDADE (kg/m^3)	MÓDULO DE FINURA	TEOR DE PARTÍCULAS MUITO FINAS (%)
Areia do rio Tejo	1430	2,45	0,5
Areia amarela de Corroios	1360	3,35	5,4

Os métodos de ensaio adoptados para as determinações realizadas sobre as areias foram os preconizados na NP 1379 (1976) [7.10] - para a análise granulométrica -, na NP 955 (1973) [7.11]- para a baridade das areias - e na NP 86 (1972) [7.12], para o teor de partículas finas. O módulo de finura foi calculado pelo método referido por Sousa Coutinho [7.13], como a soma das percentagens totais que ficaram retidas em cada peneiro, dividida por 100.

7.1.3 - Fibras

As características das fibras seleccionadas, determinadas no LNEC, cedidas pelos respectivos fabricantes ou indicadas em bibliografia, apresentam-se no Quadro 7.3.

Quadro 7.3 - Características das fibras seleccionadas

CARACTERÍSTICAS	FV	FPP
Natureza da fibra	Fibra de vidro	Fibra de polipropileno fibrilada
Densidade	2,60	0,89
Comprimento (mm)	18	5
Diâmetro ($x10^{-3}$mm)	12-20 (b)	15-200 (b)
Resist. à tracção (MPa)	2000-2500 (b)	700-780 (a)
Extensão na rotura (%)	2-3,5 % (b)	24% (a)
Módulo de Elasticidade (MPa)	70 000-80 000 (b)	3450 (a)

(a) - Valores cedidos pelo fabricante
(b) - Valores obtidos em bibliografia [7.14, 7.15]

7.1.4 - Redes

7.1.4.1 - Caracterização

Caracterizaram-se várias redes, através da realização dos seguintes ensaios:

- determinação da massa por unidade superfície;
- determinação da espessura;
- determinação do teor de cinzas a 450°C;
- determinação da resistência à tracção e do alongamento na rotura.

Estes ensaios foram realizados segundo as técnicas usadas habitualmente no LNEC para redes, descritas em relatório [7.16] e os seus resultados sintetizam-se no quadro 7.4.

Quadro 7.4 - Características das redes seleccionadas

REDE	NATUREZA DA REDE	DIMENSÃO DA MALHA (mmxmm)	ESPESSURA (mm)	TEOR DE CINZAS A 450°C (%)	MASSA POR UNIDADE DE SUPERFÍCIE (g/m²)		RESISTÊNCIA À TRACÇÃO (N/mm)	ALONGAMENTO NA ROTURA (%)
					TOTAL	VIDRO	(teia/trama)	(teia/trama)
RV1	Fibra de vidro c/tratamento de PVC	4,5 x 4,5	0,71	49,6	230	114	37/46	3,9/6,0
RV2	Fibra de vidro c/tratamento de resina acrílica	4,5 x 4,5	0,47	85,6	128	110	27/21	3,3/2,2
RV2st	Fibra de vidro s/tratamento anti-alcalino	4,5 x 4,5	0,33	95,1	105	104	16/8	3,5/1,4
RV3	Fibra de vidro c/ tratamento de resina acrílica	4,5 x 4,5	0,47	88,9	128	107	30/28	4,6/5,4
RV4	Fibra de vidro c/ tratamento de resina acrílica	10 x 10	0,65	83,9	126	111	21/17	6,8/5,3
RP	Fibra de polipropileno	4 x 4	0,98	0,45	86	-	6/4	15,9/31,8

7.1.4.2 - Ensaios de envelhecimento

Os ensaios de Envelhecimento Artificial Acelerado (EAA) foram realizados de acordo com a técnica descrita em dois documentos da União Europeia para Apreciação Técnica na Construção (UEAtc) [7.17 e 7.18] e consistiram em mergulhar provetes de redes numa emulsão alcalina obtida por adição de cimento a água destilada, numa concentração definida - 250g de cimento para 1 l de água - durante 90 dias, verificando, periodicamente, que o pH se mantém constante com valor de cerca de 12,5 e repetir, de seguida, o ensaio de tracção e alongamento na rotura.

Os ensaios de Envelhecimento Natural (EN) consistiram em incorporar tiras de redes idênticas às usadas nos EAA numa argamassa com a composição da argamassa P, conservar os provetes assim obtidos no Laboratório de Ensaios de Revestimentos de Paredes do LNEC (LERevPa), num ambiente de 23°C / 50%HR durante 28 dias e pendurá-los, de seguida, na Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes do LNEC (EENRevPa), em

exposição natural, até à data de ensaio. Foram realizados ensaios a 1 mês (logo após o período de conservação em ambiente de laboratório), 3 meses, 1 ano e 3 anos (ver figs. 7.2 a 7.5).

Os resultados obtidos sintetizam-se no quadro 7.5 e visualizam-se nos gráficos da fig. 7.6 a) e b).

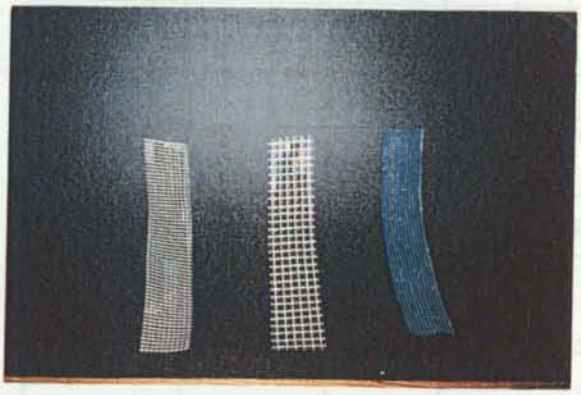


Fig. 7.2 - Redes. Aspecto geral dos provetes.

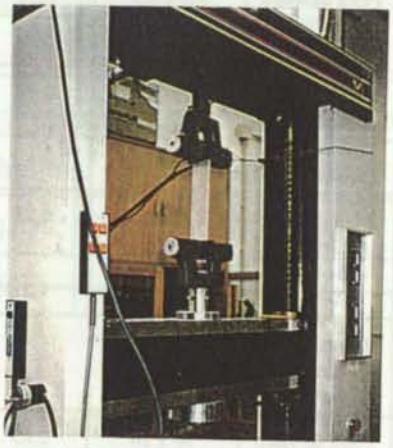


Fig. 7.3 - Redes. Ensaio de tracção.



Fig. 7.4 - Redes. EAA.

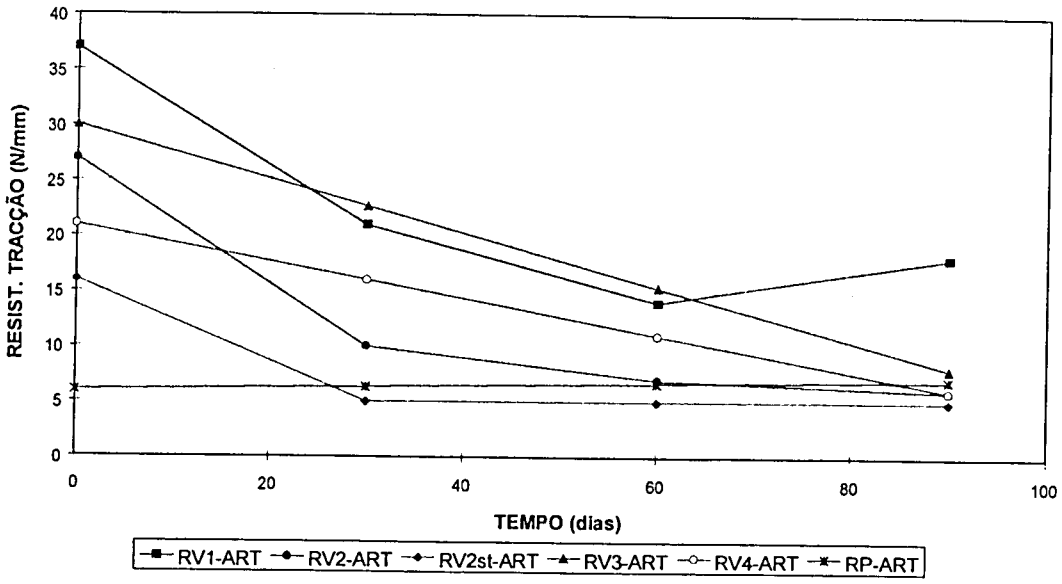


Fig. 7.5 - Redes. EN.

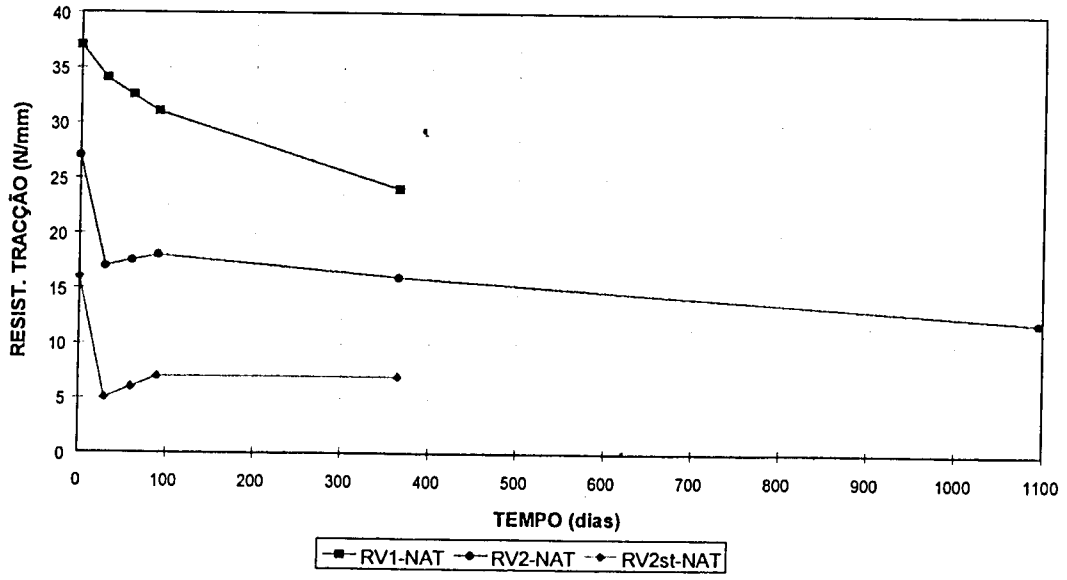
Quadro 7.5- Envelhecimento por ataque alcalino de redes de reforço de revestimentos de paredes

DESIGNAÇÃO DA REDE	NATUREZA DA REDE	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO (N/mm) (teia/trama)									ALONGAMENTO NA ROTURA (%) (teia/trama)									
		NOVA	APÓS ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL ACELERADO			APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL (só teia)					NOVA	APÓS ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL ACELERADO			APÓS ENVELHECIMENTO NATURAL (só teia)				
			30 d	60 d	90 d	30 d	90 d	1 A *		3 A		30 d	60 d	90 d	30 d	90 d	1 A *		3 A
								1ª c	2ª c								1ª c	2ª c	
RV1	Fibra de vidro c/tratamento de PVC	37/46	21/27	14/18	18/22	34	31	23	24	20	3,9/6,0	2,3/2,7	1,9/2,9	1,7/2,2	3,1	3,4	-	1,9	2,4
RV2	Fibra de vidro c/tratamento de resina acrílica	27/21	10/7	7/10	6/9	17	18	18	14	12	3,3/2,2	1,1/0,7	0,9/1,5	1,0/1,2	2,1	2,2	2,3	1,7	2,5
RV2st	Fibra de vidro s/tratamento	16/8	5/2	5/3	5/2	5	7	-	7	-	3,5/1,4	1,7/1,9	1,7/2,5	1,6/3,8	2,6	3,0	-	-	-
RV3	Fibra de vidro c/ tratamento de resina acrílica	30/28	-	-	8/9	-	-	-	-	-	4,6/5,4	-	-	2,0/2,0	-	-	-	-	-
RV4	Fibra de vidro c/ tratamento de resina acrílica	21/17	-	-	7/4	-	-	-	-	-	6,8/5,3	-	-	1,6/1,1	-	-	-	-	-
RP	Fibra de polipropileno	6/4	-	-	7/4	-	-	-	-	-	15,9/31,8	-	-	16,2/32,5	-	-	-	-	-

* - Foram feitas 2 campanhas de envelhecimento natural de 1 ano: uma em 1993 - 1ª c - e outra em 1994 - 2ª c.



a)



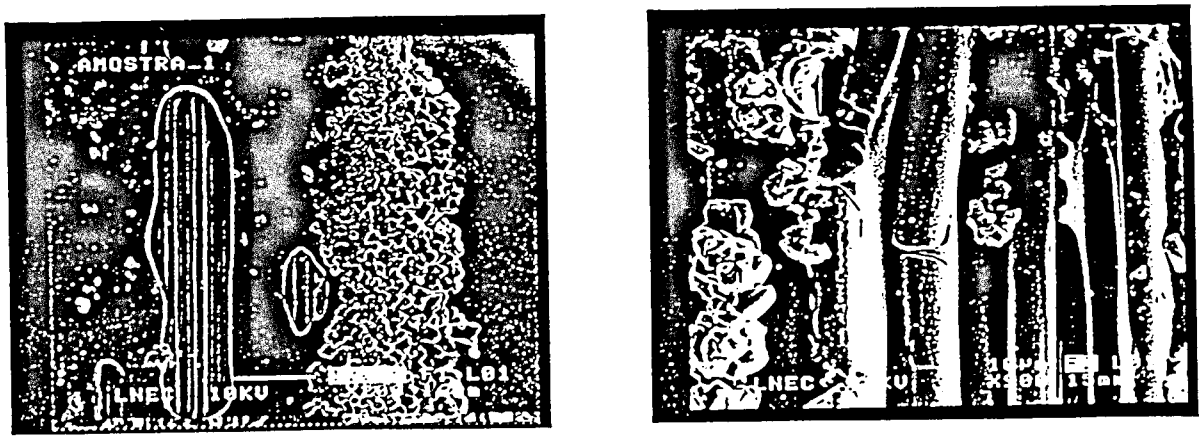
b)

Fig. 7.6 - Evolução da resistência à tracção de redes, no sentido da teia (longitudinal), sujeitas a envelhecimento a) EAA; b) EN.

7.1.4.3 - Apreciação dos resultados de envelhecimento

A observação dos resultados apresentados no quadro 7.5 e na fig. 7.6 permite concluir que o EAA conduz a uma degradação rápida das redes de fibra de vidro com tratamento anti-alcalino, que perdem resistência e elasticidade de forma muito acentuada durante os 1°s 60 dias, parecendo depois estabilizar. A rede sem tratamento tem uma degradação muito mais rápida. Como se esperava, a rede de polipropileno não sofre perda sensível de resistência nem de elasticidade.

No ensaio de EAA, a rede com tratamento de PVC parece apresentar melhor resistência aos álcalis, no entanto esta melhoria não foi confirmada no EN. Por outro lado, observações com microscópio electrónico sobre as redes RV1 e RV2 [7.19] mostram que o tratamento de resina acrílica, mais fino, envolve os filamentos de rede, enquanto o de PVC envolve a rede no seu conjunto. Assim quando, devido ao ataque alcalino, se abre um pequeno furo, todos os filamentos ficam expostos e a degradação, a partir daí, pode ser mais rápida (ver fig. 7.7).



a) b)

Fig. 7.7 - Imagens de observações com microscópio electrónico de varrimento de redes de fibra de vidro após envelhecimento artificial acelerado, segundo a técnica preconizada, durante 90 dias.
a) Rede RV1 (com protecção anti-alcalina de PVC): perfuração. b) Rede RV2 (com protecção anti-alcalina por indução de resina acrílica): desgaste.

O EN das redes de fibra de vidro, embora menos gravoso que o EAA, como seria de esperar, é, apesar disso, muito rápido, principalmente se tivermos em conta que o 1º ano - 1993 e 1994, para as 1ª e 2ª campanhas, respectivamente - foi bastante seco. Aliás, é significativo que uma grande parte da perda de resistência se dê durante os primeiros 30 dias, ou seja, durante a secagem da argamassa. A evolução considerável ao fim do 3º ano, para a rede RV2, é explicável por se ter tratado de um ano muito chuvoso (1995/1996).

Os resultados do EN são, até ao presente, inferiores aos do EAA, embora não estejam tão longe como se esperava. De qualquer modo, os dados disponíveis até ao momento parecem apontar para a manutenção de uma resistência residual das redes de fibra de vidro, que poderá ser suficiente para garantir uma melhoria significativa da resistência à fendilhação da argamassa armada. Na realidade, a carbonatação, que se processa com bastante rapidez nas argamassas de reboco, reduz a alcalinidade, contribuindo para a diminuição dos riscos de ataque.

Para o prosseguimento do estudo seleccionaram-se as redes RV3, RV4 e RP, por serem as que, tendo as características requeridas, nos foram mais facilmente disponibilizadas no mercado nacional (ver fig. 7.2). As argamassas armadas com estas redes foram designadas, respectivamente, por R1, R2 e R3.

7.2 - CONSTITUIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

7.2.1 - Definição da constituição dos rebocos tradicionais e das argamassas com fibras

A constituição das argamassas de matriz tradicional foi definida, a partir dos traços previamente adoptados, de forma a serem obtidas trabalhabilidades aceitáveis em obra, para aplicação manual à colher. Esta trabalhabilidade, experimentada caso a caso através de aplicções em tijolos, verificou-se corresponder, na generalidade dos casos, a uma consistência de cerca de 70% no ensaio de espalhamento realizado conforme descrito em 7.2.2. Para cada argamassa foram realizadas várias amassaduras experimentais, variando o teor de água de amassadura, até se obter a trabalhabilidade desejada; fixou-se o teor de água correspondente, que passou a caracterizar cada argamassa.

7.2.2 - Caracterização das argamassas em pasta

A amassadura das argamassas para os ensaios realizados em laboratório foi efectuada segundo o método habitualmente usado no LNEC e descrito em relatório [7.1]. A amassadura das argamassas destinadas a aplicações na EENRevPa foi efectuada em betoneira, pelos aplicadores, como é corrente em obra. Nas argamassas com fibras, a fibra de PP foi adicionada aos restantes constituintes secos e misturada previamente com estes antes da adição de água, enquanto a fibra de vidro AR foi adicionada no fim. Com efeito, verificou-se que a fibra de PP seleccionada é facilmente miscível a seco, e tem boa resistência ao atrito durante a amassadura, enquanto a fibra de vidro pode sofrer degradação com o atrito entre os constituintes secos e é mais facilmente miscível na pasta já parcialmente amassada.

A caracterização das argamassas em pasta consistiu, fundamentalmente, na determinação da massa volúmica aparente e da consistência por espalhamento ou, no caso dos rebocos não-tradicionais pré-doseados, pelo método Baronnie (ver fig. 7.8). No entanto, os valores da consistência foram usados apenas para caracterização das argamassas e não para avaliar a sua trabalhabilidade, já que para esse efeito se recorreu à aplicação sobre tijolos de cada uma das argamassas (ver fig. 7.9), como se referiu atrás.

A massa volúmica aparente das argamassas foi determinada com base na técnica descrita na Ficha de Ensaio do LNEC FE Pa 05 (ver Anexo I), mas utilizando como utensílio de medida um recipiente cilíndrico de 1 l de capacidade.

A consistência por espalhamento das argamassas foi determinada por ensaios de espalhamento efectuados segundo a técnica descrita na NP 414 [7.20], mas utilizando o molde tronco-cónico definido na Norma Inglesa BS 4551:1980 [7.21]. Este procedimento é o habitualmente usado no LNEC para argamassas tradicionais.

A consistência Baronnie das argamassas foi determinada de acordo com a técnica descrita em Relatório do LNEC [7.1], que consiste, fundamentalmente, em encher sucessivamente tubos de uma série de dez com diâmetros crescentes entre 10 e 55 mm, abrir o obturador de que estão providos os tubos e verificar o tempo de queda. A consistência Baronnie é dada pelo número correspondente ao tubo de diâmetro máximo através do qual a pasta não cai ao fim de 5 segundos.



a) b)

Fig. 7.8 - Avaliação da consistência das argamassas
a) ensaio de espalhamento; b) ensaio de consistência "Baronnie"



Fig. 7.9 - Avaliação da trabalhabilidade das argamassas

Relativamente a duas das fibras utilizadas avaliou-se também a capacidade de homogeneização na pasta da fibra incorporada. Para isso, recolheram-se duas amostras de 25 cm^3 de argamassa de zonas diferentes de dois moldes, logo após a moldagem, fez-se a separação das fibras por uma técnica de decantações sucessivas e determinou-se a proporção volumétrica de fibras em relação ao volume total de argamassa.

Os resultados das referidas determinações, para as argamassas preparadas em laboratório, e para as argamassas preparadas na EENRevPa pelos métodos usuais em obra, apresentam-se, respectivamente, nos quadros 7.6 e 7.7.

QUADRO 7.6 - Síntese dos ensaios de caracterização das argamassas em pasta. Ensaios no LERevPa

ARGAMASSA	MASSA VOLÚMICA APARENTE (kg/m^3)	CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO (%)	RELAÇÃO ÁGUA/LIGANTE		TEOR VOLUMÉTRICO DE FIBRAS EM AMOSTRAS RECOLHIDAS (%)	OBSERVAÇÕES
			Ponderal	Volumétrica		
P	2010	77	1,15	1,12	-	Muita exsudação
FV	1590	87	1,15	1,12	0,30-0,25-0,28-0,33	Fibras facilmente homogeneizáveis na pasta. Sem exsudação.
FPP	1570	84	0,97	0,95	1,10-0,80-0,90-1,12	Fibras facilmente homogeneizáveis na pasta. Sem exsudação.
R1	2030	73	1,15	1,12	-	Muita exsudação
R2	2030	73	1,15	1,12	-	Muita exsudação
R3	2030	73-73	1,15	1,12	-	Muita exsudação
M1	1680	6 *	-	-	-	Pasta homogénea e coesa
M2	1750	5 *	-	-	-	Pasta homogénea e coesa
M3	1630	6 *	-	-	-	Pasta homogénea e coesa
M4	1940	3 *	-	-	-	Pasta homogénea e coesa
PR	1710	35	0,40	0,39	-	Pasta homogénea e coesa mas difícil de trabalhar (muito consistente)
CA	1990	114	1,32	0,94	-	Pasta homogénea e coesa
CH	2020	88	1,67	1,32	-	Pasta homogénea e coesa
Pa	2000	105	1,30	1,27	-	Muita exsudação
Pac	2084	71	1,09	1,07	-	Pasta homogénea e muito plástica
P3	2080	80	0,84	0,82	-	Alguma exsudação

* - Consistência Baronnie

QUADRO 7.7 - Síntese dos ensaios de caracterização das argamassas em pasta. Ensaios na EENRevPa

ARGAMASSA		MASSA VOLÚMICA APARENTE (kg/m^3)	CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO (%)	RELAÇÃO ÁGUA/LIGANTE (ponderal)	OBSERVAÇÕES
P	VERÃO	2000	112	1,19	Houve uma zona que descolou e teve que ser refeita
	INVERNO	2090	92	0,83	Houve dificuldade em fazer presa *(em puxar)*
FV	VERÃO	1993	124	1,16	Houve uma zona que descolou e teve que ser refeita
FPP	INVERNO	2034	75	0,68	Dificuldades de aderência
R1	VERÃO	2013	106	1,10	A rede foi fácil de aplicar, só causando algumas dificuldades nas sobreposições dos topos
R2	INVERNO	2091	85	0,83	A rede foi difícil de aplicar; houve descolamentos.
CA	VERÃO	2003	122	1,15	Sem dificuldade
	INVERNO	2072	93	0,81	Sem dificuldade

7.2.3 - Caracterização das argamassas endurecidas

Os ensaios realizados sobre provetes prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm das argamassas endurecidas foram os seguintes:

- determinação da massa volúmica aparente pelo menos aos 7 e aos 28 dias de idade;
- determinação da resistência à tracção por flexão pelo menos aos 7 e aos 28 dias de idade;
- determinação da resistência à compressão pelo menos aos 7 e aos 28 dias de idade;
- determinação das variações dimensionais e ponderais entre os 3 e os 90 dias de idade;
- determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade aos 28 dias de idade;
- determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo menos aos 28 dias de idade.

Estes ensaios foram realizados com base nas técnicas habitualmente usadas no LNEC e descritas em relatório [7.1].

Os ensaios de variações dimensionais foram realizados com medições automáticas, desde a desmoldagem - com 1 dia de idade para a maioria das argamassas, com excepção das argamassas CA e CH, que só puderam ser desmoldadas com 3 dias de idade - usando um dispositivo de 6 comparadores ligados a um sistema de aquisição de dados programado para leituras periódicas (ver fig. 7.10).

Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico foram realizados no aparelho "Zeus Resonance Meter" do LERevPa (ver fig. 7.11).



Fig. 7.10 - Determinação das variações dimensionais por retracção



Fig. 7.11 - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

As resistências à tracção por flexão e à compressão foram determinadas na máquina Universal "Lloyds Instruments" do NCCt/DED do LNEC, com velocidades de aplicação das forças de, respectivamente, 50 N/s e 100 N/s (ver figs. 7.12 e 7.13). Esta máquina permitiu ainda o traçado das curvas força-deslocamento durante os ensaios e o cálculo do trabalho de rotura, através da determinação automática da área definida pela curva (ver capítulo 8 - gráfs. 8.37 a 8.40). As deformações do provete são calculadas a partir dos deslocamentos das garras.



Fig. 7.12 - Ensaio de compressão

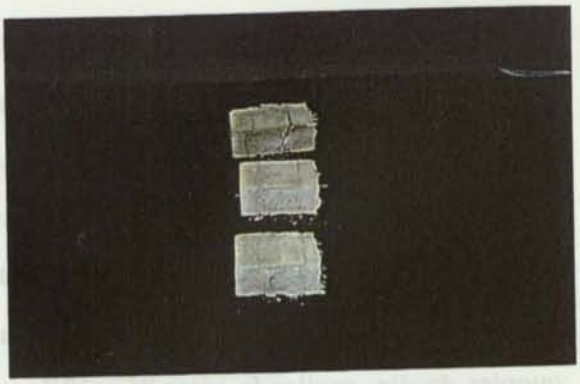


Fig. 7.13 - Provetes de argamassa FV após ensaio de tracção, apresentando fendilhação múltipla

Estes ensaios foram realizados sobre provetes das 16 argamassas seleccionadas, conservados no ambiente 1; parte destes ensaios foram realizados também sobre provetes das argamassas P, FV, M1 e CA conservadas no ambiente 2 e sobre as argamassas - P, FV, FPP, R1, R2 e CA - preparadas em obra e aplicadas na EENRevPa.

Realizaram-se também ensaios de aderência ao suporte de todas as argamassas aplicadas sobre tijolos (ver fig. 7.15), segundo a técnica descrita na Ficha de Ensaio do LNEC FE Pa 36 (ver Anexo I).

Os provetes para os ensaios de caracterização no ambiente 2 foram conservados nas seguintes condições: durante 7 dias permaneceram no LERevPa envolvidos em folhas de polietileno, de forma a garantir-se um ambiente muito húmido, que se verificou manter-se a cerca de 95% HR; no período restante, até às datas de ensaio, foram conservados numa câmara climática, programada para garantir um ambiente de $23 \pm 0{,}5$°C / 65 ± 1%HR (ver fig. 7.14).

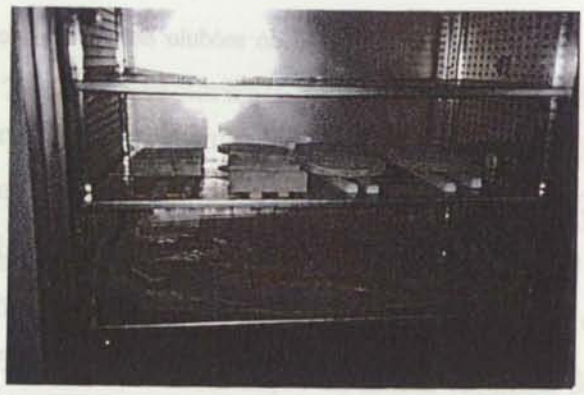


Fig. 7.14 - Provetes introduzidos na câmara climática para a 2ª fase do ambiente 2.

As condições climáticas na EENRevPa, registadas por um termo-higrógrafo mantido no local, na altura das aplicações e da cura dos provetes, eram, em síntese, as seguintes: Durante as duas primeiras semanas das aplicações de Verão, registaram-se humidades que oscilavam diariamente entre cerca de 80 e 20% de HR e temperaturas entre 20 e 40°C. Nas duas semanas seguintes, o tempo manteve-se seco e quente, mas com oscilações de menor amplitude, variando entre 80 e 35% de HR e 20 e 30°C de temperatura.

Os registos de temperatura e humidade realizados na altura das aplicações de Inverno, mostram, na primeira semana, humidades relativas variando entre 85 e 50% de HR e temperaturas entre 7 e 15°C. Nas três semanas seguintes a temperatura manteve-se, em regra, no mesmo intervalo, mas a humidade relativa atingiu valores mais baixos durante as horas quentes do dia, oscilando entre 85 e 30%.

Os resultados destes ensaios apresentam-se nos quadros 7.8 a 7.10.

Determinou-se a reacção ao fogo da argamassa FPP que, por conter fibras orgânicas, poderia apresentar problemas neste aspecto. Os provetes para estes ensaios foram conservados no ambiente 1. O ensaio foi executado de acordo com o método descrito na Especificação LNEC E 365-1990 [7.22], e o resultado confirmou que a argamassa se mantém da classe de reacção ao fogo M0, ou seja, é, como a argamassa sem fibras, um material não combustível.



a)



b)

Fig. 7.15 - Ensaio de aderência ao suporte a) realização do ensaio; b) provetes após ensaio.

QUADRO 7.8 - Síntese dos ensaios de caracterização das argamassas endurecidas. Ensaios em laboratório, ambiente 1

ARGAMASSA	MASSA VOLÚMICA APARENTE (kg/m^3)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	VARIAÇÕES DIMENSIONAIS (mm/m)	COEFICIENTE DE CAPILARIDADE ($g/dm^2.min^{1/2}$)	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MPa)	PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (ng/m.s.Pa)	PERMEÂNCIA AO VAPOR DE ÁGUA (espessura da camada de ar de difusão equivalente a 1 cm de arg.) (m)	ADERÊNCIA A SECO (MPa)
IDADE (dias)	3-7-28	3-7-28	3-7-28	2[1] -7-14-28-90	28	3-7-14-28-90-120-180	28	28	28
P	1810-1880-1880	1,1-1,1-1,1	2,4-3,1-3,2	0,03-0,20-0,22-0,23-0,25	16,2	6375-6460-6600-6165-6410-6570	22,4	0,085	0,07 (a)
FV	1630-1620-1640	0,9-1,0-0,9 (FM)	2,0-3,1-3,2 (FM)	0,08-0,24-0,29-0,31-0,34	12,4	4080-3900-3960-3630-3695-3815-3795	31,6	0,060	0,13 (a+c)
FPP	1680-1550-1520	0,9-0,7-0,9 (IFM)	2,5-1,7-2,4 (IFM)	0,09-0,26-0,30-0,34-0.38	11,0	5515-4415-4460-4150-4325-4380-4460	27,5	0,070	0,05 (c)
M1[2]	*-1620-1620	*-3,0-3,3	*-8,2-9,3	0,16-0,70-0,91-0,89-1,16	2,3	*-4205-*-4240-*-*-*	15,4	0,122	0,79 (a+c)
M2[2]	*-1750-1740	*-2,3-2,7	*-6,5-7,5	0,11-0,30-0,43-0,47-0,51	2,9	*-*-*-10300-*-*-*	15,5	0,125	0,49 (c)
M3[2]	1770-1740-1710	1,5-2,5-2,7	5,6-8,1-8,6	0,16-0,59-0,75-0,84-1,04	4,3	9540-10170-*-10180-10255-*-*-*	*	*	0,56 (a+c)
M4[2]	*-1700-1690	*-1,5-1,6	*-4,0-4,5	0,18-0,41-0,55-0,60-0,61	*	*-*-*-5900-*-*-*	*	*	0,31 (c)
PR[2]	*-1800-1750	*-6,5-8,2	*-16,2-20,9	0,02-0,15-0,37-0,48-0,57	0,4	*-*-*-10000-*-*-*	8,7	0,21	0,58 (c)

(1) - 1 dia após desmoldagem
(2) - Ensaios realizados no âmbito de outro estudo
(FM) - Fendilhação múltipla em todos os provetes; (IFM) - Início de fendilhação múltipla nalguns provetes
(a) - Rotura adesiva; (c) - Rotura coesiva
* - Valor não determinado

QUADRO 7.8 (continuação) - Síntese dos ensaios de caracterização das argamassas endurecidas. Ensaios em laboratório, ambiente 1

ARGAMASSA	MASSA VOLÚMICA (kg/m^3)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	VARIAÇÕES DIMENSIONAIS (mm/m)	COEFICIENTE DE CAPILARIDADE ($g/dm^2.min^{1/2}$)	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MPa)	PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (ng/m.s.Pa)	PERMEÂNCIA AO VAPOR DE ÁGUA (espessura da camada de ar de difusão equivalente a 1 cm de arg.) (m)	ADERÊNCIA A SECO (MPa)
IDADE (dias)	3-7-28	3-7-28	3-7-28	2(1) -7-14-28-90	28	3-7-14-28-90-120-180	28	28	28
CA	1750-1760-1760	0,7-0,7-0,8	2,0-2,1-2,9	0,07-0,25-0,28-0,30-0,49	18,3	*-*-*-4770-*-*-*	18,3	0,10	0,10 (c+a)
CH	*-1680-1690	*-0,3-0,2	*-0,8-0,6	0,11-0,21-0,22-0,23-0,26	18,7	*-*-*-3025-*-*-*	*	*	0,12 (c)
Pa	*-1880-1860	*-1,2-1,1	*-3,4-2,9	0,08-0,19-0,21-0,23-0,24	25,2	*-6560-*-6385-*-*-*	*	*	*
Pac	*-1930-1940	*-1,6-1,7	*-6,6-6,9	0,09-0,50-0,63-0,69-0,73	5,4	*-*-*-9805-*-*-*	*	*	*
P3	*-1930-1960	*-1,7-2,1	*-6,1-8,3	0,10-0,27-0,33-0,36	12,1	*-11990-*-11580-*-*-*	17,9	0,10	0,24 (a)

(1) - 1 dia após desmoldagem
(2) - Ensaios realizados no âmbito de outro estudo
(FM) - Fendilhação múltipla em todos os provetes; (IFM) - Início de fendilhação múltipla nalguns provetes
(a) - Rotura adesiva; (c) - Rotura coesiva
* - Valor não determinado

QUADRO 7.9 - Ensaios de caracterização das argamassas endurecidas. Ensaios em laboratório, ambiente 2

ARGAMASSA	MASSA VOLÚMICA APARENTE (kg/m^3)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	COEFICIENTE DE CAPILARIDADE $g/dm^2.min^{1/2}$	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MPa)
IDADE (dias)	7-8-28	7-8-28	7-8-28	28	7-8-28
P	1980-1860-1820	1,2-1,2-1,7	3,2-4,2-5,2	14,0	9275-8950-9665
FV	1630-1630-1640	0,8-1,2-1,5 (FM)	1,6-2,6-4,0	13,5	5875-6030-5670
M1	1670-1570-1530	1,1-1,3-2,3	2,1-3,3-5,4	2,3	5555-5640-5850
CA	1980-1830-1760	0,7-0,8-1,2	1,7-2,3-3,5	19,6	6780-6765-7325

(FM) - Fendilhação múltipla em todos os provetes

QUADRO 7.10 - Ensaios de caracterização das argamassas endurecidas. Ensaios na EENRevPa

ARGAMASSA		MASSA VOLÚMICA APARENTE (kg/m^3)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MPa)
IDADE (dias)		7 -28	7 - 28	7 - 28	7 - 28
P	VERÃO	1770-1820	1,2-1,2	3,8-4,0	5820-5950
	INVERNO	2010-2010	2,3-3,6	8,0-14,6	2980-3255
FV VERÃO		1750-1780	1,1-0,9	3,4-4,2	5290-5165
FPP INVERNO		1880-1910	0,8-0,8	3,8-4,1	5340-6655
R1 VERÃO (1)		1770-1820	1,2-1,2	3,8-4,0	5820-5950
R2 INVERNO (1)		2010-2010	2,3-3,6	8,0-14,6	2855-2980
CA	VERÃO	1730-1730	0,5-0,6	1,8-2,3	3145-3160
	INVERNO	1920-2020	0,7-0,9	2,0-2,2	5615-6580

(1) - Estes ensaios foram realizados sobre a argamassa sem a rede incorporada

7.3 - APRECIAÇÃO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

7.3.1 - Argamassas em pasta

Os resultados dos ensaios realizados sobre as argamassas em pasta sugerem os comentários a seguir referidos.

- A fibra de polipropileno fibrilada (PP) e a fibra de vidro *AR* (V) incorporam-se muito facilmente na argamassa, em amassadura mecânica realizada pelos processos normais em laboratório (misturador mecânico) e em obra (betoneira); não dão origem a exsudação, e o teor máximo que se definiu como admissível foi estabelecido com base na facilidade de aplicação; com efeito, volumes superiores de fibra pareciam dificultar o espalhamento da argamassa sobre a superfície do tijolo, verificando-se um certo *arrastamento* das fibras. As características descritas parecem confirmar a tixotropia que alguns autores atribuem às argamassas com estes tipos de fibras, no estado fresco, e que concorrem para a sua boa trabalhabilidade [7.14, 7.15].

  As fibras PP e V provocam uma redução significativa da massa volúmica da argamassa em pasta, em relação à argamassas padrão P, redução essa tanto mais pronunciada quanto maior é o teor de fibra.

  Uma das explicações para a boa trabalhabilidade - que, no entanto, diminui com o tempo de espera -, para a redução da massa volúmica e, ainda, no caso da argamassa com fibra PP, para a diminuição da água de amassadura, é o favorecimento da introdução de ar na argamassa durante a amassadura. Este fenómeno, bastante visível na consistência plástica das argamassas em causa, é também confirmado pela redução nítida do seu coeficiente de capilaridade (vd. Quadros 7.6 a 7.9).

- As argamassas P e Pa, só de cimento e areia, têm bastante exsudação e formam pastas pouco homogéneas e não muito trabalháveis. A argamassa P3, com maior teor de cimento, apresenta já uma trabalhabilidade melhorada, e exige um menor teor de água de amassadura. A argamassa Pac, em que os finos da areia conferem uma maior plasticidade e coesão, é a mais trabalhável deste grupo de argamassas só de cimento e areia. Todas elas são bastante pesadas, com massas volúmicas da ordem de 2000 kg/m^3. As argamassas R1, R2 e R3 podem também incluir-se neste grupo, uma vez que as características em pasta são obtidas, naturalmente, antes da incorporação da rede.

- As argamassas com cal são muito mais trabalháveis que as que têm o cimento como único ligante. As aplicações nos muretes da EENRevPa confirmaram a melhor

trabalhabilidade da argamassa com cal aérea - CA - em relação à argamassa fraca só de cimento e areia - P.

- Os rebocos pré-doseados dão origem a massas plásticas e coesas, com boa trabalhabilidade e são mais leves que os tradicionais.

- O revestimento de ligante misto, preparado com as dosagens recomendadas pelo fabricante, constitui uma pasta homogénea e coesa mas dificilmente trabalhável, devido à alta consistência. A massa volúmica obtida é inferior à das argamassas tradicionais só de cimento e a relação a/c é muito mais baixa que a usada nos rebocos tradicionais.

7.3.2 - Argamassas endurecidas

A análise dos resultados dos ensaios realizados sobre as argamassas endurecidas permitiu as reflexões críticas que se apresentam a seguir.

- As argamassas com fibras têm massa volúmica aparente inferior à da argamassa padrão, e tanto mais baixa quanto maior o teor de fibras. Este efeito é explicável pela introdução de elementos - as fibras - de densidade inferior à dos restantes elementos da mistura, mas também, provavelmente, pelo efeito de introdução de ar na pasta.

  As resistências à tracção por flexão e à compressão e o módulo de elasticidade são, de um modo geral, inferiores às resistências e módulos de elasticidade correspondentes da argamassa padrão. Essas variações, na maioria dos casos da ordem de 15 a 30%, são explicáveis pela aplicação directa da lei das misturas e ainda, mais uma vez, pela provável introdução de ar na pasta. No entanto, as argamassas com fibras ensaiadas apresentam fendilhação múltipla, particularmente visível no caso da argamassa FV (ver fig. 7.13), portanto é expectável que sejam mais dúcteis, logo com melhor comportamento à fendilhação. Estas argamassas apresentam menor coeficiente de capilaridade e maior permeabilidade ao vapor de

água que a argamassa P, o que pode ser explicado pela alteração da microstrutura das argamassas e, em particular, pelo efeito de introdução de ar já referido.
As variações dimensionais por retracção são da mesma ordem de grandeza que as da argamassa P.

- Os rebocos pré-doseados são também mais *leves* que a argamassa P, o que não surpreende, já que estes revestimentos têm, em geral, na sua constituição, introdutores de ar e outros adjuvantes com esse efeito. Por outro lado, as suas resistências à flexão e à compressão são sensivelmente superiores. Os módulos de elasticidade variam de forma menos homogénea, sendo que as argamassas M1 e M4 têm menor módulo de elasticidade, apesar das resistências superiores, enquanto M2 e M3 têm módulos de elasticidade bastante mais elevados. Estes produtos têm permeâncias ao vapor de água da mesma ordem de grandeza que P - se nos lembrarmos que são, em princípio, aplicados com espessuras inferiores - e têm aderências ao suporte bastante melhoradas. As variações dimensionais por retracção, são, em todos os casos, bastante superiores às da argamassa P.

- O revestimento de ligante misto PR apresenta resistências muito superiores à argamassa P. O seu módulo de elasticidade dinâmico é também bastante superior, no entanto é visível a sua maior ductilidade na rotura, o que deverá traduzir-se por um módulo de rotura muito menor. O coeficiente de capilaridade é muito melhorado, assim como a aderência. A permeabilidade ao vapor de água é da ordem de metade, mas, como deve ser aplicado em camada muito mais delgada, a permeância ao vapor de água pode até ser melhor.

- As argamassas com cal apresentam massa volúmica aparente inferior à argamassa P. As suas resistências à flexão e à compressão são inferiores, principalmente no caso da argamassa CH. Os módulos de elasticidade são também menores, enquanto os coeficientes de capilaridade são mais elevados. As variações dimensionais por retracção não sofrem grandes variações em relação à argamassa P.

- A areia amarela de Corroios (argamassa Pac) e o maior teor de cimento (argamassa P3) tendem a aumentar a compacidade da argamassa e portanto a sua massa volúmica aparente e a diminuir o coeficiente de capilaridade. Por outro lado, estas argamassas apresentam resistências à flexão e à compressão e módulos de elasticidade bastante superiores à argamassa P. As variações dimensionais por retracção são também mais elevadas, principalmente no caso da argamassa Pac. O aumento da água de amassadura (argamassa Pa) não parece conduzir a grandes alterações nas características, em relação à argamassa P, com excepção do aumento do coeficiente de capilaridade, devido, provavelmente, a uma estrutura mais porosa resultante da maior quantidade de água evaporada.

- No que diz respeito à reacção ao fogo, constata-se que a incorporação de fibras de polipropileno (combustíveis), nos teores máximos considerados, não afecta a classe de reacção ao fogo da argamassa, que se mantém M0. Este resultado vem, aliás, ao encontro de estudos realizados por alguns autores, que concluem que o comportamento ao fogo de argamassas e betões não é desfavoravelmente afectado pela introdução de fibras de polipropileno [7.23].

- A conservação no ambiente 2 das argamassas P, FV e CA permite aumentar as resistências a partir dos 7 dias, verificando-se paralelamente um aumento do módulo de elasticidade dinâmico. Este facto pode ser explicado pela melhor hidratação do cimento, que dará origem a uma estrutura mais compacta. No entanto, o coeficiente de capilaridade não sofre variações sensíveis.

  A argamassa M1 tem um comportamento bastante distinto. Com efeito, não se verifica aumento de resistência, mas antes uma redução, pelo menos até aos 28 dias. O facto de o módulo de elasticidade aumentar sensivelmente pode, no entanto, indiciar um aumento da resistência em idades mais avançadas, já que a experiência adquirida nestes ensaios parece mostrar que o módulo de elasticidade aumenta de forma mais rápida que as resistências à flexão e à compressão.

- Os resultados da caracterização após conservação na EENRevPa em condições de Verão e de Inverno são bastante surpreendentes: de facto, para as argamassas de

cimento P, FV, FPP, R1 e R2 verifica-se um aumento da resistência mesmo para os provetes conservados em condições de Verão; para os provetes conservados em condições de Inverno os aumentos são, como seria de esperar, ainda mais sensíveis. Os módulos de elasticidade não variam da mesma forma, mantendo-se nalguns casos da mesma ordem de grandeza; a argamassa P, em condições de Inverno, apresenta módulo de elasticidade muito mais baixo; a argamassa CA tem módulo de elasticidade menor no Verão e superior no Inverno. O ambiente mais húmido que rodeou os provetes preparados no Inverno, terá, certamente, propiciado melhores condições de hidratação ao cimento, e, portanto, maior resistência das argamassas. Mesmo nas condições de Verão, é possível que a maior humidade nocturna tenha sido suficiente para melhorar significativamente as condições de cura das argamassas, evitando uma dessecação demasiado rápida. Por outro lado, convém recordar que a amassadura das argamassas preparadas na EENRevPa decorreu em betoneira, portanto em condições diferentes das preparadas em laboratório, o que poderá também ter influenciado os resultados. Os resultados são diferentes para a argamassa CA, que revela características menos variáveis com o ambiente de conservação.

7.3.3 - Apreciação geral

Verificou-se que as fibras PP e V melhoram significativamente as características da argamassa fresca, nomeadamente a sua trabalhabilidade, plasticidade e massa volúmica aparente. Estes dois tipos de fibra são facilmente incorporados na massa, em amassadura realizada pelo método usual em laboratório, conseguindo-se, aparentemente, uma distribuição relativamente homogénea.

Constatou-se também que, de um modo geral, as fibras usadas contribuem para a redução da massa volúmica aparente das argamassas endurecidas e do seu módulo de elasticidade. A resistência mecânica não é incrementada, verificando-se, pelo contrário, uma redução; no entanto, o fenómeno de fendilhação múltipla dos provetes sujeitos a flexão (ver fig. 7.13), mais sensível no caso da argamassa FV, torna expectável uma melhoria da ductilidade e, nessa medida, um melhor comportamento à fendilhação. As fibras PP e V

BIBLIOTECA F.E. PORTO

parecem, ainda, ter um efeito positivo na redução do coeficiente de capilaridade das argamassas. Por outro lado, a introdução de fibras não pareceu afectar negativamente a reacção ao fogo e a aderência.

As argamassas pré-doseadas ensaiadas são mais trabalháveis que a argamassa P e têm resistências e aderências ao suporte superiores e coeficientes de capilaridade inferiores. Por outro lado, os módulos de elasticidade obtidos são, de um modo geral, bastante mais elevados e as retracções superiores, o que pode significar menor capacidade da argamassa se adaptar aos deslocamentos a que está sujeita em relação ao suporte.

As argamassas com cal são também bastante trabalháveis e mostram-se menos sensíveis às variações climáticas. Apresentam resistências baixas e módulos de elasticidade também reduzidos, o que parece indiciar uma maior deformabilidade e, em consequência, um bom comportamento à fendilhação, se as resistências iniciais forem suficientes para evitar uma fendilhação precoce.

O aumento do teor de cimento parece tornar as argamassas mais trabalháveis, mais resistentes, com menor capilaridade e maior aderência, mas também mais rígidas e com retracção superior, portanto, possivelmente, mais susceptíveis à fendilhação. O uso de areia argilosa parece ter efeitos semelhantes, com o inconveniente de aumentar ainda mais a retracção, principalmente a partir dos 7 dias. Por outro lado, o aumento da relação a/c não revelou variações sensíveis nas características, com excepção de um aumento significativo da capilaridade.

O ambiente 2 permite um aumento das resistências e dos módulos de elasticidade dinâmicos, principalmente aos 28 dias, das argamassas de matriz tradicional P, FV e CA. A argamassa M1 sofre, pelo contrário, uma redução da resistência.

Os provetes conservados na EENRevPa mostraram aumento de resistência e redução do módulo de elasticidade dinâmico, principalmente nas condições de Inverno. Assim, as condições naturais, principalmente as de Inverno, parecem ser bastante mais favoráveis que as proporcionadas pelos ambientes 1 e 2.

Finalmente, é interessante constatar que, se a conservação no ambiente 1 parece ser demasiado severa em relação às condições reais, o ambiente 2 também não parece estar mais perto de reproduzir as condições em obra. De facto, as condições reais em obra no nosso clima, com ciclos diários de temperaturas e humidades relativas, parece, a partir destes ensaios, ser mais favorável a uma boa hidratação do cimento. Parece-nos importante que estas

conclusões sejam confirmadas e aprofundadas com maior número de ensaios e com campanhas em condições climáticas mais variadas, para fundamentar uma escolha apropriada dos condicionamentos de ensaio para as argamassas de reboco, nas Normas Europeias em preparação.

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 7

[7.1] - VILHENA, António; VEIGA, M. Rosário - **Bases para a homologação de revestimentos pré-doseados de ligante mineral com base em cimento.** Relatório. Lisboa, LNEC, Outubro de 1995.

[7.2] - LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC) - **Cimentos. Determinação da massa volúmica.** Lisboa, LNEC, 1979. Especificação LNEC E 64-1979.

[7.3] - LNEC - **Cimentos. Determinação da superfície específica.** Lisboa, LNEC, 1980. Especificação LNEC E 65-1980.

[7.4] - INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) - **Métodos de ensaio de cimentos. Determinação das resistências mecânicas.** Lisboa, IPQ, 1990. NP EN 196-1.

[7.5] - IPQ - **Métodos de ensaio de cimentos. Análise química de cimentos.** Lisboa, IPQ, 1990. NP EN 196-2.

[7.6] - IPQ - **Métodos de ensaio de cimentos. Determinação do tempo de presa e da expansibilidade.** Lisboa, IPQ, 1990. NP EN 196-3.

[7.7] - IPQ - **Métodos de ensaio de cimentos. Determinação do teor em cloretos, dióxido de carbono e álcalis nos cimentos.** Lisboa, IPQ, 1990. NP EN 196-21.

[7.8] - IPQ - **Cimentos. Definições, composição, especificações e critérios de conformidade.** Lisboa, IPQ, 1991. NP 2064.

[7.9] - BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI) - **Sands for external renderings, internal plastering with lime and Portland cement, and floor screeds.** London, BSI. BS 1199:1976.

[7.10] - INSPECÇÃO GERAL DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS E INDUSTRIAIS (IGPAI) - **Areias para argamassas e betões. Análise granulométrica.** Lisboa, IGPAI, 1976. NP 1379.

[7.11] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Determinação da baridade.** Lisboa, IGPAI, 1973. NP 955.

[7.12] - IGPAI - **Areias para argamassas e betões. Determinação do teor em partículas muito finas e matérias solúveis.** Lisboa, IGPAI, 1972. NP 86.

[7.13] - COUTINHO, A. S. - **Fabrico e propriedades do betão.** Vol. I. Lisboa, LNEC, 1988.

[7.14] - BENTUR, A.; MINDESS, S. - **Fibre reinforced cementitious composites.** Elsevier Applied Science, London and New York, 1990.

[7.15] - HANNANT, D., J. - **Fibre cements and fibre concretes.** John Wiley and Sons, Chichester, New York, Brisbane and Toronto, 1978.

[7.16] - VILHENA, António; VEIGA, M. Rosário - **Bases para a homologação de revestimentos de impermeabilização de ligantes sintéticos para paramentos exteriores de paredes.** Relatório. Lisboa, LNEC, Julho de 1995.

[7.17] - UNION EUROPÉENNE POUR L'AGRÉMENT TECHNIQUE DANS LA CONSTRUCTION (UEAtc) - **Directives UEAtc pour l'agrément des complexes d'isolation extérieure des façades avec enduit mince sur isolant en polystyrène expansé.** Paris, Cahiers du CSTB, 1988. Livraison 293, Cahier 2289.

[7.18] - UEAtc - **Guide technique UEAtc pour l'agrément des systèmes d'isolation extérieure des façades avec enduit minéraux.** Paris, Cahiers du CSTB, 1992. Livraison 331, Cahier 2602.

[7.19] - VEIGA, M. Rosário - **Evolução com o tempo das características mecânicas de redes de fibra de vidro utilizadas como armadura de argamassas de revestimento de paredes.** Lisboa, LNEC, Junho de 1994. Comunicação apresentada ao 2º ENCORE - Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios.

[7.20] - IGPAI - **Consistência do betão. Ensaio de espalhamento.** Lisboa, IGPAI, 1964. NP 414.

[7.21] - BSI - **Methods of testing mortars, screeds and plasters.** London, BSI. BS 4551:1980.

[7.22] - LNEC - **Segurança contra incêndio. Reacção ao fogo dos materiais de construção. Critérios de classificação.** Lisboa, LNEC, 1990. Especificação LNEC E 365-1990.

[7.23] - SARVARANTA, L. - **Characterization methods for polypropylene fibre-reinforced cement mortar composites.** Espoo, Technical Research Centre of Finland (VTT), 1993. VTT publications, 136.

CAPÍTULO 8

ENSAIOS DE COMPORTAMENTO EM LABORATÓRIO

8.1 - Generalidades

8.2 - Descrição dos Métodos de Ensaio

8.3 - Resultados dos Ensaios

8.4 - Apreciação dos Resultados dos Ensaios

Bibliografia do Capítulo 8

8.1 - GENERALIDADES

Estes ensaios destinaram-se sobretudo a avaliar a susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida das argamassas, através dos critérios definidos no capítulo 6: comparação das forças instaladas em cada instante com as resistências à tracção da argamassa na mesma idade e relacionamento da energia de rotura com a tendência para a evolução da fendilhação ao longo do tempo.

Para determinar as grandezas envolvidas nestes critérios recorreu-se a equipamento especialmente concebido para o efeito, constituído por seis aparelhos - que funcionam, conforme a montagem, como *aparelhos de retracção restringida* ou como *aparelhos de retracção livre* -, uma fonte de alimentação e um sistema de aquisição de dados.

Nos ensaios realizados procurou-se despistar a possibilidade de existência de erros sistemáticos, verificando, nomeadamente, não haver sempre resultados mais altos ou mais baixos associados a um determinado aparelho, ou correspondentes aos provetes de uma argamassa usados num ensaio específico, em comparação com provetes da mesma argamassa ensaiados noutro momento.

8.2 - DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO

8.2.1 - Método usado para medição das forças devidas à retracção restringida

A técnica usada para os ensaios de retracção restringida foi a seguinte:

- Montagem os aparelhos de forma a que a cabeça superior fique imobilizada pelo parafuso, ligado ao transdutor de força.
- Com os aparelhos na posição horizontal, moldagem dos provetes sobre placas de material acrílico bem pinceladas com uma mistura de massa consistente e óleo lubrificante, usando como *paredes* de molde as cabeças superiores e inferiores e varetas também de material acrílico fixas entre elas.
- Aparafusamento das estruturas de suporte dos transdutores de deslocamento e início das medições e respectivos registos (ver figs. 8.1 a 8.4).



Fig. 8.1 - Moldagem dos provetes nos aparelhos

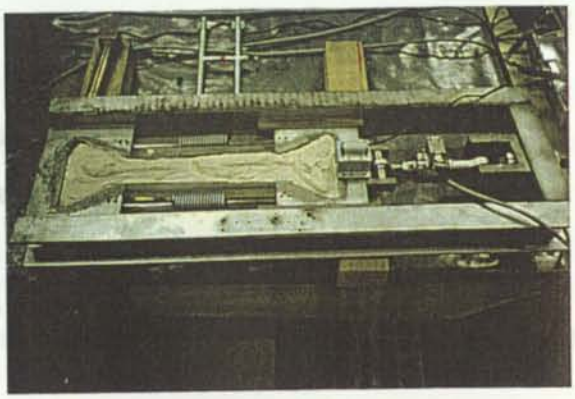


Fig. 8.2 - Preparação de provete da argamassa M2 (massa retirada da máquina de projectar)



Fig. 8.3 - Fixação do transdutor de deslocamento



Fig. 8.4 - Conjunto dos aparelhos colocados na horizontal (durante as 1ªs horas de medições)

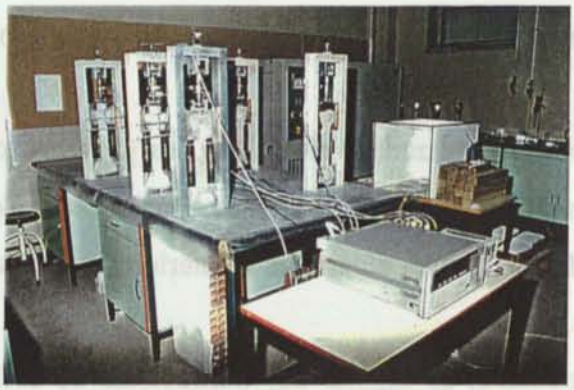


Fig. 8.5 - Conjunto de provetes na vertical (2ª fase das medições)

- Cerca de duas horas mais tarde, extracção das varetas laterais.
- Quando a argamassa tem cerca de 18 h de idade, colocação dos aparelhos na vertical e extracção das bases de material acrílico (ver fig. 8.5). Nesta posição elimina-se o atrito que a operação de olear a base não anula totalmente e criam-se condições de secagem idênticas nas duas faces; no entanto, é necessário subtrair a parcela de força correspondente ao peso da cabeça superior e restantes peças que, uma vez na posição vertical, transmitem carga ao transdutor.
- Continuação dos registos de forças, até à idade prevista para o ensaio de tracção.

8.2.2 - Método usado para medição das resistências à tracção e dos alongamentos na rotura

Os ensaios de resistência à tracção e alongamento na rotura incidiram sobre os provetes submetidos aos ensaios de retracção restringida realizados como foi descrito acima, em idades pré-definidas. A técnica utilizada consistiu no seguinte:

- Na idade definida para o ensaio de tracção, movimentação lenta do parafuso, imprimindo uma força de tracção no provete, até à rotura, mantendo em funcionamento o sistema de medição e registo de forças e deslocamentos.
- Após a abertura da 1ª fenda, manutenção do movimento lento do parafuso, até anular completamente a resistência. No caso das argamassas mais frágeis, mantém-se o movimento do parafuso até a fenda atingir cerca de 1 mm, mesmo quando a força se anula antes, para possibilitar uma melhor observação da fenda (ver figs. 8.6 e 8.7).

Nestes ensaios e na determinação das grandezas com eles relacionadas considerou-se que a rotura se inicia com a abertura da 1ª fenda - detectável pela brusca redução da força - e termina com a anulação total da força. A resistência à tracção é a força máxima atingida no ensaio de tracção e verifica-se, em geral, imediatamente antes da abertura da 1ª fenda. Os casos de materiais com fendilhação múltipla muito pronunciada, como as argamassas R1 e R2, podem constituir excepções, sendo possível que a força máxima e, portanto, a resistência à tracção, ocorra imediatamente antes da abertura de outra fenda que não a 1ª (ver gráf. 8.44).



Fig. 8.6 - Ensaio de tracção

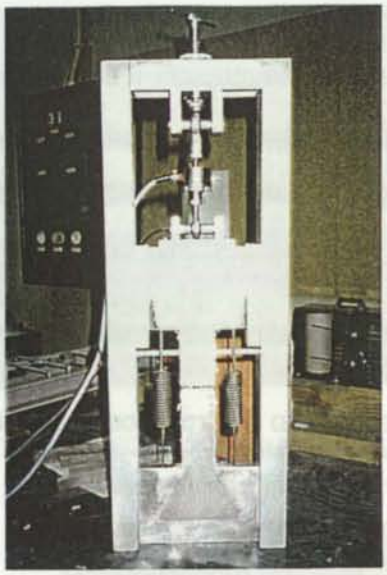


Fig. 8.7 - Fenda obtida em ensaio de tracção e "alargada" até cerca de 1 mm

8.2.3 - Método usado para medição das retracções livres

A técnica usada para os ensaios de retracção livre foi a seguinte:

- Moldagem dos provetes nos mesmos aparelhos usados para os ensaios de retracção restringida, mas modificados de modo a permitir o livre movimento da cabeça superior. Para isso, desligam-se os parafusos das cabeças superiores, retirando os transdutores de força (ver figs. 8.8 e 8.9).
- Medição e registo do deslocamento da cabeça superior em relação às peças fixas laterais, que se considera correspondente à retracção livre do provete.

Os provetes são moldados sobre placas de material acrílico bem lubrificadas com uma mistura de massa consistente e óleo lubrificante e o atrito entre as cabeças deslizantes dos aparelhos e as peças corrediças laterais foi cuidadosamente minimizado, através de correcção com massa consistente. No entanto, admite-se a permanência de algum atrito e procurou-se estimá-lo, recorrendo para isso a ensaios comparativos de força com retracção restringida, na vertical (condição considerada *sem atrito*) e na horizontal (condição considerada *com atrito* idêntico ao do ensaio de retracção livre). Estes ensaios comparativos permitiram estimar

perdas por atrito médias de 0,02. Assim, para obter valores mais próximos dos reais, multiplicaram-se os deslocamentos obtidos nos ensaios de retracção livre por 1,02.

A partir das curvas obtidas nos ensaios dos tipos descritos em 8.2.1, 8.2.2 e 8.2.3 determinaram-se grandezas importantes para avaliar o comportamento à fendilhação das argamassas, que se descrevem nos itens seguintes.

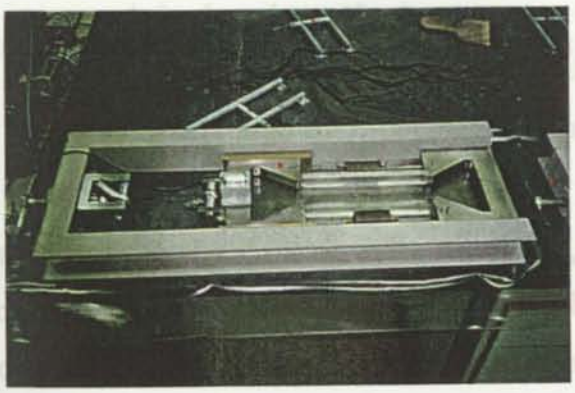


Fig. 8.8 - Aparelho preparado para ensaio de retracção livre



Fig. 8.9 - Provete em ensaio de retracção livre

8.2.4 - Grandezas relacionadas com o 1º critério de susceptibilidade à fendilhação: resistência à abertura da 1ª fenda

a) *Coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda CSAF* por retracção restringida e *Área de segurança à abertura da 1ª fenda ASAF* por retracção restringida

Os ensaios de retracção restringida permitiram, para cada argamassa, estimar relações entre as resistências à tracção R_t e as forças máximas $F_{r\ máx}$ ocorridas em cada um dos intervalos de idades t_i-t_{i-1} considerados; estas relações designaram-se, simplificadamente, por *coeficientes de segurança à abertura da 1ª fenda,* no intervalo de idades considerado:

$$CSAF\ (t_i\text{-}t_{i-1}) = R_t\ (t_i) / F_{r\ máx}\ (t_i\text{-}t_{i-1}) \qquad (8.1)$$

Considerou-se este coeficiente como um indicador da capacidade da argamassa para resistir à abertura, nesse período de tempo, de uma fenda devido à retracção restringida e definiu-se como quantificador do **1º critério de fendilhação** (ver 6.5).

Nos casos em que foram realizados ensaios de tracção em várias idades (P, FV e FPP), pareceu útil determinar uma outra grandeza para avaliar a resistência à abertura da 1ª fenda, que se designou por *Área de Segurança à abertura da 1ª fenda ASAF* e que consiste na área definida pelas curvas $R_t(t)$ e de $F_r(t)$. Esta área foi calculada pelo método *de integração de Gauss* :

$$ASAF\ (t) = \Sigma(Ri - Fi)\ .\ [(t_{i+1} - t_{i-1})/2] \qquad (8.2)$$

A *Área de Segurança Relativa* $ASAF/F_{r\ máx}$ informa sobre a capacidade da argamassa para resistir à abertura da 1ª fenda devida à retracção restringida e é, portanto, um parâmetro que nos interessa considerar no caso em estudo e que podemos considerar um parâmetro adicional para o 1º critério.

b) Módulo de elasticidade equivalente E_{eq}

Determinaram-se outros parâmetros adicionais, relacionados com a capacidade de relaxação de tensões das argamassas e estudou-se a possibilidade de os utilizar também como indicadores do seu comportamento à fendilhação, nomeadamente com a resistência à abertura da 1ª fenda.

Assim, determinou-se, para as várias argamassas e nas diferentes condições testadas, a relação entre as tensões instaladas e as deformações impostas (iguais e de sinal contrário às deformações restringidas), que se designou por *módulo de elasticidade equivalente* $E_{eq}(t)$. Esta grandeza corresponde à função *R (t,t')* referida no capítulo 4 e define a relaxação, no caso particular da retracção restringida, em que se pode admitir que a solicitação é aplicada no momento da moldagem, e, portanto, apenas existe *um tempo* (t=t').

O E_{eq} é calculado a partir das curvas de retracção livre $\varepsilon_r(t)$, das curvas de deformação $\varepsilon(t)$ obtidas no ensaio de retracção restringida (ver gráfs. 8.18 e 8.19) - que permitem determinar as curvas de retracção restringida $\varepsilon_{rr}(t)$ (equação 8.3) - e das curvas de tensão devida à retracção restringida $\sigma'_r(t)$ (equação 8.4), de acordo com as expressões:

$$\varepsilon(t)=\varepsilon_r(t)-\varepsilon_{rr}(t) \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{rr}(t)=\varepsilon_r(t)-\varepsilon(t) \tag{8.3}$$

$$\sigma'r(t)=E_{eq}(t).[\varepsilon_r(t)-\varepsilon(t)] \Rightarrow \tag{8.4}$$

$$E_{eq}(t)=\sigma'_r(t)/[\varepsilon_r(t)-\varepsilon(t)] \quad \Rightarrow \quad E_{eq}(t)=F_r(t)/\{A.[\varepsilon_r(t)-\varepsilon(t)]\} \tag{8.5}$$

em que A é a área da secção do provete.

Note-se que a expressão de cálculo de E_{eq} , é um pouco diferente da referida no capítulo 6 (expressão 6.1), porque, como nos ensaios realizados se verificou que a retracção não é totalmente restringida, foi necessário subtrair ε(t).

A relação $F_e(t)/F_r(t)$ entre a força elástica F_e (equação 8.6) e a força instalada devido à retracção restringida F_r , num determinado instante, dá também uma ideia da importância da relaxação. Aliás, esta relação é aproximadamente igual - a menos da pequena parcela ε(t) - à relação E_d/E_{eq}, entre os módulos de elasticidade *dinâmico* e *equivalente*, como facilmente se deduz das expressões que definem estas grandezas.

$$F_e(t)=E_d(t).\varepsilon_r(t).A \tag{8.6}$$

c) Determinação das forças de retracção restringida corrigidas $F_C(t)$

A partir dos módulos de elasticidade equivalentes $E_{eq}(t)$ e das curvas de retracção livre $\varepsilon_r(t)$, determinaram-se as forças de retracção restringida corrigidas $F_C(t)$, ou seja, as forças que a restrição total da retracção provocaria na argamassa (equação 8.7). A expressão de cálculo usada foi:

$$F_C(t)=E_{eq}(t).\varepsilon_r(t).A \tag{8.7 a)}$$

ou, mais directamente

$$F_C(t) = \{F_r(t)/[\varepsilon_r(t)-\varepsilon(t)]\}.\varepsilon_r(t) \qquad (8.7\ b)$$

Estas curvas são calculadas a partir de valores também obtidos por cálculo, o que origina uma acumulação de pequenos erros. Resultam, assim, pouco exactas e portanto não foi a partir delas que se definiram os critérios de susceptibilidade à fendilhação, mas sim a partir das curvas F_r *(t)*. De facto, com o cálculo das forças de retracção restringida corrigida pretendeu-se apenas dar uma ideia do valor real das forças que podem - no caso mais desfavorável de total restrição -, ser geradas na argamassa e também verificar se, em termos comparativos, era lícito usar as forças não corrigidas F_r *(t)*.

8.2.5 - Grandezas relacionadas com o 2º critério de susceptibilidade à fendilhação: resistência à evolução da fendilhação

a) Trabalho de rotura

A tenacidade de um material é o trabalho requerido para propagar uma fenda através de uma unidade de área do material. Esta característica está geralmente relacionada com a ductilidade, ou seja, com a capacidade do material se deformar após o limite elástico, antes da rotura [8.2, 8.3].

Foi determinada a área delimitada pela curva F_r/δ, nos ensaios de tracção realizados. Esta grandeza, que designamos por *G*, representa a energia de rotura da argamassa e dá uma medida da sua tenacidade nas condições testadas. Assim, foi considerada um indicador da capacidade para resistir à evolução da fendilhação, da argamassa sujeita a uma dada força, ou seja, da resistência ao alargamento da fenda e à propagação de uma rede de fendas. A relação $G/F_{r\,máx}$, ou ***Coeficiente de Resistência à Evolução da Fendilhação CREF*** dá uma ideia da capacidade de resistência à evolução da fendilhação por acção da força de retracção restringida e definiu-se como quantificador do **2º critério de fendilhação** (ver 6.5).

Adicionalmente determinaram-se, sempre que tal foi possível, as energias de rotura por flexão e por compressão das argamassas, G_f e G_c, com o objectivo de verificar até que ponto poderiam ser correlacionadas com *G* e com *CREF* e poderiam, portanto, ser consideradas indicadores úteis.

b) Extensão de rotura d_r

A extensão de rotura d_r, medida imediatamente antes da abertura da 1ª fenda, também foi determinada nos ensaios de tracção realizados e dá uma medida da ductilidade nas condições testadas; calculou-se como

$$d_r = (\delta_{ar} - \delta_0)/l \qquad (8.8)$$

em que δ_{ar} é o deslocamento antes da rotura e δ_0 o deslocamento antes do início do ensaio de tracção.

Considerou-se, em primeira análise, um indicador adicional da capacidade da argamassa para resistir à evolução da fendilhação e procurou-se avaliar a sua utilidade.

c) Módulo de rotura em tracção lenta, M_t

O módulo de rotura é a relação entre a força que produz a rotura no ensaio de tracção e a extensão total de rotura, ou seja, é o declive da recta que une o ponto de força e deslocamento *0* ao ponto correspondente à abertura da 1ª fenda, no gráfico força-deslocamento de um ensaio de tracção à rotura. Apenas coincide com o módulo de elasticidade para os materiais com comportamento totalmente elástico, o que não é o caso das argamassas em estudo. Este valor varia com a velocidade do ensaio (é tanto maior quanto mais rápido é o ensaio [8.1]). Assim, apenas tem valor comparativo entre as argamassas para idênticas velocidades de ensaio.

Esta grandeza foi determinada, para as várias argamassas, nas diferentes condições testadas, a partir das curvas R_t/δ, obtidas nos ensaios de tracção:

$$\sigma'_t = M_t \cdot d_r \Rightarrow M_t = \sigma'_t / d_r \Rightarrow M_t = (R_t - F_{r0}) / (A.d_r) \qquad (8.9)$$

em que F_{r0} é a força devida à retracção restringida antes do início do ensaio de tracção.

O M_t está relacionado com a ductilidade do material, e portanto admitiu-se também a sua utilidade para avaliar a resistência à evolução da fendilhação.

8.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

8.3.1 - Resultados dos ensaios em vazio

Os resultados dos ensaios em vazio, realizados com o objectivo de avaliar as forças transmitidas aos transdutores de força quando os aparelhos são colocados na vertical, de avaliar a capacidade de recuperação elástica dos transdutores e de detectar outras fontes de erros eventualmente existentes, apresentam-se no Anexo V, nas figs. V.1 a V.12.

Estes resultados mostram que, quando o aparelho é colocado na vertical, é transmitida ao transdutor uma força de cerca de 40 N (correspondente ao peso de algumas peças), que é depois praticamente anulada quando o aparelho volta à posição horizontal. No que se refere aos deslocamentos, verificam-se oscilações durante as mudanças de posições, mas, após alguns segundos na posição vertical, estabiliza em valores bastante baixos, que se crê não influenciarem excessivamente as forças medidas.

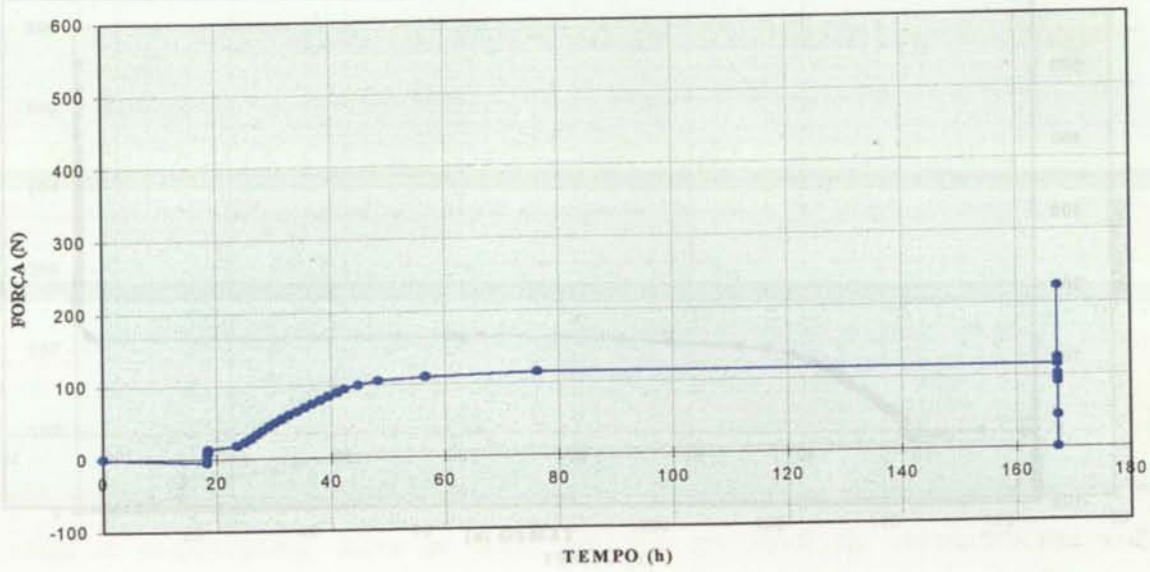
Foram também detectadas pequenas perturbações nas forças medidas nos primeiros minutos após colocação em funcionamento, verificando-se em seguida uma estabilização em valor muito próximo de zero.

Os resultados obtidos parecem indicar um comportamento satisfatório do equipamento e um grau razoável de fiabilidade nas medições.

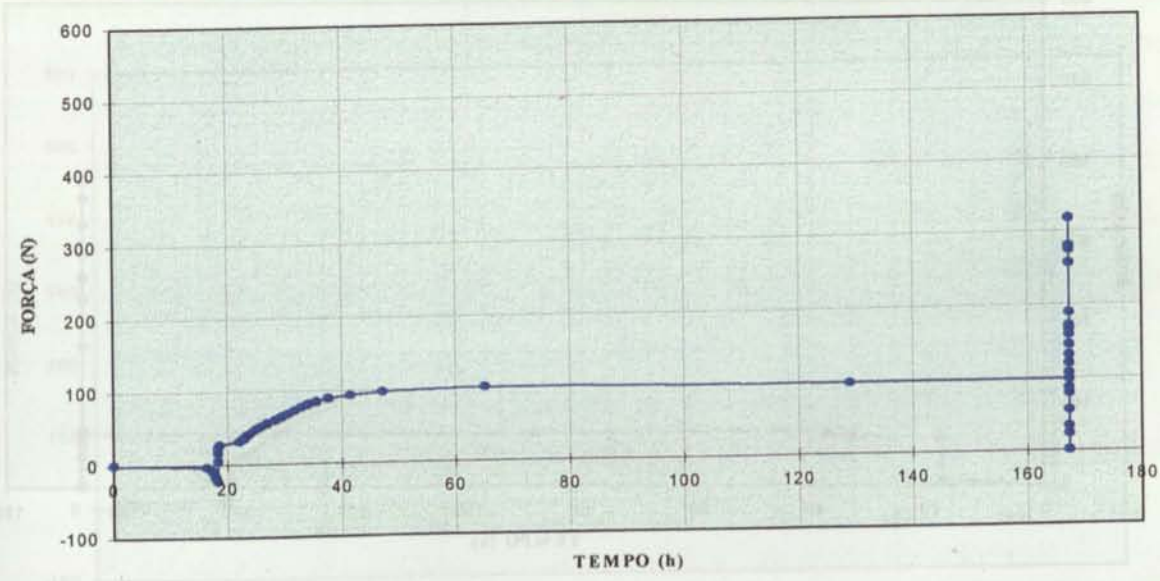
8.3.2 - Resultados dos ensaios de retracção restringida, resistência à tracção e retracção livre, no ambiente 1

Com o objectivo de mostrar a forma das curvas de forças obtidas nos ensaios de retracção restringida e nos ensaios de tracção, representam-se a seguir alguns exemplos.

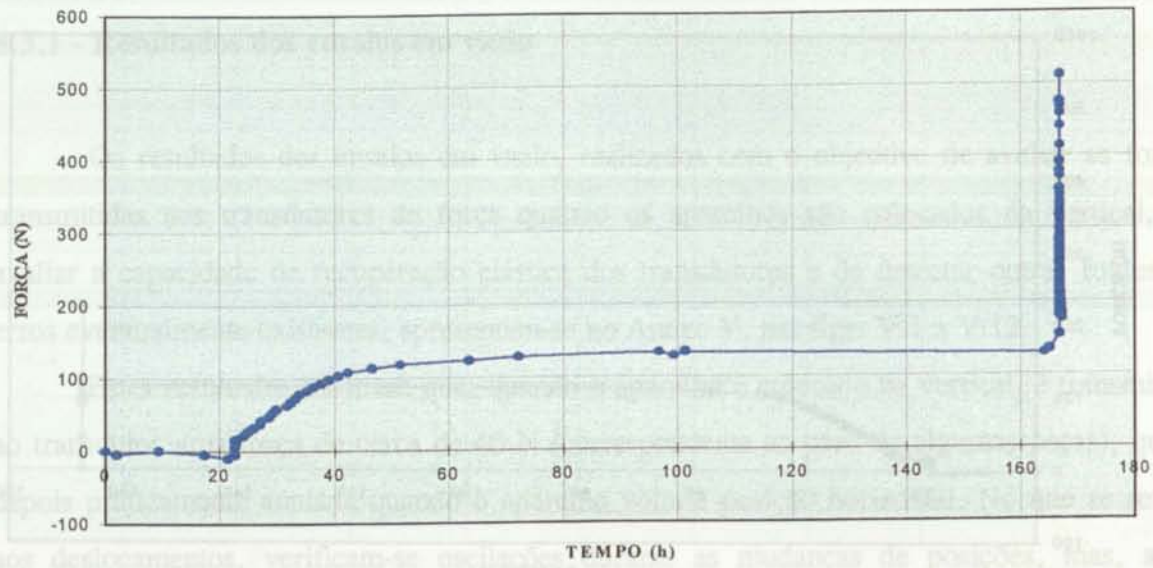
Exemplos de curvas força-tempo obtidas nos ensaios de retracção restringida, aos 7 dias, para algumas das argamassas, no ambiente 1:



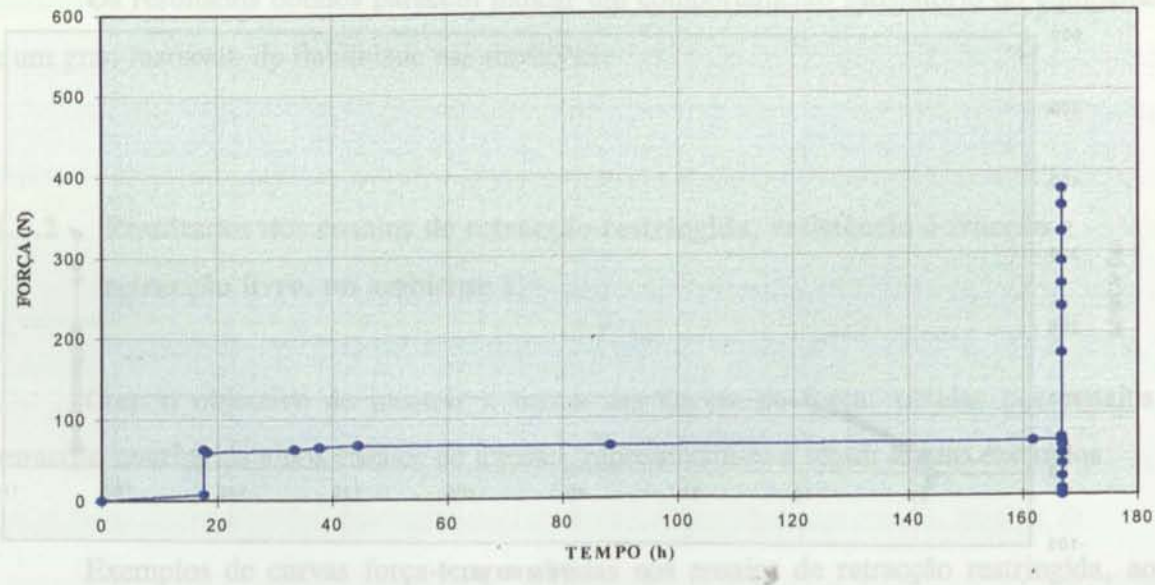
Gráf. 8.1 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa P. Ambiente 1



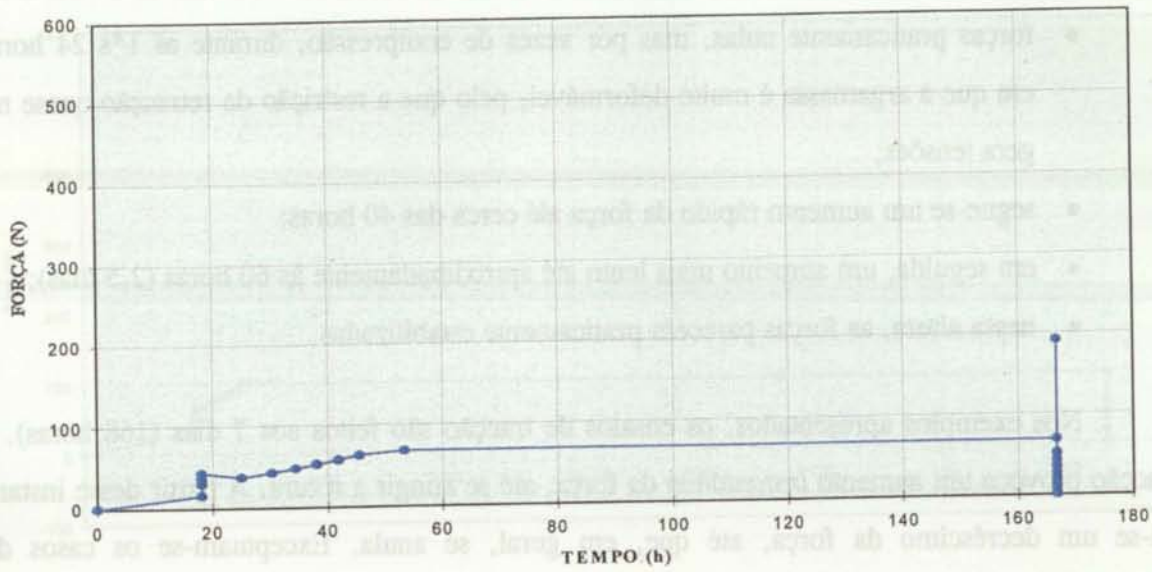
Gráf. 8.2 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa FV. Ambiente 1



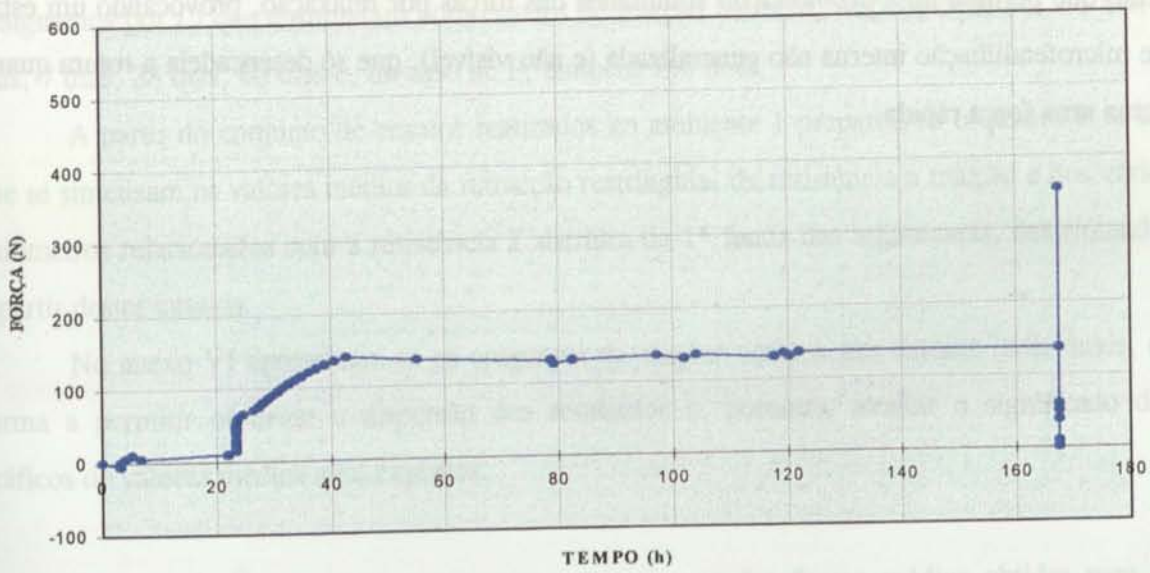
Gráf. 8.3 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa R1. Ambiente 1



Gráf. 8.4 - Curva obtida num ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa M1. Ambiente 1



Gráf. 8.5 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa CA. Ambiente 1



Gráf. 8.6 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa Pac. Ambiente 1

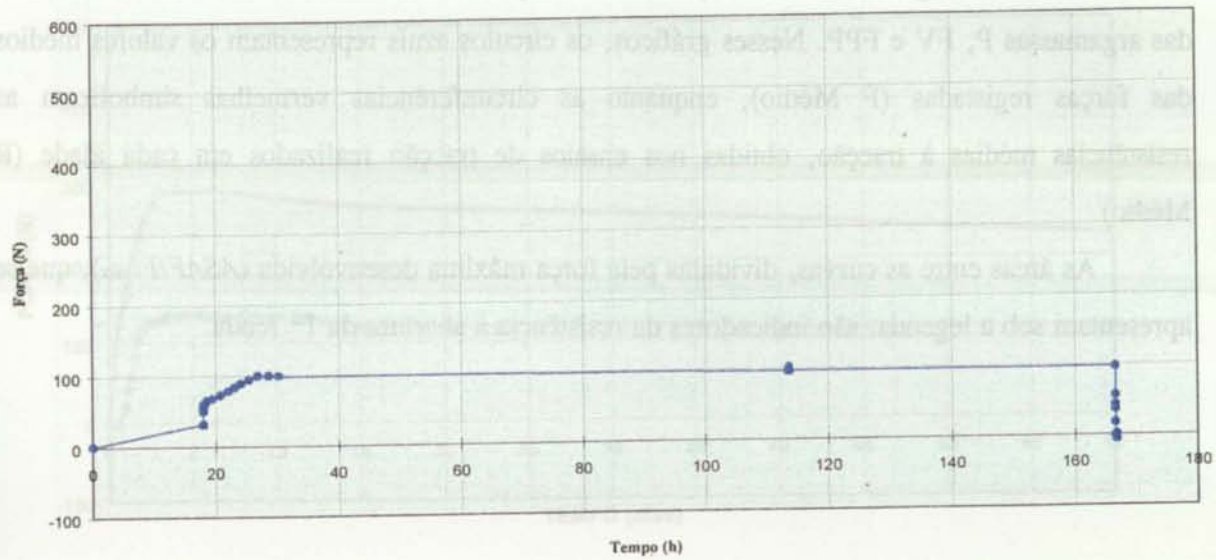
De um modo geral, as curvas mostram:

- forças praticamente nulas, mas por vezes de compressão, durante as 1ªs 24 horas, em que a argamassa é muito deformável, pelo que a restrição da retracção quase não gera tensões;
- segue-se um aumento rápido da força até cerca das 40 horas;
- em seguida, um aumento mais lento até aproximadamente às 60 horas (2,5 dias);
- nessa altura, as forças parecem praticamente estabilizadas.

Nos exemplos apresentados, os ensaios de tracção são feitos aos 7 dias (168 horas). A tracção provoca um aumento *instantâneo* da força, até se atingir a rotura. A partir desse instante dá-se um decréscimo da força, até que, em geral, se anula. Exceptuam-se os casos das argamassas com redes, em que não há anulação da força, devido à resistência da rede, como se vê no exemplo do gráf. 8.3).

Alguns provetes fendilharam, o que se traduziu em rotura sem aumento da força logo no início do ensaio de tracção, como se mostra no gráfico seguinte (gráf. 8.7).

Em nenhum dos provetes ensaiados se obteve uma anulação brusca da força, o que inicialmente nos pareceu estranho. A explicação deste facto está, crê-se, em que o ensaio é tão lento que permite uma *acomodação* simultânea das forças por relaxação, provocando um estado de microfendilhação interna não generalizada (e não visível), que só desencadeia a rotura quando actua uma força rápida.



Gráf. 8.7 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa M3. Ambiente 1 (fendilhação).

Os gráficos seguintes mostram curvas dos valores médios obtidos no conjunto dos ensaios de retracção restringida realizados sobre as 16 argamassas. Sobre as argamassas P, FV e FPP, foram feitos ensaios de retracção restringida durante 1 dia, 3 dias, 7 dias, 28 dias, 60 dias e, no caso de P, ainda durante um período de tempo mais longo (140 dias, ou *longo prazo*, que designámos por *L*) que terminaram com ensaios de tracção também, respectivamente, a 1 dia, 3 dias, 7 dias, 28 dias, 60 dias e, no caso de P, também 140 dias.

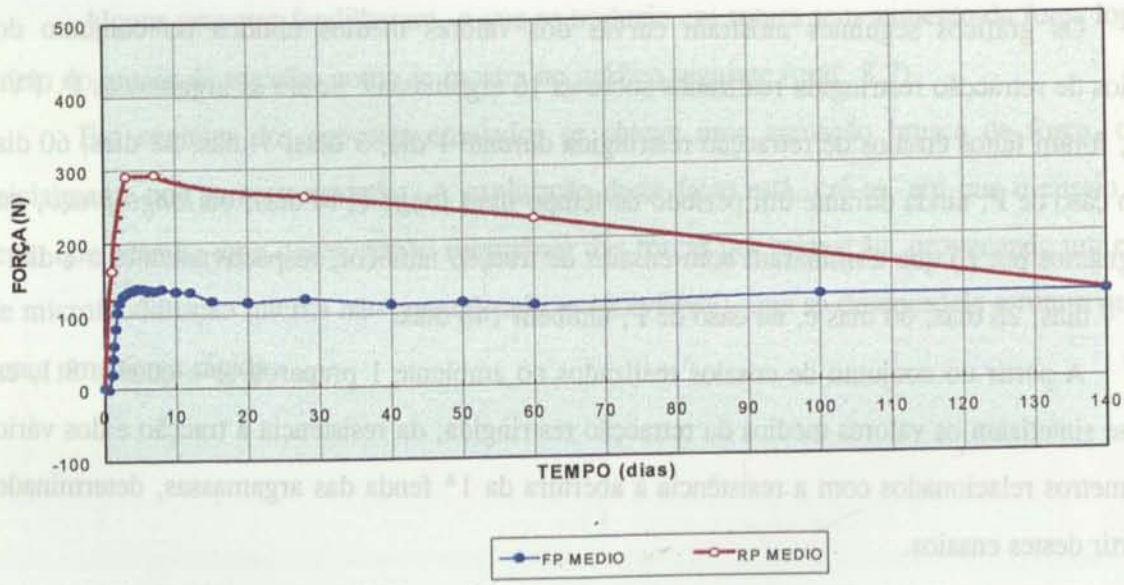
A partir do conjunto de ensaios realizados no ambiente 1 preparou-se o quadro 8.1, em que se sintetizam os valores médios da retracção restringida, da resistência à tracção e dos vários parâmetros relacionados com a resistência à abertura da 1ª fenda das argamassas, determinados a partir destes ensaios.

No anexo VI apresentam-se os conjuntos de valores obtidos nos ensaios individuais, de forma a permitir observar a dispersão dos resultados e, portanto, avaliar o significado dos gráficos de valores médios aqui expostos.

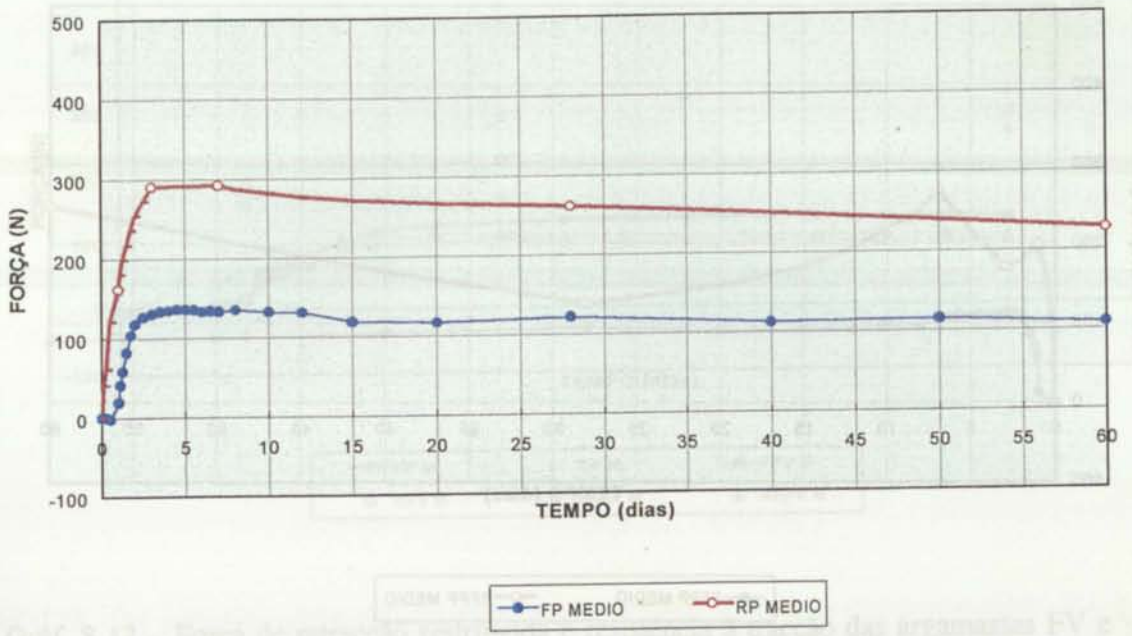
Nos gráficos 8.8 a 8.11 representam-se as curvas das forças médias obtidas para as argamassas P, FV e FPP e as curvas médias de resistências definidas para as mesmas argamassas, a partir dos resultados dos ensaios de tracção em várias idades, e usando um *método*

de interpolação linear. O gráf. 8.8 representa as curvas médias correspondentes à totalidade dos ensaios realizados sobre a argamassa P e permite ver o andamento das forças e das resistências até aos 140 dias. Os gráfs. 8.9 a 8.11 permitem comparar as formas das curvas até aos 60 dias das argamassas P, FV e FPP. Nesses gráficos, os círculos azuis representam os valores médios das forças registadas (F Médio), enquanto as circunferências vermelhas simbolizam as resistências médias à tracção, obtidas nos ensaios de tracção realizados em cada idade (R Médio).

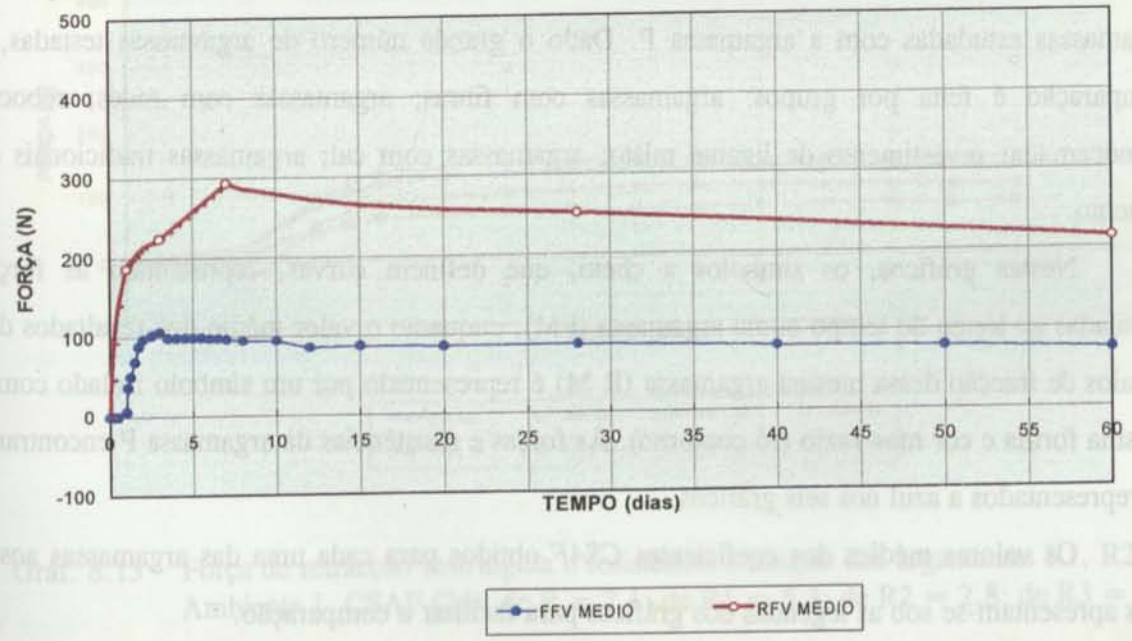
As áreas entre as curvas, divididas pela força máxima desenvolvida ($ASAF/F_{r\,máx}$), que se apresentam sob a legenda, são indicadores da resistência à abertura da 1ª fenda.



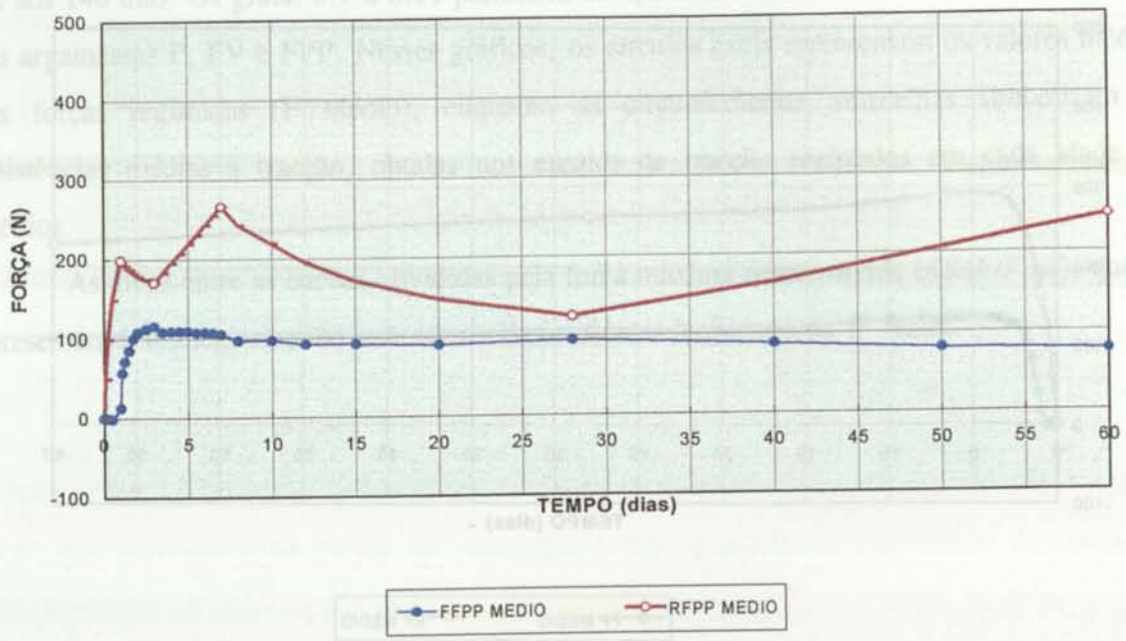
Gráf. 8.8 - Força de retracção restringida e resistência à tracção da argamassa P. Ambiente 1. Ensaio a longo prazo.
$ASAF/F_{r\,máx}$ (140 d) = 108,4 d



Gráf. 8.9 - Força de retracção restringida e resistência à tracção da argamassa P. Ambiente 1. Ensaio a 60 dias. ASAF/$F_{r\,máx}$ (60 d) = 92,9 d



Gáf. 8.10 - Força de retracção restringida e resistência à tracção da argamassa FV. Ambiente 1. Ensaio a 60 dias. ASAF/$F_{r\,máx}$ (60 d) = 118,8 d

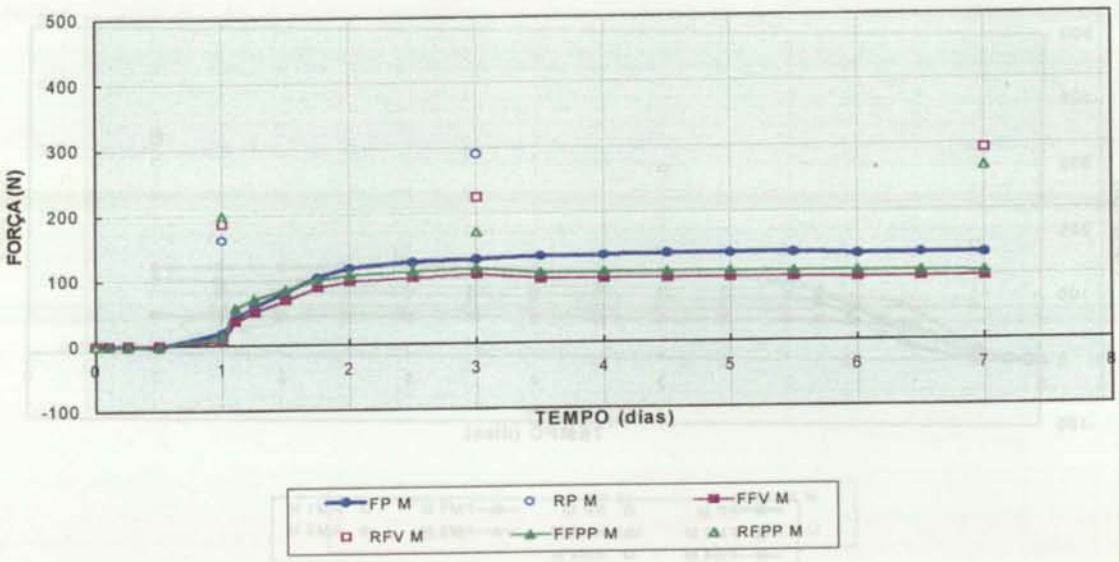


Gráf. 8.11 - Força de retracção restringida e resistência à tracção da argamassa FPP. Ambiente 1. Ensaio a 60 dias. ASAF/$F_{r\,máx}$ (60 d) = 71,2 d

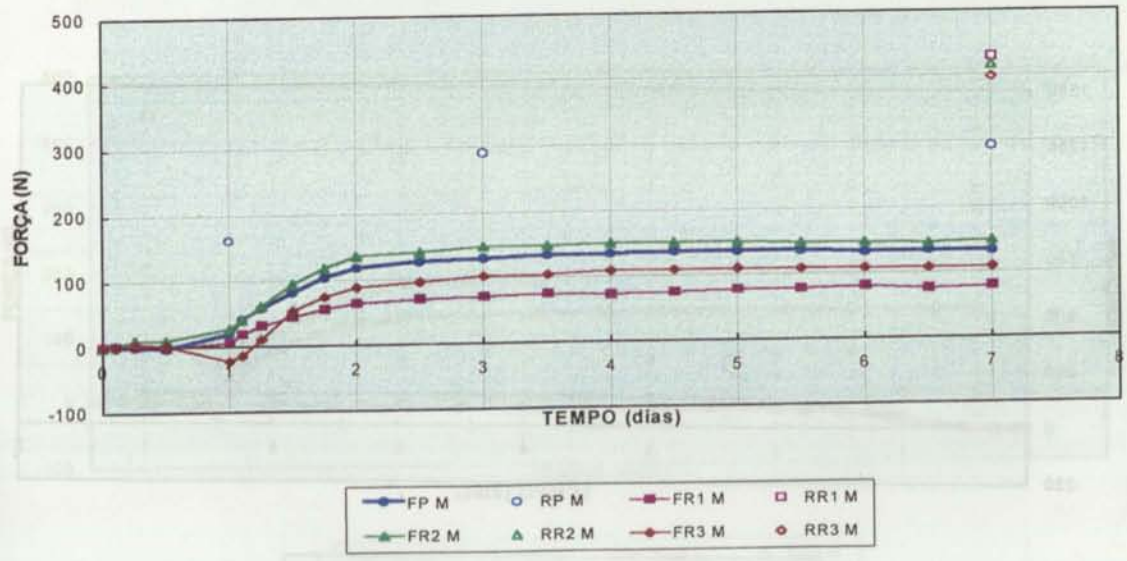
Nos gráficos 8.12 a 8.17, que se apresentam a seguir, comparam-se as curvas médias das forças (F M) e os valores médios das resistências (R M) aos 7 dias dos vários tipos de argamassas estudadas com a argamassa P. Dado o grande número de argamassas testadas, a comparação é feita por grupos: argamassas com fibras; argamassas com redes; rebocos monocamada; revestimento de ligante misto; argamassas com cal; argamassas tradicionais de cimento.

Nestes gráficos, os símbolos a cheio, que definem curvas, representam as forças instaladas ao longo do tempo numa argamassa (FM), enquanto o valor médio dos resultados dos ensaios de tracção dessa mesma argamassa (R M) é representado por um símbolo isolado com a mesma forma e cor mas vazio (só contorno). As forças e resistências da argamassa P encontram-se representados a azul nos seis gráficos.

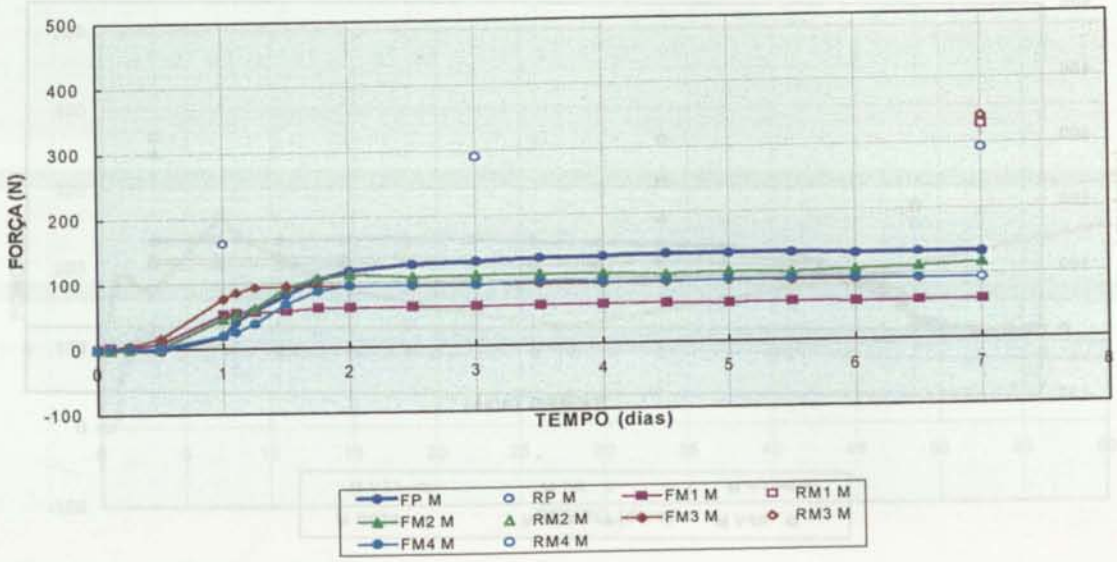
Os valores médios dos coeficientes *CSAF* obtidos para cada uma das argamassas aos 7 dias apresentam-se sob as legendas dos gráficos para facilitar a comparação.



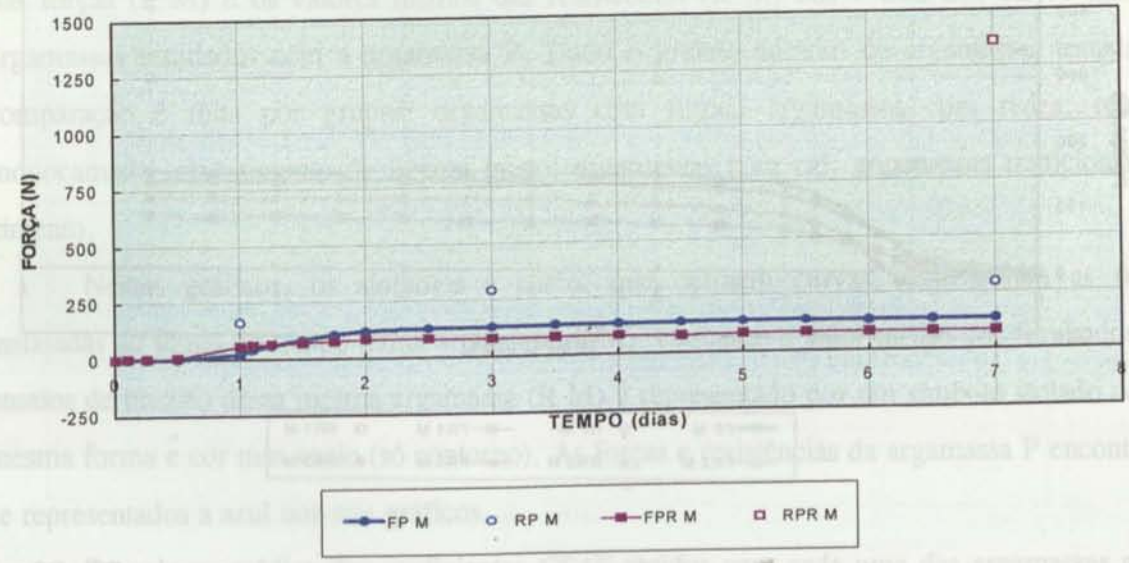
Gráf. 8.12 - Força de retracção restringida e resistência à tracção das argamassas FV e FPP. Ambiente 1. CSAF (7 d): de P = 2,1; de FV = 3,0; de FPP = 2,4



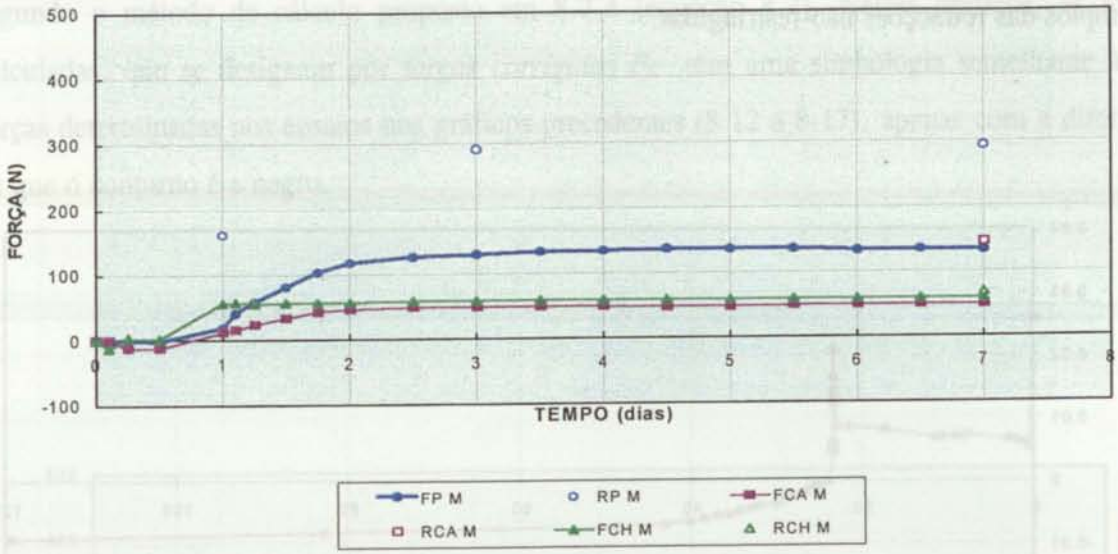
Gráf. 8.13 - Força de retracção restringida e resistência à tracção das argamassas R1, R2 e R3. Ambiente 1. CSAF (7d): de P = 2,1; de R1 = 5,3; de R2 = 2,8; de R3 = 3,6



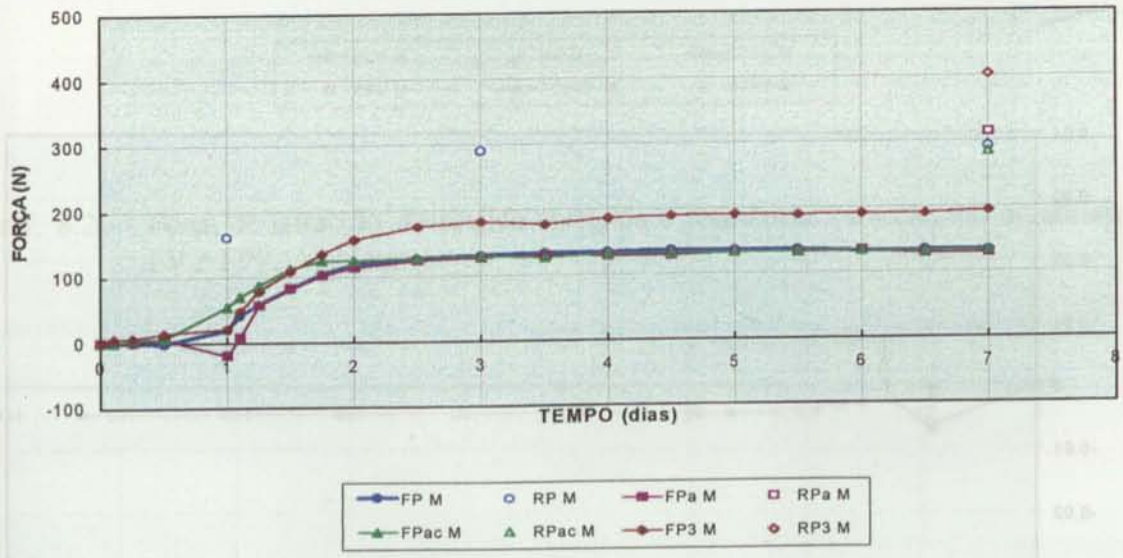
Gráf. 8.14 - Força de retracção restringida e resistência à tracção das argamassas M1, M2, M3 e M4. Ambiente 1. CSAF (7d): de P = 2,1; de M1 = 5,4; de M2 = 2,9; de M3 = 3,6; de M4 = 1,0



Gráf. 8.15 -Força de retracção restringida e resistência à tracção da argamassa PR. Ambiente 1. CSAF (7 d): de P = 2,1; de PR = 16,4

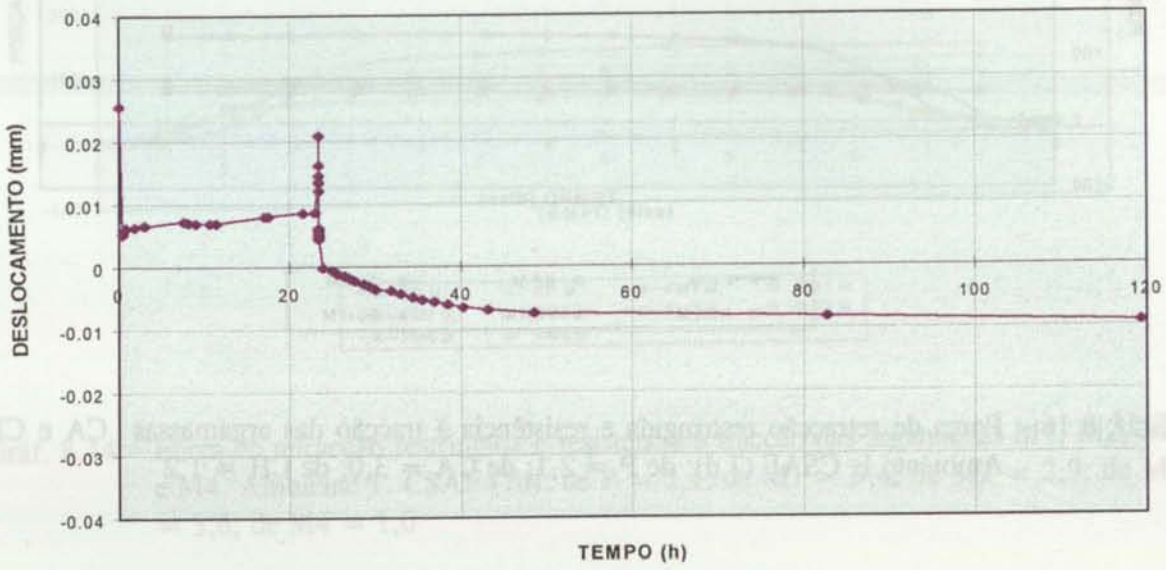


Gráf. 8.16 - Força de retracção restringida e resistência à tracção das argamassas CA e CH. Ambiente 1. CSAF (7 d): de P = 2,1; de CA = 3,0; de CH = 1,2

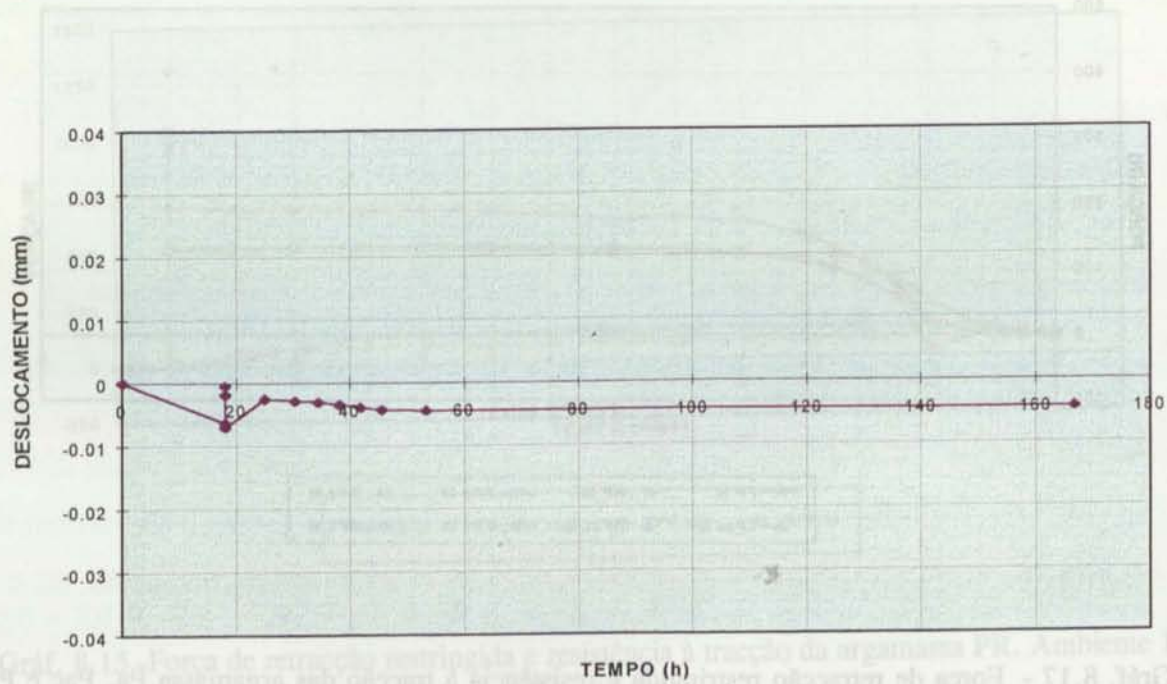


Gráf. 8.17 - Força de retracção restringida e resistência à tracção das argamassa Pa, Pac e P3. Ambiente 1. CSAF (7 d): de P = 2,1; de Pa = 2,1; de Pac = 2,1; de P3 = 2,1

A leitura dos deslocamentos durante os ensaios de retracção restringida mostrou que estes não foram totalmente impedidos nesses ensaios. Nos gráficos 8.18 e 8.19 mostram-se dois exemplos das retracções não-restringidas.

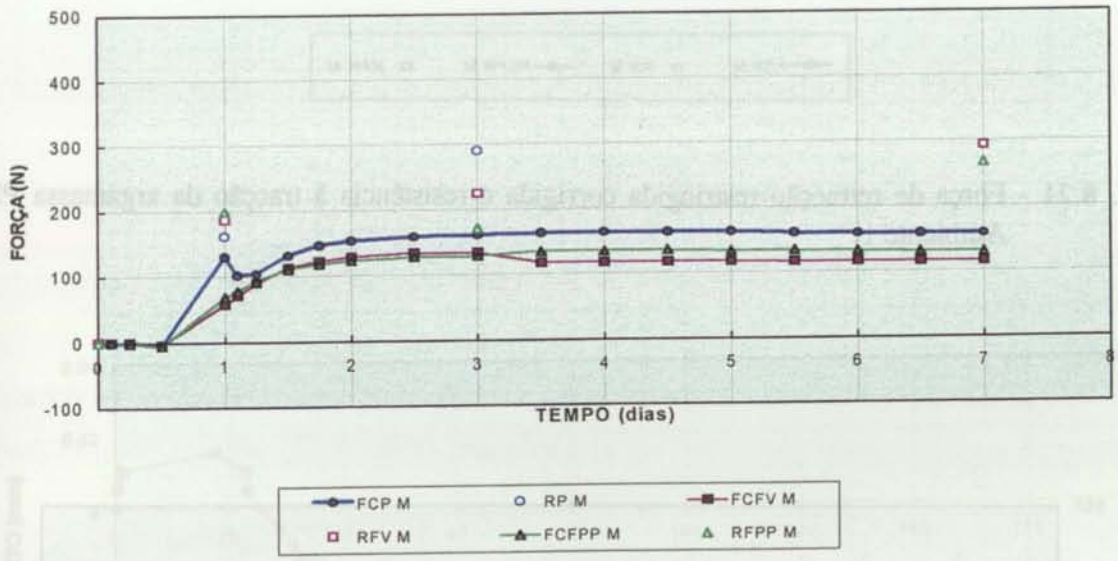


Gráf. 8.18 - Força de retracção não-restringida num provete da argamassa P. Ambiente 1

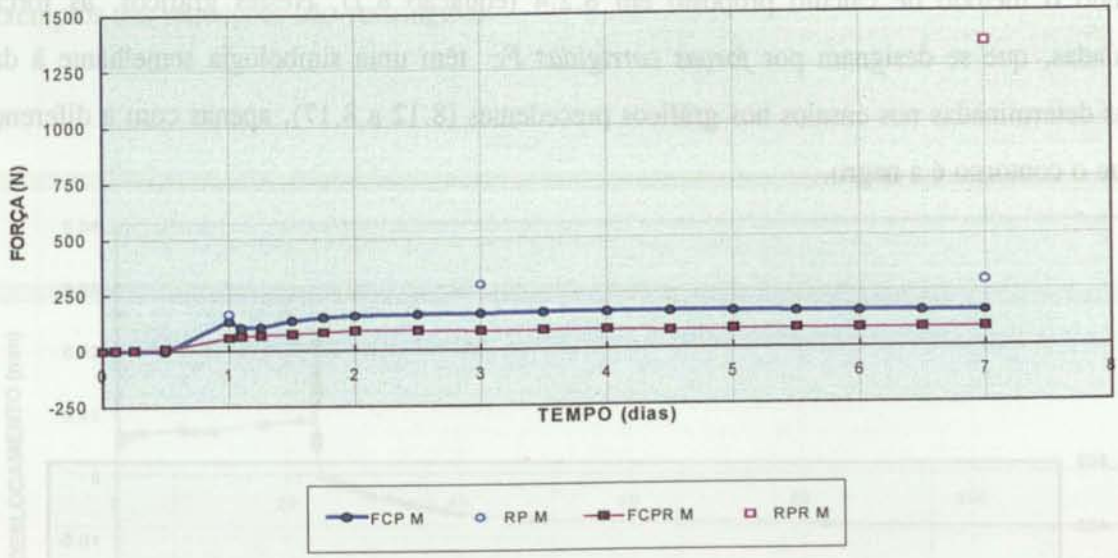


Gráf. 8.19 - Força de retracção não-restringida num provete da argamassa CA. Ambiente 1

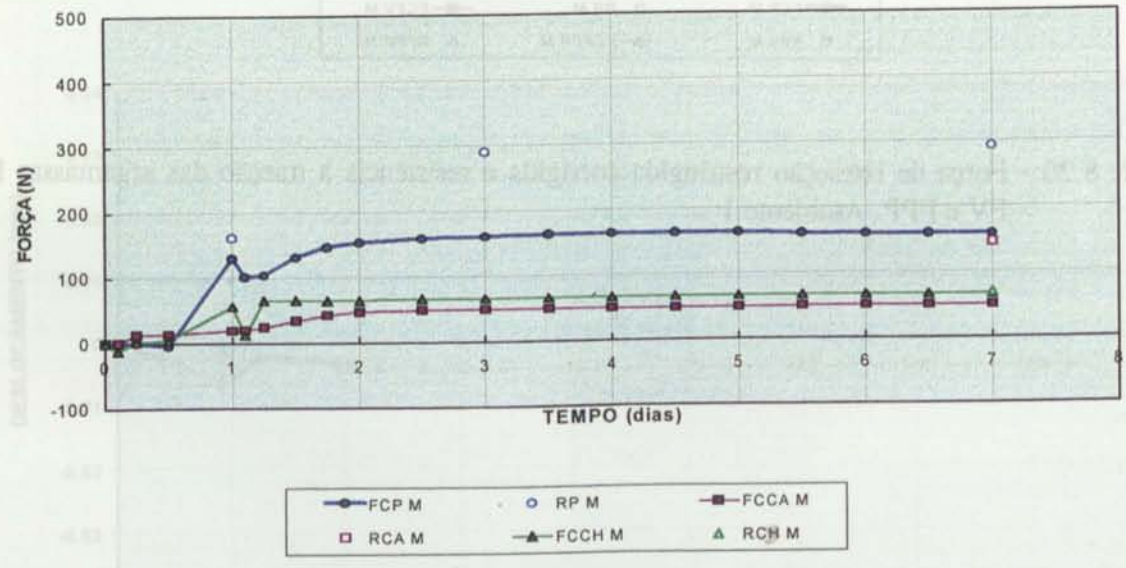
Nos gráficos seguintes (8.20 a 8.22) mostram-se alguns exemplos dos valores das forças que se instalariam, previsivelmente, nas argamassas, se a restrição da retracção fosse total, segundo o método de cálculo proposto em 8.2.4 (equação 8.7). Nestes gráficos, as forças calculadas, que se designam por *forças corrigidas Fc* têm uma simbologia semelhante à das forças determinadas nos ensaios nos gráficos precedentes (8.12 a 8.17), apenas com a diferença de que o contorno é a negro.



Gráf. 8.20 - Força de retracção restringida corrigida e resistência à tracção das argamassas P, FV e FPP. Ambiente 1



Gráf. 8.21 - Força de retracção restringida corrigida e resistência à tracção da argamassa PR. Ambiente 1.

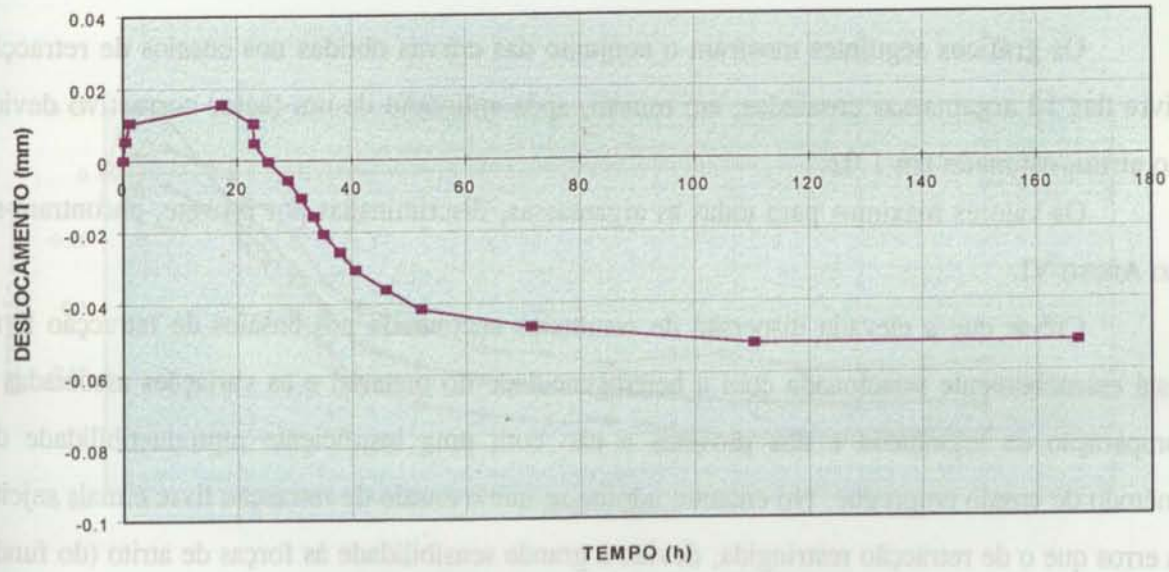


Gráf. 8.22 - Força de retracção restringida corrigida e resistência à tracção das argamassas CA e CH. Ambiente 1.

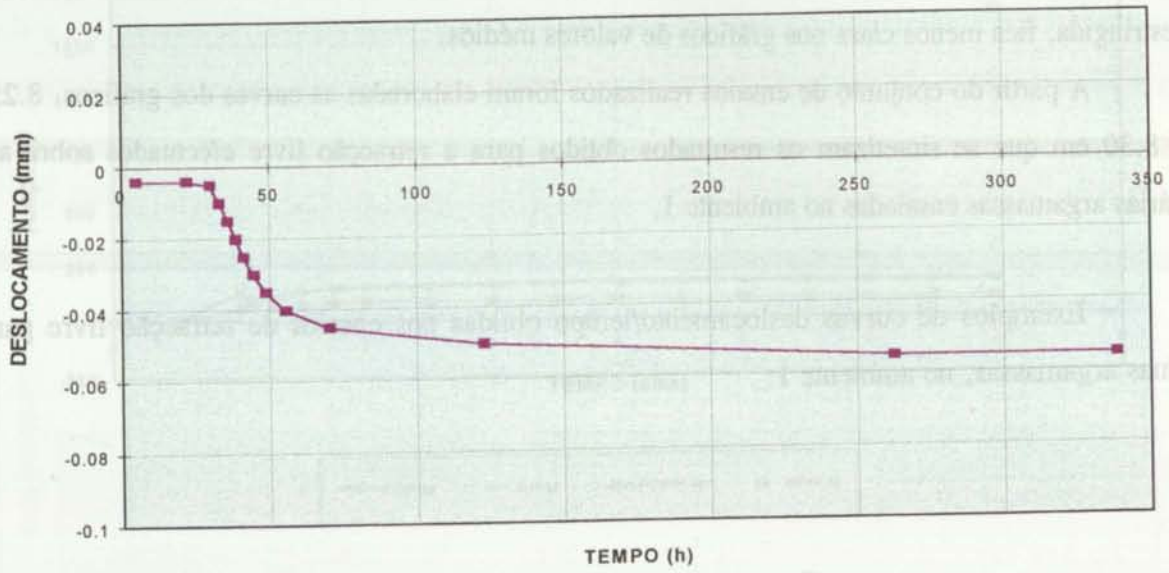
Os gráficos 8.23 e 8.24 são exemplos de curvas obtidas em ensaios de retracção livre de um provete de duas das argamassas, aqui inseridos com o objectivo de mostrar a forma das curvas individuais, que, pelas mesmas razões apontadas para os gráficos relativos à retracção restringida, fica menos clara nos gráficos de valores médios.

A partir do conjunto de ensaios realizados foram elaboradas as curvas dos gráficos. 8.25 a 8.30 em que se sintetizam os resultados obtidos para a retracção livre efectuados sobre as várias argamassas ensaiadas no ambiente 1.

Exemplos de curvas deslocamento/tempo obtidas nos ensaios de retracção livre para duas argamassas, no ambiente 1:



Gráf. 8.23 - Curva obtida no ensaio de retracção livre num dos provetes da argamassa P. Ambiente 1

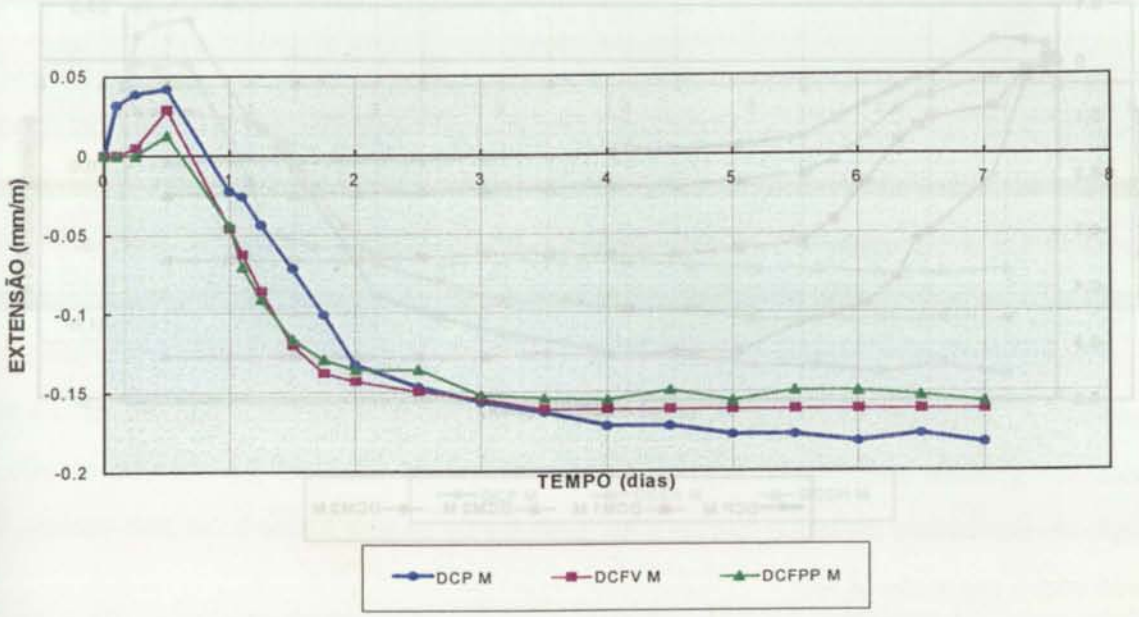


Gráf. 8.24 - Curva obtida no ensaio de retracção livre num dos provetes da argamassa CA. Ambiente 1

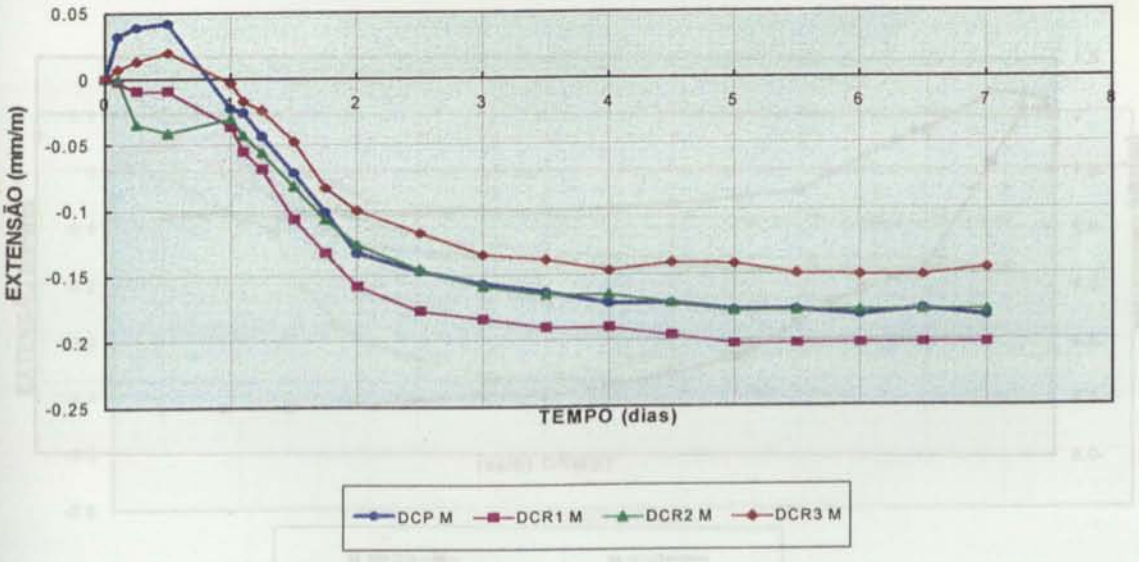
Os gráficos seguintes mostram o conjunto das curvas obtidas nos ensaios de retracção livre das 16 argamassas ensaiadas, em mm/m, após aplicação de um factor correctivo devido ao atrito, estimado em 1,02.

Os valores máximos para todas as argamassas, discriminadas por provete, encontram-se no Anexo VI.

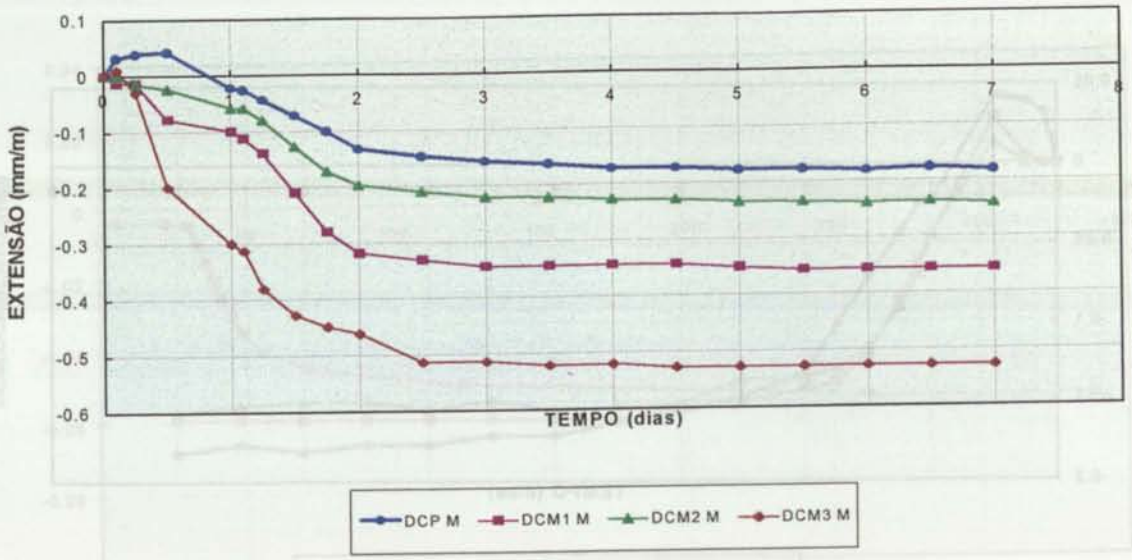
Crê-se que a elevada dispersão de resultados encontrada nos ensaios de retracção livre está essencialmente relacionada com a heterogeneidade do material e as variações associadas à preparação da argamassa e dos provetes e não com uma insuficiente reproductibilidade do método de ensaio empregue. No entanto, admite-se que o ensaio de retracção livre é mais sujeito a erros que o de retracção restringida, devido à grande sensibilidade às forças de atrito (do fundo do molde e das paredes) e a quaisquer pequenas imperfeições na linha de condução do deslocamento. Ainda assim, julga-se que a obtenção de valores da retracção desde a moldagem em provetes com o mesmo formato dos usados no ensaio de tracção são vantagens que justificam a realização deste ensaio, mesmo que os valores absolutos devam ser encarados com sentido crítico.



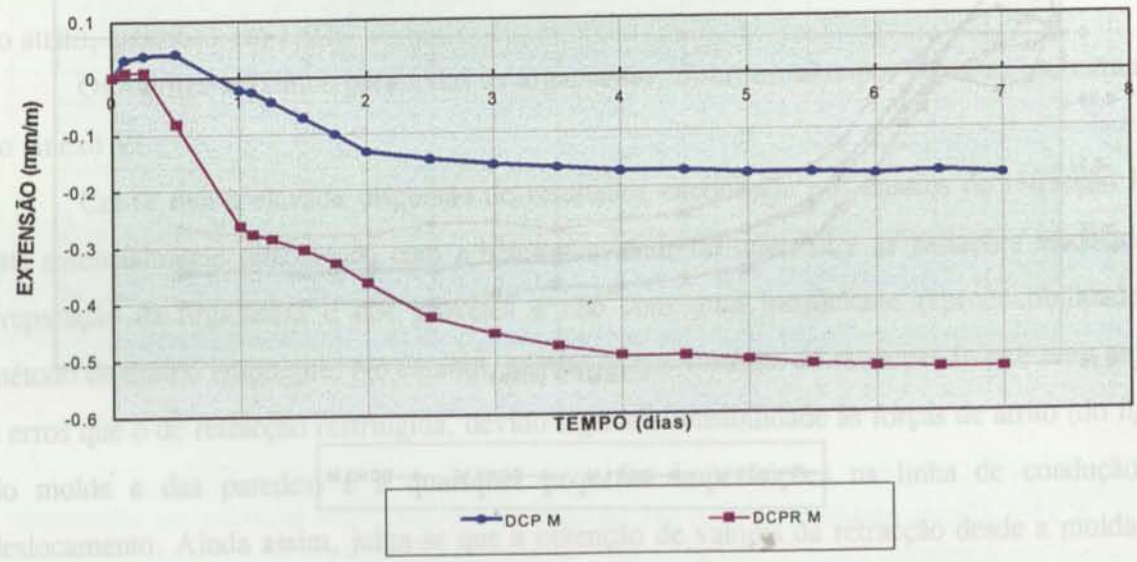
Gráf. 8.25 - Retracção livre nas argamassas P, FV e FPP. Ambiente 1.



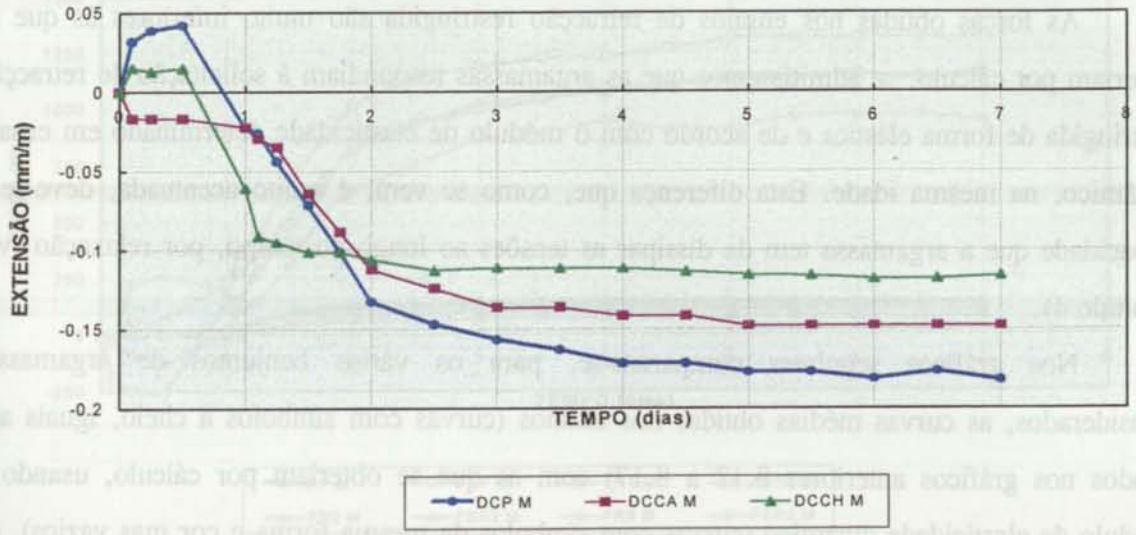
Gráf. 8.26 - Retracção livre nas argamassas R1, R2 e R3. Ambiente 1.



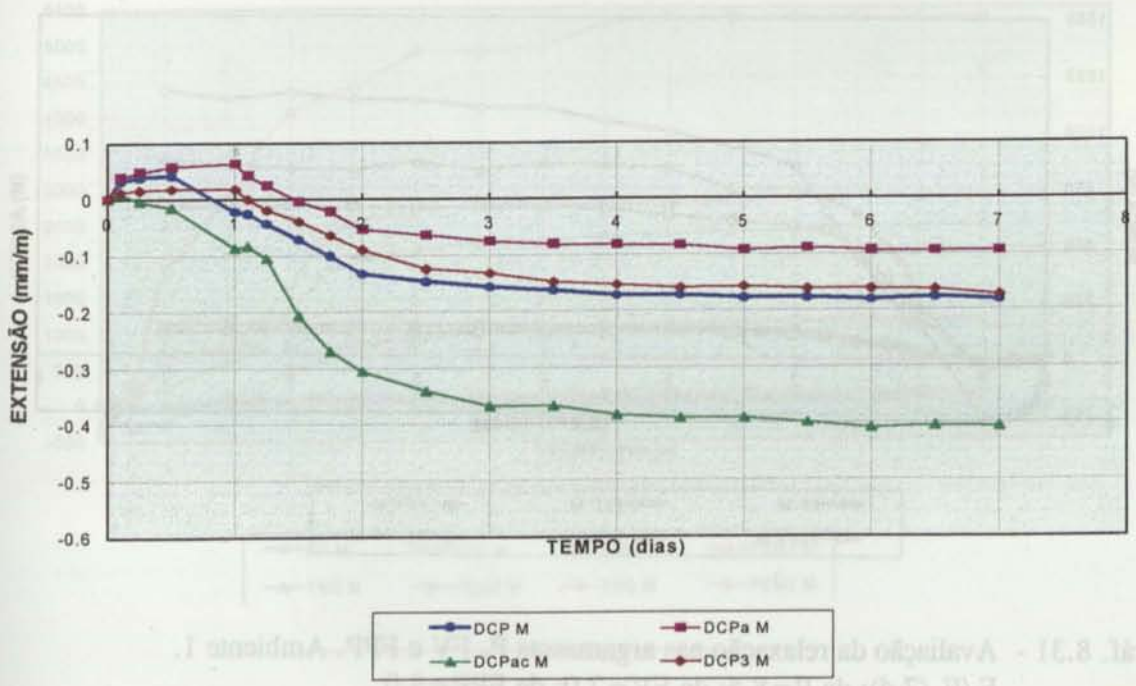
Gráf. 8.27 - Retracção livre na argamassa M1, M2 e M3. Ambiente 1.



Gráf. 8.28 - Retracção livre na argamassa PR. Ambiente 1.



Gráf. 8.29 - Retracção livre nas argamassas CA e CH. Ambiente 1.

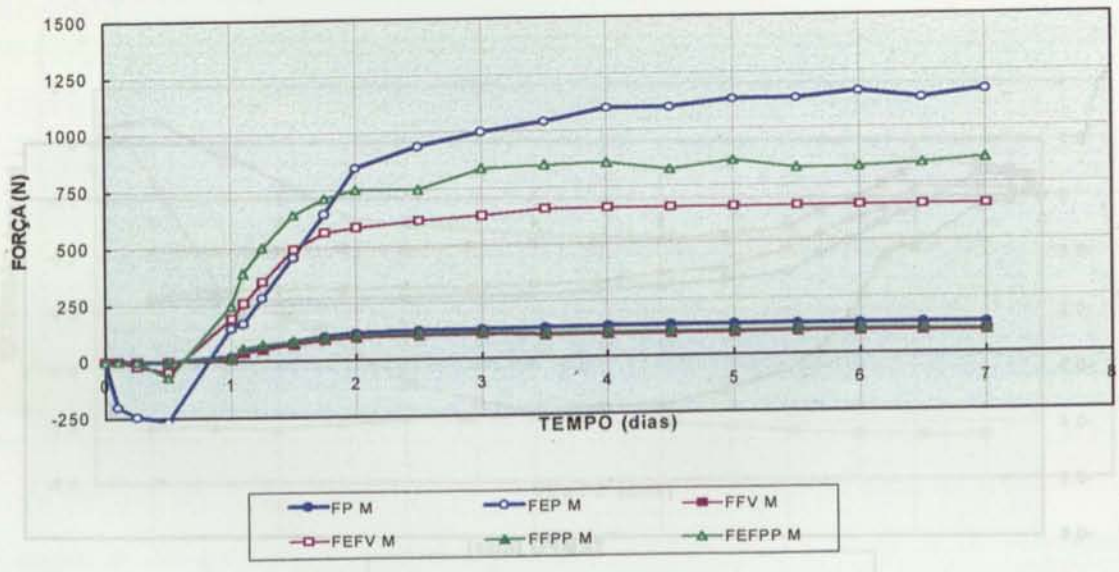


Gráf. 8.30 - Retracção livre nas argamassas Pa, Pac e P3. Ambiente 1.

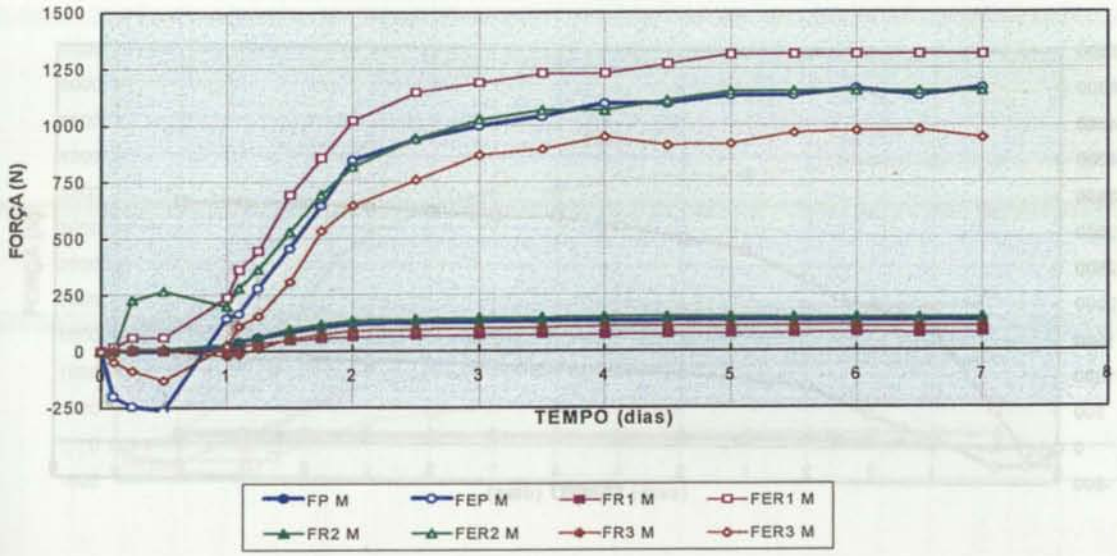
8.3.3 - Avaliação da relaxação das argamassas no ambiente 1

As forças obtidas nos ensaios de retracção restringida são muito inferiores às que se obteriam por cálculo, se admitíssemos que as argamassas respondiam à solicitação de retracção restringida de forma elástica e de acordo com o módulo de elasticidade determinado em ensaio dinâmico, na mesma idade. Esta diferença que, como se verá, é muito acentuada, deve-se à capacidade que a argamassa tem de dissipar as tensões ao longo do tempo, por relaxação (ver capítulo 4).

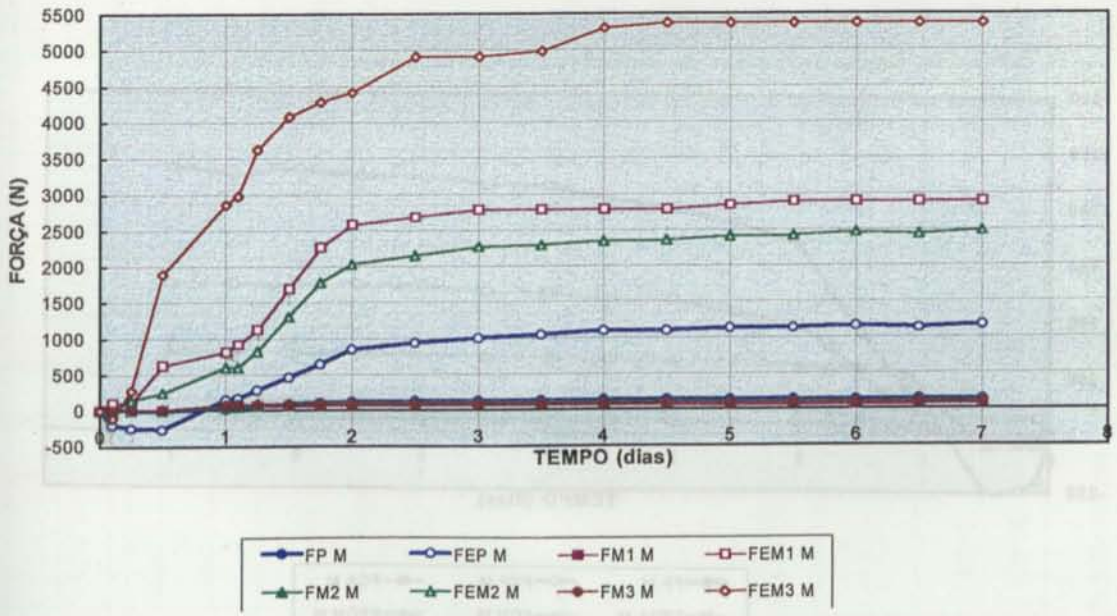
Nos gráficos seguintes comparam-se, para os vários conjuntos de argamassas considerados, as curvas médias obtidas nos ensaios (curvas com símbolos a cheio, iguais aos usados nos gráficos anteriores 8.12 a 8.17) com as que se obteriam por cálculo, usando o módulo de elasticidade dinâmico (curvas com símbolos da mesma forma e cor mas vazios), de acordo com a expressão (8.4).



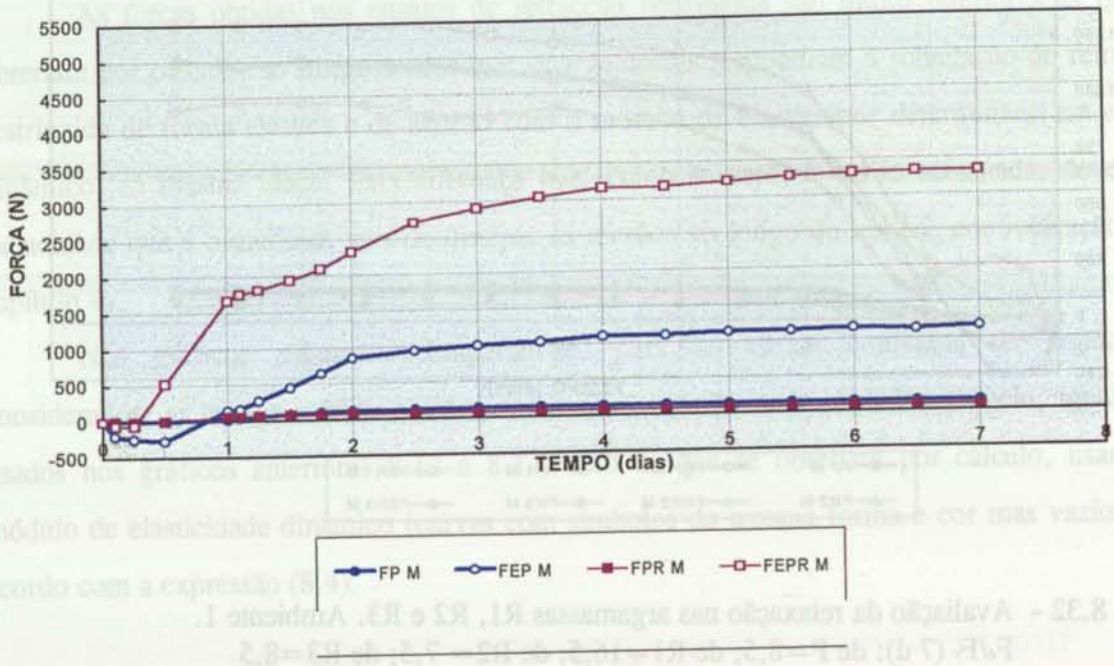
Gráf. 8.31 - Avaliação da relaxação nas argamassas P, FV e FPP. Ambiente 1.
F_e/F_r (7 d): de P=8,5; de FV=7,0; de FPP=8,0



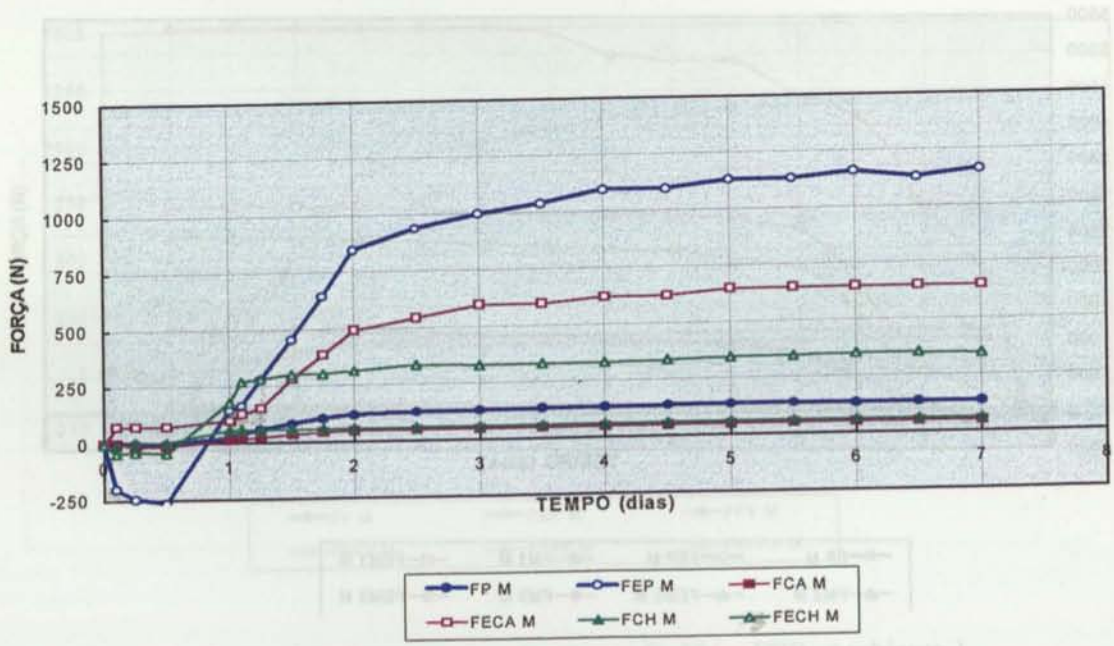
Gráf. 8.32 - Avaliação da relaxação nas argamassas R1, R2 e R3. Ambiente 1.
F_e/F_r (7 d): de P=8,5; de R1=16,5; de R2= 7,5; de R3=8,5



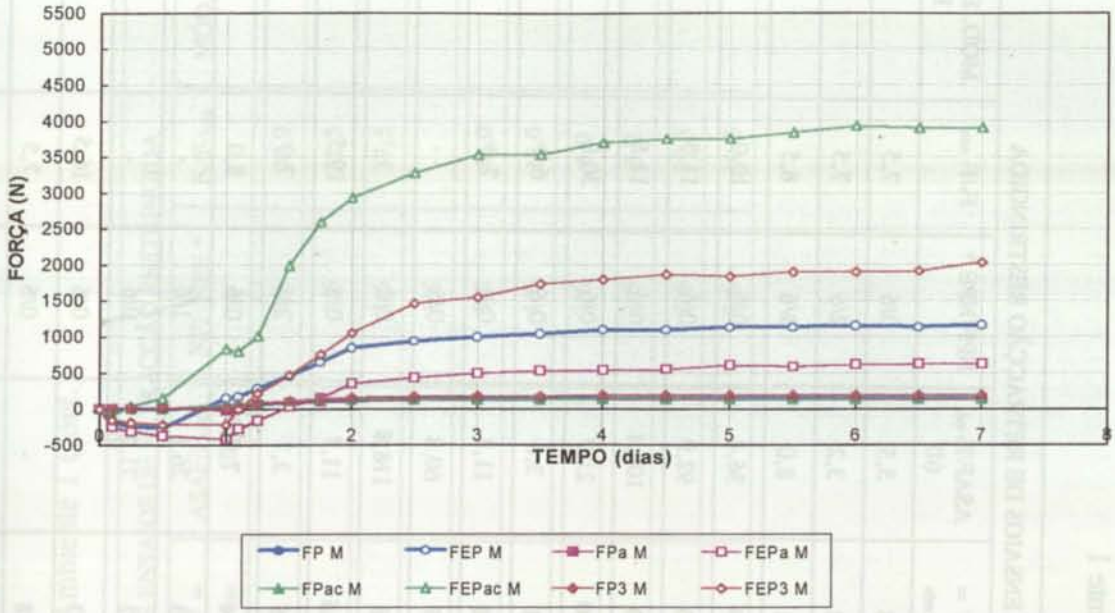
Gráf. 8.33 - Avaliação da relaxação nas argamassas M1, M2 e M3. Ambiente 1.
F_e/F_r (7 d): de P=8,5; de M1=48,0; de M2=21,5; de M3=57,5



Gráf. 8.34 - Avaliação da relaxação na argamassa PR. Ambiente 1.
F_e/F_r (7 d): de P=8,5; de PR=41,0



Gráf. 8.35 - Avaliação da relaxação nas argamassas CA e CH. Ambiente 1.
F_e/F_r (7 d): de P=8,5; de CA=12,0; de CH=6,0



Gráf. 8.36 - Avaliação da relaxação nas argamassas Pa, Pac e P3. Ambiente 1. F_e/F_r (7 d): de P=8,5; de Pa=5,0; de Pac=29,5; de P3=10,5

QUADRO 8.1 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Ambiente 1

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA						
		FORÇA MÁXIMA $F_{r\,máx}$(N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	CSAF = $R_t/F_{r\,máx}$	ASAF/$F_{r\,máx}$ (d)	NPF/NPE *	$F_e/F_{r\,máx}$	MÓD. ELAST. EQUIV. E_{eq} (MPa)
P	1	19	161	8,5	5,5	0/6	7,5	840
	3	130	290	2,2	3,2	2/6	7,5	830
	7	136	292	2,1	8,0	3/6	8,5	730
	28	135	261	1,9	36,4	0/6	10,0	640
	60	115	228	2,0	92,9	0/6	11,5	560
	140	119	120	1,0	108,4	6/6	11,5	550
FV	1	6	186	31,0	21,7	0/6	30,0	135
	3	106	224	2,1	3,8	0/6	6,0	690
	7	98	292	3,0	11,3	0/6	7,0	600
	28	94	251	2,7	60,8	0/6	-	-
	60	81	214	2,6	118,8	0/6	-	-
FPP	1	12	198	16,5	11,7	0/6	19,5	280
	3	116	171	1,5	2,7	2/6	7,0	760
	7	109	266	2,4	7,5	0/6	8,0	670
	28	97	124	1,3	26,1	1/6	-	-
	60	77	246	3,2	71,2	0/6	-	-
R1	7	81	429	5,3	-	0/6	16,5	390
R2	7	151	417	2,8	-	0/6	7,5	835
R3	7	110	398	3,6	-	0/6	8,5	740

* - Nº de provetes fendilhados / Nº de provetes ensaiados.

QUADRO 8.1 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Ambiente 1 (cont.)

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA						
		FORÇA MÁXIMA $F_{r\,máx}$ (N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	CSAF = $R_t/F_{r\,máx}$	ASAF/$F_{r\,máx}$ (d)	NPF/NPE *	$F_e/F_{r\,máx}$	MÓD. ELAST. EQUIV. E_{eq} (MPa)
M1	7	61	328	**5,4**	-	0/6	48,0	170
M2	7	117	342	**2,9**	-	0/6	21,5	485
M3	7	95	341	**3,6**	-	2/6	57,5	175
M4	7	97	93	**1,0**	-	6/6	-	-
PR	7	83	1361	**16,4**	-	0/6	41,0	155
CA	7	49	145	**3,0**	-	1/6	12,0	330
CH	7	59	69	**1,2**	-	2/6	6,0	505
Pa	7	128	314	**2,1**	-	2/6	5,0	1360
Pac	7	133	285	**2,1**	-	2/6	29,5	325
P3	7	193	403	**2,1**	-	2/6	10,5	1120

* - Nº de provetes fendilhados / Nº de provetes ensaiados

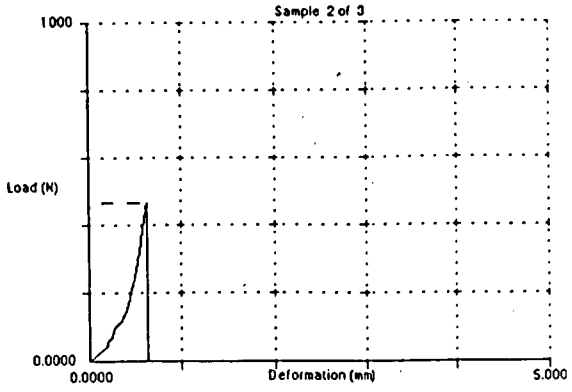
8.3.4 - Avaliação da tenacidade e da ductilidade das argamassas no ambiente 1

Os ensaios de flexão e de compressão realizados sobre parte dos prismas (ver 7.2.3) e os ensaios de tracção pura realizados sobre todos os provetes sujeitos à retracção restringida permitiram traçar curvas força-deslocamento e calcular energias de rotura das argamassas ensaiadas, e assim avaliar a sua tenacidade.

Nos gráfs. 8.37 a 8.56 apresentam-se, a título de exemplo, alguns dos gráficos obtidos nos referidos ensaios de flexão. No quadro 8.2 sintetizam-se os valores médios das energias de rotura, calculadas a partir das áreas definidas pelas curvas obtidas em todos os ensaios realizados no ambiente 1.

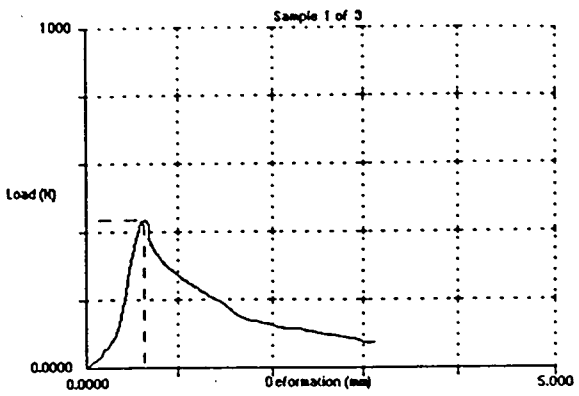
As curvas escolhidas para exemplo foram consideradas relativamente representativas das argamassas em causa, já que a forma das curvas se mantém semelhante para cada argamassa, para cada um dos tipos de ensaio (flexão, compressão ou tracção).

Os gráficos 8.37 a 8.40 foram obtidos directamente da máquina utilizada para os ensaios de flexão e de compressão (Universal "Lloyds Instruments"), em que a deformação do provete é determinada a partir do deslocamento da peça móvel da máquina (*cabeçote*) em relação às colunas fixas. Nem todas as argamassas, no entanto, puderam ser ensaiadas nesta máquina, devido às limitações da sua célula de carga. Assim, as argamassas mais resistentes foram ensaiadas na máquina de flexão e compressão "Seidner", também do LNEC, que não possibilita o registo das deformações.



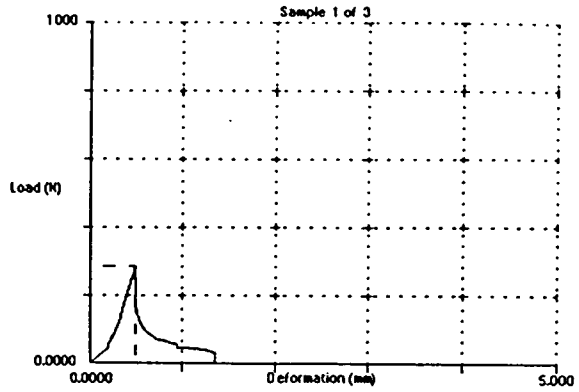
Maximum Load (N)	Def @ Max Load (mm)	Work Done (N-mm)
466.2	0.6198	91.14

Gráf. 8.37 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 7 dias de um dos provetes da argamassa P
G_{f7} = 101N.mm



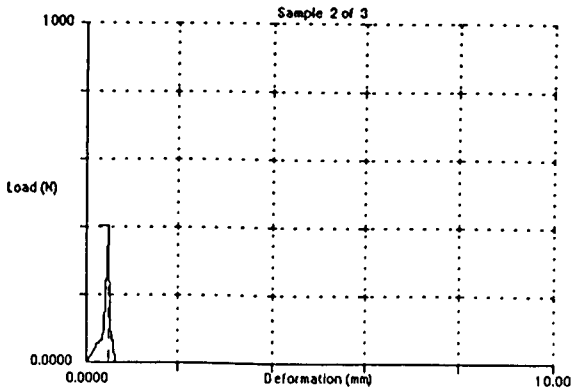
Maximum Load (N)	Def @ Max Load (mm)	Work Done (N-mm)
437.2	0.6305	515.9

Gráf. 8.38 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 7 dias de um dos provetes da argamassa FV. G_f = 438 N.mm



Maximum Load (N)	Def @ Max Load (mm)	Work Done (N-mm)
285.3	0.4786	104.2

Gráf. 8.39 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 7 dias de um dos provetes da argamassa FPP. G_f = 79 N.mm



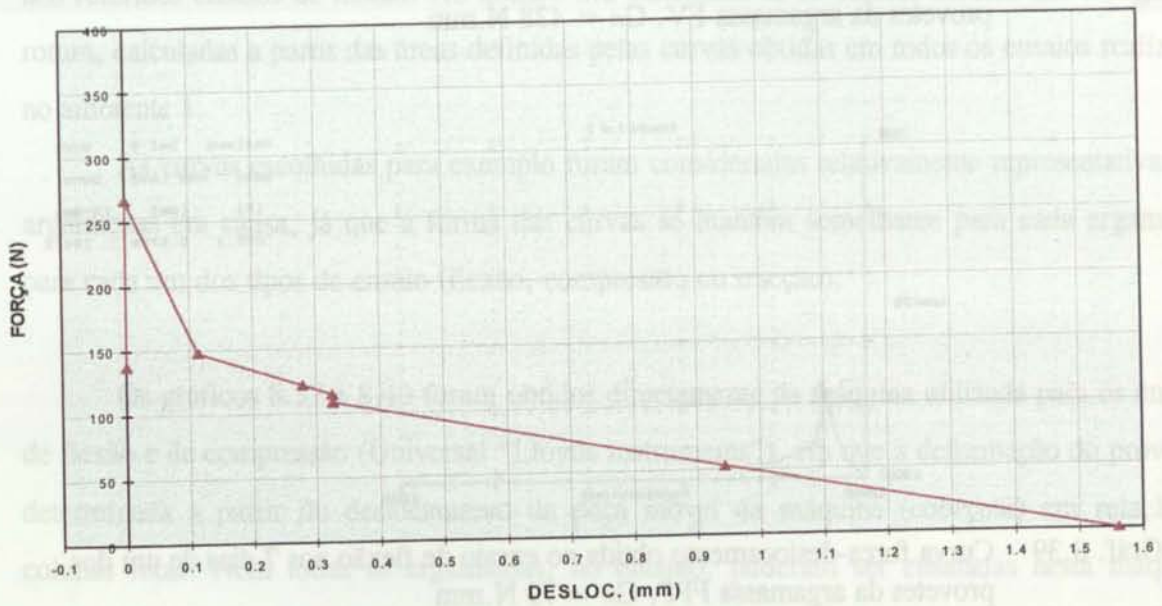
Maximum Load (N)	Def @ Max Load (mm)	Work Done (N-mm)
403.6	0.4932	57.07

Gráf. 8.40 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 7 dias de um dos provetes da argamassa Pa. G_f = 76 N.mm

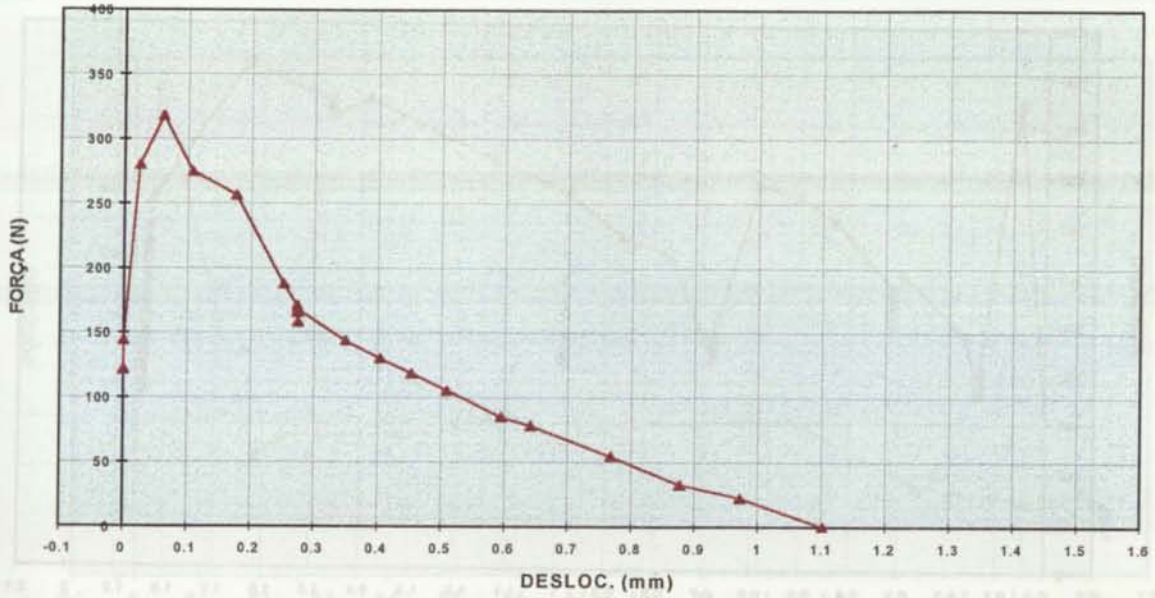
Nos gráficos seguintes (8.41 a 8.56) apresentam-se exemplos de curvas força/deslocamento obtidas para as várias argamassas nos ensaios de retracção restringida. Os exemplos seleccionados para as argamassas P, FV, R1, M1, CA, e Pac foram obtidos durante os mesmos ensaios de tracção representados nos exemplos dos gráficos 8.1 a 8.6.

Os gráficos escolhidos para exemplo foram considerados relativamente representativos das argamassas em causa, já que a forma das curvas se manteve semelhante para cada argamassa.

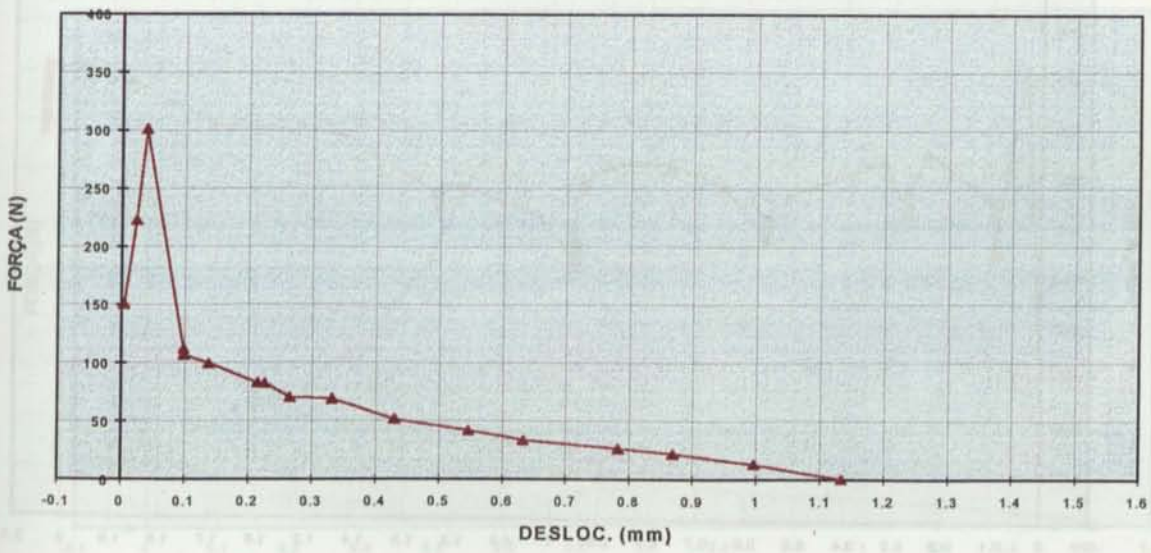
Sob a legenda de cada gráfico apresenta-se o valor médio do coeficiente *CREF* da argamassa, nos ensaios realizados na idade em causa.



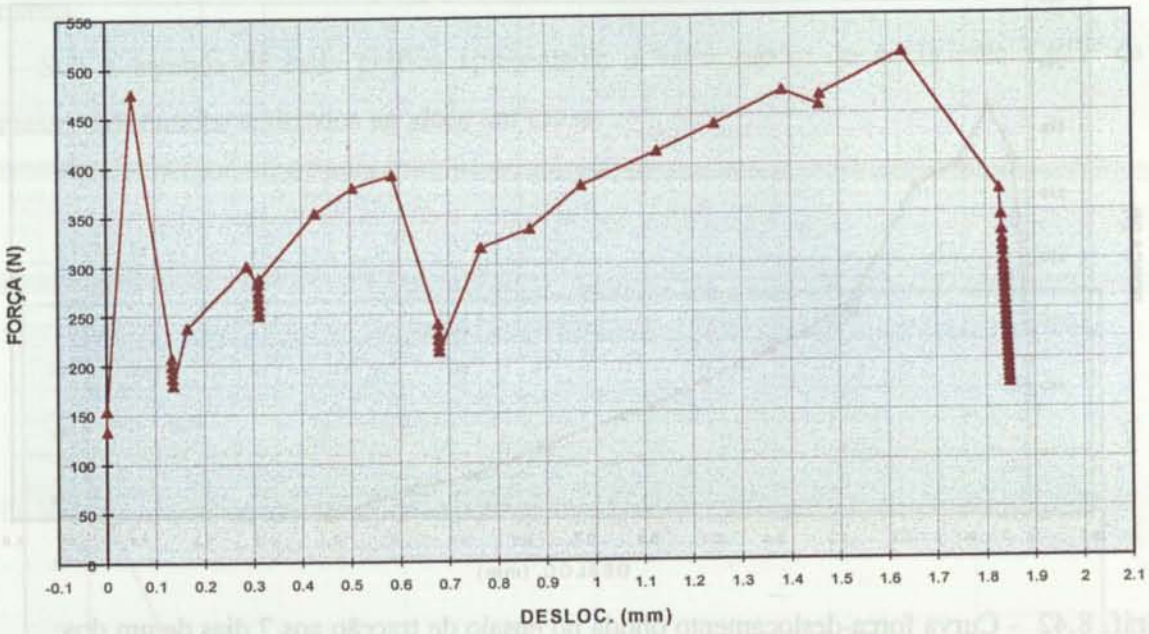
Gráf. 8.41 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa P
CREF (7) = 0,51 mm



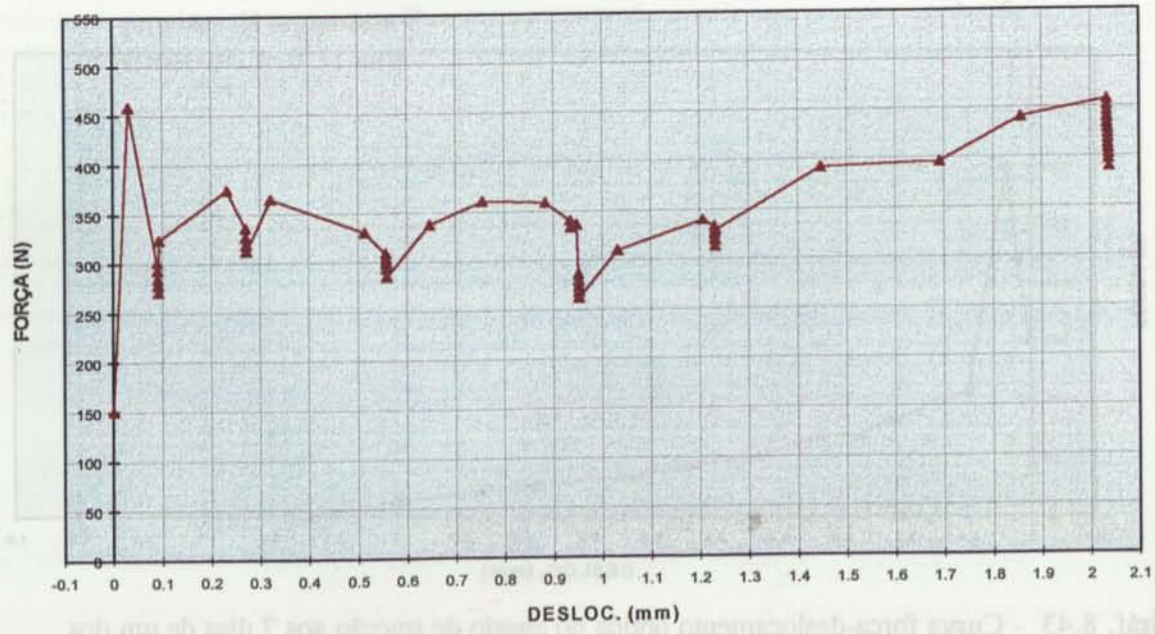
Gráf. 8.42 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa FV
CREF (7) = 1,20 mm



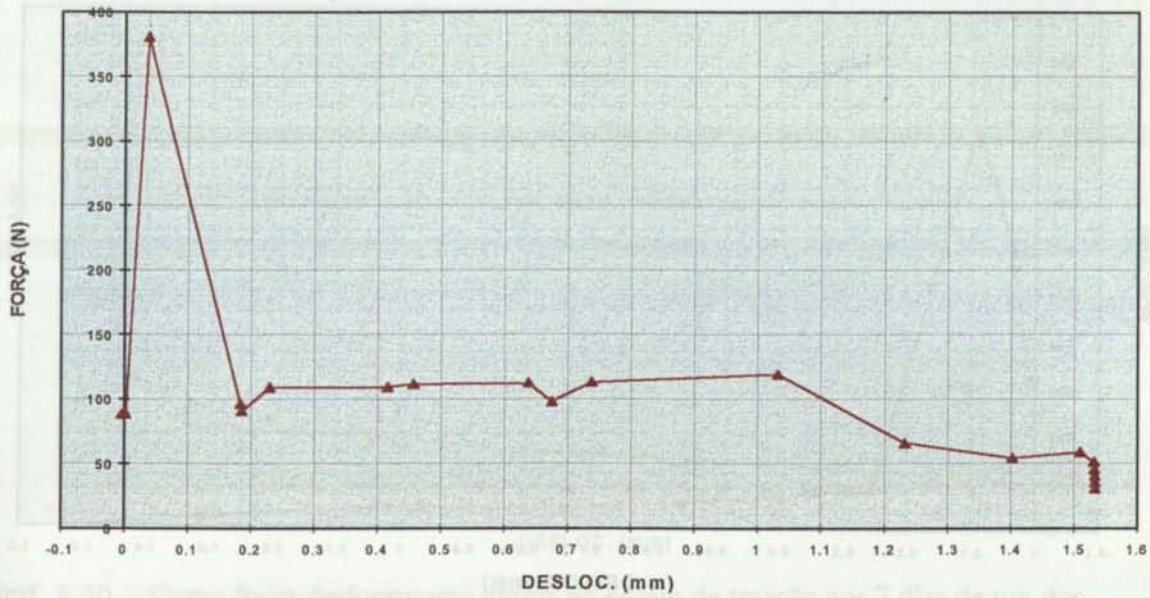
Gráf. 8.43 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa FPP
CREF (7) = 0,54 mm



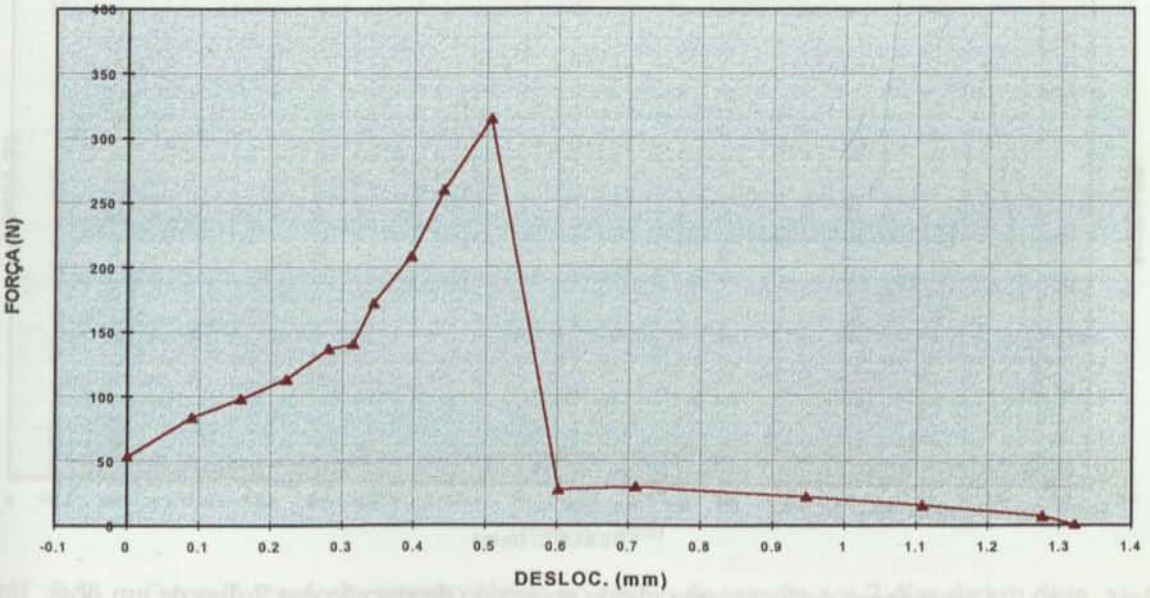
Gráf. 8.44 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa R1
CREF (7) = 8,75 mm



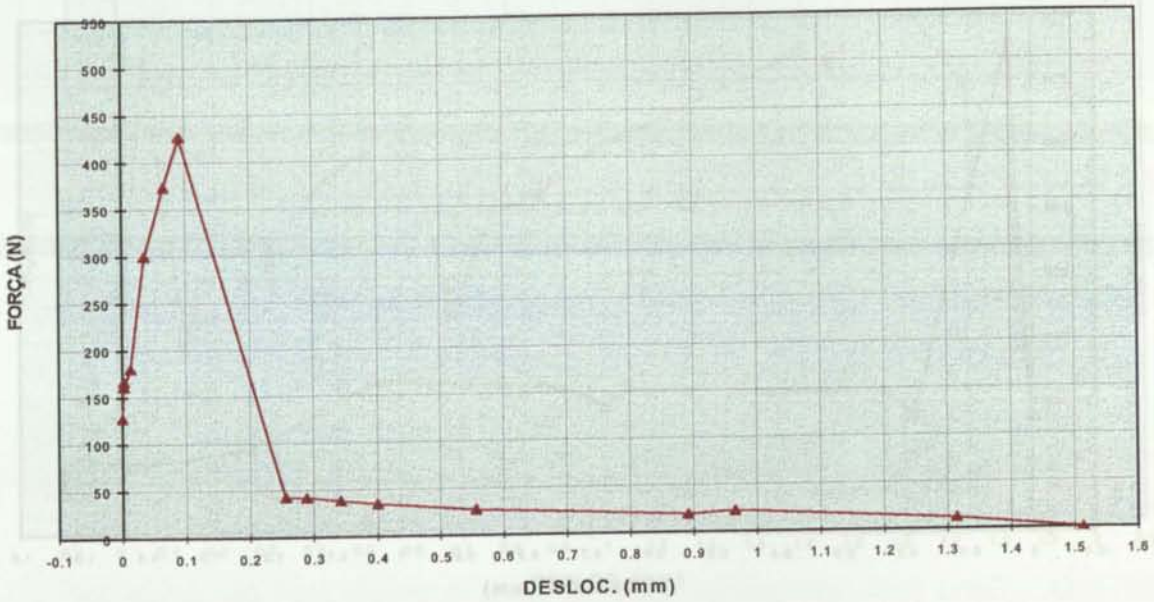
Gráf. 8.45 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa R2
CREF (7) = 4,98 mm



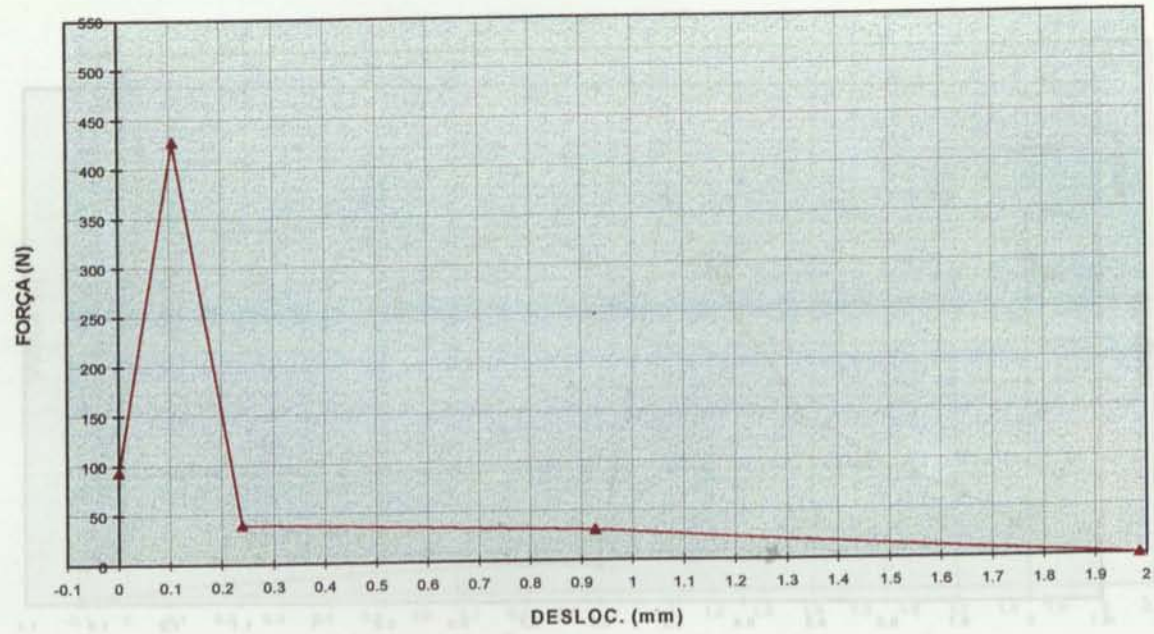
Gráf. 8.46 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa R3
CREF (7) = 1,43 mm



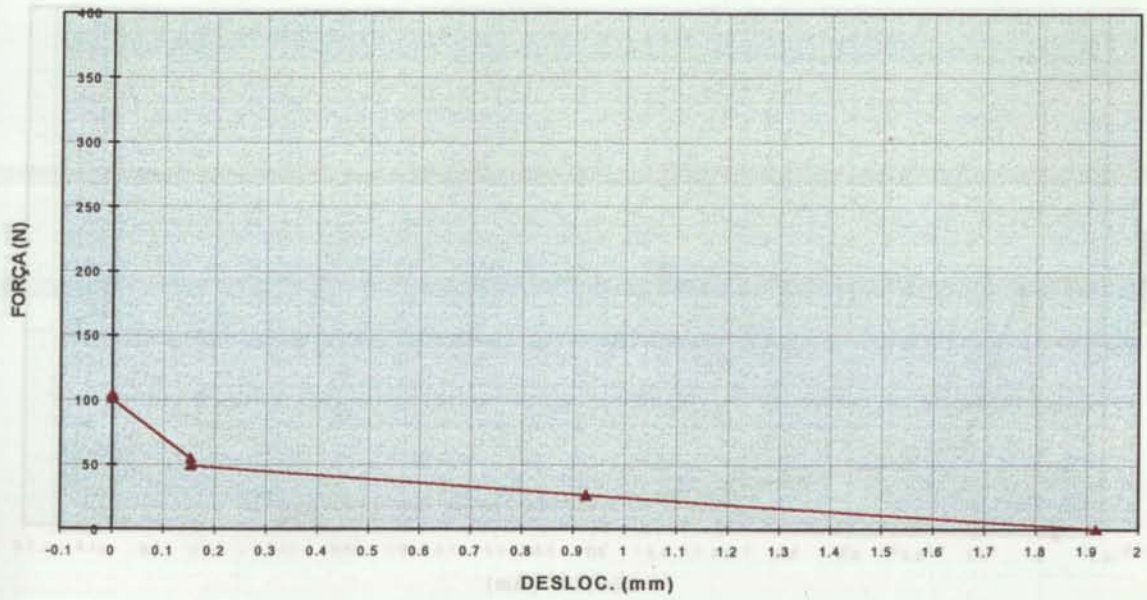
Gráf. 8.47 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa M1
CREF (7) = 2,02 mm



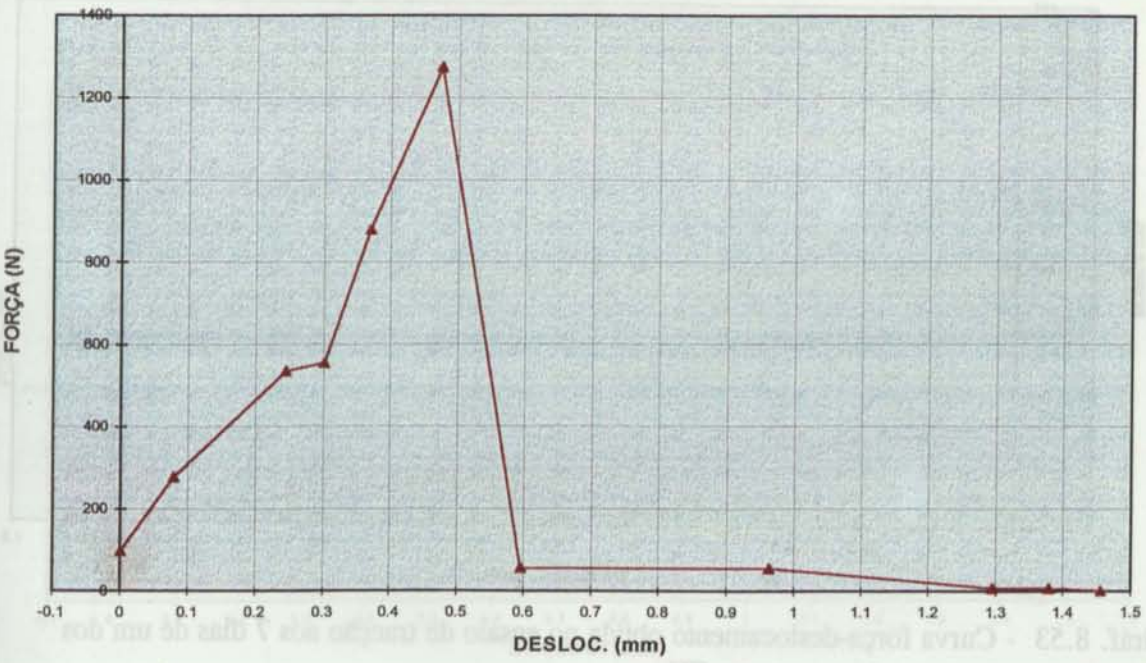
Gráf. 8.48 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa M2
CREF (7) = 0,70 mm



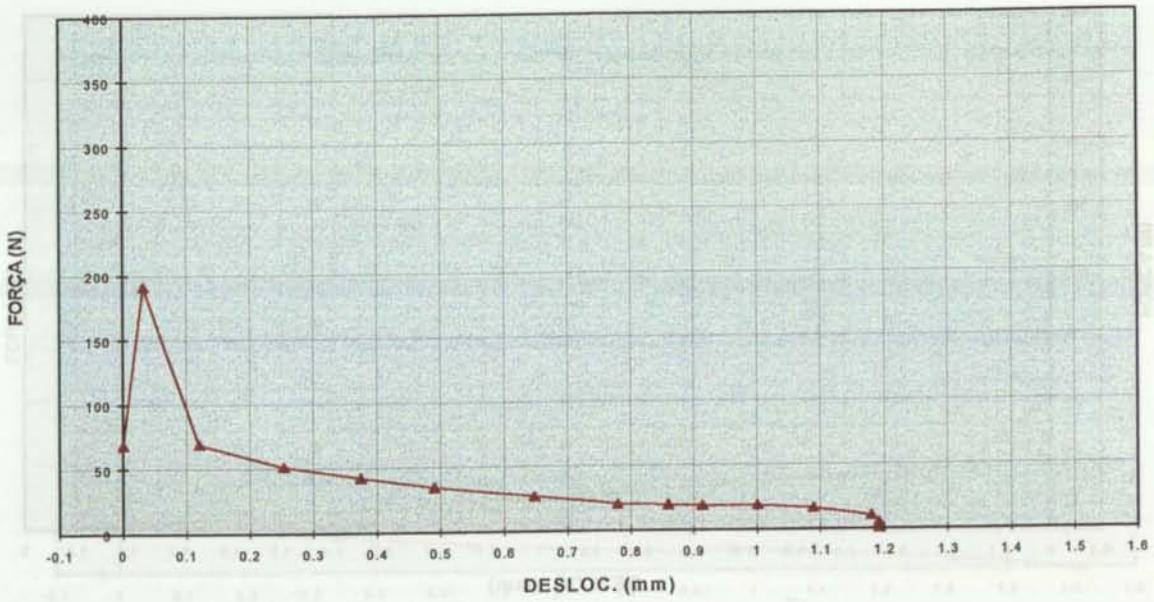
Gráf. 8.49 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa M3. CREF (7) = 1,04 mm



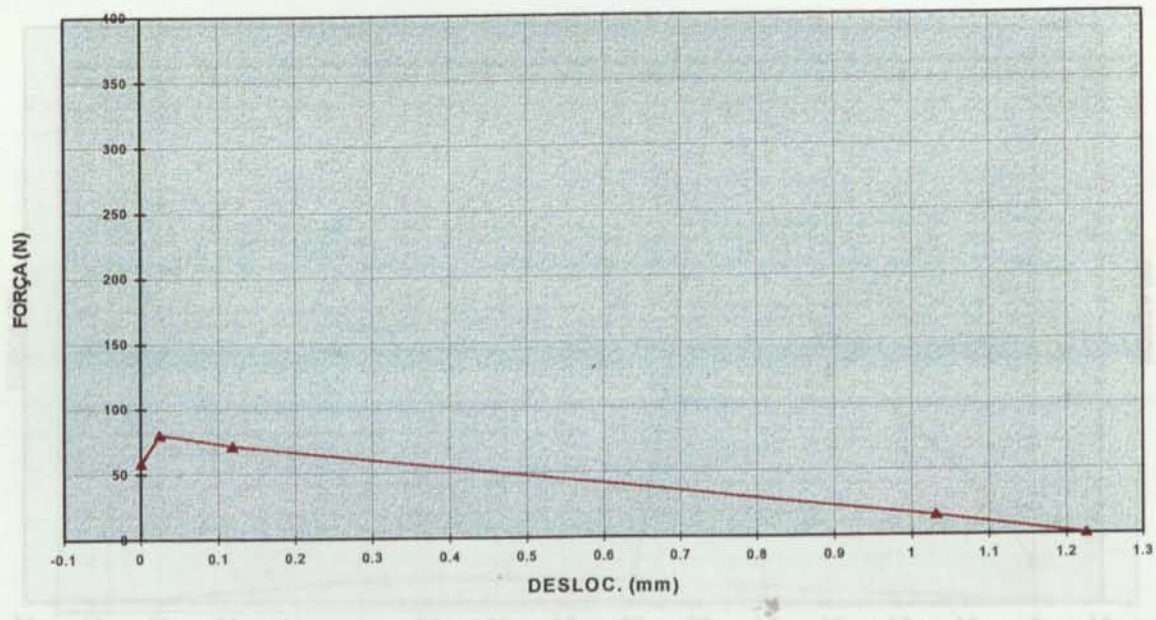
Gráf. 8.50 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa M4 (provete fissurado)
CREF (7) = 0,57 mm



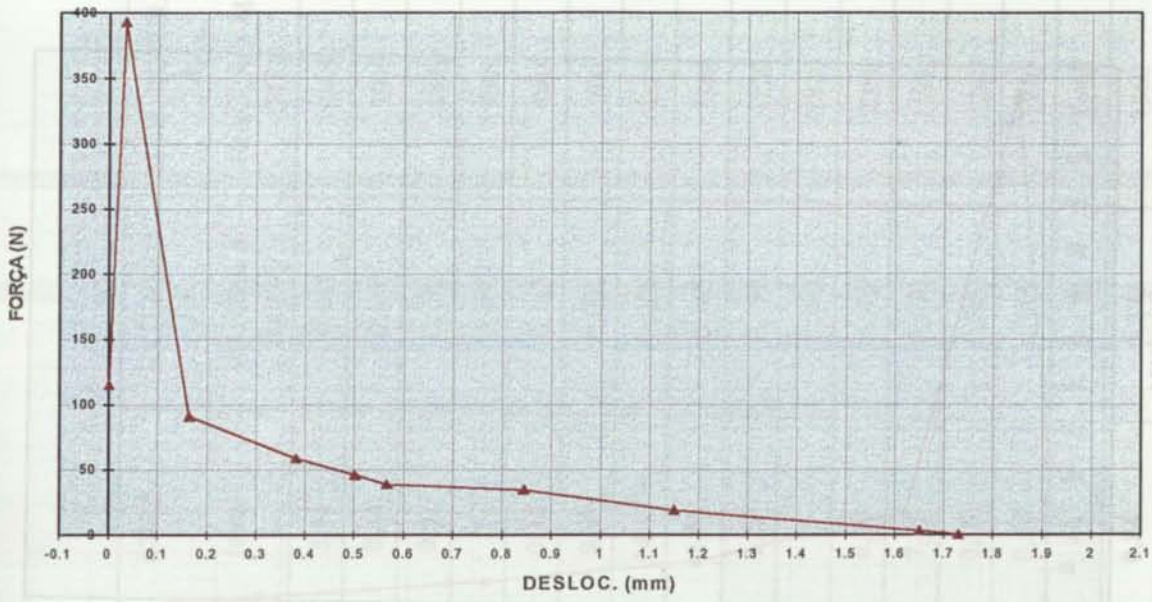
Gráf. 8.51 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa PR
CREF (7) = 6,87 mm



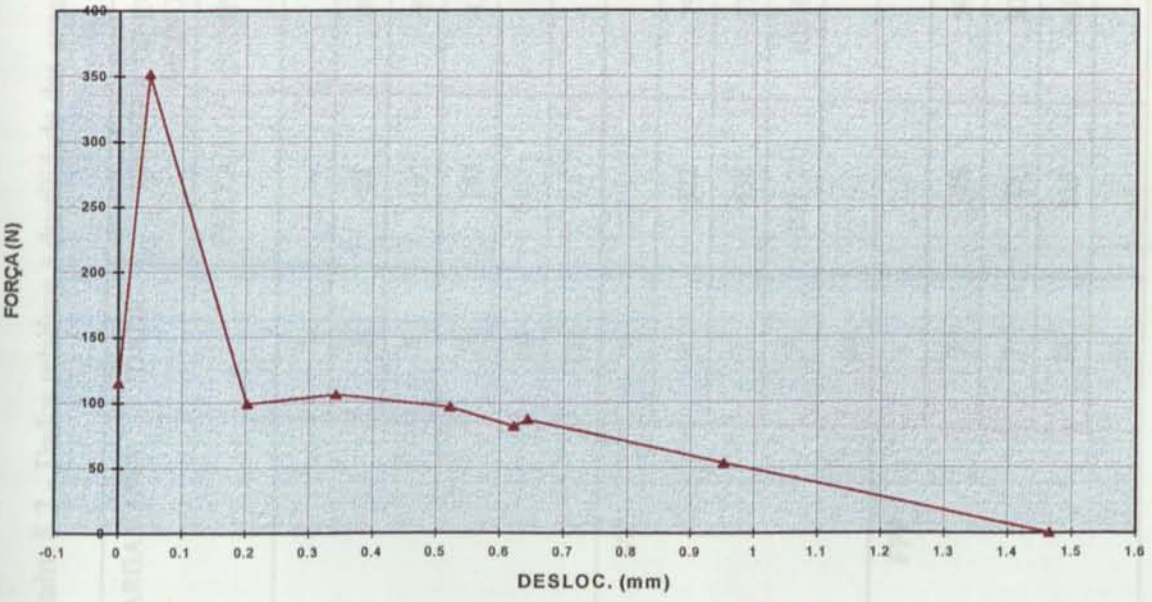
Gráf. 8.52 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa CA
CREF (7) = 1,18 mm



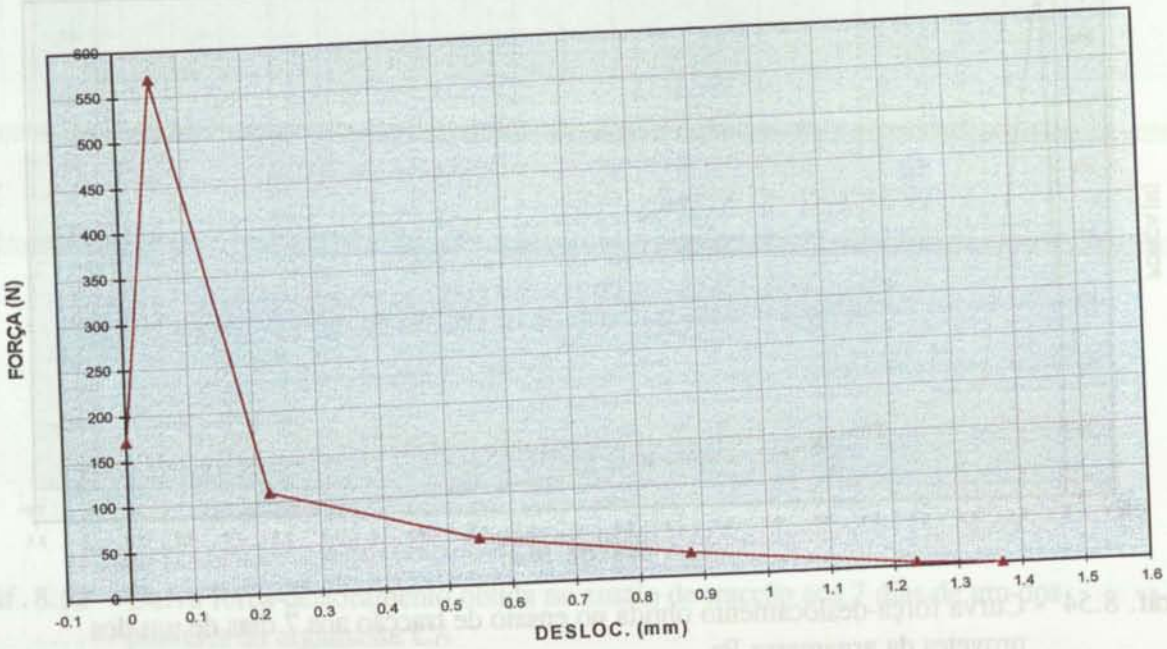
Gráf. 8.53 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa CH
CREF (7) = 0,93 mm



Gráf. 8.54 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa Pa
CREF (7) = 0,92 mm



Gráf. 8.55 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa Pac
CREF (7) = 0,63 mm



Gráf. 8.56 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa P3
CREF (7) = 0,55 mm

Quadro 8.2 - Dados relativos à ductilidade das argamassas. Ambiente 1.

ARGAMASSA	IDADE	ENERGIA DE ROTURA (VALORES MÉDIOS) (N.mm)			CREF (mm)	EXTENSÃO DE ROTURA d_r (mm/m)	MÓD. ROTURA À TRACÇÃO M_t (MPa)
		FLEXÃO G_t	COMPRESSÃO G_c	TRACÇÃO G			
P	1	-	-	59	**3,11**	0,045	12480
	3	52	3038	58	**0,45**	0,110	2970
	7	101	3988	70	**0,51**	0,070	5850
	28	145	4283	*	*	0,060	9300
	60	-	-	51	**0,44**	0,115	940
	140	-	-	58	**0,49**	0,001	290
FV	1	-	-	85	**14,17**	0,006	70070
	3	322	7920	83	**0,78**	0,165	2360
	7	438	7730	118	**1,20**	0,195	1230
	28	277-271	10810-7810	*	*	0,205	1820
	60	-	-	77	**0,95**	0,180	2380
FPP	1	-	-	85	**7,08**	0,040	11930
	3	145	5971	69	**0,59**	0,200	1240
	7	79	3062	59	**0,54**	0,215	1750
	28	113	4476	*	*	0,170	3180
	60	-	-	65	**0,84**	0,275	1560

* - Não foi possível determinar devido a problemas no ensaio (os transdutores de deslocamento estavam mal colocados)

Quadro 8.2 - Dados relativos à ductilidade das argamassas. Ambiente 1 (cont.)

ARGAMASSA	IDADE	ENERGIA DE ROTURA (VALORES MÉDIOS) (N.mm)			**CREF**	EXTENSÃO DE	MÓD. ROTURA À
		FLEXÃO G_f	COMPRESSÃO G_c	TRACÇÃO G	**(mm)**	ROTURA d_r (mm/m)	TRACÇÃO M_t (MPa)
R1	7	-	-	709	**8,75**	0,710	240
R2	7	-	-	752	**4,98**	0,215	170
R3	7	-	-	157	**1,43**	0,370	50
M1	7	-	-	123	**2,02**	1,290	460
M2	7	-	-	82	**0,70**	0,265	3520
M3	7	-	-	99	**1,04**	0,330	1850
M4	7	-	-	55*	**0,57***	0,005	-
PR	7	-	-	570	**6,87**	1,260	2600
CA	7	-	-	58	**1,18**	0,350	885
CH	7	-	-	55	**0,93**	0,020	6575
Pa	7	76	4412	118	**0,92**	0,185	8695
Pac	7	-	-	84	**0,63**	0,075	5010
P3	7	-	-	106	**0,55**	0.060	15774

* - Todos os provetes fendilharam, no entanto a energia de rotura não é nula, devido a uma resistência residual à propagação de fendas.

8.3.5 - Apreciação dos resultados dos ensaios de comportamento à fendilhação no ambiente 1

Os resultados obtidos permitiram extrair as conclusões que se sintetizam a seguir.

a) Retracção restringida

As argamassas com fibras FV e FPP sofrem forças um pouco inferiores às que se instalam na argamassa P, enquanto as resistências são, em geral, da mesma ordem de grandeza (com excepção da resistência aos 3 dias, em que P apresenta valor superior). Assim, os coeficientes *CSAF* das argamassas FV e FPP são, em quase todas as idades, um pouco superiores aos de P, embora FPP tenha um valor inferior de $ASAF/F_{r\ máx}$ aos 60 dias. Além disso, as argamassas com fibras parecem apresentar um comportamento mais homogéneo que a argamassa padrão, que mostra grande dispersão de resultados (ver Anexo VI, quadro VI.1). Nenhum dos provetes de argamassa FV fendilhou durante o ensaio de retracção restringida e alguns apresentaram, por outro lado, fendilhação múltipla durante o ensaio de tracção lenta. Nas argamassas P e FPP houve alguns casos de fendilhação de provetes durante o ensaio de retracção restringida.

As argamassas com redes de fibra de vidro R1 e R2 e de polipropileno R3, desenvolvem forças diversificadas, mas que não se afastam muito da ordem de grandeza da argamassa padrão; no entanto, mostram resistências à tracção muito superiores. Nos provetes com rede de fibra de vidro verificou-se sempre fendilhação múltipla durante o ensaio de tracção, surgindo 4 a 6 fendas antes de se iniciar uma quebra acentuada de resistência. Com a rede de polipropileno, de menor módulo de elasticidade, este fenómeno não atingiu a mesma expressão. Com a rede R2, apesar do fenómeno de fendilhação múltipla, a rotura deu-se com descolamento entre camadas, pelo plano da rede, o que mostra que a pequena abertura de malha (4,5 mm x 4,5 mm) não permite uma boa incorporação da rede, podendo prejudicar a aderência entre camadas (ver gráfs. 8.44 a 8.46 e figs. 8.10 a 8.14).

No que refere aos rebocos pré-doseados M1, M2 e M3 verificou-se que a força desenvolvida foi sensivelmente menor e as resistências superiores às da argamassa padrão, resultando coeficientes *CSAF* aos 7 dias bastante superiores. Além disso, estas argamassas

mostraram uma muito maior homogeneidade, o que é compreensível por serem doseadas industrialmente e com areia de granulometria controlada (ver Anexo VI, quadro VI.1).

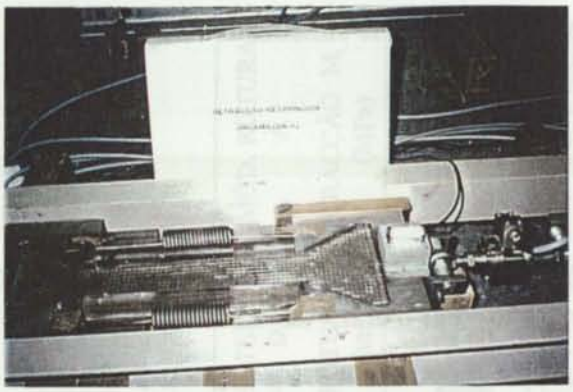


Fig. 8.10 - Preparação de provete de argamassa R2 para ensaio de retracção restringida

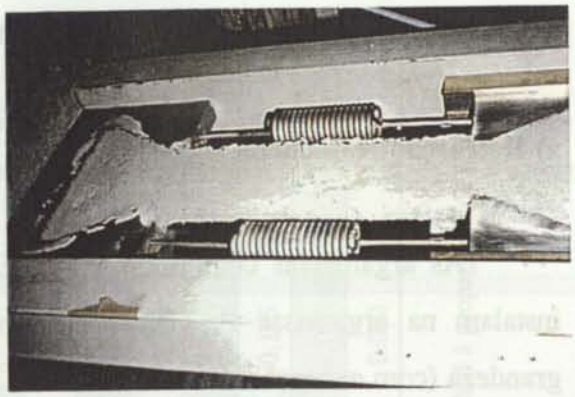


Fig. 8.11 - Provete de argamassa FV após ensaio de tracção. Fendilhação múltipla

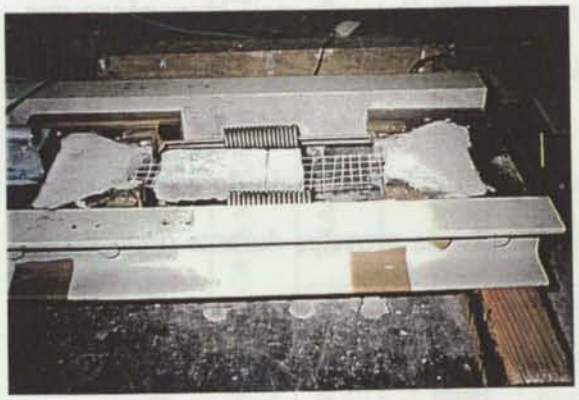


Fig. 8.12 - Provete de argamassa R1 após ensaio de tracção: fendilhação múltipla

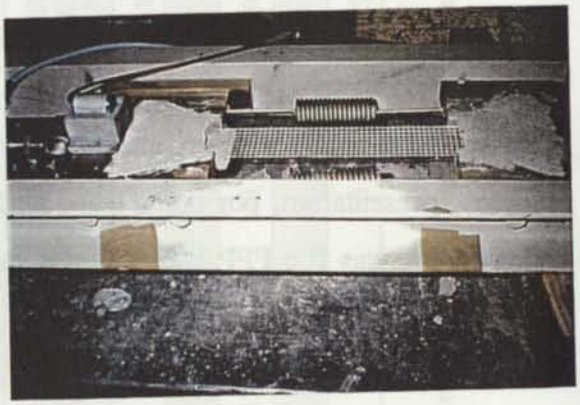


Fig. 8.13 - Provete de argamassa R2 após ensaio de tracção: fendilhação múltipla e descolamento pela rede



Fig. 8.14 - Provete de argamassa R3 após ensaio de tracção: fendilhação múltipla

O reboco pré-doseado M4 apresenta forças da mesma ordem de grandeza de P, mas verificou-se fendilhação dos seis provetes ensaiados.

A argamassa de ligante misto PR mostra forças muito baixas e resistências muito superiores às da argamassa padrão, portanto coeficientes *CSAF* muito mais elevados. O seu comportamento é bastante homogéneo (ver Anexo VI, quadro VI.1).

Nos rebocos com cal, CA e CH, desenvolveram-se forças menores e, no caso de CA, de modo mais lento. No entanto, as resistências foram significativamente mais baixas; de facto, em ambos os casos houve fendilhação de provetes e o coeficiente *CSAF* da argamassa CH é bastante reduzido. A argamassa CA tem um coeficiente *CSAF* superior a P, mas apresenta uma grande dispersão de resultados (ver Anexo VI, quadro VI.1), o que aliás também se verificou nos ensaios descritos nos capítulos 7 e 9, e se deve provavelmente à maior heterogeneidade do material.

O aumento do teor de água parece não aumentar as forças desenvolvidas, mas atrasar o seu início e gerar forças de compressão iniciais. As resistências também se mantêm idênticas às de P. Este último efeito, um pouco surpreendente à primeira vista, já que a maior quantidade de água deveria aumentar a porosidade e, em consequência, diminuir a resistência, pode ser explicado por, no ambiente considerado (23°C / 50%HR), bastante seco, se verificar, nas argamassas com o teor de água exigido por uma trabalhabilidade normal, uma incompleta hidratação do cimento. Nestas condições, o aumento de água, ao favorecer uma melhor hidratação do cimento, contribuirá para um aumento da resistência à tracção que poderá compensar a provável maior porosidade. Além disso, sendo a água a mais consumida principalmente nas reacções de hidratação, não aumenta significativamente a retracção.

A substituição da areia do rio Tejo por areia amarela de Corroios não ocasionou alterações significativas nas forças desenvolvidas nem no coeficiente *CSAF*.

Finalmente, o aumento do teor de cimento desencadeou um incremento significativo das forças geradas na argamassa, mas como as resistências também aumentaram, o coeficiente *CSAF* manteve-se idêntico.

Assim, apesar de algumas diferenças de comportamento entre as argamassas P, Pa, Pac e P3, os seus coeficientes *CSAF* são iguais.

Nestes ensaios, não houve fendilhação de nenhum provete das argamassas FV, R1, R2, R3, M1, M2 e PR. Todas as argamassas tradicionais tiveram 1, 2 ou 3 provetes fendilhado aos 7 dias. A argamassa FPP teve também provetes fendilhados, mas aos 3 e aos 28 dias, situações só comparáveis com P e FV. A argamassa monocamada M4 foi a que apresentou pior comportamento, com o menor coeficiente *CSAF* e fendilhação dos seis provetes ensaiados.

O *ensaio a longo prazo* da argamassa P mostrou uma redução significativa da resistência e um aumento da probabilidade de fendilhação em idades mais avançadas; as restantes argamassas podem ou não ter tendência idêntica.

As forças *corrigidas*, que pretendem dar uma ideia das forças que poderão de facto desenvolver-se se a retracção for totalmente restringida, não alteram sensivelmente a análise comparativa efectuada, mas parecem indiciar maior probabilidade de fendilhação, principalmente para as argamassas P, FPP e CH.

b) Retracção livre

As argamassas P, FV e FPP sofrem um empolamento inicial - que dura cerca de 15 horas para as argamassas com fibras e um pouco mais para a padrão -, seguido de contracção que atinge valores da ordem de 0,15 a 0,20 mm/m, a partir do 3º dia.

As argamassas armadas com redes - R1, R2 e R3 - apresentam também retracção semelhante à argamassa P.

Os rebocos pré-doseados M1, M2 e, principalmente M3 e a argamassa de ligante misto PR apresentam retracções sensivelmente superiores às anteriores. O empolamento inicial é praticamente imperceptível.

As argamassas com cal CA e CH apresentam retracções inferiores à P.

O aumento do teor de água - argamassa Pa - traduz-se num empolamento inicial maior e mais prolongado e numa retracção final inferior (ao contrário do que se admite habitualmente), talvez por, como já foi referido a propósito da retracção restringida, a água a mais ser consumida principalmente nas reacções de hidratação, devido ao ambiente de condicionamento ser muito seco. No entanto, como já se observou, as forças desenvolvidas são idênticas.

A utilização de areia argilosa - argamassa Pac - aumenta significativamente a retracção, como seria de esperar, dado o aumento do teor de finos. No entanto, também neste caso, como se viu, as forças desenvolvidas são idênticas às de P.

Por outro lado, a argamassa P3, com maior teor de cimento, apresenta, um pouco surpreendentemente, uma retracção muito semelhante à argamassa P, embora as forças desenvolvidas sejam, como se viu, superiores. Tal como nas outras argamassas tradicionais, ou de matriz tradicional, o empolamento inicial é bastante sensível.

Estes valores de retracção livre não são directamente comparáveis com os obtidos em prismas, com menor relação s/v (superfície livre/volume) e com o início da contagem a 1 dia de idade. No entanto, em termos comparativos, os resultados destas medições não contrariam, em

geral, os resultados obtidos com os prismas, se exceptuarmos a argamassa P3, em que os resultados da retracção medida em prismas pelo processo tradicional foram sensivelmente superiores aos correspondentes para a argamassa P.

c) Relaxação

A relaxação das argamassas P, FV e FPP revela-se bastante elevada e, aparentemente, maior para a argamassa P que para as de fibras, verificando-se que as forças se reduzem a quase 1/10, como refere alguma bibliografia [8.4, 8.5].

As argamassas armadas com redes R2 e R3 revelam, também, idêntica capacidade de relaxação, enquanto a de R1 parece ser bastante superior.

A capacidade de relaxação das argamassas não-tradicionais M1, M2, M3 e PR parece ser, ainda, muito superior.

A argamassa com cal CA tem uma relaxação superior a P, mas a da argamassa CH parece ser um pouco inferior, já que a forças elásticas muito mais baixas correspondem forças restringidas da mesma ordem de grandeza das de CA.

O aumento do teor de água de amassadura parece afectar negativamente a capacidade de relaxação da argamassa, como se vê pela curva correspondente à argamassa Pa.

A utilização de areia amarela de Corroios parece aumentar a capacidade de relaxação da argamassa, assim como o aumento do teor de cimento, embora neste caso de forma menos sensível.

As relações F_e/F_r e os *módulos de elasticidade equivalentes* obtidos para as várias argamassas consideradas (ver quadro 8.1) ajudam a concretizar as ilações sobre a relaxação extraídas dos gráficos.

d) Tenacidade e ductilidade

A análise do coeficiente *CREF* indica que, em relação à argamassa P, a argamassa FPP apresenta, em geral, um maior consumo de energia na rotura em relação à força de retracção restringida e que a argamassa FV apresenta ainda uma melhoria mais acentuada. Quando se analisam as *energias de rotura* G, G_f e G_c , a *extensão de rotura* d_r, e o *módulo de rotura à*

tracção M_t, os dados parecem apontar, no seu conjunto, na mesma direcção, no entanto, verificam-se algumas inversões e os valores têm variações de graus diferentes.

As argamassas R1, R2 e, em menor grau, R3, apresentam coeficientes *CREF* muito melhorados em relação às anteriores. A análise de G permitiria tirar conclusões semelhantes, mas d_r e M_t, embora mostrem maior ductilidade destas argamassas em relação a P, têm valores contraditórios para R1, R2 e R3. A fendilhação múltipla das argamassas com redes de fibra de vidro bem visível nos gráficos das figs. 8.44 a 8.46, contribui fortemente para a ductilidade, que assim se pode considerar uma *pseudo-ductilidade*, já que a deformabilidade é conseguida com micro-fendilhação.

A argamassa M1 tem maior coeficiente *CREF* e é claramente mais tenaz e dúctil que P, FV e FPP, embora não tanto como R1 e R2. Esta ductilidade é conseguida, fundamentalmente, através da deformação na rotura, ao contrário do que acontece com as argamassas armadas com redes. As argamassas M2 e M3 têm um comportamento um pouco semelhante, mas muito menos acentuado. A argamassa PR tem, deste ponto de vista, um comportamento superior a M1. Para a argamassa M4, dado que todos os provetes ensaiados fendilharam, apenas é possível analisar o valor de *CREF*, que é bastante baixo, mas mesmo assim da ordem de grandeza do de P.

As argamassas com cal CA e CH apresentam coeficientes *CREF* melhores que P, embora a deformação na rotura de CH seja, aparentemente, mais baixa e o seu módulo de rotura à tracção mais elevado que os de P.

O aumento do teor de água - argamassa Pa - parece melhorar um pouco o coeficiente *CREF* e também os parâmetros G e d_r, mas aumentar o M_t.

A utilização de areia argilosa - Pac - e o aumento do teor de cimento - P3 - parecem não afectar significativamente *CREF*, G e d_r. O valor de M_t também não apresenta variação com o tipo de areia mas aumenta muito com o teor de cimento.

É de notar que, apesar de se ter tentado analisar as variações do módulo de rotura em tracção lenta, estas determinações apresentam uma dispersão tão grande que se considera arriscado procurar tirar conclusões com base neste parâmetro.

e) Comportamento ao longo do tempo

A análise dos resultados referidos nas alíneas anteriores, para as argamassas P, FV e FPP, em que se fizeram ensaios em várias idades, mostram ainda que a argamassa P se torna mais susceptível à fendilhação à medida que a sua idade aumenta, enquanto as argamassas FV e FPP parecem ter um período crítico por volta dos 3 - 7 dias e melhorar depois lentamente. No entanto, a longo prazo a situação pode piorar de novo. O pior comportamento da argamassa P nos ensaios de *longo prazo* pode dever-se à lenta evolução de um estado de micro-fendilhação interna que conduz a um equilíbrio instável, em que qualquer força rápida pode levar à rotura.

f) Análise sintética dos dois critérios de susceptibilidade à fendilhação

Os resultados dos dois critérios de susceptibilidade à fendilhação definidos sintetizam-se no gráfico de barras da fig. 8.15.

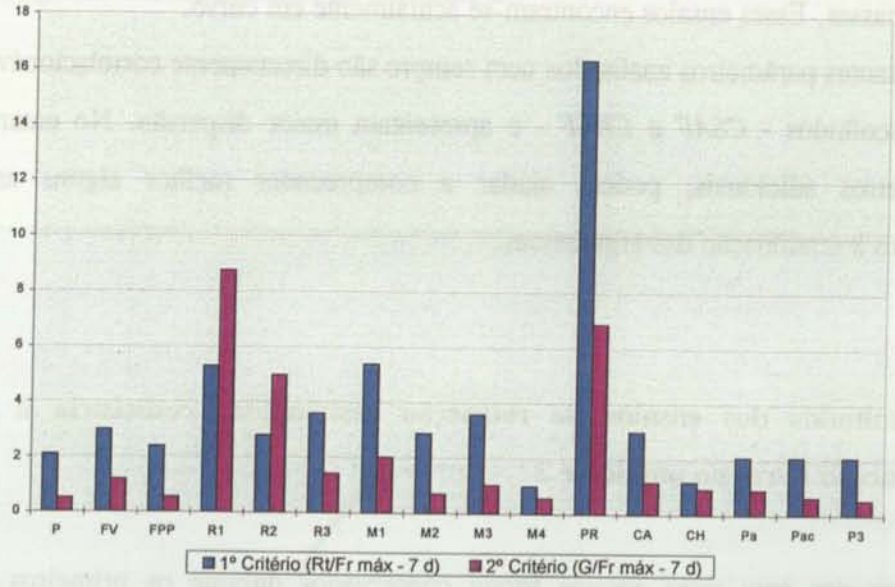


Fig. 8.15 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação, aplicados aos 7 dias

Em síntese, de acordo com os critérios definidos, aplicados aos 7 dias de idade, parece poder concluir-se que as argamassas menos susceptíveis à fendilhação por retracção restringida são PR - principalmente devido a um coeficiente *CSAF* muito elevado - e R1 - essencialmente devido a um *CREF* favorável. As argamassas R2, R3, FV e M3 mostram também um comportamento sensivelmente melhor que a argamassa padrão, tendo em conta os dois critérios.

No que se refere às argamassas tradicionais não-armadas, a que apresenta melhor comportamento é a argamassa bastarda com cal aérea CA, em que os dois critérios são, aparentemente, bastante favoráveis.

O pior comportamento foi o obtido para a argamassa M4, em que todos os provetes ensaiados fendilharam; de qualquer modo, esta argamassa foi concebida para revestir paramentos interiores, portanto estará certamente sujeita a condições menos severas, quer durante a secagem quer posteriormente, nomeadamente com menores choques térmicos.

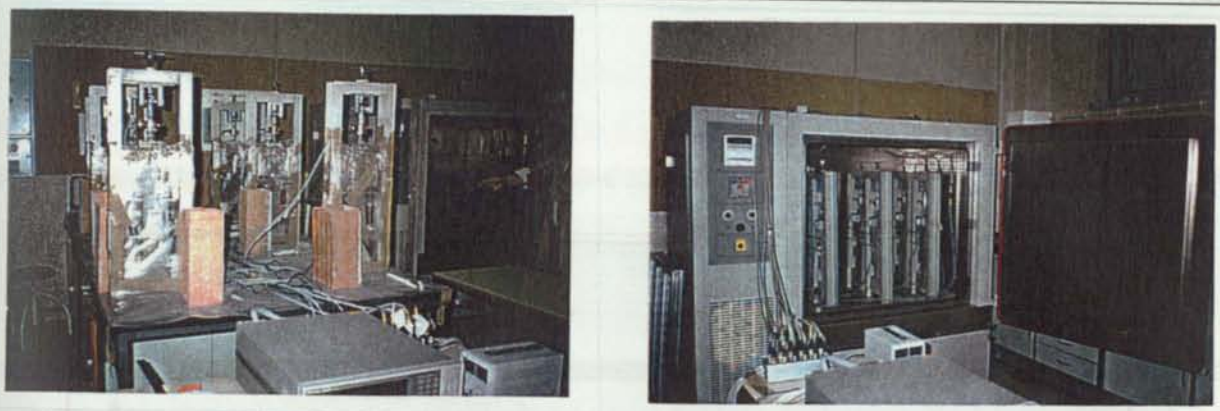
As argamassas Pa, Pac, P3 e FPP não parecem diferir muito de P.

No entanto, o comportamento a longo prazo das várias argamassas pode revelar algumas diferenças importantes. Nomeadamente a argamassa com cal aérea CA poderá ainda apresentar alterações importantes no seu comportamento, esperando-se uma melhoria em ambos os critérios. As argamassas Pac e P3 podem, pelo contrário, ver acentuada a sua susceptibilidade à fendilhação, devido à evolução da microfendilhação interna. Contudo, as limitações de tempo deste trabalho impediram a realização de ensaios mais longos (pelo menos de 28 dias) sobre todas as argamassas. Esses ensaios encontram-se actualmente em curso.

Os restantes parâmetros analisados nem sempre são directamente correlacionáveis com os indicadores escolhidos - *CSAF* e *CREF* - e apresentam maior dispersão. No entanto, usados como parâmetros adicionais, podem ajudar a compreender melhor alguns aspectos do comportamento à fendilhação das argamassas.

8.3.6 - Resultados dos ensaios de retracção restringida, resistência à tracção e retracção livre, no ambiente 2

Os provetes para estes ensaios foram conservados durante os primeiros 7 dias em ambiente caracterizado por $23\pm2°C$ de temperatura e $95\%\pm5\%$ de HR. Para isso, mantiveram-se no LERevPa e envolveram-se em folhas de polietileno, tendo-se verificado, por introdução de sondas, que a humidade relativa se mantinha na gama de valores requerida. Nos dias restantes até à data de ensaio foram mantidos numa câmara climática, programada para manter um ambiente de $23\pm0,5°C$ de temperatura e $65\%\pm1\%$ de HR (ver fig. 8.16).

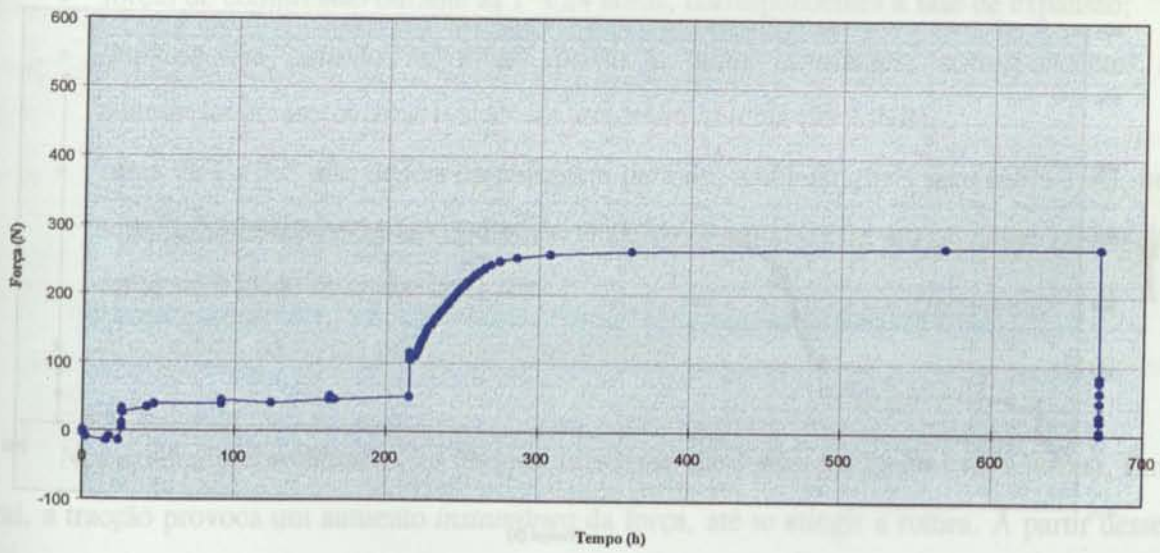


a) b)

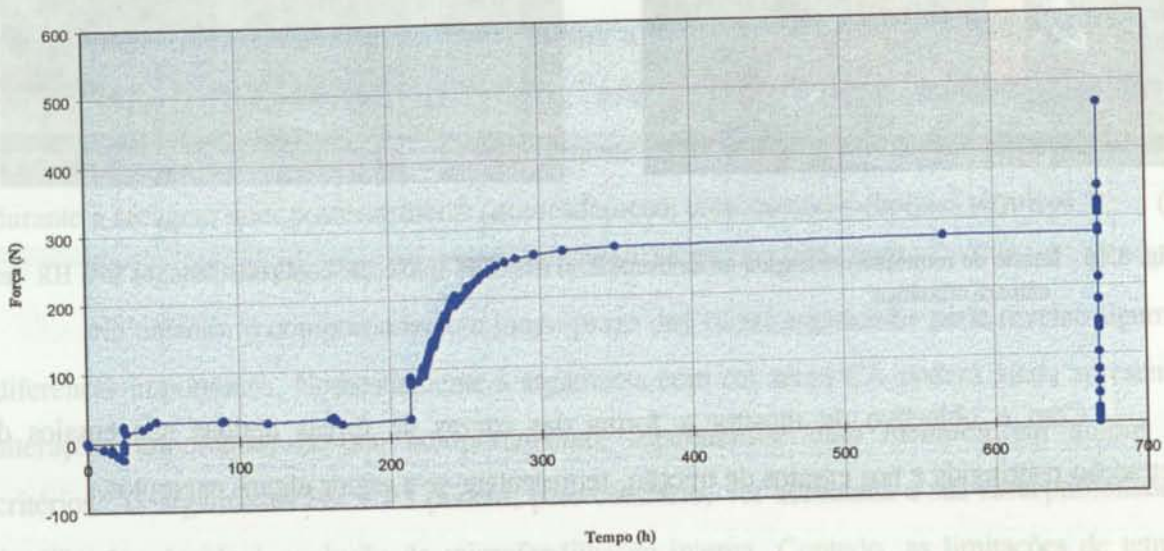
Fig. 8.16 - Ensaio de retracção restringida no ambiente 2 a) 95% HR - protecção com polietileno; b) 65% HR - em câmara climática

Com o objectivo de mostrar a forma das curvas de forças obtidas nos ensaios de retracção restringida e nos ensaios de tracção, representam-se a seguir alguns exemplos.

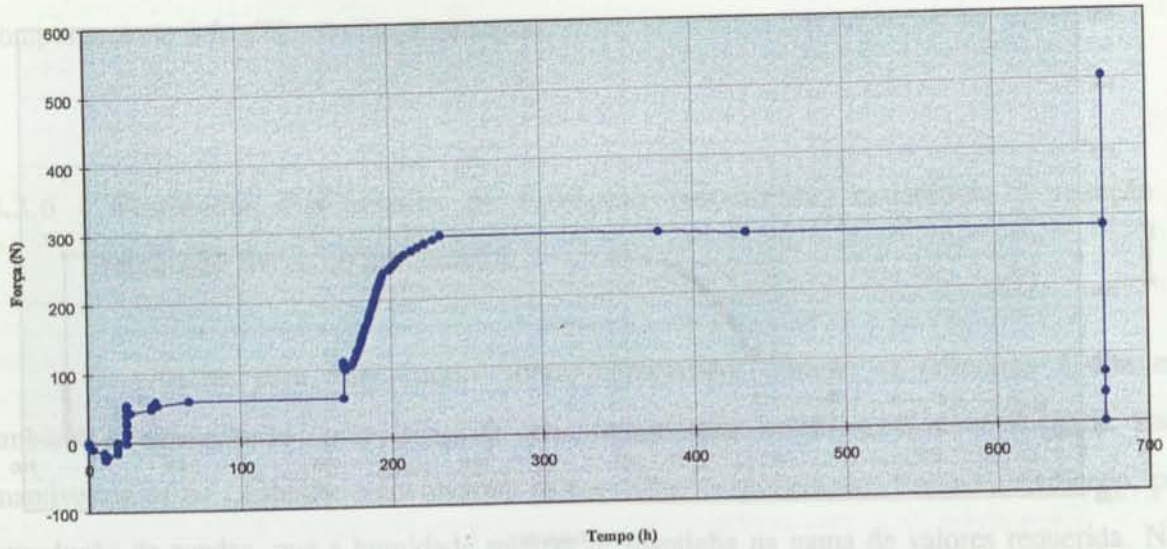
Exemplos de curvas força-tempo obtidas nos ensaios de retracção restringida até aos 28 dias, para algumas das argamassas, no ambiente 2:



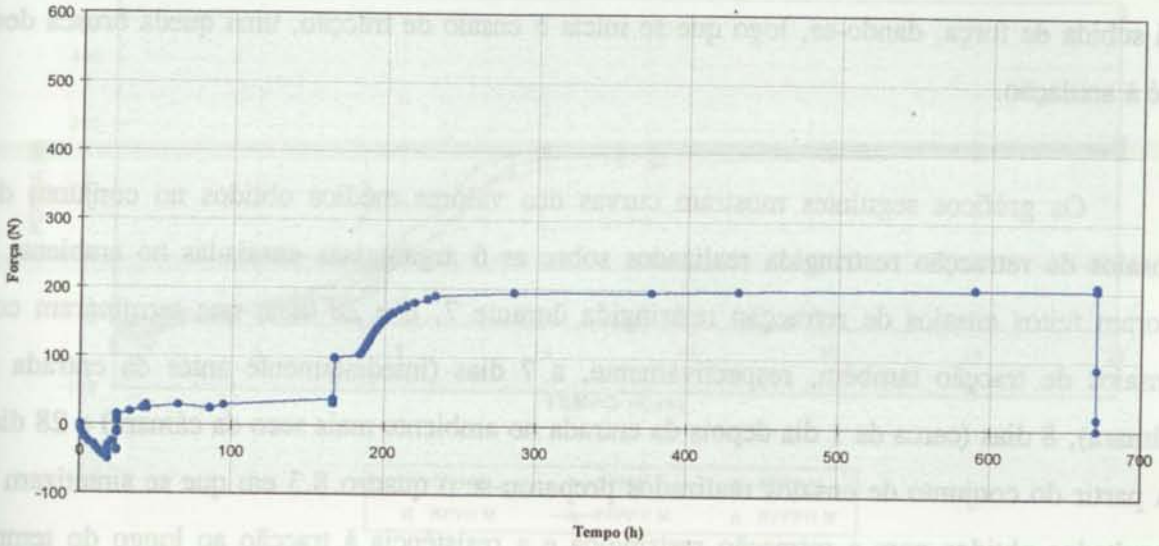
Gráf. 8.57 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa P. Ambiente 2



Gráf. 8.58 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa FV. Ambiente 2



Gráf. 8.59 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa M1. Ambiente 2



Gráf. 8.60 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa CA. Ambiente 2.

De um modo geral, as curvas mostram:

- forças de compressão durante as 1ªs 24 horas, correspondentes à fase de expansão;
- segue-se um período de forças baixas e quase constantes, correspondentes à contracção durante a conservação em atmosfera húmida (95% HR);
- cerca de 1 a 1,5 dias depois da passagem para um ambiente mais seco (65% HR), ou seja, aproximadamente aos 8 dias de idade da argamassa, há um aumento rápido da força até à idade de cerca de 11 dias;
- nessa altura, as forças praticamente estabilizam.

Nos exemplos apresentados, os ensaios de tracção são feitos aos 28 dias (672 horas). Em geral, a tracção provoca um aumento *instantâneo* da força, até se atingir a rotura. A partir desse instante dá-se um decréscimo da força, até que se anula.

No entanto, alguns dos provetes estão já fendilhados no momento do ensaio de tracção. De facto, embora as fendas não sejam visíveis, logo que se inicia o ensaio de tracção a resistência anula-se e a fenda surge. Possivelmente esta rotura frágil dá-se devido à propagação instantânea da fendilhação assim que se passa de um ensaio de tracção lenta para um ensaio de

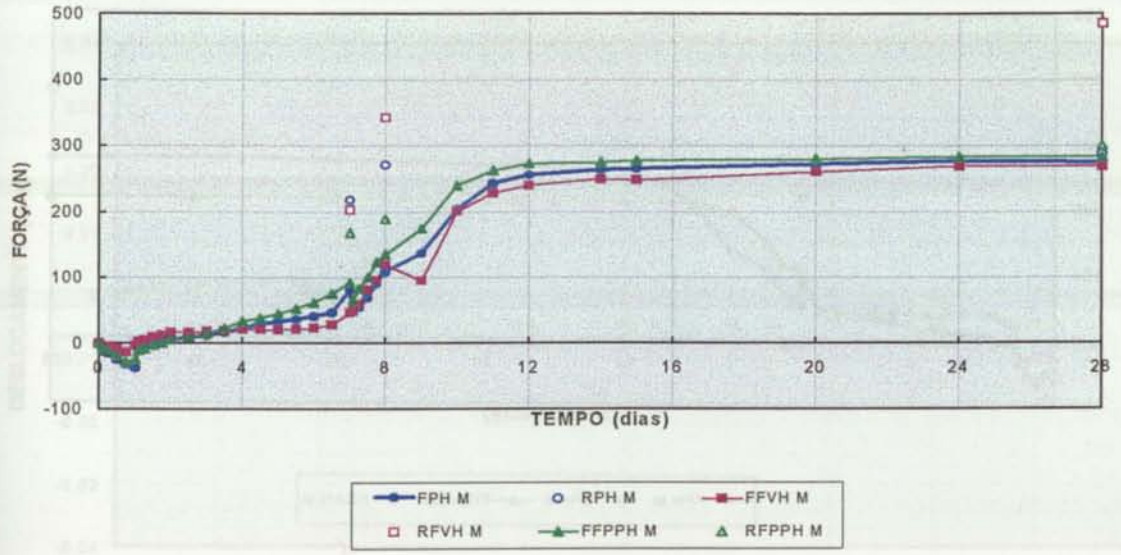
tracção rápida, portanto com menos possibilidades de actuação da relaxação e com um módulo de rotura mais elevado. Nos gráficos 8.57 e 8.60 mostram-se exemplos de ensaios em que se verificou fendilhação dos provetes; este facto é visível na parte final do gráfico, em que não há subida de força, dando-se, logo que se inicia o ensaio de tracção, uma queda brusca desta até à anulação.

Os gráficos seguintes mostram curvas dos valores médios obtidos no conjunto dos ensaios de retracção restringida realizados sobre as 6 argamassas ensaiadas no ambiente 2. Foram feitos ensaios de retracção restringida durante 7, 8 e 28 dias, que terminaram com ensaios de tracção também, respectivamente, a 7 dias (imediatamente antes da entrada na câmara), 8 dias (cerca de 1 dia depois da entrada no ambiente mais seco da câmara) e 28 dias. A partir do conjunto de ensaios realizados preparou-se o quadro 8.3 em que se sintetizam os resultados obtidos para a retracção restringida e a resistência à tracção ao longo do tempo, efectuados sobre as argamassas ensaiadas no ambiente 2.

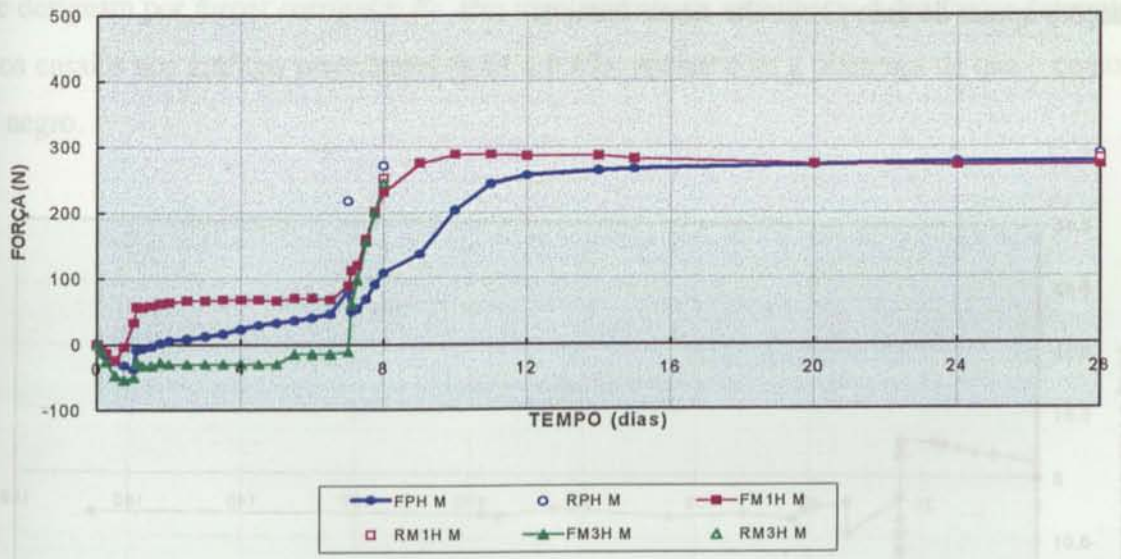
No anexo VI apresentam-se os resultados individuais obtidos para cada uma das argamassas nos ensaios de retracção restringida realizados e nos ensaios de tracção. Esses valores permitem observar a dispersão dos resultados e, portanto, avaliar o significado dos gráficos de valores médios aqui expostos.

Nos gráficos 8.61 a 8.63, que se apresentam a seguir, comparam-se as curvas médias das forças e os valores médios das resistências aos 7, 8 e 28 dias, dos vários tipos de argamassas estudadas, com os valores correspondentes da argamassa P. A comparação é feita por grupos: argamassas com fibras; argamassas pré-doseadas; argamassas com cal. A letra *H* adicionada aos símbolos significa *ambiente húmido* e refere-se ao ambiente 2.

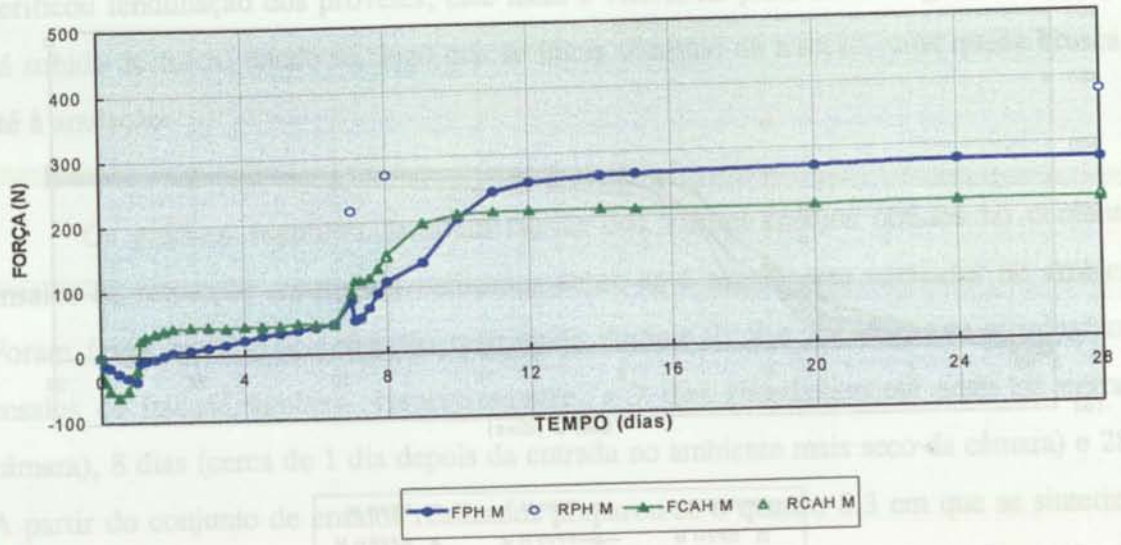
Nestes gráficos, a simbologia usada é em tudo idêntica à dos gráficos correspondentes no ambiente 1.



Gráf. 8.61 - Força de retracção restringida nas argamassa P, FV e FPP. Ambiente 2. CSAF (28d): de P=1,0; de FV=1,8; de FPP=1,1

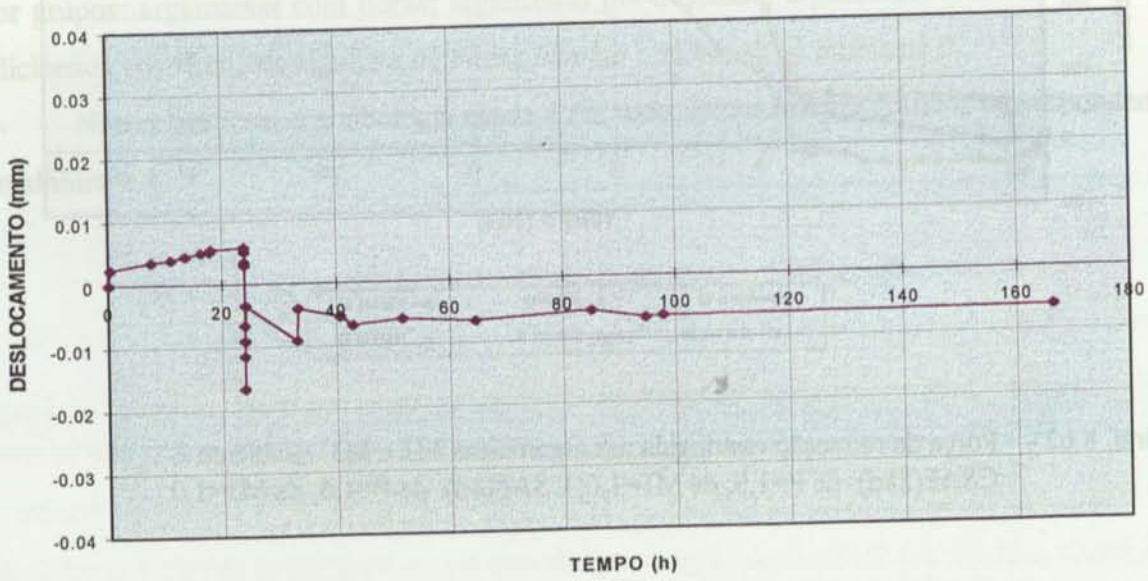


Gráf. 8.62 - Força de retracção restringida nas argamassas M1 e M3. Ambiente 2. CSAF(28d): de P=1,0; de M1=1,0; CSAF(8d): de P=1,6; de M3=1,0

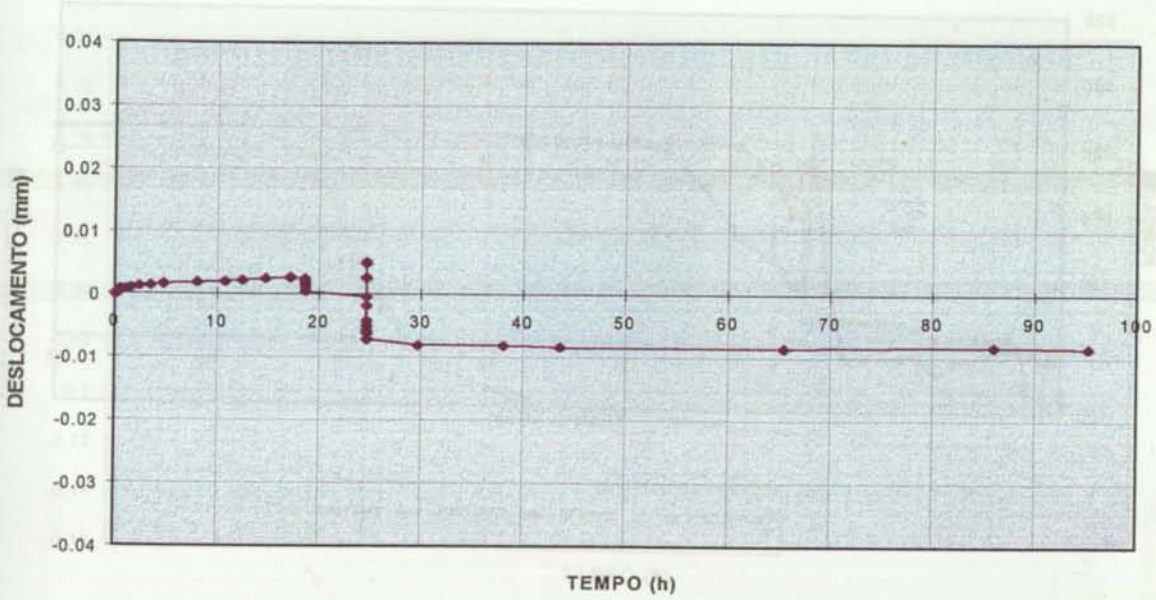


Gráf. 8.63 - Força de retracção restringida na argamassa CA. Ambiente 2.
CSAF(28d): de P=1,4; de CA=1,0

A leitura dos deslocamentos durante os ensaios de retracção restringida mostrou que estes não foram totalmente impedidos. Nos gráficos 8.64 e 8.65 mostram-se dois exemplos das retracções apesar de tudo permitidas nestes ensaios.

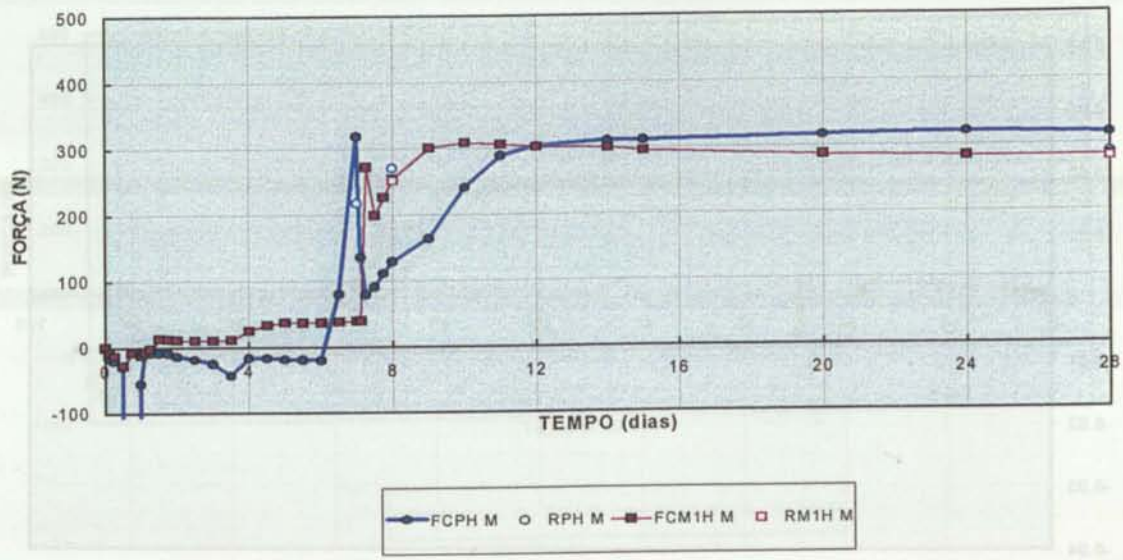


Gráf. 8.64 - Retracção não-restringida num provete da argamassa P. Ambiente 2

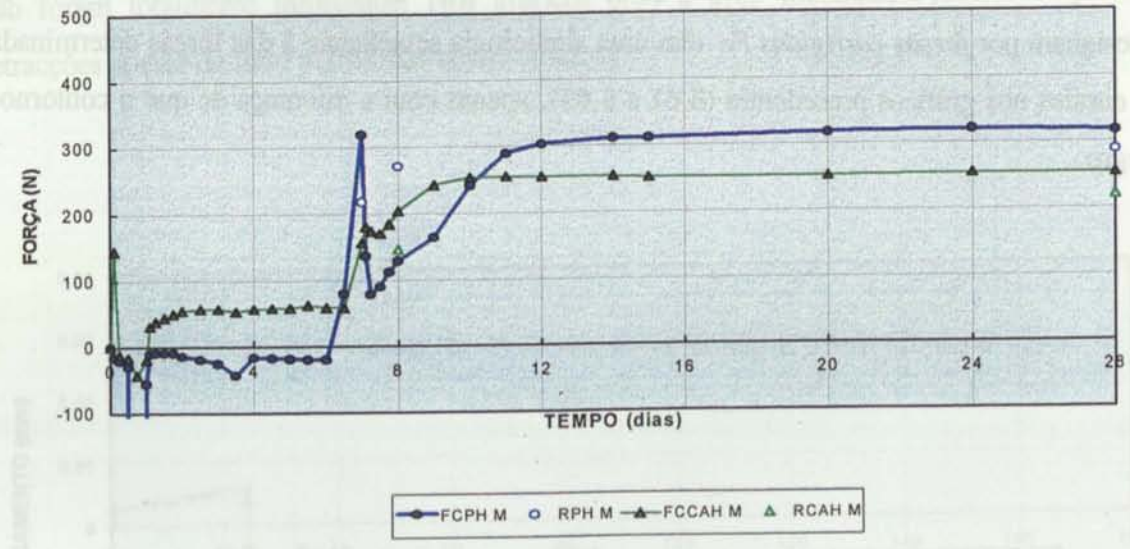


Gráf. 8.65 - Retracção não-restringida num provete da argamassa CA. Ambiente 2

Nos gráficos seguintes mostram-se alguns exemplos dos valores das forças que se instalariam, previsivelmente, nas argamassas, se a restrição da retracção fosse total, segundo o método de cálculo proposto em 8.2.4 (equação 8.7). Nestes gráficos, as forças calculadas, que se designam por *forças corrigidas Fc* têm uma simbologia semelhante à das forças determinadas nos ensaios nos gráficos precedentes (8.61 a 8.63), apenas com a diferença de que o contorno é a negro.

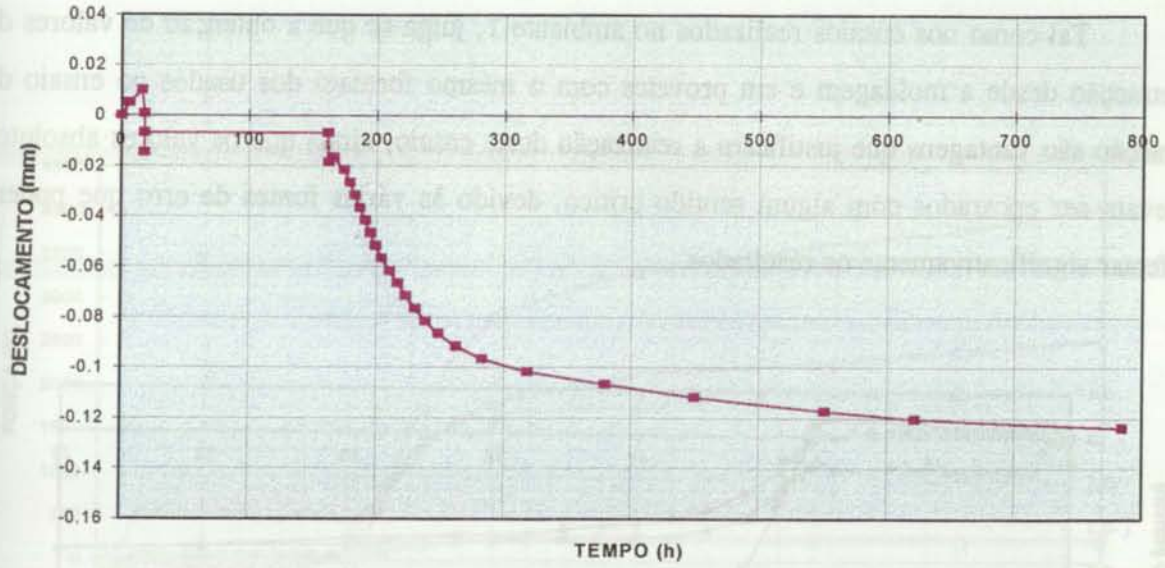


Gráf. 8.66 - Força de retracção restringida corrigida nas argamassas P e M1. Ambiente 2.

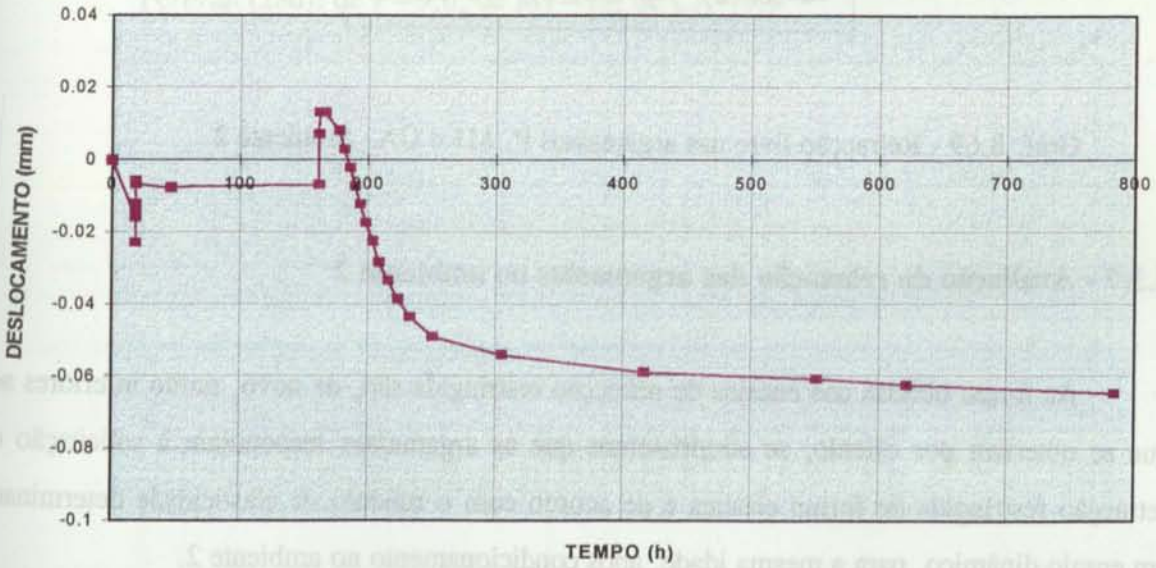


Gráf. 8.67 - Força de retracção restringida corrigida nas argamassas P e CA. Ambiente 2.

Exemplos de curvas extensão-tempo obtidas nos ensaios de retracção livre para algumas das argamassas, no ambiente 2:



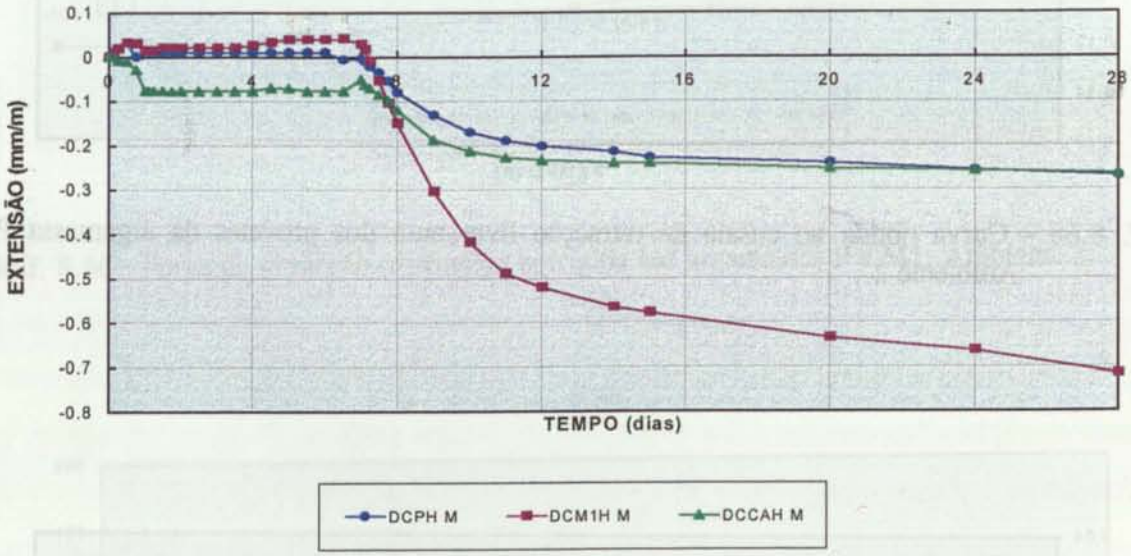
Gráf. 8.68 - Curva obtida no ensaio de retracção livre num dos provetes da argamassa P. Ambiente 2.



Gráf. 8.68 - Curva obtida no ensaio de retracção livre num dos provetes da argamassa CA. Ambiente 2.

O gráfico seguinte mostra o conjunto das curvas obtidas nos ensaios de retracção livre das 3 argamassas ensaiadas, após correcção para compensar as perdas por atrito, com um factor de 1,02.

Tal como nos ensaios realizados no ambiente 1, julga-se que a obtenção de valores da retracção desde a moldagem e em provetes com o mesmo formato dos usados no ensaio de tracção são vantagens que justificam a realização deste ensaio, ainda que os valores absolutos devam ser encarados com algum sentido crítico, devido às várias fontes de erro que podem afectar significativamente os resultados.



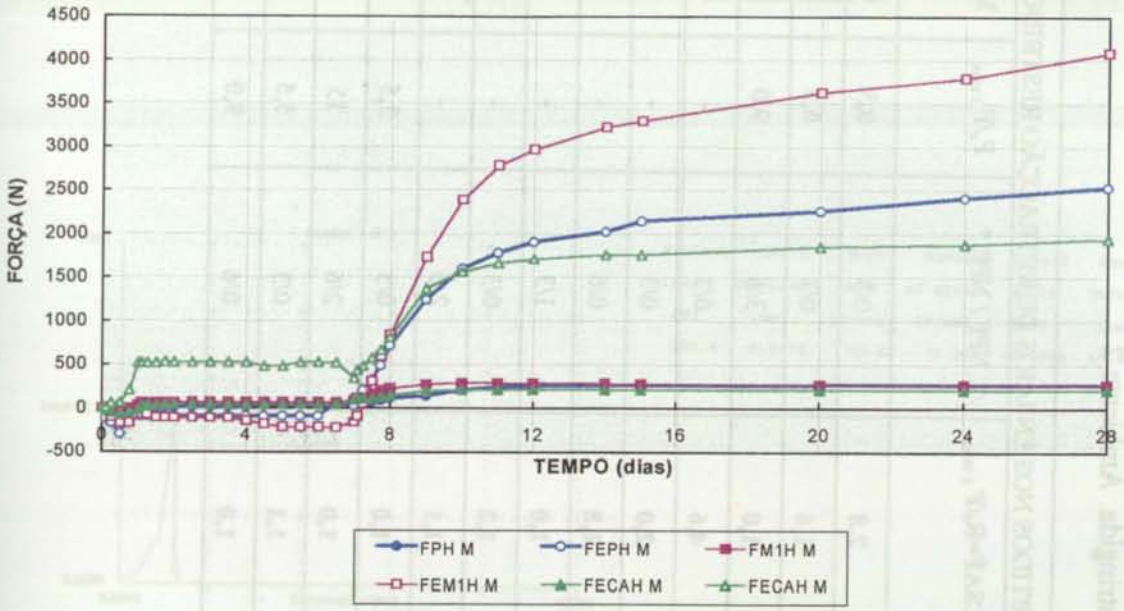
Gráf. 8.69 - Retracção livre nas argamassas P, M1 e CA. Ambiente 2.

8.3.7 - Avaliação da relaxação das argamassas no ambiente 2

As forças obtidas nos ensaios de retracção restringida são, de novo, muito inferiores aos que se obteriam por cálculo, se admitíssemos que as argamassas respondiam à solicitação de retracção restringida de forma elástica e de acordo com o módulo de elasticidade determinado em ensaio dinâmico, para a mesma idade, após condicionamento no ambiente 2.

No gráfico seguinte comparam-se as curvas obtidas nos ensaios (curvas com símbolos a cheio, idênticos aos usados nos gráficos anteriores 8.31 a 8.36) com as que se obteriam por

cálculo, usando o módulo de elasticidade dinâmico (curvas com símbolos da mesma forma e cor mas vazios), de acordo com a expressão (8.4).



Gráf. 8.70 - Avaliação da relaxação nas argamassas P, M1 e CA. Ambiente 2. $Fe/F_{r\,máx}$ (28d): de P=9,0; de M1=15; de CA=9,0

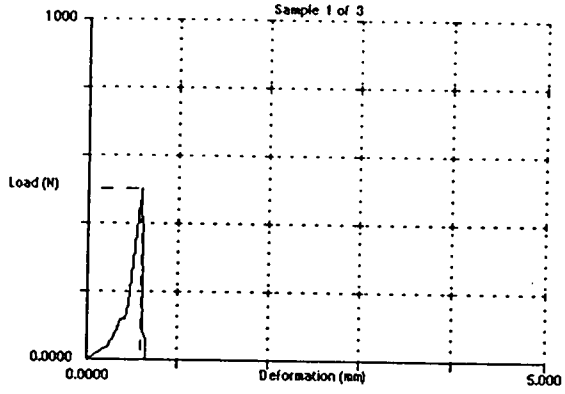
Quadro 8.3 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Ambiente 2

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA					
		FORÇA MÁXIMA Fr máx (N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	**CSAF=$R_t/F_{r\,máx}$**	NPF / NPE *	$F_e/F_{r\,máx}$	MÓD. ELAST. EQUIV. E_{eq} (MPa)
P	7	80	220	**2,8**	0/3	0,5	24415
	8	170	270	**1,6**	0/3	6,5	1030
	28	280	290	**1,0**	3/6	9,0	1040
FV	7	45	205	**4,6**	0/3	-	-
	8	175	345	**2,0**	0/3	-	-
	28	270	485	**1,8**	0/6	-	-
FPP	7	165	170	**1,0**	1/3	-	-
	8	160	190	**1,2**	0/3	-	-
	28	285	300	**1,1**	2/6	-	-
M1	8	245	255	**1,0**	0/3	3,5	1580
	28	290	280	**1,0**	2/6	15	390
CA	8	140	150	**1,1**	0/3	5,5	1240
	28	215	220	**1,0**	0/6	9,0	810

* - Nº de provetes fendilhados / Nº de provetes ensaiados

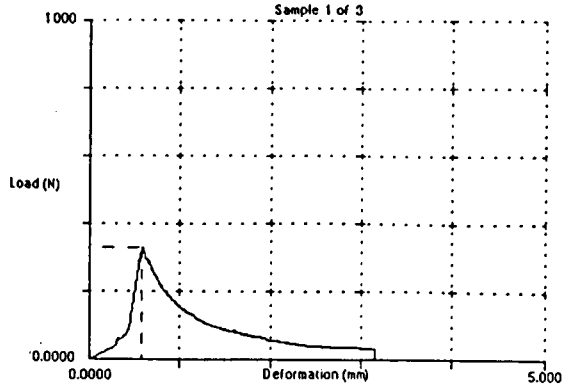
8.3.8 - Avaliação da ductilidade das argamassas no ambiente 2

Nas figs. 8.72 a 8.79 apresentam-se, a título de exemplo, alguns dos gráficos obtidos nos ensaios de flexão das argamassas conservadas no ambiente 2. No quadro 8.4 sintetizam-se os valores das energias de rotura, calculadas como as áreas definidas pelas curvas obtidas em todos os ensaios de flexão e de compressão realizados no ambiente 2.



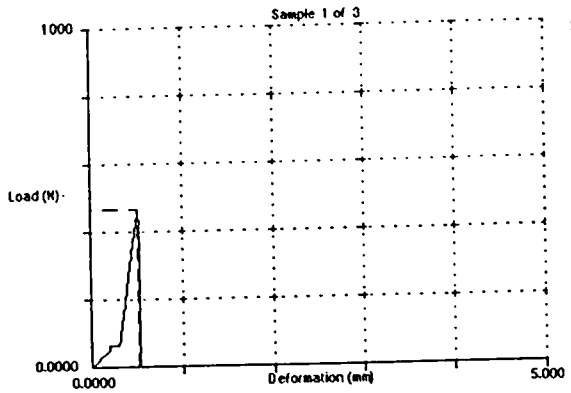
Maximum Load (N)	Def @ Max Load (mm)	Work Done (N-mm)	Modulus of Elast (N/mm2)	Sample Width (mm)	Sample Thick' (mm)
503.5	0.5978	80.87	3.367	40.0000	40.0000

Gráf. 8.72 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 7 dias de um dos provetes da argamassa P. Ambiente 2.



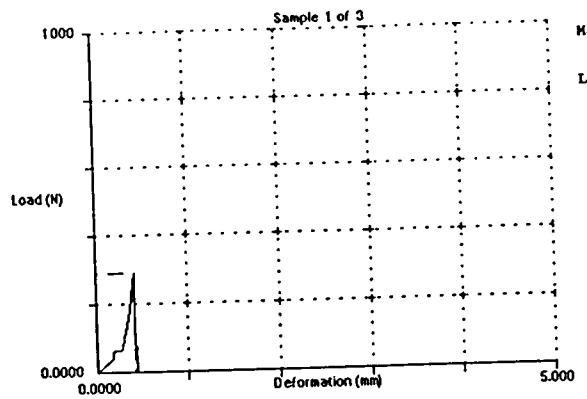
Maximum Load (N)	Work Done (N-mm)	Modulus of Elast (N/mm2)	Sample Width (mm)	Sample Thick' (mm)
331.9	279.9	2.842	40.0000	40.0000

Gráf. 8.73 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 7 dias de um dos provetes da argamassa FV. Ambiente 2.



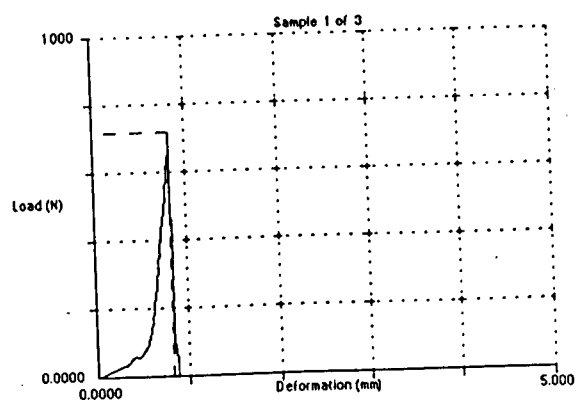
Maximum Load (N)	Def @ Max Load (mm)	Load @ Rupture (N)	Def @ Rupture (mm)	Work Done (N-mm)	Modulus of Elast (N/mm2)	Sample Width (mm)	Sample Thick' (mm)
466.9	0.5090	466.9	0.5090	71.18	4.391	40.0000	40.0000

Gráf. 8.74 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 7 dias de um dos provetes da argamassa M1. Ambiente 2.



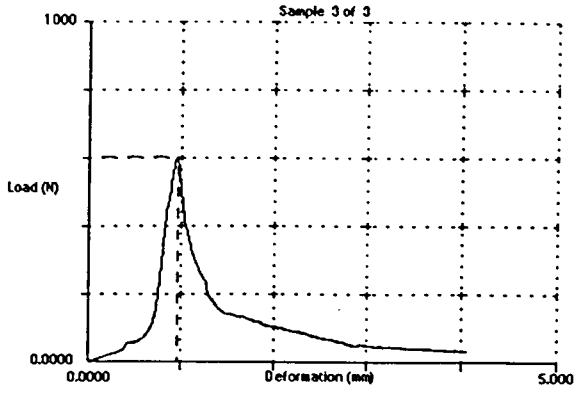
Maximum Load (N)	Def @ Max Load (mm)	Load @ Rupture (N)	Def @ Rupture (mm)	Work Done (N-mm)	Modulus of Elast (N/mm2)	Sample Width (mm)	Sample Thick' (mm)
290.7	0.4180	290.7	0.4180	34.69	4.880	40.0000	40.0000

Gráf. 8.75 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 7 dias de um dos provetes da argamassa CA. Ambiente 2



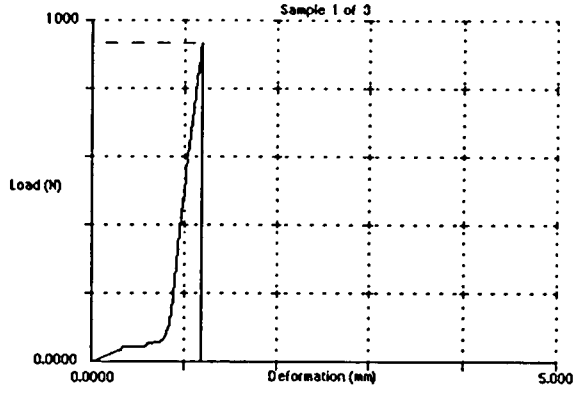
Maximum Load (N)	Work Done (N-mm)	Modulus of Elast (N/mm2)	Sample Width (mm)	Sample Thick' (mm)
719.5	124.1	2.272	40.0000	40.0000

Gráf. 8.76 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 28 dias de um dos provetes da argamassa P. Ambiente 2



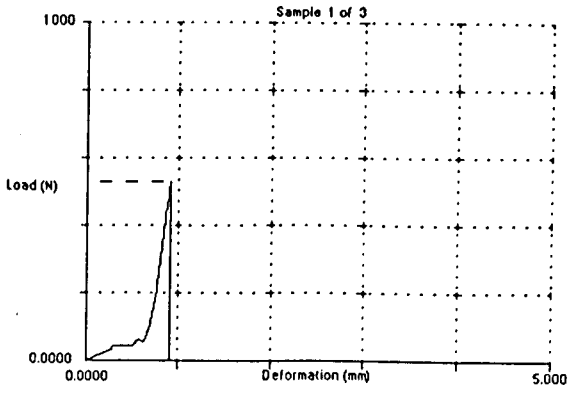
Maximum Load (N)	Work Done (N-mm)	Modulus of Elast (N/mm2)	Sample Width (mm)	Sample Thick' (mm)
603.5	451.4	2.089	40.0000	40.0000

Gráf. 8.77 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 28 dias de um dos provetes da argamassa FV. Ambiente 2



Maximum Load (N)	Def @ Max Load (mm)	Work Done (N-mm)	Modulus of Elast (N/mm2)	Sample Width (mm)	Sample Thick' (mm)
936.1	1.180	223.3	1.236	40.0000	40.0000

Gráf. 8.78 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 28 dias de um dos provetes da argamassa M1. Ambiente 2

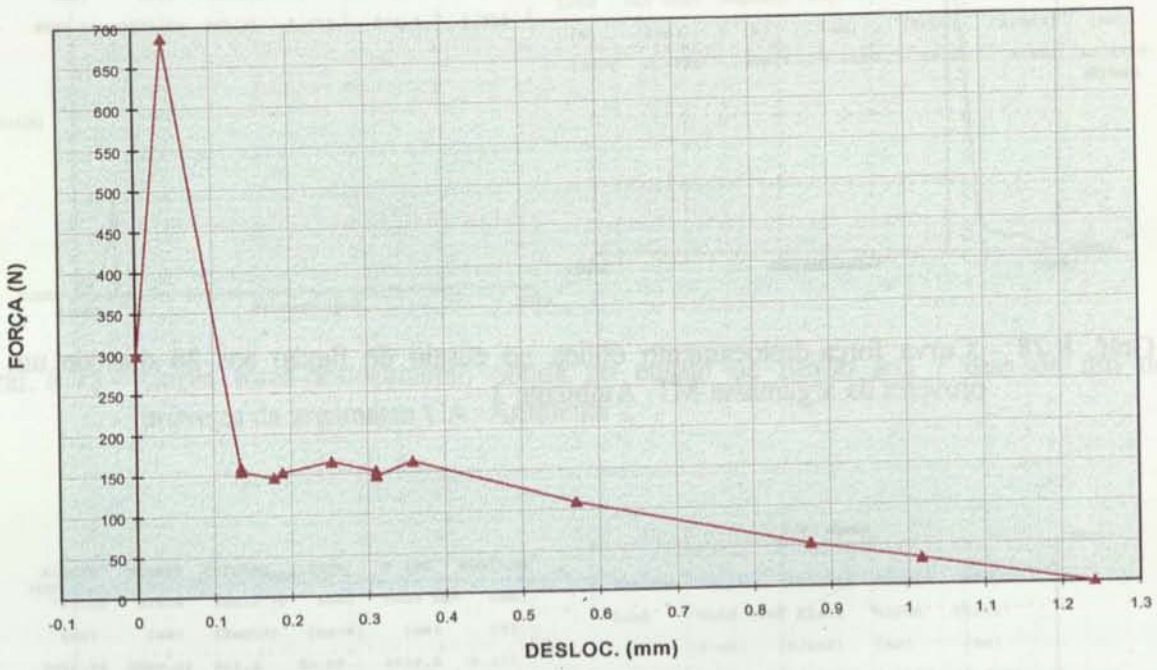


Maximum Load (N)	Def @ Max Load (mm)	Work Done (N-mm)	Modulus of Elast (N/mm2)	Sample Width (mm)	Sample Thick' (mm)
531.0	0.9006	90.60	1.428	40.0000	40.0000

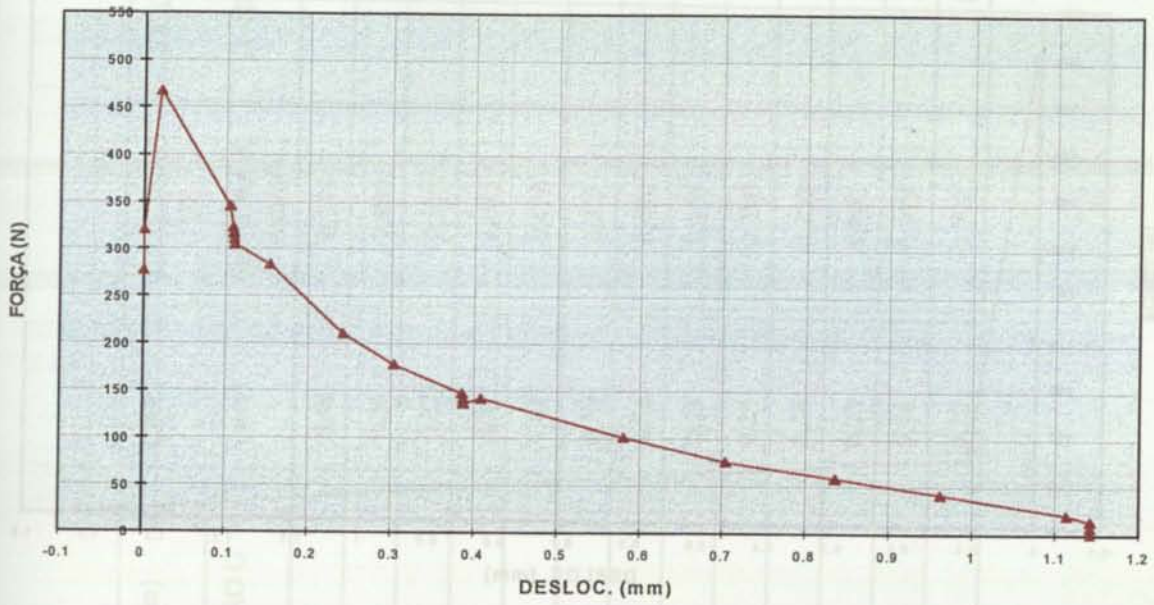
Gráf. 8.79 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de flexão aos 28 dias de um dos provetes da argamassa CA. Ambiente 2

Nos gráficos seguintes (8.80 a 8.84) apresentam-se exemplos de curvas força-deslocamento obtidas para as várias argamassas no ensaio de tracção pura realizados com os aparelhos de retracção restringida. Os exemplos seleccionados para as argamassas P, FV, M1 e CA foram obtidos durante os mesmos ensaios de tracção representados nos exemplos dos gráficos. 8.57 a 8.60.

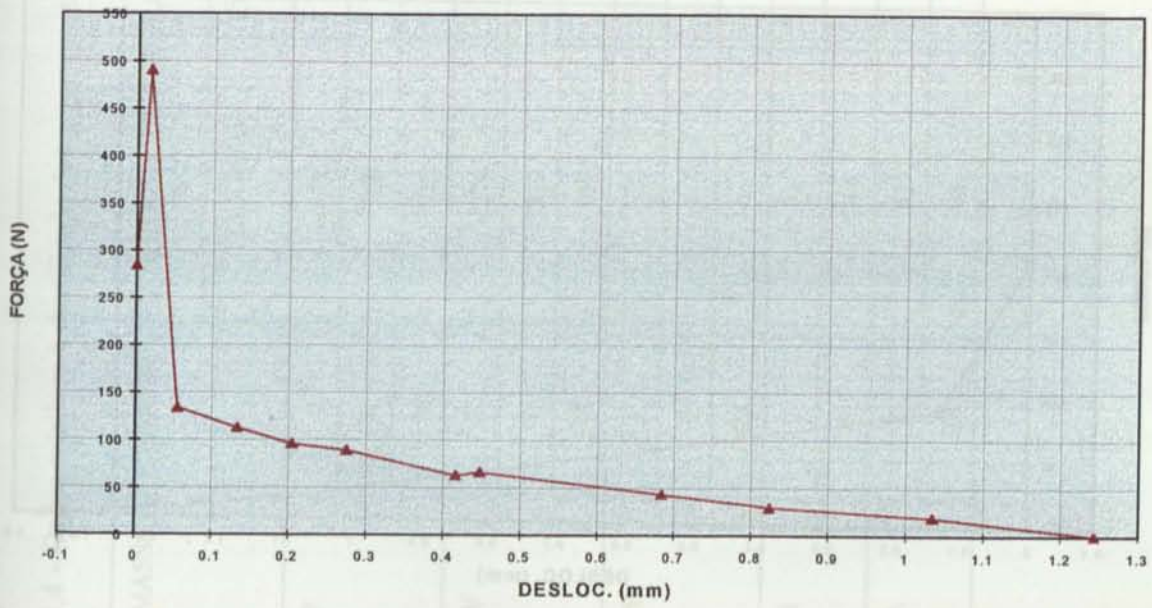
Os gráficos escolhidos para exemplo foram considerados relativamente representativos das argamassas em causa, já que a forma das curvas se manteve semelhante para cada argamassa.



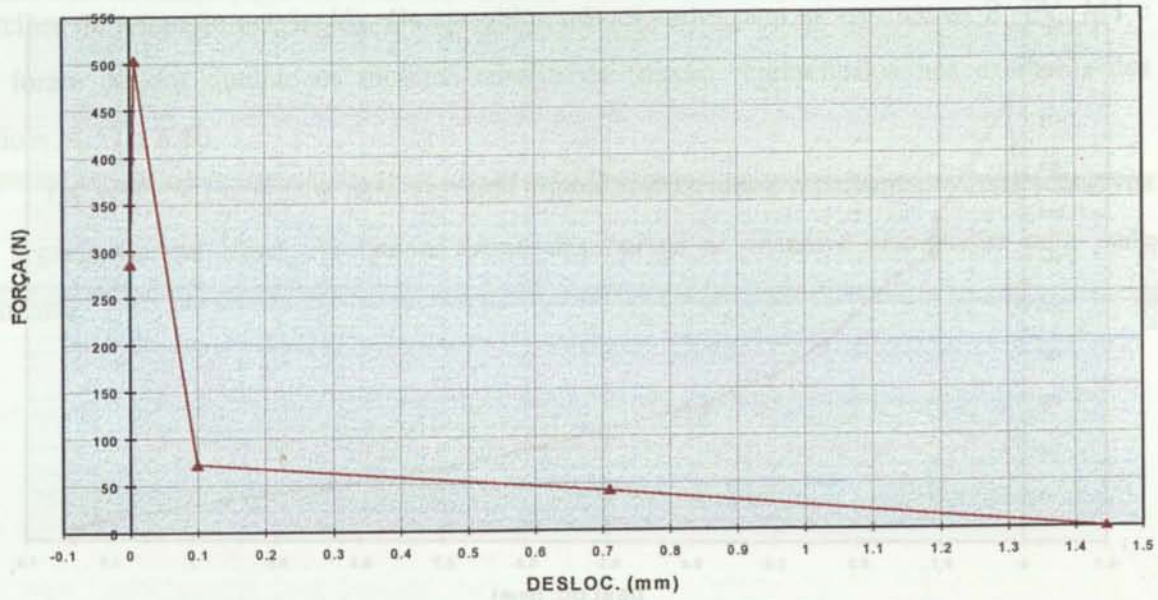
Gráf. 8.80 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 28 dias de um dos provetes da argamassa P. Ambiente 2.
CREF (28d)=0,27 mm



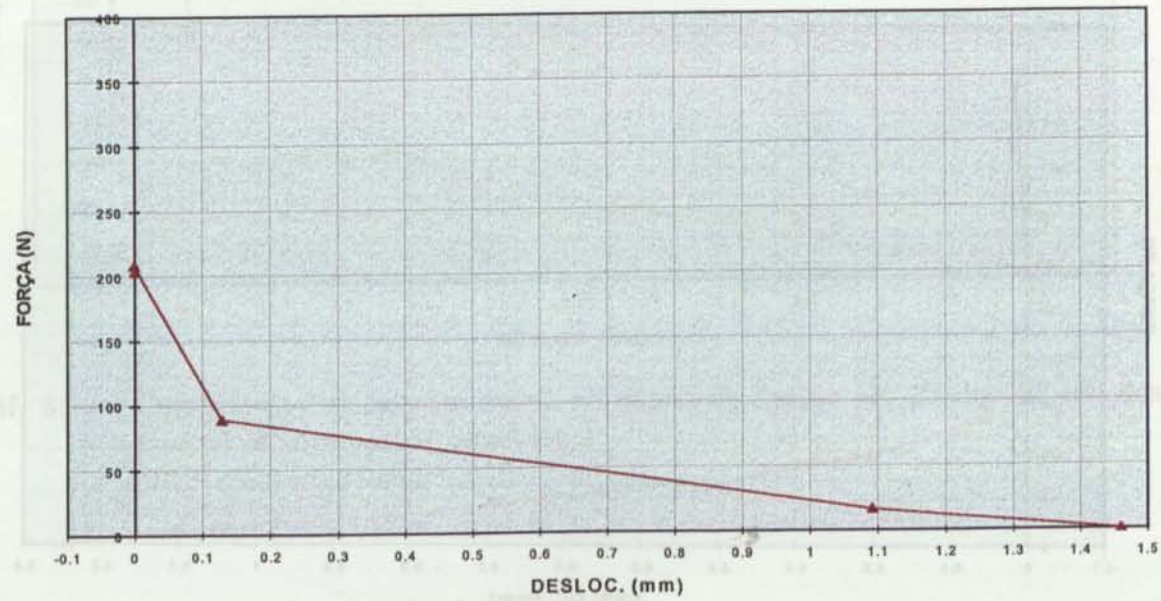
Gráf. 8.81 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 28 dias de um dos provetes da argamassa FV. Ambiente 2.
CREF (28d)=0,59 mm



Gráf. 8.82 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 28 dias de um dos provetes da argamassa FPP. Ambiente 2.
CREF (28d)=0,24 mm



Gráf. 8.83 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 28 dias de um dos provetes da argamassa M1. Ambiente 2.
CREF (28d)=0,23 mm



Gráf. 8.84 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 28 dias de um dos provetes da argamassa CA. Ambiente 2.
CREF (28)=0,25 mm

Quadro 8.4 - Dados relativos à ductilidade das argamassas. Ambiente 2.

ARGAMASSA	IDADE	ENERGIA DE ROTURA (VALORES MÉDIOS) (N.mm)			**CREF**	EXTENSÃO DE	MÓD. ROTURA
		FLEXÃO G_f	COMPRESSÃO G_c	TRACÇÃO G	**(mm)**	ROTURA d_r (mm/m)	À TRACÇÃO M_t (MPa)
P	7	73	3268	83	**0,46**	0,375	250
	8	130	3650	61	**0,36**	0,020	15780
	28	123	6385	111	**0,27**	0,110	5200
FV	7	274	2516	130	**2,89**	1,095	355
	8	410	5120	177	**1,01**	0,470	10110
	28	407	5462	159	**0,59**	0,275	1740
FPP	7	-	-	87	**0,53**	0,470	70
	8	-	-	104	**0,65**	0,155	1550
	28	-	-	67	**0,24**	0,290	1550
M1	8	84	3737	94	**0,38**	0,255	50
	28	224	5500	67	**0,23**	0,002	2200
CA	8	43	3405	103	**0,74**	0,155	4380
	28	88	3699	53	**0,25**	0,002	14785

8.3.9 - Apreciação dos resultados dos ensaios de comportamento à fendilhação no ambiente 2

a) Retracção restringida

As curvas que representam as forças devidas à retracção restringida das argamassas P, FV e FPP têm um andamento muito semelhante, apresentando valores reduzidos durante a permanência em ambiente húmido e crescimentos rápidos e acentuados logo que os provetes são introduzidos em ambiente mais seco. A estabilização dá-se por volta dos 10 dias (3 dias depois da introdução em ambiente seco), embora o mesmo não aconteça com a retracção. Os valores máximos das forças desenvolvidas aos 28 dias são de cerca de 250 a 300 N.

As argamassas P e FPP mostram tendência para fendilhar nestas condições, tendo-se observado vários provetes fendilhados, como se pode ver no Quadro 8.3. Este comportamento deve-se, provavelmente, aos gradientes muito rápidos de tensões. No entanto, é admissível que a manipulação dos provetes exigida pelo condicionamento húmido e pela alteração de ambiente possa também contribuir para o surgimento de microfendilhação. A argamassa FV parece, também neste ambiente, ter menor tendência para fendilhar que P e FPP.

Neste ambiente a argamassa M1 apresenta um comportamento muito semelhante às argamassas P e FPP se exceptuarmos o facto de ter uma subida da força mais rápida, quando é introduzida no ambiente seco, e uma estabilização também mais precoce.

A argamassa CA tem forças mais reduzidas mas também menores resistências. No entanto, nenhum dos provetes ensaiados fendilhou.

Os coeficientes *CSAF* são, aos 28 dias, muito próximos de 1 para todas as argamassas ensaiadas, excepto no caso de FV.

As forças *corrigidas* calculadas para as argamassas P, M1 e CA apontam para um aumento da probabilidade de fendilhação.

b) Retracção livre

A argamassa P sofre um empolamento inicial - que pode prolongar-se durante todo o período de conservação húmida - seguido de contracção rápida e pronunciada logo que os provetes são colocados em ambiente mais seco. A retracção atinge valores de cerca 0,25 mm/m aos 28 dias, portanto sensivelmente superiores aos verificados no ambiente 1 à mesma idade.

O reboco pré-doseado M1 tem uma retracção com andamento semelhante mas com valores finais muito superiores, atingindo cerca de 0,7 mm/m aos 28 dias. Os resultados apresentam também menor dispersão que no caso da argamassa P, como se pode ver no quadro VI.2 do Anexo VI.

A argamassa com cal CA não parece sofrer empolamento inicial, e apresenta, em média, valores de retracção semelhantes a P, embora a dispersão seja muito superior (ver Anexo VI, quadro VI.2).

c) Relaxação

A relaxação das argamassas P, M1 e CA revela-se, de novo, bastante elevada e, tal como no caso do ambiente 1, é superior para o reboco pré-doseado M1. De facto, apesar do coeficiente *CSAF* e do número de provetes fendilhados indicar um mau comportamento da argamassa M1 neste ambiente, os valores da relação $F_e/F_{r\,máx}$ e do módulo E_{eq} indicam uma capacidade de relaxação desta argamassa superior a P e a CA.

d) Tenacidade e ductilidade

A análise dos parâmetros relacionados com a ductilidade mostra que a argamassa FV, aos 28 dias, é mais dúctil que as argamassas P, FPP, M1 e CA.

O Coeficiente de Resistência à Evolução da fendilhação aos 28 dias - *CREF (28)* - é significativamente superior para a argamassa FV e da mesma ordem de grandeza para as outras argamassas ensaiadas.

A energia de rotura nos ensaios de flexão pode considerar-se consistente com estes resultados, se tivermos em conta a menor resistência da argamassa CA, que explica um valor inferior ao de P; nos ensaios de compressão verifica-se uma inversão entre as energias de rotura de P e de FV. A extensão de rotura - d_r - e o módulo de rotura à tracção - M_t - têm variações pouco consistentes, principalmente no caso da argamassa CA.

e) Análise sintética dos dois critérios de susceptibilidade à fendilhação

Os resultados dos critérios de susceptibilidade à fendilhação definidos sintetizam-se no gráfico de barras da fig. 8.17.

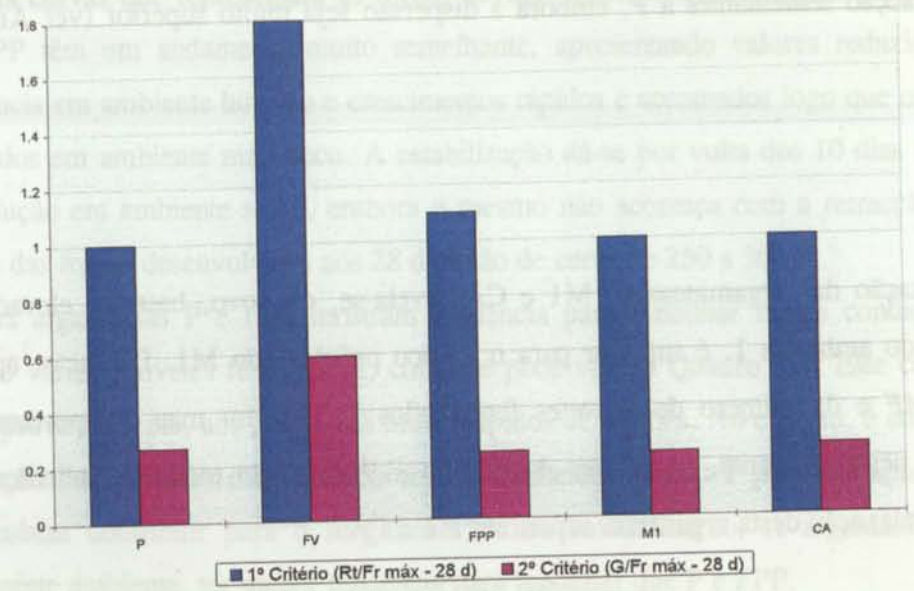


Fig. 8.17 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação, aplicados aos 28 dias

Em síntese, de acordo com os critérios definidos, aplicados aos 28 dias de idade, parece poder concluir-se que, das cinco argamassas ensaiadas, a menos susceptível à fendilhação por retracção restringida no ambiente 2 é FV, que apresenta, simultaneamente, coeficiente *CSAF* e CREF bastante elevados. As restantes argamassas têm valores muito semelhantes dos parâmetros correspondentes aos dois critérios. No entanto, é de notar que a argamassas P teve três provetes fendilhados de entre os 6 ensaiados aos 28 dias e M1 e FPP dois, enquanto a argamassa CA não teve nenhum provete fendilhado, embora todos eles mostrassem resistências muito próximas das forças.

Admite-se que o comportamento a longo prazo das várias argamassas pudesse revelar ainda algumas diferenças importantes. Nomeadamente a argamassa com cal aérea CA poderá ainda apresentar alterações importantes no seu comportamento, esperando-se uma melhoria em ambos os critérios. Contudo, mais uma vez, as limitações de tempo deste trabalho impediram a realização de ensaios mais longos sobre todas as argamassas.

Nos ensaios realizados neste ambiente verificou-se uma elevada dispersão de resultados, que limita a validade das conclusões extraídas. Essa dispersão está, julga-se, relacionada com a

heterogeneidade do material. No entanto, a variabilidade associada ao condicionamento, por exemplo aos tempos de colocação e retirada do plástico, à colocação na câmara e aos momentos de abertura desta terão também contribuído para o aumento da dispersão, mesmo nas curvas de força.

Os restantes parâmetros analisados nem sempre são directamente correlacionáveis com os dois indicadores escolhidos e apresentam maior dispersão, no entanto mostram algum interesse como parâmetros adicionais.

8.3.10 - Resultados dos ensaios de retracção restringida e resistência à tracção sobre suporte absorvente

Estes ensaios foram realizados com provetes moldados sobre placas cerâmicas, inseridas sob os aparelhos, em vez das bases acrílicas (ver fig. 8.18). O coeficiente de absorção das placas é bastante semelhante ao dos tijolos habitualmente usados em alvenarias no nosso País. Para reduzir, tanto quanto possível, o atrito da argamassa na placa, sem dificultar a sucção da água do reboco pelo suporte, aplicaram-se duas camadas de rede de fibra de vidro com malha de 4,5mm x 4,5mm (rede R2) sobre o elemento cerâmico (ver fig. 8.19). O revestimento de resina das camadas de rede facilita o seu escorregamento uma sobre a outra, reduzindo o atrito a valores que considerámos aceitáveis e permitindo, ao mesmo tempo, a fácil passagem da água. Esta metodologia foi adoptada após várias experiências com diferentes geotêxteis e com papel de filtro, que se mostraram menos eficientes.

As condições de aplicação e tipos de cura usados foram os seguintes:

Condição SA - suporte absorvente, sem humedecimento; argamassa no ambiente 1, sem humedecimento.

Condição SH - suporte absorvente humedecido antes da aplicação da argamassa, com um pulverizador de água (cerca de 20 ml de água para cada placa, espalhada por toda a superfície); argamassa no ambiente 1, sem humedecimento.

Condição SH+RH - suporte absorvente humedecido antes da aplicação da argamassa, com um pulverizador de água (cerca de 20 ml de água para cada placa, espalhada por toda a superfície) (ver fig. 8.20); argamassa no ambiente 1, mas humedecida duas vezes por dia com um pulverizador de água (cerca de 20 ml de água para cada provete, espalhada por toda a superfície) - ≈ às 10h e às 17,5h -, com início **18h** após a moldagem (a seguir à colocação na vertical) e durante **5 dias**.

Condição SH+RHB - suporte absorvente humedecido antes da aplicação da argamassa, com um pulverizador de água (cerca de 20 ml de água para cada placa, espalhada por toda a superfície); argamassa no ambiente 1, mas humedecida duas vezes por dia com um pulverizador de água (cerca de 20 ml de água para cada provete, espalhada por toda a superfície) - ≈ às 10h e às 17,5h - com início **2h** após a moldagem (a seguir a serem retiradas as barras laterais) e durante **2 dias**.

Condição SH+RHHB - suporte absorvente humedecido antes da aplicação da argamassa, com um pulverizador de água (cerca de 20 ml de água para cada placa, espalhada por toda a superfície; argamassa no ambiente 1, mas humedecida duas vezes por dia com um pulverizador de água (cerca de 20 ml de água para cada provete, espalhada por toda a superfície) - ≈ às 10h e às 17,5h - com início **2h** após a moldagem (a seguir a serem retiradas as barras laterais) e durante **5 dias**.

Condição SH+RP - suporte absorvente humedecido antes da aplicação da argamassa, com um pulverizador de água (cerca de 20 ml de água para cada placa, espalhada por toda a superfície; provete de argamassa protegido com folha de polietileno desde **2h** após a moldagem (a seguir a serem retiradas as barras laterais) e durante **5 dias**.

Os ensaios de retracção restringida e de tracção foram realizados segundo técnicas idênticas às usadas nos ensaios realizados sobre suporte não-absorvente (ver fig. 8.21). Não foram realizados ensaios de retracção livre, dado que o maior atrito inevitavelmente introduzido com este suporte retiraria significado aos valores obtidos em ensaios desse tipo.

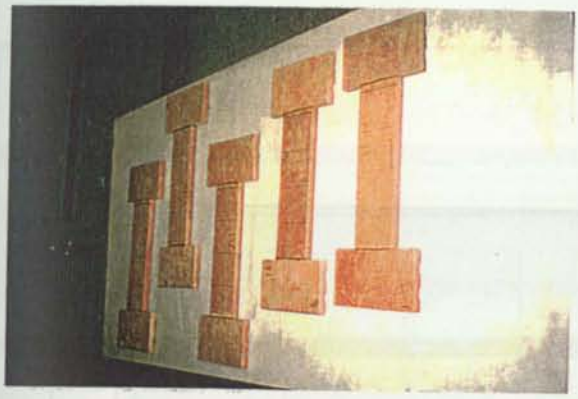


Fig. 8. 18 - Preparação de bases cerâmicas para os ensaios sobre suporte absorvente

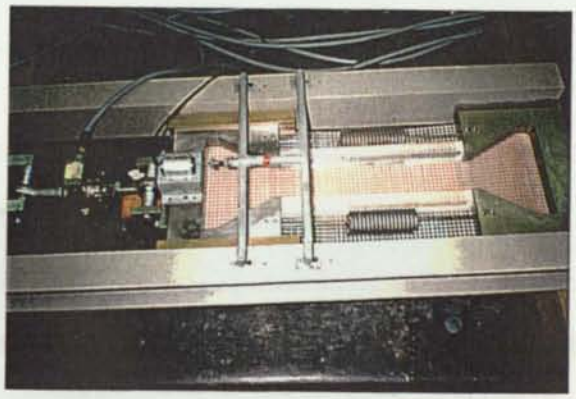


Fig. 8. 19 - Preparação do aparelho de retracção restringida para ensaio sobre suporte absorvente



Fig. 8.20 - Humedecimento do suporte (condição SH).

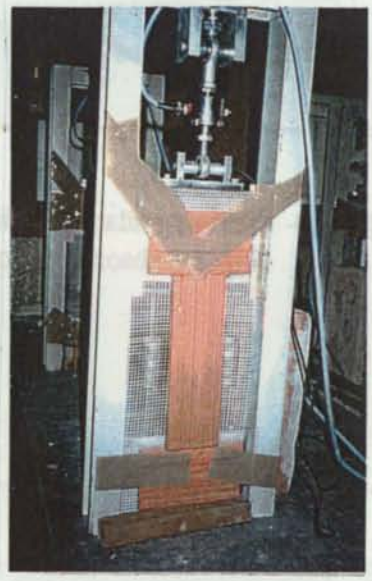
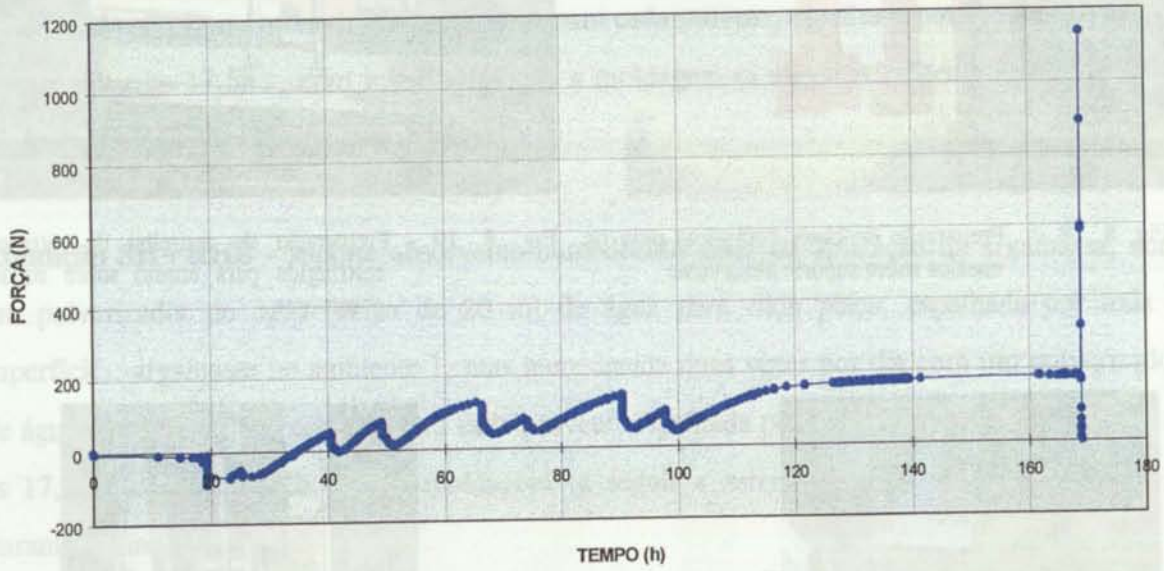


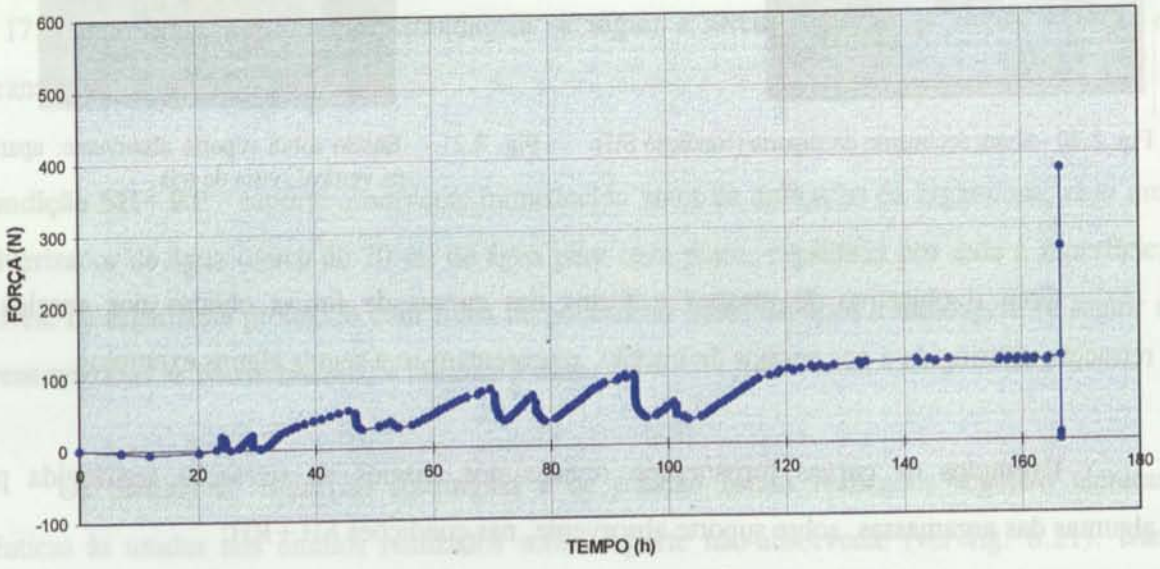
Fig. 8.21 - Ensaio sobre suporte absorvente: aparelho na vertical, vista de trás.

Com o objectivo de mostrar a forma das curvas de forças obtidas nos ensaios de retracção restringida e nos ensaios de tracção, representam-se a seguir alguns exemplos.

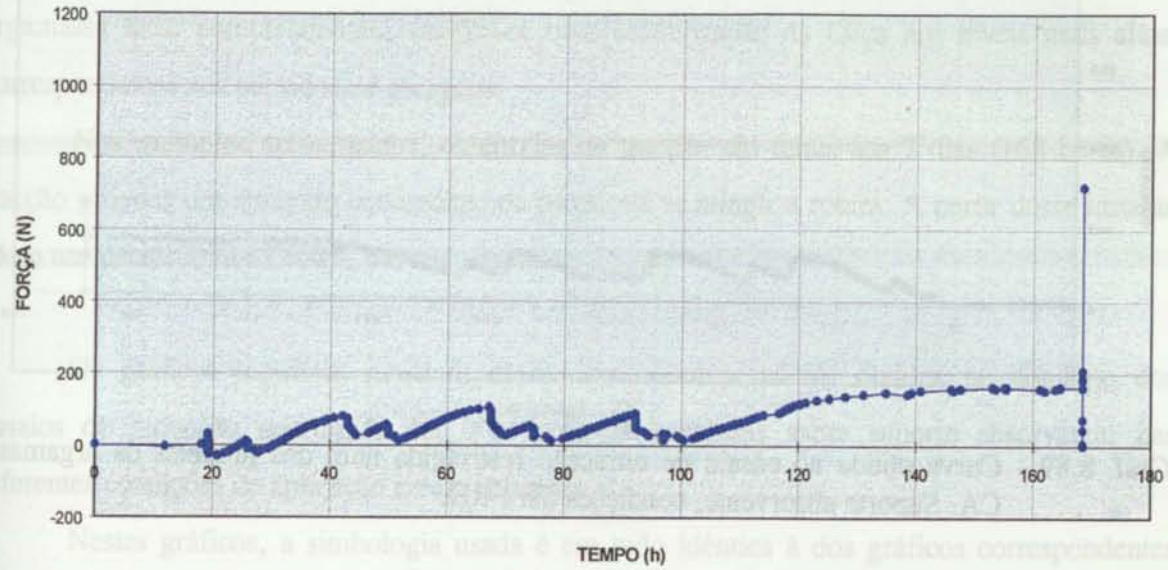
Exemplos de curvas força/tempo obtidas nos ensaios de retracção restringida para algumas das argamassas, sobre suporte absorvente, nas condições SH+RH:



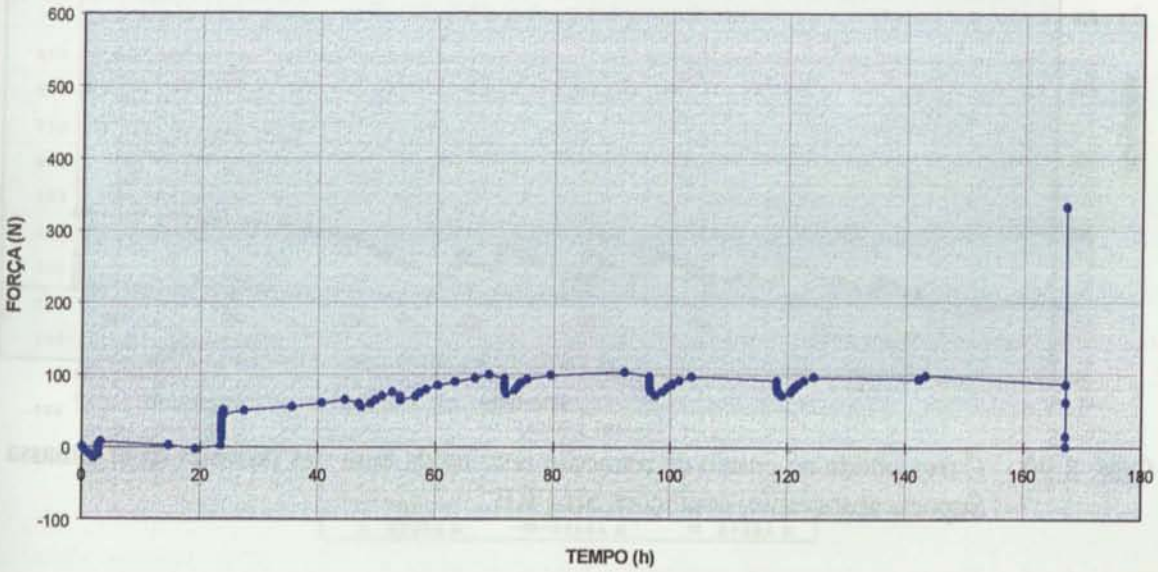
Gráf. 8.85 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa P. Suporte absorvente, condições SH+RH.



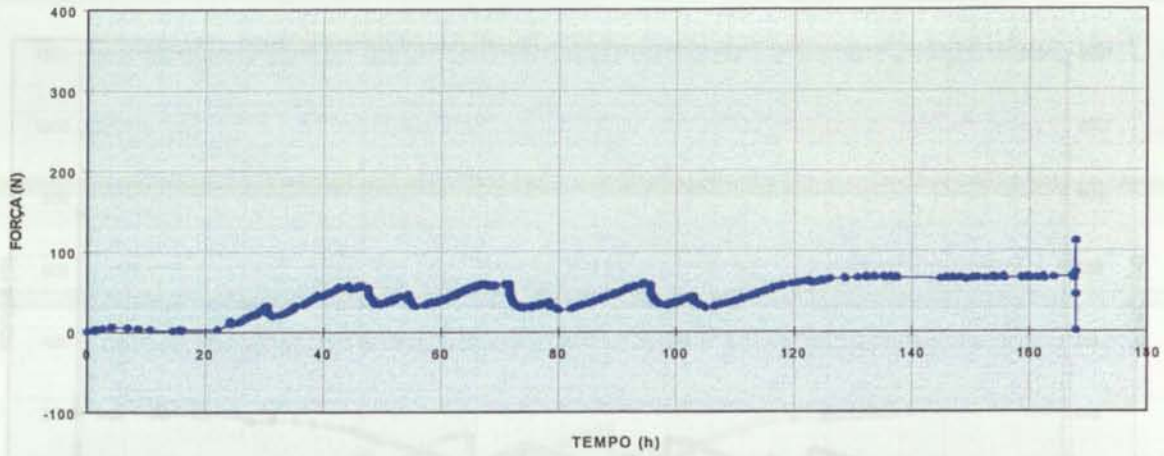
Gráf. 8.86 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa FV. Suporte absorvente, condições SH+RH.



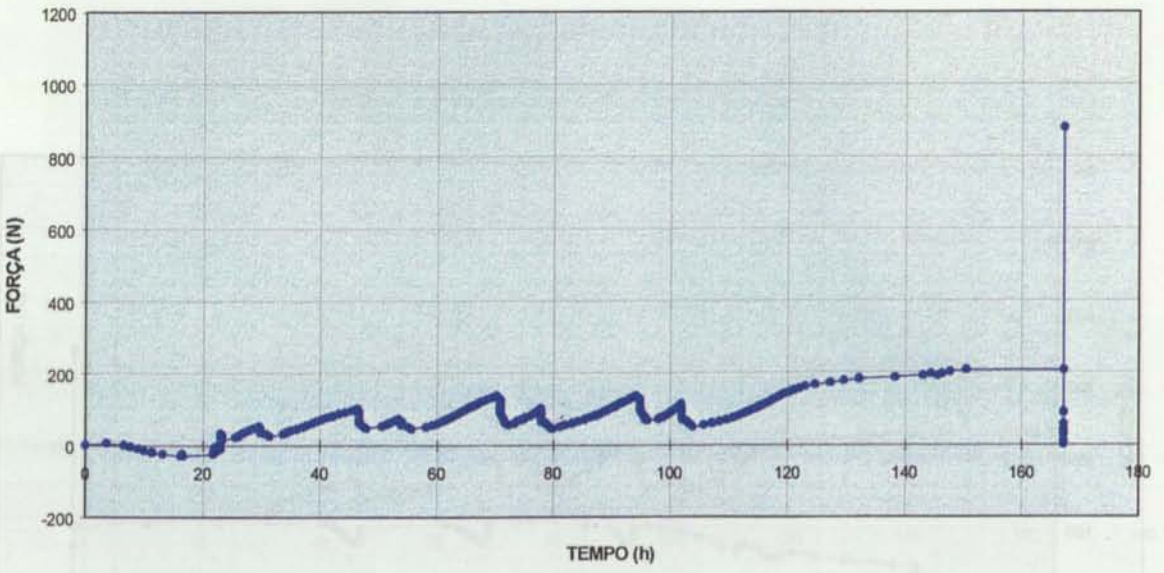
Gráf. 8.87 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa FPP. Suporte absorvente, condições SH+RH.



Gráf. 8.88 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa M1. Suporte absorvente, condições SH+RH.



Gráf. 8.89 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa CA. Suporte absorvente, condições SH+RH.



Gráf. 8.90 - Curva obtida no ensaio de retracção restringida num dos provetes da argamassa Pa. Suporte absorvente, condições SH+RH.

De um modo geral, as curvas mostram: forças praticamente nulas durante as 1ªs 24 horas, em que a argamassa é muito deformável, pelo que a restrição da retracção quase não gera

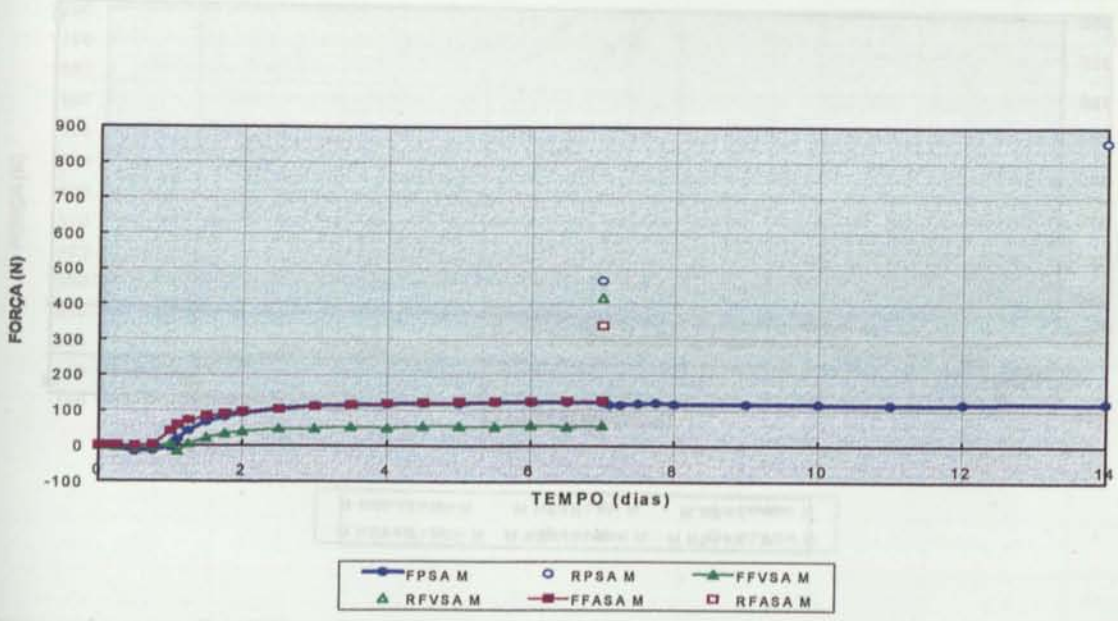
tensões; segue-se um período em que a força aumenta mas volta a baixar quase até ao nível anterior quando há humedecimento da argamassa; a reversibilidade é elevada durante vários dias, em que as forças se mantêm baixas; logo que termina o humedecimento e se deixa a argamassa secar completamente, verifica-se uma estabilização da força nos níveis mais altos, correspondentes aos períodos de secagem.

Nos exemplos apresentados, os ensaios de tracção são feitos aos 7 dias (168 horas). A tracção provoca um aumento *instantâneo* da força, até se atingir a rotura. A partir desse instante dá-se um decréscimo da força, até que se anula.

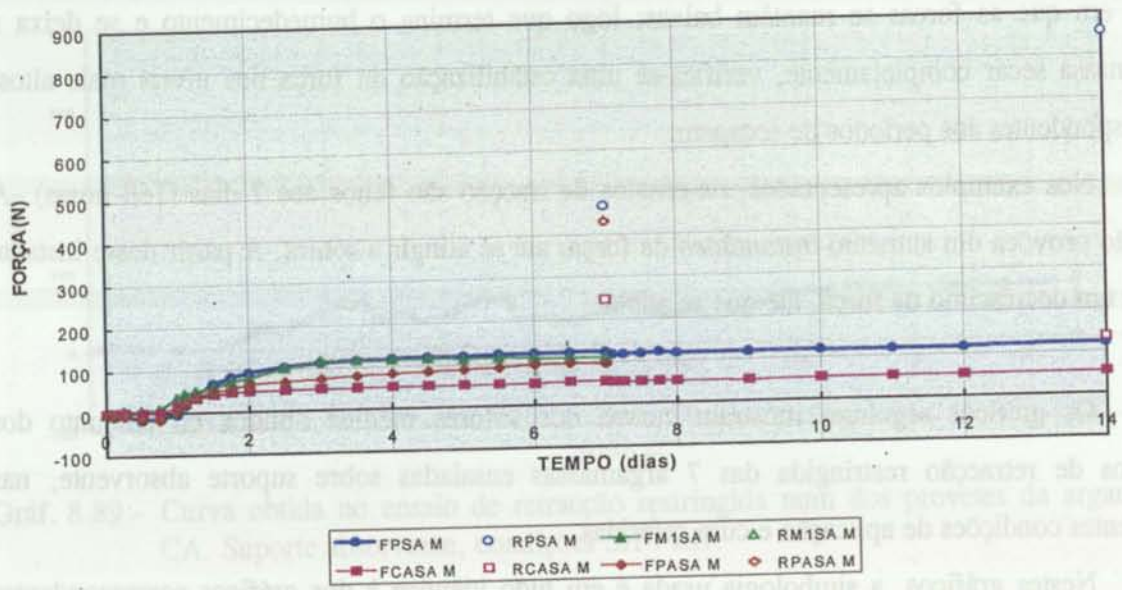
Os gráficos seguintes mostram curvas dos valores médios obtidos no conjunto dos ensaios de retracção restringida das 7 argamassas ensaiadas sobre suporte absorvente, nas diferentes condições de aplicação e cura referidas.

Nestes gráficos, a simbologia usada é em tudo idêntica à dos gráficos correspondentes nos ambientes 1 e 2.

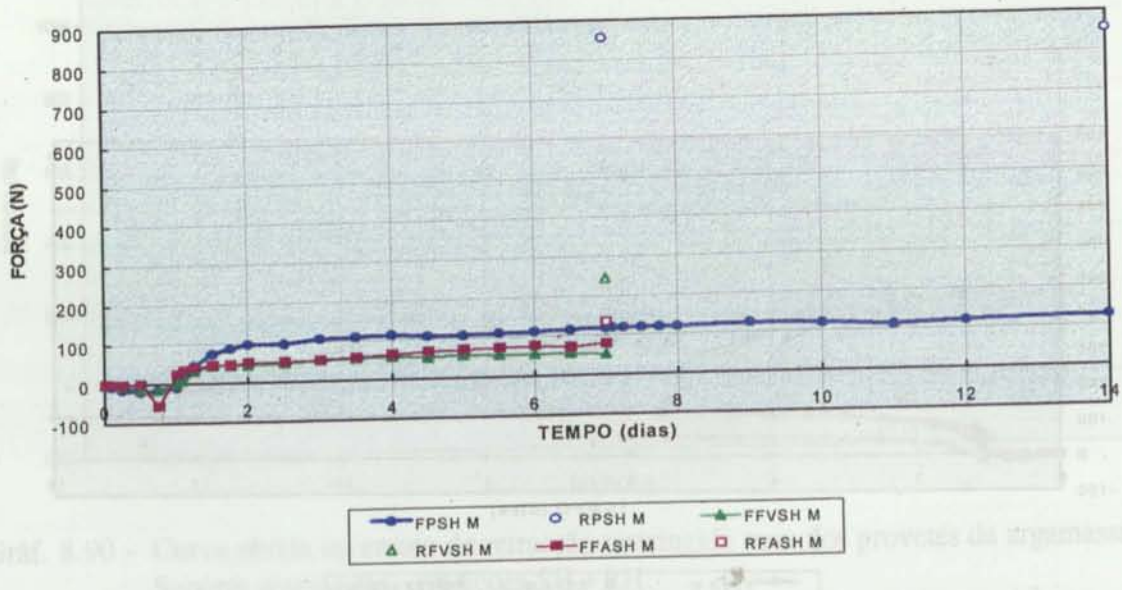
A partir do conjunto de ensaios realizados preparou-se o quadro 8.5 em que se sintetizam os resultados médios obtidos para a retracção restringida, a resistência à tracção e para os vários parâmetros calculados com esses valores. Os valores individuais apresentam-se no quadro VI.3 do Anexo VI.



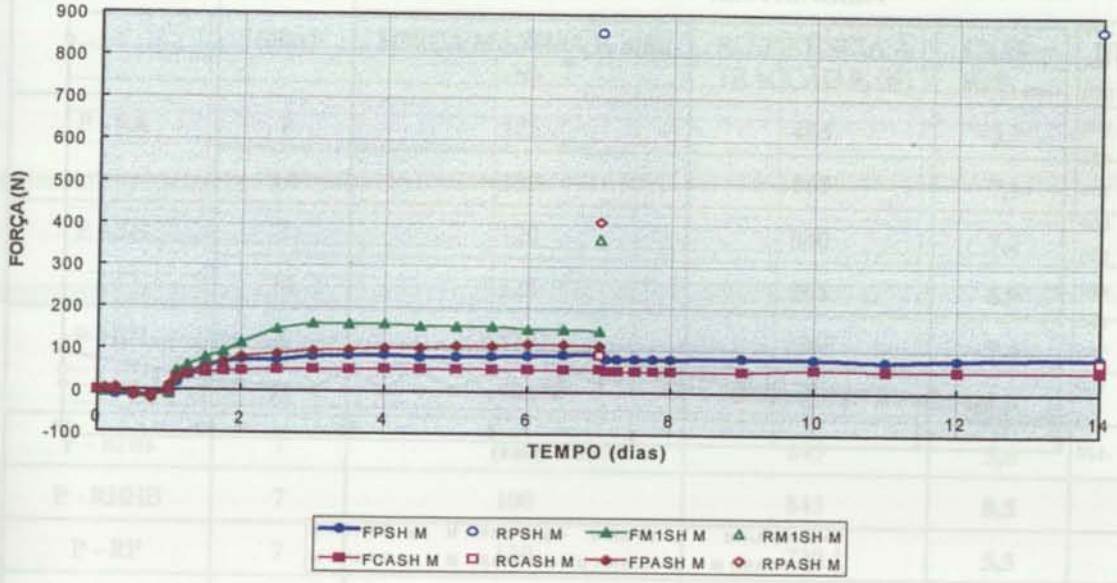
Gráf. 8.91 - Força de retracção restringida nas argamassa P, FV e FPP. Suporte absorvente, condições SA.
CSAF (7d): de P=3,7; de FV=7,0; de FPP=2,6; CSAF(14d): de P=7,1



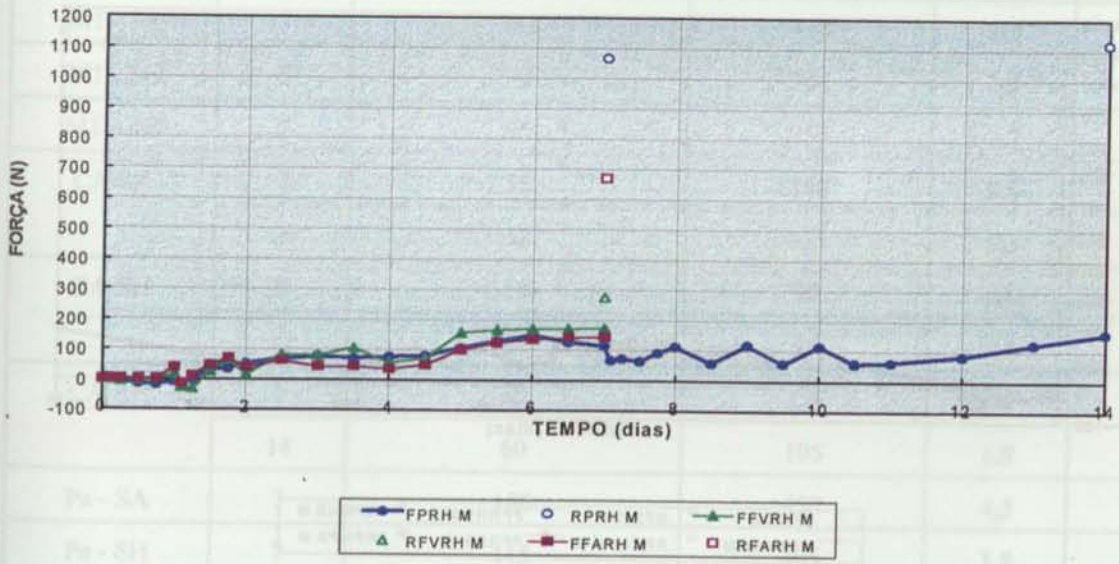
Gráf. 8.92 - Força de retracção restringida nas argamassas P, M1, CA e Pa . Suporte absorvente, condições SA.
CSAF (7d): de P=3,7; de M1=1,0; de CA=4,5; de Pa=4,3; CSAF(14d): de P=7,1; de CA=2,5



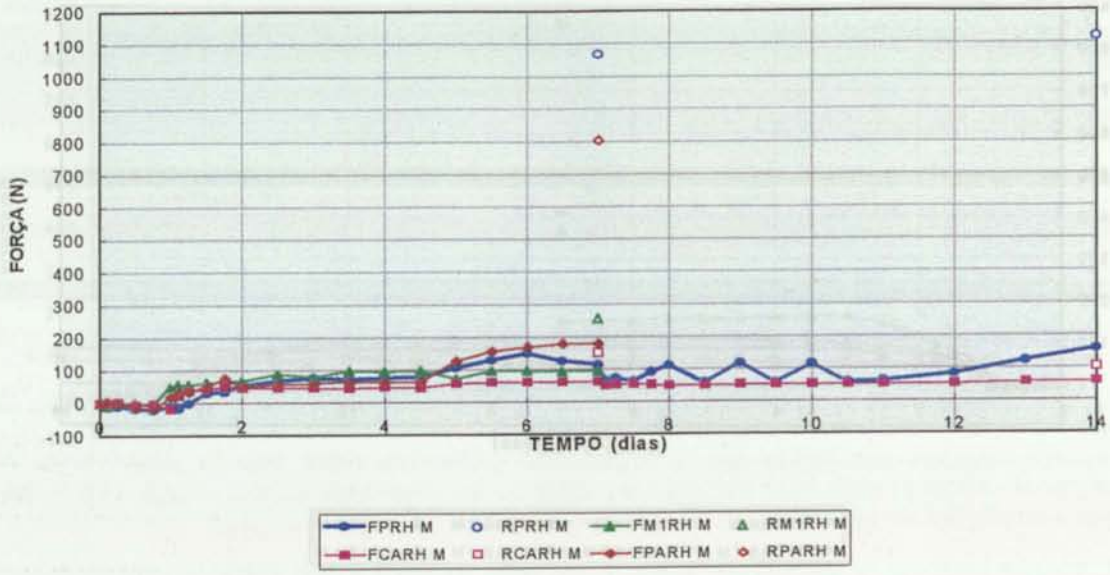
Gráf. 8.93 - Força de retracção restringida nas argamassas P, FV e FPP. Suporte absorvente, condições SH.
CSAF (7d): de P=7,2; de FV=4,1; de FPP=1,7; CSAF(14d): de P=6,9



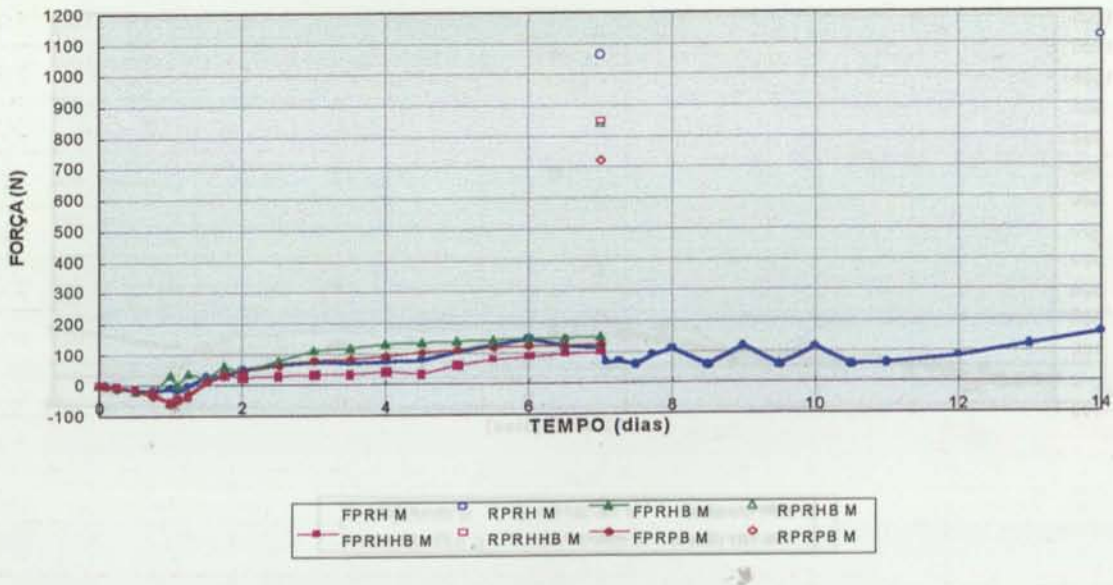
Gráf. 8.94 - Força de retracção restringida nas argamassas P, M1, CA e Pa. Suporte absorvente, condições SH.
CSAF (7d): de P=7,2; de M1=2,3; de CA=1,6; de Pa=3,5; CSAF(14d): de P=6,9; de CA=1,4



Gráf. 8.95 - Força de retracção restringida nas argamassas P, FV e FPP. Suporte absorvente, condições SH+RH.
CSAF (7d): de P=9,3; de FV=3,0 ; de FPP=4,6; CSAF(14d): de P=7,0



Gráf. 8.96 - Força de retracção restringida nas argamassas P, M1, CA e Pa. Suporte absorvente, condições SH+RH.
CSAF (7d): de P=9,3; de M1=2,7; de CA=2,5; de Pa=4,5; CSAF(14d): de P=7,0; de CA=1,8



Gráf. 8.97 - Força de retracção restringida na argamassa P. Suporte absorvente, condições SH+RH, SH+RHB, SH+RHHB e SH+RP.
CSAF (7d): de Prh=9,3; de Prhb=5,6; de Prhhb=8,5; de Prpb=5,5; CSAF(14d): de P=7,0

Quadro 8.5 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Suporte absorvente

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA			
		FORÇA MÁXIMA F_r máx (N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	**CSAF = $R_t/F_{r\,máx}$**	NPF/NPE *
P - SA	7	125	465	**3,7**	0/6
	14	120	855	**7,1**	0/6
P - SH	7	120	860	**7,2**	0/6
	14	125	865	**6,9**	0/6
P - RH	7	115	1065	**9,3**	0/6
	14	160	1120	**7,0**	0/6
P - RHB	7	150	845	**5,6**	0/6
P - RHHB	7	100	845	**8,5**	0/6
P - RP	7	130	720	**5,5**	0/6
FV - SA	7	60	420	**7,0**	0/6
FV - SH	7	60	245	**4,1**	0/6
FV - RH	7	115	340	**3,0**	1/6
FPP - SA	7	130	340	**2,6**	0/6
FPP- SH	7	80	135	**1,7**	0/6
FPP - RH	7	145	670	**4,6**	0/6
M1 - SA	7	115	110	**1,0**	3/3
M1 - SH	7	160	365	**2,3**	1/3
M1 - RH	7	95	255	**2,7**	0/3
CA-SA	7	55	250	**4,5**	0/6
	14	55	135	**2,5**	0/6
CA-SH	7	55	90	**1,6**	0/6
	14	55	75	**1,4**	0/6
CA-RH	7	60	150	**2,5**	0/6
	14	60	105	**1,8**	0/6
Pa - SA	7	100	430	**4,3**	0/3
Pa - SH	7	115	405	**3,5**	0/3
Pa - RH	7	180	805	**4,5**	0/3

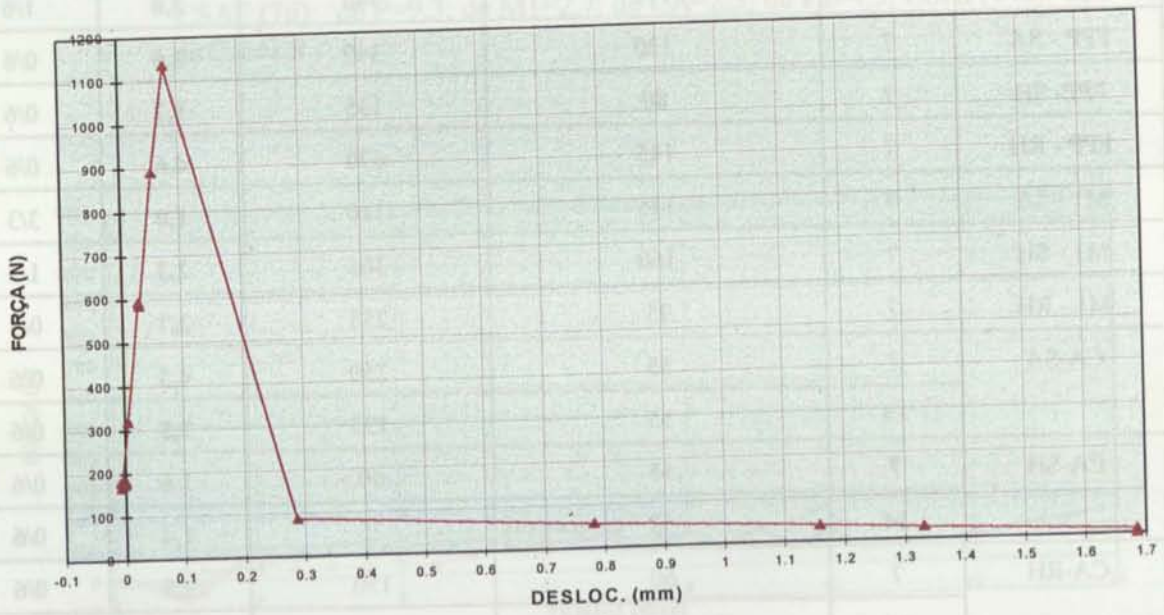
* - Nº de provetes fendilhados / Nº de provetes ensaiados

8.3.11 - Avaliação da ductilidade das argamassas aplicadas sobre suporte absorvente

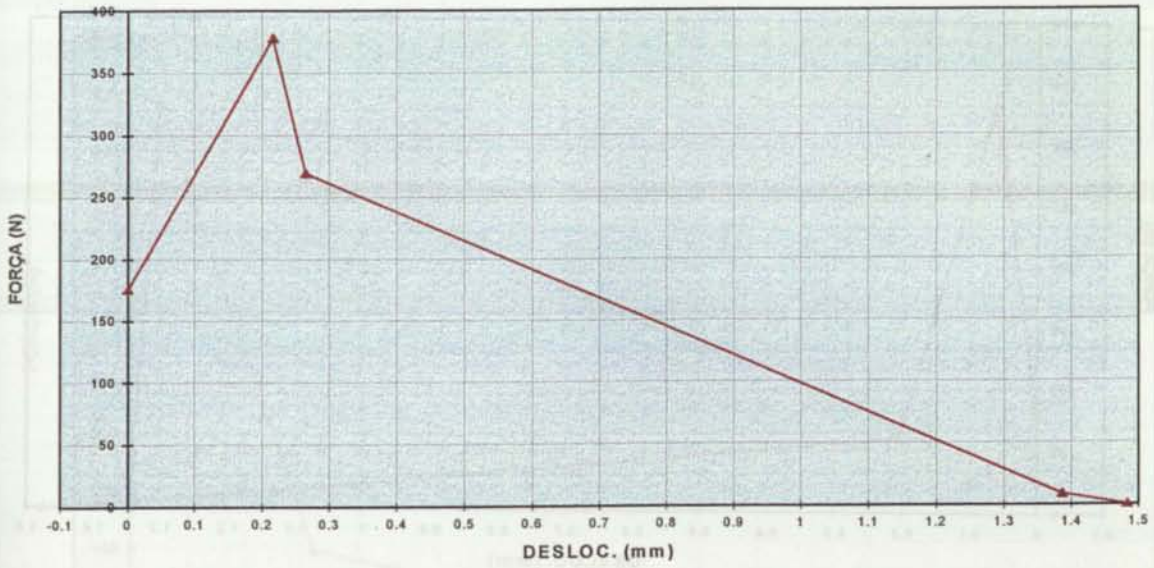
As curvas força-deslocamento obtidas durante os ensaios de tracção pura realizados com os aparelhos de retracção restringida permitem comparar as energias de rotura à tracção das várias argamassas.

Nos gráficos seguintes (8.98 a 8.103) apresentam-se exemplos de curvas força-deslocamento obtidas para as várias argamassas. Os exemplos seleccionados para as argamassas P, FV, FPP, M1, CA e Pa foram obtidos durante os mesmos ensaios de tracção representados nos exemplos dos gráficos 8.85 a 8.90.

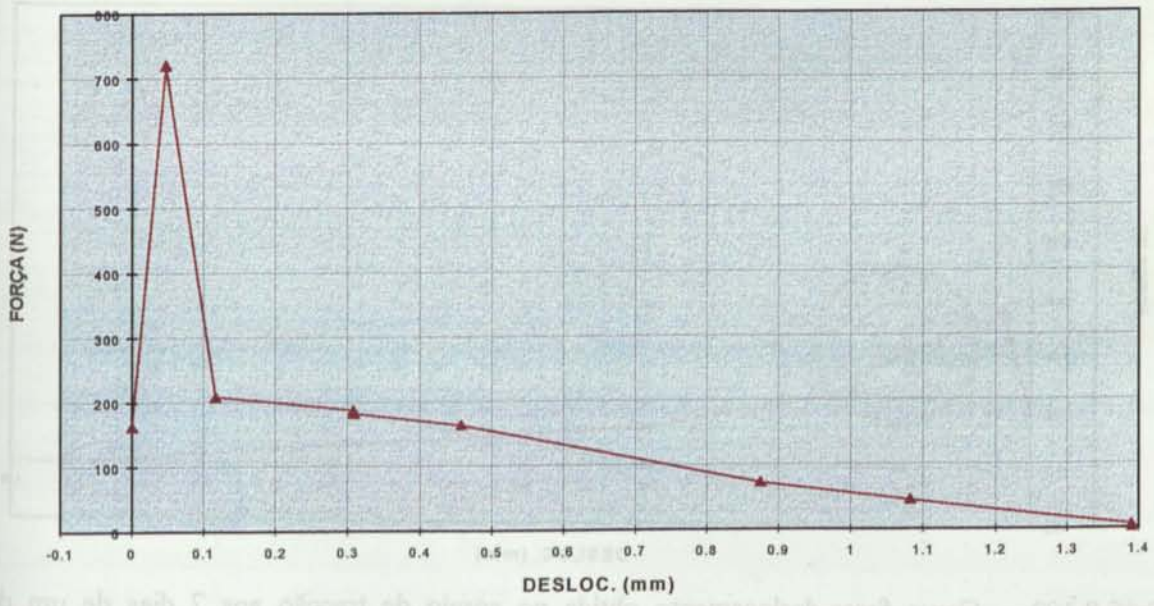
As curvas escolhidas para exemplo foram consideradas relativamente representativas das argamassas em causa, nas condições SH+RH, já que a forma das curvas se manteve semelhante para cada argamassa, nessas condições.



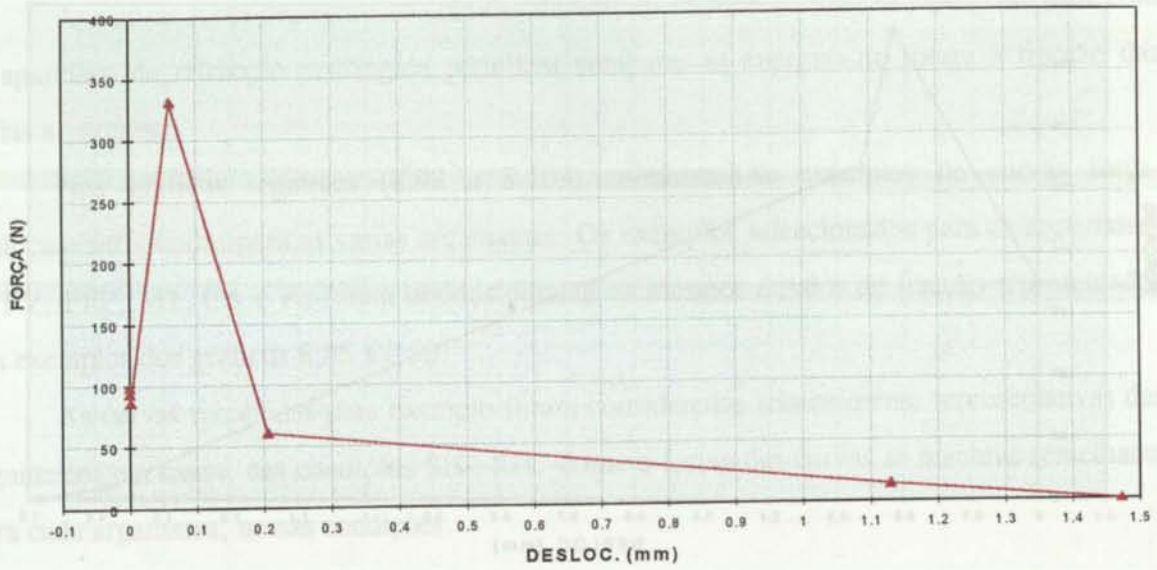
Gráf. 8.98 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa P. Suporte absorvente, condições SH+RH.
CREF (7d)=1,49 mm



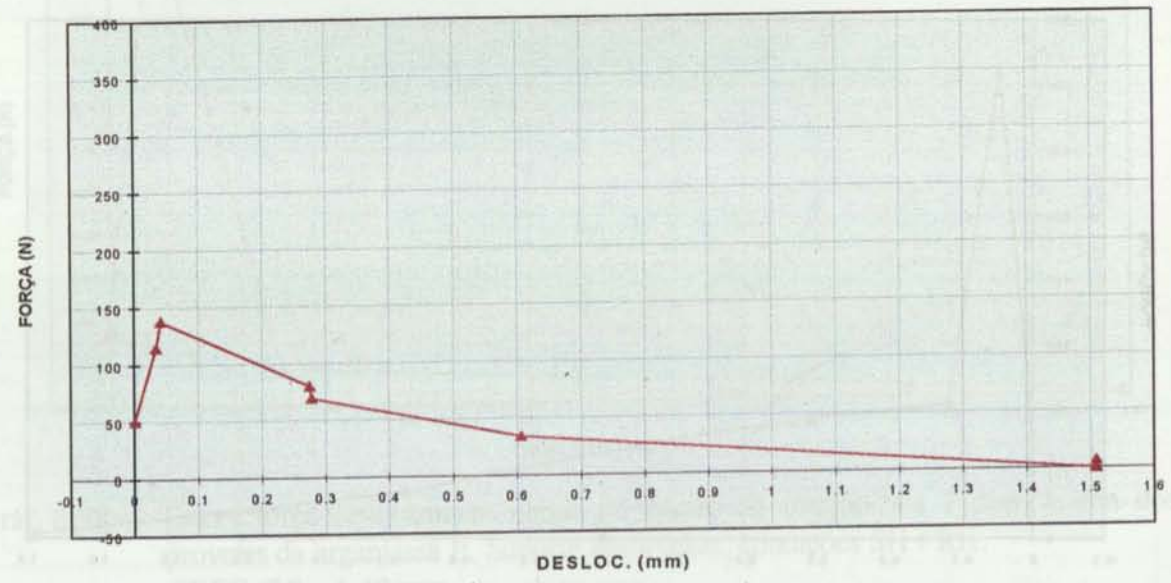
Gráf. 8.99 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa FV. Suporte absorvente, condições SH+RH.
CREF (7 d)=2,01 mm



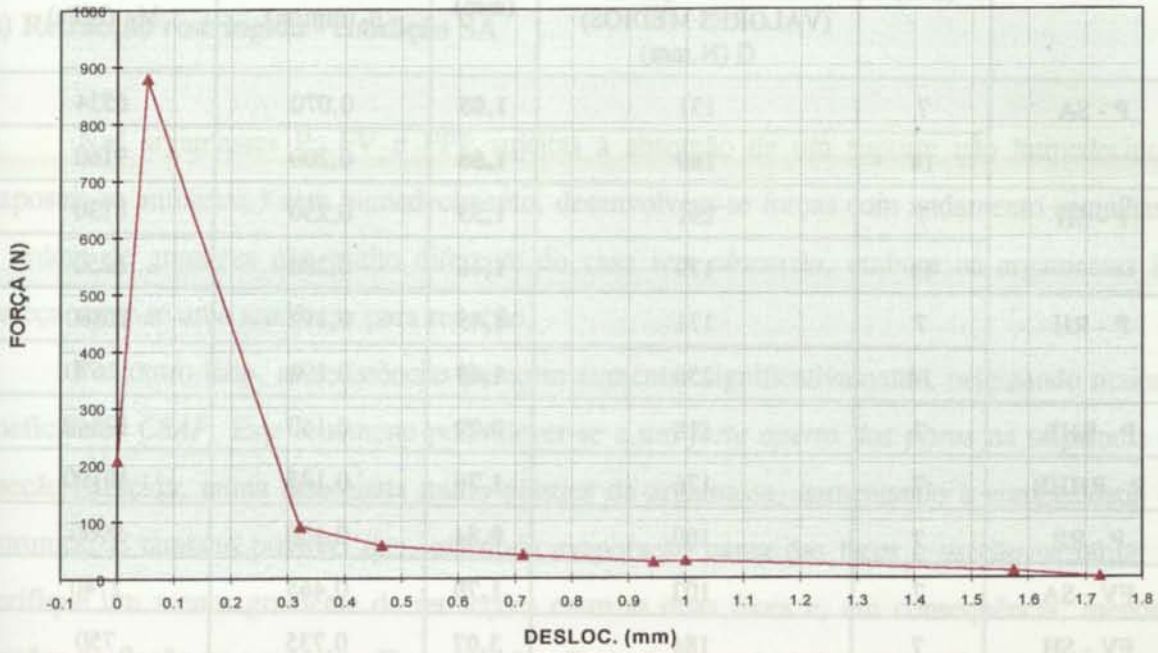
Gráf. 8.100 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa FPP. Suporte absorvente, condições SH+RH.
CREF (7d)=1,42 mm



Gráf. 8.101 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa M1. Suporte absorvente, condições SH+RH.
CREF (7d)=0,95 mm



Gráf. 8.102 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa CA. Suporte absorvente, condições SH+RH.
CREF (7d)=2,20 mm



Gráf. 8.103 - Curva força-deslocamento obtida no ensaio de tracção aos 7 dias de um dos provetes da argamassa Pa. Suporte absorvente, condições SH+RH. CREF (7d)=1,05 mm

BIBLIOTECA F.E. PORTO

Quadro 8.6 - Dados relativos à ductilidade das argamassas. Suporte absorvente

ARGAMASSA	IDADE (dias)	ENERGIA DE ROTURA EM TRACÇÃO (VALORES MÉDIOS) G (N.mm)	CREF (mm)	DEF. MÁX. NA ROTURA d_r (mm/m)	MÓD. ROTURA À TRACÇÃO M_t (MPa)
P - SA	7	131	**1,05**	0,070	6534
	14	189	**1,58**	0,200	9160
P - SH	7	291	**1,53**	0,250	8130
	14	179	**1,46**	0,280	6250
P - RH	7	171	**1,49**	0,190	11880
	14	256	**1,60**	0,190	12670
P - RHB	7	118	**0,79**	0,160	10840
P - RHHB	7	176	**1,76**	0,185	10190
P - RP	7	109	**0,84**	0,150	9960
FV - SA	7	102	**1,70**	0,465	2740
FV - SH	7	184	**3,07**	0,735	750
FV - RH	7	231	**2,01**	0,540	940
FPP - SA	7	92	**0,71**	0,120	7570
FPP- SH	7	102	**1,28**	0,440	410
FPP - RH	7	206	**1,42**	0,125	10520
M1 - SA	7	68	**0,59**	*	*
M1 - SH	7	102	**0,64**	0,070	8850
M1 - RH	7	91	**0,95**	0,085	8810
CA-SA	7	109	**1,98**	0,161	49450
	14	63	**1,15**	0,249	1845
CA-SH	7	77	**1,40**	0,407	265
	14	55	**1,00**	0,502	111
CA-RH	7	132	**2,20**	0,535	400
	14	51	**0,85**	0,053	4080
Pa - SA	7	98	**0,98**	0,102	8570
Pa - SH	7	107	**0,93**	0,080	34080
Pa - RH	7	172	**1,05**	0,140	11360

* - Todos os provetes fendilharam.

8.3.12 - Apreciação dos resultados dos ensaios de comportamento à fendilhação das argamassas sobre suporte absorvente

a) Retracção restringida - condição SA

Nas argamassas P, FV e FPP sujeitas à absorção de um suporte não humedecido e expostas ao ambiente 1 sem humedecimento, desenvolvem-se forças com andamento semelhante e ordem de grandeza não muito diferente do caso *sem absorção*, embora na argamassas FV pareça notar-se uma tendência para redução.

Por outro lado, as resistências parecem aumentar significativamente, originando maiores coeficientes *CSAF*. Este fenómeno pode dever-se a um *forte aperto dos poros* na sequência da sucção exercida, numa fase ainda muito plástica da argamassa, aumentando a compacidade da estrutura. É também possível que, existindo evaporação numa das faces e sucção na outra, se verifique um menor gradiente de retracções entre as duas faces e, em consequência, menores tensões de flexão na espessura. Esta situação, diminuindo o nível das tensões instaladas nalguns planos da secção (embora mantendo os valores médios), pode aumentar a resistência à rotura.

A argamassa CA parece sofrer um processo semelhante, enquanto a argamassa M1 parece, pelo contrário, ficar sujeita a forças de grandeza superior e atingir resistências significativamente menores, verificando-se mesmo fendilhação de todos os provetes.

O aumento da quantidade de água de amassadura (argamassa Pa) parece contribuir para uma ligeira redução das forças - o que pode ser explicado pelo aumento da água livre, que diminui a *extracção* de água dos capilares, por sucção - e para um incremento de resistência menos pronunciado que no caso da argamassa P.

b) Retracção restringida - condição SH

O humedecimento prévio do suporte não parece provocar variações consistentes nas forças desenvolvidas. As resistências têm também uma variação pouco consistente, aumentando no caso das argamassas P e M1 e baixando, em termos médios, nas restantes. No conjunto, verifica-se que os coeficientes *CSAF* apenas aumentam para as argamassas P e M1 aos 7 dias e se reduzem significativamente para a FV, FPP e CA. No entanto, é possível que este efeito se

anule mais tarde e que em idades superiores a 14 dias haja um aumento de resistência em todas as argamassas.

c) Retracção restringida - condição SH+RH

A pulverização periódica do revestimento com água, a partir das primeiras 18 horas mostra que, em geral, as tensões permanecem baixas enquanto se mantém o humedecimento, acompanhando claramente as alternâncias húmido-seco. Logo que se interrompe o humedecimento, contudo, verifica-se uma subida rápida da força desenvolvida. Apenas a argamassa M1 tem um comportamento diferente, mostrando-se menos sensível às alternâncias humedecimento-secagem.

Na maior parte dos casos, as resistências parecem aumentar com o humedecimento periódico, como seria de esperar devido à presumível melhor hidratação do cimento. No entanto, o coeficiente *CSAF* diminui para a argamassa FV.

d) Retracção restringida - condições SH+RHB; SH+RHHB; SH+RP

Ao comparar o humedecimento periódico da argamassa P iniciado às 18 horas e prolongado durante 5 e durante 12 dias, com um humedecimento periódico iniciado às 2 horas e prolongado durante 2 dias e durante 5 dias, e ainda com a protecção da argamassa fresca com uma folha de polietileno, para reduzir a evaporação, verifica-se que o humedecimento mais precoce e prolongado permite manter o nível de tensões mais baixo, enquanto as resistências se mantêm altas. Assim, o coeficiente *CSAF* mais elevado corresponde à condição SH+RHHB e os menores a SH+RP e a SH+RHB.

e) Ductilidade

A avaliação da ductilidade das argamassas P, FV e FPP, aplicadas sobre suporte absorvente, com base no coeficiente *CREF* e, adicionalmente, na *extensão de rotura* d_r e no *módulo de rotura à tracção Mt,* parecem apontar para um comportamento significativamente melhorado deste ponto de vista, em relação às mesmas argamassas conservadas quer no ambiente 1, quer no ambiente 2 (ver quadros 8.2 e 8.4). No entanto, nas argamassas CA e Pa

essa melhoria não é visível, e na argamassa M1 observa-se, pelo contrário, uma redução da ductilidade.

De um modo geral, a ductilidade das argamassas parece aumentar quando melhoram as condições de hidratação, ou seja, quando se passa das condições SA para SH e, principalmente, para SH+RH. No caso da argamassa P, em que se experimentaram outros tipos de cura, verificou-se que se obtém melhor ductilidade com molhagens periódicas e prolongadas, sendo os procedimentos de envolvimento em plástico e o humedecimento curto os menos eficientes. Ainda no que diz respeito à argamassa P, verificou-se, de um modo geral, um aumento da ductilidade dos 7 para os 14 dias.

Nas condições SH+RH não se verificou fendilhação de nenhum provete.

f) Análise sintética dos dois critérios de susceptibilidade à fendilhação

Os resultados dos critérios de susceptibilidade à fendilhação definidos sintetizam-se nos gráficos de barras das figuras 8.22 a 8.25.

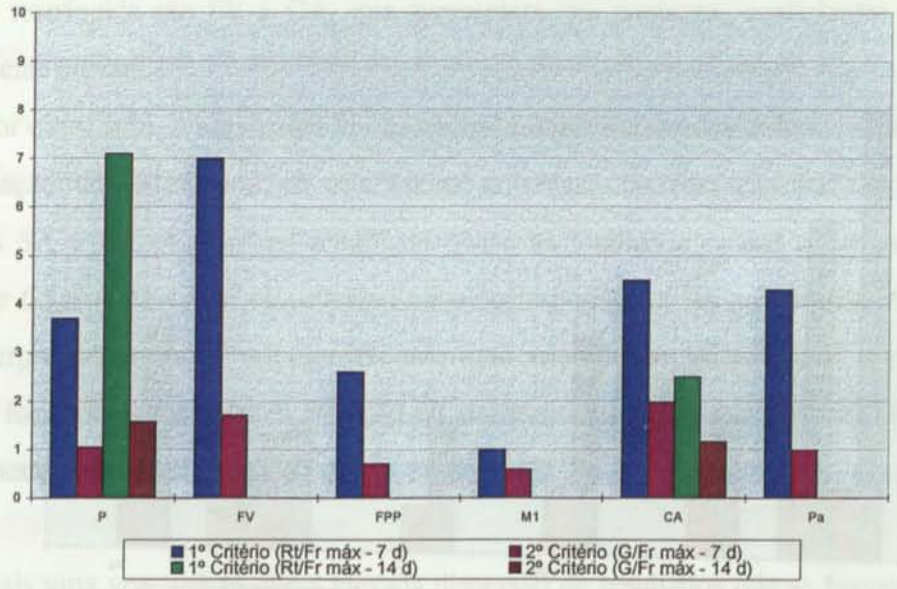


Fig. 8.22 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação das argamassas aplicadas sobre suporte absorvente. Condições SA.

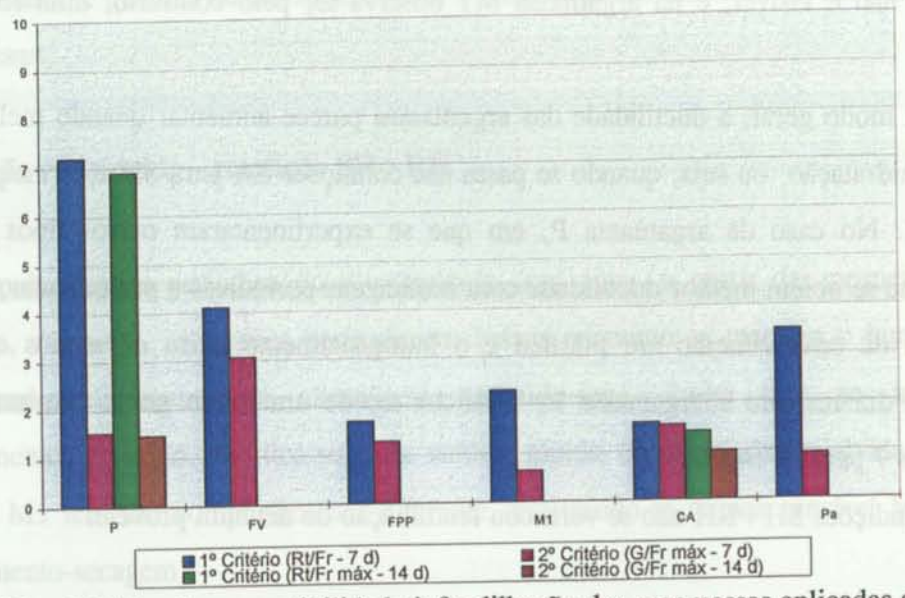


Fig. 8.23 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação das argamassas aplicadas sobre suporte absorvente. Condições SH.

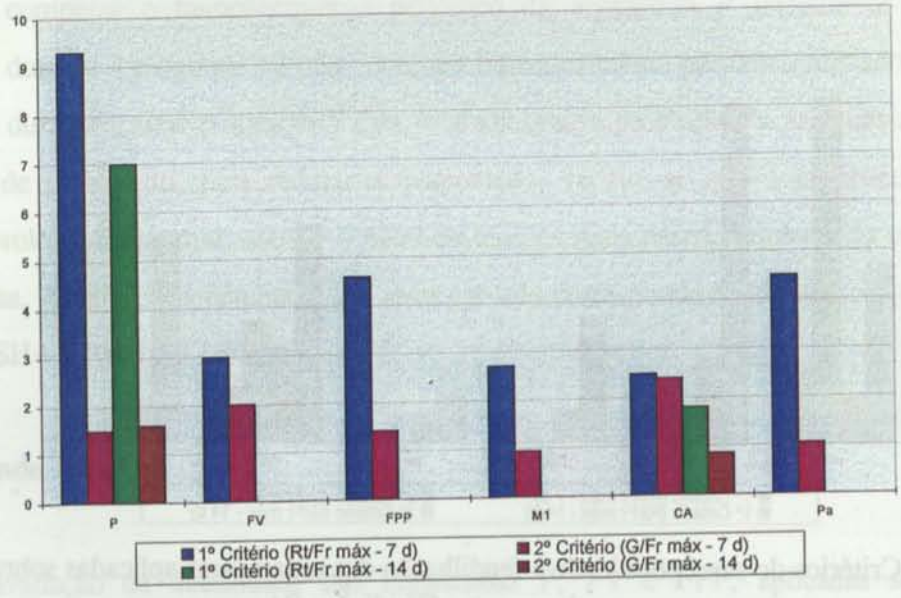


Fig. 8.24 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação das argamassas aplicadas sobre suporte absorvente. Condições SH+RH.

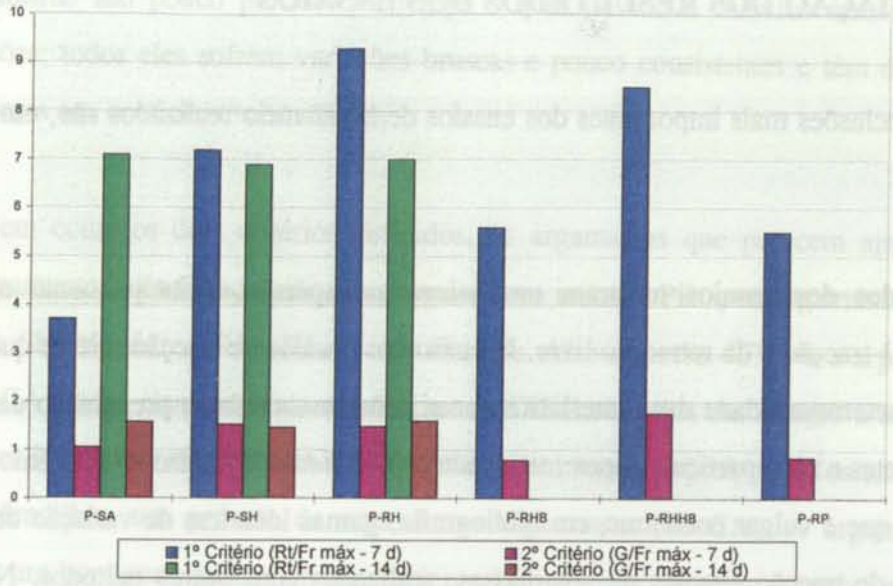


Fig. 8.25 - Critérios de susceptibilidade à fendilhação da argamassa P aplicada sobre suporte absorvente, com várias condições de cura.

Em síntese, de acordo com os critérios definidos, parece poder concluir-se que, nas argamassas aplicadas sobre suporte absorvente, as menos susceptíveis à fendilhação por retracção restringida são FV e CA, que apresentam, no conjunto, coeficientes *CSAF* e *CREF* relativamente elevados.

Por outro lado, a argamassa M1 apresenta valores baixos dos critérios de susceptibilidade à fendilhação definidos, embora este efeito se reduza na condição RH. Com efeito, nas condições SA e SH os provetes fendilham quase na totalidade e, em todas as condições, os valores de *CSAF* e de *CREF* são inferiores aos correspondentes ao suporte não-absorvente. Este facto é surpreendente, uma vez que M1 tem uma retenção de água elevada e supunha-se, por isso, que fosse pouco sensível à absorção do suporte, mas não que o seu comportamento fosse negativamente afectado.

Mais uma vez, crê-se que a elevada dispersão de resultados que se encontra nos ensaios está relacionada com a heterogeneidade do material. No entanto, a variabilidade associada ao condicionamento, e aos humedecimentos do suporte e da argamassa terão também contribuído para o aumento da dispersão, mesmo nas curvas de força.

8.4 - APRECIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

As conclusões mais importantes dos ensaios de laboratório realizados são, em síntese, as seguintes:

- Os resultados dos ensaios mostram uma elevada dispersão, principalmente no caso da resistência à tracção e da retracção livre. No caso dos ensaios de tracção, crê-se que este facto reflecte a heterogeneidade dos materiais e as variações associadas à preparação da argamassa e dos provetes e não, particularmente, uma menor *fiabilidade* do método de ensaio empregue, tanto mais que é vulgar encontrar, em bibliografia, gamas idênticas de variação de resultados de ensaios de tracção simples de argamassas, realizados com outros métodos. No caso dos ensaios de retracção livre, as forças de atrito que não é possível anular totalmente e outros factores podem afectar os resultados de forma mais significativa, no entanto, julga-se que a informação obtida, ao efectuar medições desde a moldagem e em condições de evaporação e sucção mais próximas das reais, é relevante, pelo menos em termos qualitativos. A dispersão é maior no caso dos materiais mais heterogéneos, ou seja, na argamassa bastarda CA e, a seguir, nas outras argamassas tradicionais; a argamassa com resina e os monocamada apresentam comportamentos mais homogéneos. Como seria de esperar, as condições de ensaio que exigem maior manipulação conduzem a maiores dispersões de resultados. Assim, os ensaios realizados no ambiente 1 são os mais fiáveis. Contudo, os outros são importantes, principalmente para avaliar a influência de alguns factores.

- Os critérios de fendilhação e os indicadores escolhidos - *CSAF* e *CREF* - parecem ser relativamente consistentes com as várias situações ensaiadas e com a experiência prática. Pelo contrário, a análise de outros parâmetros, como as forças geradas por retracção restringida ou a energia de rotura por tracção ou por flexão, por si só, dão resultados bastante contraditórios. A análise da relaxação e da ductilidade através de outros factores, como o módulo de elasticidade equivalente E_{eq} e a relação F_e/F_r - no caso da relaxação - e a extensão de rotura d_r e o módulo de rotura à tracção M_t - no caso da ductilidade - revelaram-se métodos menos fiáveis para avaliar a susceptibilidade à fendilhação. De facto, são, por um lado, mais difíceis de determinar, implicando maior número de ensaios; exigem medidas mais sujeitas a erro, quer devido aos condicionamentos do equipamento - as medidas de deformações

instantâneas são pouco precisas no tempo - quer devido a cálculos sensíveis a pequenas variações; todos eles sofrem variações bruscas e pouco consistentes e têm dispersões muito superiores aos coeficientes escolhidos.

- Tendo em conta os dois critérios definidos, as argamassas que parecem apresentar melhor comportamento à fendilhação são a argamassa com resina - PR -, as argamassas armadas com redes de fibra de vidro - R1 e R2 - e com fibra de vidro dispersa - FV - e a argamassa com cal aérea - CA: todas elas apresentam coeficientes *CREF* elevados em relação à argamassa P em condições idênticas e coeficientes *CSAF* também, em regra, superiores. Nos ensaios realizados apenas fendilhou um provete de uma destas argamassas (da CA). A argamassa M1, que mostrou um bom comportamento no ambiente 1, revelou-se bastante susceptível à fendilhação no ambiente 2 e nos ensaios sobre suporte absorvente. A argamassa CA mostrou melhor comportamento em condições secas (ambiente 1 e condições SA) que em condições mais húmidas.

De acordo com os resultados obtidos e tendo em conta o conhecimento prático que, até certo ponto, temos das argamassas de reboco ensaiadas[1], consideramos poder sugerir uma classificação de resistência à fendilhação por retracção restringida, com base nos resultados dos ensaios de retracção restringida nas condições em que se dispõe de ensaios em maior número - ou seja, até 7 dias, em ambiente caracterizado por 23° C / 50% HR. Esta classificação, que se sintetiza no quadro 8.7, terá, naturalmente, que ser testada, corrigida e adaptada em função da experiência prática a adquirir e de campanhas de ensaios mais alargadas a realizar. De acordo com ela, as argamassas ensaiadas seriam classificadas como se mostra no quadro 8.8, em que se refere também, para comparação, a classificação segundo o critério ε - *E* - *E/Rt* referido no capítulo 3 (ver 3.3). Da comparação ressalta uma adequação à prática do critério *CSAF/CREF* muito maior para os

[1] - Parece útil fazer notar aqui que as observações em obras com revestimentos executados com estas argamassas, ao longo de vários anos de trabalho da autora nesta área, indiciam um bom comportamento à fendilhação das argamassas PR, M1, CA e argamassas armadas com rede de fibra de vidro com malha 8 x 8 (portanto, em princípio semelhantes a R1) e mesmo com malha 5 x 5 (semelhante a R2) . A experiência é pouca no que se refere às argamassas CH, R3, FV e FPP. Em revestimentos realizados com argamassas tradicionais do tipo de P, Pa, Pac ou P3 sem armadura e, por vezes, com os monocamada M2, M3 e M4 têm-se observado alguns problemas de fendilhação. Estas observações não têm validade estatística e constituem, portanto, uma indicação de carácter pouco objectivo.

tipos de argamassas estudadas, que, além disso, permite distinguir entre si muito melhor as argamassas com diferentes comportamentos à fendilhação.

Quadro 8.7 - Classificação *CSAF/CREF*

CLASSE	1° critério - CSAF	2° critério - CREF (mm)
1 (Fraca susceptibilidade à fendilhação) *	CSAF ≥ 1	CREF ≥ 1
2 (Média susceptibilidade à fendilhação) *	CSAF ≥ 1	0,6 ≤ CREF < 1
3 (Forte susceptibilidade à fendilhação) **	CSAF < 1	CREF < 0,6

* Tem que verificar as duas condições para pertencer à classe.
** Basta verificar uma das condições para pertencer à classe.

Quadro 8.8 - Classificação das argamassas estudadas segundo os critérios CSAF/CREF e ε_r-E-E/Rt

ARGAMASSA	CLASSIFICAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À FENDILHAÇÃO SEGUNDO O CRITÉRIO **CSAF/CREF**	CLASSIFICAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À FENDILHAÇÃO SEGUNDO O CRITÉRIO **ε_r-E-E/Rt**
P	Forte	Forte
FV	Fraca	Forte
FPP	Forte	Forte
R1	Fraca	Forte
R2	Fraca	Forte
R3	Fraca	Forte
M1	Fraca	Média
M2	Média	Forte
M3	Fraca	Forte
M4	Forte	Forte
PR	Fraca	Fraca
CA	Fraca	Forte
CH	Média	Forte
Pa	Média	Forte
Pac	Média	Forte
P3	Forte	Forte

Os ensaios de laboratório realizados permitiram, de algum modo, avaliar a influência de vários factores na susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida de argamassas de reboco.

a) Comparação das argamassas tradicionais com os revestimentos não-tradicionais monocamada e de ligante misto

No ambiente 1, os revestimentos monocamada, (com excepção de M4) e o revestimento de ligante misto ensaiados, quando aplicados sobre suporte não-absorvente, mostraram, de um modo geral, melhores coeficientes *CSAF* e *CREF* que a argamassa padrão, parecendo assim provável que apresentem uma menor susceptibilidade à fendilhação.

Nas outras condições testadas, o monocamada M1 (único ensaiado) apresentou, pelo contrário, piores coeficientes *CSAF* e *CREF*. Este facto deve estar relacionado com a maior retenção de água do produto e, portanto, com a menor sensibilidade aos ambientes secos. Mesmo assim, esta inversão é um pouco surpreendente. Uma explicação possível para essa diferença de comportamento tão acentuada é sempre a hipótese de o produto, de tecnologia original francesa, ter sido optimizado para a análise experimental que, em França tal como em Portugal, tem sido baseada em ensaios realizados sobre provetes condicionados num ambiente de 23° C / 50% HR. Esta atitude - que não implicaria, naturalmente, má-fé do fabricante - pode gerar vícios a que as Instituições que têm a seu cargo a avaliação de qualidade têm que estar atentos, tornando-se necessário aferir frequentemente os resultados dos ensaios de laboratório através das observações em obra e adaptar os métodos de ensaio às condições reais. No entanto, a verdade é que as observações em obra deste produto aplicado parecem indicar um bom comportamento à fendilhação, pelo que se admite a hipótese de um lote defeituoso nos ensaios realizados no ambiente 2 e com suporte absorvente, ou de a exagerada manipulação realizada nos ensaios nessas condições serem, em parte, responsáveis pela fendilhação dos provetes. Além disso, convém não esquecer que a aderência ao suporte é também um ponto forte da argamassa M1, e que esse factor não é considerado nesta análise, sendo, portanto, possível que o comportamento real seja melhor que o sugerido por estes resultados. Para esclarecer esta discrepância considera-se necessário realizar nova campanha de ensaios com esta argamassa, a fim de despistar qualquer problema com os últimos sacos utilizados e com a manipulação dos provetes.

b) Influência das fibras e redes

A utilização de armaduras com fibras dispersas e redes parece melhorar significativamente os coeficientes *CSAF* e *CREF* das argamassas de cimento de matriz tradicional, em todas as condições testadas. Esta melhoria é particularmente sensível no caso de armaduras com redes de fibra de vidro, em que a fendilhação múltipla desempenha um papel importante. A armadura com fibra de vidro dispersa também mostra alguma eficiência.

c) Influência do tipo de ligante

De um modo geral, a argamassa com cal aérea apresenta melhores coeficientes *CSAF* e *CREF*, enquanto a cal hidráulica não parece melhorar o comportamento à fendilhação. Nas condições mais húmidas, no entanto, o comportamento da argamassa CA apresenta menos vantagens, o que pode dever-se ao insuficiente endurecimento desta argamassa durante os curtos períodos de tempo considerados, em condições mais desfavoráveis ao prosseguimento da carbonatação.

d) Influência do teor de cimento

O aumento do teor de cimento do traço 1:4 para o traço 1:3 não deu origem a variações sensíveis em nenhum dos critérios de fendilhação, pelo menos no ambiente 1 e na idade considerada (7 dias).

e) Influência do teor de água

O aumento do teor de água parece não influenciar muito os coeficientes *CSAF* e $CREF_r$ no ambiente 1. Quando aplicada sobre suporte absorvente e sujeita a humedecimento periódico, a argamassas Pa parece não atingir resistências tão elevadas como a P, resultando menores coeficientes *CSAF*, talvez porque a maior quantidade de água não permite um *aperto* inicial tão forte dos poros.

f) Influência do tipo de areia

A utilização de areia com maior teor de argila não parece, de acordo com os ensaios realizados, afectar significativamente nem o coeficiente *CSAF* nem o *CREF* da argamassa. Aparentemente, a maior relaxação compensa as forças mais elevadas geradas pela retracção.

g) Influência das condições de cura e da absorção do suporte

O ambiente 2, em que se mantém grande humidade durante os primeiros dias e depois há uma transferência para um ambiente seco, origina uma rápida subida das forças nessa transição, dando origem à fendilhação de provetes das argamassas mais fracas. Assim, de um modo geral, e ao contrário do que poderia parecer, os coeficientes *CSAF* obtidos no ambiente 2 são inferiores aos obtidos no ambiente 1. Por outro lado, embora a energia de rotura das argamassas seja, em geral, superior no ambiente 2 - o que pode dever-se apenas a uma microfendilhação interna das argamassas que origine uma pseudo-ductilidade - o coeficiente *CREF* é, na maioria dos casos, inferior ao do ambiente 1.

A aplicação sobre suporte absorvente parece exercer um efeito benéfico sobre as argamassas de matriz tradicional, verificando-se, de um modo geral, um aumento do coeficiente *CSAF*, essencialmente devido a significativos aumentos da resistência à tracção e um aumento da ductilidade, visível principalmente no incremento do coeficiente *CREF* , mas também das energias de rotura e das deformações na rotura.

Pelo contrário, a argamassa do tipo monocamada, M1, vê as forças instaladas muito aumentadas, resultando uma redução do coeficiente *CSAF* e vários provetes fendilhados, e, em paralelo, parece sofrer uma redução muito significativa da ductilidade.

Os ensaios sobre suporte absorvente indicam que, de um modo geral, a melhoria dos coeficientes *CSAF* é mais sensível com o humedecimento do suporte e ainda mais pronunciada com as molhagens periódicas do revestimento. Também a ductilidade aumenta de forma paralela, ou seja, de um modo geral o humedecimento periódico aumenta o coeficiente *CREF*.

O método de cura por protecção com plástico parece ser menos eficiente, no que diz respeito à susceptibilidade à fendilhação, que o humedecimento periódico prolongado por alguns dias.

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 8

[8.1] - JOISEL, A. - **Fisuras e grietas en morteros y hormigones. Sus causas y remedios.** Barcelona, Editores técnicos asociados, S. A.. 1965.

[8.2] - PIGGOTT, M., R. - **Loadbearing fibre composites.** International Pergamon Library. Toronto, 1980.

[8.3] - TAYLOR, G. D. - **Construction Materials.** Longman Scientific & Technical. London, 1991.

[8.4] - SOUSA COUTINHO, A. S.; GONÇALVES, A. - **Fabrico e propriedades do betão.** Vol. III. Lisboa, LNEC, Maio de 1994.

[8.5] - TAMIN, P. F. - **Étude du comportement mécanique des revêtements de façade. Enduits.** Thèse de doctorat. Paris, École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), décembre 1986.

CAPÍTULO 9

ENSAIOS COMPLEMENTARES

9.1 - Ensaios na Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes do LNEC (EENRevPa)

9.2 - Observações ao Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV)

Bibliografia do Capítulo 9

9.1 - ENSAIOS NA ESTAÇÃO DE ENSAIO NATURAL DE REVESTIMENTOS DE PAREDES DO LNEC (EENRevPa)

9.1.1 - Aplicações

Foram executadas aplicações de rebocos constituídos pelas argamassas P, FV, FPP, R1, R2 e CA em muretes de alvenaria de tijolo, com dimensões da ordem de 2 m x 2 m, executados para o efeito na Estação de Ensaio Natural de Revestimentos de Paredes do LNEC (EENRevPa). Usaram-se quatro muretes, que foram divididos ao meio, sendo uma das metades - abrangendo as faces Norte e Sul - revestida no Verão (Julho de 1995), com tempo quente e seco, e a outra revestida no Inverno (Fevereiro de 1996), com tempo frio e húmido (ver figs. 9.1 e 9.2).

As aplicações foram realizadas sempre pela mesma equipa, constituída por duas pessoas com formação na área de construção civil. Os revestimentos foram executados numa única camada além do salpico - embora não seja esta a prática recomendada, considerou-se que este procedimento permitia perceber melhor as características de cada uma das composições -, geralmente (sempre que necessário) em duas demãos. O tempo de secagem do salpico, os traços das argamassas e os acabamentos foram pré-definidos. A quantidade de água de amassadura e os tempos entre demãos foram deixados ao critério dos aplicadores.

Controlaram-se a quantidade de água de amassadura, a consistência, e os tempos de execução e de secagem das demãos e observaram-se a trabalhabilidade, rendimento e aderência inicial.

Foram introduzidas sondas junto ao suporte para os ensaios de medição dos tempos de molhagem e de secagem em exposição natural (ver fig. 9.3).

De cada uma das argamassas aplicadas, foi retirada pasta à saída da betoneira, para a execução de provetes prismáticos sobre os quais foram realizados ensaios de resistência à flexão e à compressão, depois de cura na própria EENRevPa (ver fig. 9.4). Os resultados desses ensaios incluíram-se na caracterização das argamassas e estão sintetizados no quadro 7.6 (ver capítulo 7).

Durante as 2 primeiras semanas das aplicações de Verão, o termo-higrógrafo mantido na EENRevPa, junto aos muretes com as aplicações, registou humidades que oscilavam diariamente entre cerca de 80 e 20% de HR e temperaturas entre 20 e 40°C. Nas duas

semanas seguintes, o tempo manteve-se seco e quente, mas com oscilações de menor amplitude, variando entre 35 e 80% de HR e 20 e 30°C de temperatura.

Os registos de temperatura e humidade realizados na altura das aplicações de Inverno, mostram, na 1ª semana, humidades relativas variando entre 50 e 85% de HR e temperaturas entre 7 e 15°C. Nas três semanas seguintes a temperatura manteve-se, em regra, no intervalo referido, mas a humidade relativa atingiu valores mais baixos durante as horas quentes do dia, oscilando entre 30 e 85%.

As fichas das aplicações realizadas incluem-se no Anexo III.

Verificou-se que as argamassas aplicadas no Verão levaram mais água de amassadura e ficaram com consistência muito mais fluida que as preparadas no laboratório, enquanto no Inverno os teores de água e as consistências escolhidas pelos aplicadores foram da mesma ordem de grandeza das usadas nos ensaios de laboratório. Esse procedimento dos aplicadores é justificável pela maior taxa de evaporação e maior taxa de absorção do suporte no Verão, que levam a que seja necessário maior teor de água de amassadura para obter tempo de trabalhabilidade e trabalhabilidade final aproximadamente idênticos.

Nas aplicações realizadas no Inverno de 95/96 - em período mais chuvoso que o habitual no nosso País - verificaram-se algumas dificuldades de aderência, principalmente no caso de P e de R2, sendo necessário aplicar os rebocos em mais demãos menos espessas. Com efeito, o elevado grau de saturação da alvenaria impedia a absorção da aguada do cimento da argamassa, afectando assim o processo normal de aderência.

As aplicações e as observações realizados sobre os revestimentos aplicados mostram que as argamassas com fibras são facilmente aplicáveis em obra. As misturas usadas podem ser amassadas pelos processos normais em obra (ver fig. 9.5) e aplicadas manualmente também pelos métodos correntes. Tanto no Inverno como no Verão, obtiveram-se pastas mais homogéneas, coesas e trabalháveis que com a argamassa padrão, embora se note uma tendência para queda de trabalhabilidade mais rápida que na argamassa padrão. Contudo, segundo os aplicadores, a aplicação e o acabamento final terão apresentado algumas dificuldades, embora rapidamente ultrapassáveis (ver fig. 9.6). Esta opinião poderá estar relacionada com um certo efeito de arrastamento das fibras com a passagem da colher, mas também se deverá, pelo menos em parte, à natural desconfiança que qualquer produto ou processo novo provoca em profissionais treinados com produtos e processos tradicionais.

As argamassas armadas com rede de fibra de vidro também não parecem apresentar grandes dificuldades, principalmente no que se refere à rede RV1, com malha de cerca de 10 mm x 10 mm, embora se traduza, como é natural, num aumento do tempo de aplicação (ver figs. 9.7 e 9.8). A aplicação da rede de malha 4,5 x 4,5 mm é um pouco mais morosa, verificando-se tendência para o descolamento da segunda demão, o que não surpreende, dado que a dimensão da malha, da mesma ordem de grandeza dos grãos mais grossos da areia, não permite uma boa incorporação na argamassa.

A argamassa bastarda CA é muito trabalhável e plástica. A sua aplicação não ofereceu dificuldades.



Fig. 9.1 - Aplicação da argamassa R1 na EENRevPa (Inverno)



Fig. 9.2 - Aplicação da argamassa P na EENRevPa (Verão)



Fig. 9.3 - Colocação das sondas para medições com humidímetro, antes da aplicação da argamassa.



Fig. 9.4 - Provetes em exposição natural na EENRevPa



Fig. 9.5 - Amassadura da argamassa FPP (aplicação de Inverno na EENRevPa).



Fig. 9.6 - Aplicação da argamassa FPP na EENRevPa (Inverno).



Fig. 9.7 - Aplicação da argamassa R1 na EENRevPa - colocação da rede.



Fig. 9.8 - Aplicação da argamassa R1 na EENRevPa - 2ª demão de argamassa.

9.1.2 - Ensaios de exposição natural

Os rebocos aplicados ficaram expostos às condições climáticas naturais desde a sua execução até ao presente, ou seja, cerca de 2 anos no caso das aplicações de Verão e de 1,5 ano no caso das aplicações de Inverno (ver fig. 9.9).

Verificou-se que todos os painéis mantiveram bom aspecto final até ao presente, sem anomalias visíveis, excepto a argamassa padrão de Verão, em que se começou a notar microfendilhação localizada (na face Sul do murete, na zona superior à direita), a partir de Março de 1996. Esta microfendilhação, formando uma malha com cerca de 15 cm de lado, desapareceu de novo no Verão seguinte, provavelmente devido à dilatação resultante do efeito térmico, e não voltou a surgir até Maio de 1997, data da última observação realizada antes da publicação deste trabalho (ver fig. 9.9).

À data em que foram realizados os ensaios de aderência ao suporte e de resistência ao choque, os painéis tinham, respectivamente, cerca de 1 ano e cerca de 5 meses. No caso da argamassa CA repetiram-se os ensaios recentemente - para os painéis de Verão e de Inverno respectivamente com cerca de 1,5 e 1 ano - para despistar a possibilidade de esta argamassa, com endurecimento previsivelmente mais lento, não ter ainda as suas características estabilizadas a um nível idêntico à das argamassas com o cimento como único ligante.

9.1.3 - Ensaios de aderência ao suporte

Nos ensaios de aderência efectuados sobre as argamassas aplicadas nos muretes usou-se uma técnica idêntica à usada nos ensaios sobre provetes de pequenas dimensões, referidos no capítulo 7. Esta técnica é descrita na Ficha de Ensaio do LNEC FE Pa 36, que se inclui no Anexo I.

Foram realizadas pelo menos cinco determinações em cada aplicação, ou seja, em cada meio murete (ver fig. 9.10). Os ensaios foram feitos na face Norte, para não afectarem as observações relativas à fendilhação e as medições da capacidade de impermeabilização, que puderam continuar a fazer-se na face Sul.

Os ensaios mostram uma boa aderência de todas as argamassas. De facto, os resultados mais baixos dão-se por rotura coesiva (no seio do revestimento) e não adesiva (na ligação revestimento-suporte). Os valores obtidos são, em todos os casos, muito superiores aos obtidos nos ensaios de arrancamento efectuados em provetes pequenos, no ambiente 1 (ver quadro 7.8, capítulo 7).

Estes ensaios parecem indiciar uma melhoria da resistência ao arrancamento da argamassa P nas condições de Inverno, embora tal se deva essencialmente a uma melhoria da

coesão, explicável, provavelmente, por uma hidratação mais completa. Pelo contrário, a argamassa CA parece mostrar menor coesão nas condições de Inverno, talvez devido ao menor grau de carbonatação, que afecta também a sua resistência ao arrancamento. Com efeito, a repetição dos ensaio a 1 ano de idade parece indiciar uma melhoria da aderência, facto que é coerente com a hipótese sugerida.

A argamassa FV parece ser a que apresenta melhor resistência ao arrancamento, quer por aderência quer por coesão, tal como já se tinha verificado nos ensaios realizados no ambiente 1 (ver quadro 7.8, capítulo 7).

A menor coesão da argamassa $R2^{i}$ em relação à $R1^{v}$, apesar das condições de Inverno deverem, em princípio, garantir melhor hidratação, pode reflectir uma deficiente ligação entre as demãos que incorporam a rede, devido à malha demasiado estreita em relação ao diâmetro dos inertes.

Os resultados dos ensaios de aderência sintetizam-se no quadro 9.1.



Fig. 9.9 - Aspecto final do murete com as argamassas FPP (Inverno, lado esquerdo) e FV (Verão, lado direito).



Fig. 9.10 - Ensaio de aderência num murete da EENRevPa.

Quadro 9.1 - Aderência ao suporte das argamassas aplicadas em muretes

ARGAMASSA	APLICAÇÃO	TENSÃO DE ARRANCAMENTO (MPa)		TIPOLOGIA DE ROTURA
		Resultados individuais	Médias	
P^v	VERÃO	0,36-0,57-0,45-0,34-0,48-0,63-0,44	0,5	Rotura coesiva (c)
	INVERNO	0,86-0,87-0,63-0,59	0,8	Rotura adesiva (a)
		0,86-0,77		Rotura mista (c+a)
		0,88		Rotura do suporte
$R1^v$	VERÃO	0,69	0,8	Rotura do suporte
		0,78		Rotura do suporte e adesiva
		0,31-1,12-0,88-0,97-1,01		Rotura adesiva
$R2^i$	INVERNO	0,65-0,44-0,74-0,31-0,38	0,5	Rotura adesiva
		0,52-0,60		Rotura coesiva
FV^v	VERÃO	1,18-0,64-0,99	1,0	Rotura adesiva
		1,13		Rotura mista (c+a)
		1,22-0,89		Rotura coesiva
FPP^i	INVERNO	0,45-0,49-0,43-0,63-0,57	0,5	Rotura coesiva
		0,46		Rotura mista (c+a)
		0,24		Rotura adesiva
CA^v	VERÃO	0,79-0,38-0,43-0,87-0,58-0,36	0,5	Rotura coesiva
		0,31		Rotura mista (c+a)
CA^v	VERÃO (Repetição com 1,5 anos)	0,43-0,51-0,38-0,47-0,34-0,43-0,31	0,4	Rotura coesiva
CA^i	INVERNO	0,22-0,16-0,13-0,09-0,14-0,18	0,2	Rotura coesiva
CA^i	INVERNO (Repetição com 1 ano)	0,22-0,22-0,35-0,22-0,20-0,20-0,35	0,3	Rotura coesiva

9.1.4 - Ensaios de choque de esfera e de punçoamento dinâmico

Os ensaios de choque de esfera de 3 J foram realizados de acordo com a técnica descrita na Ficha de Ensaio FE Pa 25, que se inclui no Anexo I. Os de 10 J foram efectuados com base na mesma técnica de ensaio, mas usando uma esfera com cerca de 1 kg de peso e cerca de 1 m de braço, dispositivo este construído para o efeito nas oficinas do LNEC (ver fig. 9.11).

Os ensaios de punçoamento dinâmico foram realizados com o aparelho "Perfotest Baronnie", de acordo com a técnica recomendada em Directivas UEAtc [9.1, 9.2]. Este aparelho permite reproduzir choques perfurantes, com punções cilíndricos de extremidade hemisférica, com vários diâmetros. O ensaio é tanto mais severo quanto menor for o diâmetro do punção utilizado.

Foram realizadas pelo menos cinco determinações em cada painel, ou seja, em cada meio murete. Os ensaios foram feitos na face Norte, pela mesma razão exposta para os ensaios de aderência.

Os resultados dos ensaios de choque de esfera e de punçoamento dinâmico sintetizam-se no quadro 9.2.



Fig. 9.11 - Ensaio de choque de corpo duro não cortante (10 J) num murete da EENRevPa.

Os resultados obtidos indiciam um bom comportamento de todas as argamassas ao choque de corpo duro e ao punçoamento, mas puseram em evidência a maior deformabilidade da argamassa CA em relação a todas as outras.

Quadro 9.2 - Choque de esfera e punçoamento dinâmico

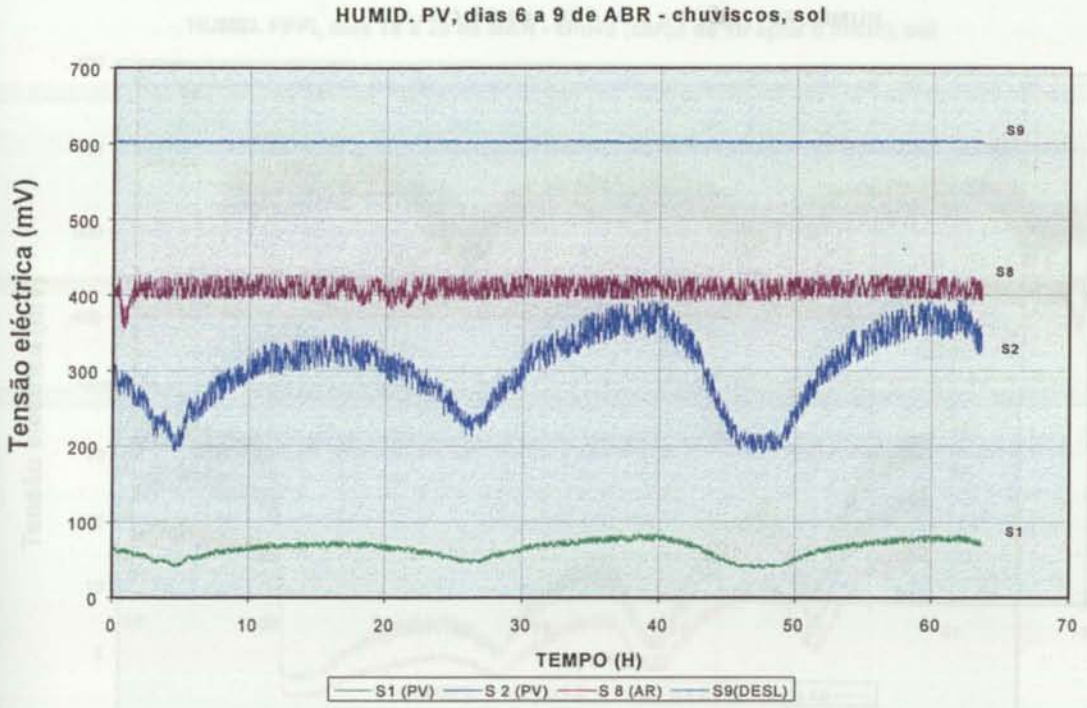
ARGAMASSA	APLICAÇÃO	CHOQUE DE ESFERA				PUNÇOAMENTO DINÂMICO diâmetro do punção (mm)					
		3 J		10 J		6	8	10	12	15	20
		ϕ da marca (mm)	profundidade (mm)	ϕda mossa (mm)	profundidade (mm)	profundidade (mm)	profundidade (mm)	profundidade (mm)			
P	VERÃO	8	0,2	14	0,3	0,7	0,6	0,3	Marca ligeira	Sem marca	
	INVERNO	7	0,3	14	0,5	0,4	Marca acentuada	Marca ligeira	Sem marca		
R1[v]	VERÃO	10	0,3	13	0,6	0,6	Marca acentuada	Marca ligeira		Sem marca	
R2[i]	INVERNO	8	0,3	17	0,9	0,5					
FV[v]	VERÃO	8	0,3	15	0,8	1,0	Marca acentuada	Marca ligeira		Marca ligeira	Sem marca
FPP[i]	INVERNO	8	0,3	15	0,5	0,7				Sem marca	
CA	VERÃO	9	0,6	19	1,0	1,4	0,7	0,6	Marca acentuada	Marca ligeira	Sem marca
	VERÃO (repetição com 1,5 anos)	11	0,7	18	1,2	1,5	0,9	0,6	0,4	Marca acentua-da	Sem marca
	INVERNO	8	0,8	20	1,2	1,0	0,7	0,5	Marca acentuada	Marca ligeira	Sem marca
	INVERNO (repetição com 1 ano)	9	0,5	17	0,8	0,9	0,5	0,4			

9.1.5 - Ensaios de avaliação da capacidade de impermeabilização

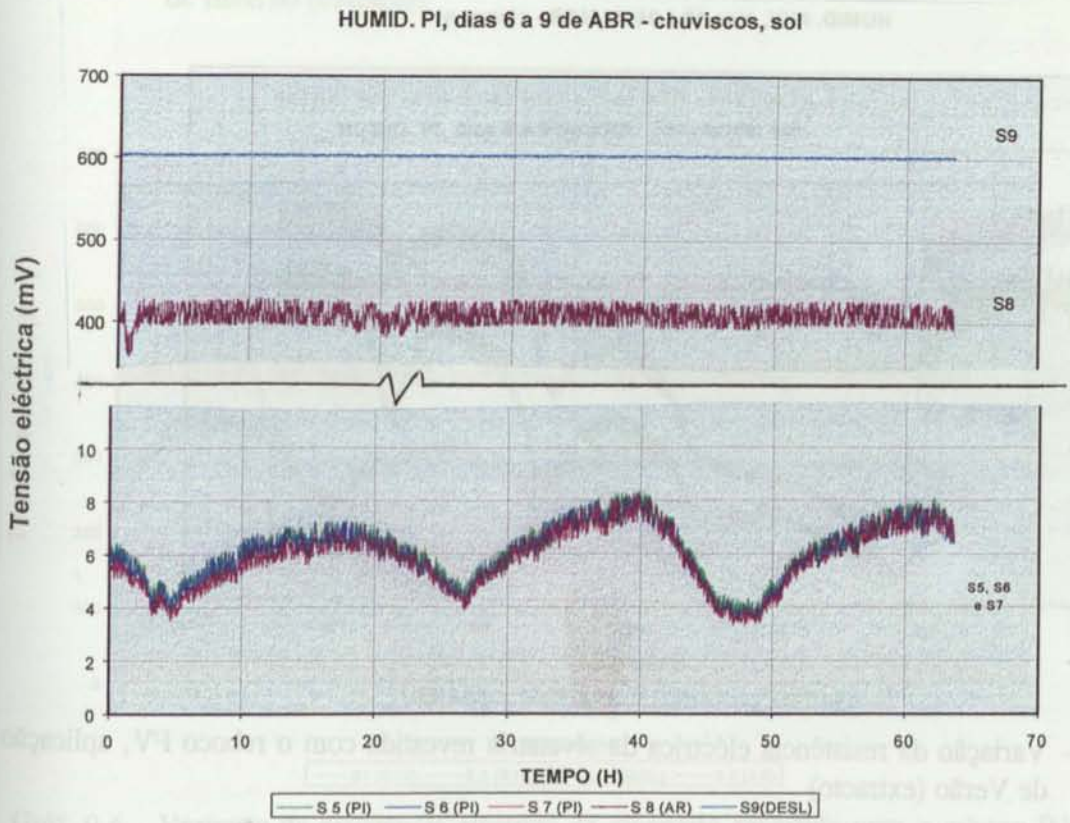
A avaliação da capacidade de impermeabilização foi realizada através da medição e registo das resistências eléctricas dos revestimentos junto ao suporte, em exposição natural a várias chuvadas, durante os meses de Janeiro a Maio de 1996. As variações detectadas deveriam permitir calcular os tempos de exposição à chuva necessários para que a água atinja o suporte e os tempos de exposição ao sol necessários à secagem. Dado que as chuvadas têm, naturalmente, grande variação de intensidade, pressão e duração, os valores obtidos têm um significado relativo, ou seja, apenas é possível comparar entre si os revestimentos ensaiados em simultâneo. No entanto, crê-se que a continuação destes ensaios poderá permitir tirar conclusões interessantes sobre o comportamento dos revestimentos de ligante mineral no que diz respeito à impermeabilização à água da chuva.

Estas medições foram feitas com um equipamento especialmente concebido para o efeito pelo Eng. João Palma, Investigador do CPCE do LNEC [9.3], previamente testado através de um extenso programa de ensaios descrito num relatório do LNEC [9.4]. Uma comunicação [9.5] e uma Tese de Mestrado recentes [9.6] relatam também trabalho de investigação realizado com este equipamento sobre a capacidade de impermeabilização de revestimentos de paredes.

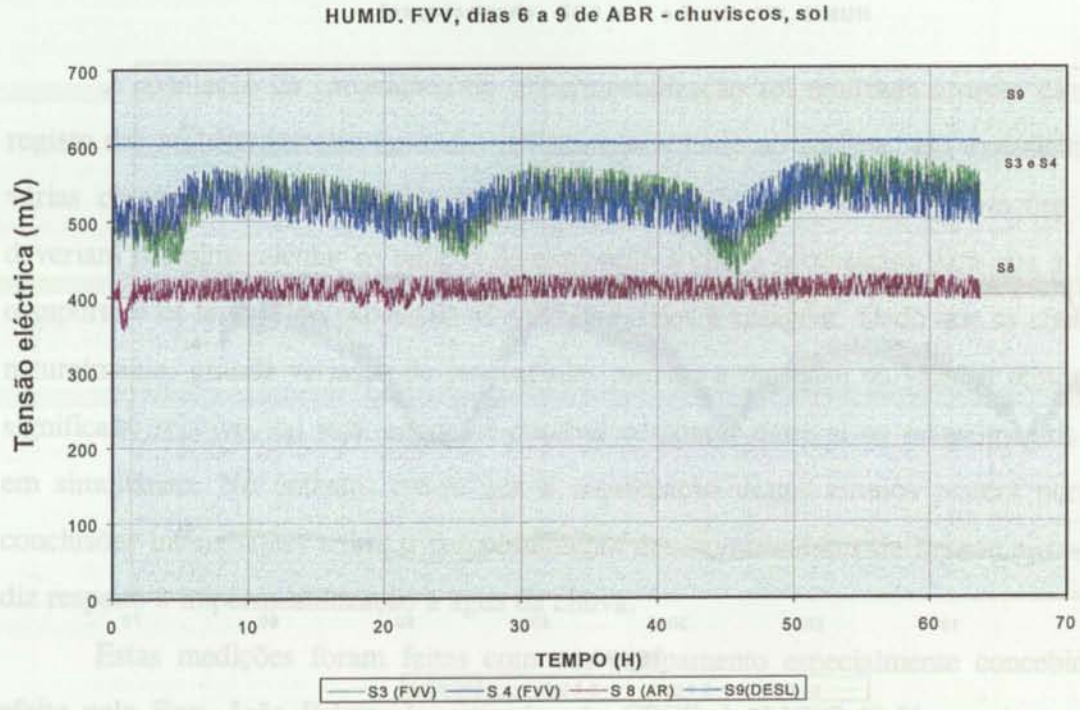
Apresentam-se nos gráficos 9.1 a 9.10 algumas das curvas obtidas, que se consideram relativamente representativas dos resultados destes ensaios. Nessas figuras, as designações S8 (ar) ou S1 (ar) - representam sondas que foram mantidas ao ar, coladas, pelo exterior, aos muretes em medição, com o objectivo de referenciar o início da chuva, já que são molhadas instantaneamente e têm secagem também quase instantânea. Os registos correspondentes a S9 (desligado) ou S6 (desligado), foram obtidos através de canais a que não se ligou nenhuma sonda, funcionando como indicadores do bom funcionamento do aparelho e ainda como referência do limite máximo das resistências que é possível obter neste ensaio (600 mV).



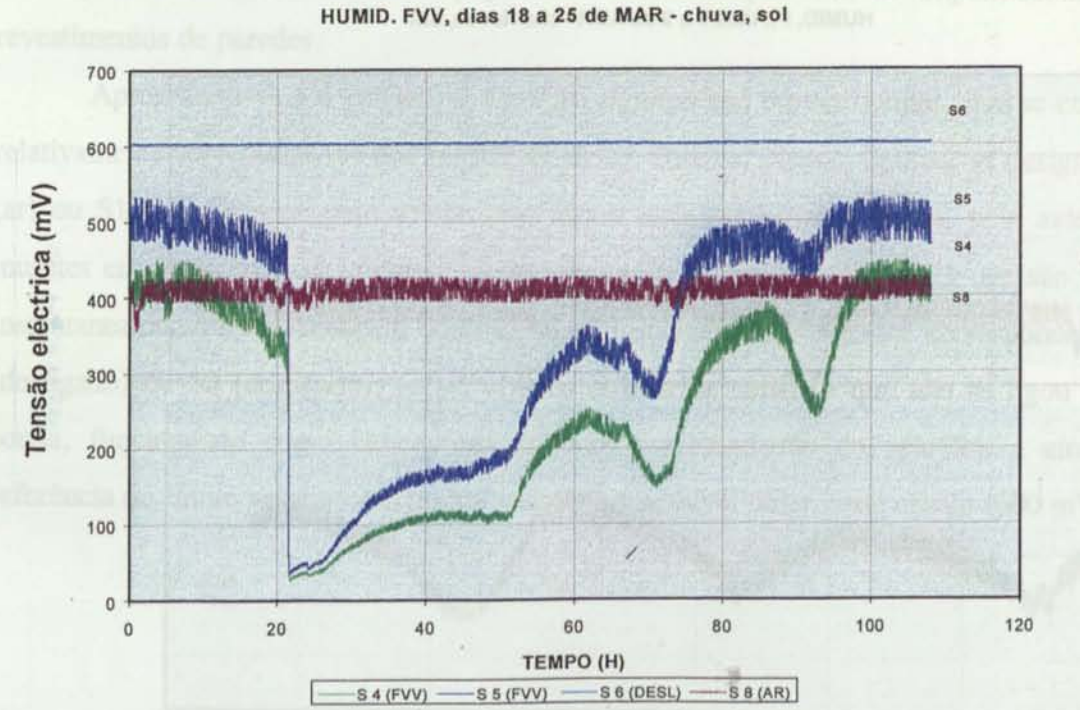
Gráf. 9.1 - Variação da resistência eléctrica da alvenaria revestida com o reboco P, aplicação de Verão (extracto)



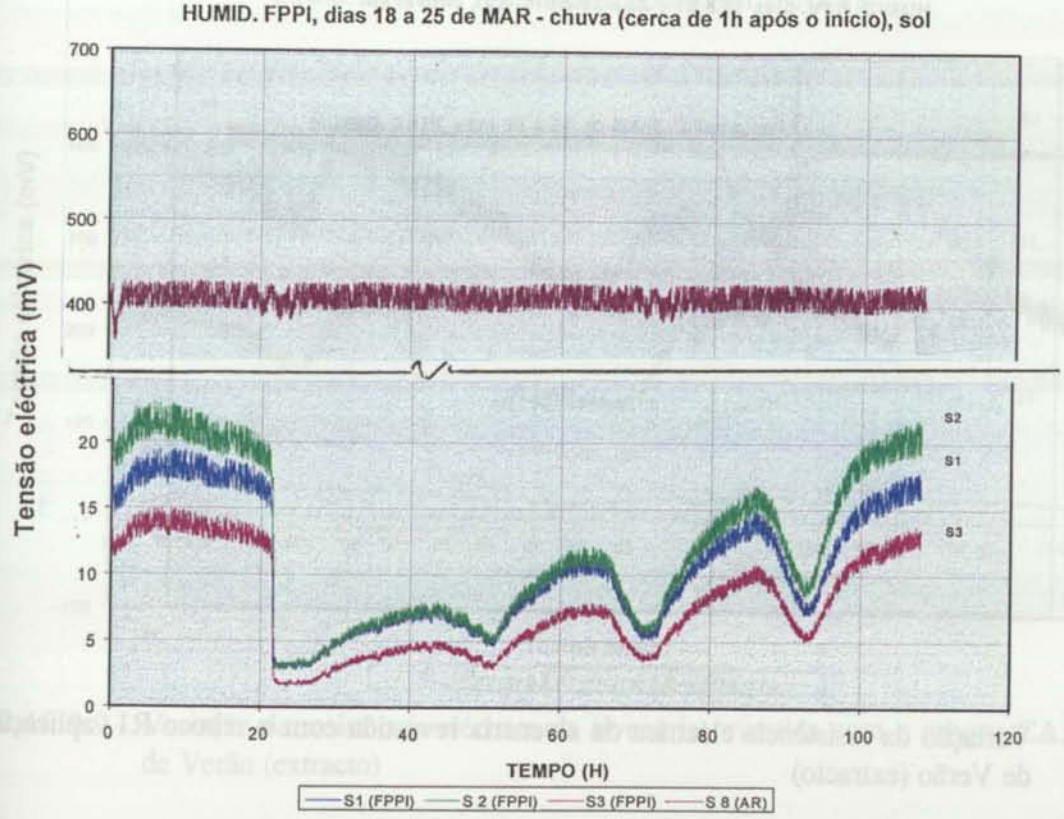
Gráf. 9.2 - Variação da resistência eléctrica da alvenaria revestida com o reboco P, aplicação de Inverno (extracto)



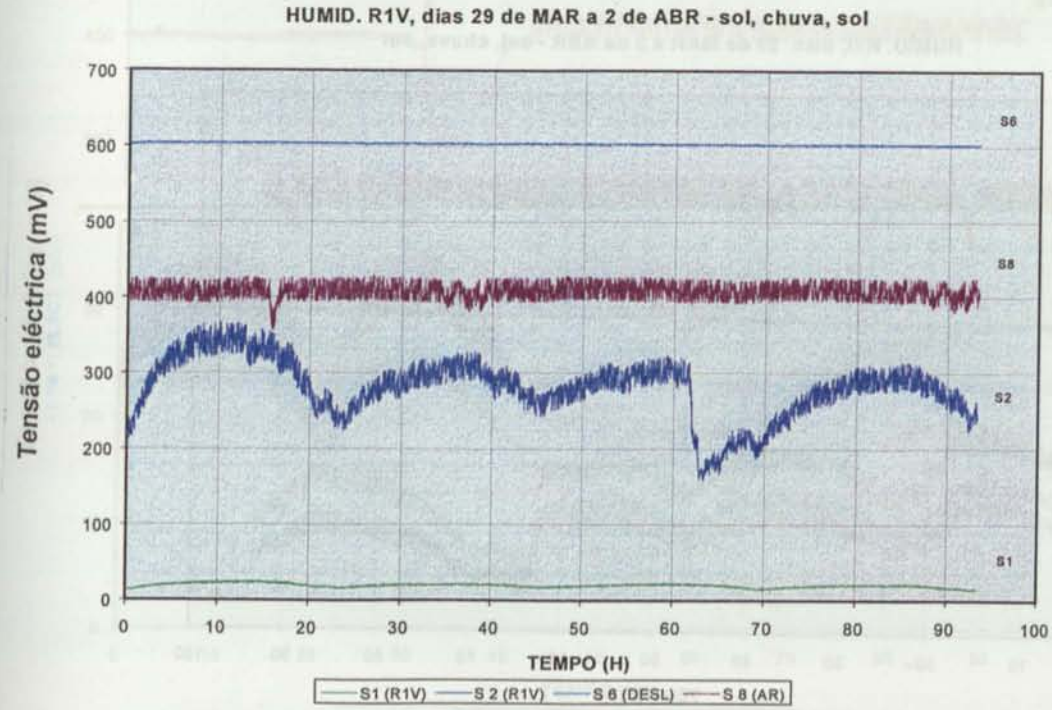
Gráf. 9.3 - Variação da resistência eléctrica da alvenaria revestida com o reboco FV, aplicação de Verão (extracto)



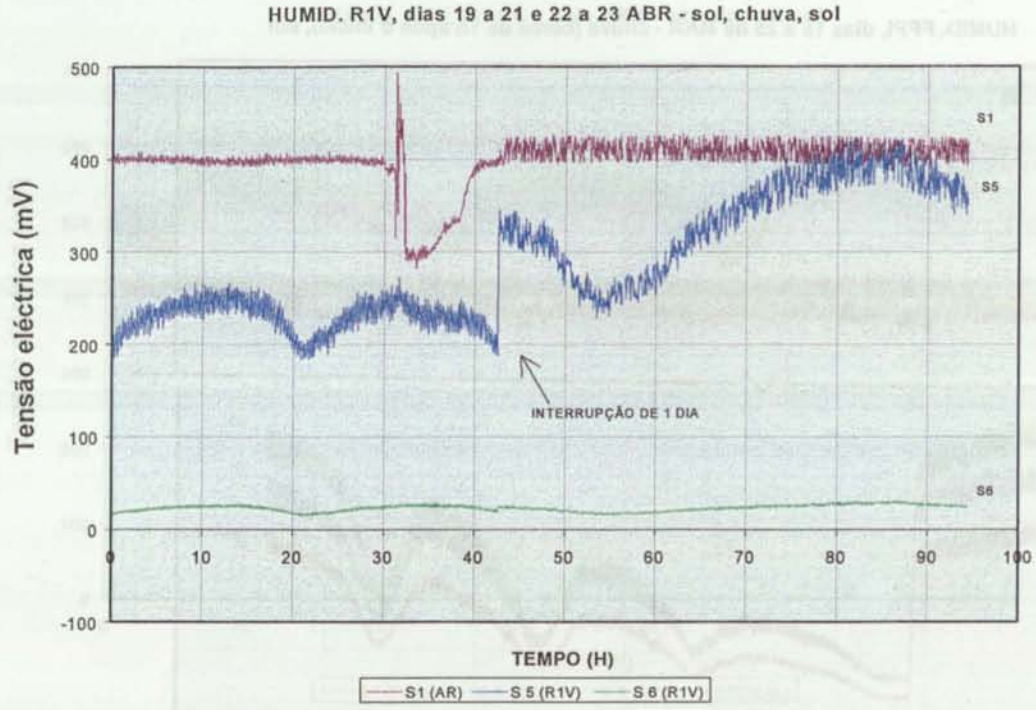
Gráf. 9.4 - Variação da resistência eléctrica da alvenaria revestida com o reboco FV, aplicação de Verão (extracto)



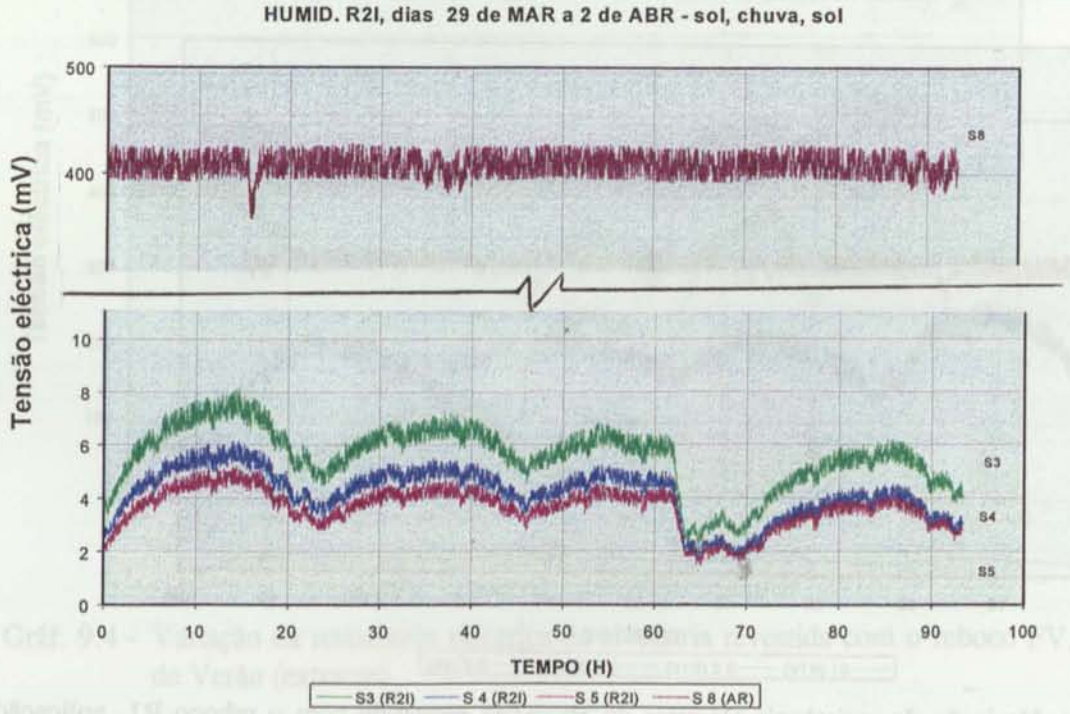
Gráf. 9.5 - Variação da resistência eléctrica da alvenaria revestida com o reboco FPP, aplicação de Inverno (extracto)



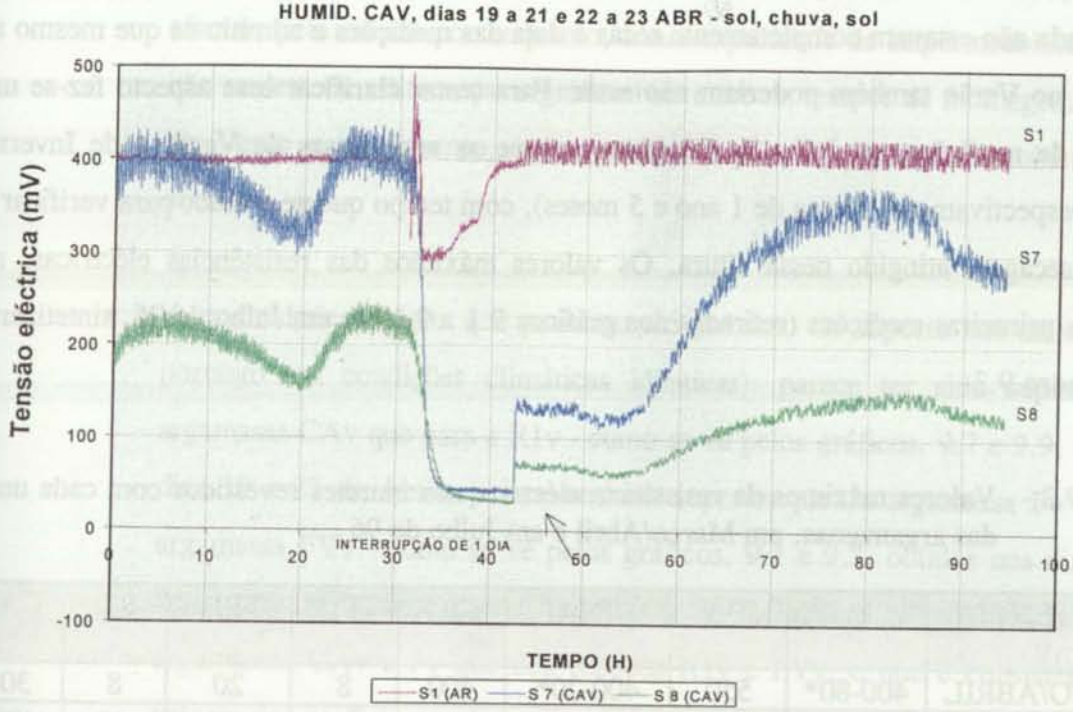
Gráf. 9.6 - Variação da resistência eléctrica da alvenaria revestida com o reboco R1, aplicação de Verão (extracto)



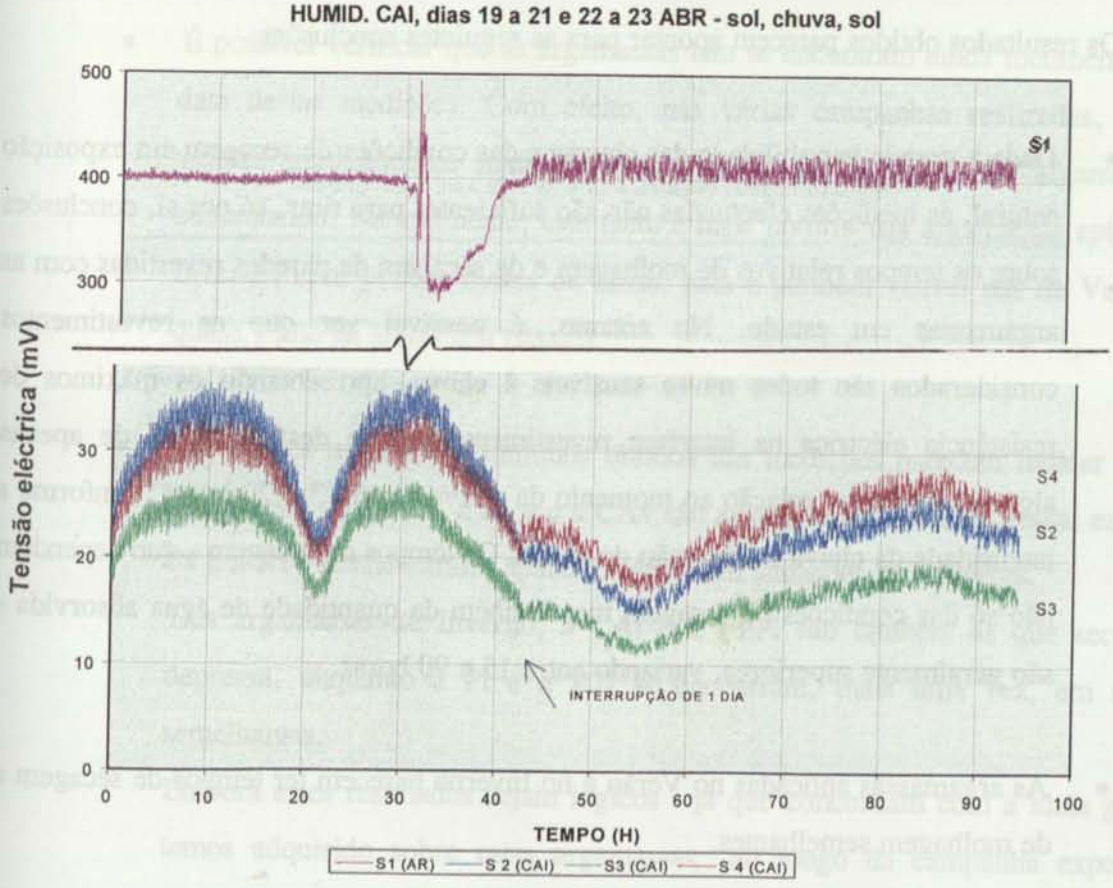
Gráf. 9.7 - Variação da resistência eléctrica da alvenaria revestida com o reboco R1, aplicação de Verão (extracto)



Gráf. 9.8 - Variação da resistência eléctrica da alvenaria revestida com o reboco R2, aplicação de Inverno (extracto)



Gráf. 9.9 - Variação da resistência eléctrica da alvenaria revestida com o reboco CA, aplicação de Verão (extracto)



Gráf. 9.10 - Variação da resistência eléctrica da alvenaria revestida com o reboco CA, aplicação de Inverno (extracto)

Verificou-se que as argamassas aplicadas no Inverno (com cerca de 2 a 3 meses de idade) ainda não estavam completamente secas à data das medições e admitiu-se que mesmo as aplicadas no Verão também poderiam não estar. Para tentar clarificar esse aspecto fez-se um conjunto de medições em Julho de 96 (data em que as argamassas de Verão e de Inverno tinham, respectivamente, cerca de 1 ano e 5 meses), com tempo quente e seco, para verificar o grau de secagem atingido nessa altura. Os valores máximos das resistências eléctricas, na altura das primeiras medições (retiradas dos gráficos 9.1 a 9.10) e em Julho de 96, sintetizam-se no quadro 9.3.

Quadro 9.3 - Valores máximos da resistência eléctrica nos muretes revestidos com cada uma das argamassas, em Março/Abril e em Julho de 96

RESISTÊNCIA (mV)	Pv	FVv	R1v	CAv	Pi	FPPi	R2i	CAi
MARÇO/ABRIL	400-80*	550	400-20*	400	8	20	8	30
JULHO	400	550	500-250*	400	30	400	45	400

* - Sondas com valores marcadamente diferentes

Os resultados obtidos parecem apontar para as seguintes conclusões:

- Dada a grande variabilidade das chuvas e das condições de secagem em exposição natural, as medições efectuadas não são suficientes para tirar, só por si, conclusões sobre os tempos relativos de molhagem e de secagem de paredes revestidas com as argamassas em estudo. No entanto, é possível ver que os revestimentos considerados são todos muito sensíveis à chuva, apresentando os máximos de resistência eléctrica na interface revestimento-suporte desfasamentos de apenas algumas horas em relação ao momento da chuva - entre 3 e 20 horas, conforme a intensidade da chuva e a pressão do vento. Os tempos de secagem - que dependem não só das condições de secagem mas também da quantidade de água absorvida - são geralmente superiores, variando entre 15 e 90 horas.

- As argamassas aplicadas no Verão e no Inverno parecem ter tempos de secagem e de molhagem semelhantes.

- A fendilhação muito fina da argamassa P, na aplicação de Verão, não parece afectar, pelo menos por enquanto, a sua capacidade de impermeabilização, já que não se detectam diferenças significativas entre os tempos de molhagem dos painéis de Verão e de Inverno, que apresentam *picos* praticamente coincidentes, em abcissas.

- A quantidade de água que penetrou até próximo do suporte nos mesmos dias (e portanto em condições climáticas idênticas): parece ter sido superior para a argamassa CAv que para a R1v - como se vê pelos gráficos. 9.7 e 9.9, obtidos nos dias 19 a 23 de Abril; parece ter sido superior para a argamassa Pv que para a argamassa FVv - como se vê pelos gráficos. 9.1 e 9.3, obtidos nos dias 6 a 9 de Abril. Assim, a água parece penetrar mais facilmente através dos rebocos com argamassas CAv e Pv que dos rebocos R1v e FVv, o que é consistente com os valores dos coeficientes de capilaridade obtidos para estas argamassas (ver capítulo 7, quadro 7.8)

- É possível verificar que as argamassas não se encontram ainda totalmente secas à data destas medições. Com efeito, nas várias campanhas realizadas, obtêm-se valores gradualmente mais altos, à medida que a idade das argamassas vai aumentando. Naturalmente, este facto é mais notório nas argamassas aplicadas no Inverno, com poucos meses de idade, mas é também visível nas de Verão, com quase 1 ano na altura dos ensaios.

- Os valores máximos e mínimos obtidos nas medições parecem indicar que, das argamassas de Verão, a FVv e a CAv são as que secam mais depressa, enquanto a Pv e a R1v se encontram, aparentemente, em situações semelhantes.

  Das argamassas de Inverno, a CAi e a FPPi são também as que secam mais depressa, enquanto a Pi e a R2i se encontram, mais uma vez, em situações semelhantes.

  Embora estes resultados sejam lógicos - já que concordam com a ideia geral que temos adquirido sobre estas argamassas ao longo da campanha experimental

realizada - os valores obtidos nos ensaios de permeabilidade ao vapor de água não conduziriam a esta conclusão (ver capítulo 7, quadro 7.8).

9.2 - OBSERVAÇÕES AO MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE VARRIMENTO (MEV)

9.2.1 - Amostras observadas

Foram observadas ao microscópio electrónico de varrimento amostras dos seguintes tipos[1]:

- Extraídas da zona de rotura de provetes das argamassas P, FV e FPP, sujeitos a ensaios de tracção após retracção restringida com três tipos de cura: amostras 0 e 1 - SH+RH; amostras 2 e 3 - SH; amostras 4 e 5 - SA.

- Extraídas de prismas de argamassas FV ensaiados à flexão e compressão, curados no ambiente 2: amostras FV-F/C.

- Extraídas dos revestimentos aplicados nos muretes da EENRevPa, em condições de Inverno e de Verão: amostras PEI - padrão exterior Inverno - e FEI - fibra de polipropileno, exterior, Inverno - e amostras PEV - padrão exterior Verão - e FEV - fibra de vidro exterior Verão.

As amostras extraídas de provetes de laboratório tinham cerca de 4 a 5 meses no momento das observações; as extraídas dos muretes tinham cerca de 8 meses (aplicações de Verão) e de 2 a 3 meses (aplicações de Inverno).

[1] - Nestas observações contou-se com a colaboração de técnicos do Núcleo de Química do Departamento de Materiais de Construção (DMC/NQ) do LNEC que trabalham habitualmente com o MEV: as amostras foram preparadas e as observações permanentemente acompanhadas pela técnica Ana Paula Melo e recorreu-se à ajuda do Bolseiro de Investigação Dr. Santos Silva sempre que surgiram dúvidas na interpretação das imagens.

9.2.2 - Resultados das observações

Das observações realizadas apresentam-se, a seguir, algumas imagens consideradas representativas.

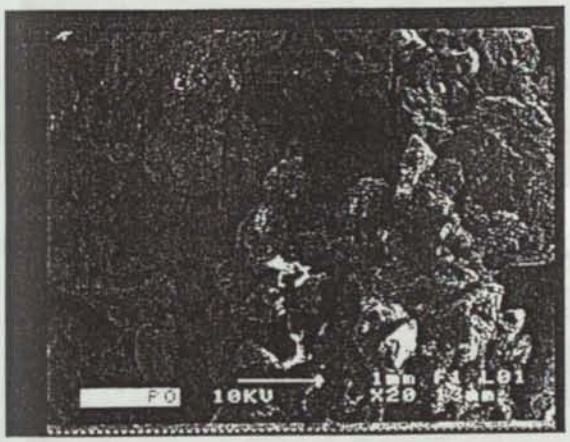


Fig. 9.12 - Aspecto geral de amostra do tipo P0

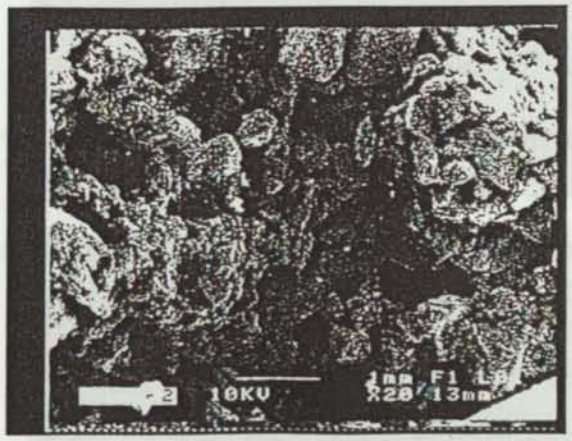


Fig. 9.13 - Aspecto geral de amostra do tipo P1

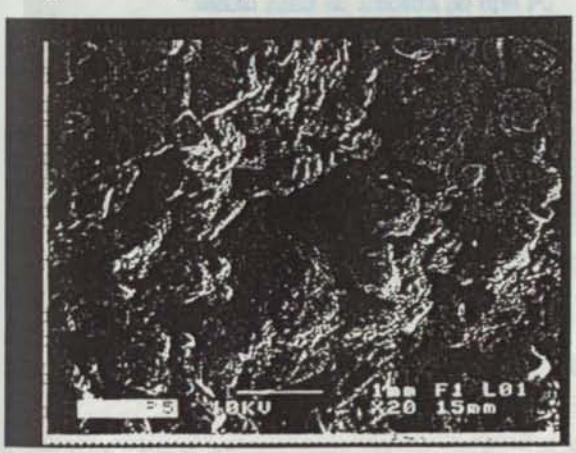


Fig. 9.14 - Aspecto geral de amostra do tipo P3

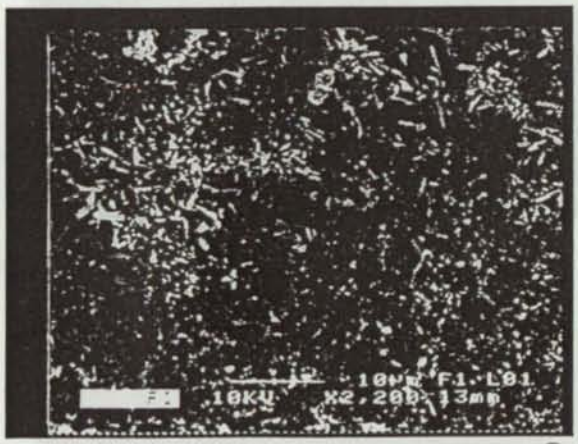


Fig. 9.15 - Cristais de etringite em amostra do tipo P1

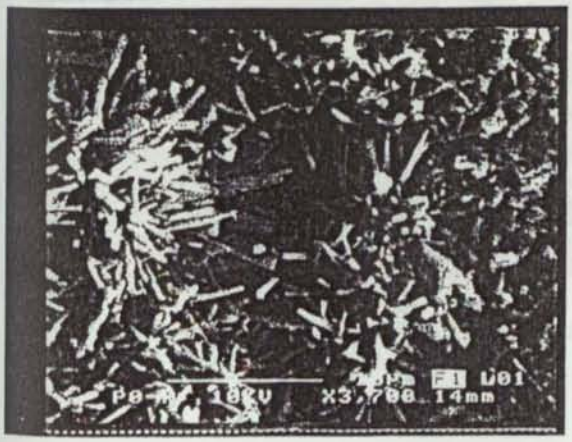


Fig. 9.16 - Cristais de etringite em amostra do tipo P0

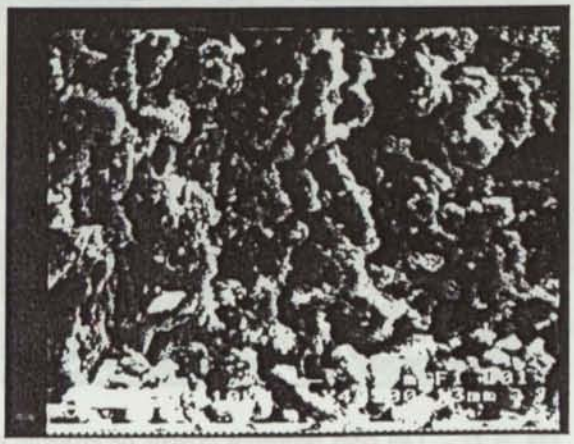


Fig. 9.17 - Gel em amostra do tipo P5

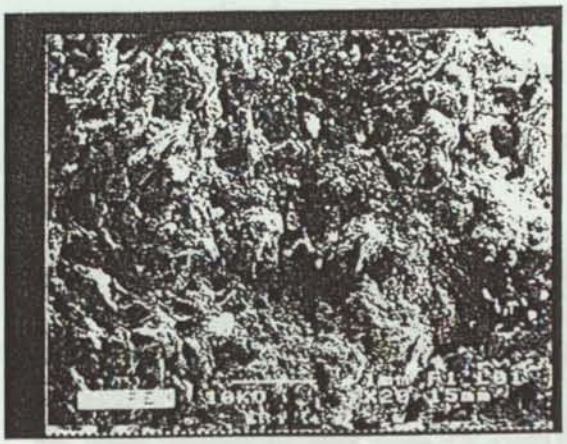


Fig. 9.18 - Aspecto geral de amostra do tipo PEV (murete Verão)

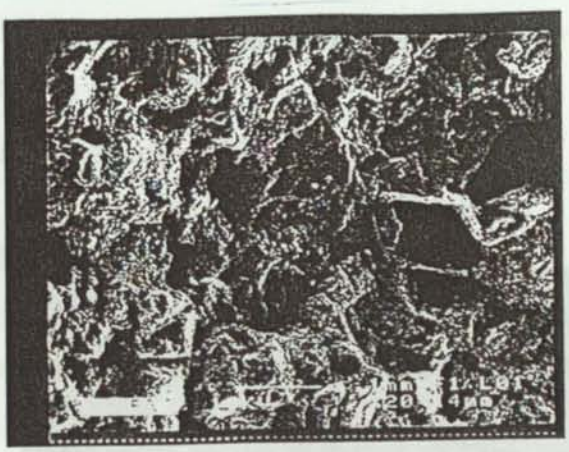


Fig. 9.19 - Aspecto geral de amostra do tipo PEI (murete Inverno)

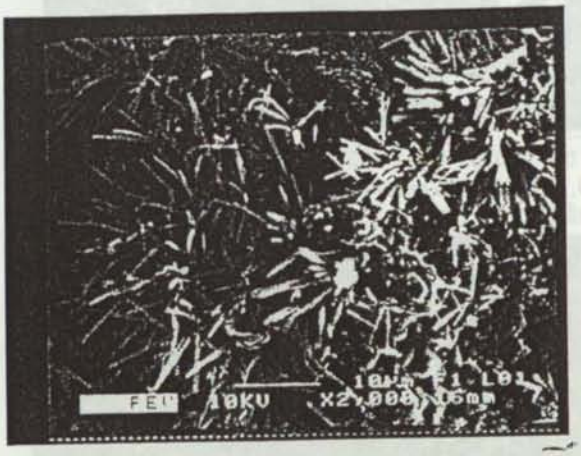


Fig. 9.20 - Cristais de etringite em amostra do tipo PEV (murete, Verão)

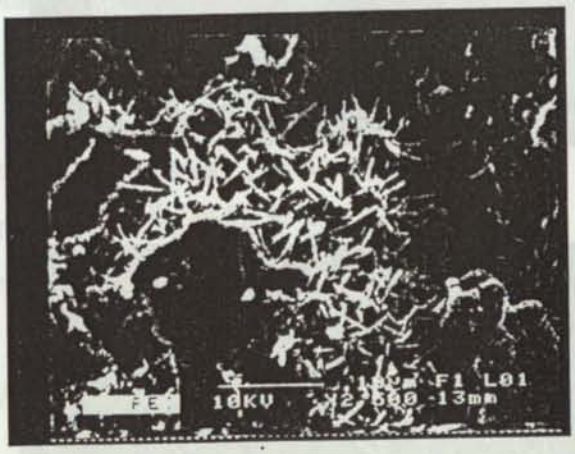


Fig. 9.21 - Cristais de etringite em amostra do tipo PEI (murete Inverno)



Fig. 9.22 - Gel com pequenos cristais de etringite em amostra do tipo PEI (murete Inverno)

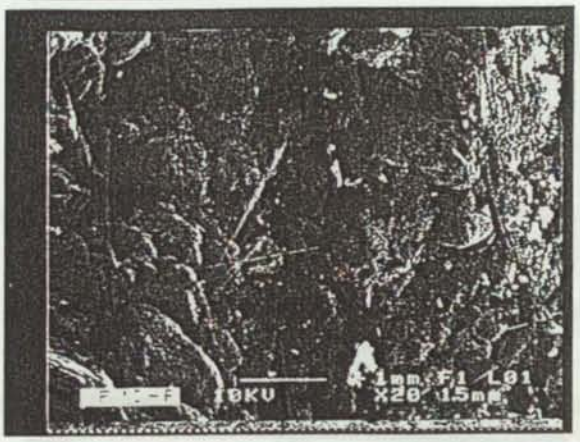


Fig. 9.23 - Aspecto geral de amostra do tipo FV0. Distribuição das fibras

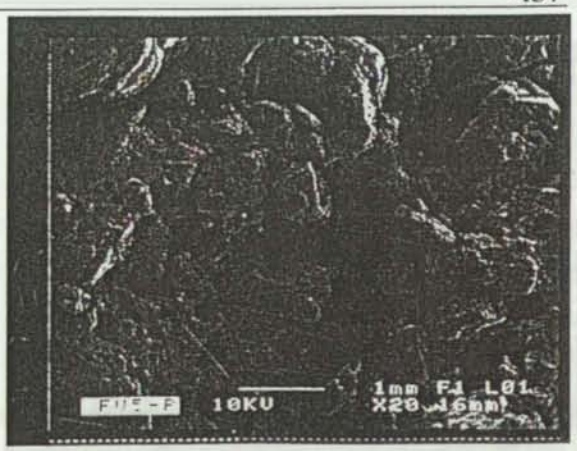


Fig. 9.24 - Aspecto geral de amostra do tipo FV5. Distribuição das fibras

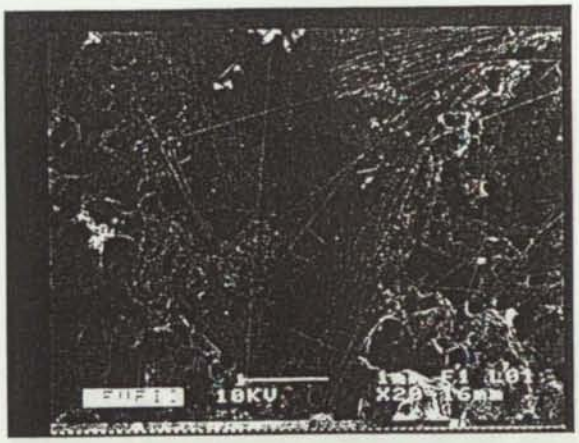


Fig. 9.25 - Aspecto geral de amostra do tipo FV F/C

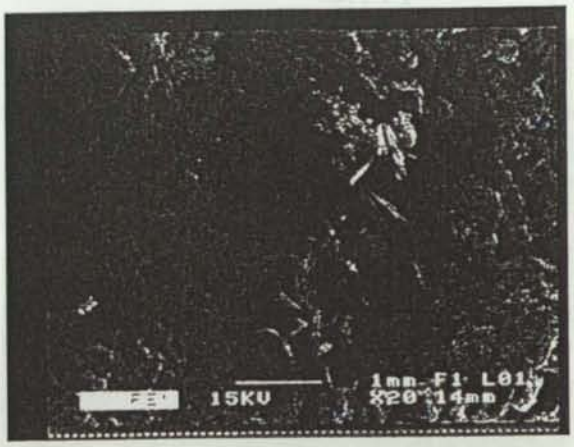


Fig. 9.26 - Aspecto geral de amostra do tipo FEV (murete Verão)

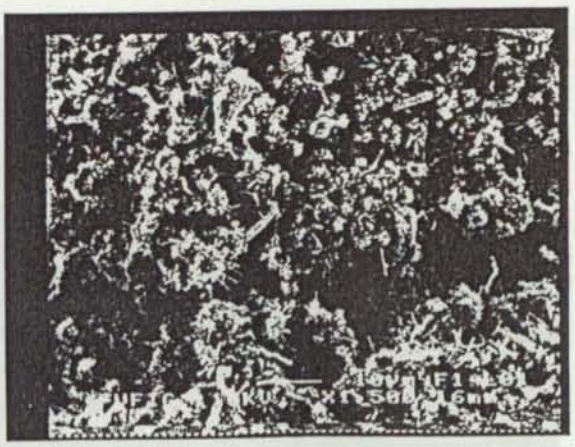


Fig. 9.27 - Cristais de etringite em amostra do tipo FV F/C

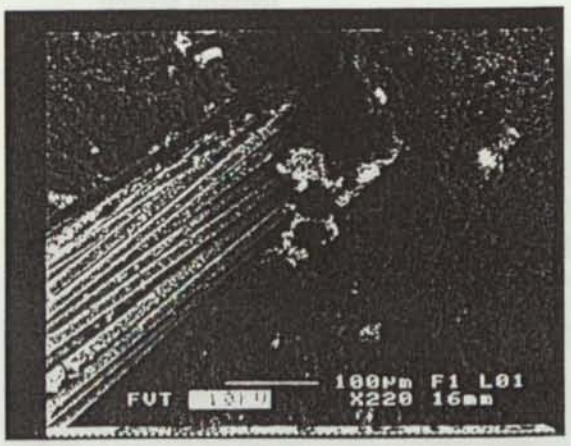


Fig. 9.28 - Feixe de fibras de vidro em amostra do tipo FV3

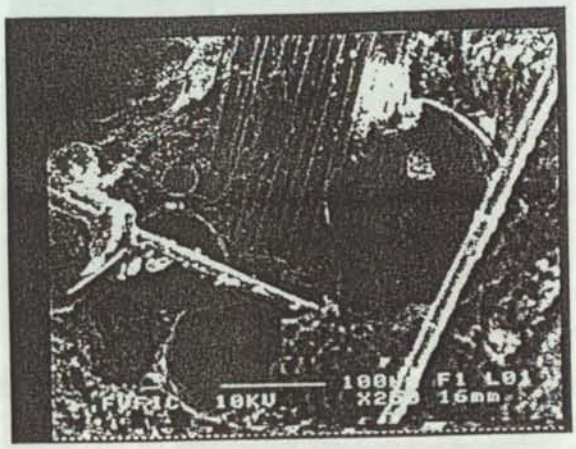


Fig. 9.29 - Feixe de fibras de vidro em amostra do tipo FV F/C.

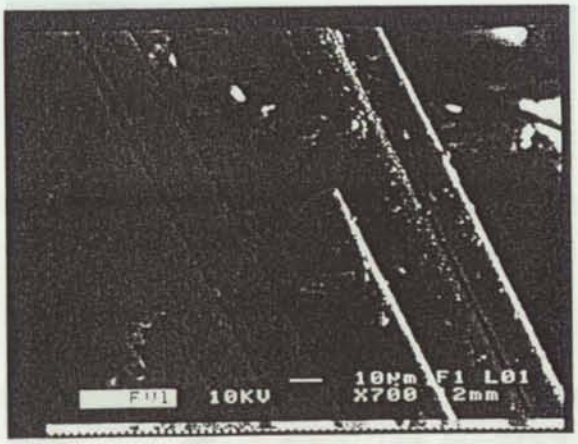


Fig. 9.30 - Pormenor das fibras de vidro em amostra do tipo FV1.

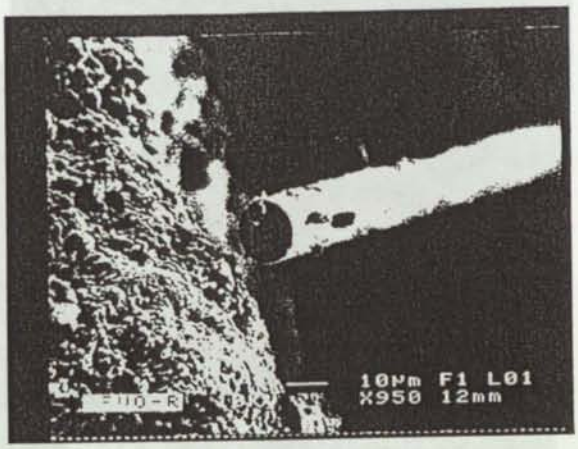


Fig. 9.31 - Pormenor de fibra de vidro em amostra do tipo FV0



Fig. 9.32 - Aspecto geral de amostra do tipo FA0. Distribuição das fibras.

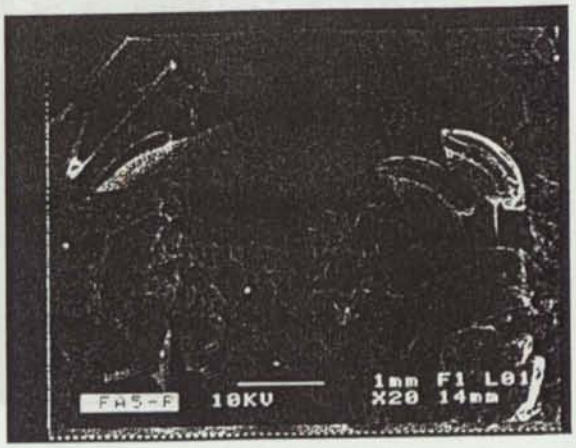


Fig. 9.33 - Aspecto geral de amostra do tipo FA5. Distribuição das fibras.

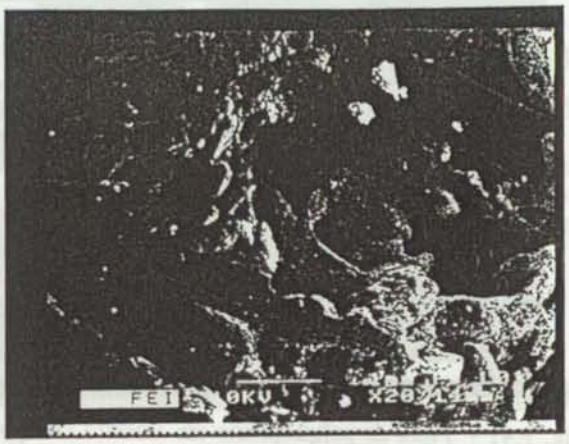


Fig. 9.34 - Aspecto geral de amostra do tipo FEI (murete Inverno).

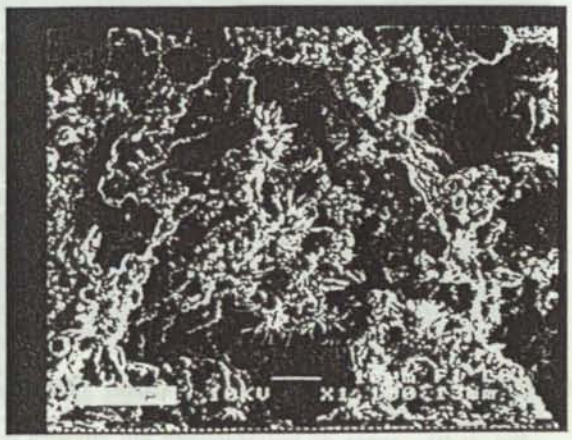


Fig. 9.35 - Cristais de etringite em amostra do tipo FA1.

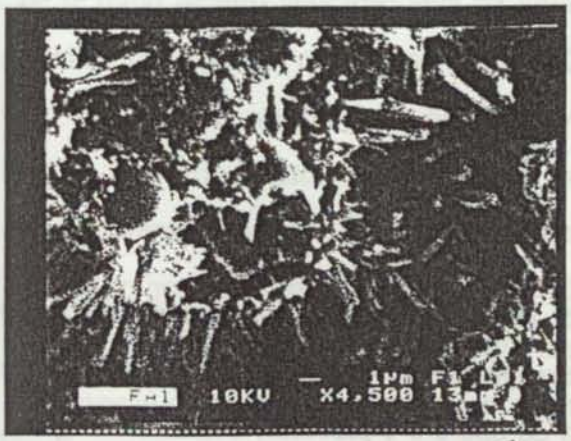


Fig. 9. 36 - Cristais de etringite em amostra do tipo FA1.

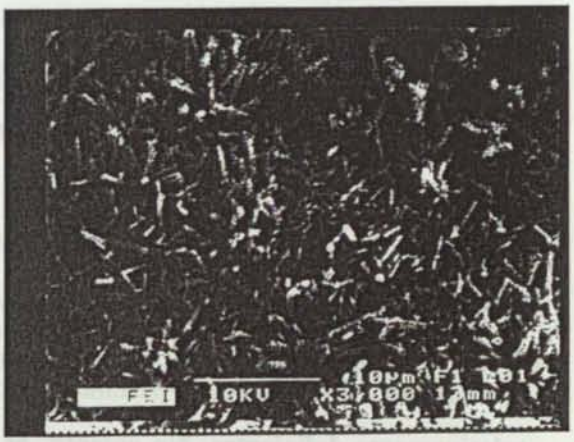


Fig. 9.37 - Cristais de etringite em amostra do tipo FEI (murete Inverno).

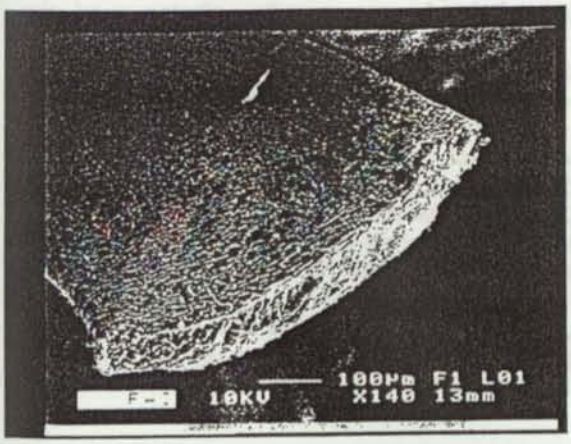


Fig. 9.38 - Fibra de polipropileno em amostra do tipo FA0. Pormenor.

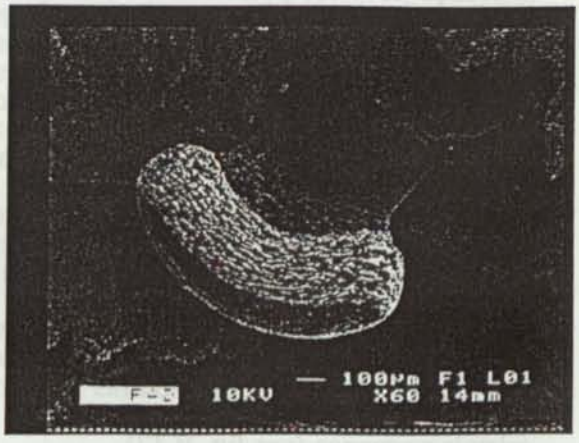


Fig. 9.39 - Fibra de polipropileno em amostra do tipo FA0. Pormenor da extremidade.



Fig. 9.40 - Fibra de polipropileno em amostra do tipo FA3. Pormenor da superfície de rotura.

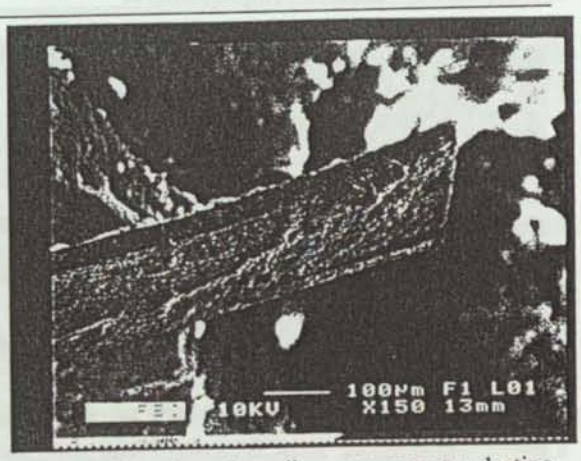


Fig. 9.41 - Fibra de polipropileno em amostra do tipo FEI. Pormenor da extremidade.

9.2.3 - Conclusões das observações

a) Amostras de argamassa padrão (P)

Todas as amostras extraídas de provetes de ensaios de retracção restringida e tracção apresentam um aspecto bastante poroso, heterogéneo e com ligações matriz-inerte relativamente deficientes. No entanto, as amostras do tipo 0 e 1 parecem, de um modo geral, menos porosas e mais homogéneas que as dos tipos 2, 3, 4 e 5 (ver figs. 9.12 a 9.14). Esta diferença deve-se, possivelmente, à melhor hidratação dos provetes 0 e 1, que são sujeitos a molhagens periódicas durante os primeiros dias.

As amostras dos tipos 0 a 5 encontram-se bastante carbonatadas, o que não é de estranhar, já que se trata de provetes com cerca de 4 meses de idade, pouco espessos (20 mm de espessura) e sujeitos a um ambiente que favorece a carbonatação.

Apenas nas amostras dos tipos 0 e 1 se observam zonas com cristais de sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringite) bem desenvolvidos, característicos de uma hidratação completa (ver figs. 915 e 9.16). Nas outras amostras é mais comum ver apenas gel e por vezes alguns cristais pequenos (ver fig. 9.17).

As amostras extraídas dos muretes mostram melhor ligação matriz-inertes e mais zonas cristalizadas (ver figs. 9.18 a 9.22). Estes aspectos, que parecem atestar uma melhor hidratação, embora mais nítidos nas amostras de Inverno, são também visíveis nas amostras de Verão, o que é justificável, já que mesmo as aplicações de Verão estiveram expostas a

períodos mais húmidos que o ambiente 1, por exemplo durante a noite, e foram sujeitas, mais tarde, às chuvas frequentes do Inverno. Embora tardias, estas molhagens deverão ter-lhes permitido completar a sua hidratação. As amostras PEI não se encontram carbonatadas, o que é compreensível, uma vez que estiveram sempre em ambiente muito húmido e frequentemente expostas à chuva.

b) Amostras de argamassa com fibra de vidro (FV)

As amostras retiradas dos provetes de laboratório apresentam todas aspecto bastante poroso. Apenas se nota maior homogeneidade nas amostras retiradas do murete (FEV), apesar de se tratar de uma aplicação feita no Verão e nas amostras extraídas dos prismas ensaiados à flexão e compressão, curados no ambiente 2 (ver figs. 9.23 a 9.26).

Apenas se vêem cristais bem desenvolvidos nas amostras dos tipos FV-F/C e FEV (ver fig. 9.27). No entanto, é de notar que as fibras, pelo facto de não serem condutoras e se encontrarem bastante salientes, reflectem os electrões, dificultando a obtenção de ampliações nítidas, o que pode impedir a observações de zonas cristalizadas eventualmente existentes.

Todas as amostras se encontram bastante carbonatadas, o que também pode impedir a observação de cristais, caso se tenham formado.

As fibras encontram-se relativamente bem disseminadas na massa (ver figs. 9.23 a 9.26), embora por vezes se encontrem concentradas em *feixes* (ver figs. 9.28 e 9.29). Estão em bom estado, não se notando deformações nem degradação superficial (ver figs. 9.30 e 9.31). Este facto é explicável pelo alto módulo de elasticidade e elevada resistência da fibra de vidro em relação à matriz, que favorecem uma rotura do compósito por arrancamento (e não por corte) da fibra, sem deformação plástica desta. A ligação fibra-matriz parece ser boa, não se detectando microfendas nem maior porosidade na zona de interface (ver figs. 9.28 e 9.29).

c) Amostras de argamassa com fibra de polipropileno (FPP)

As amostras retiradas dos provetes de laboratório apresentam aspecto mais compacto e homogéneo que as amostras observadas das argamassas P e FV (ver figs. 9.32 e 9.33). As amostras retiradas do murete representam, ainda assim, uma melhoria, o que não é de

estranhar, já que as aplicações, realizadas no Inverno, estiveram sujeitas a ambiente sempre húmido e a chuvas frequentes, tendo portanto boas condições de hidratação (ver fig. 9.34).

Apenas se vêem cristais bem desenvolvidos nas amostras dos tipos 0 e 1 e FEI (ver figs. 9.35 a 9.37).

As amostras extraídas dos provetes de laboratório mostram carbonatação em toda a espessura dos provetes. Pelo contrário, as amostras retiradas do murete não apresentam sinais de carbonatação, o que é explicável pelo facto de essa argamassa ter permanecido sempre em ambiente muito húmido, pouco favorável às reacções de carbonatação.

As fibras encontram-se relativamente bem disseminadas na massa (ver figs. 9.32 a 9.34). Nas zonas de rotura por tracção encontram-se muito deterioradas e deformadas, o que mostra que foram traccionadas e houve, em geral, rotura por corte das fibras (ver figs. 9.38 a 9.40). Este modo de rotura está de acordo com o facto de as fibras de polipropileno terem um módulo de elasticidade inferior ao da matriz e serem, portanto, solicitadas à tracção para além do seu limite elástico, sempre que a ligação fibra-matriz seja suficientemente boa para o permitir. Assim, a ligação fibra-matriz parece ser boa, não se detectando, aliás, microfendas nem maior porosidade na zona de interface (ver fig. 9.39). Nas amostras do tipo FEI não se vêem fibras significativamente deterioradas, o que é consistente com o facto de não ter havido tracção, tendo-se extraído a amostra com escopro e martelo (ver fig. 9.41).

Assim, do conjunto de observações realizadas parecem poder extrair-se, em síntese, as seguintes conclusões:

- Os provetes mantidos no ambiente 1, com suporte absorvente, têm uma hidratação incompleta, mesmo que o suporte seja humedecido previamente; com efeito, o humedecimento periódico parece melhorar de forma sensível o grau de hidratação, que continua, contudo, a não ser total; as aplicações nos muretes - sujeitas à chuva, mesmo que no período de aplicação o ambiente seja seco - mostram uma hidratação bastante melhor. As argamassas obtidas são sempre bastante porosas e com deficientes ligações matriz-inertes, embora se notem melhorias nas condições que asseguram melhor hidratação. A argamassa com fibra de polipropileno parece também, por outro lado, dar origem a amostras mais homogéneas e mais *ligadas* que as outras duas. As argamassas consideradas, em provetes com relações s/v

(superfície livre/volume) altas e em condições ambientes favoráveis - nomeadamente em provetes com 20 mm de espessura e em ambientes com humidades relativas da ordem de 50% - carbonatam rapidamente em toda a espessura dos provetes, o que era expectável, dado tratar-se de argamassas muito porosas.

- As argamassas com fibras parecem ter carbonatação mais rápida que a argamassa padrão, fenómeno este ainda mais visível na FPP que na FV, o que pode ser explicado por uma maior permeabilidade ao ar resultante de uma maior porosidade. Nas argamassas FV e FPP - e mais uma vez mais na FPP que na FV - são menos visíveis zonas bem cristalizadas, o que poderá dever-se, em parte, à menor visibilidade dos cristais de etringite, dissimulados pelo carbonato de cálcio resultante da carbonatação, mas também pode estar relacionado com a necessidade de mais água de amassadura para completar a hidratação. De facto, é possível que as fibras, ao tornarem a estrutura da argamassa mais aberta, facilitem a evaporação da água. Esta explicação é, aliás, consistente com o resultado dos ensaios de capacidade de impermeabilização, que mostram maior rapidez de secagem das argamassas FV e FPP em relação à P.

- As fibras mostram-se, de um modo geral, bem disseminadas na massa, embora no caso da fibra de vidro, mais fina, haja zonas em que se aglomeram em *feixes*.

- As fibras de vidro encontram-se, em todas as amostras observadas, em bom estado, não sendo visíveis degradações superficiais nem deformações. Aparentemente, não são significativamente atacadas pelos álcalis do cimento (pelo menos de forma visível) nem muito afectadas pelos procedimentos de amassadura e aplicação dos rebocos. O mecanismo de rotura mais frequente parece ser por arrancamento, sem se atingir a tensão de rotura das fibras e sem introdução nestas de deformações plásticas, o que era, aliás, expectável, dada a elevada resistência à tracção e o alto módulo de elasticidade destas fibras em relação à matriz de argamassa.

- As fibras de polipropileno aparecem muito deformadas, e com as extremidades deterioradas. Aparentemente foram solicitadas à tracção para além do seu limite elástico e a rotura do compósito deu-se, frequentemente, com rotura das fibras. Este mecanismo de rotura é consistente com as características das fibras de polipropileno, que têm resistência à tracção relativamente reduzida e módulo de elasticidade da mesma ordem de grandeza da matriz usada.

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 9

[9.1] - UNION EUROPÉENNE POUR L'AGRÉMENT TECHNIQUE DANS LA CONSTRUCTION (UEAtc) - **Directives UEAtc pour l'agrément des complexes d'isolation extérieure des façades avec enduit mince sur isolant en polystyrène expansé.** Paris, Cahiers du CSTB, 1988. Livraison 293, Cahier 2289.

[9.2] - UEAtc - **Guide technique UEAtc pour l'agrément des systèmes d'isolation extérieure des façades avec enduits minéraux.** Paris, Cahiers du CSTB, 1992. Livraison 331, Cahier 2602.

[9.3] - PALMA, João - **Aparelho Detector de Humidade no Betão com Base na Variação da Condutibilidade**. Lisboa, LNEC, 1992. Relatório.

[9.4] - GONÇALVES, Teresa; VEIGA, M. do Rosário - **Aplicação de aparelho detector de humidade ao estudo da capacidade de impermeabilização de argamassas de reboco**. Lisboa, LNEC, Janeiro de 1994. Relatório.

[9.5] - GONÇALVES, Teresa; VEIGA, M. Rosário; CANHA DA PIEDADE, A. - **Evaluation of the capacity for impermeabilization of wall renders.** "In International Symposium on Moisture Problems in Building walls, Proceedings". Porto, September 1995.

[9.6] - GONÇALVES, Teresa - **Capacidade de impermeabilização de revestimentos de paredes de ligantes minerais. Desenvolvimento de um método de ensaio com base na resistência eléctrica.** Tese de Mestrado a apresentar no Instituto Superior Técnico. Lisboa, LNEC, Fevereiro de 1997.

CAPÍTULO 10

CONCLUSÕES

10.1 - Síntese Crítica dos Resultados
10.2 - Desenvolvimento Futuro da Investigação neste Domínio
10.3 - Considerações Finais

10.1 - SÍNTESE CRÍTICA DOS RESULTADOS

Ao longo deste trabalho procuraram atingir-se os objectivos fundamentais definidos no capítulo 1, nomeadamente:

- Desenvolvimento de uma metodologia para determinação das tensões induzidas, por retracção restringida, na argamassa de reboco e na sua interface com o suporte.

- Desenvolvimento de um método de avaliação da susceptibilidade à fendilhação de argamassas de reboco devido à retracção restringida.

- Análise da influência dos seguintes factores no comportamento de rebocos, principalmente na sua susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida: condições de cura; absorção do suporte; composição do reboco (tipo de ligante, teor de água, natureza da areia, teor de cimento, inclusão de armadura de fibras dispersas ou redes, inclusão de resina).

Para concretizar estes objectivos, foi projectado, fabricado e posto a funcionar o equipamento necessário à determinação de tensões de retracção restringida e de deslocamentos por retracção livre em argamassas, desde a moldagem. O mesmo equipamento permite ainda determinar as resistências à tracção das argamassas em qualquer idade.

Foram realizadas determinações, ao longo do tempo, das tensões instaladas, das retracções e das resistências à tracção, sobre um importante número de argamassas de reboco - 6 rebocos tradicionais (P, Pa, Pac, P3, CA, CH), 2 rebocos com fibras dispersas (FV e FPP), 3 rebocos armados com redes de fibra de vidro ou de polipropileno (R1, R2 e R3), 4 rebocos pré-doseados (M1, M2, M3 e M4) e um reboco de ligante misto (PR) -, testadas em várias condições de cura e sobre suportes com absorções diferentes; com base nos dados obtidos nessas medições foram determinados diversas grandezas - o *módulo de elasticidade equivalente* E_{eq}, a *extensão de rotura (imediatamente antes da abertura da 1ª fenda)* d_r, o *módulo de rotura em tracção lenta* M_l - e alguns parâmetros - o *coeficiente de*

segurança à abertura da 1ª fenda CSAF, que traduz a relação entre a resistência à tracção e a força máxima induzida por retracção restringida $R_t/F_{r\ máx}$ e o *coeficiente de resistência à evolução da fendilhação CREF*, obtido a partir da relação entre a energia de rotura por tracção e a força máxima induzida por retracção restringida $G/F_{r\ máx}$ - destinados a avaliar a susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida.

Analisaram-se essas grandezas e parâmetros e estabeleceram-se critérios de avaliação.

As argamassas usadas foram caracterizadas e observadas ao microscópio electrónico para que os resultados obtidos pudessem ser, tanto quanto possível, relacionados com as respectivas microestruturas.

O seu comportamento foi avaliado no que diz respeito aos outros aspectos considerados relevantes, nomeadamente a trabalhabilidade e a facilidade de aplicação, a capacidade de impermeabilização, a aderência ao suporte, a resistência ao choque e, no caso da argamassa com fibra orgânica (FPP), a reacção ao fogo. Para tal, além de uma extensa campanha de ensaios laboratoriais, efectuaram-se aplicações experimentais em muretes construídos na EENRevPa, que permitiram a realização de observações, de medições dos tempos de molhagem e secagem com chuva, de ensaios de aderência e de resistência ao choque.

Embora o comportamento das argamassas de reboco - e, em particular, a sua susceptibilidade à fendilhação por retracção restringida -, sujeito à influência de tantos e tão dificilmente quantificáveis factores, seja demasiado complexo para ficar resolvido nestas páginas, considera-se ter avançado bastante no seu conhecimento. Assim, propõe-se o estabelecimento de uma classificação com base nos dois parâmetros principais referidos - ***coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda CSAF*** e ***coeficiente de resistência à evolução da fendilhação CREF*** -, que se sintetiza no quadro 10.1.

Quadro 10.1 - Classificação quanto à susceptibilidade à fendilhação de argamassas, baseada em ensaios de retracção restringida até 7 dias, em ambiente caracterizado por 23° C / 50% HR

CLASSE DE SUSCEPTIBILIDADE À FENDILHAÇÃO	1° critério - CSAF	2° critério - CREF (mm)
1 (Fraca) *	CSAF ≥ 1	CREF ≥ 1
2 (Média) *	CSAF ≥ 1	0,6 ≤ CREF < 1
3 (Forte) **	CSAF < 1	CREF < 0,6

* Tem que verificar as duas condições para pertencer à classe.
** Basta verificar uma das condições para pertencer à classe.

Segundo este critério, as argamassas estudadas são classificadas como consta do quadro 10.2, onde se inclui também, para comparação, a classificação segundo o critério ε_r - *E-E/Rt*, do CSTB.

Quadro 10.2 - Classificação da susceptibilidade à fendilhação das argamassas estudadas segundo os critérios CSAF/CREF e ε_r - E-E/Rt

ARGAMASSA	CLASSIFICAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À FENDILHAÇÃO SEGUNDO O CRITÉRIO CSAF/CREF	CLASSIFICAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À FENDILHAÇÃO SEGUNDO O CRITÉRIO ε_r - E-E/Rt
P	Forte	Forte
FV	Fraca	Forte
FPP	Forte	Forte
R1	Fraca	Forte
R2	Fraca	Forte
R3	Fraca	Forte
M1	Fraca	Média
M2	Média	Forte
M3	Fraca	Forte
M4	Forte	Forte
PR	Fraca	Fraca
CA	Fraca	Forte
CH	Média	Forte
Pa	Média	Forte
Pac	Média	Forte
P3	Forte	Forte

A classificação *CSAF/CREF* - que, de um modo geral, não contraria as observações feitas em obra ao longo dos últimos anos - precisa, no entanto, de ser sancionada por observações em obra mais sistemáticas e por uma campanha experimental mais alargada, que forneça maior número de dados em que basear essas conclusões.

A influência das condições de cura parece ter ficado também esclarecida. Com efeito, no caso das argamassas de matriz tradicional, todos os aspectos do comportamento parecem ser largamente beneficiados quando as condições de hidratação são favoráveis, verificando-se melhor aderência, menor capilaridade e melhor comportamento à fendilhação, traduzido em coeficientes *CSAF* e *CREF* superiores. No entanto, a transição brusca de ambientes húmidos para ambientes muito mais secos, como no caso do ambiente 2, ou da cura com recurso a protecção com polietileno, gera gradientes de tensão na espessura do reboco que reduzem a resistência à tracção e podem, em muitos casos, provocar fendilhação. O humedecimento periódico desde a aplicação e prolongado durante os primeiros dias parece ser o método de cura mais favorável a um bom comportamento à fendilhação por retracção restringida. De facto, todos os rebocos ensaiados mostram coeficientes *CREF* superiores nessas condições de cura (condições SH+RH em relação às condições SA) e coeficientes *CSAF* também superiores ou idênticos.

O estudo permitiu também concluir que os rebocos em exposição exterior natural, aplicados no Inverno, ou até mesmo no Verão, têm melhores condições de hidratação e podem apresentar comportamento mais favorável que as argamassas de idêntica constituição preparadas e conservadas em laboratório, quer no ambiente 1 quer no 2.

A influência da absorção do suporte, no que se refere às argamassas de matriz tradicional, foi também esclarecida. De um modo geral, a sucção do suporte mostrou-se claramente favorável. No entanto, no que se refere ao reboco monocamada M1, surgiram resultados contraditórios de difícil interpretação. De facto esse reboco, como normalmente acontece com os rebocos deste tipo, tem na sua constituição adjuvantes que lhe permitem uma melhor retenção de água, logo esperava-se que fosse pouco sensível à alteração de absorção do suporte. No entanto, o reboco M1 parece mesmo ser negativamente afectado, facto este já difícil de explicar, considerando-se necessário fazer mais ensaios, com outro lote de produto, para adquirir mais certezas.

A acentuada melhoria de comportamento à fendilhação das argamassas armadas com redes de fibra de vidro e de polipropileno e, em menor grau, com fibras dispersas de idêntica natureza, ficou também demonstrada e explicada satisfatoriamente.

A análise de alguns dos factores relacionados com a composição da argamassa resultou bastante positiva. Com efeito, a utilização de cal aérea misturada com o cimento, quando a aplicação e cura decorrem em ambiente seco, parece melhorar significativamente o

comportamento à fendilhação sem apresentar desvantagens graves de outros pontos de vista. Em ambiente húmido, contudo, já não foi possível concluir com segurança sobre um bom comportamento à fendilhação, considerando-se necessário realizar ensaios mais longos e com particulares cuidados na manipulação dos provetes. O aumento do teor de água, dentro de limites aceitáveis de trabalhabilidade e aplicabilidade, parece, ao contrário do que seria de esperar, não ter inconvenientes graves no que diz respeito à susceptibilidade à fendilhação e, em condições secas e com suporte absorvente, poder mesmo ser benéfico, por permitir uma hidratação mais completa do cimento. Por outro lado, o teor de cimento e a natureza da areia foram aspectos insuficientemente estudados e que exigiriam uma campanha experimental mais vasta e prolongada para que os resultados pudessem ser considerados conclusivos.

A possibilidade de determinação das tensões desenvolvidas na argamassa, durante a sua presa e endurecimento, é, em si, um instrumento importante para a selecção de composições a usar sobre suportes fracos, designadamente em trabalhos de reabilitação de edifícios antigos. A argamassa bastarda com cal aérea mostrou, nesse aspecto, vantagens em relação a todas as outras ensaiadas.

No que se refere aos ensaios adicionais realizados, foi possível concluir que todas as argamassas aplicadas nos muretes - P, FV, FPP, R1, R2 e CA - são trabalháveis e fáceis de aplicar e todas elas apresentam boa aderência e boa resistência ao choque.

Os ensaios de exposição à chuva com medição dos tempos de secagem-molhagem com humidímetro mostraram que estas argamassas permitem que a água da chuva atinja o suporte em poucas horas - entre 3 e 20 horas, conforme a intensidade da chuva e a pressão do vento - e que os tempos de secagem - que dependem não só das condições de secagem mas também da quantidade de água absorvida -, são geralmente superiores, variando entre 15 e 90 horas. Nestes ensaios, os revestimentos que permitem maior penetração da água da chuva parecem ser os realizados com a argamassa CA, mas esses são também, juntamente com os realizados com as argamassas com fibras FV e FPP, os que mais rapidamente secam. Contudo, para tirar conclusões verdadeiramente fiáveis, seria necessária uma campanha de ensaios muito mais prolongada - talvez durante 1 ano, para experimentar várias intensidades de chuva - e, principalmente, com medições em simultâneo em todos os painéis, para

possibilitar a comparação directa - por exemplo usando mais humidímetros ou colocando fios mais compridos.

As observações com microscópio electrónico permitiram observar a cristalização mais completa das argamassas curadas em melhores condições de hidratação e, principalmente, no exterior e a mais rápida carbonatação das argamassas sujeitas a ambientes mais secos (ambiente 1, condições SA) e de menor espessura. No caso das argamassas com fibras dispersas, mostraram uma boa ligação das fibras à matriz e uma distribuição na massa razoável, embora não completamente homogénea.

O estudo permitiu ainda tirar conclusões sobre as condições gerais de realização de ensaios de revestimentos de paredes. Com efeito, as grandes diferenças, quer quantitativas, quer qualitativas, nos resultados obtidos nos ensaios realizados sobre argamassas idênticas em diferentes condições de aplicação e cura, vêm provar como é importante aproximar as condições de ensaio das condições reais de aplicação e exposição, embora seja, naturalmente, necessário mantê-las simples e padronizá-las. Parece-nos essencial que os ensaios de comportamento sejam realizados, tanto quanto possível, em provetes:

- Com uma espessura mais realista que os prismas de 40 x 40 mm habitualmente adoptados; 20 mm parece-nos mais adequado.

- Armazenados em ambientes com um condicionamento menos seco que o ambiente 1, correspondente ao usado actualmente no LNEC e no CSTB francês - 50% HR desde a moldagem - mas também desprovido de variações bruscas, como o ambiente 2, preconizado nos actuais projectos de normas europeias - 95% HR durante 2 dias e 65% HR durante o período restante. Uma humidade constante de 65% e pulverização periódica com água, em condições bem definidas, seria mais adequado, pelo menos nos ensaios de comportamento.

- Preparados, sempre que possível, sobre suporte absorvente, quando for esse o campo de aplicação previsto para o reboco em causa. A utilização de papel de filtro pode ser uma alternativa prática.

10.2 - DESENVOLVIMENTO FUTURO DA INVESTIGAÇÃO NESTE DOMÍNIO

As limitações do presente estudo deixam amplo campo para uma futura investigação. Assim, impõe-se a realização de algumas acções imediatas para tornar mais efectivas as metodologias propostas para a avaliação da susceptibilidade à fendilhação:

- O aperfeiçoamento do equipamento e das técnicas de ensaio para determinação das tensões, retracções livres e resistências à tracção. Parece-nos possível e relativamente fácil adaptar aos aparelhos dispositivos mecânicos (com sistemas de alavancas) para os levantar de forma a poder retirar o fundo e, numa segunda fase, para os passar à vertical. A realização dos ensaios de tracção também pode ser mais mecanizada. No que se refere à retracção livre, vale a pena investigar mais profundamente métodos simples para reduzir o atrito no fundo do molde, durante o 1º dia, embora a pesquisa realizada nos tenha convencido que os investigadores anteriores também não resolveram eficazmente este problema. A interposição, entre o provete e a base de material acrílico, pincelada com a mesma mistura de massa consistente e óleo lubrificante usada nos presentes ensaios, de uma folha de polietileno, também lubrificada de igual modo, é uma tentativa a fazer.

- A ampliação da campanha experimental realizada, prolongando os tempos de ensaio dos vários tipos de argamassas estudados, para avaliar o seu comportamento em idades mais avançadas, já que grande parte dos problemas de fendilhação em rebocos se detectam após alguns meses (e por vezes alguns anos) de aplicação.

- O aprofundamento do estudo da influência, na susceptibilidade à fendilhação, dos diversos factores analisados, introduzindo leques de variação mais alargados.
  Seria útil, por exemplo, a realização de ensaios com outros tipos de condicionamento e de cura: humidade constante de 65% HR e de 75% HR, mantendo a temperatura de 23°C; ciclos diários de humidades (diurna e nocturna); temperatura mais baixa (situação de Inverno); temperatura mais alta

(situação de Verão); protecção da superfície com um tecido poroso que se mantém humedecido. A realização de ensaios de camadas de espessura diferente sobre suportes com vários coeficientes de absorção também poderá trazer dados interessantes. Variações maiores no teor de cimento, eventualmente com introdução de adjuvantes (introdutores de ar e plastificantes), argamassas com maior dosagem de cal aérea e até com cal aérea como único ligante (para utilização em reabilitação de edifícios antigos) e argamassas com outras areias usadas no País em rebocos serão também aspectos a estudar. Um estudo mais aprofundado do comportamento de rebocos pré-doseados aplicados sobre suporte absorvente é, como já se referiu, necessário para esclarecer algumas dúvidas deixadas em aberto no presente estudo.

As acções referidas devem permitir constituir uma vasta base de dados, que, em conjunto com observações em obra, tornará possível aperfeiçoar, de forma fundamentada, os critérios sugeridos de apreciação da susceptibilidade à fendilhação.

Em simultâneo com estas acções considerar-se-ia extremamente útil a elaboração de um programa de elementos finitos que simule o comportamento mecânico, antes e após fendilhação, de uma argamassa de reboco aplicada sobre um suporte. Os resultados dos ensaios realizados forneceriam os dados necessários e permitiriam a selecção de coeficientes experimentais, se tal se revelasse necessário. Um programa deste tipo alargaria muito a utilidade dos ensaios, já que permitiria extrapolar os seus resultados para diferentes condições e idades.

A fase seguinte deverá ser a consideração da aderência ao suporte e a quantificação da sua influência neste aspecto do comportamento dos rebocos. Este estudo, por via experimental, afigura-se bastante difícil, já que, para ser satisfatoriamente realizado, seria preciso resolver o problema de promover a aderência da argamassa a um suporte e, em simultâneo, transmitir as forças geradas a um transdutor capaz de as medir. Na verdade, as soluções experimentais tentadas até ao momento para conseguir incluir este factor, abordadas no capítulo 4 deste trabalho, revelaram-se extremamente *pesadas* e tiveram muito pouco êxito. No entanto, parece viável uma metodologia mista, em que a abordagem analítica complemente as insuficiências da via experimental. Ou seja, a introdução de

diferentes condições de fronteira no programa de elementos finitos referido atrás, poderia conduzir a conclusões interessantes, desde que os resultados obtidos fossem validados e calibrados por ensaios apropriados, que, por serem efectuados de forma relativamente pontual, até poderiam ser *pesados*.

Uma segunda linha de investigação surge ainda, relacionada com o aprofundamento do trabalho realizado sobre o comportamento à fendilhação de rebocos: o estudo de algumas formulações de rebocos tradicionais que permitissem optimizar essa característica, para aplicações bem definidas, através da utilização de adjuvantes ou aditivos com dosagens bem quantificadas, misturas de areias, recurso a fibras e redes. Este tipo de estudo deveria, contudo, ser conduzido por uma equipa com uma componente química ou de engenharia de materiais, que poderia, aliás, ser facilmente constituída no LNEC.

Outras linhas de investigação nos parecem úteis, na área do comportamento de rebocos. O desenvolvimento das metodologias aqui abordadas para avaliação da capacidade de impermeabilização é uma das mais óbvias, que está já a ser prosseguida no LNEC, com uma Tese de Mestrado sobre o assunto (ver referência bibliográfica 9.6 do Capítulo 9), que se debruça, fundamentalmente, sobre os ensaios em provetes de pequenas dimensões. A realização de um próximo trabalho, em que sejam cruzados ensaios em muretes ou em obra com ensaios em provetes reduzidos poderá contribuir decisivamente para o alargamento dos conhecimentos num domínio tão importante do comportamento dos rebocos como é a sua capacidade de impermeabilização.

Como ficou demonstrado no presente estudo, o desenvolvimento de técnicas de ensaio que permitam simular melhor as condições reais de aplicação e exposição de rebocos é também uma linha que merece algum esforço, sob pena de nos basearmos em resultados pouco significativos.

10.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como ficou claro nos itens anteriores, este trabalho está longe de concluir a investigação sobre o comportamento de rebocos, nomeadamente no que se refere à fendilhação por retracção restringida. No entanto, crê-se poder afirmar que abre alguns caminhos que podem conduzir, finalmente, a conclusões e foi aqui que procurou chegar-se em 10.2.

Espera-se, por outro lado, que possa ter alguns resultados práticos imediatos, pois esse é um objectivo que não julgamos lícito perder de vista em qualquer trabalho que se reclame de Investigação Aplicada.

Assim, julga-se que pode, desde já, apoiar a elaboração de regras de composição e aplicação de rebocos, que deverão também contar com a contribuição da experiência de empreiteiros e aplicadores e que poderão ser actualizadas periodicamente, sempre que o aumento dos conhecimentos ou a evolução das tecnologias o justifique.

As metodologias desenvolvidas estão já a ser usadas (em complemento dos ensaios e critérios anteriormente empregues) em estudos de Apreciação de rebocos pré-doseados.

Os resultados obtidos deverão fundamentar pareceres e estudos de apoio à selecção de rebocos a realizar no LNEC, naturalmente sempre complementados com cuidadas observações em obra, como é prática corrente neste Laboratório.

Não menos importante parece-nos ser a divulgação das conclusões a que se chegou, pelo que se prevê a elaboração de comunicações e artigos a apresentar em congressos e revistas nacionais e internacionais.

Finalmente, a divulgação da técnica de ensaio desenvolvida e a comercialização dos aparelhos de retracção restringida para organismos de Investigação nacionais e estrangeiros é, também, uma medida a encarar seriamente.

Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Maio de 1997

ANEXO I

FICHAS DE ENSAIO

MHOP – LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – PORTUGAL

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS – NÚCLEO DE COMPORTAMENTO DAS CONSTRUÇÕES

FICHA DE ENSAIO

F E Pa 05

SfB (41) Pr 4 (42) Pr 4

CDU 693.62

REVESTIMENTOS COM BASE EM LIGANTES SINTÉTICOS

DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA

REVESTIMENTO DE PAREDES
REVÊTEMENT DE MUR
WALL COVERING

NOVEMBRO 1980

1 — OBJECTO

A presente ficha de ensaio destina-se a fixar o modo de determinar a massa volúmica dos revestimentos delgados de massas plásticas para paredes e dos revestimentos com base em ligantes sintéticos para paramentos interiores de paredes, enquanto sob a forma de pasta.

2 - RESUMO DO PROCESSO

Determinação da massa por unidade de volume do revestimento em pasta mediante pesagem dum determinado volume do produto.

3 — APARELHOS E UTENSÍLIOS

3.1 - Picnómetro de metal com capacidade de 1000 ml, com tampa e orifício para escoamento de excedente, sendo de preferência acompanhado dum contrapeso para taragem.

3.2 - Termómetro graduado em °C.

3.3 - Balança com sensibilidade de 0,01 g.

4 — PROVETES

O ensaio é realizado sobre três provetes. Cada provete é constituído por cerca de 1000 cm^3 de material retirado duma amostra representativa do produto a ensaiar.

5 — AMBIENTE ATMOSFÉRICO DE CONDICIONAMENTO E DE ENSAIO

A preparação dos provetes e o ensaio realizam-se num ambiente atmosférico caracterizado por 23 ± 2°C de temperatura e 50 ± 5% de humidade relativa.

6 — TÉCNICA

6.1 - Calibra-se o picnómetro a partir de água destilada a 20°C, tomando para massa volúmica da água naquelas condições o valor de 0,998 g/cm^3.

6.2 - Lava-se o picnómetro com um solvente apropriado e deixa-se secá-lo. Considera-se que o picnómetro está seco quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens sucessivas, intervaladas de 15 minutos, não exceder 0,02 g.

6.3 - Pesa-se o picnómetro vazio, com a tampa.

6.4 - Homogeneíza-se o produto a ensaiar, mede-se a temperatura a que se encontra e enche-se com ele o picnómetro evitando a formação de bolhas. Coloca-se a tampa do picnómetro, deixando livre o orifício de escoamento para que o produto em excesso se possa escapar. Elimina-se cuidadosamente o produto excedente.

6.5 - Pesa-se o picnómetro cheio com o produto.

7 — RESULTADOS

Sendo:

m_1 - massa, em gramas, do picnómetro com a tampa;

m_2 - massa, em gramas, do picnómetro cheio do produto e com a tampa;

v - volume, em cm^3, do produto contido no picnómetro;

a massa volúmica, expressa em g/cm^3, é

$$\frac{m_2 - m_1}{v}$$

O valor da massa volúmica será a média aritmética das determinações obtidas a partir dos três provetes e exprime-se arredondado às décimas.

Pa 05.2

8 — BOLETIM DE ENSAIO

O boletim de ensaio deve fazer referência à presente ficha de ensaio e mencionar o seguinte:

a) designação identificativa do produto ensaiado;

b) qualquer alteração que eventualmente tenha sido introduzida na execução do ensaio;

c) valores de m_1 e de v;

d) valores de m_2 para cada provete;

e) massa volúmica de cada provete e a média respectiva;

f) data da realização do ensaio.

BIBLIOGRAFIA

UNION EUROPÉENNE POUR L'AGRÉMENT TECHNIQUE DANS LA CONSTRUCTION (UEAtc) - Paris - Directivas Comuns UEAtc para a homologação de revestimentos delgados de massas plásticas para paredes. Lisboa. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1978. Tradução 701.

COMMISSION CHARGÉE DE FORMULER DES AVIS TECHNIQUES SUR DES PROCÉDÉS, MATÉRIAUX, ÉLÉMENTS OU ÉQUIPEMENTS UTILISÉS DANS LA CONSTRUCTION - Paris - Annexe au guide technique spécialisé des enduits plastiques de finition intérieurs. Modalités d'essais. Mai 1973.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR) - Paris - Peintures. Détermination de la masse volumique des peintures, vernis et préparations assimilées. NF T 30-020, Mars 1966.

MHOP – LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – PORTUGAL

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS – NÚCLEO DE COMPORTAMENTO DAS CONSTRUÇÕES

FICHA DE ENSAIO

FE Pa 06

SfB (41) Pr 4 (42) Pr 4

CDU 693.62

REVESTIMENTOS COM BASE EM LIGANTES SINTÉTICOS

DETERMINAÇÃO DO pH

REVESTIMENTO DE PAREDES
REVÊTEMENT DE MUR
WALL COVERING

NOVEMBRO 1980

1 - OBJECTO

A presente ficha de ensaio destina-se a fixar o modo de determinar o pH dos revestimentos delgados de massas plásticas para paredes e dos revestimentos com base em ligantes sintéticos para parg mentos interiores de paredes, enquanto sob a forma de pasta.

2 - DEFINIÇÕES

2.1 - pH dum produto em solução

Logaritmo decimal do inverso da concentração hidrogeniónica desse produto em solução, expressa em iões-grama por litro.

2.2 - Processo electrométrico de determinação de pH

Processo de determinação de pH segundo o qual o pH duma solução é obtido a partir da medição da diferença de potencial entre um eléctrodo de vidro e um eléctrodo de calomelanos de referência, mergulhados nessa solução.

3 - RESUMO DO PROCESSO

Determinação do pH do revestimento pelo processo electrométrico, a partir da diluição duma pequena quantidade desse produto em pasta em igual massa de água bidestilada.

4 - APARELHOS E UTENSÍLIOS

4.1 - Aparelho para determinação de pH pelo processo electrométrico, constituído essencialmente por:

a) Eléctrodo de vidro.

b) Eléctrodo de calomelanos de referência, saturado de KCl.

c) Voltímetro graduado em unidades de pH, permitindo obter leituras com precisão de 0,05 unidades.

4.2 - Balança com precisão de 0,01 g.

4.3 - Termómetro com precisão de 0,5°C.

4.4 - Copo de precipitação de 25 ml.

4.5 - Vareta de vidro para agitação manual.

4.6 - Água bidestilada recentemente fervida e arrefecida numa atmosfera isenta de dióxido de carbono.

4.7 - Banho termorregularizador a 20 ± 1°C.

4.8 - Frasco de lavagem por esguicho, de plástico, contendo água bidestilada.

5 - PROVETES

O ensaio é efectuado sobre 3 provetes.

Cada provete é obtido por diluição de cerca de 5 g do produto em pasta em igual massa de água bidestilada (4.7).

6 - AMBIENTE ATMOSFÉRICO DE CONDICIONAMENTO E DE ENSAIO

A preparação e o ensaio dos provetes devem decorrer num ambiente atmosférico caracterizado por 23 ± 2°C de temperatura e 50 ± 5 % de humidade relativa.

7 - TÉCNICA

7.1 - Introduzem-se no copo de precipitação (4.4) cerca de 5 g do revestimento em pasta e adiciona-se-lhe igual massa de água bidestilada (4.7).

Pa 06.2

7.2 - Homogeneíza-se a solução obtida agitando-a manualmente com a vareta de vidro (4.5).

7.3 - Introduz-se o copo com a solução no banho termoregularizador (4.8), onde permanece até que se estabeleça o equilíbrio da temperatura a 20 ± ± 1°C.

7.4 - Antes de se proceder à determinação do pH, calibra-se o aparelho referido em 4.1 com as soluções tampão convenientes e segundo o processo recomendado pelo fabricante.

7.5 - Lavam-se os eléctrodos em água bidestilada (1), limpam-se com papel de filtro, enxaguam-se com a solução a ensaiar e montam-se no aparelho medidor do pH (4.1).

7.6 - Agita-se de novo a solução e mergulham-se nela os eléctrodos.

7.7 - Fazem-se duas ou três leituras do PH da solução, com breve agitação entre cada leitura. Estas não devem diferir de mais de 0,05 unidades de pH e devem atingir um valor constante em cerca de 1 minuto. Não devem fazer-se leituras antes do aparelho ter atingido o equilíbrio.

7.8 - Retiram-se os eléctrodos da solução, lavam-se em água bidestilada, limpam-se com papel de filtro e enxaguam-se com a solução a ensaiar.

7.9 - Verifica-se a calibração do aparelho com a solução tampão de pH mais próximo do pH do revestimento; se a leitura diferir de mais de 0,05 unidades de pH do valor correcto, o aparelho deve ser ajustado e deve repetir-se o procedimento descrito em 7.5 e 7.6, até se obterem leituras concordantes.

7.10 - Repetem-se as operações descritas de 7.1 a 7.9 para outras duas porções de cerca de 5g do revestimento em pasta. Os resultados das três determinações não devem diferir entre si de mais de 0,3 unidades de pH.

8 - RESULTADOS

O resultado exprime-se pela média aritmética dos três valores do pH obtidos e apresenta-se arredondado às décimas.

9 - BOLETIM DE ENSAIO

O boletim de ensaio deve fazer referência à presente ficha e mencionar, ainda, o seguinte:

a) designação identificativa do revestimento ensaiado;

b) qualquer alteração eventualmente introduzida na execução do ensaio;

c) marca e modelo do aparelho medidor do pH;

d) valores individuais do pH correspondentes a cada um dos provetes e a média respectiva;

e) data da realização do ensaio.

BIBLIOGRAFIA

UNION EUROPEENNE POUR L'AGRÉMENT TECHNIQUE DANS LA CONSTRUCTION (UEAtc) - Paris - Directivas Comuns UEAtc para a homologação de revestimentos delgados de massas plásticas para paredes. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1978. Tradução 701.

COMMISSION CHARGÉE DE FORMULER DES AVIS TECHNIQUES SUR DES PROCEDÉS, MATÉRIAUX, ELEMENTS OU EQUIPEMENTS UTILISÉS DANS LA CONSTRUCTION - Paris - Annexe au guide technique spécialisé des enduits plastiques de finition intérieurs. Modalités d'essais. Mai 1973.

ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION (ISO) - Genève - Matières plastiques. Dispersions aqueuses de polymères et copolymères. Détermination du pH. Norme Internationale ISO 1148, 1975.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC) - Lisboa - Solos. Determinação do pH. Especificação LNEC E 203, Outubro de 1967.

1 - Quando não estão em uso, os eléctrodos devem ser mergulhados num copo com água bidestilada.

MHOP – LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – PORTUGAL

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS – NÚCLEO DE COMPORTAMENTO DAS CONSTRUÇÕES

FICHA DE ENSAIO

F E Pa 10

SfB (41)P (42)P

CDU 693.62

REVESTIMENTOS COM BASE EM LIGANTES HIDRÁULICOS OU SINTÉTICOS

DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA

REVESTIMENTO DE PAREDES
REVÊTEMENT DE MUR
WALL COVERING

NOVEMBRO 1980

1 — OBJECTO

A presente ficha de ensaio destina-se a fixar o modo de determinar a consistência dos revestimentos delgados de massas plásticas para paredes, dos revestimentos não-tradicionais com base em ligantes hidráulicos para impermeabilização de paramentos exteriores de paredes e dos revestimentos com base em ligantes sintéticos para paramentos interiores de paredes, enquanto sob a forma de pasta.

2 — RESUMO DO PROCESSO

Introdução do revestimento em pasta em troços de tubo de diversos diâmetros e suspensão desses tubos para determinação do tempo ao fim do qual a pasta tomba, total ou parcialmente, do seu interior; registo do tubo de maior diâmetro para o qual a pasta permanece na totalidade no seu interior durante pelo menos 5s (consistência de 1 a 10).

Penetração duma agulha calibrada no revestimento em pasta previamente introduzido em troços de tubo de diversos diâmetros e suspensão do conjunto pela haste dessa agulha para determinação do tempo ao fim do qual se verifica a queda dos referidos tubos; registo do tubo de maior diâmetro que permanece em suspensão sem tombar durante pelo menos 5s (consistência de 11 a 20).

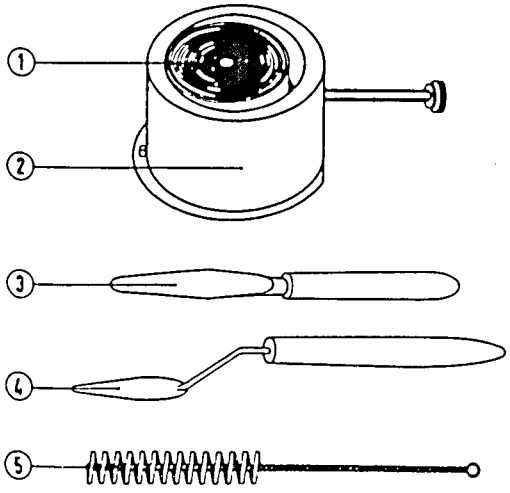
3 — APARELHOS E UTENSÍLIOS

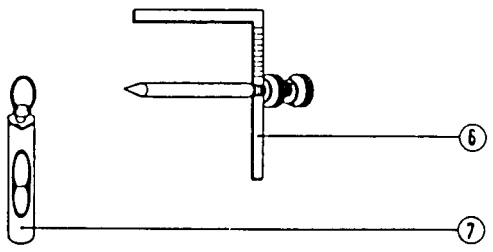
3.1 - Equipamento "Consistor Baronnie" (fig. 1), constituído por:

a) Dez troços de tubos de aço inoxidável, referenciados de 1 a 10 através de entalhes numa das bases, com 50 mm de altura e diâmetros interiores compreendidos entre 10 mm e 55 mm.

b) Copela com obturador.

c) Agulha calibrada, de aço inoxidável, mon





1 - troços de tubos de aço inoxidável
2 - copela com obturador
3 - espátula
4 - colher de pedreiro
5 - escovilhão
6 - agulha calibrada montada num esquadro
7 - relógio de areia

Fig. 1

Pa 10.2

tada num esquadro do mesmo material com uma das hastes graduada.

d) Relógio de areia calibrado para 5 segundos.

e) Colher de pedreiro.

f) Espátula.

g) Escovilhão para limpeza dos tubos.

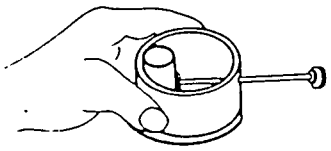


Fig. 2 - A

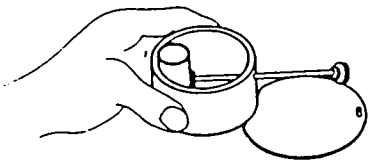


Fig. 2 - B

4 — PROVETES

O ensaio é efectuado sobre cerca de 1 l do revestimento em pasta, obtida nas seguintes condições:

- após homogeneização do produto — no caso dos revestimentos comercializados sob a forma de pasta (revestimentos delgados de massas plásticas para paredes, revestimento com base em ligantes sintéticos para paramentos interiores de paredes, etc.);

- após a realização da operação de amassadura, imediatamente ou depois de decorrido o intervalo de tempo eventualmente recomendado pelo fabricante — no caso dos revestimentos não-tradicionais com base em ligantes hidráulicos para impermeabilização de paramentos exteriores de paredes - devendo nesse caso a amassadura ser efectuada nas proporções e nas condições prescritas pelo fabricante;

- à saída da máquina de projecção habitualmente utilizada para as aplicações em obra — no caso dos revestimentos que se destinem a ser preferencialmente aplicados por aquele processo.

5 — TÉCNICA

5.1 - Selecciona-se um troço de tubo de diâmetro médio; coloca-se esse tubo no interior da copela (com o obturador fechado) e aperta-se-o contra a parede desta por meio do parafuso. Quando se aperta o parafuso deve ter-se o cuidado de garantir que a face inferior do tubo (face que apresenta os entalhes de referência) se mantem em contacto com o obturador da copela (fig. 2-A).

5.2 - Com a colher de pedreiro, procede-se ao enchimento do tubo com a pasta a ensaiar, compactando esta com leves pancadas do cabo da colher na copela. Depois de concluído o enchimento, arrasa-se a pasta, com a espátula, pelo nível superior do tubo.

5.3 - Abre-se rapidamente o obturador da copela e, simultaneamente, inicia-se a contagem do tempo durante 5 segundos (fig. 2-B). Para a contagem do tempo pode utilizar-se o relógio de areia que é fornecido como acessório do "Consistor Baronnie" ou, então, um cronómetro adequado.

5.4 - Decorridos os 5 segundos, verifica-se se a pasta tombou (total ou parcialmente) do tubo ou se ainda permanece totalmente no interior deste. Repetem-se as operações referidas em 5.1, 5.2 e 5.3, escolhendo, respectivamente, um tubo de diâmetro inferior ou superior ao inicial, consoante se verifique a primeira ou a segunda daquelas hipóteses.

5.5 - Procede-se deste modo até se encontrar o tubo de maior diâmetro para o qual a pasta permanece (na totalidade) no seu interior durante pelo menos os referidos 5 segundos.

A consistência será expressa pelo número de referência desse tubo (número de 1 a 10).

5.6 - Quando uma pasta apresenta consistência superior a 10, isto é, quando essa pasta se mantém, sem tombar, durante os 5 s no interior do tubo de maior diâmetro, há que recorrer, então, à agulha calibrada para se poder prosseguir a determinação.

5.7 - Começa-se por inverter a posição da copela para que o obturador (fechado) fique voltado para cima (fig. 3-A).

5.8 - Selecciona-se, então, um tubo de diâmetro médio que se coloca sobre a copela; interpõe-se entre a superfície do obturador e a base do tubo um papel de filtro de diâmetro superior ao do maior tubo.

5.9 - Enche-se o tubo com o revestimento em pasta e arrasa-se pelo nível superior daquele.

5.10 - Bloqueia-se a agulha no seu esquadro, na posição correspondente ao diâmetro do tubo.

5.11 - Introduz-se a agulha verticalmente na pasta contida no tubo, fazendo deslizar a haste não graduada do esquadro ao longo do bordo exterior do

Pa 10.3

tubo em questão.

5.12 - Puxando pela haste que se encontra na posição horizontal (haste graduada) suspende-se o conjunto tubo com pasta - agulha, ao mesmo tempo que se inicia a contagem de tempo durante 5 s(fig. 3-B).

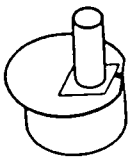


Fig. 3 - A

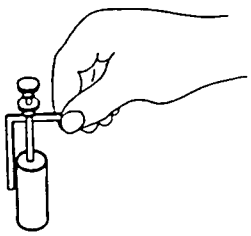


Fig. 3 - B

5.13 - Se o tubo com a pasta tombar em menos de 5 s repetem-se as operações referidas de 5.7 a 5.12 com um tubo de diâmetro inferior; se ao fim dos 5 s o tubo com a pasta não tiverem tombado, repetem-se aquelas operações escolhendo um tubo de diâmetro superior.

5.14 - Procede-se deste modo até se encontrar o tubo de maior diâmetro para o qual o tubo com a pasta (suspensos pela haste graduada do esquadro da agulha) não tomba em menos de 5 s.

A consistência será expressa pelo número correspondente à adição de 10 com o número de referência do tubo que satisfaz à condição referida em 5.14 (número de 11 a 20).

6 — RESULTADOS

O resultado exprime-se:

a) pelo número de referência do tubo de maior diâmetro para o qual a pasta permanece na totalidade no seu interior durante pelo menos 5 s, após abertura do obturador da copela (consistência de 1 a 10);

ou

b) pelo número correspondente à adição de 10 com o número de referência do tubo de maior diâmetro para o qual o tubo com a pasta, suspensos pela haste graduada do esquadro da agulha, não tombam em menos de 5 s (consistência de 11 a 20).

7 — BOLETIM DE ENSAIO

O boletim de ensaio deve fazer referência à presente ficha de ensaio e mencionar o seguinte:

a) designação identificativa do produto ensaiado;

b) qualquer alteração que eventualmente tenha sido introduzida na execução do ensaio;

c) descrição sumária das operações de preparação dos provetes;

d) resultado do ensaio;

e) data da realização do ensaio.

BIBLIOGRAFIA

COMMISSION CHARGÉE DE FORMULER DES AVIS TECHNIQUES SUR DES PROCÉDÉS, MATÉRIAUX, ÉLEMENTS OU ÉQUIPEMENTS UTILISÉS DANS LA CONSTRUCTION - Paris - Enduits extérieurs d'imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques. Modalités d'essais. Octobre 1975.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB) - Paris - Influence de la consistance des produits en pâte sur leur aptitude à l'emploi. 1975.

MHOP – LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – PORTUGAL

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS – NÚCLEO DE COMPORTAMENTO DAS CONSTRUÇÕES

FICHA DE ENSAIO

F E Pa 25

SfB (41) (42)

CDU 693.62

REVESTIMENTOS DE PAREDES

ENSAIO DE CHOQUE DE ESFERA

REVESTIMENTO DE PAREDES
REVÊTEMENT DE MUR
WALL COVERING

NOVEMBRO 1980

1 — OBJECTO

A presente ficha de ensaio destina-se a fixar o modo de avaliar a resistência dos revestimentos de paredes ao choque de corpos duros não cortantes (representados convencionalmente no ensaio por uma esfera).

2 — RESUMO DO PROCESSO

Medição e registo do diâmetro da mossa produzida pelo impacto duma esfera de aço sobre o revestimento a ensaiar, aplicado num murete.

3 — APARELHOS E UTENSÍLIOS

3.1 - "Martinet Baronnie" com o seguinte acessório: esfera (ver anexo).

3.2 - Régua metálica, ou qualquer outro instrumento, que permita determinar comprimentos com precisão de 1 mm.

4 — PROVETES

O ensaio é realizado sobre uma aplicação do revestimento num murete de cada um dos materiais de suporte previstos no seu campo de aplicação.

O revestimento é preparado e aplicado de acordo com as prescrições do fabricante para as aplicações em obra.

Os muretes deverão ter dimensões não inferiores a 2 m x 2 m.

NOTA: Nos casos em que o revestimento a ensaiar se destine a constituir a camada de acabamento dum processo de revestimento que englobe mais do que uma camada, a natureza do material constituinte do murete poderá ser irrelevante, caso em que interessará apenas que este seja previamente revestido com as camadas que habitualmente constituem a base subjacente ao revestimento objecto do ensaio. Se o fabricante previr mais do que um tipo de base que possa ser associada ao revestimento, haverá que executar um murete para cada uma delas.

5 — AMBIENTE ATMOSFÉRICO DE CONDICIONAMENTO E DE ENSAIO

5.1 - Revestimentos para paramentos interiores de paredes

Os provetes devem ser executados, secar e permanecer durante o ensaio em ambiente interior.

5.2 - Revestimentos para paramentos exteriores de paredes

Os provetes devem ser executados, secar e permanecer durante o ensaio em ambiente exterior.

6 - TÉCNICA

6.1 - Preparados os provetes, deixa-se o revestimento secar durante, pelo menos, 28 dias.

6.2 - Prepara-se o "martinet Baronnie" fixando a esfera na extremidade livre do braço.

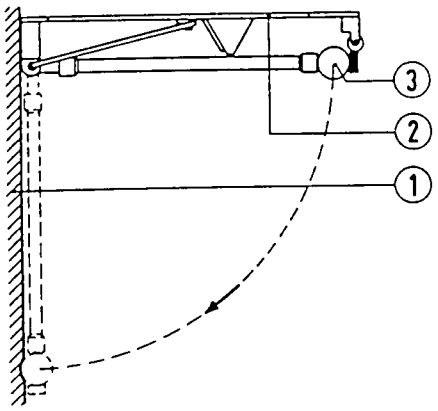
6.3 - Coloca-se o corpo do "martinet" na posição horizontal e aplica-se firmemente a cabeça desse aparelho contra a superfície a ensaiar. Mantem-se o braço do "martinet" ao longo do corpo, encostando a esfera ao rolo existente no pé do "martinet" (fig. 1). Verifica-se a horizontalidade do aparelho a fim de se garantir que a trajectória descrita pelo braço ao tombar se situa num plano vertical. Deixa-se, então, tombar livremente o braço a fim de se produzir o embate da esfera no murete, evitando contudo que seja transmitido mais do que um impacto.

6.4 - Realizam-se cinco ensaios sobre cada murete. Observam-se as degradações sofridas pelo revestimento nas áreas embatidas e medem-se os diâmetros das mossas produzidas.

7 — RESULTADOS

O resultado do ensaio exprime-se pelos diâmetros, em mm, das mossas resultantes dos cinco en

Pa 25.2



1 - revestimento
2 - "martinet Baronnie"
3 - esfera

Fig. 1

saios e pela respectiva média aritmética.

8 — BOLETIM DE ENSAIO

O boletim de ensaio deve fazer referência à presente ficha de ensaio e mencionar, ainda, o seguinte:

a) designação identificativa do produto ensaiado;

b) qualquer alteração eventualmente introduzida na execução do ensaio;

c) duração da secagem dos provetes;

d) caracterização dos ambientes atmosféricos onde decorreram a secagem e o ensaio do revestimento;

e) consumo de produto preconizado pelo fabricante para as aplicações em obra e consumo efectivamente verificado em cada provete;

f) caracterização resumida das degradações sofridas pelo revestimento nas áreas embatidas pela esfera;

g) diâmetros das cinco mossas produzidas e a média aritmética respectiva;

h) data da realização do ensaio.

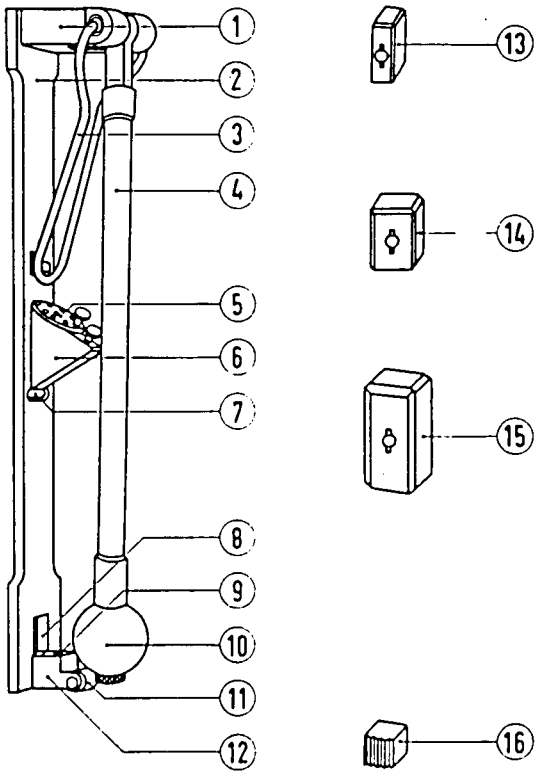
BIBLIOGRAFIA

UZAC, R.; VIGIER, J.; BARONNIE, P. - Essais de qualification des surfaces peintes. Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Paris, (80), Cahier 695, Juin 1966.

Pa 25.3

ANEXO

APARELHO "MARTINET BARONNIE"



1 - cabeça do "martinet"
2 - corpo do "martinet"
3 - punho
4 - braço
5 - disco
6 - suporte do disco
7 - nível
8 - abertura para introdução do bloco denteado
9 - fman de retenção do bloco denteado
10 - esfera
11 - rolo
12 - pé do "martinet"
13 - massa de 250 g
14 - massa de 500 g
15 - massa de 1 000 g
16 - bloco denteado

MHOP – LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – PORTUGAL

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS – NÚCLEO DE COMPORTAMENTO DAS CONSTRUÇÕES

FICHA DE ENSAIO

F E Pa 36

SfB (41) (42)

CDU 693.62

REVESTIMENTOS DE PAREDES

ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO

REVESTIMENTO DE PAREDES
REVÊTEMENT DE MUR
WALL COVERING

ABRIL 1986

1 — OBJECTO

A presente ficha de ensaio destina-se a fixar o modo de avaliar a aderência dos revestimentos de paredes a um qualquer tipo de material de suporte.

2 — RESUMO DO PROCESSO

Determinação da força necessária para provocar o arrancamento por tracção duma determinada área do revestimento, aplicado nos diversos tipos de material de suporte relativamente aos quais se pretende avaliar a capacidade de aderência do revestimento; cálculo da tensão que provoca a rotura no plano de contacto do revestimento com o suporte - - tensão de aderência.

3 — APARELHOS E UTENSÍLIOS

3.1 - Aparelho de arrancamento (fig. 1) constituído essencialmente por:

a) Um dinamómetro metálico de ar (1) colocado entre dois discos metálicos, (2) e (3). O disco inferior (3) possui três pés (4) dispostos simetricamente em relação ao centro.

b) Uma haste (5), munida de rosca nas duas extremidades, que atravessa os dois discos e o dinamómetro. Esta haste só pode ter movimentos longitudinais visto a sua rotação ser impedida por uma cavilha (6) alojada num disco (7) que, por sua vez, está fixo ao disco (2).

c) Uma peça (8), com uma cavidade interior terminando inferiormente por uma superfície esférica, que enrosca na rosca inferior da haste.

d) Um volante (9) que é enroscado na extremidade superior da haste e que se apoia sobre o disco (7) por meio dum rolamento de esferas (10).

e) Um parafuso (11), cuja cabeça esférica fica alojada na cavidade da peça (8).

f) Um manómetro com mostrador graduado (12).

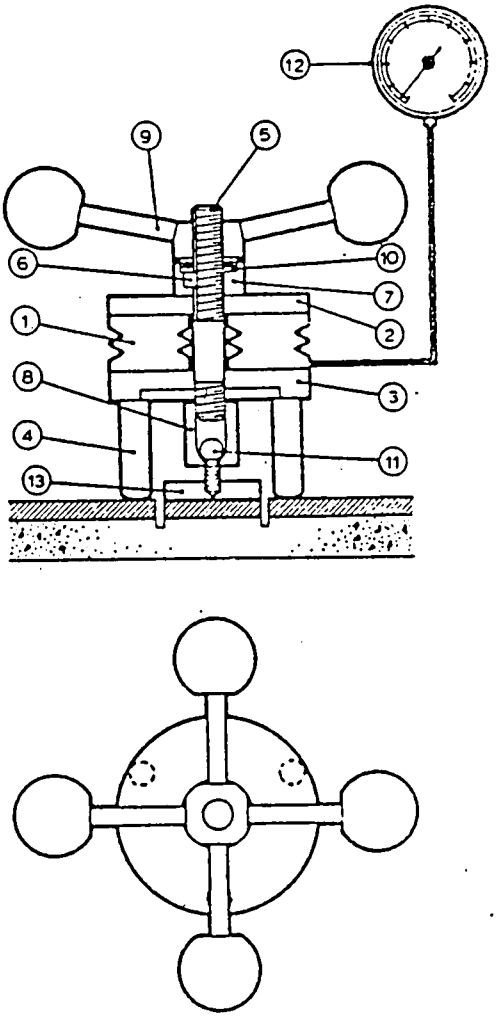


Fig. 1

Pa 36.2

3.2 - Pastilhas metálicas cilíndricas (13), com 50 mm de diâmetro e 10 mm de espessura, providas numa das faces duma rosca perfeitamente centrada.

3.3 - Engenho de furar provido duma broca circular oca, com 50 mm de diâmetro interior.

3.4 - Cola de alta resistência, por exemplo com base em resina epoxídica.

4 — PROVETES

4.1 - Preparação

a) Ensaios em laboratório

O ensaio é efectuado sobre aplicações do revestimento em bases construídas a partir dos materiais de suporte relativamente aos quais se pretende avaliar a capacidade de aderência do revestimento.

O revestimento é preparado e aplicado segundo as prescrições do fabricante para aplicações em obra. No caso dos revestimentos destinados preferencialmente a serem aplicados por projecção, o produto para ensaio deve ser colhido à saída da própria máquina de projecção.

b) Ensaios em obra

O ensaio é efectuado sobre a aplicação existente.

4.2 - Número de determinações

a) Ensaios em laboratório

São efectuadas pelo menos cinco determinações por cada tipo de material de suporte relativamente aos quais se pretende avaliar a capacidade de aderência do revestimento.

b) Ensaios em obra

Em paramentos exteriores de paredes são efectuadas pelos menos três determinações da aderência por cada 50 m^2 de paramento.

Em paramentos interiores de paredes a aderência é avaliada a partir de determinações efectuadas em painéis com comprimento (l) delimitado por todas as arestas existentes na parede e que se desenvolvam do tecto ao pavimento; a altura (h) dos painéis será sempre a distância do tecto ao pavimento. A área dum painel será, então, $S = l \times h$; a esta área não serão descontadas as áreas de vãos eventualmente existentes no painel. O número de determinações por painel será $n = S/1,5$, com um mínimo de cinco.

A localização das determinações deve ser feita ao acaso, repartida pela superfície dos painéis; os locais das determinações devem, no entanto, distar entre si pelo menos 0,20 m e distar dos bordos dos painéis ou de arestas intermédias pelo menos 0,10 m.

5 — AMBIENTE ATMOSFÉRICO DE CONDICIONAMENTO E DE ENSAIO

Os provetes para os ensaios de laboratório, após a aplicação do revestimento, devem ser condicionados num ambiente atmosférico caracterizado por $23 \pm 2°C$ de temperatura e $50 \pm 5\%$ de humidade relativa, durante, pelo menos 28 dias.

6 — TÉCNICA

6.1 - Concluído o endurecimento do revestimento, fazem-se, com o engenho de furar, cinco incisões no revestimento, de modo a que este seja cortado em toda a sua espessura.

6.2 - Com a cola de alta resistência, colam-se as pastilhas metálicas (3.2) sobre as zonas limitadas pelas incisões, evitando que a cola penetre nestas.

6.3 - Deixa-se a cola secar durante, pelo menos, 48 horas no ambiente atmosférico definido em 5.

6.4 - Enrosca-se o parafuso de cabeça esférica na pastilha metálica e introduz-se, de seguida, a cabeça do parafuso na cavidade da peça (8) através duma abertura lateral existente nesta.

6.5 - Verifica-se o zero no manómetro (12).

6.6 - Roda-se o volante de modo a comprimir o fole do dinamómetro, para se provocar simultâneamente um esforço de tracção na pastilha metálica, até que se verifique a rotura do plano de contacto do revestimento com o suporte.

6.7 - Lê-se no mostrador do manómetro, e regista-se, o valor da força máxima exercida.

6.8 - Regista-se a tipologia de rotura obtida: rotura de aderência (no plano revestimento-suporte), rotura no seio do revestimento, rotura no seio do suporte, ou rotura mista.

7 — RESULTADOS

Sendo, para cada determinação:

F - força de rotura, em N

S - área da pastilha metálica, em mm^2 (1963 mm^2)

a tensão de aderência, σa, em MPa, é

$$\sigma_a = \frac{F}{S}$$

O valor final da tensão de aderência será a média das determinações efectuadas.

Pa 36.3

8 — BOLETIM DE ENSAIO

O boletim de ensaio deve fazer referência à presente ficha e mencionar, ainda, o seguinte:

a) designação identificativa do produto ensaiado;

b) informação sobre qualquer alteração eventualmente introduzida na execução do ensaio;

c) identificação dos materiais de suporte ensaiados;

d) dimensões dos provetes correspondentes a cada um dos tipos de material de suporte;

e) descrição sumária das operações inerentes à preparação e aplicação do revestimento;

f) designação identificativa da cola de alta resistência utilizada;

g) valores individuais das determinações (forças e correspondentes tensões) e valor médio da tensão de aderência;

h) indicação das tipologias de rotura observadas;

i) data da realização do ensaio.

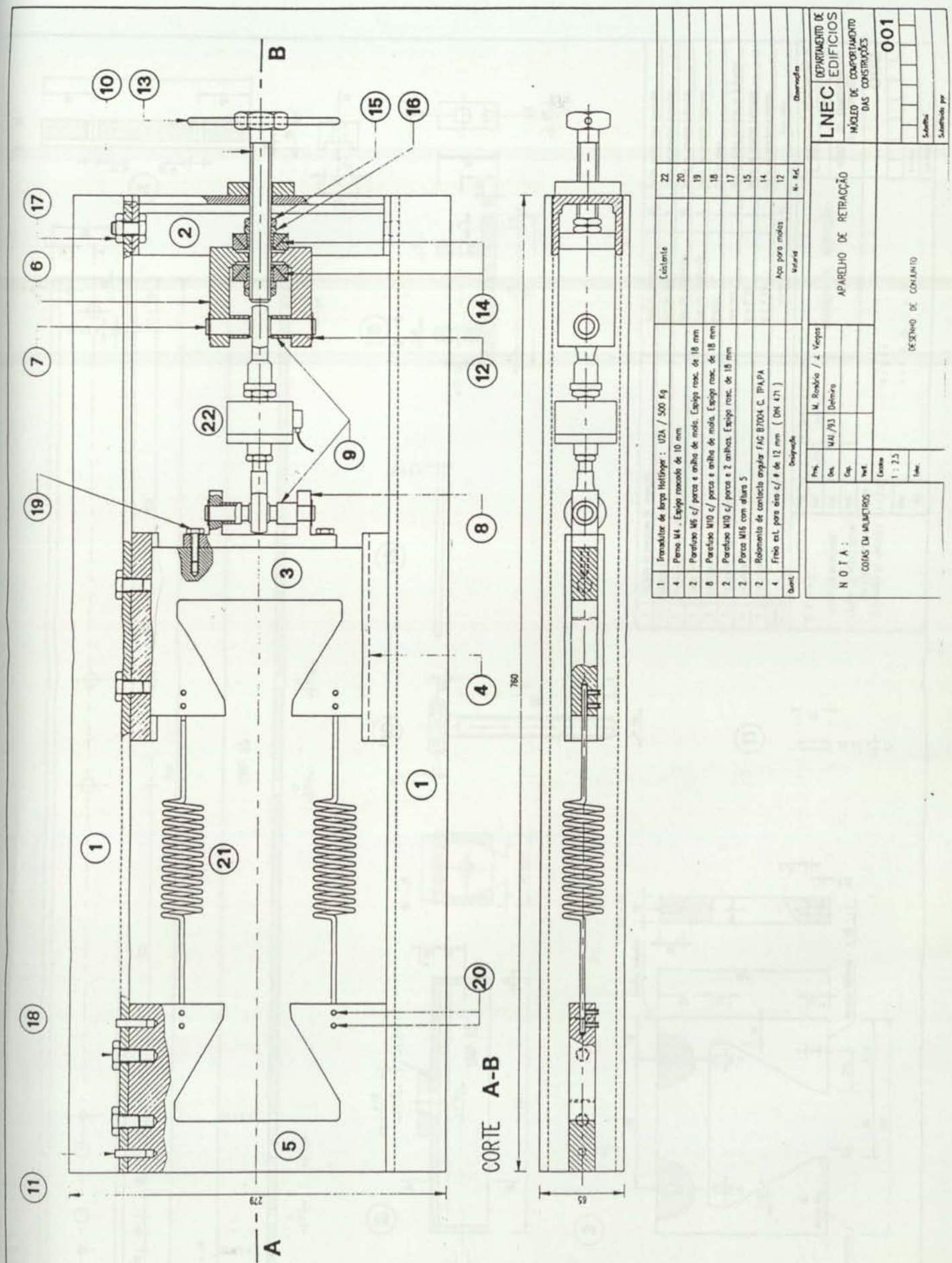
BIBLIOGRAFIA

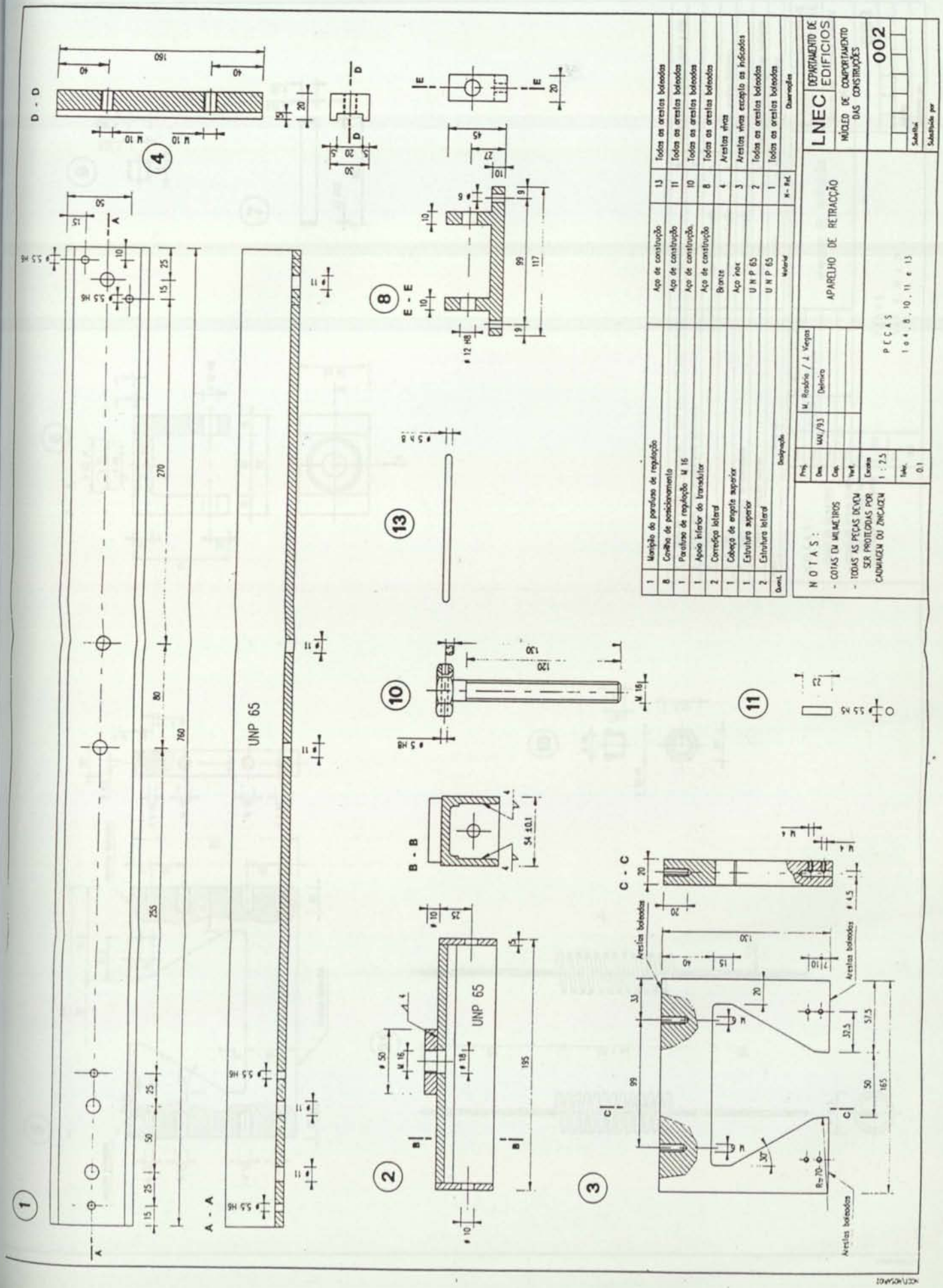
CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB) - Modalités d'essais des enduits d'imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques. Paris, CSTB, Cahiers du CSTB, Cahier nº 1779, Juin 1982.

GROUPE DE COORDINATION DES TEXTES TECHNIQUES - Paris - Travaux d'enduits intérieurs en plâtre. Cahier des Charges. Document Technique Unifié (DTU) nº 25.1. Paris, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Juillet 1975.

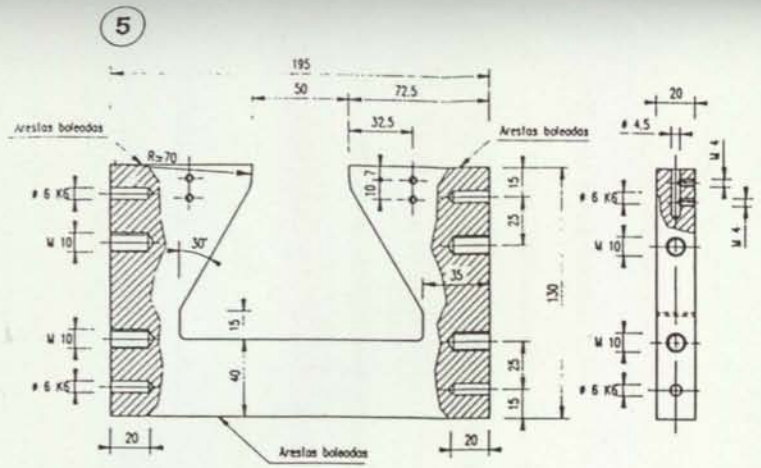
ANEXO II

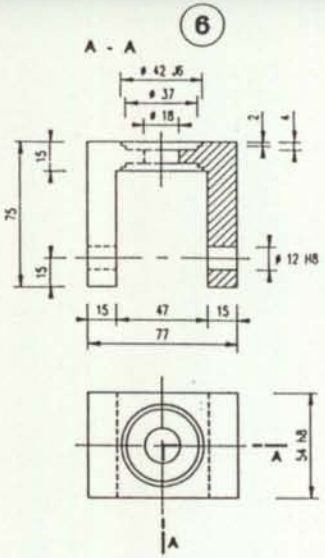
PROJECTO DO APARELHO DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA

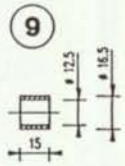

CORTE A-B
A
B
279
65
760
1 Transdutor de força Hottinger : U2A / 500 Kg
4 Perno M4 . Espiga rascada de 10 mm
2 Parafuso M6 c/ porca e anilha de mola. Espiga rasc. de 18 mm
8 Parafuso M10 c/ porca e anilha de mola. Espiga rasc. de 18 mm
2 Parafuso M10 c/ porca e 2 anilhas. Espiga rasc. de 18 mm
2 Porca M16 com altura 5
2 Rolamento de contacto angular FAG B7004 C. TPA.PA
4 Freio ext. para eixo c/ ø de 12 mm (DIN 471)
Quant.
Designação
Existente
Aço para molas
Material
Observações
APARELHO DE RETRACÇÃO
DESENHO DE CONJUNTO
NOTA:
COTAS EM MILIMETROS
M. Rosário / J. Viegas
MAI /93
Delmiro
1 : 2.5
LNEC
DEPARTAMENTO DE EDIFICIOS
NÚCLEO DE COMPORTAMENTO DAS CONSTRUÇÕES
001

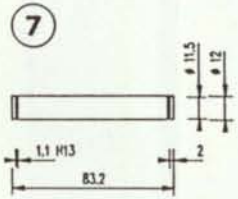


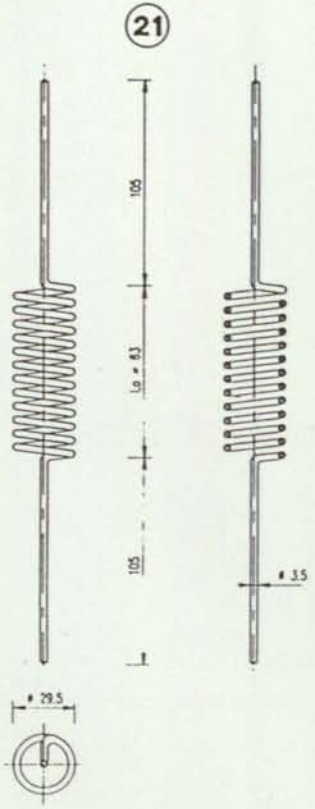
1 Manipulo do parafuso de regulação
8 Cavilha de posicionamento
1 Parafuso de regulação M 16
1 Apoio inferior do transdutor
2 Corrediço lateral
1 Cabeça de engate superior
1 Estrutura superior
2 Estrutura lateral
Quant. Designação
Aço de construção 13 Todas as arestas boleadas
Aço de construção 11 Todas as arestas boleadas
Aço de construção 10 Todas as arestas boleadas
Aço de construção 8 Todas as arestas boleadas
Bronze 4 Arestas vivas
Aço inox 3 Arestas vivas excepto as indicadas
U N P 65 2 Todas as arestas boleadas
U N P 65 1 Todas as arestas boleadas
Material N.- Ref. Observações
NOTAS:
- COTAS EM MILIMETROS
- TODAS AS PEÇAS DEVEM SER PROTEGIDAS POR CADMIAGEM OU ZINCAGEM
Proj. M. Rosário / J. Viegas
Des. MAI/93 Delmira
Cap.
Verif.
Escalas 1 : 2.5
Tolér. 0.1
APARELHO DE RETRACÇÃO
PEÇAS 1 a 4, 8, 10, 11 e 13
LNEC DEPARTAMENTO DE EDIFICIOS
NÚCLEO DE COMPORTAMENTO DAS CONSTRUÇÕES
002
Substitui
Substituído por
D - D
E - E
A - A
B - B
C - C
UNP 65
Arestas boleadas

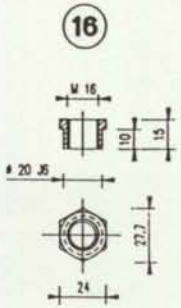












Quant.	Designação	Materiais	Nº Ref.	Observações
2	Mola de tracção c/ ø exterior = 29.5 mm, c/ 18 espiras úteis.	Aço inox	21	Extremidades afinhadas com o eixo
2	Porca M16 com encaixe para rolamento		16	
4	Espaçador	Aço de construção	9	
2	Eixo	Aço de construção	7	Todas as arestas boleadas
1	Apoio superior do transdutor	Aço de construção	6	Todas as arestas boleadas
1	Cabeço de engate inferior	Aço inox	5	Arestas vivas excepto as indicadas

NOTAS:

- COTAS EM MILIMETROS
- TODAS AS PEÇAS DEVEM SER PROTEGIDAS POR CADMIAGEM OU ZINCAGEM

Proj.		M. Rosário / J. Viegas
Des.	MAI./93	Delmiro
Cop.		
Verif.		
Escalas 1 : 2.5		
Toler. 0.1		

APARELHO DE RETRACÇÃO

PEÇAS
5 a 7 , 9 , 16 e 21

LNEC DEPARTAMENTO DE EDIFICIOS
NÚCLEO DE COMPORTAMENTO DAS CONSTRUÇÕES

003

Substitui

Substituído por

ANEXO III

FICHAS DE APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS NA EENRevPa

APLICAÇÕES EM MURETE - VERÃO

MURETE: 37d **ARGAMASSA: P**

DATA: 95-07-17

MANHÃ: Face Sul

TARDE: Face Norte

CONDIÇÕES AMBIENTES: 30°C/40% HR (às 14H); vento médio e seco.

ESPALHAMENTO: 116-109

RELAÇÃO A/C (volume/peso): 1,4-1,35 / 1,2

APLICAÇÃO:

1) Salpico 1:2 dois dias antes (95/07/14)
2) Pulverização com água, atirada com um pincel molhado num balde
3) Aplicação da camada de base 1:4 à colher, atirada com energia
4) Aperto com a colher
5) Alisamento com régua alternado com pequenos remendos e aperto com colher
6) Alisamento com talocha plástica alternado com pequenos remendos e aperto com colher
7) Passagem com esponja humedecida

OBSERVAÇÕES:

Aparentemente a argamassa aplicada era consideravelmente mais fluida que a preparada por nós para os ensaios.

Foram introduzidas duas sondas para avaliação da capacidade de impermeabilização.

Controlou-se a temperatura/humidade ambientes desde o início da aplicação até à idade de 28 d.

Tiraram-se 6 provetes para resistências à flexão e à compressão aos 7 e aos 28 dias, com exposição ao ambiente exterior.

Houve uma zona que descolou e caiu e teve que ser "remendada" (à esq., logo abaixo do meio do murete).

A duração da aplicação foi de cerca de 2 h cada face.

MURETE: 36d ARGAMASSA: CA

DATA: 95-07-18

MANHÃ: Faces Sul e Norte

TARDE: Topos

CONDIÇÕES AMBIENTES: 30°C/40% HR (às 14H); vento médio e seco.

ESPALHAMENTO: 115-129

RELAÇÃO A/L (volume/peso): 1,1-1,2 / 1,3-1,4

APLICAÇÃO:

1) Salpico 1:2 três dias antes (95/07/14)
2) Pulverização com água, atirada com um pincel molhado num balde
3) Aplicação da camada de base 1:1:6 à colher, atirada com energia
4) Aperto com a colher
5) Alisamento com régua alternado com pequenos remendos e aperto com colher
6) Alisamento com talocha plástica alternado com pequenos remendos e aperto com colher
7) Passagem com esponja humedecida

OBSERVAÇÕES:

Aparentemente a argamassa aplicada era consideravelmente mais fluida que a preparada por nós para os ensaios.

Foram introduzidas duas sondas para avaliação da capacidade de impermeabilização.

Controlou-se a temperatura/humidade ambientes desde o início da aplicação até à idade de 28d

Tiraram-se 6 provetes para resistências à flexão e à compressão aos 7 e aos 28 dias, com exposição ao ambiente exterior.

MURETE: 38d ARGAMASSA: R1

DATA: 95-07-20

MANHÃ: Face Sul e face Norte

TARDE: Topo

CONDIÇÕES AMBIENTES: 30°C/40% HR (às 14H); vento médio e seco.

ESPALHAMENTO: 110-111-99

RELAÇÃO A/C (volume/peso): 1,4-1,35-1,3 / 1,1

APLICAÇÃO:

1) Salpico 1:2 cinco dias antes (95/07/14)
2) Pulverização com água, atirada com um pincel molhado num balde
3) Aplicação da 1ª demão da camada de base 1:4 (10 mm de espessura) à colher, atirada com energia
4) Aplicação da rede (RV4 -10x10) ao alto, colando com o aperto da colher, e também com pequenas colheradas de argamassa aplicadas sobre ela.
5) Secagem durante cerca de 0,5 a 1 h?
6) Aplicação da 2ª demão da camada de base 1:4 (10 mm de espessura) á colher, atirada com energia
7) Aperto com a colher
8) Alisamento com régua de madeira alternado com pequenos remendos e aperto com colher
9) Alisamento com talocha plástica alternado com pequenos remendos e aperto com colher
10) Passagem com esponja humedecida

OBSERVAÇÕES:

Aparentemente a argamassa aplicada era consideravelmente mais fluida que a preparada por nós para os ensaios.

Foram introduzidas duas sondas para avaliação da capacidade de impermeabilização.

Controlou-se a temperatura/humidade ambientes desde o início da aplicação até à idade de 28d

A rede foi bastante fácil de aplicar e de colar, só causando algumas dificuldades nos topos, nas sobreposições.

MURETE: 39d **ARGAMASSA: FV^V**

DATA: 95-07-21

MANHÃ: Faces Sul e Norte - início

TARDE: Faces Sul e Norte - acabamento; topo

CONDIÇÕES AMBIENTES: 30°C/40% HR (às 14H); vento médio e seco.

ESPALHAMENTO: 123-125

RELAÇÃO A/C (volume/peso): 1,35-1,4-1,5 / 1,2

APLICAÇÃO:

1) Salpico 1:2 seis dias antes (95/07/14)
2) Pulverização com água, atirada com um pincel molhado num balde
3) Aplicação da camada de base 1:4 com fibra de vidro de 18 mm incorporada (0,3%), em volume) à colher, atirada com energia
4) Aperto com a colher
5) Alisamento com régua alternado com pequenos remendos e aperto com colher
6) Alisamento com talocha plástica alternado com pequenos remendos e aperto com colher
7) Passagem com esponja humedecida

OBSERVAÇÕES:

Aparentemente a argamassa aplicada era consideravelmente mais fluida que a preparada por nós para os ensaios.

Foram introduzidas duas sondas para avaliação da capacidade de impermeabilização.

Controlou-se a temperatura/humidade ambientes desde o início da aplicação até à idade de 28d

Tiraram-se 6 provetes para resistências à flexão e à compressão aos 7 e aos 28 dias, com exposição ao ambiente exterior.

Houve uma zona que descolou e caiu e teve que ser "remendada".

APLICAÇÕES EM MURETE - INVERNO

MURETE: 37e ARGAMASSA: P

DATA: 96-02-07

MANHÃ: Faces Sul e Norte, 1ª demão

TARDE: Faces Sul e Norte, 2ª demão

CONDIÇÕES AMBIENTES: cerca de 10-12°C/85% HR; vento fraco húmido; chuviscos.

ESPALHAMENTO: 93-91

RELAÇÃO A/C (volume/peso): 0,84-0,84-0,90 / 0,81

APLICAÇÃO:

1) Salpico 1:2 cinco dias antes (95/02/02)
2) Aplicação da camada de base 1:4 à colher, atirada com energia, em duas demãos com algumas horas de intervalo
3) Aperto com a colher
4) Alisamento com régua alternado com pequenos remendos e aperto com colher
5) Alisamento com talocha plástica alternado com pequenos remendos e aperto com colher
6) Passagem com esponja humedecida

OBSERVAÇÕES:

Aparentemente a argamassa aplicada era de consistência semelhante à preparada por nós para os ensaios.

Foram introduzidas três sondas para avaliação da capacidade de impermeabilização.

Controlou-se a temperatura/humidade ambientes desde o início da aplicação até à idade de 28 d.

Tiraram-se 6 provetes para resistências à flexão e à compressão aos 7 e aos 28 dias, com exposição ao ambiente exterior.

A argamassa teve dificuldade em "puxar", pelo que foi necessário aplicá-la em duas demãos, com algum tempo de secagem entre elas.

A duração da aplicação foi de cerca de 1,5 h a 1ª demão e 1,5 h a 2ª.

MURETE: 36e ARGAMASSA: CA

DATA: 96-02-09

MANHÃ: Faces Sul e Norte, 1ª demão

TARDE: Faces Sul e Norte, 2ª demão

CONDIÇÕES AMBIENTES: 15°C/65% HR (às 14H); tempo húmido e sem vento.

ESPALHAMENTO: 102-68-108

RELAÇÃO A/L (volume/peso): 0,81-0,81-0,83 / 1,0

APLICAÇÃO:

1) Salpico 1:2 sete dias antes (95/02/02)
2) Aplicação da camada de base 1:1:6 à colher, atirada com energia, em duas demãos realizadas com algumas horas de intervalo
3) Aperto com a colher
4) Alisamento com régua de madeira alternado com pequenos remendos e aperto com colher
5) Alisamento com talocha plástica alternado com pequenos remendos e aperto com colher
6) Passagem com esponja humedecida

OBSERVAÇÕES:

Foram introduzidas três sondas para avaliação da capacidade de impermeabilização.

Controlou-se a temperatura/humidade ambientes desde o início da aplicação até à idade de 28d

Tiraram-se 6 provetes para resistências à flexão e à compressão aos 7 e aos 28 dias, com exposição ao ambiente exterior.

MURETE: 38e ARGAMASSA: R2

DATA: 96-02-08

MANHÃ: Face Sul e face Norte, 1ª camada

TARDE: Face Sul e face Norte, colocação da rede (RV2-4,5x4,5) e 2ª camada

CONDIÇÕES AMBIENTES: 15°C/60% HR (às 14H); vento fraco.

ESPALHAMENTO: 89-69-96

RELAÇÃO A/C (volume/peso): 0.83-0.83-0.86 / 0.83

APLICAÇÃO:

1) Salpico 1:2 seis dias antes (96/02/02)
2) Aplicação da 1ª demão da camada de base 1:4 (10 mm de espessura) à colher, atirada com energia
3) Aplicação da rede ao alto, colando com o aperto da colher, e também com pequenas colheradas de argamassa aplicadas sobre ela.
4) Secagem durante cerca de 3 h
5) Aplicação da 2ª demão da camada de base 1:4 (10 mm de espessura) á colher, atirada com energia
6) Aperto com a colher
7) Alisamento com régua alternado com pequenos remendos e aperto com colher
8) Alisamento com talocha plástica alternado com pequenos remendos e aperto com colher
9) Passagem com esponja humedecida

OBSERVAÇÕES:

Foram introduzidas três sondas para avaliação da capacidade de impermeabilização.

Controlou-se a temperatura/humidade ambientes desde o início da aplicação até à idade de 28d

A rede foi difícil de aplicar e de colar, devido à abertura de malha demasiado pequena para a passagem dos inertes. Chegou a descolar em placa, quando se estava a aplicar a 2ª camada.

MURETE: 39e **ARGAMASSA: FA[I]**

DATA: 96-02-13

MANHÃ: Faces Sul e Norte - 1ª e 2ª demãos

TARDE: Faces Sul e Norte - acabamento; topo

CONDIÇÕES AMBIENTES: 15°C/80% HR (às 14H); sem vento; chuva à hora do almoço e chuviscos à tarde.

ESPALHAMENTO: 80-70

RELAÇÃO A/C (volume/peso): 0,80-0,80 / 0,68

APLICAÇÃO:

1) Salpico 1:2 onze dias antes (95/02/02)
2) Aplicação da camada de base 1:4 com fibra de polipropileno de 5mm incorporada (1%), em volume) à colher, atirada com energia
3) Aperto com a colher
4) Alisamento com régua de madeira alternado com pequenos remendos e aperto com colher
5) Alisamento com talocha plástica alternado com pequenos remendos e aperto com colher
6) Passagem com esponja humedecida

OBSERVAÇÕES:

Foram introduzidas três sondas para avaliação da capacidade de impermeabilização.

Controlou-se a temperatura/humidade ambientes desde o início da aplicação até à idade de 28d

Tiraram-se 6 provetes para resistências à flexão e à compressão aos 7 e aos 28 dias, com exposição ao ambiente exterior.

Houve dificuldades de aderência e foi preciso aplicar em demãos pouco espessas, pois a argamassa tinha tendência a cair.

ANEXO IV

RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES PARA SELECÇÃO DAS ARGAMASSAS COM FIBRAS

As argamassas obtidas foram designadas pela letra correspondente ao tipo de fibra usada (A, B, E ou V) seguida de um número i, indicativo do teor volumétrico em que é incorporada, relativamente ao volume total de argamassa em pasta:

$i = [v_f/(v_{ci} + v_{ar} + v_{ag} + v_f)] \times 100$.

Assim, as argamassas ensaiadas, todas com traço volumétrico 1:4 (cimento : areia do rio), foram as seguintes:

- P - argamassa padrão;
- P+IA - argamassa padrão adjuvada com um introdutor de ar, na proporção ponderal de 0,15% em relação ao cimento;
- FA1, FA08, FA06 - argamassas com fibra de polipropileno fibrilada (A), em teor volumétrico de, respectivamente, 1%, 0,8% e 0,6% do volume total de argamassa;
- FB04, FB03, FB02 - argamassas com fibra de polipropileno fibrilada (B), em teor volumétrico de, respectivamente, 0,4%, 0,3% e 0,2% do volume total de argamassa em pasta;
- FB04+IA - argamassa com constituição idêntica à FB04, mas adjuvada com um introdutor de ar, na proporção de 0,15% em relação ao cimento;
- FE04, FE03, FE02 - argamassas com fibra acrílica (E), em teor volumétrico de, respectivamente, 0,4%, 0,3% e 0,2% do volume total de argamassa em pasta;
- FV03, FV02, FV01 - argamassas com fibra de vidro resistente aos álcalis (V), em teor volumétrico de, respectivamente, 0,3%, 0,2% e 0,1% do volume total de argamassa em pasta.

Nos quadros seguintes apresentam-se os resultados dos ensaios realizados sobre as várias argamassas:

Quadro IV.1 - Síntese dos resultados dos ensaios sobre as argamassas endurecidas - Argamassas com fibra A

CARACTERÍSTICAS	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS PARA AS ARGAMASSAS			
		ARGAMASSA PADRÃO	ARGAMASSAS COM FIBRA A (polipropileno)		
			FA1	FA08	FA06
MASSA VOLÚMICA (kg/m^3)	7 28	2016 1997	1671 1661	1735 1742	1745 1734
RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO (MPa)	7 28	1,11 1,13	0,71 0,79	0,85 0,85	0,82 0,89
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	7 28	3,58 3,23	2,52 2,91	2,95 3,23	2,86 2,76
VARIAÇÕES DIMENSIONAIS (mm/m)	3 7 14 28	0,065 0,267 0,360 0,371	0,087 0,233 0,308 0,321	0,108 0,258 0,350 0,392	0,092 0,254 0,313 0,358
VARIAÇÕES PONDERAIS (kg/m^3)	3 7 14 28	49,8 74,8 74,5 69,9	17,9 28,3 26,3 24,7	17,1 36,0 37,4 37,7	14,6 31,3 30,6 26,1
VARIAÇÕES PONDERAIS (%)	3 7 14 28	2,60 3,91 3,94 3,65	1,07 1,70 1,58 1,49	0,96 2,01 2,09 2,10	0,82 1,75 1,72 1,46
COEFICIENTE DE CAPILARIDADE ($ng/dm^2.min^{1/2}$)	28	14,8	12,7	13,7	12,7
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MPa)	120	6830	5032	6830	5980
ADERÊNCIA (MPa)	28	0,07 (a)	0,05 (c)	0,04 (c)	0,04 (a)
REACÇÃO AO FOGO	28	M0	M0	-	-

(a) - Rotura predominantemente por aderência.
(c) - Rotura predominantemente por coesão.

Quadro IV.2- Síntese dos resultados dos ensaios sobre argamassas endurecidas - Argamassas com fibra B

CARACTERÍSTICAS	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS PARA AS ARGAMASSAS					
		ARGAMASSA PADRÃO	ARGAMASSA PADRÃO+IA	ARGAMASSAS COM FIBRA B (polipropileno)			
				FB04	FB04+IA	FB03	FB02
MASSA VOLÚMICA (kg/m^3)	7	2016	1723	1745	1755	1757	1813
	28	1997	1739	1765	1735	1770	1789
RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO (MPa)	7	1,11	0,90	0,83	0,90	0,87	0,91
	28	1,13	0,92	0,82	0,88	0,81	0,89
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	7	3,58	2,76	3,43	3,70	3,11	4,05
	28	3,23	2,86	3,23	3,22	3,41	3,74
VARIAÇÕES DIMENSIONAIS (mm/m)	3	0,065	0,219	0,063	0,169	0,079	0,062
	7	0,267	0,248	0,275	0,231	0,288	0,248
	14	0,360	0,279	0,321	0,263	0,308	0,348
	28	0,371	0,346	0,361	0,319	0,335	0,356
VARIAÇÕES PONDERAIS (kg/m^3)	3	49,8	69,4	34,2	107,6	30,1	28,2
	7	74,8	71,4	63,5	115,4	53,9	56,6
	14	74,5	70,3	67,1	115,8	56,3	58,8
	28	69,9	66,2	63,6	112,2	52,6	57,0
VARIAÇÕES PONDERAIS (%)	3	2,60	3,84	1,87	5,76	1,65	1,54
	7	3,91	3,95	3,46	6,18	2,94	3,08
	14	3,94	3,89	3,67	6,21	3,07	3,19
	28	3,65	3,66	3,47	6,00	2,87	3,20
COEFICIENTE DE CAPILARIDADE ($ng/dm^2.min^{1/2}$)	28	14,8	10,4	18,5	16,5	17,7	19,2
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MPa)	120	6830	6053	4781	4715	4754	4841
ADERÊNCIA (MPa)	28	0,07 (a)	0,09 (a+c)	0,16 (a)	0,08 (a)	0,15 (a+c)	0,13 (a)
REACÇÃO AO FOGO	28	M0	-	M0	-	-	-

(a) - Rotura predominantemente por aderência.
(c) - Rotura predominantemente por coesão.
(a+c) - Rotura por aderência ou por coesão, sem predominância nítida de um dos casos.

Quadro IV.3 - Síntese dos resultados dos ensaios sobre argamassas endurecidas - Argamassas com fibra E

CARACTERÍSTICAS	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS PARA AS ARGAMASSAS			
		ARGAMASSA PADRÃO	ARGAMASSAS COM FIBRA E (acrílica)		
			FE04	FE03	FE02
MASSA VOLÚMICA (kg/m^3)	7 28	2016 1997	1684 1686	1704 1717	1751 1761
RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO (MPa)	7 28	1,11 1,13	0,92 0,88	0,75 0,79	0,88 0,94
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	7 28	3,58 3,23	3,85 3,75	2,27 3,15	2,51 3,13
VARIAÇÕES DIMENSIONAIS (mm/m)	3 7 14 28	0,065 0,267 0,360 0,371	0,079 0,277 0,330 0,371	0,067 0,271 0,317 0,350	0,096 0,279 0,325 0,359
VARIAÇÕES PONDERAIS (kg/m^3)	3 7 14 28	49,8 74,8 74,5 69,9	44,1 64,1 62,4 59,9	24,2 49,0 48,6 45,6	26,6 44,8 43,5 40,6
VARIAÇÕES PONDERAIS (%)	3 7 14 28	2,60 3,91 3,94 3,65	2,51 3,64 3,55 3,41	1,38 2,80 2,77 2,60	1,50 2,52 2,45 2,29
COEFICIENTE DE CAPILARIDADE ($ng/dm^2.min^{1/2}$)	28	14,8	14,1	13,6	14,3
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MPa)	120	6830	5229	5223	4920
ADERÊNCIA (MPa)	28	0,07 (a)	0,16 (a)	0,09 (a)	0,13 (a)

(a) - Rotura predominantemente por aderência.

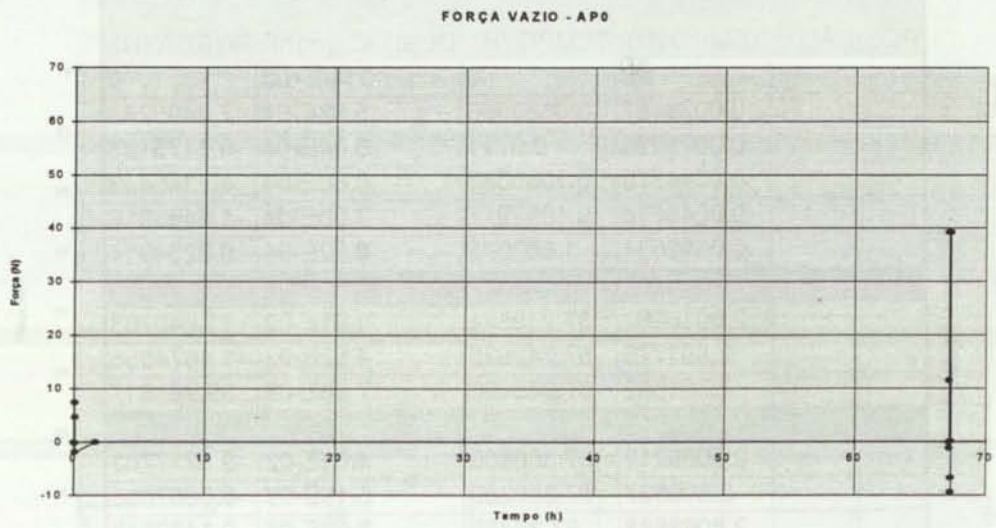
Quadro IV.4 - Síntese dos resultados dos ensaios sobre argamassas endurecidas - Argamassas com fibra V

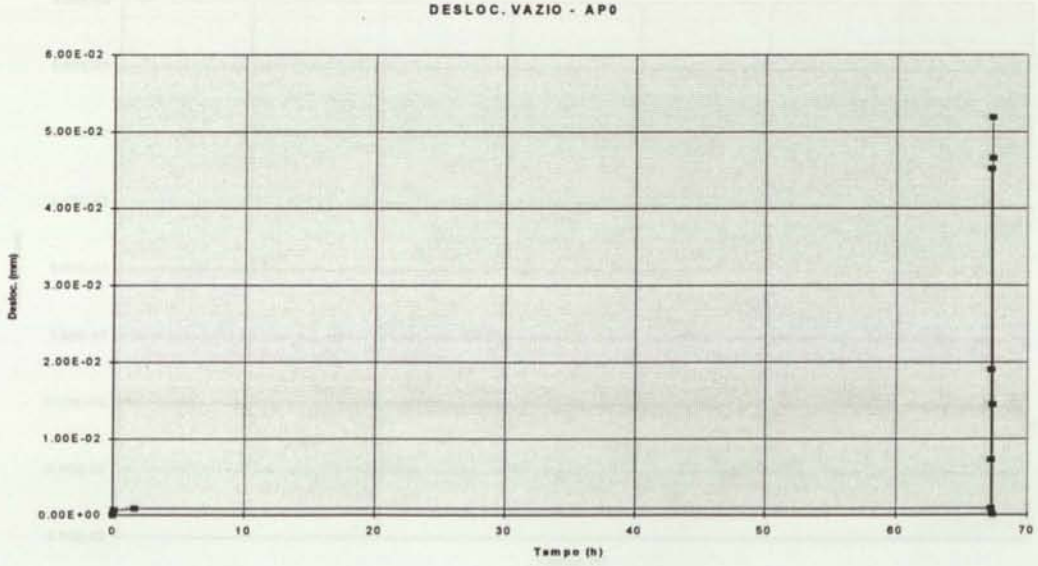
CARACTERÍSTICAS	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS PARA AS ARGAMASSAS			
		ARGAMASSA PADRÃO	ARGAMASSAS COM FIBRA V (vidro)		
			FV03	FV02	FV01
MASSA VOLÚMICA (kg/m^3)	7	2016	1622	1691	1749
	28	1997	1642	1698	1746
RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO (MPa)	7	1,11	0,98	0,96	0,85
	28	1,13	0,89	1,11	0,86
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	7	3,58	3,14	3,67	3,28
	28	3,23	3,24	3,64	3,36
VARIAÇÕES DIMENSIONAIS (mm/m)	3	0,065	0,077	0,058	0,046
	7	0,267	0,240	0,231	0,221
	14	0,360	0,290	0,290	0,300
	28	0,371	0,323	0,315	0,346
VARIAÇÕES PONDERAIS (kg/m^3)	3	49,8	25,4	43,5	31,9
	7	74,8	45,0	66,5	58,2
	14	74,5	45,2	67,2	59,4
	28	69,9	40,3	62,2	57,1
VARIAÇÕES PONDERAIS (%)	3	2,60	1,50	2,45	1,74
	7	3,91	2,66	3,76	3,18
	14	3,94	2,67	3,79	3,19
	28	3,65	2,38	3,51	3,11
COEFICIENTE DE CAPILARIDADE ($ng/dm^2.min^{1/2}$)	28	14,8	11,4	11,5	13,3
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MPa)	120	6830	4274	5032	6118
ADERÊNCIA (MPa)	28	0,07 (a)	0,13 (a+c)	0,15 (a)	0,16 (a)

(a) - Rotura predominantemente por aderência.
(a+c) - Rotura por aderência ou por coesão, sem predominância nítida de um dos casos.

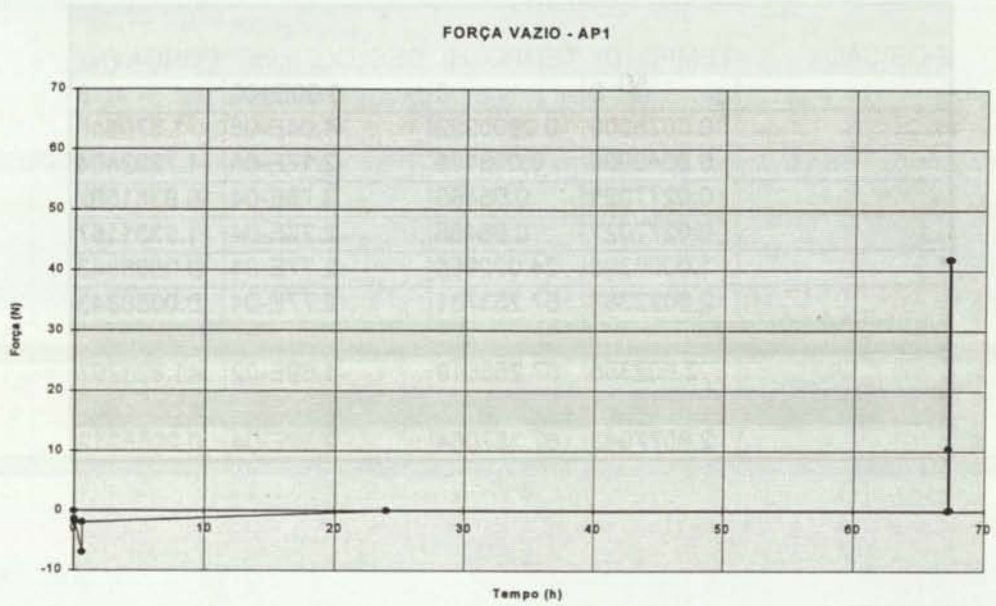
ANEXO V

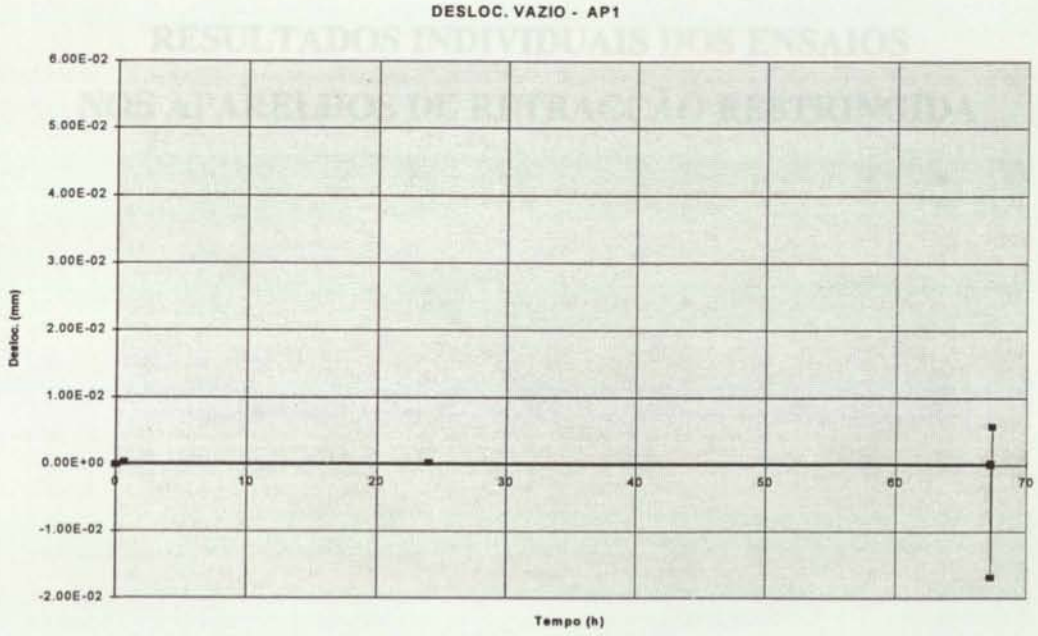
RESULTADOS DAS MEDIÇÕES COM OS APARELHOS VAZIOS


FORÇA VAZIO - AP0
Força (N)
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
0
10
20
30
40
50
60
70
Tempo (h)


DESLOC. VAZIO - AP0
Desloc. (mm)
6.00E-02
5.00E-02
4.00E-02
3.00E-02
2.00E-02
1.00E-02
0.00E+00
0
10
20
30
40
50
60
70
Tempo (h)

POSIÇÃO	TEMPO (D)	TEMPO (H)	DESLOC. (mm)	FORÇA (N)
	0	0	0.00E+00	0
	0.0028481	0.0683556	5.82E-04	7.4496243
	0.0029625	0.0711	6.54E-04	-0.1175127
	0.0044378	0.1065083	6.60E-04	4.7346439
	0.0045538	0.1092917	7.06E-04	-1.8463919
	0.0692531	1.662075	8.82E-04	0.0204914
VERTICAL	2.8016602	67.239844	8.82E-04	0.0204914
	2.8016602	67.239844	1.91E-02	11.540763
	2.801776	67.242625	4.52E-02	-1.1674556
	2.801892	67.245408	7.26E-03	39.285817
HORIZONTAL	2.8064057	67.353736	1.45E-02	39.214832
	2.8065212	67.356508	4.65E-02	-9.3217703
	2.806637	67.359289	5.19E-02	-6.6867333
	2.8068688	67.36485	6.03E-05	0.1439542


FORÇA VAZIO - AP1
Força (N)
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
10
20
30
40
50
60
70
Tempo (h)


DESLOC. VAZIO - AP1
Desloc. (mm)
6.00E-02
5.00E-02
4.00E-02
3.00E-02
2.00E-02
1.00E-02
0.00E+00
-1.00E-02
-2.00E-02
0
10
20
30
40
50
60
70
Tempo (h)

POSIÇÃO	TEMPO (D)	TEMPO (H)	DESLOC. (mm)	FORÇA (N)
	0	0	0.00E+00	0
	0.0025009	0.0600222	-6.04E-05	-1.376646
	0.0040906	0.098175	-2.17E-05	-1.7292404
	0.0277021	0.66485	3.78E-04	-6.9381582
	0.0277021	0.66485	2.77E-04	-1.9331157
	1.0000398	24.000956	2.77E-04	0.0668843
	2.8022388	67.253731	2.77E-04	0.0668843
VERTICAL	2.8022388	67.253731	-2.54E-05	10.451021
	2.802355	67.256519	-1.69E-02	41.823797
HORIZONTAL	2.8074476	67.378742	5.77E-03	41.823797
	2.8077943	67.387064	2.39E-04	0.2055312

ANEXO VI

RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS NOS APARELHOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA

QUADRO VI.1 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Ambiente 1

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA						
		FORÇA MÁXIMA F_r (N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	RETRACÇÃO LIVRE ε_r (mm/m)	ENERGIA DE ROTURA POR TRACÇÃO G (N.mm)	DEF. MÁXIMA NA ROTURA dr (mm/m)	MÓDULO DE ROTURA À TRACÇÃO Mt (Mpa)	MÓD. ELAST. EQUIV. E_{eq} (MPa)
P	1	28-19-22-15-19-25-16	91-231-159-210-111-165	0.012-+.001-.003-.028-.012-.015	46.5-60.5-63.3-64.1-61.6-55.0	.008-.081-.053-..039-.041-.048	18665-6289-10426-7350-17403-14503	834-947-538-1016-1240-455
	3	154-109-128-137-125-129	365-362-128-137-380-360	.127-.157-.126-.119-.138-.169	57.4-42.9-57.7-62.960.3-63.5	.085-.089-*-.078-*-.180	1433-1740-*-5747-*-2950	934-627-846-912-785-880
	7	115-119-153-153-125-148	115-119-462-465-453-148	.155-.160-.181-.151-.132-.117	97.7-43.0-87.4-95.6-47.5-46.2	.043-*-.065-102-*-*	6289-*5067-6188-*-*	630-658-874-843-704-677
	28	106-99-187-141-159-135	123-227-269-326-362-260	.244-.202-.123-.190-.201-.128	-	.118-.126-.119-.109-.106-.113	1025-942-955-837-1076-803	605-577-712-530-848-579
	60	98-81-153-113-129-109	205-250-250-255-200-212	.244-.136-.202-.194-.210-.132	47.3-52.6-55.2-49.3-48.0-52.1	.179-.157-.086-.097-.081-.089	1055-907-1110-801-839-925	520-505-460-705-705-480
	140	139-99-120-119-129-112	140-100-114-120-129-112	.245-.125-.276-.215-.230-.245	46.0-60.4-76.3-48.4-62.1-55.2	.001-.002-.001-0-.001-.001	*-*-*-*-*-*	505-500-450-705-680-460
FV	1	3-3-7-9-6-5	192-181-180-188-191-182	.079-.013-.046-.022-.065-.050	83.4-88.4-83.2-85.1-87.0-84.5	.005-.006-..005-.006-.006	78266-61875-75266-63452-69520-72031	144-178-115-95-154-119
	3	115-110-104-111-101-100	240-264-141-251-238-214	.181-.128-.155-.132-.171-.166	60.4-86.2-69.6-115.9-75.7-88.3	.072-.113-.245-.233-.180-.144	4345-3421-270-1395-2530-2204	656-725-755-695-668-659
	7	101-100-102-90-98-95	318-267-296-302-281-287	.181-.141-.161-.145-.178-.172	129.6-110.2-118.5-114.9-121.4-115	.268-.123-.235-.188-.174.182	1258-1199-1245-1202-1235-1242	615-632-552-647-546-552-596
	28	93-86-94-97-92-99	284-255-214-226-274-252	-	-	.152-.175-.184-.143-.201-.166	4026-3153-2987-.3031-.2750-3116	-
	60	88-70-81-83-89-76	241-187-224-203-199-228	-	90.5-56.5-78.5-83.2-69.0-86.4	411-.077-.23-.186-.095-.080	1755-2277-2428-2535-2649-2629	-

BIBLIOTECA FEUP PORTO

QUADRO VI.1 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Ambiente 1 (contin,)

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA						
		FORÇA MÁXIMA F_r (N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	RETRACÇÃO LIVRE ε_r (mm/m)	ENERGIA DE ROTURA POR TRACÇÃO G (N.mm)	DEF. MÁXIMA NA ROTURA dr (mm/m)	MÓDULO DE ROTURA À TRACÇÃO Mt (Mpa)	MÓD. ELAST. EQUIV. E_{eq} (MPa)
FPP	1	8-17-9-19-10-8	239-158-176-205-187-224	.033-.056-.044-.037-.040-.038	81.9-88.1-83.2-86.4-81.0-88.9	.064-.016-.053-.029-.035-.044	6715-17146-12430-16429-10245-8600	223-253-276-320-314-295
	3	111-119-123-128-107-109	128-172-155-128-107-235	.136-.152-.169-.143-.158-.139	73.7-61.6-79.6-69.9-45.6-86.3	.139-.151-.224-*-*-.283	209-3264-241-*-*-1242	682-751-794-760-819-764
	7	122-114-118-82-109-110	301-232-280-243-244-296	.136-.156-.177-.162-.145-.157	64.3-61.1-57.3-54.9-58-60.6	.245-.188-.220-.196-.236-.202	1876-1629-1648-1749-1821-1766	765-711-733-535-625-664
	28	108-81-97-102-95-99	158-123-91-110-133-128	-	-	.186-.169-.136-.165-.193-.156	3350-2955-3123-3430-2801-3402	-
	60	99-61-87-68-71-83	259-234-238-252-240-248	-	77.3-54.0-66.0-72.5-59.6-62.1	.231-.321-.290-.236-.324-.239	1364-1430-1536-1860-1726-1433	-
R1	7	89-88-73-72-82-79	385-473-397-412-469-433	.226-.180-.185-.213-.221-.192	743-697-710-726-702-677	1.083-.332-.603-.792-.1.034-.423	473-375-96-102-174-205	379-456-385-393-377-370
R2	7	151-150-148-145-162-150	459-376-384-422-395-456	.167-.188-.165-.172-.180-.175	741-746.3-763.2-764.6-745.0-749.8	.223-.214-.208-.222-.213-.212	148-168-183-196-159-167	921-788-775-810-883-844
R3	7	126-91-112-95-118-116	415-381-395-410-408-386	.143-.148-.145-.151-.147-.142	149.3-175.1-146.1-153.6-166.0-151.2	.285-.457-.356-.298-.422-.391	30-89-56-39-33-52	900-620-731-682-790-725

QUADRO VI.1 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Ambiente 1 (cont.)

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA						
		FORÇA MÁXIMA F_r (N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	RETRACÇÃO LIVRE ε_r (mm/m)	ENERGIA DE ROTURA POR TRACÇÃO G (N.mm)	DEF. MÁXIMA NA ROTURA dr (mm/m)	MÓDULO DE ROTURA À TRACÇÃO Mt (Mpa)	MÓD. ELAST. EQUIV. E_{eq} (MPa)
M1	7	71-67-53-59-58-55	294-378-315-324-321-334	.326-.357-.387-.373-.365-.342	105.5-104.3-106.6-174.5-126.1-122.0	1.504-1353-1177-1.563-1.103-1.015	490-498-327-473-446-512	188-192-152-155-163-169
M2	7	111-127-128-96-122-115	346-425-393-262-237-388	.335-.098-.110-.242-.209-.272	54.1-50.1-46.9-112.8-56.6-174.5	.145-.138-.126-.564-.032-.579	3214-3810-3735-3543-2889-3915	428-572-433-431-527-528
M3	7	98-99-99-91-92-94	501-430-96-428-499-92	.458-.528-.597-.482-.507-.583	60.8-108.7-120.6-98.4-63.2-138.9	*-.344-.387-.396-*-.205	*-1589-2091-1415-*-2290	189-180-186-166-169-171
M4	7	101-97-81-98-100-101	101-97-81-93-95-97	-	54.1-50.7-59.3-58.6-52.0-53.9	-	-	-
PR	7	73-97-72-88-81-79	1347-1274-1463-1376-1285-1398	.511-.482-.578-.503-..555-.496	616.3-621.4-604.9-545.5-536.0-492.2	1.029-1.186-1.560-1.034-1.530-1.254	3098-2479-2229-2650-2347-2803	145-205-127-137-148-164
CA	7	77-6-68-46-51-46	203-136-193-46-163-127	.155-.128-.161-.145-.139-.150	48.8-17.3-50.9-74-78.4-77.2	.301-*-.434-.130-.442-.415	1038-*-659-666-983-1084	487-36-431-290-393-354
CH	7	58-50-68-54-63-61	80-58-68-66-74-61	.146-.086-.116-.128-.095-.132	49.7-63.2-51.4-52.5-61.0-54.3	.06-.002-*-*-.014-.006	916-12237-8595-4542	405-587-570-478-456-520
Pa	7	151-115-119-129-118-136	429-393-119-412-117-416	.091-.104-.088-.099-.101-.092	205.5-89.1-53.9-54.2-154.2-160.6	.158-.182-*-*-.193-.205	8931-8456-*-*-8712-8686	1692-1124-1389-1273-1480-1182
Pac	7	115-136-148-130-131-142	352-356-148-353-357-142	.349-.408-.464-.355-.442-.371	124.3-79.1-58.4-97.5-55.3-92.1	.120-.108-*-.031-*-.042	4914-5107-*-5183-*-4835	335-340-325-314-312-327
P3	7	181-171-228-198-211-176	411-569-228-198-476-529	.182-.166-.171-.176-.169-.170	138.5-121.2-110.5-129.2-64.5-69.8	.044-.140-..035-.034-*-*	13268-7107-20540-22183	992-1153-1455-1015-991-1126

* - Provete fendilhado: não foi possível fazer a determinação

Quadro VI.2 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Ambiente 2

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA						
		FORÇA MÁXIMA F_r (N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	RETRACÇÃO LIVRE e_r (mm/m)	ENERGIA DE ROTURA POR TRACÇÃO G (N.mm)	DEF. MÁXIMA NA ROTURA dr (mm/m)	MÓDULO DE ROTURA À TRACÇÃO Mt (Mpa)	MÓD. ELAST. EQUIV. E_{eq} (MPa)
P	7	73-94-68	287-148-222	.035-.042-.003	67.1-100.9-82.2	.324--.422-..378	112-382-256	25371-17629-29473
	8	163-175-176	175-368-274	.042-.119-.080	47.5-78.8-57.5	.001-.043-.018	20433-11130-15694	430-1472-1180
	28	303-269-263-272-293-285	90-686-260-315-287-89	.224-.316-.270-..295-.239-.252	214.4-93.1-157.1-50.5-47.1-105.3	.187-*-.094-*-*-.055	176-*-10132-*-*-5290	1128-1116-996-1029-998-1003
FV	7	30-69-43	182-224-203	-	125.2-139.2-126.8	1.228-.960-.1.091	311-403-350	-
	8	165-184-176	201-484-350	-	121.2-233.7-175.4	.601-.237-.576	151-2072-2993	-
	28	277-261-282-258-269-274	467-504-492-478-501-473	-	159.5-165.3-179.2-140.9-147.1-163.9	.274-.286-.293-.258-.244-.293	1737-1856-1692-1330-1976-1860	-
FPP	7	219-108-168	219-118-172	-	99.4-75.5-88.3	*-.397-.545	*-66-75	-
	8	170-157-155	180-197-189	-	101.8-108.0-103.0	.003-.308-.154	10661-326-223	-
	28	284-282-285-280-288-286	490-111-285-295-323-311	-	58.7-73.5-60.3-76.5-69.7-65.0	*-.332-*.285-.274-.303	*-1550-*-1650-1430-1576	-

Quadro VI.2 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Ambiente 2

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA						
		FORÇA MÁXIMA F_r (N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	RETRACÇÃO LIVRE e_r (mm/m)	ENERGIA DE ROTURA POR TRACÇÃO G (N.mm)	DEF. MÁXIMA NA ROTURA dr (mm/m)	MÓDULO DE ROTURA À TRACÇÃO Mt (Mpa)	MÓD. ELAST. EQUIV. E_{eq} (MPa)
M1	8	238-256-239	244-261-252	.182-.117-.149	108.1-78.5-96.0	.253-.294-.220	43-45-62	1626-1445-1662
	28	285-292-288-289-294-291	58-503-292-261-296-294	.693-.740-.716-.725-.698-.731	54.4-79.4-53.1-72.3-65.5-77.2	*-.002-*-.001-.002-.003	2202-2301-2118-2176	365-407-403-384-379-395
CA	8	133-148-145	140-153-155	.019-.221-.120	91.5-113.2-105.1	.307-.001-.156	63-8699-4378	1105-1230-1391
	28	230-203-225-212-228-205	232-109-229-215-230-209	.160-.372-.266-.185-.202-.355	32.0-72.8-34.2-63.5-61.6-58.5	*-.002-*-.001-.003-.002	*-22503-*-10160-12332-14154	853-765-823-792-815-801

* - Provete fendilhado: não foi possível fazer a determinação

Quadro VI.3 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Suporte absorvente

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA				
		FORÇA MÁXIMA F_r (N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	ENERGIA DE ROTURA POR TRACÇÃO G (N.mm)	DEF. MÁXIMA NA ROTURA dr (mm/m)	MÓDULO DE ROTURA À TRACÇÃO Mt (Mpa)
P - SA	7	120-139-118-114-130-121	399-536-423-488-491-445	166.7-84.2-142.3-124.6-133.9-135.1	.036-.105-.076-.085-.073-.042	1824-11242-5203-9350-8510-3074
	14	123-120-125-119-122-119	985-728-836-924-852-795	186.6-199.4-185.3-193.7-169.7-199.2	.212-.186-.185-.193-.215-.206	10143-8178-10004-9350-8121-9152
P - SH	7	119-122-125-115-118-123	916-797-845-830-905-843	182.6-305.4-294.3-355.2-321.3-286.4	.194-.301-.214-.263-.308-.220	10267-8300-7242-8136-7204-7635
	14	133-122-121-129-124-122	713-1018-993-807-796-863	132.9-230.8-183.4-201.2-194.8-130.5	.153-.411-.334-.183-.281-.299	9459-2228-6830-3514-8156-7323
P - RH	7	138-146-124-93-99-105	997-1137-1030-1151-998-1062	114.7-247.9-173.4-116.4-164.3-206.5	.185-.190-.201-.183-.194-.186	11175-12575-12003-12160-11756-11603
	14	158-157-165-162-157-159	1246-993-1065-1023-1234-1168	274.6-252.5-234.5-256.2-243.9-276.1	.203-.174-.196-.194-.172-.192	13362-11981-12910-12456-13645-11605
P - RHB	7	138-164-155-147-142-161	836-850-840-849-837-841	121.0-119.3-114.5-116.1-115.4-125.3	.169-.151-.163-.159-.157-.158	10330-11350-10903-10870-11030
P - RHHB	7	127-70-105-98-86-118	906-788-855-862-791-873	185.4-173.8-179.4-172.3-166.5-177.3	.187-.180-.183-.188-.191-.184	10440-9948-10333-10329-9956-10145
P - RP	7	138-118-126-133-124-129	712-730-718-725-710-714	109.5-113.2-110.5-111.8-105.3-106.9	.130-.172-.148-.163-.145-.142	11017-8899-9903-10760-9034-10128
FV - SA	7	47-70-69-52-48-59	232-605-485-391-376-418	115.1-125.6-93.4-99.1-86.3-88.2	.646-.283-.544-.632-.301-.366	734-4741-2710-3042-2976-2245
FV - SH	7	45-71-66-59-48-53	214-277-227-256-242-265	181.1-189.8-183.6-181.9-187.2-183.0	.978-.495-.634-.485-.873-.942	430-1063-865-749-616-774
FV - RH	7	113-117-112-118-114-115	378-302-356-339-327-343	225.3-156.5-250.6-267.2-233-256.9	.541-.855-.436-.463-.516-.422	1208-484-956-1105-1033-846

Quadro VI.3 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Suporte absorvente (contin.)

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA				
		FORÇA MÁXIMA F_r (N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	ENERGIA DE ROTURA POR TRACÇÃO G (N.mm)	DEF. MÁXIMA NA ROTURA dr (mm/m)	MÓDULO DE ROTURA À TRACÇÃO Mt (Mpa)
FPP - SA	7	160-97-143-95-158-128	575-102-483-310-229-345	113.5-71.6-94.3-86.9-75.4-110.8	.078-.160-.145-.117-.096-.124	15041-98-9945-4480-10640-5226
FPP- SH	7	96-62-89-76-64-93	142-127-124-130-141-138	104.6-99.3-101.9-103.6-98.9-103.2	.610-.268-.460-.383-.421-.516	208-611-496-445-288-415
FPP - RH	7	125-162-157-139-148-128	621-720-618-684-711-653	227.1-185.6-214.5-193.2-198.6-221	.136-.117-.122-.135-.118-.120	9113-11929-10070-10730-11712-9564
M1 - SA	7	125-107-114	112-107-111	*	*	59.4-76.1-69.0
M1 - SH	7	179-153-148	588-142-359	122.6-81.8-101.4	.083-*-.059	7646-*-10052
M1 - RH	7	97-99-92	177-332-260	101.8-77.9-89.7	.115-.152-.156	13690-9930-10460
CA-SA	7	59-53-43-66-54-58	116-377-365-134-210-306	100.8-116.4-99.3-110-119.4-104	.116-.471-.096-.109-.101-.093	476-1720-1889-1557-1954-1635
	14	43-65-48-62-50-59	163-106-145-127-129-142	73.3-52.2-59.5-66.9-71.0-55.2	.095-.411-.332-.205-.213-.237	2965-252-1916-1802-2514-1617
CA-SH	7	59-62-65-47-51-52	64-114-93-62-89-101	73.6-79.6-75.3-82.1-74.4	.547-.266-.398-.405-.401-.423	24-506-335-204-226-301
	14	56-56-50-49-58-6155	71-78-82-73-71-75	58.4-51.2-53.1-59.6-50.8-56.0	.558-.446-.535-.553-.493-.428	94-128-110-112-97-126
CA-RH	7	68-71-52-58-54-56	112-186-175-129-143-158	89.4-174.6-111.3-145.6-124.1-148.2	.589-.480-.512-.472-.558-.586	197-605-518-326-343-408
	14	51-67-58-66-55-62	138-68-123-86-91-118	61.3-41.1-56.2-48.0-52.9-45.5	.104-.002-.083-.027-.055-.048	2119-6046-5120-3933-3212-4052

Quadro VI.3 - Características das argamassas sujeitas à retracção restringida. Suporte absorvente (contin.)

ARGAMASSA	IDADE (dias)	VALORES MÉDIOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRACÇÃO RESTRINGIDA				
		FORÇA MÁXIMA F_r (N)	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO R_t (N)	ENERGIA DE ROTURA POR TRACÇÃO G (N.mm)	DEF. MÁXIMA NA ROTURA dr (mm/m)	MÓDULO DE ROTURA À TRACÇÃO Mt (Mpa)
Pa - SA	7	103-93-102	294-569-433	76.3-119.6-97.5	.031-.204-.072	16549-5897-3265
Pa - SH	7	125-112-209	685-399-129	139.0-74.4-108.2	.162-.001-.082	8755-48336-45146
Pa - RH	7	152-175-207	729-801-879	.145-.132-143	9963-12761-11355	141.4-203.3-169

* - Provete fendilhado: não foi possível fazer a determinação

Com o presente estudo pretende-se desenvolver uma metodologia que permita prever as tensões induzidas no seio da argamassa e na interface com o suporte devidas à retracção restringida de rebocos e estabelecer um método de avaliação da sua susceptibilidade à fendilhação devida a este fenómeno. De facto, os métodos usados actualmente são empíricos e têm-se revelado pouco rigorosos e insuficientemente fiáveis.
Neste trabalho desenvolvem-se os aspectos teóricos usados para fundamentar os objectivos referidos, descreve-se o equipamento projectado e construído para a determinação de tensão, retracção livre e resistência à tracção em provetes de argamassa, explicitam-se as grandezas determinadas e os critérios estabelecidos.
Analisam-se diversos factores que influenciam o comportamento à fendilhação de rebocos, entre os quais se salientam as condições climáticas e as técnicas de cura, a absorção de água do suporte, o tipo de ligante, a quantidade de água de amassadura e o tipo de areia. A utilização de fibras, disseminadas na argamassa ou sob a forma de redes, foi também um factor estudado. Apresentam-se resultados de determinações realizadas sobre dezasseis argamassas de reboco, com diferentes condições de cura.
Apresenta-se uma classificação quanto à susceptibilidade à fendilhação de argamassas de reboco, aplica-se essa classificação às argamassas estudadas e discute-se o resultado.
Paralelamente, estudam-se outros aspectos do comportamento dessas argamassas de reboco considerados importantes, como a capacidade de impermeabilização e a aderência ao suporte.
Procurou-se lançar algumas bases que permitirão seleccionar, com melhor conhecimento de causa, argamassas de revestimento a utilizar em condições e suportes definidos e especificar procedimentos de aplicação e de cura.
O estudo teve em conta os materiais disponíveis no mercado nacional e os suportes, as condições climáticas e os métodos de aplicação existentes no nosso país.

Maria do Rosário da Silva Veiga licenciou-se em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico em 1981. Entre 1982 e 1984 exerceu actividade como projectista de estruturas; entre 1984 e 1987 realizou trabalho no Laboratório de Engenharia de Angola, nas áreas de estruturas e de reabilitação de edifícios. Iniciou funções no LNEC em 1987, na carreira de Investigação. Desde essa data até Dezembro de 1997 desenvolveu actividade no Núcleo de Comportamento de Construções do Departamento de Edifícios, como Estagiária e Assistente de Investigação.
Realizou estudos quer de investigação programada quer por contrato, centrados, fundamentalmente, no tema "Revestimentos de paredes". No âmbito desse tema participou ainda em Comissões Especializadas e em Grupos de Trabalho Internacionais, realizou actividade de normalização internacional e actividade docente em Cursos de especialização e de formação e em Mestrados, co-orientou uma Tese de Mestrado e orientou um estágio profissionalizante.
Realizou um estágio no British Research Establishment e visitou o British Board of Agrément, ambos em Graston, Reino Unido, e visitou o Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, de Paris.
Em Dezembro de 1997 concluiu o seu Doutoramento em Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
0000042438

ISBN 972 - 49 - 1757 - 6
9 789724 917573