Hipólito José Campos de Sousa

MELHORIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DAS ALVENARIAS POR ACTUAÇÃO NA GEOMETRIA DOS ELEMENTOS

Aplicação a Blocos de Betão de Argila Expandida

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
1996

Hipólito José Campos de Sousa

MELHORIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DAS ALVENARIAS POR ACTUAÇÃO NA GEOMETRIA DOS ELEMENTOS

Aplicação a Blocos de Betão de Argila Expandida

(2U043) / SOU 9 / MEL
UNIVERSIDADE DO PORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA
N.º
CDU
Data 29-10-1996
5-5-2132

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
1996

A presente dissertação foi objecto de uma bolsa do "*PRODEP - Programa Operacional de Desenvolvimento Educativo para Portugal, Subprograma 4, Medida 4.2 - Sistema de Apoios à Realização de Estágios Avançados em Empresas (SEAD)*". No respeito das condições de elegibilidade do projecto, efectuou-se um protocolo envolvendo a *FEUP*, o *LNEC* e a *PAVILECA*. Coube ao *LNEC* a coorientação e apoio em algumas áreas experimentais, enquanto a *PAVILECA*, como contrapartida do acesso aos resultados do trabalho, facultou o " know - how " industrial e os materiais e produtos necessários à realização da parte experimental.

À Luísa
ao Gonçalo e ao Henrique

Agradecimentos

Ao terminar este trabalho pretendo manifestar o meu sincero agradecimento a todos os que, ao longo do tempo e a diferentes níveis, contribuíram de forma indispensável para a sua realização.

Em primeiro lugar destaco o apoio, a orientação e a confiança recebida ao longo do trabalho do Prof. Vítor Abrantes a quem manifesto profunda gratidão.

Ao Eng.º Teixeira Trigo, meu supervisor do estágio no *LNEC*, estou igualmente grato pela crítica certa, disponibilidade e amizade que sempre me manifestou.

À memória do Prof. Barbosa de Abreu que sempre incentivou a minha carreira académica, o meu reconhecimento e saudade.

Ao Eng.º Artur Ribeiro dos Santos agradeço o estímulo e o apoio na revisão do texto que se apresenta.

Pretendo igualmente realçar o acolhimento amigo que encontrei no Laboratório Nacional de Engenharia Civil a todos os níveis; sublinho a disponibilidade dos responsáveis, colegas e técnicos do Departamento de Edifícios, Núcleos de Processos de Construção, Comportamento das Construções e Comportamento de Componentes, bem como do Sector de Cerâmica do Departamento de Materiais de Construção. Destaco particularmente a amizade e ajuda recebida da Eng.ª Fernanda Carvalho, do Eng.º Carvalho Lucas e Eng.º Pina dos Santos bem como do Sr. Sousa Rosa e Sr. Manuel Sadio.

Agradeço à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ao Departamento de Engenharia Civil, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ao *PRODEP*, ao Centro de Engenharia Civil, à *PAVILECA*, e à Embaixada de França que em termos institucionais e financeiros viabilizaram o trabalho.

Saliento igualmente todo o apoio recebido da *PAVILECA S.A.*, na pessoa do Eng.º Ferreira da Silva e do Sr. Simões que colaborou na realização dos provetes.

Manifesto também o meu apreço ao Laboratório de Física das Construções, particularmente ao Prof. Vasco Freitas e Eng.º Kim Rosenbom pela colaboração em alguns ensaios.

Destaco ainda a prestável colaboração das empresas *DOW* e *YTONG* que gentilmente cederam materiais utilizados na parte experimental.

À Eng.ª Graça Vaz, à D. Cristina Paredes e Sr. Jorge Bernardes, que colaboraram no tratamento de resultados e na edição do texto, bem como aos meus colegas da Secção de Construção Civis, à D. Balbina Bernardes e D. Maria de Lurdes os meus sinceros agradecimentos.

Finalmente quero agradecer de forma especial à minha família, todo o carinho e compreensão demonstrados durante a elaboração do presente trabalho.

Melhoria do Comportamento Térmico e Mecânico das Alvenarias por Actuação na Geometria dos Elementos
Aplicação a Blocos de Betão de Argila Expandida

Hipólito José Campos de Sousa

Dissertação apresentada para efeito de prestação de provas de Doutoramento em Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, sob a supervisão do Professor Doutor Vítor Carlos Trindade Abrantes Almeida

Resumo

A forma de realizar as paredes exteriores dos edifícios em Portugal evoluiu bastante, não tendo esta evolução, em geral, uma reflexão aprofundada subjacente, visando a adequação das soluções às nossas condições. Atestam este facto as frequentes anomalias associadas às soluções actualmente consideradas tradicionais.

Atendendo às preocupações crescentes relativas ao comportamento térmico das construções, analisa-se neste trabalho a possibilidade de utilizar soluções de paredes exteriores em pano simples que, para além de satisfazer os requisitos de conforto térmico, possam, em complementaridade, ter funções resistentes em edifícios de pequeno porte.

Apresenta-se uma síntese das actuações possíveis tendentes à melhoria do comportamento térmico e mecânico dos elementos para alvenaria, tendo em conta as principais exigências aplicáveis às soluções de parede exterior em pano simples. Discutem-se os métodos experimentais e analíticos de determinação das características térmicas dos produtos e das alvenarias. Faz-se a síntese dos factores que influenciam o comportamento mecânico das alvenarias sob acções verticais. Por último, nesta 1ª parte, abordam-se as especificidades dos betões de inertes leves, particularmente de argila expandida para fabrico de blocos.

Na 2ª parte do trabalho apresenta-se um modelo numérico de simulação do coeficiente de transmissão térmica de alvenarias exteriores, em regime estacionário, através do método dos elementos finitos usando o programa *COSMOS/M*. Apresentam-se os resultados de uma análise de sensibilidade visando avaliar a influência, no referido parâmetro, dos diferentes aspectos associados à geometria dos elementos, à execução das alvenarias e às características físicas dos materiais constituintes. Simula-se também o comportamento térmico de paredes realizadas a partir de blocos reais e de um protótipo optimizado.

A 3ª parte do trabalho é dedicada à caracterização experimental. Valida-se o modelo de simulação térmica através do ensaio de provetes de parede em câmara climática calibrada existente no *LNEC* e adaptada para o efeito. Realizam-se ensaios mecânicos de provetes de parede à compressão, para avaliar a influência, no comportamento mecânico das paredes, de diversos factores associados aos elementos, à argamassa e ao aparelho de assentamento. Por fim, à luz dos resultados experimentais e da simulação numérica do comportamento térmico, discute-se a influência dos diferentes factores que influenciam o comportamento térmico e mecânico dos elementos para alvenaria e das paredes.

Palavras-Chave: "Alvenarias", "Paredes", "Blocos de Betão Leve", "Argila Expandida", "Simulação Numérica Térmica", "Coeficiente de Transmissão Térmica", "Ensaios em Câmaras Climáticas", "Ensaios Mecânicos de Paredes", "Alvenaria Resistente".

Improvement of Thermal and Mechanical Behaviour of Masonry by Acting on the Geometry of the Units
Expanded clay concrete blocks application

Hipólito José Campos de Sousa

Thesis submitted for satisfaction of the requirements for the Ph. D. degree in Civil Engineering of the FEUP, under the supervision of Prof. Vítor Carlos Trindade Abrantes Almeida

Abstract

The way of making external walls for buildings in Portugal has changed considerably, without a deep discussion looking for a performable solution for Portuguese conditions. As a result there are pathologies associated with the solutions considered as traditional.

Considering the growing concern associated with thermal behaviour of buildings, the possibility of using thick single-leaf external walls is analysed in this work; these walls are also supposed to have a structural contribution in small buildings.

A summary of possible actions in order to improve the thermal and mechanical behaviour of masonry units is presented, considering the main requirements of single-leaf external wall solutions. Experimental and analytical methods for the determination of thermal characteristics of the products and masonry are analysed. A summary of the factors that influence the mechanical behaviour of masonry walls under vertical loading is presented. Finally, in this first part, the particularities of the lightweight aggregate concrete are addressed, specially the expanded clay concrete used in masonry blocks.

In the second part of the work, and using the computer code *COSMOS/M* is presented a Finite Element simulation of the overall coefficient of heat transfer (U value), for external masonry walls, made of expanded clay hollow concrete blocks. The results of a sensitive analysis are shown, in order to estimate the influence on the above parameter of the different aspects associated with the units geometry, with the masonry execution and with the physical characteristics of the component materials. The simulation of the thermal behaviour of the walls was also considered with real blocks and with an optimized unit model.

The third part addresses the experimental study. The numerical simulation described is validated experimentally using a calibrated hot box existent in *LNEC* and adapted to this work, to measure the heat flow through different walls. The compressive strength of several wall test panels is obtained to evaluate the influence on the mechanical behaviour of the walls, of different aspects associated with the units, with the mortar and with the masonry bond.

At last, the thermal experimental results and those obtained with the numerical simulation are compared. The influence of different factors affecting thermal and mechanical behaviour are discussed. The mechanical experimental results are compared with different references, concerning mechanical behaviour of walls, particularly with Eurocode 6.

Keywords: "Masonry", "Walls", "Lightweight Concrete Blocks", "Expanded Clay", "Numerical Thermal Simulation", "U value", "Calibrated Hot Box Tests", "Blockwork Panel Tests", "Structural Masonry"

ÍNDICE GERAL

Índice de Figuras

Índice de Quadros

Simbologia

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 - ANTECEDENTES E OBJECTIVOS 3
1.2 - ESTRUTURA DO TRABALHO 7
1.3 - ABREVIATURAS, SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA 9

Capítulo 2

MELHORIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DAS ALVENARIAS POR ACTUAÇÃO NA GEOMETRIA DOS ELEMENTOS - ESTADO DA ARTE

2.1 - GENERALIDADES 13
2.2 - MELHORIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO 15
2.2.1 - Actuações possíveis 15
2.2.2 - Material constituinte, incorporação de isolante e forma do elemento 17
2.2.3 - Assentamento 20
2.2.4 - Principais estudos realizados 21
2.3 - MELHORIA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO 24
2.3.1 - Actuações possíveis 24
2.3.2 - Principais estudos realizados 25
2.4 - TENDÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAIS 27
2.4.1 - Tendências internacionais 27
2.4.2 - Tendências nacionais 27
2.5 - SÍNTESE DOS CONDICIONALISMOS EXIGENCIAIS DA ENVOLVENTE EM PANO ÚNICO DE BLOCOS DE BETÃO DE INERTES LEVES 29
2.5.1 - Introdução 29
2.5.2 - Exigências de segurança 30
2.5.3 - Adaptação a movimentos 32

2.5.4 - Estanquidade à água da chuva 34
2.5.5 - Durabilidade 40
2.5.6 - Conforto termohigrométrico 40
2.5.7 - Conforto acústico 41
2.5.8 - Adaptação à utilização e execução 42
2.5.9 - Exigências de economia e produtividade 43

Capítulo 3

MATERIAIS E ELEMENTOS PARA ALVENARIA - MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS SUAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

3.1 - INTRODUÇÃO 49
3.2 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS MATERIAIS E PRODUTOS PARA ALVENARIA 51
3.2.1 - Métodos aplicáveis aos materiais homogéneos 51
3.2.2 - Métodos aplicáveis aos produtos 52
3.2.3 - Correcções às determinações experimentais 55
3.3 - MÉTODOS NÃO EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS PRODUTOS PARA ALVENARIA 56
3.3.1 - Recurso a valores tabelados 56
3.3.2 - Determinação por métodos analíticos 58
3.3.2.1 - Generalidades 58
3.3.2.2 - Métodos simplificados 58
3.3.2.3 - Técnicas de cálculo numérico 60
3.3.2.4 - Correcções aos resultados analíticos 61
3.4 - DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ALVÉOLOS DOS PRODUTOS PARA ALVENARIA 62
3.4.1 - Introdução 62
3.4.2 - Condução 63
3.4.3 - Convecção 64
3.4.4 - Radiação 69
3.4.5 - Tratamento conjunto dos mecanismos de transmissão de calor em alvéolos 77

Capítulo 4

COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ALVENARIAS SOB ACÇÕES VERTICAIS

4.1 - INTRODUÇÃO 83
4.2 - PARTICULARIDADES DAS ALVENARIAS COMO MATERIAL ESTRUTURAL 83
4.3 - MODELOS DE COMPORTAMENTO DAS ALVENARIAS SOB CARGAS VERTICAIS 86
4.3.1 - Generalidades 86
4.3.2 - Síntese dos modelos clássicos de comportamento das alvenarias 87
4.3.3 - Modelos simplificados de comportamento 89
4.3.4 - Modelos comtemplados em documentos de carácter regulamentar 92
4.3.5 - Modelos numéricos 100
4.4 - PRINCIPAIS FACTORES CONDICIONANTES DO COMPORTAMENTO DAS ALVENARIAS SUJEITAS A ACÇÕES VERTICAIS 101
4.4.1 - Generalidades 101
4.4.2 - Resistência à compressão dos elementos 102
4.4.3 - Geometria interna e dimensões dos elementos 107
4.4.4 - Resistência e características da argamassa 108
4.4.5 - Juntas de assentamento 111
4.4.6 - Aparelho de assentamento e qualidade de execução 113

Capítulo 5

BLOCOS DE BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA - CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR

5.1 - INTRODUÇÃO 119
5.2 - GENERALIDADES SOBRE BETÕES LEVES 120
5.2.1 - Definição de betão leve 120
5.2.2 - Classificação dos inertes quanto à massa volúmica 120
5.2.3 - Terminologia associada aos betões leves 121
5.2.4 - Técnicas de obtenção dos diferentes betões leves 122
5.2.5 - Resenha histórica e perspectivas actuais da utilização de betões leves [159,167] 124
5.3 - O INERTE LEVE DE ARGILA EXPANDIDA 125
5.3.1 - Descrição do processo de fabrico da argila expandida 125
5.3.1.1 - Sequência do processo de fabrico 125
5.3.1.2 - Matéria-prima e sua aptidão para a expansão 126

5.3.1.3 - Preparação da matéria prima 128
5.3.1.4 - Cozedura 129
5.3.2 - Principais propriedades da argila expandida 130
5.4 - COMPOSIÇÃO, FABRICO, COLOCAÇÃO E CURA DOS BETÕES DE ARGILA EXPANDIDA 134
5.4.1 - Composição 134
5.4.1.1 - Aspectos de base 134
5.4.1.2 - Estudo de composição 135
5.4.2 - Fabrico 137
5.4.3 - Transporte, colocação e compactação 138
5.4.4 - Cura 139
5.5 - PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA 140
5.5.1 - Introdução 140
5.5.2 - Massa volúmica 140
5.5.3 - Resistência à compressão 141
5.5.4 - Resistência à tracção 142
5.5.5 - Características elásticas 144
5.5.6 - Variações dimensionais 146
5.5.7 - Características térmicas 147
5.5.8 - Outras características 149
5.6 - PARTICULARIDADES DOS BETÕES DE ARGILA EXPANDIDA PARA FABRICO DE BLOCOS PARA ALVENARIA 150
5.6.1 - Composição e fabrico 150
5.6.2 - Cura 150
5.6.3 - Variações dimensionais 151
5.7 - CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DE UM BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA USADO NA REALIZAÇÃO DE BLOCOS 152
5.7.1 - Composição, fabrico e cura 152
5.7.2 - Caracterização do betão 153
5.7.2.1 - Caracterização física 155
5.7.2.2 - Caracterização mecânica 155
5.7.3 - Apreciação dos resultados 161
5.7.3.1 - Massa volúmica aparente do betão 161
5.7.3.2 - Condutibilidade térmica 162
5.7.3.3 - Características mecânicas 163
5.8 - PRINCIPAIS EXIGÊNCIAS NORMATIVAS APLICÁVEIS A BLOCOS DE BETÃO DE INERTES LEVES 165
5.8.1 - Generalidades 165
5.8.2 - Exigências normativas relativas a blocos de betão de inertes leves 167

5.8.2.1 - Características geométricas 167
5.8.2.1.1 - Forma 167
5.8.2.1.2 - Geometria interna 168
5.8.2.1.3 - Dimensões exteriores 169
5.8.2.1.4 - Tolerância das dimensões exteriores 170
5.8.2.1.5 - Percentagem de furação 172
5.8.2.2 - Características físicas 173
5.8.2.2.1 - Aspecto e textura 173
5.8.2.2.2 - Massa volúmica 173
5.8.2.2.3 - Variações dimensionais 174
5.8.2.2.4 - Absorção de água por imersão 174
5.8.2.3 - Características mecânicas 175
5.8.2.3.1 - Resistência à compressão 175
5.8.2.4 - Recepção do produto 176
5.8.2.4.1 - Identificação e data de fabrico 176
5.8.2.4.2 - Ensaios de recepção 177

Capítulo 6

MODELO DE SIMULAÇÃO TÉRMICA

6.1 - INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS 183
6.2 - MODELAÇÃO DOS PROBLEMAS TÉRMICOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS 184
6.2.1 - Introdução 184
6.2.2 - Descrição geral do *Método dos Elementos Finitos* 184
6.3 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA UTILIZADO 187
6.3.1 - Características e potencialidades do programa 187
6.3.2 - Elementos contemplados pelo programa 188
6.3.3 - Entrada de dados e saída de resultados 189
6.3.4 - Verificação de fiabilidade 190
6.4 - PRESSUPOSTOS DE ANÁLISE 192
6.4.1 - Regime e processo de transmissão 192
6.4.2 - Condições fronteira 194
6.4.3 - Características físicas admitidas para os materiais 196
6.4.4 - Tratamento dos alvéolos 196
6.4.5 - Obtenção do coeficiente de transmissão térmica - K 198
6.5 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 199

6.5.1 - Geometria dos blocos 199
6.5.2 - Parâmetros a considerar na simulação 212
6.5.2.1 - Parâmetros geométricos 212
6.5.2.2 - Parâmetros físicos 214
6.5.3 - Tipo de elemento finito e nível de discretização 217
6.5.4 - Situações simuladas e resultados 218
6.6 - SIMULAÇÃO DE CASOS REAIS 245
6.6.1 - Geometrias correntes simuladas 245
6.6.2 - Geometria melhorada simulada 249
6.6.3 - Parâmetros a variar na simulação 251
6.6.4 - Tipos de elementos e nível de discretização 251
6.6.5 - Situações simuladas e resultados 252
6.7 - APRECIAÇÃO DOS RESULTADOS 256

Capítulo 7

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MODELOS

7.1 - INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS 261
7.2 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS ALVENARIAS 262
7.2.1 - Descrição do equipamento de ensaio disponível no *LNEC* 262
7.2.1.1 - Aspectos gerais 262
7.2.1.2 - Câmara quente 264
7.2.1.3 - Câmara fria 266
7.2.1.4 - Porta-provetes 266
7.2.1.5 - Funcionamento e calibração 269
7.2.2 - Programa experimental 270
7.2.2.1 - Provetes e parâmetros analisados 270
7.2.2.2 - Execução e controlo dos provetes 271
7.2.2.3 - Instrumentação e registo de informação 281
7.2.2.4 - Ensaio dos provetes 290
7.2.2.5 - Caracterização complementar 291
7.2.2.6 - Fiabilidade e erros 298
7.2.3 - Resultados 299
7.2.3.1 - Metodologia de tratamento de dados 299
7.2.3.2 - Curva de calibração da câmara de ensaio 302
7.2.3.3 - Características térmicas dos provetes ensaiados 305

7.2.3.4 - Validação experimental do modelo numérico 306
7.3 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ALVENARIAS DE BLOCOS DE BETÃO LEVE SOB ACÇÃO DE CARGAS VERTICAIS 308
7.3.1 - Aspectos gerais 308
7.3.2 - Elementos de betão leve usados no estudo 308
7.3.3 - Parâmetros analisados 309
7.3.3.1 - Resistência à compressão dos blocos de betão de inertes leves 309
7.3.3.2 - Argamassa de assentamento 310
7.3.3.3 - Aparelho da alvenaria 313
7.3.3.4 - Tipo de provete de alvenaria 313
7.3.4 - Programa de ensaio das alvenarias 317
7.3.5 - Programa de ensaio dos materiais constituintes das alvenarias 320
7.3.6 - Controlo e execução dos provetes 321
7.3.6.1 - Controlo dos blocos e inertes 321
7.3.6.2 - Controlo da composição da argamassa 321
7.3.6.3 - Controlo das condições de execução dos provetes 321
7.3.6.4 - Execução dos provetes 321
7.3.7 - Ensaio dos provetes 326
7.3.7.1 - Equipamento de ensaio 326
7.3.7.2 - Preparação dos provetes para ensaio 326
7.3.7.3 - Técnica de ensaio, registo e forma de expressão dos resultados 328
7.3.8 - Resultados do estudo experimental 330
7.3.8.1 - Materiais constituintes 330
7.3.8.2 - Resultados dos ensaios de compressão normal 331

Capítulo 8

APRECIAÇÃO DOS RESULTADOS

8.1 - INTRODUÇÃO 341
8.2 - COMPORTAMENTO TÉRMICO 342
8.2.1 - Fiabilidade do modelo numérico 342
8.2.2 - Modelo de simulação térmica - Análise de sensibilidade 342
8.2.2.1 - Introdução 342
8.2.2.2 - Percentagem de furação 343
8.2.2.3 - Número de fiadas de alvéolos paralelas ao sentido do fluxo 346
8.2.2.4 - Número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao sentido do fluxo 346
8.2.2.5 - Posição relativa dos alvéolos 351

8.2.2.6 - Alvéolos de configuração não rectangular 352
8.2.2.7 - Influência das juntas horizontais 352
8.2.2.8 - Condutibilidade térmica dos constituintes 353
8.2.2.9 - Preenchimento das juntas verticais 355
8.2.2.10 - Existência de juntas descontínuas 355
8.2.2.11 - Juntas horizontais delgadas 355
8.2.2.12 - Emissividade das superfícies dos alvéolos 356
8.2.2.13 - Preenchimento total dos alvéolos com isolante térmico 357
8.2.3 - Geometrias reais - Simulação numérica 358
8.3 - COMPORTAMENTO MECÂNICO 360
8.3.1 - Materiais constituintes 360
8.3.1.1 - Blocos de betão 360
8.3.1.2 - Argamassa base 361
8.3.1.3 - Argamassa-cola 362
8.3.2 - Análise dos resultados dos ensaios de compressão normal 363
8.3.2.1 - Relação entre a resistência dos provetes e os seus constituintes 363
8.3.2.2 - Comparação entre os resultados experimentais e a determinação através das expressões do EC6 364
8.3.2.3 - Avaliação da influência dos parâmetros analisados 367
8.3.2.4 - Configuração de rotura 370

Capítulo 9

SÍNTESE, CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO

9.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS 375
9.2 - CONCLUSÕES 377
9.3 - PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO 380

Referências 383

ANEXO I

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO BETÃO USADO NA REALIZAÇÃO DE BLOCOS DE BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA

I.1 - GENERALIDADES I.3

I.2 - CARACTERÍSTICAS DOS INERTES UTILIZADOS I.3
I.3 - CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO BETÃO I.4

ANEXO II

EXEMPLOS DE FICHEIROS DE ENTRADA DE DADOS E DE RESULTADOS DO PROGRAMA *COSMOS/M*

II.1 - GENERALIDADES II.3
II.2 - GEOMETRIA E MALHA DO ELEMENTO DE REFERÊNCIA II.3
II.3 - FICHEIRO DE ENTRADA DE DADOS II.4
II.4 - FICHEIRO DE RESULTADOS II.5

ANEXO III

VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TÉRMICA

III.1 - GENERALIDADES III.3
III.2 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE A 2D III.3
III.3 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE A 3D III.12
III.4 - GEOMETRIAS REAIS A 2D E 3D III.16

ANEXO IV

CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO USADO NA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

IV.1 - GENERALIDADES IV.3
IV.2 - EQUIPAMENTO UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA IV.3
IV.2.1 - Temperaturas IV.3
IV.2.2 - Fluxos IV.4
IV.2.3 - Fonte de alimentação estabilizada IV.4

IV.2.4 - Multímetro digital IV.5
IV.2.5 - Autotransformador regulável IV.5
IV.2.6 - Aquisição de dados e registo automático IV.6
IV.2.7 - Observações termográficas IV.6
IV.3 - EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS MECÂNICOS IV.7
IV.3.1 - Resistência à compressão IV.7

ANEXO V

SEQUÊNCIA DE TRATAMENTO DE RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS ALVENARIAS

V.1 - GENERALIDADES V.3
V.2 - SEQUÊNCIA DE TRATAMENTO DOS RESULTADOS V.3
V.3 - SÍNTESE DE RESULTADOS V.3

ANEXO VI

RESULTADOS COMPLEMENTARES DE ENSAIOS DA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

VI.1 - GENERALIDADES VI.3
VI.2 - CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS PROVETES VI.3
VI.2 .1- Constituintes das argamassas de assentamento e reboco VI.3
VI.2 .2 - Poliestireno expandido extrudido do provete de calibração VI.5
VI.3 - CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS PROVETES VI.5
VI.3.1 - Blocos de betão VI.5
VI.3.2 - Constituintes e argamassa de assentamento VI.6
VI.3.3 - Módulo de elasticidade dos provetes de alvenaria ensaiados à compressão VI.7
VI.4 - BOLETINS DE ENSAIO VI.7

Índice de Figuras

Capítulo 1

1.1 - Síntese aproximada da evolução das paredes exteriores em Portugal 5

Capítulo 2

2.1 - Síntese dos condicionantes e soluções para a envolvente..... 14
2.2 - Representação gráfica do coeficiente de transmissão térmica K de uma parede, em função da sua resistência térmica $1/k_p$..... 16
2.3 - Actuações tendentes à melhoria do comportamento térmico de elementos para alvenaria..... 17
2.4 - Aspecto da geometria de blocos com isolamento térmico integrado..... 19
2.5 - Aspecto da geometria de uma gama de blocos de cofragem isolantes a preencher com betão..... 21
2.6 - Factores afectando os movimentos térmicos e por acção da humidade em paredes..... 33
2.7 - Representação gráfica da classificação dos locais em termos de índice de chuva incidente persistente, adoptada na Grã-Bretanha [51]..... 35
2.8 - Disposições correntes em juntas verticais de elementos para alvenaria..... 44

Capítulo 3

3.1 - Câmara quente com guarda - esquema de conjunto..... 53
3.2 - Câmara quente calibrada - esquema de conjunto..... 54
3.3 - Distribuição de temperatura na camada limite..... 64
3.4 - Convecção livre em cavidade rectangular..... 67
3.5 - Convecção em cavidade rectangular larga..... 68
3.6 - Convecção em cavidade rectangular estreita..... 68
3.7 - Relações geométricas para a determinação do poder emissivo de um elemento de superfície dA_1..... 72
3.8 - Factores geométricos na radiação entre 2 elementos..... 73
3.9 - Balanço térmico na superfície k de um contorno fechado..... 74
3.10 - Analogia eléctrica ilustrando as trocas por radiação entre 3 faces de um alvéolo constituído por 4 superfícies..... 76

3.11 - Resistência térmica de alvéolos para fluxos horizontais, segundo diferente normalização 78

Capítulo 4

4.1 - Representação esquemática das tensões nos elementos e na argamassa, numa alvenaria submetida à compressão simples, em que a argamassa é mais deformável que os elementos 88

4.2 - Ilustração do modelo em duas fases 89

4.3 - Resistência característica à compressão das alvenarias (f_k), versus resistência normalizada dos elementos (f_b), para uma argamassa com resistência à compressão de 5 MPa [126] 99

4.4 - Relação entre as resistências da alvenaria (f_k) e da argamassa (f_m), expressas relativamente à resistência do bloco(f_b) 106

4.5 - Condicionantes da resistência à compressão da argamassa na alvenaria [143] 109

4.6 - Mecanismo de equilíbrio e tensões nos septos transversais 112

4.7 - Provete para ensaio de alvenaria à compressão, segundo ASTM E 447-84 *"stack-bond"* 114

Capítulo 5

5.1 - Esquema geral de fabrico dos inertes de argila expandida [170] 126

5.2 - Fases de preparação da matéria-prima segundo diferentes processos [170] 128

5.3 - Relação simplificada entre a resistência do betão, resistência da matriz e a tensão teórica e transmitida pelo inerte [156] 135

5.4 - Relação aproximada entre massa volúmica e resistência à compressão de betões de argila expandida 141

5.5 - Relação entre módulos de elasticidade de betão corrente e betão de argila expandida com a mesma resistência à compressão [179] 144

5.6 - Aspecto geral dos provetes após ensaio de rotura à compressão 156

5.7 - Dimensões do provete e dispositivo de carga segundo *ISO* 4013 [182] 158

5.8 - Aspecto geral dos dispositivos de ensaio de tracção por flexão 159

5.9 - Aspecto geral do provete e dispositivo de ensaio para determinação do módulo de elasticidade 160

5.10 - Condutibilidades térmicas de betões de argila expandida, em função da sua massa volúmica, determinadas no *LNEC* 162

5.11 - Configuração dos topos dos blocos segundo NF P 14-304 167

5.12 - Disposição preconizada para os blocos com juntas descontínuas, relativamente à continuidade das juntas verticais e horizontais 167

Capítulo 6

6.1 - Geometria do elemento de referência..... 191
6.2 - Unidade elementar a simular..... 195
6.3 - Corte vertical tipo das geometrias consideradas..... 212
6.4 - Orientação preferencial da furação relativamente ao fluxo..... 213
6.5 - Posição relativa dos alvéolos..... 213
6.6 - Geometria do bloco "*Bloco de 20*"..... 246
6.7 - Geometria do bloco "*Bloco de 25*"..... 247
6.8 - Geometria do bloco "*Bloco de 30*"..... 248
6.9 - Geometria do bloco 500 mm x 200 mm x 250 mm *melhorado* 250

Capítulo 7

7.1 - Conjunto das câmaras e porta-provetes na posição fechada..... 263
7.2 - Esquema do conjunto das câmaras para ensaios térmicos..... 263
7.3 - Câmara quente..... 265
7.4 - Câmara fria..... 267
7.5 - Esquema do porta-provetes..... 268
7.6 - Geometria do provete 1..... 272
7.7 - Geometria do provete 2..... 273
7.8 - Geometria do provete 3..... 274
7.9 - Geometria do provete 4..... 275
7.10 - Geometria do provete 5..... 276
7.11 - Aspectos da execução dos provetes..... 277
7.12 - Instrumentação das câmaras quente e fria..... 283
7.13 - Instrumentação do provete 1..... 284
7.14 - Instrumentação do provete 2..... 285
7.15 - Instrumentação dos provetes 3 e 4..... 286
7.16 - Instrumentação do provete 5..... 287
7.17 - Aspecto do equipamento de instrumentação utilizado..... 289
7.18 - Imagens termográficas obtidas durante os ensaios..... 296
7.19 - Distribuição de velocidades do ar na câmara fria ao longo do tempo..... 297
7.20 - Perfil de temperaturas do provete..... 301
7.21 - Perfil de temperaturas do provete de calibração..... 303
7.22 - Curva de calibração..... 305

7.23 - Geometrias tradicionais dos provetes, para ensaio de alvenarias à compressão [109, 208] 314

7.24 - Dimensões do provete de bloco 500 x 200 x 250 segundo pr EN 1052-1 [125] 316

7.25 - Dimensões do provete alternativo de bloco 500 x 200 x 250 316

7.26 - Aspectos de execução dos provetes para ensaios mecânicos 323

7.27 - Aspectos da disposição das bases de leitura do alongâmetro nos diferentes provetes 327

7.28 - Configurações típicas de rotura de provetes 336

Capítulo 8

8.1 - Coeficiente de transmissão térmica, em função da percentagem de furação, para os resultados de simulação numérica - análise de sensibilidade em 2D, para betão com $\lambda = 0.40$ 343

8.2 - Coeficiente de transmissão térmica, em função da percentagem de furação, para os resultados de simulação numérica - análise de sensibilidade em 2D, para betão com $\lambda = 1.40$ 344

8.3 - Coeficiente de transmissão térmica das geometrias 6, 6A, 13, 13A, 19 e 19A, para diferentes condutibilidades térmicas do betão constituinte 345

8.4 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos paralelas ao fluxo, para o agrupamento de geometrias "A" - Análise de sensibilidade em 2D 346

8.5 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, para os resultados de simulação numérica - Análise de sensibilidade em 2D 347

8.6 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, para o agrupamento de geometrias "B" - Análise de sensibilidade em 2D 348

8.7 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, para o agrupamento de geometrias "C" - Análise de sensibilidade em 2D 349

8.8 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, para o agrupamento de geometrias "D" - Análise de sensibilidade em 2D 349

8.9 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, para o agrupamento de geometrias "E" - Análise de sensibilidade em 2D 350

8.10 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, para o agrupamento de geometrias "F" - Análise de sensibilidade em 2D 350

8.11 - Coeficiente de transmissão térmica, em função do número de fiadas de alvéolos desalinhados perpendiculares ao fluxo, para 2 tipos de betões e 4 agrupamentos de geometrias 351

8.12 - Quociente entre o coeficiente de transmissão térmica de blocos homólogos, com igual número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, alinhadas ou desalinhadas 352

8.13 - Relações médias entre coeficientes de transmissão térmica de blocos iguais (K_1/K_2), realizados com betões de condutibilidade térmicas diferentes (λ_1/λ_2)..... 354

8.14 - Comparação entre a resistência característica das alvenarias realizadas com argamassa corrente, obtida por via experimental ou através do EC 6..... 366

8.15 - Comparação entre a resistência característica das alvenarias realizadas com argamassa-cola, obtida por via experimental ou através do EC 6..... 366

8.16 - Aspecto de provetes após rotura..... 369

8.17 - Resistência comparada do provete de referência de 4 fiadas e do provete alternativo de 3 fiadas..... 370

Anexo II

II.1 - Geometria e malha adoptada na simulação do elemento de referência (corte horizontal com simplificação de simetria)..... II.3

Anexo III

III.1 - Geometria B01 - sub-ref^a 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ *betão* = 0.40)..... III.3

III.2 - Geometria B01 - sub-ref^a 5 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 1.40)..... III.4

III.3 - Geometria B06 - sub-ref^a 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 0.40)..... III.4

III.4 - Geometria B06 - sub-ref^a 4 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 1.40)..... III.5

III.5 - Geometria B08 - sub-ref^a 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 0.40)..... III.5

III.6 - Geometria B08 - sub-ref^a 4 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 1.40)..... III.6

III.7 - Geometria B11 - sub-ref^a 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 0.40)..... III.6

III.8 - Geometria B11 - sub-ref^a 5 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão =1.40)..... III.7

III.9 - Geometria B15 - sub-ref^a 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 0.40)..... III.7

III.10 - Geometria B15 - sub-ref^a 5 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 1.40)..... III.8

III.11 - Geometria B19 - sub-ref^a 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 0.40)..... III.8

III.12 - Geometria B19 - sub-refª 5 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 1.40)..... III.9

III.13 - Geometria B24 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 0.40)..... III.9

III.14 - Geometria B24 - sub-refª 5 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 1.40)..... III.10

III.15 - Geometria B27 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 0.40)..... III.10

III.16 - Geometria B27 - sub-refª 5 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 1.40)..... III.11

III.17 - Geometria B43 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 0.40)..... III.11

III.18 - Geometria B01 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo z e distribuição de temperaturas a 3D ($\lambda_{betão}$ = 0.40)..... III.12

III.19 - Geometria B08 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo z e distribuição de temperaturas a 3D ($\lambda_{betão}$ = 0.40)..... III.13

III.20 - Geometria B15 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo z e distribuição de temperaturas a 3D ($\lambda_{betão}$ = 0.40) III.14

III.21 - Geometria B27 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo z e distribuição de temperaturas a 3D ($\lambda_{betão}$ = 0.40) III.15

III.22 - Geometria corrente 500 x 200 x 200 - Malha a 3D..... III.16

III.23 - Geometria *melhorada* 500 x 200 x 200 - Malha a 3D..... III.16

III.24 - Geometria corrente 500 x 200 x 200 - sub-refª 2 - Gradiente térmico e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)..... III.17

III.25 - Geometria *melhorada* 500 x 200 x 250 - sub-refª 2 - Gradiente térmico e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)..... III.19

Anexo V

V.1 - Sequência de tratamento de dados relativa ao provete 1..... V.4

V.2 - Sequência de tratamento de dados relativa ao provete 2..... V.6

V.3 - Sequência de tratamento de dados relativa ao provete 3..... V.8

V.4 - Sequência de tratamento de dados relativa ao provete 4..... V.10

Anexo VI

VI.1 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série A - I... VI.8

VI.2 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série A - II.. VI.8

VI.3 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série A - III. VI.9

VI.4 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série A - IV VI.9
VI.5 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série B - I... VI.10
VI.6 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série B - II.. VI.10
VI.7 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série B - III. VI.11
VI.8 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série B - IV VI.11

Índice de Quadros

Capítulo 2

2.1 - Síntese de referências internacionais relativas à melhoria do comportamento térmico..... 22

2.2 - Síntese de principais referências internacionais relativas à melhoria do comportamento mecânico..... 26

2.3 - Principais exigências funcionais aplicáveis às alvenarias da envolvente..... 30

2.4 - Espessura mínima das paredes em pano único função da exposição do local à chuva incidente, segundo BS 5628: Part 3 [51]..... 36

2.5 - Espessura do tosco de paredes em pano único segundo DTU 20.1 [52]..... 38

2.6 - Factores que influenciam a estanquidade à água da chuva de paredes duplas segundo BS 5628: Part 3 [51]..... 39

2.7 - Valores máximos do coeficiente de transmissão térmica de paredes segundo o *RCCTE* [8]..... 41

2.8 - Factor R 45 (dB) de paredes exteriores, em função da utilização do edifício e do local de implantação, segundo o *RGR* [47]..... 42

Capítulo 3

3.1 - Resistência térmica ($m^2.^oC/W$) de espaços de ar não ventilados..... 79

Capítulo 4

4.1 - Síntese de documentos de carácter normativo relativos ao cálculo de alvenarias..... 93

4.2 - Alvenaria estrutural. Características dos materiais constituintes das alvenarias segundo *EC6*..... 96

4.3 - Resistência característica à compressão - f_k - da alvenaria estrutural corrente segundo *EC6*..... 98

4.4 - Factor corrector multiplicativo - δ - , a aplicar à resistência à compressão dos elementos, para obtenção da resistência normalizada..... 104

4.5 - Aspectos relativos à determinação da resistência à compressão de blocos de betão - f_b' 105

4.6 - Coeficientes parciais de segurança relativos às propriedades dos materiais, segundo *EC6* 115

Capítulo 5

5.1 - Classificação dos betões leves segundo a recomendação *RILEM* [155] 120

5.2 - Classificação dos inertes quanto à massa volúmica e principais aplicações do betão com ele fabricado [159] 121

5.3 - Terminologia e classificação *RILEM* para betões leves [165] 122

5.4 - Relação aproximada entre massa volúmica do inerte e massa volúmica do betão leve [156] 136

5.5 - Módulo de elasticidade de betões leves em função da sua massa volúmica [156] 145

5.6 - Condutibilidade térmica útil de betões de argila expandida [74,76] 147

5.7 - Composição do betão usado na confecção dos blocos de argila expandida, por amassadura e por m^3 153

5.8 - Ensaios do betão usado na realização de blocos de betão de argila expandida 154

5.9 - Massa volúmica aparente do betão constituinte dos blocos no estado natural e seco 155

5.10 - Tensão de rotura à compressão dos provetes de betão constituinte dos blocos. 157

5.11 - Tensão de rotura à tracção por flexão de provetes de betão constituinte dos blocos 158

5.12 - Módulo de elasticidade em compressão dos provetes de betão constituinte dos blocos 161

5.13 - Comparação entre os resultados da caracterização efectuada e valores de referência franceses 164

5.14 - Normas exigenciais de blocos de betão correntes de inertes leves analisadas... 165

5.15 - Características previstas nas normas exigenciais de blocos de betão de inertes leves 166

5.16 - Espessuras mínimas dos septos exteriores e interiores de blocos de betão destinados a paredes estruturais, segundo ASTM C90 169

5.17 - Dimensões exteriores de coordenação e nominais dos blocos segundo a NF P 14-402 169

5.18 - Dimensões exteriores nominais dos blocos segundo a BS 6073:2 170

5.19 - Tolerâncias de dimensões exteriores segundo NF P 14 - 402 170

5.20 - Tolerâncias de dimensões exteriores segundo BS 6073:1 171

5.21 - Tolerâncias de dimensões exteriores segundo pr EN 771-3 171

5.22 - Absorção máxima de água por imersão de blocos de betão com função resistente, segundo ASTM C90 174

5.23 - Classes e resistências características de blocos de betão de inertes leves segundo NF P 14-304 175

5.24 - Resistência média e mínima à compressão de blocos de betão, em função da sua utilização, segundo ASTM C90 e C129 176

5.25 - Número de elementos constituintes das amostras, para ensaios de recepção, segundo NF P 14-304 178

5.26 - Número de elementos constituintes da amostra para ensaios de recepção segundo BS 6073:1 179

Capítulo 6

6.1 - Elementos finitos possíveis de utilizar na análise térmica no programa *COSMOS/M* 188

6.2 - Verificação de fiabilidade do programa para problema de referência - Síntese de pressupostos e resultados 192

6.3 - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade, I a XII ..... 200 a 211

6.4 - Agrupamentos de geometrias por atributos 215

6.5 - Condutibilidades térmicas consideradas na simulação numérica 216

6.6 - Simulação numérica da parede com blocos B10 para diferentes níveis de discretização 219

6.7 - Situações simuladas na análise de sensibilidade, I a IX ..... 220 a 228

6.8 - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade I a XVI. 229 a 244

6.9 - Geometrias correntes de blocos de betão de argila expandida produzidas 245

6.10 - Condutibilidades térmicas consideradas na simulação de geometrias reais 251

6.11 - Situações simuladas e resultados da simulação numérica relativa ao bloco *real "Bloco de 20"* 252

6.12 - Situações simuladas e resultados da simulação numérica relativa ao bloco *real "Bloco de 25"* 253

6.13 - Situações simuladas e resultados da simulação numérica relativa ao bloco *real "Bloco de 30* 254

6.14 - Situações simuladas e resultados da simulação numérica relativa ao bloco *melhorado* 500 x 200 x 250 255

Capítulo 7

7.1 - Síntese de dados relativos aos provetes 1 e 2 279

7.2 - Síntese de dados relativos aos provetes 3, 4 e 5 280

7.3 - Configuração de canais do sistema de aquisição de dados 289

7.4 - Aspectos relevantes relativos aos ensaios dos provetes 1 a 4 290

7.5 - Aspectos relevantes relativos ao ensaio do provete de calibração 291

7.6 - Compilação dos resultados disponíveis da caracterização do tijolo cerâmico efectuada pelo LNEC [200, 201, 202, 203] 292

7.7 - Resultados da caracterização de blocos de betão, relativos à caracterização térmica 293

7.8 - Resultados da caracterização das argamassas de assentamento e reboco, relativos à caracterização térmica 294

7.9 - Resultados da caracterização do poliestireno extrudido 294

7.10 - Síntese de resultados da caracterização experimental térmica do provete de calibração 304

7.11 - Síntese de resultados da caracterização térmica dos provetes 1 a 4 306

7.12 - Síntese comparada do K para as paredes realizadas com blocos de geometrias reais 307

7.13 - Classes de argamassas segundo EN 998-2 [123] 311

7.14 Características da argamassa base 312

7.15 - Dimensões dos provetes para determinação da resistência à compressão das alvenarias segundo pr EN 1052-1 [125] 315

7.16 - Síntese das séries de provetes de alvenaria de blocos para os ensaios de compressão 317

7.17 - Identificação dos provetes de alvenaria de blocos de betão leve correntes 500 x 200 x 250 318

7.18 - Identificação dos provetes de alvenaria de blocos de betão leve *melhorados* 500 x 200 x 250 319

7.19 - Resultados da caracterização de blocos de betão, relativos à caracterização mecânica 330

7.20 - Resultados da caracterização das argamassas de assentamento, relativos à caracterização mecânica 331

7.21 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série A -I 332

7.22 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série A - II 332

7.23 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série A - III 333

7.24 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série A - IV 333

7.25 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série B - I 334

7.26 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série B - II 334

7.27 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série B - III 335

7.28 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série B - IV 335

Capítulo 8

8.1 - Relação entre o coeficiente de transmissão térmica de paredes tendo por base blocos com a mesma geometria, realizados com betões de condutibilidade térmica diferente 353

8.2 - Redução do K de paredes de alvenaria, por adopção de juntas horizontais delgadas, comparativamente a juntas correntes 356

8.3 - Redução do K de paredes de alvenaria, por alteração da emissividade da superfície dos alvéolos 357

8.4 - Redução do K de paredes de alvenaria, por preenchimento total dos alvéolos com isolante.térmico 357

8.5 - Síntese de aspectos relevantes relativos às geometrias reais simuladas 358

8.6 - Agravamento do K de paredes realizadas com blocos de geometrias reais, por consideração das juntas horizontais correntes de assentamento 359

8.7 - Redução do K de paredes realizadas com blocos de geometrias reais, por adopção de juntas horizontais delgadas, comparativamente a juntas correntes 359

8.8 - Exigências mecânicas relativas a blocos de betão de inertes leves segundo normativa CEN 360

8.9 - Resistência à compressão dos blocos ensaiados 361

8.10 - Características principais da argamassa-cola YTONG, segundo DH 383 [198]... 362

8.11 - Síntese de resultados experimentais relativos à alvenaria e seus constituintes.. 363

8.12 - Síntese das características das alvenarias obtidas a partir da resistência dos elementos e da argamassa por recurso às expressões do EC 6 365

Anexo IV

IV.1 - Características dos termopares IV.3

IV.2 - Características dos fluxímetros IV.4

IV.3 - Características da fonte de alimentação estabilizada IV.4

IV.4 - Características do multímetro digital IV.5

IV.5 - Características do autotransformador regulável IV.5

IV.6 - Características do sistema de aquisição e registo automático IV.6

IV.7 - Características do equipamento de termografia IV.6

IV.8 - Características da prensa de compressão IV.7

Anexo V

V.1 - Síntese de resultados relativos aos provetes 1 e 2..... V.12
V.2 - Síntese de resultados relativos ao provete 3 e 4..... V.13
V.3 - Síntese de resultados relativos ao provete 5 ..... V.14

Anexo VI

VI.1 - Características geométricas e mecânicas dos blocos 500 x200 x 250 correntes.... VI.5
VI.2 - Características geométricas e mecânicas dos blocos 500 x200 x 250 *melhorados* VI.6
VI.3 - Características mecânicas das argamassas utilizadas no assentamento dos provetes de alvenaria para ensaios de compressão..... VI.7

Simbologia

1) ABREVIATURAS

ACERMI	Association pour la Certification des Matériaux Isolants
ACI	American Concrete Institute
AFNOR	Association Française de Normalisation
APICC	Associação Portuguesa de Industriais de Cerâmica de Construção
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSI	British Standard Institution
CEB	Comité Euro-International du Béton
CEN	European Committee for Standardization
CERIB	Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton Manufacturé
CIB	International Council for Building Research Studies and Documentation
CICCOPN	Centro Industriais Construção Civil e Obras Públicas do Norte
COSMOS/M	Programa de Elementos Finitos desenvolvido pela SRAC
CSTB	Centre Scientifique etTechnique du Bâtiment
CTCV	Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro
CTTB	Centre Technique des Tuiles et Briques
DIN	Deutsches Institut fur Normung
DOW	Marca Registada da " The Dow Chemical Company"
EC6	Eurocódigo 6
EC8	Eurocódigo 8
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte
IC	Instituto da Construção
IGPAI	Inspecção Geral de Produtos Agrícolas e Industriais
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	International Organization for Standardization
ITBTP	Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
m.e.f.	Método dos Elementos Finitos
PAVILECA	Pavileca - Pavimentos e Blocos S.A.
PRODEP	Programa Operacional de Desenvolvimento Educativo para Portugal
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
REBAP	Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado
RGEU	Regulamento Geral das Edificações Urbanas
RGR	Regulamento Geral sobre o Ruído

RILEM	Reúnion Internationale des Laboratoires d'Essai de Matériaux
RSCCS	Regulamento de Segurança das Construções Contra os Sismos
RSCIEH	Regulamento Segurança contra Incêndio em Edifícios de Habitação
SRAC	Structural Research and Analysis Corporation

2) TÉRMICA

SÍMBOLOS GERAIS

Q	Fluxo de calor	W
q	Densidade de fluxo	W/m^2
λ	Condutibilidade térmica(1)	W/(m.ºC) – W/(m.K)
λ'	Condutibilidade térmica útil	W/(m.ºC) – W/(m.K)
h	Condutância térmica superficial	$W/(m^2.{}^{\circ}C)$ – $W/(m^2.K)$
h	Altura	m
R ou U	Resistência térmica	$(m^2.{}^{\circ}C)/W$ – $(m^2.K)/W$
q^*	Produção interna de calor	W
K	Coeficiente de transmissão térmica	$W/(m^2.{}^{\circ}C)$ – $W/(m^2.K)$
k_p	Condutância térmica	$W/(m^2.{}^{\circ}C)$ – $W/(m^2.K)$
T	Temperatura	ºC – K
t	Tempo	s
v	Velocidade	m/s
l	Dimensão característica	m
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
ρ	Massa volúmica	kg/m^3
c_p	Calor específico a pressão constante	J/(kg.ºC) – J/(kg.K)
β	Coeficiente de dilatação térmica	k^{-1}
A	Área	m^2
P_ϕ	Potência fornecida	W
ΔT	Gradiente de temperatura	ºC - K
Flx	Densidade de fluxo lido e registado	W/m^2
α	Difusibilidade térmica = $\lambda/\rho\, c_p$ (1)	m^2/s
E	Poder emissivo de um corpo negro	W/m^2
ε	Emissividade hemisférica	–
ν	Viscosidade cinemática	m^2/s
μ	Viscosidade dinâmica = $\rho\nu$	$N.s/m^2$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W/(m^2.K^4)$
e	Espessura	m
x, y, z	Coordenadas segundo os eixos coordenados globais	m

(1) Com significado diferente na radiação

NÚMEROS

Nu	Número de Nusselt = $h_c.l/\lambda$
Re	Número de Reynolds = $v.l/\nu$
Ec	Número de Eckert = $v^2/(c_p.\Delta T)$
Gr	Número de Grashof = $gl^3\beta\,\Delta T/\nu^2$
Pr	Número de Prandtl = $\mu\, c_p/\lambda$
Ra	Número de Raleigh = $g\beta\,\Delta T\, l^3/(\nu\alpha)$

RADIAÇÃO

λ	Comprimento de onda	μm
α	Absorvidade	–
ρ	Reflectividade	–
ζ	Transmissividade	–
J	Radiosidade	W/m^2
G	Irradiação	W/m^2
F	Factor de forma	–

ÍNDICES

i	Interior
e	Exterior
c	Convecção
r	Radiação
t	Total, ambiente a ambiente
k, m, n	Variáveis
x, y, z	Eixos coordenados globais
b	Corpo negro
$equiv.$	Equivalente
p	Camada
j	Secção
amb	Ambiente
cq	Câmara quente
pq	Face quente do provete
pf	Face fria do provete
cf	Câmara fria
f	Fria
q	Quente
λ	Monocromático

3) MECÂNICA

SÍMBOLOS GERAIS

f	Resistência média à compressão da alvenaria	MPa
f_b	Resistência média normalizada à compressão dos elementos	MPa
f_b'	Resistência média à compressão dos elementos	MPa
f_i	Resistência à compressão de um provete individual de alvenaria	MPa
f_m	Resistência média à compressão da argamassa	MPa
f_k	Resistência característica à compressão da alvenaria	MPa
f_c	Resistência à compressão do betão	MPa
f_{cj}	Resistência à compressão do betão, aos j dias de idade	MPa
f_{ct}	Resistência do betão à tracção	MPa
f_{ck}	Resistência característica à compressão do betão	MPa
S_r	Secção resistente do elemento	m^2
S_b	Secção aparente do elemento	m^2
S_n	Secção efectiva do elemento	m^2
E	Módulo de elasticidade da alvenaria	MPa
E_b	Módulo de elasticidade do elemento	MPa
E_c	Módulo de elasticidade secante do betão	MPa
E_{cj}	Módulo de elasticidade secante do betão , aos j dias de idade	MPa
E_{co}	Módulo de elasticidade tangente do betão	MPa
E_{coj}	Módulo de elasticidade tangente do betão, aos j dias de idade	MPa
E_i	Módulo de elasticidade de um provete individual	MPa
E_m	Módulo de elasticidade da argamassa	MPa
F_{max}	Força de rotura	kN
A	Área carregada	m^2
e	Espessura da junta horizontal de assentamento	m
h	Altura do elemento	m
t	Espessura do elemento	m
h	Altura do elemento	m
ρ	Massa volúmica	kg/m^3
σ	Tensão	MPa
K	Coeficiente minorador	–
δ	Factor corrector para conversão da resistência à compressão em resistência normalizada	–
ε	Extensão	‰

ÍNDICES

i	Individual
u	Elemento
s	Seca

comp. diam.	Compressão diametral
flexão	Flexão
útil	Útil
simples	Simples, pura
m	Média

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

ÍNDICE

1.1- ANTECEDENTES E OBJECTIVOS
1.2 - ESTRUTURA DO TRABALHO
1.3 - ABREVIATURAS, SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - ANTECEDENTES E OBJECTIVOS

As paredes de alvenaria que realizam a envolvente dos edifícios têm um papel decisivo no comportamento das construções, para além de representarem uma parcela importante do preço final da construção, pois o seu custo, incluindo revestimentos, estima-se entre 14% e 20 % do total [1,2].

Portugal é um país da Europa do Sul, marcadamente mediterrânico no zona central e meridional, mas com influências atlânticas crescentes para Noroeste. Com excepção de algumas zonas montanhosas, o clima é ameno e a pluviosidade, associada à vertente atlântica, é mais intensa no litoral Norte.

A arquitectura tradicional portuguesa apresentava soluções de carácter regional, fruto dum longo processo evolutivo muito adaptadas às condições climatéricas. Predominava a utilização da pedra em paredes espessas e pesadas. Com excepção de algumas zonas rurais ou em edifícios mais rudes do Norte do país, onde eram frequentes as soluções em pedra à vista, nos edifícios correntes as paredes de pedra eram revestidas por rebocos espessos, porosos, de baixa rigidez e realizados em várias camadas por mão de obra muito experiente.

Na vertente atlântica, nas zonas mais expostas à acção da chuva, era habitual procurar melhorar-se a resistência à penetração da água pelo reboco com a introdução de uma camada impermeável, à base de argamassa asfáltica, ou mais recentemente argamassa rica em cimento Portland aditivada com hidrófugo [3], aplicada directamente sobre o suporte.

Com carácter mais regional e com o mesmo objectivo de melhorar o comportamento à água da chuva, utilizavam-se, além dos revestimentos decorativos cerâmicos, revestimentos de estanquidade descontínuos, sendo os mais frequentes em ardósia ou chapas de fibrocimento, sobretudo em empenas.

Apesar de não se conhecer um estudo histórico aprofundado da evolução das soluções de paredes exteriores em Portugal, o que seria do maior interesse, julga-se que as soluções tradicionais

começaram a evoluir de uma forma rápida e nem sempre adaptada às condições locais no pós-guerra [4,5,6]. Com efeito, é no fim da década de 40 e sobretudo nas zonas urbanas que se assiste a uma generalização das estruturas de betão armado, nos pavimentos, estendida progressivamente aos elementos verticais de suporte. As paredes foram perdendo a função resistente e transformaram-se em simples panos de enchimento, tendo a pedra cedido progressivamente o lugar aos tijolos cerâmicos. Estes desdobraram-se numa variedade enorme de formatos, mas evoluindo sempre de elementos maciços para elementos predominantemente de furação horizontal e sucessivamente mais aligeirados [7].

Na década de 60 generalizou-se a parede dupla de tijolo para permitir :

- aligeirar o peso das paredes de forma a não solicitar exageradamente a estrutura;
- reduzir a espessura dos panos;
- melhorar a produtividade para contrariar o aumento dos custos de mão-de-obra;
- articular as preocupações anteriores com uma estanquidade à água de chuva satisfatória.

Esta solução construtiva para as paredes da envolvente foi importada com adaptações do estrangeiro, sendo realizada com panos progressivamente mais esbeltos. No fim da década de 70, a tomada de consciência das preocupações de conforto térmico, aliada à necessidade de poupar energia, e à consequente publicação de regulamentação respectiva [8], conduziram à vulgarização do emprego de isolantes térmicos preenchendo a caixa de ar das paredes duplas.

Ao longo deste processo evolutivo manteve-se a tradição de rebocar as paredes. No entanto os rebocos à base de ligantes hidráulicos foram substituindo os rebocos à base de ligantes aéreos, a qualidade de execução tornou-se menos cuidada e perdeu-se o carácter regional das soluções arquitectónicas e construtivas. A fig.1.1 procura fazer a síntese do processo evolutivo.

A optimização dos materiais e soluções existentes, ou a criação e desenvolvimento de novos materiais ou soluções alternativas aos materiais tradicionais, se bem que tentada em algumas situações, não têm conseguido implantar-se de forma relevante.

Apesar disso, infelizmente, as anomalias e ocorrências patológicas associadas às soluções consideradas tradicionais são frequentes, resultando de, entre outras causas, um processo em que o enquadramento regulamentar é escasso ou praticamente inexistente [9,10]. A escolha e pormenorização da solução a adoptar na envolvente das construções não é objecto de uma atenção e pormenorização na fase de projecto compatível com a sua importância, sendo normalmente deixada ao critério dos seus executores.

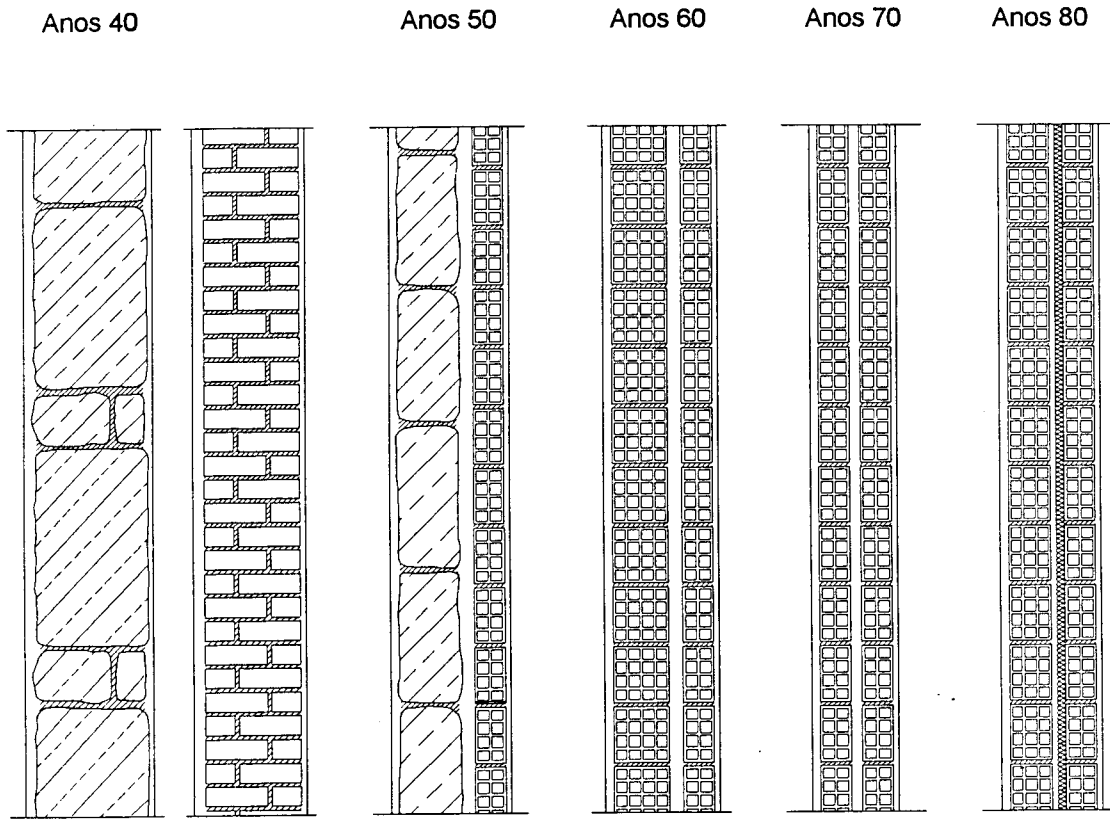


Fig. 1.1 - Síntese aproximada da evolução das paredes exteriores em Portugal

Em síntese, poderá dizer-se relativamente às paredes exteriores actualmente usadas em edifícios que:

- são normalmente de simples preenchimento, duplas, não ultrapassando em geral o pano mais espesso 0.15 m de espessura, realizadas com tijolo cerâmico de elevada furação horizontal e mecanicamente pouco resistente, com utilização frequente de isolantes na caixa de ar, sobretudo nas zonas mais frias;
- as paredes duplas são geralmente pouco cuidadas ao nível da ligação entre panos, drenagem e ventilação da caixa de ar, fixação de isolante, atenuação de pontes térmicas e ligação à estrutura;
- as soluções de pano simples tem pouca expressão, sendo em regra realizadas com blocos de betão celular autoclavado e blocos de betão de argila expandida, cujas produções incluem espessuras superiores à dos blocos cerâmicos actuais que não ultrapassam 0.220 m;

- não existem produções industrializadas de acessórios e elementos para a resolução de pontos singulares das paredes, o que cria situações de improviso e deficiente qualidade construtiva;
- quer as paredes duplas, quer as paredes simples são generalizadamente revestidas com rebocos tradicionais normalmente ricos em ligantes hidráulicos, pouco porosos e realizados por mão de obra pouco experiente;
- o acabamento dos rebocos é feito muito frequentemente por pintura, embora tenham também alguma expressão os revestimentos cerâmicos e de pedra;
- as soluções de parede dupla com tijolos "face à vista" são pouco frequentes, mas tendencialmente crescentes.

A nível internacional verifica-se preocupação com a definição das soluções mais adequadas à realização das paredes da envolvente, de forma adaptada às respectivas condições locais e centrada sobretudo em torno da melhoria do comportamento térmico, procurando tirar-se ainda partido da capacidade mecânica dos elementos, sem negligenciar a estanquidade à água.

Verifica-se ainda em diversos países a tendência para desenvolver novos tipos de elementos para alvenarias que possibilitem a adopção de paredes em pano simples, como alternativa à parede dupla, muito apoiada numa indústria dinâmica de produção de elementos para alvenaria. Esta tendência pode ser constatada pelos inúmeros artigos publicados em revistas estrangeiras e comunicações apresentadas em congressos internacionais relativos a alvenarias. Mesmo entre nós, já há tendências no mesmo sentido, sendo digno de registo um trabalho solicitado pela *APICC - Associação Portuguesa de Industriais de Cerâmica de Construção* - visando a melhoria da geometria dos tijolos cerâmicos, em que o autor esteve envolvido [11]. Os trabalhos mais relevantes serão referidos no Capítulo 2.

Estes novos elementos para alvenaria são fundamentalmente vocacionados para responder às preocupações de origem térmica, mas podem ter funções mecânicas em edifícios de pequeno e médio porte. As resistências mecânicas deste tipo de elementos são relativamente reduzidas, correspondendo aliás à linha europeia que privilegia a utilização das soluções estruturais em alvenaria resistente em edifícios unifamiliares de pequeno porte, ou edifícios multifamiliares de médio porte. A tendência americana é distinta da europeia. É vulgar nos EUA e Canadá o recurso a alvenarias resistentes em edifícios de grande porte, mesmo em zonas sísmicas, como resultado da existência de elementos para alvenaria com resistências elevadas usados sem vocação térmica, e do recurso às alvenarias armadas.

Justifica-se assim em nosso entender uma reflexão aprofundada sobre os seguintes aspectos:

- usar elementos para alvenaria mais espessos, de comportamento térmico e mecânico melhorado, na realização de paredes da envolvente em pano simples;
- desenvolver elementos para alvenaria que, para além de satisfazerem as exigências de carácter térmico constantes do *RCCTE* [8], possam ter funções resistentes em edifícios de pequeno porte;
- tornar viável a realização dos referidos elementos para alvenaria com materiais isolantes, como a argila alveolada ou betão de inertes leves, para satisfazerem os requisitos de isolamento térmico;
- ponderar as vantagens e inconvenientes das soluções correntemente adoptadas para a realização de paredes em Portugal.

O presente trabalho dedicar-se-à apenas aos elementos confeccionados com betão de inertes leves de argila expandida, já que a argila expandida é o inerte leve mais difundido em todo o mundo. Existe actualmente em Portugal uma unidade produtora de argila expandida que alimenta um conjunto de indústrias produtoras de artefactos de betão, entre os quais blocos de betão para alvenaria. São objectivos destas produções tirar o máximo partido da baixa condutibilidade térmica do betão de argila expandida e desenvolver blocos de betão espessos que possam ser usados na realização de paredes em pano único.

1.2 - ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o objectivo de dar um contributo para a melhoria do comportamento térmico e mecânico dos elementos para alvenaria a usar na envolvente, recorrendo a blocos de betão de argila expandida, organizou-se um plano de investigação cujos objectivos principais são:

- estabelecimento de um modelo de simulação do comportamento térmico dos elementos de alvenaria;
- estabelecimento dos factores condicionantes do comportamento mecânico dos elementos de alvenaria ;
- validação experimental do modelo de simulação térmico e do modelo de comportamento mecânico;
- análise dos resultados da simulação e da validação experimental.

Para a simulação numérica do comportamento térmico, foram seleccionados os factores que à partida se consideravam ter mais influência no comportamento térmico dos elementos para alvenaria, avaliando-se a repercussão de cada um deles no desempenho da solução de parede que os incorpora.

Usou-se nesta simulação um programa de elementos finitos disponível na *FEUP* e correntemente usado noutras instituições de investigação - *COSMOS/M* -, com possibilidade de, entre outros, modelar o comportamento térmico e o comportamento mecânico.

No caso do comportamento mecânico o desenvolvimento foi menor, tendo-se limitado à identificação dos factores associados à geometria dos elementos e ao assentamento que condicionam o comportamento mecânico das paredes. A identificação desses factores foi efectuada através de uma síntese monográfica. Esta diferença de tratamento radica-se na importância relativa de cada uma das vertentes e na maior possibilidade de melhoria sob o ponto de vista térmico.

O estudo experimental foi levado a cabo recorrendo a blocos de betão de inertes de argila expandida da produção corrente da *PAVILECA*, e ainda a um bloco melhorado, cuja geometria foi desenvolvida propositadamente para este trabalho.

A validação experimental do modelo de simulação do comportamento térmico, de acordo com normalização *ISO*, foi efectuada no *LNEC* sobre 4 provetes de parede, utilizando uma câmara climática existente, desenvolvida para um trabalho de Tese cujo objectivo era o estudo teórico e experimental em condições de Inverno da transmissão de calor em janelas [12]. A referida câmara foi objecto de adaptações visando a realização de ensaios de parede.

A validação experimental do comportamento mecânico foi realizada sobre 24 provetes de alvenaria de acordo com a normativa em preparação no *CEN*, utilizando uma prensa de compressão e equipamento complementar existente na *FEUP*.

Em toda a validação experimental, os parâmetros ligados à execução foram objecto de grande cuidado e controlo, procurando-se que fossem representativos de soluções correntemente utilizadas, ou correspondendo a evoluções esperadas no sector. Os materiais elementares constituintes dos provetes foram objecto de caracterização segundo normalização estrangeira de grande divulgação.

Para além da simulação numérica e da caracterização experimental, fez-se ainda uma síntese da informação que se conhece neste domínio.

O trabalho está organizado em nove Capítulos.

Após esta apresentação do trabalho, o Capítulo 2 faz a síntese das actuações possíveis tendentes à melhoria do comportamento térmico e mecânico dos elementos para alvenaria e das tendências internacionais e nacionais neste domínio. Os condicionalismos exigenciais a ter presentes na envolvente em pano único de blocos de betão de inertes leves são apresentados de forma genérica.

O Capítulo 3 é dedicado aos métodos de determinação das características térmicas dos materiais e produtos para alvenaria, com particular destaque à forma de determinação da resistência térmica dos alvéolos.

O Capítulo 4 procura fazer a síntese dos factores que influenciam o comportamento mecânico, sob acções verticais, dos elementos para alvenaria e das alvenarias .

O Capítulo 5 é dedicado à descrição das características e particularidades dos betões leves de argila expandida usados no fabrico de blocos. Neste capítulo apresentam-se ainda os resultados de uma caracterização experimental preliminar do betão de argila expandida usado no fabrico de blocos, bem como as principais exigências normativas aplicáveis a blocos de betão de inertes leves.

No Capítulo 6 descreve-se o modelo de simulação térmica utilizado, referindo os pressupostos em que o mesmo se fundamentou e os resultados obtidos.

No Capítulo 7 apresenta-se a caracterização experimental térmica e mecânica efectuada sobre os provetes de alvenaria e seus constituintes, descreve-se a forma de execução dos provetes, as condições de realização dos ensaios, os registos efectuados e os resultados obtidos. Em complementaridade, apreciam-se as características dos diversos constituintes, face ao especificado em normalização aplicável.

O Capítulo 8 é dedicado à apreciação e comentário dos resultados da simulação e validação efectuados na vertente térmica e mecânica.

Finalmente, no Capítulo 9, resumem-se as principais conclusões do trabalho de simulação e caracterização experimental e sugerem-se futuras vias de desenvolvimento.

1.3 - ABREVIATURAS, SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA

Durante a apresentação do trabalho houve a preocupação de procurar definir as abreviaturas e símbolos utilizados, à medida que iam aparecendo.

Apresenta-se no entanto, para facilitar a consulta, o conjunto das abreviaturas e símbolos usados ao longo do texto. Alguns símbolos têm significado diferente conforme o problema em discussão seja de índole térmica ou mecânica.

Sempre que os símbolos têm unidades específicas associadas inclui-se essa referência.

Ao longo do texto são usadas com frequência termos cuja acepção convêm clarificar:

- matéria-prima - substância natural, não trabalhada, a partir da qual, com eventual adição de outras matérias-primas ou materiais, se fabrica um material ou produto de construção;
- material de construção - substância fornecida à obra sem forma directamente aplicável ou sem forma própria definida;
- produto de construção - substância produzida industrialmente destinada a ser incorporada de modo permanente nas obras para, após ser trabalhada ou adicionada a outras matérias e produtos, constituir elementos de construção;
- elemento de construção - constituinte de um subsistema de construção aplicado no seu local de utilização, realizado a partir de materiais ou produtos de construção;
- elemento para alvenaria - produto de construção, produzido industrialmente a partir de diferentes matérias-primas ou materiais, possuindo características regulares e controladas, destinado em geral a ser assente com argamassa, para construção de paredes ou divisórias.

CAPÍTULO 2

MELHORIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DAS ALVENARIAS POR ACTUAÇÃO NA GEOMETRIA DOS ELEMENTOS - ESTADO DA ARTE

CAPÍTULO 2

MELHORIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DAS ALVENARIAS POR ACTUAÇÃO NA GEOMETRIA DOS ELEMENTOS - ESTADO DA ARTE

ÍNDICE

2.1 - GENERALIDADES
2.2 - MELHORIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO
2.2.1 - Actuações possíveis
2.2.2 - Material constituinte, incorporação de isolante e forma do elemento
2.2.3 - Assentamento
2.2.4 - Principais estudos realizados
2.3 - MELHORIA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
2.3.1 - Actuações possíveis
2.3.2 - Principais estudos realizados
2.4 - TENDÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAIS
2.4.1 - Tendências internacionais
2.4.2 - Tendências nacionais
2.5 - SÍNTESE DOS CONDICIONALISMOS EXIGENCIAIS DA ENVOLVENTE EM PANO ÚNICO DE BLOCOS DE BETÃO DE INERTES LEVES
2.5.1 - Introdução
2.5.2 - Exigências de segurança
2.5.3 - Adaptação a movimentos
2.5.4 - Estanquidade à água da chuva
2.5.5 - Durabilidade
2.5.6 - Conforto termohigrométrico
2.5.7 - Conforto acústico
2.5.8 - Adaptação à utilização e execução
2.5.9 - Exigências de economia e produtividade

CAPÍTULO 2

MELHORIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DAS ALVENARIAS POR ACTUAÇÃO NA GEOMETRIA DOS ELEMENTOS - ESTADO DA ARTE

2.1 - GENERALIDADES

As paredes exteriores são um elemento construtivo sobre o qual recai uma multiplicidade de exigências, onde se destacam como mais significativas as seguintes:

- exigências de segurança (estrutural e sob acção do fogo);
- exigências de conforto (térmico e acústico);
- exigências de estanquidade à água da chuva;
- exigências de aspecto;
- exigências de adaptação à utilização;
- exigências de economia e produtividade.

A melhoria das condições de conforto nos edifícios em geral e na habitação em particular, associada às preocupações de gestão racional de energia, conferem ao comportamento térmico das construções um peso relevante. As exigências de conforto térmico são assim condicionantes da concepção da envolvente das construções, com destaque para as paredes exteriores.
Cabe portanto às paredes conciliar um conjunto muito vasto de requisitos distintos, nem sempre facilmente compatibilizáveis.

Tendo em vista a prossecução dos objectivos referidos, consubstanciam-se as seguintes alternativas:

- a primeira alternativa procura, no limite, um elemento para cada função, ou seja, um elemento ou componente asseguram a segurança estrutural, outros elementos têm apenas como objectivo a separação dos espaços, cabendo ainda a outros as funções de isolamento térmico, estanquidade à água da chuva, etc.;

- a segunda alternativa, optimizante mas mais complexa, procura concentrar num único componente construtivo uma multiplicidade de funções que a parede deve desempenhar. Alguns autores [13] designam estes elementos como elementos de 2ª geração.

Embora esta perspectiva seja redutora do problema, verifica-se que existem em termos construtivos estas duas tendências. A preferência por uma ou outra das alternativas radica-se em diversas variáveis como a tradição construtiva das diferentes regiões, as soluções arquitectónicas mais correntes, os aspectos relativos ao clima, materiais de construção disponíveis, e mesmo aspectos de moda, podendo, sem nenhuma incoerência, coexistirem as duas tendências na mesma região, fig. 2.1.

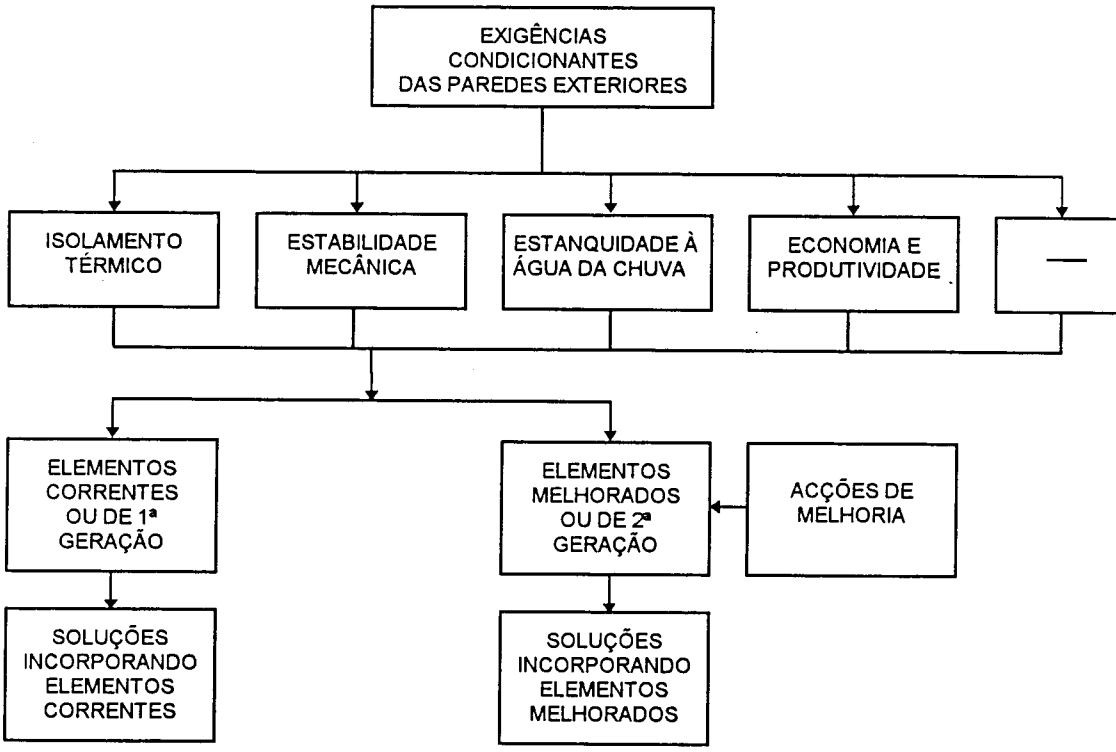


Fig. 2.1 - Síntese dos condicionantes e soluções para a envolvente

Em Portugal nos últimos anos tem-se assistido a modificações no sector da construção de edifícios, principalmente nas seguintes vertentes:

- alargamento do enquadramento regulamentar, visando uma melhoria de desempenho das construções em termos de conforto;
- evolução das práticas construtivas no sentido de uma maior racionalidade e economia de mão-de-obra;
- aparecimento de novos materiais e sistemas construtivos.

Todavia, lamentavelmente, nem sempre a evolução das práticas construtivas e os novos materiais e sistemas têm subjacentes a reflexão necessária, visando a adaptação às nossas condições reais. Por estas razões, e porque as paredes exteriores são um constituinte fundamental das construções, parece-nos oportuno reflectir sobre a melhoria do comportamento térmico e mecânico das alvenarias - duas das funções mais importantes das paredes - por actuação ao nível da geometria dos elementos.

Neste capítulo far-se-à a síntese de:

- estado da arte das actuações possíveis tendentes à melhoria do comportamento térmico;
- estado da arte das actuações possíveis tendentes à melhoria do comportamento mecânico;
- tendências internacionais e nacionais, nos domínios em apreço;
- condicionantes exigenciais da envolvente dos edifícios em pano único realizada em blocos de betão de inertes leves;

2.2 - MELHORIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

2.2.1 - Actuações possíveis

Como se sabe a grandeza que define o isolamento térmico de uma parede é *o coeficiente de transmissão térmica* - K - definido como sendo a quantidade de calor que, por unidade de tempo, atravessa uma superfície de área unitária por unidade de diferença de temperatura, entre os ambientes que separa. Para paredes exteriores pode ser calculado pela expressão seguinte:

$$K = \frac{1}{1/h_i + 1/k_p + 1/h_e} \qquad (2.1)$$

em que:

$1/h_i$, $1/h_e$ - resistências térmicas superficiais interior e exterior respectivamente ($m^2.^oC/W$);

k_p - condutância térmica da parede ($W/(m^2.^oC)$) , definida como sendo a quantidade de calor que, por unidade de tempo, atravessa uma superfície de área unitária, por unidade de diferença de temperatura entre as duas faces da parede.

Atendendo a que nas paredes exteriores, nas condições normais de utilização, as resistências térmicas superficiais - $1/h_i$, $1/h_e$ - são praticamente constantes, e que o seu valor, fixado regulamentarmente, é o seguinte:

$1/h_i$ = 0.12 $m^2.^oC/W$

$1/he$ = 0.04 $m^2.°C/W$

$$K = \frac{1}{0.16 + 1/kp} \qquad (2.2)$$

Como a melhoria do isolamento térmico das paredes passa pela minimização do coeficiente de transmissão térmica - K -, se representarmos K em função de $1 / kp$, a curva obtida é uma hipérbole, fig 2.2 .

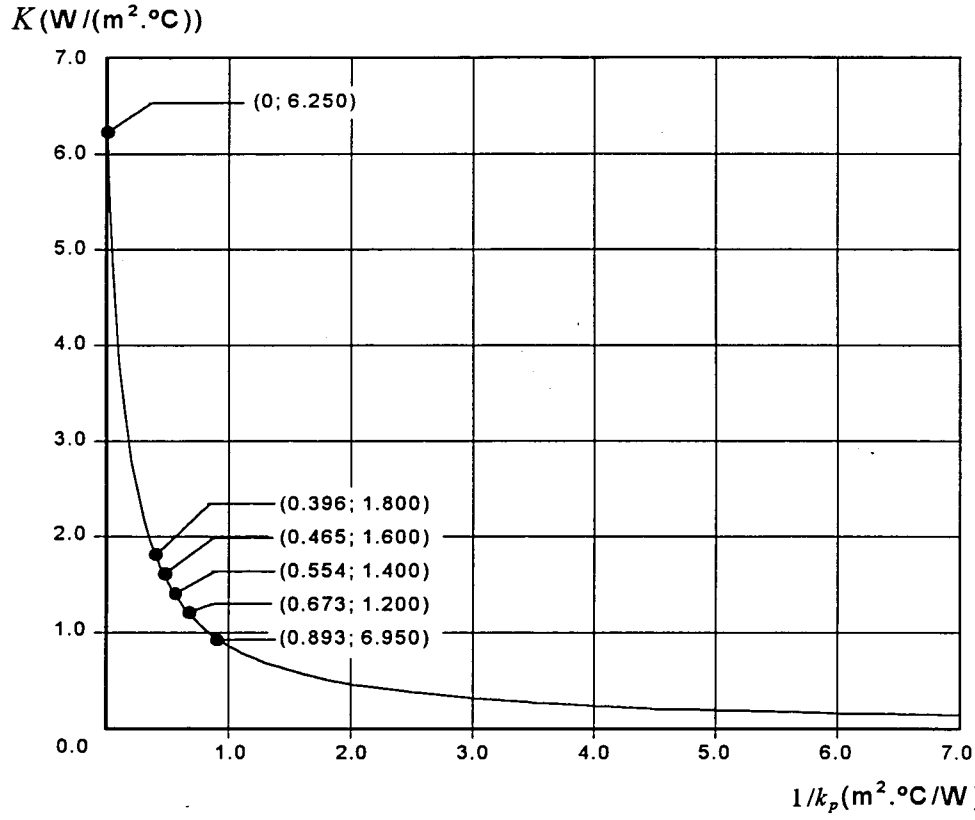


Fig. 2.2 - Representação gráfica do coeficiente de transmissão térmica K de uma parede, em função da sua resistência térmica $1 / kp$

A análise da figura evidencia aspectos importantes:

- mesmo numa parede com resistência térmica nula, (de vidro, por exemplo), K é próximo de 6.25 W/(m².°C);
- a curva começa por ter um decrescimento rápido, mas a partir de uma certa altura a redução de K só pode ser conseguida com grandes acréscimos de $1 / kp$, ou seja, dado que a envolvente das construções comporta outros elementos além das paredes, há um limiar a partir do qual não faz sentido tentar melhorar o isolamento térmico das paredes, pois este só pode ser conseguido com grandes custos.

Sendo kp função das seguintes grandezas: espessura e condutibilidade térmica dos materiais constituintes dos revestimentos, isolamento térmico do tosco da alvenaria, (compreendendo a influência do próprio elemento e das juntas); a minimização de kp passa pela maximização da espessura e isolamento do tosco da parede e dos seus revestimentos. As actuações possíveis poderão dividir-se em quatro vertentes, embora estas não sejam independentes entre si:

- material constituinte;
- incorporação de isolante;
- forma do elemento;
- assentamento.

2.2.2 - Material constituinte, incorporação de isolante e forma do elemento

Sintetizam-se na fig. 2.3 as actuações possíveis, visando a melhoria do comportamento térmico dos elementos para alvenaria, ao nível do material constituinte do elemento, número e características geométricas dos alvéolos, espessura e disposição dos septos, recurso ou não a isolante.

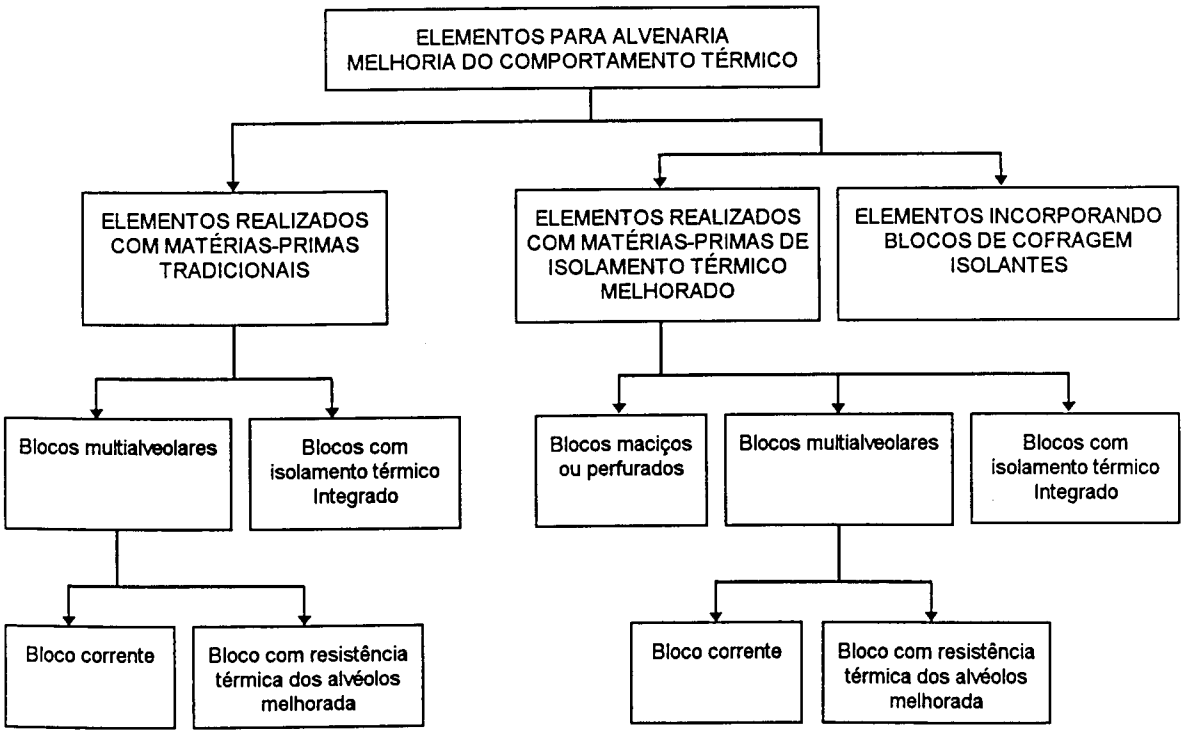


Fig.2.3 - Actuações tendentes à melhoria do comportamento térmico de elementos para alvenaria

Os objectivos referidos são comuns a todos os tipos de elementos - cerâmicos, de betão de inertes correntes, leves, ou outros - embora o âmbito deste trabalho se restrinja aos blocos de betão de inertes leves de argila expandida.

Para os elementos realizados com matérias-primas tradicionais - cerâmicos ou de betão de inertes correntes - uma primeira constatação tem a ver com a dificuldade em, apenas com o elemento e sem complemento de isolamento, satisfazer as exigências climáticas em zonas medianamente exigentes, por exemplo zona I_3 do *RCCTE* [8]. Esta dificuldade subsiste mesmo que se recorra a paredes espessas em pano simples, em substituição das paredes duplas, conforme objectivo deste estudo.

Ainda relativamente aos elementos realizados com materiais tradicionais, a melhoria do comportamento térmico pode ser conseguida das formas seguintes, (vd. fig. 2.4):

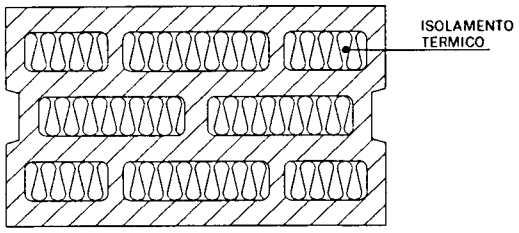
- criando blocos multialveolares, multiplicando o número de fiadas de alvéolos e tirando assim partido do elevado poder isolante do ar;
- privilegiando o desencontro das fiadas consecutivas de alvéolos e limitando o número de ligações transversais;
- incorporando total ou parcialmente isolante térmico[1] nos alvéolos;
- diminuindo a emissividade das paredes dos alvéolos, por forma a aumentar a resistência térmica dos mesmos;
- realizando blocos ditos de isolamento integrado, em que dois semi-blocos são ligados por placa de isolamento térmico pré-moldada ou injectada.

Os produtos não tradicionais para alvenaria, com isolamento térmico melhorado, podem resultar da utilização na sua produção de materiais mais isolantes, como as argilas alveoladas, os betões leves ou mesmo isolantes térmicos. Aplicam-se a estas matérias-primas as actuações já referidas para os materiais tradicionais visando a melhoria do seu comportamento térmico.

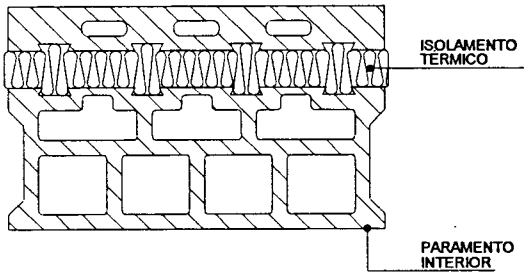
Sobressaem como desvantagens inerentes à utilização de materiais mais isolantes, a redução da resistência mecânica final dos produtos para alvenaria, o acréscimo da importância relativa das juntas argamassadas, a menor estabilidade dimensional perante variações do teor de água, e eventualmente o custo.

[1] De acordo com a certificação de isolantes térmicos para a construção vigente em França, ACERMI [14], consideram-se produtos isolantes os que apresentarem uma resistência térmica mínima de 0.5 $m^2.°C/W$ e cuja condutibilidade térmica seja no máximo 0.065 W /(m.°C).

a) Bloco de betão com isolamento térmico preenchendo todos os alvéolos



b) Bloco de betão com camada contínua de isolamento térmico incorporado em fabrica



c) Bloco de betão com isolamento térmico incorporado em fabrica

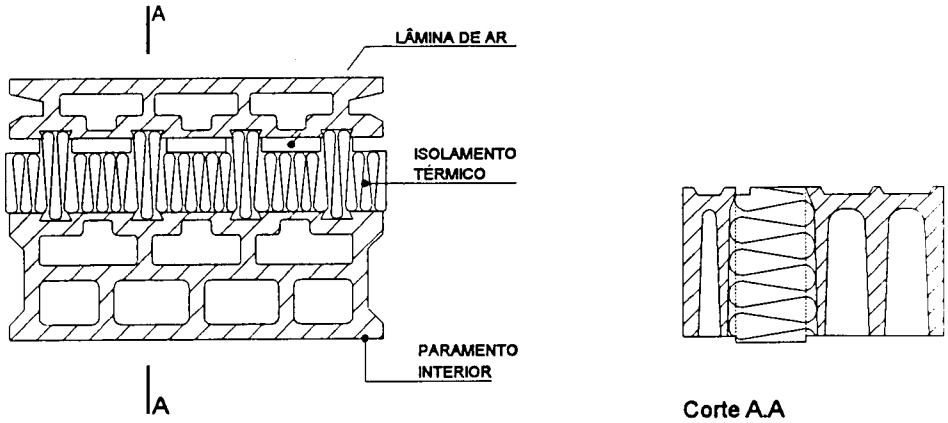


Fig. 2.4 - Aspecto da geometria de blocos com isolamento térmico integrado

Como desvantagens complementares, válidas para as matérias-primas tradicionais e não-tradicionais, usadas na produção de elementos para alvenarias, a ter em conta nas acções atrás enunciadas, destacam-se:

- dificuldade tecnológica em realizar a projecção de revestimentos nos alvéolos, por forma a reduzir as perdas por radiação, essas dificuldades vêm acrescidas em texturas mais cavernosas;
- comportamento deficiente de elementos com grandes variações de isolamento térmico ao longo da sua espessura, derivado sobretudo de choques térmicos e condensações no interior do elemento.

Por último, as soluções com utilização de elementos incorporando blocos de cofragem isolantes correspondem a sistemas similares ao que se apresenta na fig.2.5. Não se trata tanto de alvenarias, mas mais de uma parede de betão simples ou armado, com cofragem perdida isolante, constituida pelos blocos.

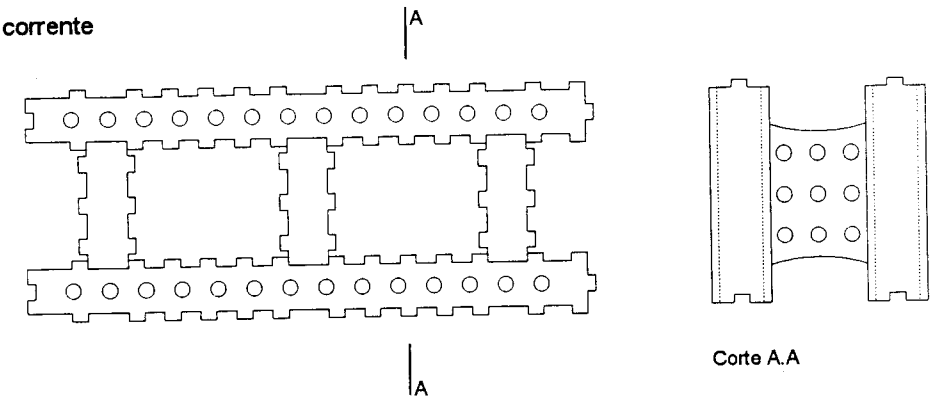
Quanto à forma, para além dos aspectos já referidos mais associados à geometria interna, em geral os elementos podem ter dimensões correntes e formatos rectangulares, associados às formas de movimentação, manuseio e assentamento habituais, ou formatos desenvolvidos visando a melhoria de determinadas características dos elementos. São ainda passíveis de desenvolvimento elementos de grandes dimensões, requerendo dispositivos mecânicos de manuseio e assentamento, sendo importante definir nestes casos a fronteira entre as alvenarias de grandes blocos e os sistemas de painéis.

2.2.3 - Assentamento

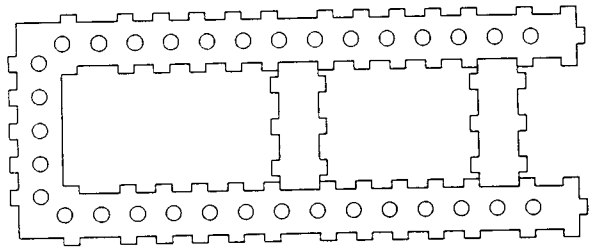
As juntas de assentamento representam, sob o ponto de vista térmico, problemas para as alvenarias. Constituem normalmente heterogeneidades e pontes térmicas. Estes aspectos acentuam-se no caso dos elementos realizados com matérias - primas mais isolantes. Os efeitos negativos das juntas de assentamento podem ser minorados pelas seguintes actuações:

- redução do número de juntas, através do aumento das dimensões faciais dos elementos, diminuindo assim a proporção da área de juntas relativamente à área ocupada pelos elementos;
- diminuição do "peso" das juntas através da redução da sua espessura, por eliminação do preenchimento das juntas verticais e, no limite, pela eliminação do preenchimento das juntas horizontais;
- utilização de argamassas de assentamento mais isolantes;
- recurso a descontinuidades nas juntas de assentamento por forma a reduzir as pontes térmicas.

a) Bloco corrente



b) Bloco de topo



c) Bloco de lintel

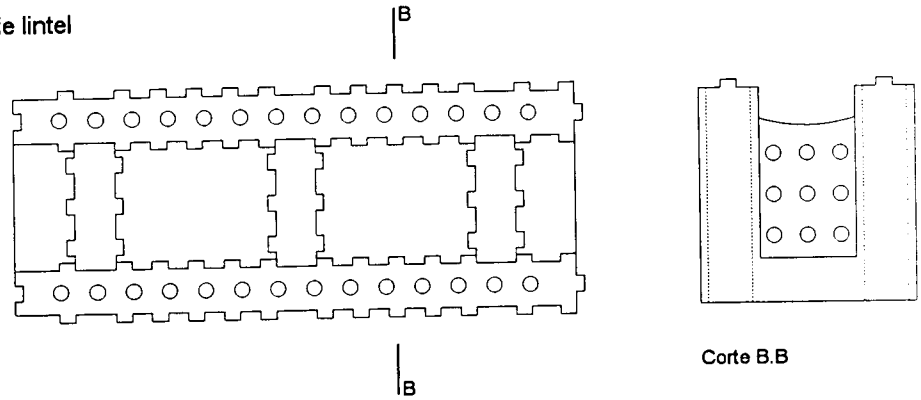


Fig. 2.5 - Aspecto da geometria de uma gama de blocos de cofragem isolantes, a preencher com betão

2.2.4 - Principais estudos realizados

Referem-se seguidamente no Quadro 2.1 os estudos internacionais que se conhecem no domínio da melhoria do comportamento térmico dos elementos para alvenaria :

Quadro 2.1 - Síntese de referências internacionais relativas à melhoria do comportamento térmico

PAÍS	DATA	REFª.	ENTIDADE	SÍNTESE DE OBJECTIVOS
ALEMANHA				
	1979	[15]	-	Discute o isolamento térmico de paredes exteriores realizadas em alvenaria sem isolamento integrado, revestidas nas duas faces e os limites possíveis de optimização.
	1980	[16]	-	Expõe as soluções preconizadas na normalização alemã, para adequar o desempenho das paredes em pano simples às exigências regulamentares.
	1982	[17]	-	Apresenta a possibilidade de realização de elementos para alvenaria, com isolamento integrado, como resposta ao aumento das exigências regulamentares relativas a comportamento térmico.
	1986	[18]	Institut fur Ziegelforschung	Demonstra que é possível, recorrendo a paredes espessas em pano único, realizadas com elementos cerâmicos optimizados, satisfazer as exigências regulamentares relativas a conforto térmico de paredes na Alemanha.
	1991	[19]	Liapor	Relatório síntese das acções desenvolvidas na Alemanha nos últimos anos ao nível dos blocos de betão leve, tendo em vista a melhoria do seu comportamento térmico.
ÁUSTRIA				
	1979	[20]	-	Refere estudos realizados na Áustria para melhorar o isolamento térmico das paredes, com destaque para o emprego de blocos de betão. Discute a influência dos diversos factores e a sua importância relativa.
	1987	[21]	-	Estudo de optimização da geometria de elementos cerâmicos para alvenaria em pano simples, satisfazendo as exigências regulamentares austríacas, incluindo simulação numérica e validação experimental.
	1990	[22]	-	Apresenta os diferentes tipos de blocos desenvolvidos para satisfazer as exigências térmicas (blocos perfurados espessos, blocos de betão leve, blocos com isolamento integrado, blocos de cofragem e blocos de betão com inertes de madeira). Evidencia que esses blocos satisfazem as exigências austríacas de isolamento térmico.
EUA				
	1980	[23]	-	Para diferentes soluções de alvenaria de blocos de betão, apresentam-se resultados analíticos do coeficiente de transmissão térmica e a comparação dos mesmos com resultados experimentais obtidos em diferentes laboratórios.

Quadro 2.1 (cont.) - Síntese de referências internacionais relativas à melhoria do comportamento térmico

FRANÇA				
	1979 1980 1985	[24] [25] [26]		Apresenta estudos sobre a viabilidade de produção industrial e características técnicas de blocos de betão de inertes leves não tradicionais, maciços, multialveolares e com isolamento integrado.
	1986	[27]	CERIB	Estudo sobre a viabilidade de utilização de betões de poliestireno expandido em alvenarias, como blocos maciços ou de cofragem isolante.
	1986	[28]	CSTB	Descreve os diferentes tipos de alvenarias isolantes, analisando as potencialidades térmicas de cada solução e sua aptidão para resolver os problemas térmicos.
	1994	[29]	CERIB, CSTB, CTBA	Estudo sobre a viabilidade de produção, utilização e características de blocos de betão com inertes de madeira.
GRÃ - BRETANHA	1981	[30]		Apresenta métodos de determinação das características térmicas de paredes de blocos vazados, por via analítica ou experimental e sintetiza os resultados para diversas geometrias
ISRAEL				
	1993	[31]		Estudo relativo à comparação do coeficiente de transmissão térmica de paredes, obtido por diferentes métodos analíticos, com destaque para uma simulação a 3D pelo método das diferenças finitas; analisam-se diversas geometrias e validam-se os resultados experimentalmente.
ITÁLIA				
	1980	[32]		Estudos relativos à optimização do comportamento térmico dos elementos para alvenaria, por actuação na geometria dos alvéolos recorrendo a modelos eléctricos, cálculo teórico e termografia.
	1982	[33]	UNIV. BARI	Apresenta expressões matemáticas para avaliar as características térmicas dos elementos para alvenaria.
	1986	[13]		Comparação entre o desempenho térmico das diferentes soluções de alvenaria e perspectivas de evolução.
	1986	[34]	POLI. TORINO	Possibilidades de desenvolvimento de novos produtos para alvenaria, visando a simplificação construtiva e a melhoria do comportamento térmico.
	1990	[35]	UNIV. PÁDUA	Estudo do comportamento térmico dos elementos para alvenaria por simulação numérica a 2D, pelo método dos elementos finitos.
NORUEGA				
	1992	[36]	NBRI	Descreve-se a evolução da construção de alvenaria na Noruega e a preocupação em melhorar o desempenho térmico dos elementos , tendo particular atenção aos problemas de estanquidade à água da chuva; descreve-se um bloco "sandwich" em betão de inertes leves de argila expandida incorporando isolante e disposições drenantes.

2.3 - MELHORIA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

2.3.1 - Actuações possíveis

A tentativa de concentrar num único componente construtivo uma multiplicidade de funções, no que respeita aos elementos para alvenaria, tem privilegiado a melhoria do comportamento térmico com eventual prejuízo do comportamento mecânico.

Com efeito, a principal vocação destes elementos é a realização de paredes constituintes da envolvente, com funções resistentes em edifícios de pequeno e médio porte, ou a realização de panos de enchimento na envolvente de edifícios com estrutura reticulada. Assim sendo, a melhoria do comportamento mecânico dos elementos para alvenaria vem secundarizada pelos aspectos que se revelam determinantes no seu desempenho:

- exigências de conforto térmico;
- exigências de estanquidade à água da chuva;
- exigências de economia e produtividade.

Em termos de comportamento mecânico, a investigação tem-se centrado na percepção dos mecanismos de funcionamento estrutural das alvenarias e no estabelecimento dos respectivos modelos de comportamento.

Em geral, a compreensão dos referidos mecanismos de funcionamento e da influência relativa dos diferentes factores tem permitido desenvolver acções de melhoria sob os outros pontos de vista, sem penalizar o comportamento mecânico.

Apesar do referido, tem-se conhecimento de acções tendentes à melhoria efectiva do comportamento mecânico, sobretudo através das seguintes actuações:

- Melhoria das características mecânicas das matérias-primas usadas na produção dos elementos para alvenaria, sem penalizar as suas características térmicas. Esta actuação passa pelo conhecimento mais profundo das características dos inertes, pela optimização da composição do betão e ainda pela utilização como matéria-prima de resíduos diversos [37, 38, 39] (madeira, cortiça, subprodutos de demolições, etc.).

- Optimização da geometria interna dos produtos para alvenaria. Esse objectivo pode ser conseguida ao nível do aparelho da alvenaria, procurando, no caso dos elementos de furação vertical, assegurar que entre fiadas sucessivas haja uma sobreposição efectiva da totalidade dos septos [40]. A um nível mais microscópico é possível, através de simulação por métodos numéricos, procurar optimizar a configuração da geometria do elemento [41].

Em paralelo, tem-se também conhecimento de acções que, sem prejudicar o comportamento mecânico, procuram tirar partido do melhor conhecimento do funcionamento estrutural das paredes, através da racionalização da execução das alvenarias, com acréscimos de produtividade e melhoria do comportamento térmico:

- recurso a elementos com maiores dimensões faciais;

- realização de juntas verticais parcialmente argamassadas, ou secas com dispositivos de encaixe;

- recurso a juntas horizontais delgadas com utilização de argamassa - cola;

- recurso a argamassas de assentamento leves;

- recurso a aparelhos de assentamento que favoreçam o aumento da produtividade e eventualmente a automatização do assentamento.

No Capítulo 4 dar-se-à notícia mais detalhada da influência destes factores no comportamento mecânico das alvenarias.

2.3.2 - Principais estudos realizados

Referem-se seguidamente no Quadro 2.2 os estudos internacionais que se conhecem no domínio da melhoria do comportamento mecânico dos elementos para alvenaria.

Quadro 2.2 - Síntese de principais referências internacionais relativas à melhoria do comportamento mecânico

PAÍS	DATA	REFª.	ENTIDADE	SÍNTESE DE OBJECTIVOS
ALEMANHA				
	-	[42]	-	Discute a interacção entre a melhoria do comportamento térmico e mecânico de elementos cerâmicos para alvenaria.
	1989	[43]	-	Sintetiza os resultados da investigação na Alemanha, aplicada ao domínio das alvenarias, visando reduzir custos e racionalizar processos.
	1990	[44]	-	Apresenta um estudo visando a melhoria do isolamento térmico em elementos cerâmicos para alvenaria, por actuação no material constituinte, na geometria e argamassa de assentamento. Discute a influência destes aspectos no comportamento mecânico.
EUA				
	1993	[41]	-	Apresenta os resultados de um projecto de optimização da forma de blocos de betão leve correntes nos EUA, através de uma análise bidimensional por recurso ao m.e.f.. Esta análise permite determinar as regiões críticas sob o ponto de vista mecânico e melhorar a geometria.
	1994	[37]		Discute as particularidades dos betões para a confecção de blocos, com destaque para os betões de inertes leves. Analisam-se as particularidades da composição deste tipo de betões e em que medida as características finais destes betões e produtos podem ser melhoradas.
FRANÇA				
	1986	[45]	CERIB	Apresenta um método de cálculo para avaliação da capacidade resistente das alvenarias sob acção de cargas verticais. Apresentam-se resultados de ensaios e compara-se o funcionamento mecânico de alvenarias realizadas com juntas verticais preenchidas ou juntas secas.
	1986	[46]	CERIB	Analisa a aplicação dos critérios modernos de segurança estrutural ao domínio dos artefactos de betão e em que medida estes métodos podem contribuir para uma mais correcta exploração estrutural destes produtos.
ÍNDIA				
	1988	[40]	Indian Institute of Technologie	Discute as características das geometrias mais correntes de elementos para alvenaria e sugere-se uma geometria optimizada que assegura a sobreposição integral de todos os septos entre fiadas sucessivas, para um aparelho de assentamento desfasado de meio bloco.

2.4 - TENDÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAIS

2.4.1 - Tendências internacionais

Como resultado das preocupações em melhorar o comportamento térmico e mecânico dos elementos para alvenaria, e de acordo com o referido nos pontos anteriores, podem identificar-se tendências de evolução a nível internacional, na linha de um elemento para múltiplas funções que se sintetizam nos seguintes aspectos:

- paredes mais espessas;
- elementos menos densos;
- aumento do número de alvéolos;
- recurso a matérias-primas com condutibilidade térmica mais baixa que, simultaneamente, possam corresponder a subprodutos;
- recurso a subprodutos ou desperdícios industriais como matérias-primas (numa linha de preocupação com problemas ambientais e de optimização dos recursos existentes);
- recurso a juntas de assentamento descontínuas;
- utilização de argamassas de assentamento mais isolantes;
- utilização preferencial de juntas de assentamento delgadas.

A realização de elementos na linha destas tendências coloca alguns problemas que deverão ser tidos em conta na concepção dos elementos:

- juntas de assentamento como pontes térmicas locais, com importância crescente à medida que o elemento é mais isolante;
- estanquidade à água da chuva das paredes em pano único;
- compatibilidade dos elementos com a deformabilidade dos suportes;
- dificuldade em utilizar estes elementos à vista;
- custo das matérias-primas requeridas para a produção destes elementos, normalmente superior ao das matérias-primas requeridas para os produtos tradicionais.

2.4.2 - Tendências nacionais

Em Portugal os produtos tradicionais para alvenaria, além da pedra natural cuja utilização tem vindo progressivamente a reduzir-se, são os tijolos cerâmicos e os blocos de betão de inertes correntes. Salienta-se que as produções de tijolos cerâmicos actuais não incluem elementos de espessura

superior a 0.220 m. Os produtos tradicionais são usados com diversos fins, constituindo a envolvente da construção ou definindo a compartimentação. Em alguns casos a utilização destes elementos ultrapassa a função de preenchimento e os mesmos desempenham funções resistentes, embora normalmente sem a adopção de princípios de dimensionamento rigorosos.

Quanto aos produtos para alvenaria integrando processos de construção considerados não tradicionais, têm vindo a ser produzidos entre nós diversos produtos que incluem blocos com espessuras superiores ao máximo produzido em tijolos cerâmicos , dos quais se destacam como mais significativos e com produção industrial os seguintes:

- blocos de betão de inertes de argila expandida;
- blocos de betão celular autoclavado;
- blocos de betão incluindo como inerte leve granulado de cortiça previamente revestido com argamassa;
- blocos de betão de inertes correntes, com geometria adaptada à execução de juntas não argamassadas;
- blocos de cofragem de poliestireno expandido, a assentar por simples encaixe e para preencher com betão.

Estes produtos requerem soluções complementares não tradicionais, pelo que se deveria privilegiar a sua venda e utilização como elementos integrantes de um sistema e não como elementos isolados. Sem esta perspectiva e sem a existência de elementos e sistemas de acabamento complementares, é difícil assegurar o sucesso das soluções. Por outro lado os produtores deveriam pensar para além do seu produto, colaborando na preparação e planeamento da obra, desenvolvendo ferramentas específicas e apoiando tecnicamente a execução. Esta atitude não é habitual entre nós.

Em Portugal, aliás como em alguns países estrangeiros, a utilização destes produtos na realização de alvenarias tem estado aquém das expectativas. Para tal contribuirão principalmente os seguintes aspectos:

- conservadorismo tradicional do mercado de construção nacional e desconfiança relativamente a soluções não tradicionais;
- existência reduzida de documentação de carácter técnico sobre estes materiais e sistemas;
- alguns destes sistemas requerem soluções não tradicionais de assentamento e reboco;
- existem situações recentes de deficiente utilização destas soluções que estiveram na origem de várias patologias;
- os insucessos nas soluções ou produtos não tradicionais são muito amplificados, repercutindo-se de forma exagerada sobre os produtos, sem paralelo no que acontece nos produtos tradicionais onde ocorrem também muitas anomalias;

- número reduzido de soluções homologadas;
- a normalização existente aplicável às alvenarias e aos produtos usados na sua realização, é escassa e em alguns aspectos desactualizada, com excepção da regulamentação recente relativa ao conforto - *RGR - Regulamento Geral sobre o Ruído* , 1987 [47], *RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, 1990 [8] - salientando-se no entanto que esta regulamentação, sobretudo o *RCCTE*, tem dinamizado a utilização e desenvolvimento de novos materiais.

Apesar de não terem encontrado grande eco junto dos produtores de materiais de construção e do próprio mercado, tem havido entre nós alguns trabalhos visando a análise e a melhoria do comportamento térmico e mecânico dos elementos para alvenaria, em geral com o envolvimento do *LNEC*. Parecem-nos dignos de registo os seguintes:

- Trabalho conduzido por PAIVA em 1973 [48], visando a caracterização térmica por via analítica das paredes exteriores dos edifícios de alvenaria de tijolo furado. Analisa a influência de aspectos associados à geometria dos elementos nas características térmicas das paredes.
- Síntese das tendências actuais de evolução dos blocos para alvenaria, a nível internacional e nacional, elaborada por CARVALHO e LUCAS [49] em 1989.
- Estudo elaborado para a *APICC* pelo *CTCV*, *LNEC* e *IC* em 1993 [11], visando a melhoria das geometrias dos tijolos cerâmicos, incluindo caracterização experimental e estudo analítico.

2.5 - SÍNTESE DOS CONDICIONALISMOS EXIGENCIAIS DA ENVOLVENTE EM PANO ÚNICO DE BLOCOS DE BETÃO DE INERTES LEVES

2.5.1 - Introdução

Pretende-se sintetizar as exigências funcionais relativas a paredes, nas condições a seguir especificadas, funcionando como condicionalismos a ter presentes na concepção da geometria de blocos de betão de inertes leves, a utilizar na envolvente.

Esta abordagem aplica-se a paredes nas seguintes condições:

- constituem a parte opaca da envolvente dos edifícios;
- destinam-se a ser revestidas pelo exterior e interior com revestimentos tradicionais ou não tradicionais, actuando em complementaridade para desempenho das funções inerentes às partes opacas da envolvente;
- são constituídas por um pano único, realizado com blocos de betão de inertes leves de argila expandida.

Consideram-se como exigências principais aplicáveis aos elementos opacos da envolvente e particularmente das alvenarias nas condições enunciadas, as que se enumeram no Quadro 2.3 [50, 51, 52].

Quadro 2.3 - Principais exigências funcionais aplicáveis às alvenarias da envolvente

EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS	
SEGURANÇA	Estabilidade
	Segurança ao fogo
ADAPTAÇÃO A MOVIMENTOS	
ESTANQUIDADE À ÁGUA DA CHUVA	
DURABILIDADE	
CONFORTO	Termohigrométrico
	Acústico
ADAPTAÇÃO À UTILIZAÇÃO	
ASSOCIADAS À EXECUÇÃO	
ECONOMIA E PRODUTIVIDADE	

2.5.2 - Exigências de segurança

a) **Estabilidade**

As paredes, particularmente as constituintes da envolvente, devem ser concebidas por forma a satisfazerem a segurança regulamentar relativamente a todas as acções actuantes sobre a parede durante a vida da obra.

As acções a considerar serão evidentemente diferentes no caso das paredes terem ou não função estrutural, devendo em qualquer dos casos assegurar-se a verificação da estabilidade para o conjunto de acções aplicáveis em cada caso. Embora a verificação da estabilidade das paredes possa ser efectuada por métodos de análise estrutural, ou mesmo através de verificação experimental, é importante que na concepção da mesma se tenha em consideração a interacção com toda a estrutura e construção da qual a parede faz parte, obtendo-se normalmente a necessária rigidez e estabilidade, através de uma espessura adequada relativamente à altura e comprimento da parede. Assim, é vulgar existirem em documentos de carácter normativo referências a espessuras mínimas e esbeltezas[2] máximas, em paredes sujeitas às acções do vento:

[2] Entende-se por esbelteza o quociente da distância entre os elementos contíguos de travamento e a espessura da parede. Os elementos de travamento poderão ser elementos estruturais ou panos de paredes dispostos ortogonalmente com desenvolvimento suficiente.

- BS 5628: Part 3 [51]:

  - para além do estabelecimento de espessuras para paredes em função das mesmas serem duplas ou simples, do tipo de ligações e do zonamento sob acção do vento, refere os seguintes limites:

    - em paredes simples a esbelteza horizontal e vertical não deve exceder 40;
    - em paredes duplas a esbelteza horizontal e vertical, relativamente à espessura total da parede, não pode exceder 30, além disso cada um dos panos deve ter espessura mínima de 0.100 m, a caixa de ar não pode exceder 0.100 m e os dois panos devem estar unidos por ligadores de acordo com especificações detalhadas.

- DTU 20.1 [52]:

  - a esbelteza corrente de paredes entre pisos não deve ser superior a 30; caso a parede tenha utilização estrutural estes valores deverão ser mais reduzidos;
  - a existência de cargas concentradas provocadas pela existência de vãos, bem como pela suspensão de cargas deve ser objecto de análise, motivando a adopção das disposições construtivas adequadas. Da mesma forma a possibilidade de ocorrência de acções de impacto deve ser tida em conta na concepção da parede e dos seus acabamentos. Existem critérios e técnicas de ensaio objectivos que permitem avaliar o desempenho das paredes sob estes pontos de vista [53].

b) **Segurança ao fogo**

As alvenarias devem ser concebidas para terem um comportamento face ao fogo apropriado à sua utilização.

De acordo com o *RSCIEH - Regulamento de Segurança Contra Incêndio em Edifícios de Habitação* [54] o comportamento ao fogo dos materiais de construção e elementos construtivos caracteriza-se pelos seguintes indicadores:

- reacção ao fogo : contributo do material para a origem e desenvolvimento do incêndio, sendo a qualificação dos materiais sob este ponto de vista feita através de 5 classes (M0 a M4, correspondendo os extremos a materiais não combustíveis e a materiais facilmente inflamáveis, respectivamente);
- resistência ao fogo: comportamento face ao fogo de elementos construtivos, relativamente à manutenção das funções que tais elementos devem desempenhar em caso de incêndio, avaliando-se pelo tempo que decorre desde o início de um processo

térmico normalizado a que o elemento é sujeito, até ao momento em que este deixa de satisfazer as exigências relacionadas com as suas funções. De acordo com as exigências os elementos classificam-se em estáveis ao fogo (estabilidade), pára-chamas (estanquidade) e corta-fogo (estanquidade e isolamento térmico), fazendo-se a classificação sob estes pontos de vista através de escalões de tempo de 15 a 360 minutos.

A quantificação das exigências é expressa no *RSCIEH*, para edifícios de habitação, em função da utilização do edifício e da altura do mesmo acima do solo. O mesmo regulamento considera as partes opacas das paredes exteriores tradicionais satisfatórias, desde que sejam cumpridas condições complementares relativas aos vãos e a condições de vizinhança.

No que diz respeito às alvenarias constituídas por blocos de betão de inertes leves de argila expandida, o seu comportamento face ao fogo é em geral superior ao das alvenarias de blocos de betão normal, consideradas tradicionais, dado os inertes leves serem mais isolantes termicamente [55].

2.5.3 - Adaptação a movimentos

As construções estão sujeitas a pequenos movimentos, após a sua realização, que podem ser resultantes de:

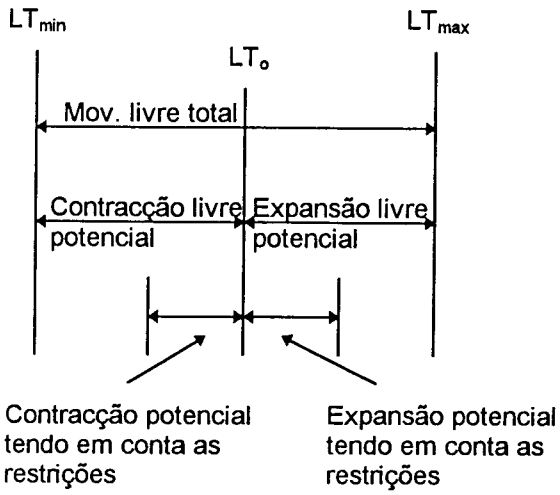
- deformação estrutural;
- movimentos das fundações;
- variações de temperatura;
- variações de humidade;
- acção química.

Como as alvenarias têm restrições que as impedem de se movimentar livremente, sob o efeito dos referidos movimentos desenvolvem-se tensões que podem provocar fissuração. Este risco pode vir aumentando nos pontos de concentração de tensões ou quando se usam argamassas de assentamento demasiado ricas.

Embora não existam exigências quantificadas sobre este ponto de vista, é fundamental que na fase de concepção se prevejam estes movimentos e se tomem medidas tendentes à eliminação ou redução dos seus efeitos negativos. A adequação das alvenarias a estas exigências passa pela adopção de disposições construtivas ao nível da parede e da sua interacção com a estrutura.

Sintetizam-se na figura 2.6 os factores que afectam os movimentos de origem térmica e por acção da humidade, nos blocos e na argamassa de assentamento [51].

MOVIMENTOS DE ORIGEM TÉRMICA

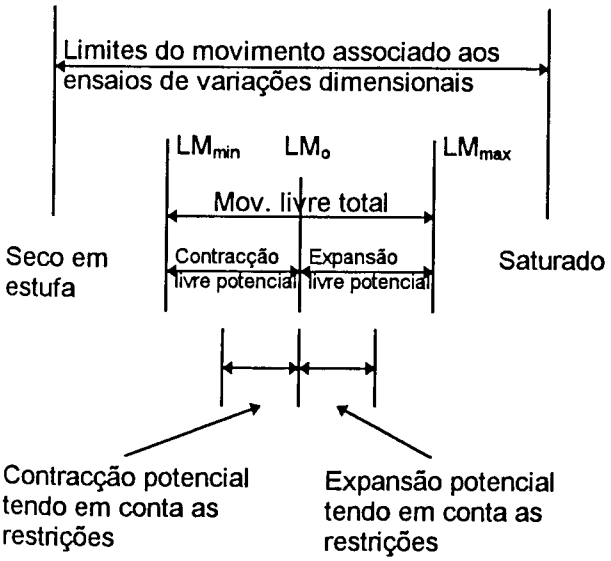


T_o - Temperatura inicial do material durante a construção

T_{min} - Temperatura mínima esperada para a parede

T_{max} - Temperatura máxima esperada para a parede

MOVIMENTOS PROVOCADOS PELA HUMIDADE NO ELEMENTO



LM_o - Comprimento associado ao conteúdo inicial de humidade

LM_{min} - Comprimento associado ao conteúdo mínimo de humidade

LM_{max} - Comprimento associado ao conteúdo máximo de humidade

MOVIMENTOS PROVOCADOS PELA HUMIDADE DAS ARGAMASSAS

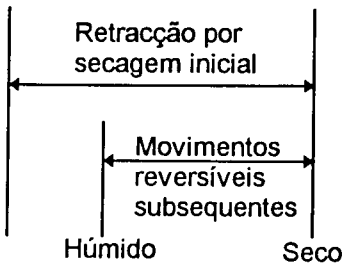


Fig. 2.6 - Factores afectando os movimentos de origem térmica e por acção da humidade em paredes

2.5.4 - Estanquidade à água da chuva

A parte opaca da envolvente das construções deve assegurar a minimização dos efeitos associados à incidência da água da chuva. A minimização destes efeitos traduz-se na ausência de infiltrações para o interior por efeito da chuva incidente, eventualmente acompanhada de vento e na ausência de infiltrações no seio da parede que provoquem o seu humedecimento exagerado e prolongado originando a deterioração da mesma.

A obtenção destes objectivos tem que ser alcançada adequando as soluções construtivas, incluindo tosco e revestimento, às condições locais de chuva incidente associada a vento.

O mecanismo de penetração de água está associado à quantidade, tipo e dimensões dos poros dos materiais constituintes da parede, à sua capacidade de absorverem a água superficial que por gravidade escorre pela parede e sobretudo à ocorrência de fissuras, onde, a simples acção da gravidade, ou a acção conjugada da chuva e vento asseguram um caminho para a penetração da água para o interior. Ao nível da alvenaria, a existência de descontinuidades, materializadas por câmaras de ar ou a simples interrupção da argamassa de assentamento nas juntas, são importantes em termos de estanquidade à água da chuva, porque funcionam como cortes de capilaridade, dificultando o percurso da água para o interior.

Na análise do comportamento à água da chuva das paredes há que considerar os seguintes factores:

- clima e exposição do local;
- constituição dos revestimentos;
- constituição do tosco da parede (incluindo características dos elementos, espessura do(s) pano(s), tipo de juntas e argamassa de assentamento);
- configuração arquitectónica do edifício ;
- qualidade de execução.

Em diversos países existem zonamentos e classificações sob o ponto de vista de chuva incidente batida pelo vento (índice de chuva incidente e índice de chuva incidente persistente[3]), conforme se mostra na fig. 2.7 relativamente ao critério adoptado na BS 5628: Part 3 [51] para a Grã- Bretanha. A

[3] Índice de chuva incidente - Produto dos valores médios anuais de precipitação (m), pela velocidade do vento (m/s) para cada direcção considerada. Uma unidade de chuva incidente corresponde aproximadamente a 200 l/m^2 de água da chuva em superfície horizontal.

Índice de chuva incidente persistente - Para cada direcção considerada, produto dos valores médios anuais de precipitação (m) pela velocidade do vento (m/s) e por um factor adimensional, função da velocidade e direcção do vento.

partir deste zonamento é possível, em função da localização geográfica e do grau de exposição, seleccionar as soluções construtivas mais adequadas para as paredes. Repare-se que existem sobreposições nas definições dos limites de cada classe associadas à natureza variável dos dados meteorológicos.

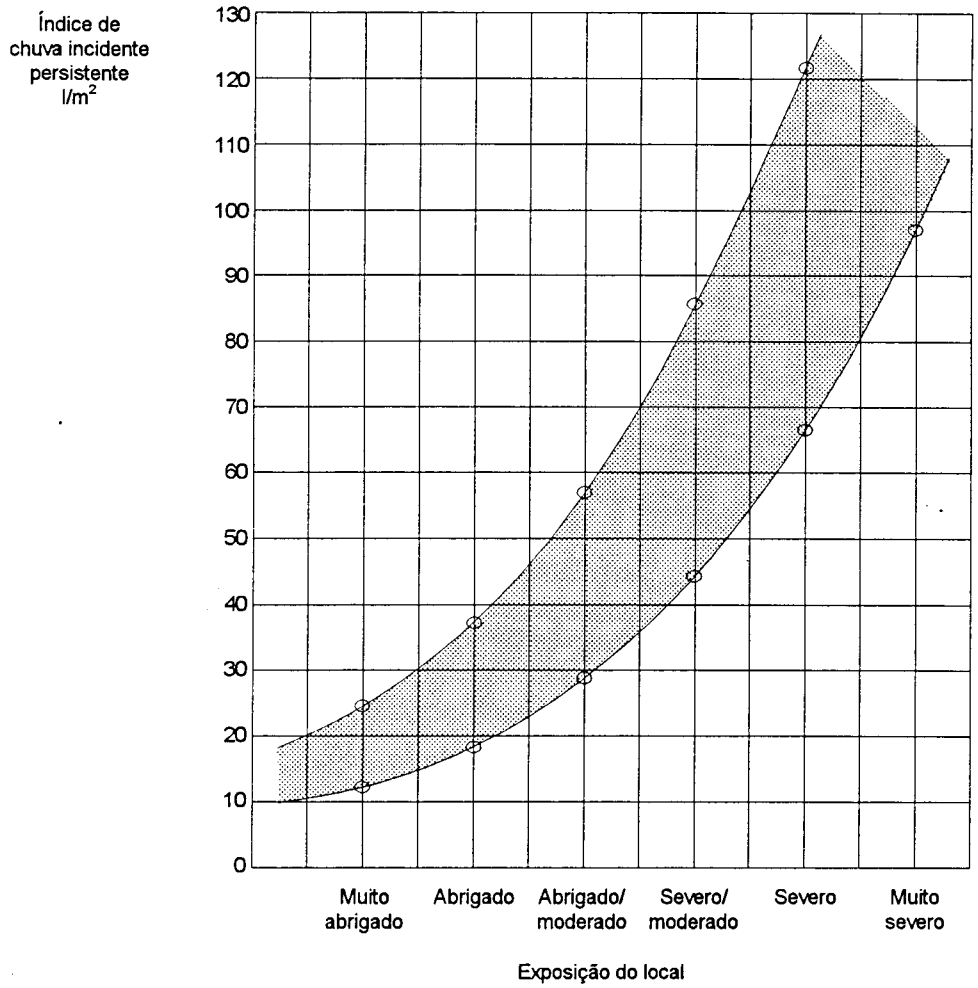


Figura 2.7 - Representação gráfica da classificação dos locais em termos de índice de chuva incidente persistente, adoptada na Grã-Bretanha [51]

Em Portugal foram feitos estudos na década de 60 no *LNEC* por PAIVA [56] que originaram uma proposta de zonamento de chuva incidente. Recentemente o assunto foi retomado em estudos conduzidos no *LNEC* por HENRIQUES [57].

Os revestimentos têm uma contribuição fundamental na satisfação dos requisitos de estanquidade à água da chuva. É habitual distinguir revestimentos de estanquidade de revestimentos de impermeabilização [58]. Os revestimentos de estanquidade são capazes de praticamente por si só

garantirem a estanquidade à água exigível em geral ao conjunto tosco / revestimento. Estes revestimentos mantêm as suas características de estanquidade mesmo no caso da ocorrência de fissuração limitada do suporte, e são conseguidos por revestimentos descontínuos ou por revestimentos de ligantes sintéticos armados.

Os revestimentos de impermeabilização conferem o complemento de impermeabilização à água necessário para que o conjunto tosco / revestimento seja estanque. O revestimento deve limitar a quantidade de água que atinge o suporte, mas será o conjunto tosco / revestimento que globalmente assegurará a estanquidade requerida. A conservação por parte destes revestimentos da sua função impermeabilizante, depende do comportamento do suporte, não reunindo em geral condições para conservarem essa capacidade quando ocorre degradação significativa do suporte, como por exemplo fissuração. Enquadram-se nesta classe os revestimentos tradicionais de ligantes hidráulicos (rebocos) e os revestimentos não-tradicionais de ligantes hidráulicos para impermeabilização de paramentos exteriores de paredes [58].

Os revestimentos condicionam assim de forma importante o desempenho das paredes exteriores, em termos de estanquidade à água da chuva, sobretudo no caso das paredes em pano simples, de tal forma que as disposições regulamentares francesas, DTU 20.1 [52] interditam a utilização desta solução sem revestimento (com excepção das alvenarias de pedra) e as disposições inglesas BS 5628: Part 3 [51] só o permitem em zonas abrigadas, conforme se pode verificar no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Espessura mínima das paredes em pano único função da exposição do local à chuva incidente, segundo BS 5628 : Part 3 [51]

EXPOSIÇÃO À CHUVA INCIDENTE	**Espessura mínima da parede excluindo revestimentos (mm)**					
	Elementos cerâmicos e sílico-calcários		**Elementos em betão**			
			Elem. de inertes correntes		**Elem.inert.leves e de betão cel.autoclavado**	
	Rev. de imperm.	**À vista**	**Rev. de imperm.**	**À vista**	**Rev. de imperm.**	**Á vista**
Muito severa	Não recomendado. Utilização de revestimentos de estanquidade					
Severa	328	Não rec.	250	Não rec.	215	Não rec.
Moderada/Severa	215	"	215	"	190	"
Abrigada/Moderada	190	440	190	440	140	440
Abrigada	90	328	90	328	90	328
Muito abrigada	90	190	90	190	90	190

A espessura dos elementos escolhidos e a sua capacidade de absorção de água são importantes em termos de estanquidade à água da chuva. A espessura mínima das paredes, particularmente da solução em pano simples, encontra-se em geral estabelecida em função das condições de exposição do local à chuva incidente, como pode ser visto no Quadro 2.4 para as disposições inglesas [51]. Convém referir que quer os elementos cerâmicos, bem como os elementos em betão, têm correntemente na Grã - Bretanha geometrias muito diferentes das adoptadas em Portugal, pelo que, mesmo que as condições de exposição fossem idênticas às existentes em Portugal, a definição de espessuras propostas na BS 5628:Part 3 [51] , não seria extrapolável para Portugal, dado que associados aos elementos intervêm outros factores, como a distribuição interna do material, geometria, etc., devendo no estabelecimento da espessura mínima atender-se às características dos materiais correntes em cada país .

O documento normativo francês DTU 20.1 [52], mais adaptável à realidade portuguesa, dado que os materiais correntemente utilizados em França e as soluções construtivas são mais próximas das adoptadas em Portugal, faz depender a especificação da espessura das paredes exteriores dos seguintes factores:

- localização da construção
  - interior de grandes centros urbanos,
  - interior de pequenos aglomerados ou periferia de grandes centros;
  - isolada em zona rural;
  - isolada junto ao mar.

- altura da parede acima do solo
  - ≤ 6 m
  - 6 - 18 m
  - 18 - 28 m
  - 28 - 50 m
  - 50 - 100 m

- existência de protecção
  - parede abrigada;
  - parede não abrigada.

Cada um destes factores encontra-se claramente definido, sendo possível para cada construção identificar a situação em que a mesma se enquadra.

No caso das paredes simples, as espessuras mínimas são as constantes do Quadro 2.5, devendo as paredes ser revestidas.

Quadro 2.5 - Espessura do tosco de paredes em pano único segundo DTU 20.1 [52]

SITUAÇÃO DA PAREDE	Espessura mínima do tosco (1) (mm)					
	Tij.maciço ou perfurado	Tij. vazado (furação horizontal)	Bloco cerâmico perfurado	Bloco de betão de inertes correntes	Bloco de betão de inertes leves	Bloco de betão celular autoclavado
Abrigada	220	225	200	200	225	200
Não abrigada até 6m	220	225 (2)	20 0(2)	20 0(2)	225	200 (2)
Não abrigada entre 6 e 18m	220	275 (2)	275 (2)	275 (2)	225	275 (2)
Não abrigada entre 18 e 28m	220	275 (2)	325 (2)	325 (2)	225	275 (2)
Não abrigada, isolada junto ao mar, até 6m e com tradição de uso	220	275 (3)	325 (3)	325 (3)	275 (3)	275 (3)

(1) Paredes obrigatoriamente revestidas

(2) Excepto junto ao mar

(3) Excepto em frente ao mar (orla marítima)

A composição da argamassa de assentamento, a sua plasticidade e a aderência entre a argamassa e os elementos, são aspectos importantes em termos de estanquidade à água de chuva.

O preenchimento ou não das juntas de assentamento com argamassa e os seus reflexos na estanquidade à água da chuva das paredes, é um assunto controverso.

Com efeito, segundo uma campanha de ensaios realizada em França na década de 60, a existência de juntas argamassadas comparativamente à adopção de juntas secas, reduz o risco de penetração de água, revelando melhor comportamento as juntas objecto de um acabamento mais cuidado [59]. Por outro lado a utilização de argamassas menos permeáveis parece melhorar o comportamento da parede sob este ponto de vista, bem como a utilização de juntas de assentamento descontínuas.

No entanto, os desenvolvimentos associados à melhoria do comportamento térmico e sobretudo as preocupações com a obtenção de ganhos de produtividade no assentamento de alvenarias, levaram em muitos casos à adopção de juntas verticais secas e à substituição das argamassas correntes por argamassa-cola nas juntas horizontais.
Neste caso, se bem que a configuração dos topos dos blocos possa contribuir para a melhoria da estanquidade, por exemplo através da adopção de perfis em dente de serra, vai sobretudo caber aos revestimentos exteriores assegurar a estanquidade à água da chuva. O revestimento deve ser capaz

de realizar "a ponte" entre elementos adjacentes, se não se pretender ver aumentado o risco de fissuração. Necessidade semelhante ocorria já quando as juntas horizontais e verticais das alvenarias assentes tradicionalmente, realizadas com argamassa corrente, eram incorrectamente preenchidas.

A qualidade de execução da parede é um factor importante pois, além de outros aspectos, um preenchimento incorrecto ou insuficiente das juntas pode facilitar a penetração da água [59].

As paredes duplas, embora usadas em construções Gregas e Romanas, parecem ter sido reinventadas pelos Ingleses no início do século XIX, como solução mais adaptada à protecção contra a humidade [60]. Com efeito, em termos conceituais as paredes duplas revelam, comparativamente às paredes simples, um melhor comportamento à penetração da água da chuva, dada a existência de uma cavidade que materializa uma barreira à passagem da água para o pano interior. No entanto a espessura reduzida do pano exterior, quando comparada com as soluções de parede simples, tornam-no menos resistente aos movimentos que lhe são impostos e mais sensível aos aspectos de qualidade construtiva. Por outro lado, a reduzida espessura de algumas caixas de ar, a existência de inúmeros pontos de contacto entre os panos, a dificuldade em realizar uma drenagem eficaz da caixa de ar e o excesso de confiança no bom comportamento das paredes duplas, fazem com que em muitas situações concretas o desempenho real das paredes duplas seja inadequado. Sintetizam-se no Quadro 2.6 os principais factores que afectam a estanquidade à água da chuva de paredes duplas segundo a normalização inglesa [51].

Quadro 2.6 - Factores que influenciam a estanquidade à água da chuva de paredes duplas segundo BS 5628 : Part3 [51]

FACTORES	**ACRÉSCIMO DO RISCO DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA** →			
Revestimento	De estanquidade		De impermeabilização	Outro
Argamassa de assentamento	Cimento : cal :areia		Cimento : areia	
Acabamento da junta	Bem acabada		Mal acabada ou sem acabamento	
Caixa de ar (mm)	> 50	50	25	0
Isolamento térmico na caixa de ar	Sem isolamento		Preenchimento parcial com isolamento	Preenchimento total com isolamento

O tratamento arquitectónico das fachadas tem importância no comportamento à água da chuva da envolvente. Se por um lado a existência de fachadas muito lisas, com grandes envidraçados, conduz a um risco acrescido, a existência de elementos salientes, como varandas, parapeitos ou beirais, pode reduzir a exposição à chuva associada a vento e diminuir o risco de penetração.

2.5.5 - Durabilidade

A durabilidade da envolvente está ligada ao número de anos em que a mesma conserva um desempenho satisfatório.

A durabilidade das paredes é muito condicionada pela quantidade de água que a parede contêm e como esta se comporta na presença de água. A água pode ser proveniente entre outras origens da chuva, ou da ascensão capilar a partir das fundações.

Em termos de durabilidade é também importante a resistência da parede aos outros agentes atmosféricos além da água, nomeadamente às variações de temperatura, à radiação solar e ao vento.

A água provoca acções químicas e físicas que degradam a parede. Estes efeitos são mais acentuados nas alvenarias à base de produtos cerâmicos, do que nas alvenarias realizadas com elementos à base de betão. A resistência mecânica dos elementos, particularmente quando utilizados à vista, pode ser importante na avaliação da durabilidade da mesma. Os elementos metálicos existentes na parede, quer sejam ligadores nas paredes duplas, ou elementos resistentes nas alvenarias armadas, devem estar convenientemente protegidos contra a corrosão.

São ainda importantes em termos de durabilidade os aspectos associados à qualidade construtiva da parede, à concepção da mesma em termos de estanquidade à água da chuva e ao tipo de revestimento.

2.5.6 - Conforto termohigrométrico

As paredes da envolvente devem apresentar uma resistência satisfatória à passagem de calor, visando assegurar os níveis de conforto térmico considerados razoáveis e limitar os consumos de energia em aquecimento. Por outro lado os paramentos interiores das paredes devem apresentar-se isentos de humidade de condensação, por requisitos de conforto e durabilidade.

A facilidade com que se dá a passagem de calor é expressa através do coeficiente de transmissão térmica da parede K (W/(m^2.ºC)), cuja determinação irá ser discutida no Capítulo 3. O *RCCTE* [8], em função das zonas climáticas em que o país se divide, estabelece valores máximos para K, que se transcrevem no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 - Valores máximos do coeficiente de transmissão térmica de paredes segundo o *RCCTE* [8]

K (W/(m^2.ºC))	Zona climática		
	I_1	I_2	I_3
Valor máximo para que a parede exterior satisfaça automaticamente os requisitos do RCCTE [1]	1.4	1.2	0.95
Valor máximo absoluto, em paredes exteriores verticais[1]	1.8	1.6	1.45

[1] - O edifício deverá satisfazer a outros requisitos de isolamento térmico

A secura dos paramentos interiores e o risco de condensação superficial podem ser controlados das seguintes formas:

- garantindo que em condições normais de utilização, as temperaturas do paramento interior sejam superiores à temperatura de ponto de orvalho do ambiente interior;
- limitando o coeficiente de transmissão térmica da parede a um máximo função da localização da construção, conforme preconizado no *RCCTE*, Quadro 2.7;
- limitando o factor de concentração de perdas térmicas[4] a um valor estabelecido, que segundo o *RCCTE* [8] em fachadas não deve ultrapassar 1.3.

2.5.7 - Conforto acústico

O isolamento aos ruídos aéreos exteriores, entendido como abaixamento do nível dos ruídos aéreos exteriores que atravessam a parede, é avaliado através do isolamento sonoro médio das paredes exteriores, incluindo zonas transparentes, caracterizado pelo factor R45 (em dB).

[4] Quociente entre o valor médio pesado do coeficiente de transmissão térmica de uma zona da envolvente e o coeficiente de transmissão térmica da sua zona corrente. Quantifica a influência das heterogeneidades.

De acordo com o *RGR* [47], em função da utilização do edifício e da caracterização do local de implantação, o factor R45, em dB, deverá apresentar os valores constantes do Quadro 2.8.

Quadro 2.8 - Factor R45 (dB) de paredes exteriores, em função da utilização do edifício e do local de implantação, segundo o *RGR* [47]

LOCAL	UTILIZAÇÃO DO EDIFÍCIO			
	Habitação	Escolar		Hospitalar ou similar
		Corrente	Deficientes auditivos	
Pouco ruidoso	≥ 25	≥ 25	≥ 35	≥ 30
Ruidoso	≥ 30	1	1	1
Muito ruidoso	≥ 35	1	1	1

1 - Localização interdita para as novas construções de acordo com o Regulamento Geral sobre o Ruído

O cumprimento destas exigências, em paredes exteriores de edifícios correntes de habitação, é muito condicionado pelo tratamento acústico dos vãos nelas existentes.

2.5.8 - Adaptação à utilização e execução

Os elementos para alvenaria devem ser concebidos por forma a que os mesmos e as paredes com eles realizados sejam adequados à utilização previsível. Esta adequação pode avaliar-se principalmente em termos de aptidão para receber acabamentos, facilidade de manuseio e assentamento e ainda aptidão para receber elementos integrados. São assim importantes a rugosidade das superfícies, as asperezas, arestas e outras descontinuidades tendo em vista a função dos elementos e da parede como suporte de acabamentos.

Os elementos devem apresentar também uma geometria e massa que facilitem a preensão e o manuseio por um único homem, com uma ou duas mãos, visando a melhoria do rendimento de assentamento. Por outro lado devem ser previstas nos elementos disposições que facilitem a integração na parede de elementos estruturais como montantes, pilares, vigas, padieiras, etc, bem como instalações embutidas.

A correcta ou incorrecta execução das alvenarias influencia todas as exigências que se enumeraram nos pontos anteriores.

Embora não seja possível enumerar exigências quantificadas associadas à execução, consideram-se decisivos na realização de alvenarias da envolvente, os seguintes aspectos :

- aparelho da alvenaria;
- aderência elemento / argamassa;
- espessura e correcto preenchimento das juntas;
- protecção contra danos durante a construção.

Durante a construção devem tomar-se medidas que protegam a parede de acções mecânicas ou de condições climatéricas adversas.

2.5.9 - Exigências de economia e produtividade

As paredes e os seus diversos constituintes devem ser concebidos tendo em conta o seu custo nas múltiplas vertentes, custo de construção, custo de funcionamento e custo de manutenção.

O custo de construção tem subjacente o custo dos elementos e a produtividade no seu assentamento entre outros, reflectindo as acções de industrialização.

Os custos de funcionamento e de manutenção têm subjacentes os aspectos de economia de energia e desempenho da solução, em termos de durabilidade e necessidade de reparação.

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos grandes esforços, sobretudo nos países mais desenvolvidos, no sentido de racionalizar o assentamento das alvenarias com ganhos de produtividade. Estes esforços têm-se apoiado num conhecimento mais aprofundado do funcionamento das alvenarias.

As principais actuações centram-se ao nível do desenvolvimento de novos produtos, formatos e dimensões dos elementos e nos métodos de assentamento.

Parte destas acções já foram referidas ao longo deste Capítulo. São dignas de referência a preocupação em adoptar dimensões e massas para os elementos que facilitem a preensão e o manuseamento, recorrendo se possível a elementos de maiores dimensões, sem aumentar o seu peso.

Ao nível dos métodos de assentamento refere-se a supressão das juntas verticais de assentamento e a adopção de configurações para os topos dos blocos que facilitem o seu assentamento - fig. 2.8.

a) Juntas parcialmente preenchidas com argamassa

b) Juntas secas

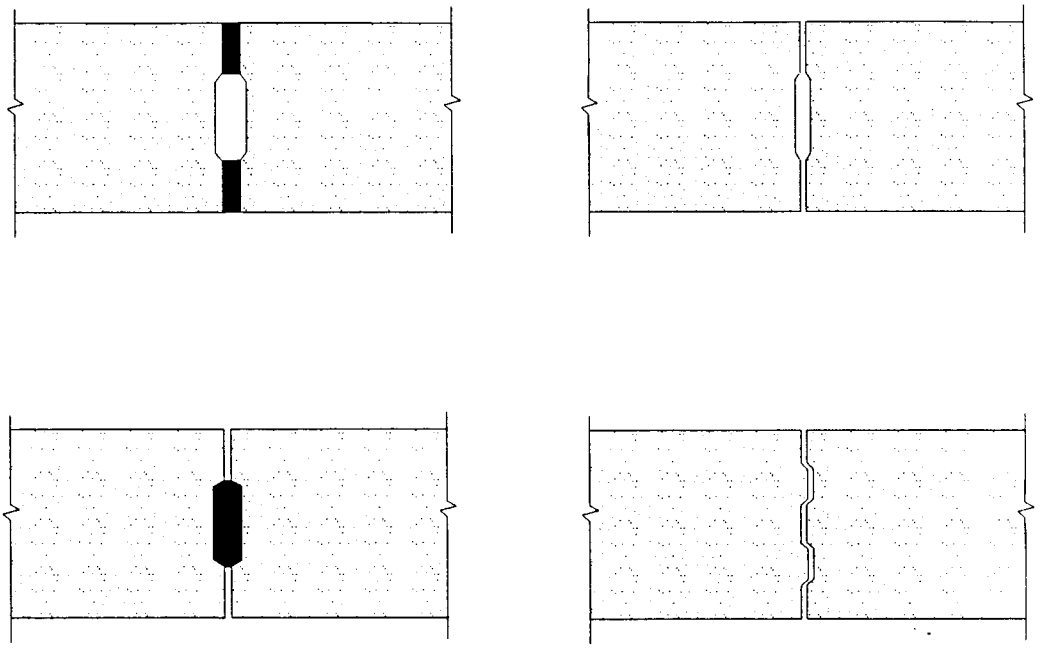


Fig. 2.8 - Disposições correntes em juntas verticais de elementos para alvenaria

Relativamente às juntas horizontais, tem-se vindo a tornar corrente a utilização de juntas delgadas de assentamento realizadas com argamassa-cola, com vantagens ao nível do comportamento térmico e mecânico.

Discute-se já a possibilidade de realização de alvenarias totalmente secas, embora actualmente esta tecnologia apresente ainda um conjunto grande de limitações [61]. Com efeito as juntas de argamassa desempenham um conjunto de funções importantes:

- atenuam os pontos duros de contacto entre as superfícies, locais de concentração de tensões e de origem de fissuração;
- permitem uma correcção, fiada a fiada, da horizontalidade e verticalidade;
- permitem uma adaptação à altura exacta da construção;
- contribuem decisivamente para a estanquidade ao ar e também para o isolamento acústico;
- contribuem para a estanquidade à água da chuva e reduzem a possibilidade de infiltrações;
- asseguram durante a construção uma certa estabilidade da parede.

No entanto crê-se que no futuro a execução de alvenarias com juntas secas virá a ultrapassar as limitações actuais, recorrendo para tal a um controlo mais apertado da planeza dos elementos e minimização dos seus desvios dimensionais. Na realização da parede será necessário assegurar um rigor de assentamento da 1ª fiada, capaz de dispensar a necessidade de correcções posteriores. Uma outra via que terá sem dúvida desenvolvimento num futuro não muito distante, será o assentamento por recurso a equipamento mecânico, parcial ou totalmente automático, de que já se conhecem protótipos.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E ELEMENTOS PARA ALVENARIA - MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS SUAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E ELEMENTOS PARA ALVENARIA - MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS SUAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

ÍNDICE

3.1 - INTRODUÇÃO
3.2 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS MATERIAIS E PRODUTOS PARA ALVENARIA
3.2.1 - Métodos aplicáveis aos materiais homogéneos
3.2.2 - Métodos aplicáveis aos produtos
3.2.3 - Correcções às determinações experimentais
3.3 - MÉTODOS NÃO EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS PRODUTOS PARA ALVENARIA
3.3.1 - Recurso a valores tabelados
3.3.2 - Determinação por métodos analíticos
3.3.2.1 - Generalidades
3.3.2.2 - Métodos simplificados
3.3.2.3 - Técnicas de cálculo numérico
3.3.2.4 - Correcções aos resultados analíticos
3.4 - DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ALVÉOLOS DOS PRODUTOS PARA ALVENARIA
3.4.1 - Introdução
3.4.2 - Condução
3.4.3 - Convecção
3.4.4 - Radiação
3.4.5 - Tratamento conjunto dos mecanismos de transmissão de calor em alvéolos

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E ELEMENTOS PARA ALVENARIA - MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS SUAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

3.1 - INTRODUÇÃO

As alvenarias constituintes da envolvente dos edifícios devem satisfazer um conjunto muito alargado de exigências, entre as quais as de conforto térmico, conforme foi referido no Capítulo 2. O conforto térmico, referido à envolvente dos edifícios, para as situações climáticas limites de Inverno e Verão, traduz-se de forma simplificada nos dois aspectos principais seguintes:

- níveis adequados de isolamento térmico entre as condições climatéricas exteriores e interiores;
- desfasamento da amplitude térmica entre o exterior e o interior.

A quantificação das exigências sob este ponto de vista está associada a determinados níveis de conforto e a pressupostos de política energética, estabelecidos nos diferentes países em função das condições climáticas locais e das soluções arquitectónicas e construtivas habituais.

Entre nós é o *RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* [8] que estabelece os requisitos de comportamento térmico dos edifícios. No caso da envolvente opaca das construções, essa quantificação é feita através do coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente - K -, cujos máximos admissíveis constam do *RCCTE* [8] em função do zonamento climático do país (vd. Quadro 2.7 para valores relativos às paredes).

Uma parede de alvenaria é um elemento de construção integrando diferentes produtos e materiais de construção. Uma parede corrente é constituída pelos elementos para alvenaria (tijolos cerâmicos, blocos de betão ou outros) e pelas argamassas de assentamento e reboco. As exigências de conforto térmico aplicam-se directamente às paredes, embora os elementos para alvenaria, bem como os outros materiais ou produtos a incorporar na parede, devam apresentar sob o ponto de vista térmico, características consentâneas com as exigências aplicáveis às alvenarias.

As características térmicas principais dos materiais, produtos ou elementos de construção, são a condutibilidade térmica - λ - e o coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente. -K - Estas características podem ser determinadas por via experimental ou analítica [62, 63]:

- Via experimental:
  - ensaiando o material, se este for homogéneo, em laboratório;
  - ensaiando o produto, elemento de construção ou componente completo, em laboratório;
  - efectuando medições em condições reais, em edifícios existentes.

- Via analítica:
  - recorrendo a valores tabelados;
  - recorrendo a métodos de cálculo simplificados, admitindo fluxos unidireccionais;
  - recorrendo a métodos de cálculo mais rigorosos, utilizando métodos numéricos.

Os métodos atrás referidos têm diferente enquadramento normativo, a que se fará referência ao longo do texto, como *Normas portuguesas, Normas ISO, Documentos CEN e outras Normas estrangeiras.*

A determinação das características térmicas dos produtos e elementos de construção por via analítica requer o conhecimento das características térmicas do material ou materiais usados na sua produção. Estas propriedades dos materiais só podem ser determinadas por via analógica ou por via experimental. No caso das paredes a via analítica envolve níveis de complexidade diferentes, conforme a alvenaria e os elementos usados na sua realização apresentem ou não constituição homogénea. A hipótese de constituição homogénea é de ocorrência difícil e corresponde à situação do elemento para alvenaria ser maciço e idêntico à argamassa de assentamento. A constituição não homogénea corresponde às situações de elementos para alvenaria heterogéneos, por exemplo incorporando alvéolos, a paredes realizadas com argamassas de constituição diferente dos elementos para alvenaria, ou ainda a paredes compostas, formadas por panos de constituição distinta.

A realização de ensaios em componentes completos ou edifícios é dispendiosa e dirigida a situações particulares, pois enquanto as propriedades dos materiais são intrínsecas à natureza dos mesmos, as propriedades dos produtos são sempre função da forma e dimensões destes. Sobressai assim o interesse dos métodos analíticos, eventualmente com diferentes níveis de rigor, possibilitando, por exemplo na fase de concepção do produto, a previsão das características térmicas do mesmo, antes da sua produção industrial.

Por último é importante estabelecer a distinção entre os valores das características térmicas obtidos em condições convencionais de ensaio e os valores correspondentes às situações reais de utilização.

É corrente [64, 65, 66] definir os seguintes valores das características térmicas dos materiais ou produtos:

- *valor declarado* - valor associado ao material ou produto, é determinável por métodos normalizados e representa o valor assumido pela característica em condições de referência; é usado na declaração de conformidade do produto ou na comparação com outros produtos do mercado;
- *valor de cálculo* - valor associado à alvenaria propriamente dita, determinado para condições específicas de utilização, através de métodos harmonizados, baseando-se entre outros, no valor declarado e corresponde às condições a que o produto irá estar sujeito. Os valores de cálculo não estão sujeitos a certificação ou verificação de conformidade, podendo o mesmo produto apresentar diferentes valores de cálculo de acordo com as condições de aplicação.

3.2 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS MATERIAIS E PRODUTOS PARA ALVENARIA

3.2.1 - Métodos aplicáveis aos materiais homogéneos

Os métodos comummente aceites e normalizados para a determinação da condutibilidade térmica - λ - dos materiais homogéneos constituintes dos produtos para alvenaria são:

- *método da placa quente* [67, 68, 69];
- *método fluximétrico* [70, 71].

Ambos os métodos se referem a materiais homogéneos, preferencialmente rígidos, com forma e dimensões próprias, mas podem, mediante preparações diferentes, ser aplicados a materiais com forma própria e espessura mal definida, ou mesmo a materiais granulares. Os dois métodos têm em conta apenas a transmissão de calor por condução. Todavia, enquanto o 1º método é dito absoluto ou primário por não requerer calibração através de provetes de condutibilidade térmica conhecida, o 2º requer essa calibração, pelo que é designado por método comparativo ou secundário. Apresenta-se seguidamente uma descrição sucinta dos dois métodos:

a) **Método da placa quente [67, 68, 69]**

O método é aplicável a provetes secos, ou condicionados até massa constante em ambiente normalizado, de espessura não superior a 1/3 da área de medida. A dimensão da face dos provetes

deve ser maior que as dimensões da zona de medição da placa, devendo os provetes preferencialmente cobri-la por completo. De forma simplificada o procedimento consiste em intercalar dois provetes entre uma placa quente e duas placas frias, eventualmente interpondo placas de regularização. Existe uma zona de medição e uma zona periférica de protecção ou de guarda. Estabelecem-se ao fim de algum tempo na zona de medição dois fluxos caloríficos aproximadamente iguais e perpendiculares às faces do provete. Atingido o regime permanente, mede-se a queda de temperatura através do provete, por diferença de temperatura entre as faces do mesmo, e o fluxo de calor correspondente à potência eléctrica fornecida à zona de medição da placa quente, para o estabelecimento do referido gradiente; a partir daqui determina-se a condutibilidade térmica. A determinação com precisão satisfatória pode ser demorada, chegando a exigir vários dias.

b) **Método fluximétrico [70,71]**

O método é aplicável a produtos secos, ou condicionados até massa constante em ambiente normalizado. De forma simplificada e para a configuração de montagem mais simples, o procedimento consiste em colocar o produto entre duas placas isotérmicas, uma representando a fonte de calor e outra a fonte fria, com controlo e leitura da temperatura nas placas. Existe também um fluxímetro colocado junto duma das faces de provete, que após o estabelecimento do regime permanente determina o fluxo de calor que atravessa o provete. Por comparação com o fluxo que atravessa o material de calibração determina-se a condutibilidade térmica. É necessário proceder a calibrações do aparelho com periodicidade regular. Existem outras montagens possíveis, correspondendo a configurações com um provete e dois fluxímetros, com dois ou mais provetes e um ou mais fluxímetros. A determinação com precisão satisfatória é normalmente conseguida em algumas horas.

3.2.2 - Métodos aplicáveis aos produtos

Os métodos normalizados para determinação do coeficiente de transmissão térmica - K- de produtos ou elementos de construção usados na envolvente opaca dos edifícios são:

- *método da câmara quente com guarda* [72, 73];
- *método da câmara quente calibrada* [72, 74].

Aplicam-se a provetes ou componentes não homogéneos de grandes dimensões, em geral em regime estacionário às temperaturas típicas de funcionamento dos edifícios. Em ambos os métodos o provete é suportado e envolvido por uma estrutura perimetral e está colocado entre duas câmaras, uma quente e uma fria. As câmaras e a estrutura envolvente do provete devem ser muito bem isoladas. As condições de temperatura ambiente, velocidade do ar e radiação no interior das câmaras são controladas.

A dimensão do provete e condições de ensaio devem ser estabelecidas em função das características do provete, tendo presente o efeito destes parâmetros na exactidão dos resultados. Uma temperatura média de 10 °C e um gradiente térmico de 20 °C são correntes. A velocidade do ar nas 2 câmaras é regulada em função dos objectivos do ensaio. Embora não seja possível especificar um condicionamento prévio normalizado, é necessário que do relatório de ensaio conste de forma detalhada a situação do provete. É importante ter presente que a transferência de humidade durante o ensaio pode ter influência nos resultados e dificulta a uniformização de temperaturas nas faces do provete. Efectuando a determinação das temperaturas em regime estacionário, nas duas faces e nas superfícies do provete, bem como da potência fornecida à câmara quente, é possível calcular o coeficiente de transmissão térmica do provete.

A diferença entre o método da câmara quente com guarda e o da câmara quente calibrada resulta do facto do 1º não requerer a calibração do conjunto através da utilização de provetes de material de características térmicas conhecidas, pelo que é designado de absoluto ou primário, enquanto o 2º requer essa calibração, sendo designado de secundário. Apresenta-se seguidamente uma descrição sucinta das diferenças entre os dois métodos.

a)- **Método da câmara quente com guarda [72, 73]**

Apresenta-se na fig. 3.1 um esquema do conjunto da instalação.

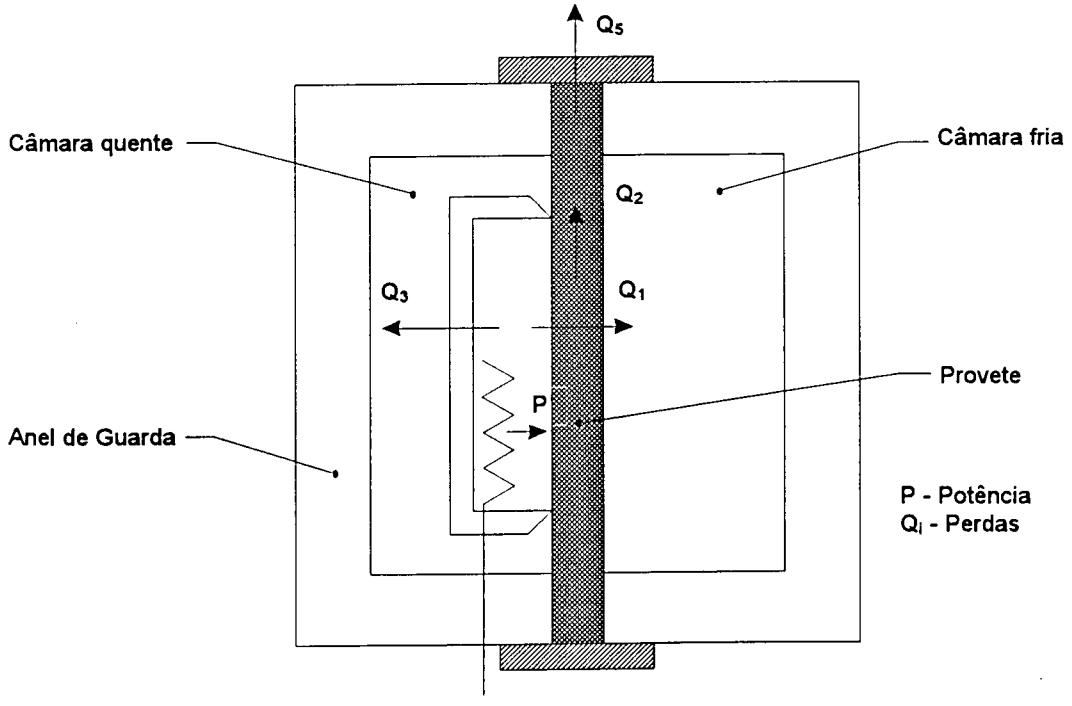


Fig.3.1 - Câmara quente com guarda - esquema de conjunto

Como é perceptível da figura, a câmara quente (câmara de medida), está envolvida por uma câmara de guarda, cujo ambiente é controlado para minimizar as perdas através das paredes da câmara quente e transversalmente ao provete. Em condições ambientes iguais na câmara quente e na câmara de guarda, o fluxo térmico total através do provete será igual ao calor fornecido à câmara quente, sendo a partir daqui possível determinar de forma directa as propriedades térmicas do provete.

b) - **Método da câmara quente calibrada [72, 74]**

Apresenta-se na fig.3.2 um esquema do conjunto da instalação.

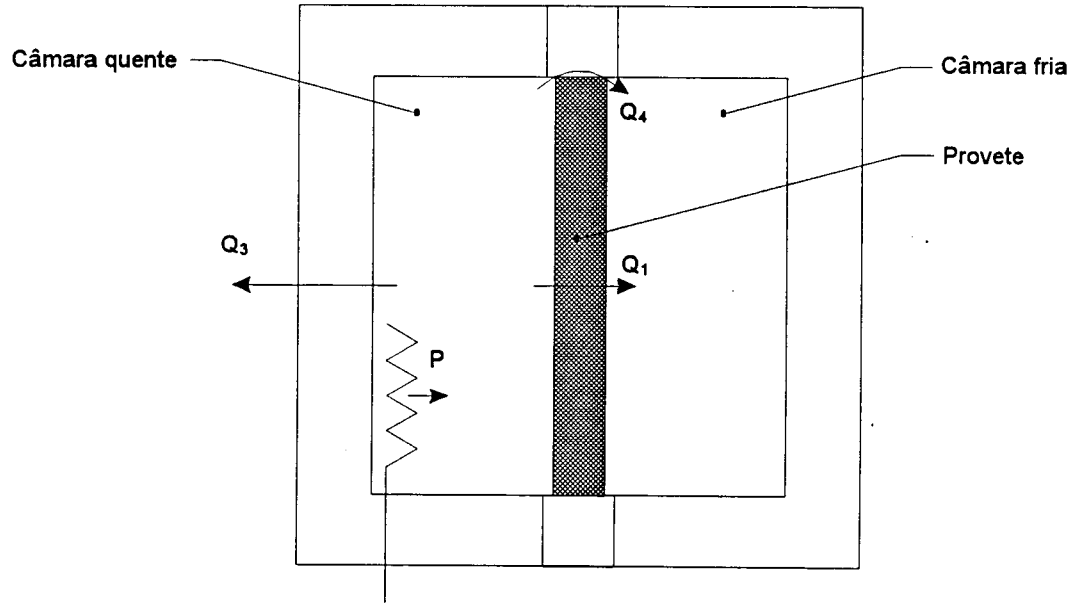


Fig. 3.2 - Câmara quente calibrada - esquema de conjunto

Como se depreende da figura, a câmara quente está envolvida pelas condições ambientes do local de ensaio, cuja temperatura não é necessariamente a da câmara de medida. As perdas térmicas pelas paredes da câmara existem, apesar de reduzidas ao mínimo pela sua construção. Assim a potência total fornecida deve ser corrigida das perdas pelas paredes da câmara e pelas partes laterais do provete. Esta correcção é determinada através de ensaios com provetes de calibração de resistência térmica conhecida, de espessura idêntica à dos provetes a medir. Quantificadas essas perdas, a determinação passa a ser idêntica à da câmara quente com guarda.

3.2.3 - Correcções às determinações experimentais

As determinações experimentais referidas nos pontos anteriores são efectuadas em condições convencionais de laboratório, podendo aproximar-se mais ou menos das condições de serviço dos materiais ou produtos. É assim evidente que os valores medidos precisam de ser corrigidos para se adequarem às condições de serviço da construção e aos requisitos regulamentares. Estes valores designam-se por valores de cálculo. Estas correcções deverão ter em consideração, segundo a ISO/TR 9165 [62] os seguintes aspectos :

- a humidade do material ou produto;
- envelhecimento, implicando a mudança das propriedades térmicas com a idade;
- temperatura;
- condições de execução.

Por forma a ser possível realizar as referidas correcções a norma em apreço recomenda [62]:

- Para cada família de materiais ou produtos reunir um conjunto de resultados que possibilite relacionar a característica térmica em apreço, com cada um dos aspectos referidos anteriormente que a influenciam. Organizar curvas de referência;
- Dispondo destas curvas de referência é possível converter os dados disponíveis para as condições convenientes, sejam as de referência, ou as de funcionamento efectivo da construção.

Relativamente à concretização das correcções, o documento ISO/TR 9165 [62] refere entre outras, correcções relativas à condutibilidade térmica e ao coeficiente de transmissão térmica, respeitantes aos betões (normais, leves e celulares) e às alvenarias respectivamente.

- No que diz respeito à condutibilidade térmica dos betões os aspectos a ter em conta são:

  - Massa volúmica - principal factor que afecta a condutibilidade térmica; em média esta decresce entre 0.1 a 0.2 % por cada 1 kg/m^3 de aumento da massa volúmica.
  - Temperatura - para a gama de temperaturas de referência, entre 10 e 24 °C, não é necessária em geral qualquer correcção. Fora desta gama, acima de 0 °C a variação situa-se entre 0.025 % a 0.1 % por cada grau, dependendo do teor de humidade, abaixo de 0 °C a variação pode ser maior.
  - Humidade - o teor de humidade tem um efeito importante na condutibilidade térmica. Esse efeito depende, entre outros, do tipo de betão, do tipo de inertes e da forma de produção. O teor de humidade deve ser expresso preferencialmente como percentagem relativamente à massa. No caso do betão leve de argila expandida refere-se que para

massas volúmicas entre 400 e 1800 kg/m^3 a condutibilidade cresce linearmente, de 4 %, por cada 1% de crescimento do teor de humidade.

- No que respeita às alvenarias, o coeficiente de transmissão térmica depende da condutibilidade térmica do material constituinte do elemento, da geometria do mesmo e da argamassa de assentamento. Para que as correcções sejam fiáveis é necessário que a densidade dos elementos usados nos ensaios não varie mais de ± 7% relativamente à densidade nominal. Os aspectos mais influentes são:

  - Massa volúmica aparente - a resistência térmica da alvenaria decresce com o aumento da massa volúmica, entre 0.1 a 0.2 % por cada aumento de 1 kg/m^3.
  - Temperatura - o efeito da temperatura no coeficiente de transmissão térmica das alvenarias é similar ao que ocorre na condutibilidade térmica do betão.
  - Humidade - a influência da humidade é importante, mas pode ser variável, pois depende da temperatura, pluviosidade, exposição da construção e técnicas construtivas. A relação entre o coeficiente de transmissão térmica e a humidade varia ainda com o tipo de elemento utilizado. Como primeira aproximação a relação é linear, com reduções da resistência térmica entre 3 a 10 %, por cada 1% em massa de acréscimo da humidade.

3.3 - MÉTODOS NÃO EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS PRODUTOS PARA ALVENARIA

3.3.1 - Recurso a valores tabelados

Os valores tabelados de cálculo das características térmicas dos produtos para alvenaria têm sempre subjacentes determinações analíticas ou experimentais, embora sejam posteriormente arredondados por forma a cobrir, com um certo nível de segurança, produtos originários de diferentes produções, bem como ligeiras simplificações nas geometrias.

Nos elementos homogéneos maciços, os valores tabelados estão associados à condutibilidade térmica do material constituinte, determinada por via experimental. Nos elementos de constituição heterogénea os valores tabelados resultam em geral do cálculo, dado não existir técnica de ensaio normalizada disponível para a determinação da resistência térmica dos elementos para alvenaria [64] . Os valores tabelados das características em análise são possíveis de estabelecer considerando os diferentes formatos e formas de assentamento.

De acordo com o documento referido, *CEN* pr EN 1745 [64], as tabelas deverão conter referências aos aspectos que influenciam o valor final da característica, como sejam:

- material ou materiais constituintes;
- massa volúmica do material;
- geometria interior e furação;
- tipo de argamassa de assentamento, propriedades térmicas da mesma e configuração das juntas;
- densidade de juntas;
- factores correctores das características para variação da humidade.

Existem divulgadas entre nós diversas tabelas contendo valores de cálculo das características térmicas de elementos para alvenaria e das próprias alvenarias. Merecem destaque as seguintes:

- Diversas publicações *LNEC* que por recurso à via analítica, caracterizam termicamente os elementos para alvenaria e as soluções de parede mais correntes em Portugal [75, 76]. A publicação *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios* [76] funciona inclusivamente como texto de apoio referido no *RCCTE* [8]. As tabelas respeitam a valores convencionais úteis (ou de cálculo), não carecendo de qualquer correcção e definem:

  - condutibilidade térmica de diversos materiais e isolantes térmicos;
  - resistências térmicas superficiais e de espaços de ar não ventilados;
  - resistências térmicas de diversas soluções de paredes e pavimentos;
  - coeficientes de transmissão térmica de soluções mais correntes de elementos da envolvente dos edifícios, com destaque para as paredes, pavimentos, coberturas e envidraçados.

- Documento normativo francês DTU "Régles Th-K77" [77], que apresenta as seguintes tabelas:

  - valores úteis de condutibilidade térmica de materiais;
  - resistências térmicas úteis de elementos de construção e de espaços de ar não ventilados;
  - coeficientes de transmissão térmica úteis das soluções mais correntes da envolvente;
  - coeficientes de transmissão linear úteis das ligações mais correntes.

- pr EN 1745 [64] que apresenta em anexo tabelas contendo :

  - Condutibilidade térmica de materiais constituintes dos produtos para alvenaria, bem como das argamassas de assentamento. As tabelas contemplam diferentes massas volúmicas e

respeitam a materiais secos, carecendo assim de correcções para se adequarem às situações de serviço.

- Resistência térmica de cálculo de paredes realizadas com diferentes elementos, em função da geometria do elemento, das condutibilidades térmicas do material constituinte e da argamassa de assentamento. Estes valores foram obtidos através de simulação tridimensional, usando um programa de diferenças finitas, sendo os resultados calibrados e corrigidos através do recurso a ensaios em câmaras climáticas.

3.3.2 - Determinação por métodos analíticos

3.3.2.1 - Generalidades

A determinação por métodos analíticos das características térmicas dos elementos e das alvenarias justifica-se pelas razões já enunciadas.

Podem usar-se métodos simplificados de análise, em regime estacionário, através da decomposição do elemento e da parede num conjunto de camadas cujos fluxos se calculam de forma independente, sendo no fim associados.

Em alternativa podem usar-se técnicas de cálculo numérico, como os métodos das diferenças finitas ou dos elementos finitos, a duas ou três dimensões. Aspectos particulares a merecerem análise cuidada são a existência ou não de isotropia na condutibilidade térmica dos diferentes materiais, bem como o tratamento dos alvéolos. Ambas as abordagens têm algum enquadramento orientador e requerem informação preliminar relativa à condutibilidade térmica dos materiais constituintes, como se irá ver de seguida.

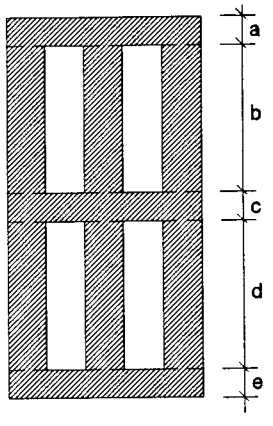
3.3.2.2 - Métodos simplificados

A norma ISO 6946/1 [78] contém regras simplificadas para o cálculo das propriedades térmicas de produtos e elementos de construção em regime estacionário. Esta norma refere que os valores obtidos por este procedimento deverão ser corrigidos para ter em conta os factores associados à execução. Baseada na norma ISO existe um projecto de norma *CEN* - pr EN 30211 [63] que apresenta a mesma metodologia.

O método objecto dessas referências baseia-se num cálculo da transmissão térmica em regime permanente, por fluxos unidireccionais transversais à parede, aplicável a elementos constituídos por camadas com propriedades térmicas uniformes, incluindo eventualmente camadas de ar. É possível ainda, mediante simplificação, aplicar o método a camadas não homogéneas.

De forma simplificada e para a situação mais geral de camadas heterogéneas existem duas possibilidades de determinação:

- a primeira, que conduz a valores superiores da resistência térmica, admite apenas fluxos unidireccionais perpendiculares à superfície, em número igual ao das secções distintas existentes no elemento, sendo a resistência final a associação em paralelo das resistências parcelares como se explicita abaixo:



$$R'_t = \frac{\sum_j A_j}{\sum_j \left(A_j / R_{tj}\right)} \qquad (3.1)$$

em que:

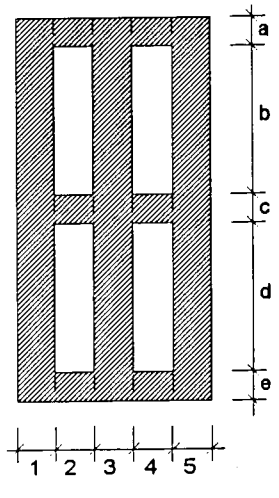
$j = a, \ldots, e$ (secção)

A_j - área das diferentes secções paralelas ao fluxo (m^2);

R_{tj} - resistência térmica total, ambiente a ambiente, de cada secção ($m^2.^oC/W$);

R'_t - resistência térmica total, ambiente a ambiente, do elemento ($m^2.^oC/W$);

- a segunda possibilidade, que conduz a valores inferiores da resistência térmica, admite fluxos bidireccionais, sendo a temperatura, homogénea ou não, constante em cada camada paralela às faces do elemento, resultando a resistência final da associação em série das resistências parcelares, como se explicita abaixo:



$$R_{tp} = \frac{\sum_j A_j}{\sum_j \left(A_j / R_{jp}\right)} \qquad (3.2)$$

$$R''_t = \sum_p R_{tp} \qquad (3.3)$$

em que:

$j = a, \ldots, e$ (secção)

$p = 1, \ldots, 5$ (camada)

A_j - área das diferentes secções paralelas ao fluxo (m^2);

R_{jp} - resistência térmica da intersecção de cada camada com cada secção (m^2.°C/W);

R_{tp} - resistência térmica total, ambiente a ambiente, de cada camada (m^2.°C/W);

R''_t - resistência térmica total ambiente a ambiente do elemento (m^2.°C/W);

ou em alternativa:

$$\lambda p = \frac{\sum_j \lambda_{jp}.\, A_j}{\sum_j A_j} \tag{3.4}$$

$$Rtp = e_p / \lambda_p \tag{3.5}$$

$$R''t = \sum_p Rtp \tag{3.3}$$

em que:

λ_{jp} - condutibilidade térmica do material constituinte da intersecção de cada camada com cada secção (W/m.°C);

λ_p - condutibilidade térmica equivalente de cada camada (W/m.°C);

e_p - espessura da camada (m).

A resistência total estimada será:

$$Rt = \frac{R't + R''t}{2} \tag{3.6}$$

e o erro relativo máximo, em percentagem é:

$$\frac{1}{2} \times \frac{R't - R''t}{Rt} \times 100 \tag{3.7}$$

3.3.2.3 - Técnicas de cálculo numérico

A norma europeia preliminar pr EN 1745, com os respectivos anexos [64], estabelece os princípios em que deve basear-se a determinação por métodos numéricos do coeficiente de transmissão térmica das alvenarias. A simulação deve efectuar-se num programa que permita:

- simular o modelo a duas ou três dimensões;
- utilizar formatos rectangulares ou não rectangulares;
- definir condutibilidades térmicas isotrópicas ou não;
- tratar os espaços de ar - alvéolos- considerando as parcelas de radiação e convecção;
- considerar as resistências térmicas superficiais.

O ficheiro de dados deve ser apresentado para possibilitar a verificação noutros programas. Os resultados devem permitir identificar as temperaturas mínima e máxima nas superfícies do elemento, bem como o fluxo. A verificação da fiabilidade do programa deve ser efectuada através da resolução de elementos de referência, não devendo os desvios do coeficiente de transmissão térmica ultrapassar 2%. O documento apresenta diversos elementos de referência.

3.3.2.4 - Correcções aos resultados analíticos

Apesar de na determinação das características térmicas se utilizarem valores de cálculo das propriedades dos materiais, os valores obtidos carecem de correcção. Uma primeira correcção tem a ver com os arredondamentos. Assim, o pr EN 30211 [63] preconiza que o valor final do coeficiente de transmissão térmica seja arredondado à segunda casa decimal. O mesmo documento preconiza que devem ser tidos em conta os seguintes aspectos, efectuando, se necessário, as respectivas correcções:

- infiltrações;
- efeito das pontes térmicas;
- efeito da humidade;
- efeito da chuva;
- envelhecimento dos materiais.

O projecto de norma em apreço [63], remete para os regulamentos nacionais a consideração das correcções resultantes dos efeitos mencionados, enquanto não for produzida a versão definitiva da norma europeia.

3.4 - DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ALVÉOLOS DOS PRODUTOS PARA ALVENARIA

3.4.1 - Introdução

As paredes de alvenarias são constituídas pelos elementos para alvenaria, pelas juntas de assentamento e pelos revestimentos.
A determinação das características térmicas das alvenarias através de métodos analíticos requer o conhecimento das características térmicas dos diversos constituintes. Relativamente aos elementos e atendendo a que a generalidade dos mesmos, com excepção dos maciços, apresentam alvéolos dispostos horizontal ou verticalmente, a determinação das suas características térmicas passa pelo conhecimento do comportamento térmico destas câmaras de ar. A correcta avaliação do isolamento térmico conferido pelos alvéolos constitui a principal dificuldade daquela determinação.

Segundo o documento CEN pr EN 30211 [63] consideram-se alvéolos em elementos para a alvenaria, os espaços de ar que satisfaçam aos seguintes requisitos:

- limitados por duas faces paralelas e perpendiculares à direcção do fluxo;
- espessura não superior a 0.300 m;
- não estão directamente ligados ao ambiente interior, podendo relativamente ao ambiente exterior ser não ventilados, ligeiramente ventilados ou bem ventilados. Consideram-se ainda não ventilados os espaços de ar com pequenos orifícios para ventilação, desde que entre estes e o exterior não exista qualquer camada de isolamento térmico, estabelecendo o documento a secção limite desses orifícios. Normalmente os alvéolos dos elementos para alvenaria são não ventilados.

A resistência térmica de um alvéolo resulta do isolamento térmico conferido pelo ar, coexistindo fenómenos de condução, convecção e radiação, com preponderância dos dois últimos. A resistência térmica varia com os seguintes factores:

- ventilação;
- direcção do fluxo ;
- dimensões do alvéolo, sendo corrente distinguir espaços de ar em que a espessura é inferior a 1/10 de qualquer das outras dimensões, de espaços de ar que não satisfazem esta condição;
- emissividade das superfícies dos alvéolos, devendo, no caso de alvéolos revestidos com materiais de baixa emissividade, ter-se em conta a perda de brilho desses materiais com o tempo;

- temperatura média do alvéolo, com influência sobretudo na radiação;
- gradiente de temperatura entre as paredes do alvéolo, com influência sobretudo na convecção.

3.4.2 - Condução

Como se sabe a condução é um dos três processos de transmissão de calor que ocorre quando existe um gradiente de temperatura num dado domínio, provocando a transferência de energia a nível molecular da região com temperatura mais elevada para a região com menor energia. No caso dos alvéolos dos elementos de alvenaria a transmissão de calor por condução dá-se através do ar entre as faces do alvéolo a diferentes temperaturas. Habitualmente esta transmissão é muito reduzida quando comparada com a transmissão por convecção e radiação, dada a baixa condutibilidade térmica do ar.

O tratamento da condução em alvéolos não apresenta qualquer diferença relativamente às situações clássicas de condução [79, 80, 81]. Considerando o caso simples de uma placa de espessura dx , com as outras dimensões suficientemente grandes para se poder considerar uma placa infinita, a transmissão de calor por condução é regida pela *Lei de Fourier*, segundo a qual a quantidade de calor que passa através de uma área A, normal á direcção do fluxo calorífico, por unidade de tempo, é proporcional ao gradiente térmico:

$$Q_x = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \qquad \text{ou} \qquad q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \tag{3.8}$$

em que:

T - temperatura (°C);

λ - condutibilidade térmica do material (W/(m.°C));

Q_x - Fluxo segundo x (W);

q_x - densidade de fluxo segundo x (W/m^2).

Supondo que por quaisquer meios as faces da placa vão ser mantidas a temperaturas diferentes T_1 e T_2, verifica-se experimentalmente que após um certo tempo a temperatura estabiliza no interior da placa, tendo todos os pontos de cada plano paralelo às faces da placa a mesma temperatura, ou seja atinge-se o regime estacionário, sendo o perfil de temperaturas na espessura da placa linear. O fluxo de calor para a condução unidireccional em regime estacionário é então dado por:

$$q_x = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{dx} \tag{3.9}$$

em que:

T_1 e T_2 - temperatura superficial nas duas faces, 1 e 2, da placa (°C);
os restantes símbolos têm o significado referido em (3.8).

3.4.3 - Convecção

A convecção é uma forma de transmissão de calor devida a um gradiente térmico, em que o calor é transmitido através do movimento macroscópico de um fluido. A convecção diz-se livre ou natural se o movimento é exclusivamente causado pela diminuição de densidade do fluido ao ser aquecido. Na situação oposta, em que há intervenção de um meio externo, a convecção diz-se forçada.

É usual expressar o fenómeno de convecção, no caso de fluxo entre uma superfície e o fluido nas condições da fig. 3.3, de uma forma simplista conhecida por *Lei do arrefecimento de Newton* [79]:

$$q_x = h_c (T_2 - T_e) \tag{3.10}$$

em que:

q_x - densidade de fluxo segundo x (W/m^2);

h_c - coeficiente de convecção térmica ou condutância térmica superficial por convecção (W/m^2.°C);

T_2 - temperatura superficial (°C);

T_e - temperatura do fluido (°C).

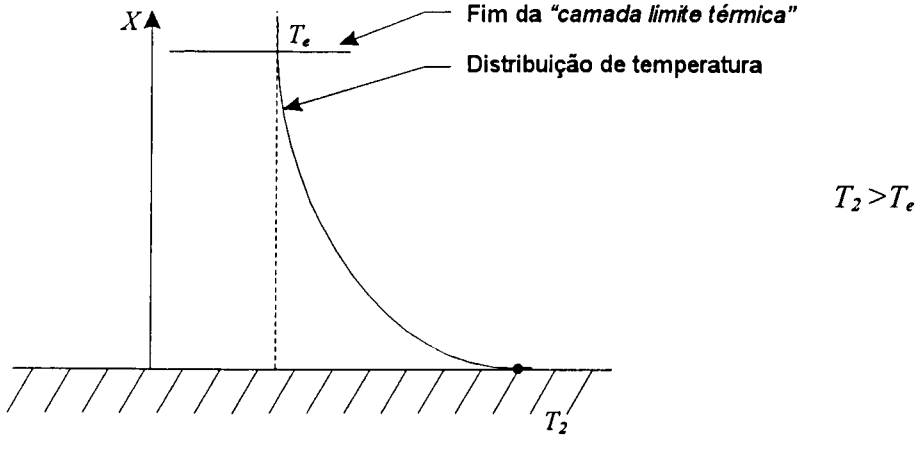


Fig. 3.3 - Distribuição de temperatura na camada limite

O coeficiente - h_c - é função de muitos parâmetros (forma e dimensões da superfície, tipo de fluido, gradiente de temperatura, etc.). O estudo do problema na sua forma mais geral é do domínio da Mecânica dos Fluidos e requer a determinação da velocidade, pressão, temperatura e densidade do fluido, em função da posição e do tempo. As equações intervenientes são as equações do movimento que derivam da 2ª *Lei de Newton*, as equações de continuidade e de energia resultantes dos princípios de conservação da massa e da energia e a equação de estado [79].

A resolução analítica destas equações, atendendo às condições fronteira é complexa. Para simplificar as expressões finais é habitual tomar adimensionais as grandezas intervenientes, o que dá às expressões uma forma mais compacta, independentemente dos valores das variáveis. Essas grandezas chamam-se números [79, 80]. A grandeza adimensional que expressa a transferência de calor por convecção é :

$$Nu = \frac{h_c l}{\lambda} \tag{3.11}$$

em que:

Nu - nº de Nusselt;

l - dimensão característica (m);

λ - condutibilidade térmica do fluido (W/(m.ºC)).

Convêm sublinhar que Nu = 1 equivale à existência de um regime de transmissão de calor por condução, com aplicação da *Lei de Fourier*. O nº de Nusselt ao longo de uma superfície, no caso mais geral, é função das seguintes grandezas adimensionais:

$$Nu = f(Re, Gr, Ec, Pr) \tag{3.12}$$

Re, Gr, Ec e Pr são respectivamente os números de Reynolds, Grashof, Eckert e Prandtl.

$$Re = \frac{vl}{\nu} = \frac{vl\rho}{\mu} \tag{3.13}$$

$$Gr = \frac{gl^3 \beta \Delta T}{\nu^2} \tag{3.14}$$

$$Ec = \frac{v^2}{c_p \Delta T} \tag{3.15}$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha} \tag{3.16}$$

em que :

v - velocidade (m/s);

l - dimensão característica (m);

ν - viscosidade cinemática (m^2/s);

μ - viscosidade dinâmica ($N.s/m^2$);

ρ - massa volúmica (kg/m^3);

g - aceleração da gravidade (m/s^2);

β - coeficiente de dilatação térmica ($°C^{-1}$);

ΔT - gradiente de temperatura (°C);

c_p - calor específico a pressão constante (W.m/(kN.s)).

Em convecção livre ou natural as forças de inércia não existem e a dissipação viscosa é desprezável, pelo que o nº de Nusselt passa a ser dado pela expressão:

$$Nu = f(Gr, Pr) \tag{3.17}$$

A convecção natural não se limita ao fluxo laminar. Desenvolvem-se também instabilidades criadas pelo fluxo ascendente aquecido, chocando com o fluido descendente arrefecido. Estes distúrbios podem ser amplificados podendo gerar turbulência. A transição entre regime laminar ou turbulento depende da grandeza relativa das forças ascendentes e das forças resistentes viscosas, sendo corrente expressá-la em função do produto de Gr por Pr, designado por nº de Raleigh - Ra.

Normalmente a transição entre regimes ocorre para $Ra \cong 10^9$ [79], correspondendo, para placa vertical, a um desenvolvimento próximo de 1 m, com o ar a cerca de 27 °C e ΔT= 10 °C.

Ao longo de uma placa em contacto com o fluido o nº de Nusselt é variável em função da distância ao bordo, pelo que se pode definir um Nu_{local} e um $\overline{Nu}$ (médio), resultando da integração do Nu_{local} a toda a placa. É possível, para situações específicas de placas verticais, resolver Nu em função de Ra e Pr por via analítica, para regimes laminar e turbulento, encontrando-se essas expressões e expressões empíricas mais simples que as aproximam em diversa bibliografia [79, 80, 82].

No caso de uma placa plana vertical a expressão teórica para $\overline{Nu}$ é da forma [80]:

$$\overline{Nu} = 0.677\left(\frac{Pr^2}{0.952 + Pr}\right)^{1/4} \cdot Gr^{1/4} \tag{3.18}$$

e a expressão empírica que a aproxima:

$$\overline{Nu} = 0.59 Pr^{1/4} Gr^{1/4} \qquad 10^4 \langle Pr \cdot Gr \langle 10^9 \tag{3.19}$$

No cálculo destes valores deve-se admitir como dimensão característica, a considerar em ***Gr*** e ***Nu***, o desenvolvimento da placa.

Uma situação particular de convecção livre é a que ocorre em espaços de ar limitados por paredes a diferentes temperaturas, de acordo com a figura 3.4.

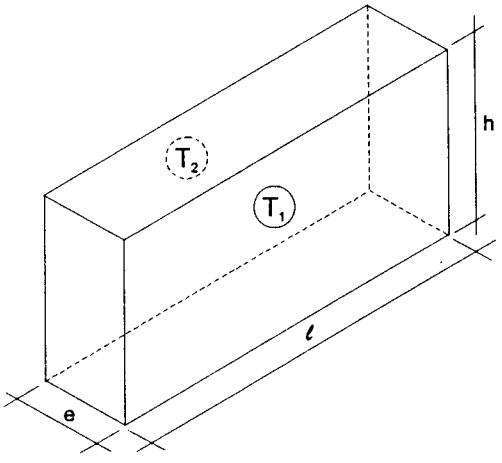


Fig. 3.4 - Convecção livre em cavidade rectangular

Nesta situação a configuração geométrica é determinante. Admitindo que o comprimento - *l*- é grande, relativamente à espessura - *e*- podem ocorrer duas situações:

- Se as placas estiverem suficientemente afastadas ($e \geq 3$ vezes a máxima espessura da camada limite) e *h/e* for grande (≥ 40), os efeitos dos extremos tornam-se desprezáveis e a convecção dá-se das paredes verticais para o fluido a uma temperatura intermédia, como se não se tratasse de um espaço fechado, de acordo com a fig. 3.5 [80], podendo usar-se as expressões relativas a convecção natural em placas planas verticais.

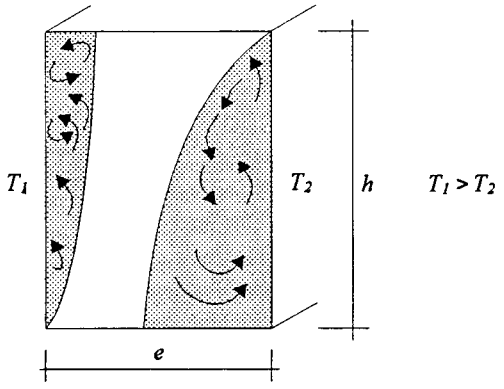


Fig.3. 5 - Convecção em cavidade rectangular larga

- Se a distância - e - entre as placas for pequena, as camadas limites interferem, formando sub-regiões onde ocorrem circulações isoladas do fluido, de acordo com a fig. 3.6.

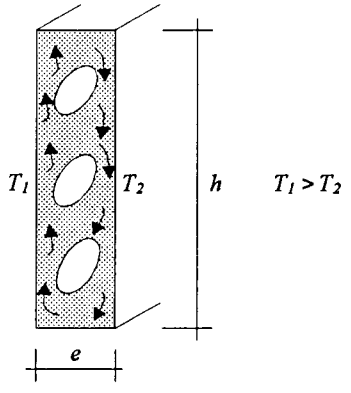


Fig. 3.6 - Convecção em cavidade rectangular estreita

À medida que a distância entre as placas - e - vai diminuindo, o movimento do fluído é dificultado pela viscosidade e a transmissão de calor faz-se quase exclusivamente por condução através do fluido. Este facto equivale a ter presente que, caso as expressões conduzam a $Nu < 1$, esses valores não deverão ser utilizados pois no mínimo Nu deverá ser igual a 1. Existem expressões resultantes de estudos experimentais que estabelecem coeficientes de convecção médios, tendo em conta a convecção e a condução em função das grandezas intervenientes, para $h/e \geq 3$ [80]. Existem diversas expressões em bibliografia que permitem determinar o Nu em alvéolos. Dentre essas referem-se as seguintes:

- segundo [35], para alvéolos em que $Ra < 3 \times 10^4$:

$$Nu = 0.258 Ra^{0.248} (h/e)^{-0.20} \quad (3.20)$$

- segundo [83]:

- h/e =5 $Ra < 10^8$

$$Nu = max\{((1+(\frac{0.193 Ra^{1/4}}{1+(1800/Ra)^{1.289}})^3)^{1/3}, 0.00605 Ra^{1/3}\} \quad (3.21)$$

- h/e =10 $Ra < 9.7 \times 10^6$

$$Nu = max\{((1+(0.125 Ra^{0.28})^9)^{1/9}, 0.061 Ra^{1/3}\} \quad (3.22)$$

- h/e = 20 $Ra < 2 \times 10^6$

$$Nu = (1+(0.064 Ra^{1/3})^{6.5})^{1/6.5} \quad (3.23)$$

3.4.4 - Radiação

Como se sabe a matéria emite energia térmica por radiação para o meio envolvente, mesmo que entre ela e o meio não exista qualquer veículo.

O poder emissivo E_b-, fluxo de calor emitido por unidade de tempo e por unidade de área, de um corpo ideal, dito negro, é dado pela *Lei de Stefan - Boltzmann* [79]:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3.24)$$

em que :

E_b - poder emissivo de um corpo negro (W/m^2);

σ - Constante de Stefan- Boltzmann, constante de proporcionalidade independente do material , $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$ W/(m^2.K^4); (3.25)

T - Temperatura absoluta (K).

O corpo negro é uma abstracção que corresponde ao absorsor perfeito, isto é, absorve toda a radiação nele incidente, independentemente do comprimento de onda ou do ângulo de incidência. Nos corpos vulgares o poder emissivo mantém-se proporcional às mesmas grandezas, mas o seu valor absoluto vem reduzido:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \tag{3.26}$$

em que:

ε - se designa por emissividade e expressa a relação entre o poder emissivo de um corpo real e o poder emissivo de um corpo negro.

A energia térmica radiada por um corpo não é uniforme para todos os comprimentos de onda, definindo-se por isso *poder emissivo monocromático* E_λ , como a energia radiada por unidade de tempo e por unidade de área no intervalo $d\lambda$:

$$dE = E\lambda \, d\lambda \qquad E = \int_0^\infty E\lambda \, d\lambda \tag{3.27}$$

Para um corpo negro, a distribuição espectral do poder emissivo monocromático é dada pela *Lei de Planck* [79]:

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{(C_2/(\lambda T)} - 1)} \tag{3.28}$$

em que:

$E_{b\lambda}$ - poder emissivo monocromático de um corpo negro (W/m^2);

λ - comprimento de onda (μm);

C_1 = 3.7413 E8 W.μm^4/m^2 ;

C_2 = 1.4388 E4 μm.K .

Representando a distribuição espectral do poder emissivo monocromático em função do comprimento de onda, constata-se que a área sob a curva de distribuição espectral é proporcional a T^4 ,de acordo com a *Lei de Stefan-Boltzmann,* e o poder emissivo máximo ocorre para um comprimento de onda determinável pela *Lei de Wien* [79]:

$$\lambda_{max} T = C_3 = 2897.8 \ \mu\text{m.K} \tag{3.29}$$

Os fenómenos de radiação térmica são essencialmente superficiais. Ao incidir sobre uma superfície a radiação térmica pode decompor-se em parcelas absorvidas, reflectidas ou transmitidas, de acordo com as características do corpo. Designando por α, ρ e ζ respectivamente as parcelas absorvidas, reflectida e transmitida (*absorvidade*, *reflectividade* e *transmissividade*) teremos:

$$\alpha + \rho + \zeta = 1 \tag{3.30}$$

Nos corpos negros α = 1 e nos corpos perfeitamente transparentes ζ = 1. Os corpos em que ρ = 1 designam-se por reflectores perfeitos, podendo a reflexão ser especular (ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência), ou difusa (reflexão em todas as direcções). No caso das superfícies opacas ζ = 0, então ρ = 1-α. Numa pequena superfície de um corpo não negro, colocado no interior de um recipiente cujas paredes se comportam como um corpo negro, para que o conjunto esteja em equilíbrio térmico é necessário que o corpo emita a mesma energia que absorve - *Lei de Kirchoff:*

$$\varepsilon = \alpha \tag{3.31}$$

Embora em termos estritos as condições requeridas pela *Lei de Kirchoff* sejam ideais, nas condições reais, sempre que as temperaturas dos corpos sejam da mesma ordem de grandeza, a adopção da igualdade postulada na *Lei de Kirchoff* conduz a um erro relativamente pequeno. Nas aplicações correntes é assim vulgar admitir que α e ε são independentes da direcção da radiação, admitindo-se portanto que os corpos são absorsores e emissores difusos, bem como que α é independente do comprimento de onda da radiação incidente, designando-se os corpos nesta situação por *corpos cinzentos.*

Para as aplicações em Térmica dos Edifícios é importante definir as trocas de energia por radiação entre superfícies. A intensidade da radiação hemisférica emitida por uma superfície difusa pode ser obtida como se passa a descrever.

A fig.3.7 representa uma pequena superfície emissora dA_1, cujo centro é o ponto Q. Admitindo que q é a densidade de fluxo por unidade de tempo, radiado a partir de dA_1, , interceptada por dA_2, a intensidade de radiação- I'_1 -emitida pela superfície dA_1, que atinge um elemento dA_2, com centro em P, do hemisfério por unidade de tempo é dada por:

$$I'_1 = \frac{dq}{d\omega} \times \frac{1}{\cos\theta} \tag{3.32}$$

em que:

ω - ângulo sólido associado a dA_2 relativo a Q

θ - ângulo entre a normal a dA_1, e $\overline{PQ}$

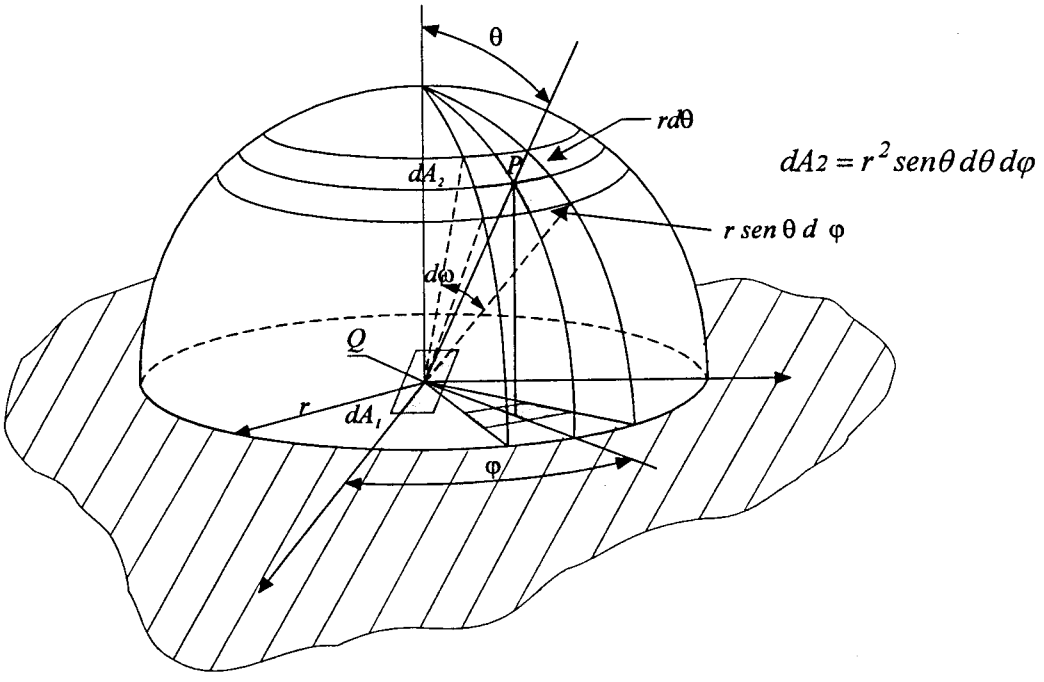


Fig. 3.7- Relações geométricas para a determinação do poder emissivo de um elemento de superfície dA_1

$$dq = I'1 \cos\theta \cdot d\omega \tag{3.33}$$

$$dq = I'1\, sen\theta cos\,\theta.d\theta\, d\varphi \tag{3.34}$$

$$q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I'1\, sen\theta cos\,\theta\, d\theta\, d\varphi \tag{3.35}$$

Como a radiação é difusa, I'_1 é independente de θ e φ então:

$$q = I'1 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} sen\theta cos\,\theta \cdot d\theta\, d\varphi = I'1 \cdot \Pi \tag{3.36}$$

em que Π é um ângulo sólido.

No caso de se tratar apenas da energia emitida que deixa a superfície, a densidade de fluxo passa a ser o poder emissivo hemisférico - E - e - I'_1 - a intensidade da radiação emitida:

$$E = I'1.\ \Pi \tag{3.37}$$

O poder emissivo -E- representa a energia total emitida em todas as direcções, por unidade de área da superfície do corpo emissivo, e por unidade de tempo. A intensidade de radiação emitida I'_1 representa a radiação que passa por um plano imaginário normal à direcção de emissão e que está contido dentro de um ângulo sólido, por unidade de tempo. Esta grandeza tem carácter direccional.

O fluxo de radiação Q representa a energia radiada por um corpo que é interceptado por outro corpo por unidade de tempo [80]. Entre duas superfícies, o fluxo de radiação da superfície A_1 para A_2, definido como a potência radiada por A_1 que incide em A_2 de acordo com a fig. 3.8, é dado por:

$$dQ_{1\to 2} = \frac{I'_1\, dA_1 \cos\theta_1\, dA_2 \cos\theta_2}{r^2} = I'_1 \cos\theta_1\, dA_1 \left(\frac{dA_2 \cos\theta_2}{r^2}\right) = I'_1 \cos\theta_1\, dA_1\, d\omega_{12} \qquad (3.38)$$

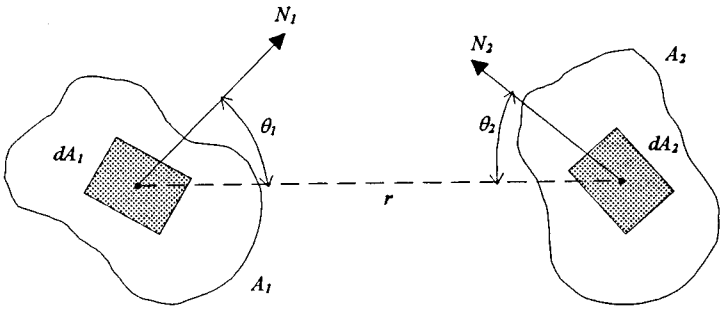


Fig. 3.8 - Factores geométricos na radiação entre 2 elementos

em que $d\omega_{12}$ é o ângulo sólido associado a $dA_2 \cos\theta_2$ em A_1.

$$Q_{1\to 2} = \frac{E_1 \cos\theta_1 \cos\theta_2}{\Pi r^2} \cdot dA_2 \cdot dA_1 \qquad (3.39)$$

Exprimindo a potência radiada por A_1 que atinge A_2 por unidade de área de A_1 tem-se:

$$\frac{Q_{1\to 2}}{A_1} = E_1 \left[\frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2}{\Pi r^2} \cdot dA_2 \cdot dA_1 \right] \qquad (3.40)$$

Assim, da potência total radiada por A_1 , E_1 , a fracção que atinge A_2 é dada pelo termo entre parêntesis designado factor de forma , F_{12} . O factor de forma é uma grandeza que apenas é função da geometria do problema e que varia entre 0 e 1. Os factores de forma gozam de determinadas propriedades facilmente determináveis:

- reciprocidade $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$
- se as superfícies A_j formarem um conjunto fechado:

$$\sum_{j=1}^{n} F_{kj} = 1$$,para uma qualquer superfície k do conjunto.

A determinação de um factor de forma a partir da definição é em geral trabalhosa, recorrendo-se frequentemente a tabelas onde se apresentam os factores de forma mais correntes.

No caso dos corpos não negros, os fluxos totais são constituídos por parcelas emitidas e parcelas reflectidas que também devem ser consideradas. Para tal é necessário definir:

- *Radiosidade* - J - Potência total que provém da superfície por unidade de área. Inclui um termo relativo à energia emitida e outro à reflectida; o 1º termo tem uma distribuição espectral função da temperatura do corpo, enquanto o 2º é função da temperatura dos corpos de onde originalmente provêm;
- *Irradiação* - G - Potência total que incide numa superfície por unidade de área.

Para um dado corpo:

$$J = E + \rho G \tag{3.41}$$

Num sistema plano fechado, fig. 3.9 , o balanço térmico da superfície k, ou fluxo resultante entre a superfície k e o sistema, entendido como a diferença entre a potência emitida por k para todas as superfícies e a recebida por k de todas as superfícies é dada por [84]:

$$Qk = \left(Jk - Gk\right)Ak \tag{3.42}$$

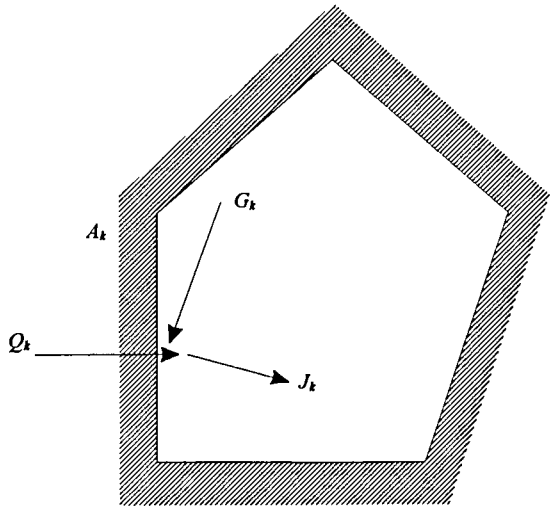


Fig. 3. 9 - Balanço térmico na superfície k de um contorno fechado

Por sua vez a partir de (3.41):

$$Jk = \varepsilon k \, \sigma \, Tk^4 + (1 - \varepsilon k) \, Gk \tag{3.43}$$

Tendo presente que :

$$Gk \, Ak = \sum_{j=1}^{n} Fjk \, Jk \, Aj = \sum_{j=1}^{n} Fkj \, Jj \, Ak \tag{3.44}$$

Conclui-se :

$$Gk = \sum_{j=1}^{n} Fkj \, Jj \tag{3.45}$$

Substituindo (3.45) em (3.42) e (3.44) respectivamente, obtêm-se :

$$Qk = Ak \left(Jk - \sum_{j}^{n} Fkj \, Jj \right) \tag{3.46}$$

e

$$Qk = Ak \frac{\varepsilon k}{1 - \varepsilon k} \cdot \left(\sigma \, Tk^4 - Jk \right) \tag{3.47}$$

Aplicando as expressões anteriores a todas as superfícies do contorno, resolvendo (3.47) em ordem a Jk e substituindo em (3.46) chega-se às seguintes expressões em notação matricial:

$$\sum_{j=1}^{n} \left(\frac{\delta kj}{\varepsilon j} - Fkj \frac{1 - \varepsilon j}{\varepsilon j} \right) \frac{Qj}{Aj} = \sum_{j=1}^{n} (\delta kj - Fkj) \, \sigma \, Tj^4 \tag{3.48}$$

$$\sum_{j=1}^{n} \left(\delta kj - (1 - \varepsilon k) \, Fkj \right) Jj = \varepsilon k \, \sigma \, Tk^4 \tag{3.49}$$

$$Qk = Ak \left(Jk - \sum_{j=1}^{n} Fkj - Jj \right) \tag{3.50}$$

em que k assume os valores de 1 até n e δkj é o símbolo de Kronecker.

Cada uma destas equações dá origem a um sistema que resolvido em função das condições fronteira conhecidas, permite determinar as temperaturas, os fluxos e as radiosidades.

A determinação das trocas de calor por radiação em alvéolos é possível, conhecendo as temperaturas das diferentes superfícies e as respectivas emissividades, utilizando as equações anteriores.

No caso mais simples de cavidade rectangular longa, assimilável a duas placas paralelas com a mesma área, suficientemente extensas para que relativamente à distância entre elas possam ser

consideradas um sistema fechado, as expressões simplificam-se porque $A_1 = A_2 = A$ e $F_{12} = F_{21} = 1$, então:

$$Q_1 = -Q_2 = \frac{A\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \tag{3.51}$$

É possível aplicar à transmissão de calor por radiação, uma analogia eléctrica [80, 85, 86], que permite uma mais fácil visualização do problema, particularmente em alvéolos.
A expressão (3.51) resulta da simplificação da expressão mais geral:

$$Q_1 = -Q_2 = \frac{\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \tag{3.52}$$

em que o denominador sugere a adição de 3 resistências em série características das superfícies A_1 e A_2 , função das respectivas emissividades e uma resistência térmica intermédia função do factor de forma F_{12}. No caso de um alvéolo limitado por 4 superfícies, com as faces 1 e 2 às temperaturas T_1 e T_2 respectivamente e as outras duas à temperatura média $(T_1 + T_2)/2$ teríamos o circuito representado na fig. 3.10, sendo o fluxo total trocado pela face 1, com as faces 2 e 3, inversamente proporcional à associação das resistências assinaladas na fig. 3.10.

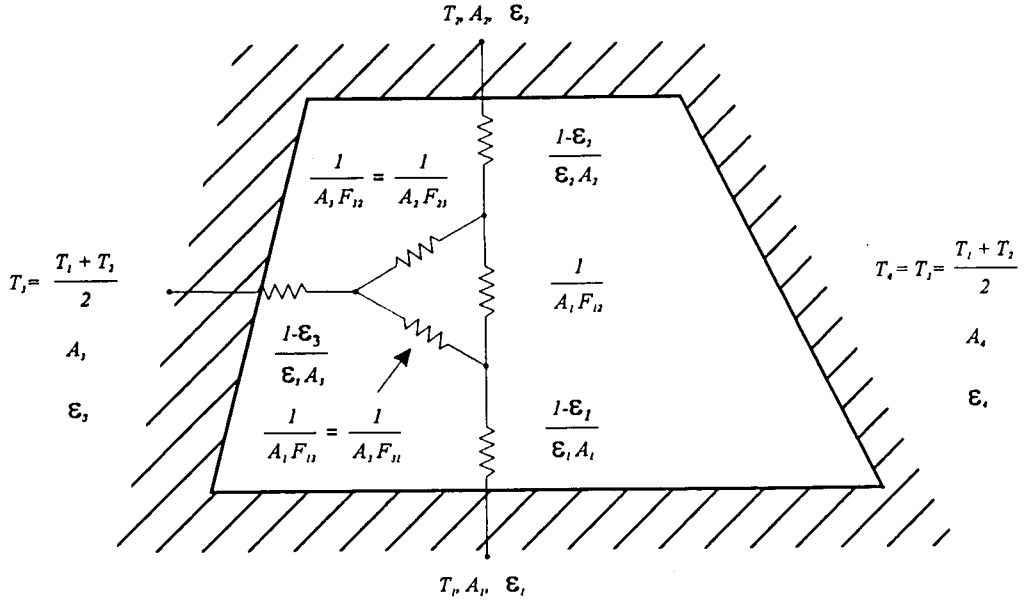


Fig. 3.10 - Analogia eléctrica ilustrando as trocas por radiação entre 3 faces de um alvéolo constituído por 4 superfícies

Como é perceptível da fig. 3.10, no caso dos alvéolos, a transmissão de calor por radiação, para além da emissividade das superfícies é muito influenciada pelo número e disposição das faces do alvéolo.

3.4.5 - Tratamento conjunto dos mecanismos de transmissão de calor em alvéolos

Como já foi referido nos alvéolos ocorrem fenómenos de transmissão de calor por condução, convecção e radiação. Normalmente, para as emissividades habituais dos materiais de construção, a parcela mais importante da transmissão é devida à radiação.

Em Térmica dos Edifícios é habitual procurar associar os diversos fenómenos, que apesar de terem sido tratados em separado ocorrem, no entanto, em simultâneo. Como se viu, dado um espaço preenchido por ar entre duas superfícies às temperaturas T_1 e T_2 com $T_1 > T_2$, a densidade de fluxo de calor por convecção e marginalmente por condução da superfície do corpo 1 para o ar é :

$$q_c = h_c \left(T_1 - T_2\right) \tag{3.53}$$

Por sua vez ,a densidade de fluxo radiado pela superfície 1 (como diferença entre a potência emitida e a recebida) pode ser expressa como:

$$q_r = \sigma S \left(T_1^4 - T_2^4\right) \tag{3.54}$$

em que S é função das características geométricas e físicas das superfícies (3.52). Por analogia com (3.53) pode-se expressar:

$$q_r = h_r \left(T_1 - T_2\right) \tag{3.55}$$

concluindo-se que :

$$h_r = \frac{\sigma S \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\left(T_1 - T_2\right)} = \sigma S \left(T_1 + T_2\right) \cdot \left(T_1^2 + T_2^2\right) \tag{3.56}$$

dado que para as temperaturas correntes em térmica de edifícios $T_1 \cong T_2$, tem-se:

$$h_r = 4\sigma S \left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right)^3 \tag{3.57}$$

Resulta por fim a densidade de fluxo de calor total conduzido, convectado e radiado pela superfície *1* como:

$$q = (hc + hr)(T1 - T2) \tag{3.58}$$

Em térmica dos edifícios designa-se o factor, $hc + hr$ por *condutância térmica de espaços de ar* e o seu inverso $R = 1/(hc + hr)$ por *resistência térmica de espaços de ar.*

No caso dos alvéolos dos elementos para alvenaria e como primeira aproximação podem utilizar-se as resistências térmicas de espaços de ar com desenvolvimento indefinido, constantes de diferente normalização e que se sintetizam na fig. 3.11.

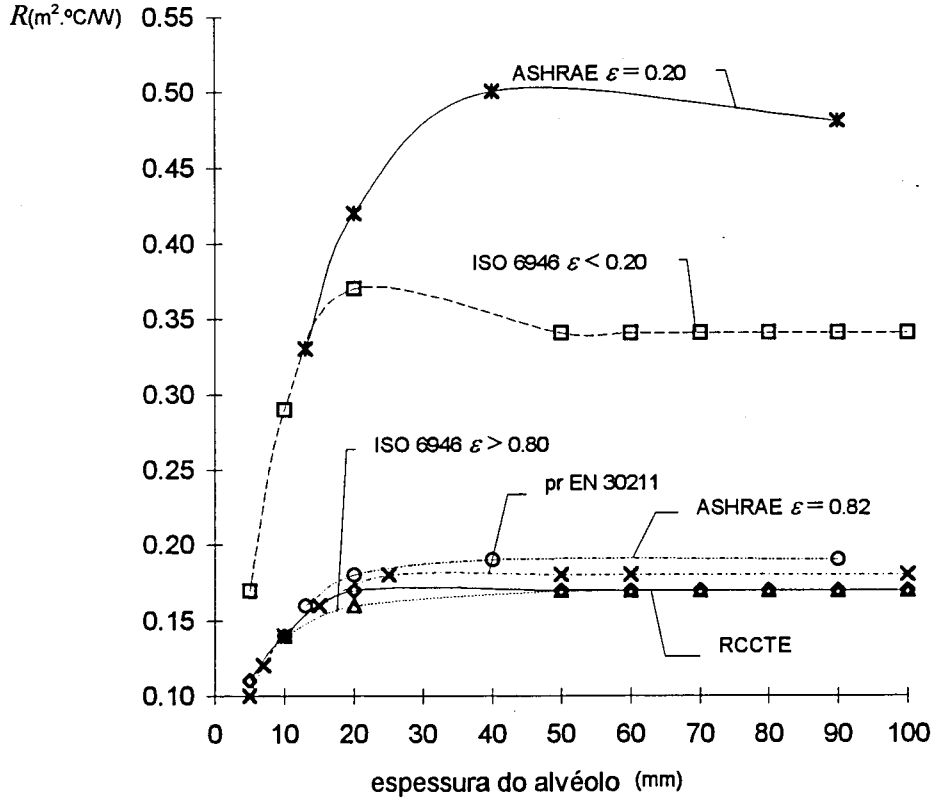


Fig. 3.11 - Resistência térmica de alvéolos para fluxos horizontais ,segundo diferente normalização

Pode-se encontrar informação mais detalhada relativamente à determinação da resistência térmica de espaços de ar não ventilados do tipo dos alvéolos para alvenaria, limitados por materiais de elevada emissividade em documentação preliminar *CEN.* O pr EN 30211 [63] preconiza:

- se $l/e \geq 10$ (3.59)

$$R = 1/(h_c + h_r)$$

$$h_c = max\ (0.92,\ 0.025/e)$$

$$h_r = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} h_{ro}$$

em que:

$$h_{ro} = 4\sigma \left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right)^3 ;$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - emissividades das superfícies;

T_1 e T_2 - Temperaturas das superfícies dos alvéolos.

- se $l/e < 10$

$$R = \frac{1}{h_c + 1/2 \cdot h_r \cdot \left(1 + \sqrt{1 + e^2/l^2} - e/l\right)} \quad (3.60)$$

em que os símbolos têm o significado já referido nas expressões anteriores.

O pr EN 32573:1992 [87], relativo a pontes térmicas, especifica para alvéolos não ventilados as resistências térmicas constantes do Quadro 3.2.

Quadro 3.1 - Resistência térmica ($m^2.°C/W$) de espaços de ar não ventilados

e	*e/l*							
(mm)	**10**	**5**	**3**	**2**	**1**	**0.5**	**0.3**	**< 0.1**
2	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
5	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.11	0.11	0.10
7	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.13	0.13	0.12
10	0.20	0.19	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14
15	0.24	0.23	0.22	0.21	0.20	0.18	0.17	0.16
25	0.29	0.28	0.27	0.26	0.23	0.21	0.19	0.18
> 25	0.29	0.28	0.27	0.26	0.23	0.21	0.19	0.18

Há trabalhos de modelização numérica do comportamento dos materiais para alvenaria [35,88], em que para simplificar a simulação, a condutância térmica do ar dos alvéolos e transformada numa condutibilidade térmica equivalente, constituída por dois termos, um relativo à convecção e outro à radiação:

$$\lambda_{equiv} = \lambda_{equiv\,c} + \lambda_{equiv\,r} \tag{3.61}$$

em que

$$\lambda_{equivc} = h_c \cdot e\,;$$

$$\lambda_{equiv\,r} = h_r \cdot e\,.$$

CAPÍTULO 4

COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ALVENARIAS SOB ACÇÕES VERTICAIS

CAPÍTULO 4

COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ALVENARIAS SOB ACÇÕES VERTICAIS

ÍNDICE

4.1 - INTRODUÇÃO

4.2 - PARTICULARIDADES DAS ALVENARIAS COMO MATERIAL ESTRUTURAL

4.3 - MODELOS DE COMPORTAMENTO DAS ALVENARIAS SOB CARGAS VERTICAIS

- 4.3.1 - Generalidades
- 4.3.2 - Síntese dos modelos clássicos de comportamento das alvenarias
- 4.3.3 - Modelos simplificados de comportamento
- 4.3.4 - Modelos contemplados em documentos de carácter regulamentar
- 4.3.5 - Modelos numéricos

4.4 - PRINCIPAIS FACTORES CONDICIONANTES DO COMPORTAMENTO DAS ALVENARIAS SUJEITAS A ACÇÕES VERTICAIS

- 4.4.1 - Generalidades
- 4.4.2 - Resistência à compressão dos elementos
- 4.4.3 - Geometria interna e dimensões dos elementos
- 4.4.4 - Resistência e características da argamassa
- 4.4.5 - Juntas de assentamento
- 4.4.6 - Aparelho de assentamento e qualidade de execução

CAPÍTULO 4

COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ALVENARIAS SOB ACÇÕES VERTICAIS

4.1 - INTRODUÇÃO

São objectivos deste Capítulo discutir o comportamento mecânico das alvenarias sob acções verticais, com destaque para as alvenarias realizadas a partir de blocos de betão de inertes leves com furação vertical.

Discutem-se as singularidades das alvenarias como material estrutural, apresentando-se de forma sumária os mecanismos de funcionamento das alvenarias sujeitas a cargas verticais e os critérios que se conhecem para efectuar o seu dimensionamento. Destacam-se os critérios constantes de documentos de carácter regulamentar, visando a verificação de estabilidade das alvenarias estruturais . Refere - se a possibilidade de aplicação de métodos numéricos a este domínio.

Por último discute-se a influência dos principais parâmetros condicionantes do comportamento mecânico das alvenarias, recorrendo a resultados de ensaios e simulações numéricas. Os parâmetros considerados são a resistência à compressão dos elementos, características da argamassa de assentamento, geometria interna e dimensões dos elementos, juntas de assentamento e aspectos associados ao aparelho e qualidade de execução.

4.2 - PARTICULARIDADES DAS ALVENARIAS COMO MATERIAL ESTRUTURAL

As alvenarias constituem provavelmente a solução estrutural mais antiga na realização de edifícios, associando-se a esta solução um riquíssimo espólio arquitectónico. No entanto a sua realização baseou-se durante milhares de anos na tradição construtiva regional, alicerçada num processo empírico progressivamente apurado ao longo dos séculos.

Com algum atraso relativamente a outras soluções estruturais, os critérios modernos de dimensionamento procuraram estender-se também às alvenarias.

São inúmeros os testemunhos que se podem referir a nível internacional do crescente interesse suscitado pelas alvenarias como material estrutural. Apenas com carácter ilustrativo, refere-se :

- Principais entidades desenvolvendo actividade no domínio das alvenarias:
  - Comissão Técnica do *CIB - International Council for Building Research Studies and Documentation* :
    - W 23 - " *Load Bearing Walls* ";
  - Comissões Técnicas do *CEN - European Committee for Standardization* :
    - TC125 - " *Masonry* "
    - TC250 - " *Structural Eurocodes*"
  - Comissão Técnica da *ISO - International Organization for Standardization* :
    - TC179 - " *Masonry Structures*";
  - " *British Masonry Society* " na Grã-Bretanha;
  - " *Masonry Society* " nos EUA.

- Principais encontros no domínio das alvenarias com periodicidade regular :
  - " *International Brick and Block Masonry Conference* "(IBMaC) com 9 edições;
  - " *North American Masonry Conference* " com 6 edições;
  - " *International Symposium on Computer Methods in Structural Masonry* " com 3 edições.

A actividade de investigação no domínio das alvenarias tem contribuído para a produção de múltiplos documentos de carácter normativo, a que se fará referência detalhada mais à frente.

No entanto, a tentativa de produzir materiais estruturais para alvenarias com boas características mecânicas, bem como desenvolver métodos eficazes de dimensionamento enfrenta algumas dificuldades. Com efeito, e contrariamente a outros materiais estruturais ou soluções construtivas, para as quais o estabelecimento de valores teóricos das suas características resistentes pode ser efectuado de forma relativamente fácil e com uma incerteza satisfatória, no caso das alvenarias este objectivo é muito mais delicado pelas razões que seguidamente se enumeram.

a) **A solução**

A alvenaria é em si própria um elemento construtivo composto, constituído no mínimo pelos elementos e pela argamassa, podendo ainda incorporar outros constituintes, como por exemplo armaduras horizontais ou verticais, no caso das alvenarias armadas, ou betão de enchimento por forma a melhorar as suas características resistentes.

b) **Os constituintes**

Os elementos para alvenaria, para além de poderem ser realizados a partir de matérias-primas ou materiais muito diversos (argilas, betão normal ou leve, pedras naturais, etc.), apresentam geometrias exteriores e interiores muito variadas, frequentemente de carácter local, assentes nas tradições construtivas de cada região.
Por outro lado a produção dos elementos para alvenaria pode ser conseguida com níveis de industrialização muito diversos, desde produções de carácter marcadamente artesanal, até produções muito industrializadas. Estes aspectos dão origem a uma gama muito ampla das características dos produtos.

Quanto ao outro constituinte fundamental das alvenarias - a argamassa de assentamento - pode apresentar múltiplas composições. A espessura e configuração das juntas horizontais e verticais, em estreita articulação com os elementos, têm uma influência significativa, mas difícil de esclarecer.

Poderão enumerar-se ao nível dos constituintes os seguintes parâmetros condicionantes do comportamento mecânico das alvenarias:

- Elemento :

  - resistências à tracção e compressão em regime uniaxial ou multiaxial;
  - módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e fluência;
  - rugosidade;
  - absorção de água;
  - resistência aos agentes químicos;
  - variações dimensionais;
  - massa, geometria e furação;

- Argamassa :

  - resistência à compressão e comportamento em regime multiaxial;
  - módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e fluência;
  - aderência;
  - trabalhabilidade, plasticidade e capacidade de retenção de água.

c) **A execução**

Os aspectos de carácter tecnológico associados à qualidade de execução das alvenarias são também importantes para o seu comportamento mecânico. No entanto os factores intervenientes no

assentamento das paredes são inúmeros e a sua influência difícil de evidenciar, tornando muito difícil qualquer tentativa de uniformização.

d) **A experimentação e o cálculo**

A determinação das características resistentes dos elementos isolados põe problemas acrescidos relativamente aos outros materiais estruturais correntes. Referem-se como exemplos, a dificuldade em obter provetes de dimensões normalizadas, a necessidade de proceder à regularização das faces dos provetes nos ensaios mecânicos, a grande sensibilidade dos elementos às condições de fabrico e conservação, a anisotropia da generalidade dos elementos e a dificuldade de instrumentar os provetes devido à geometria dos elementos.

A consideração dos efeitos combinados, por exemplo entre elementos e argamassa, é complexa e difícil de parametrizar, podendo conduzir a que os fenómenos que condicionam a rotura possam ser diferentes dos observados nos produtos isolados.

A comparação entre modelos de comportamento e resultados experimentais é delicada porque, para além das dificuldades na realização das caracterizações experimentais, a generalidade dos resultados apresenta dispersões importantes e, ainda, porque muitos procedimentos experimentais têm, por diversas razões, carácter convencional.

4.3 - MODELOS DE COMPORTAMENTO DAS ALVENARIAS SOB CARGAS VERTICAIS

4.3.1 - Generalidades

A concepção de estruturas recorrendo a alvenarias resistentes passa sobretudo pelo conhecimento da sua resistência sob acção de cargas verticais.

A determinação experimental desta resistência é trabalhosa e cara, devido à própria dimensão dos provetes, às precauções a ter em conta na execução, à instrumentação complexa e ainda à dispersão importante dos resultados. Por outro lado, a possibilidade de a partir dos resultados experimentais formular conclusões muito gerais deve ser cuidada, atendendo às grandes disparidades entre as características dos diferentes elementos e às singularidades já referidas das alvenarias como material estrutural. A alternativa de determinação da resistência pelo cálculo é assim de interesse evidente.

É objectivo deste ponto, apresentar de forma sumária a síntese dos mecanismos de funcionamento das alvenarias sob cargas verticais e os critérios que se conhecem, sobretudo os adoptados pelos regulamentos de alvenaria estrutural, para a verificação da estabilidade das mesmas.

Discute-se de forma mas detalhada o comportamento mecânico das alvenarias resistentes de blocos de betão de inertes leves com furação vertical.

4.3.2 - Síntese dos modelos clássicos de comportamento das alvenarias

Como já foi referido, embora sob um ponto de vista histórico as alvenarias sempre tenham tido uma utilização estrutural importante, a tentativa de explicar o seu comportamento mecânico é bastante recente. Descrevem-se de seguida os critérios de comportamento mais divulgados.

a) **Modelo de formulação próprio da mecânica do contínuo**

A abordagem mais simplificada consiste na suposição de um modelo de comportamento em que a alvenaria é uma associação de elementos e argamassas com propriedades médias, admitindo comportamento elástico e isotrópico [89]. Esta formulação é simplista, mas comum no estudo de outros problemas de Engenharia.

O tratamento analítico do problema é análogo ao adoptado noutros problemas de Engenharia Civil, devendo respeitar-se as condições de equilíbrio e a lei constitutiva típica do material em apreço, cuja determinação se baseia em resultados experimentais. O comportamento dos materiais apresenta uma complexidade notável que a lei constitutiva deverá traduzir, devendo no entanto esta complexidade ser ponderada pela necessária simplicidade das aplicações em Engenharia.

Em primeira aproximação, o comportamento da alvenaria pode admitir-se elástico, o que é razoável para carregamento moderado em fase não fissurada.

O estabelecimento de critérios de rotura que permitam a análise não linear em fase fissurada poderá seguir os critérios correntemente adoptados em problemas mecânicos (Coulomb, Mohr, etc.), ou outros ajustados ao domínio das alvenarias [90]. Os critérios de rotura a usar para o estudo de alvenarias deverão ter em conta a anisotropia.

b) **Modelo de HILSDORF**

A 1ª tentativa que se conhece de explicar o mecanismo de rotura de uma alvenaria - de tijolos maciços - em função das diferentes deformabilidades dos dois principais constituintes - argamassa e tijolo - é devida a HILSDORF e remonta a 1969 [91].

Observando o mecanismo de rotura de provetes de alvenaria, HILSDORF concluiu que sob acção de uma compressão simples a parede deforma-se não só no seu plano, mas também no plano perpendicular, gerando-se tensões horizontais de compressão na argamassa e tensões horizontais de tracção no elemento, devido à maior deformabilidade da argamassa, fig 4.1.

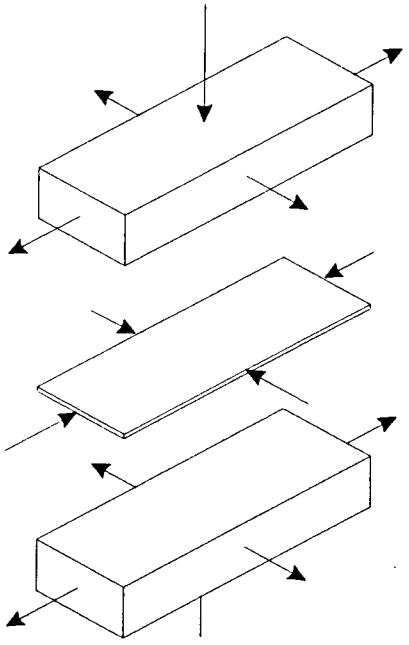


Fig 4.1 - Representação esquemática das tensões nos elementos e na argamassa, numa alvenaria submetida à compressão simples, em que a argamassa é mais deformável que os elementos

O estado de tensão triaxial que se desenvolve na argamassa explica os factos das tensões de rotura da alvenaria poderem ultrapassar a resistência à compressão uniaxial da argamassa, bem como da resistência à compressão simples do elemento para alvenaria poder não se correlacionar com a resistência do elemento na parede.

c) **Modelo de formulação em duas fases**

A regularidade do aparelho da alvenaria sugere a utilização de um modelo em que a alvenaria é assimilada a um material com duas fases, consistindo em elementos elásticos assentes numa matriz de argamassa com comportamento não elástico [92,93] fig 4.2 . A rotura ocorre de acordo com uma lei constitutiva. As juntas de argamassa têm boa resistência à compressão, reduzida resistência à tracção e resistência ao corte função do aparelho e da compressão instalada. Esta formulação tem analogias em problemas de mecânica das rochas [94].

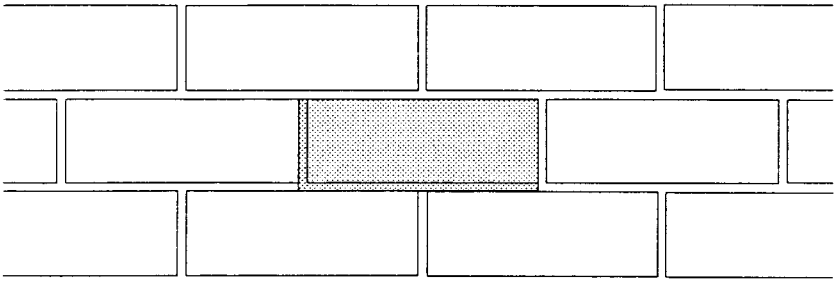


Fig. 4.2 - Ilustração do modelo em duas fases

4.3.3 - Modelos simplificados de comportamento

Procurando ter em conta a especificidade dos elementos para alvenaria utilizados em França, mas também na Europa do Sul, com uma estrutura interna muito alveolada, o *CSTB* desenvolveu recentemente um modelo simplificado de cálculo, para explicar de forma aproximada o comportamento das alvenarias sob acção de cargas verticais [95]. Este documento surge também como reacção a alguma inadequação do Eurocódigo 6 - *EC6 -Estruturas de Alvenaria* [96] - para traduzir, através de modelos fiáveis, o comportamento das alvenarias, particularmente das realizadas com os materiais correntes na Europa do Sul [97,98].

A formulação apresentada é simplificada, mas representativa da realidade.

Tendo em conta o comportamento à rotura das alvenarias distingue 3 grupos:

- alvenarias de elementos maciços ou equiparáveis;
- alvenarias de elementos de furação vertical;
- alvenarias de elementos de furação horizontal.

O modelo proposto relaciona a resistência média à compressão da alvenaria - f - ,com a resistência média normalizada à compressão dos elementos constituintes - f_b - e com a resistência média à compressão da argamassa - f_m.

Convém ter presente que os valores obtidos experimentalmente, f_b e f , não são intrínsecos ao material, pois têm sempre um carácter convencional associado às técnicas de ensaio. No caso das

alvenarias têm influência, entre outros, o modo e velocidade de carregamento, as características dos materiais usados na rectificação, a humidade dos produtos e o efeito de cintagem dos pratos da prensa.

Admitindo comportamento elástico e linear e por considerações de deformabilidade global do elemento deduzem-se as seguintes expressões gerais [95]:

a) **Elementos maciços**

$$f = f_b \cdot \frac{S_r}{S_b} \cdot \frac{t_u}{t_u + \frac{e}{h_u} \cdot \frac{E_b}{E_m}} \tag{4.1}$$

e

$$\frac{S_r}{S_b} = (t_u - e) / t_u \tag{4.2}$$

em que :

S_r - Secção resistente do elemento

S_b - Secção aparente do elemento

e - Espessura da junta horizontal

h_u - Altura do elemento

t_u - Espessura do elemento

E_b - Módulo de elasticidade do elemento

E_m - Módulo de elasticidade da argamassa

No caso dos elementos maciços o coeficiente corrector S_r / S_b traduz a redução efectiva da largura da junta, devido à sua degradação próximo dos bordos do elemento, de acordo com (4.2).

A configuração de rotura é função da espessura da junta e da resistência da argamassa, podendo corresponder ao esmagamento do material do elemento, no caso de juntas delgadas realizadas com argamassas resistentes, ou ao esmagamento da argamassa e/ou fissuração do elemento em torno dum núcleo central, no caso de juntas espessas realizadas com argamassas pouco resistentes.

b) **Elementos de furação vertical**

$$f = f_b \cdot \frac{S_r}{S_n} \cdot \frac{t_u}{t_u + \frac{e}{h_u} \cdot \frac{E_b}{E_m} \cdot \frac{S_b}{S_n} \cdot \frac{1}{R_1}} \tag{4.3}$$

em que :

S_n - Secção efectiva do elemento, correspondente à secção aparente deduzida dos vazios

R_1 - Factor adimensional que traduz a esbelteza dos septos ($R_1 \leq 1$)

os restantes símbolos têm o significado já referido em (4.1) e (4.2).

No caso dos elementos de furação vertical a rotura pode ocorrer por punçoamento da argamassa das juntas produzido pelos septos, ou por esmagamento do material constituinte dos septos.

Nestes elementos de furação vertical, a secção resistente - S_r - deve ser entendida como a secção efectiva comum a duas fiadas consecutivas, ou seja, a secção correspondente aos septos longitudinais, pois, devido ao aparelho aleatório de assentamento, não há garantia de sobreposição dos septos transversais.

A inclusão do parâmetro $S_b \ / \ S_n$ resultou dum estudo de correlação com resultados de ensaios.

O parâmetro R_1 procura acautelar a possibilidade de ocorrer rotura por encurvadura de septos muito esbeltos de elementos para alvenaria. Esta consideração pode revelar-se relevante no caso de blocos de grande altura.

c) **Elementos de furação horizontal**

$$f = f_b \cdot \frac{S_r}{S_n} \cdot \frac{t_u}{t_u + \frac{e}{h_u} \cdot \frac{E_b}{E_m} \cdot \frac{S_b}{S_n} \cdot \frac{1}{R_2}} \tag{4.4}$$

R_2 - factor adimensional que traduz a esbelteza dos septos ($R_2 \leq 1$)

os restantes símbolos têm o significado já referido em (4.1), (4.2) e (4.3).

No caso destes elementos, normalmente cerâmicos, a rotura ocorre por encurvadura local dos septos verticais, após fissuração dos septos horizontais que funcionam como rigidificadores.

A principal vantagem deste modelo simplificado, resulta do facto da simples análise das expressões permitir retirar conclusões que concordam normalmente com as observadas nas caracterizações experimentais:

- a resistência da alvenaria - f - nunca é superior à resistência do elemento - f_b ;
- a resistência da alvenaria - f - cresce com a redução da espessura das juntas horizontais - e ;
- a resistência da alvenaria - f - cresce com o aumento da rigidez da argamassa - E_m ;
- no caso dos elementos de furação vertical, por exemplo os blocos de betão, a percentagem de furação produz uma redução da resistência superior à relação entre a secção efectiva e a secção bruta.

4.3.4 - Modelos contemplados em documentos de carácter regulamentar

Em Portugal nunca existiu um regulamento estrutural para alvenarias. Existem referências a disposições construtivas, por forma a assegurar a segurança estrutural das construções em alvenaria, no *Regulamento Geral das Edificações Urbanas - RGEU* [9] e *no Regulamento de Segurança das Construções Contra os Sismos - RSCCS* [99]. Esta abordagem é antiquada e não dispõe de qualquer modelo que a suporte.

Merece destaque um planeamento de estudos visando a regulamentação e normalização de construções de alvenaria, elaborado por TRIGO em 1983 [100].

Situação diversa ocorre nos principais países da Europa e da América do Norte, onde existem documentos de carácter regulamentar relativos à utilização estrutural das alvenarias.

Apresenta-se no Quadro 4.1 uma síntese dos documentos de carácter normativo / regulamentar aplicáveis a alvenarias em vigor em diversos países, embora nos países membros da União Europeia o Eurocódigo 6 [96] possa vir a substituir, a prazo, os regulamentos nacionais, pelo que alguns desses países não têm procedido a revisões dos seus regulamentos.

Quadro 4.1 - Síntese de documentos de carácter normativo relativos ao cálculo de alvenarias

PAÍS	DOCUMENTO E REF.[AS]	SÍNTESE
ALEMANHA		A regulamentação está dividida em 4 partes:
	DIN 1053 - Part 1 1974 [101]	**1ª Parte** - Dimensionamento , disposições construtivas e execução dos trabalhos de alvenarias resistentes ou não. Aplica-se a todo o tipo de materiais para alvenaria. Resulta da síntese e duma longa evolução de regras práticas (a 1ª edição remonta a 1930). Dimensionamento por tensões de segurança a partir das tensões admissíveis nas diferentes alvenarias (função do elemento, da argamassa e da situação da parede). Apresenta exigências relativas às argamassas. Existem normas de características dos elementos, ensaio e mecanismos de certificação.
	DIN 1053 - Part 2 1984 [102]	**2ª Parte** - Dimensionamento de alvenarias a partir de resultados de ensaios sobre os elementos e as argamassas, ou, em alternativa, sobre provetes de parede. Aplica-se aos mesmos materiais da 1ª Parte. Dimensionamento por estados limites. **3ª Parte** -Dimensionamento e disposições construtivas de alvenarias armadas. Existe apenas sob a forma de "draft".
	DIN 1053 - Part 4 1987 [103]	**4ª Parte** - Dimensionamento, disposições construtivas e execução dos trabalhos de painéis pré-fabricados tendo por base elementos cerâmicos. Dimensionamento por tensões de segurança.
AUSTRÁLIA	AS 3700 - 1988 [104]	Dimensionamento, disposições construtivas e execução dos trabalhos de alvenarias. Aplica-se a todos os tipos de alvenarias e materiais para alvenaria. Dimensionamento por estados limites. A resistência da alvenaria pode ser obtida a partir da resistência dos elementos e da argamassa, ou a partir de ensaios sobre provetes de parede. Existem normas de características e ensaio dos elementos.
BÉLGICA	NBN B24-301 1980 [105]	Dimensionamento e concepção de estruturas de alvenaria. Aplica-se a alvenarias correntes realizadas com elementos cerâmicos e em betão. Dimensionamento por estados limites. A resistência da alvenaria pode ser obtida a partir da resistência dos elementos e da argamassa, ou a partir de ensaios sobre provetes de parede. Existem normas de características e ensaio dos elementos e normas de ensaio dos "muretes" de alvenaria.
	NBN B24 - 401 1981[106]	A norma NBN B24 -401 respeita à execução das alvenarias.

Quadro 4.1 (cont.) - Síntese de documentos de carácter normativo relativos ao cálculo de alvenarias

EUA	ACI 530 - 92 [107]	Dimensionamento e concepção de estruturas de alvenaria. Aplica-se a todos os tipos de alvenarias e materiais para alvenaria. Dimensionamento por tensões de segurança de alvenarias correntes e armadas. Contempla regras de dimensionamento expedito " empírico", para edifícios em determinadas condições. Contêm disposições relativas a alvenarias armadas. Apresenta requisitos para alvenarias em zonas sísmicas.
	ACI 530.1 -92 [108]	O ACI 530.1-92 apresenta exigências dos materiais e da execução das estruturas em alvenaria.
FRANÇA	DTU 20.1 [52] 1985	Disposições construtivas e execução dos trabalhos de alvenarias. Aplica-se a alvenarias correntes, realizadas com qualquer material para alvenaria. Comporta um anexo com regras simplificadas de dimensionamento estrutural por tensões de segurança a partir das tensões admissíveis pelas diferentes alvenarias . Os produtos estão enquadrados por normas contendo exigências e técnicas de ensaio, existindo mecanismos de certificação assegurando a conformidade com as normas.
GRÃ-BRETANHA	BS 5628: Part 1 1978 [109]	A regulamentação está dividida em 3 partes: **1ª Parte** - Dimensionamento e concepção de estruturas correntes de alvenaria. Aplica-se a todo o tipo de materiais para alvenaria. Dimensionamento por estados limites. A resistência da alvenaria pode ser obtida a partir da resistência dos elementos e da argamassa, ou a partir de ensaios sobre provetes de parede. Existem normas de características e ensaio dos elementos
	BS 5628: Part 2 1985 [110]	**2ª Parte** - Dimensionamento e concepção de estruturas de alvenaria armada. Aplica-se a todo o tipo de materiais para alvenaria. Critérios de dimensionamento análogos aos da 1ª Parte.
	BS 5628: Part 3 1985 [51]	**3ª Parte** - Recomendações gerais para o projecto, disposições construtivas e execução dos trabalhos de todo o tipo de alvenarias.
ITÁLIA	D.M 24/1/86 [111] D.M 9/1/87 [112]	Concepção e dimensionamento de estruturas de edifícios em alvenaria. Aplica-se a alvenarias correntes, realizadas com qualquer tipo de elementos. Dimensionamento por estados limites. A resistência da alvenaria pode ser obtida a partir da resistência dos elementos e da argamassa, ou a partir de ensaios sobre provetes de parede. Existem normas de características e ensaio dos elementos. Dispõe ainda de um regulamento relativo às construções em zonas sísmicas, contendo disposições que devem ser respeitadas pelas alvenarias.
SUÍÇA	SIA V177/2 1989 [113]	Dimensionamento e concepção de estruturas correntes de alvenaria. Aplica-se a elementos cerâmicos e em betão. Dimensionamento por estados limites. A resistência da alvenaria é obtida a partir das propriedades dos materiais, por definição dum critério de rotura, diagrama não linear momento-curvatura, e por um módulo de elasticidade e de distorção.

Como se sabe estão em preparação no *CEN* normas europeias e Eurocódigos abrangendo, entre outras matérias e soluções construtivas, as alvenarias. Este corpo normativo irá vigorar em grande parte dos países da Europa Ocidental.

No âmbito do CEN/TC 125 - " *Masonry* ", estão em preparação normas relativas aos diferentes produtos para alvenarias - elementos, argamassas e componentes auxiliares - bem como normas de ensaio dos mesmos e das próprias alvenarias.

No âmbito do CEN/TC 250 - "*Structural Eurocodes*" e com repercussões no domínio das alvenarias, foram já aprovados, como normas provisórias, o Eurocódigo 6 - *EC6 - Estruturas de Alvenaria - Parte 1.1* [96] , e o Eurocódigo 8 - *EC8 - Estruturas em Zonas Sísmicas* [114] - que abrange também as estruturas de alvenarias.

O Eurocódigo 6 surge na linha de um documento anterior do *CIB* - W23, intitulado " *International Recommendations for Design and Erection of Unreinforced and Reinforced Masonry Structures with an Appendix on Recommendations for Seismic Design of Unreinforced, Confined and Reinforced Masonry Structures*"[115], de 1987.

O *EC6, Parte 1.1* [96], aplica-se a alvenarias correntes, armadas, pré-esforçadas e confinadas, estando organizado da seguinte forma:

- generalidades;
- concepção de alvenarias;
- materiais;
- dimensionamento das alvenarias;
- disposições relativas a elementos estruturais;
- execução dos trabalhos;
- diversos anexos de carácter normativo ou apenas informativo.

A metodologia de quantificação das acções e do estabelecimento das resistências de cálculo é comum a todos os Eurocódigos e baseia-se nos princípios de verificação de segurança aos estados limites.

Sintetizam-se no Quadro 4.2 as características dos materiais constituintes das alvenarias segundo o *EC6*.

Quadro 4.2 - Alvenaria estrutural. Características dos materiais constituintes das alvenarias segundo *EC6*

CLASSIFICAÇÃO		CARACTERÍSTICAS
ELEMENTOS		
• ORIGEM	TIPOS	- Cerâmicos - (pr EN 771-1 [116]) - Sílico-Calcários- (pr EN 771-2 [117]) - Betão de inertes correntes ou leves * - (pr EN 771-3 [118]) - Betão celular autoclavado - (pr EN 771-4 [119]) - Pedra artificial - (pr EN 771-5 [120]) - Pedra natural - (pr EN 771-6 [121])
• CONTROLO DE QUALIDADE NA PRODUÇÃO	CATEGORIA (reflecte-se nos coeficientes parciais de segurança relativos aos elementos)	- **I** - dispersão da resistência mecânica inferior a limite estabelecido. - **II** - não satisfaz condições categoria I.
• QUANTO À GEOMETRIA E FURAÇÃO	GRUPO	- **1** - Depressões ou furação vertical ≤ 25 % . Dimensões dos septos limitadas inferiormente e dimensões dos alvéolos limitadas superiormente. - **2A** - Furação vertical > 25 % e ≤ 45 %. Dimensões dos septos limitadas inferiormente - **2B** - Furação vertical > 45 % e ≤ 55 % . Dimensões dos septos limitadas inferiormente - **3** - Furação horizontal ≤ 70 % . Dimensões dos septos limitadas inferiormente e dimensões dos alvéolos limitadas superiormente.
• PROPRIEDADES **		- Resistência á compressão normalizada (f_b) ≥ 2 MPa (técnica pr EN 772-1 1993 [122], resistência convertida para as condições de seco ao ar e "factor de forma" normalizado). - Durabilidade - referência qualitativa

* - Exigências abordadas de forma detalhada no **Capítulo 5**

** - Exigências complementares no *EC8*

Quadro 4.2 (cont.) - Alvenaria estrutural. Características dos materiais constituintes das alvenarias segundo *EC6*

ARGAMASSA		
• APLICAÇÃO	TIPOS	pr EN 998-2 [123] : - Argamassa convencional - inertes correntes, juntas correntes com espessura > 3 mm - Argamassa-cola - juntas delgadas ≤ 3mm - Argamassa leve - inertes leves, massa volúmica da argamassa < 1500 kg/m³
• PROPRIEDADES **		- Resistência à compressão média (f_m) (técnica EN 1015-11 [124]) : - Alvenaria corrente, argamassa convencional ≥ 1 MPa (classe M1); - Alvenaria armada e pré-esforçada, argamassa convencional ≥ 5 MPa (classe M5); - Alvenaria com juntas delgadas, argamassa-cola ≥ 5 MPa (classe M5); - Alvenaria assente com argamassa leve ≥5 MPa (classe M5); - Durabilidade - referência qualitativa - Aderência - Em argamassas convencionais sem adjuvantes está assegurada. Noutras condições avaliação através de ensaios.
BETÃO COMPLEMENTAR		
Sem interesse para o objectivo deste trabalho		
ARMADURAS		
Sem interesse para o objectivo deste trabalho		

** - Exigências complementares no *EC 8*

Sintetizam-se no Quadro 4.3 as formas de determinação da resistência característica à compressão da alvenaria estrutural corrente segundo o *EC6*.

Quadro 4.3 - Resistência característica à compressão - f_k - da alvenaria estrutural corrente segundo *EC 6*

SITUAÇÃO	QUANTIFICAÇÃO
• **DETERMINAÇÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS** ***	Segundo pr EN 1052-1 [125]
• **DETERMINAÇÃO ATRAVÉS DE RELAÇÕES EMPÍRICAS ENTRE RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS E ARGAMASSA****	
- Alvenaria corrente realizada com argamassa convencional	- $f_k = K f_b^{0.65} f_m^{0.25}$ (MPa) (4.5) - $f_m \leq$ min (20 MPa, f_b) K - coeficiente que depende do grupo do elemento e da existência ou não de uma junta longitudinal de argamassa ao longo da parede (valores preconizados entre 0.40 a 0.60) $E = 1000 f_k$ (4.6)
- Alvenaria corrente realizada com argamassa-cola	- $f_k = K f_b^{0.0.65} f_m^{.25}$ (MPa) (4.5) - $f_b \leq 50$ MPa - $f_m \leq$ min (20 MPa, f_b) K - coeficiente que depende do grupo do elemento (valores preconizados entre 0.50 a 0.70) Interdito em elementos do Grupo 3 Tolerâncias dimensionais dos elementos compatíveis com juntas delgadas $E = 1000 f_k$ (4.6)
- Alvenaria corrente realizada com argamassa leve	- $f_k = K f_b^{0.65}$ (MPa) (4.7) - $f_b \leq 15$ MPa K - coeficiente variável com a massa volúmica da argamassa e com o material constituinte do elemento (valores preconizados entre 0.55 e 0.80) Só possível com elementos do Grupo **1** $E = 1000 f_k$ (4.6)
- Alvenaria corrente realizada com juntas verticais não preenchidas	Utilizadas as expressões (4.5 a 4.7) já referidas. A influência deste tipo de assentamento repercute-se na resistência ao corte que deve ser determinada de forma diferente das alvenarias com juntas verticais preenchidas.
- Alvenaria corrente realizada com juntas horizontais descontínuas	- Só possível nos Grupos de elementos **1,2A e 2B.** - A resistência é em geral determinada da mesma forma, mas a resistência do elemento - f_b - deve ser obtida por aplicação da força apenas através das áreas destinadas a serem argamassadas.

*** - Discutida no Capítulo 7

**** - f_b . resistência média normalizada à compressão dos elementos;
- f_m - resistência média à compressão da argamassa;
- E - módulo de elasticidade secante

A determinação da referida resistência através de ensaios será apresentada de forma mais desenvolvida no Capítulo 7.

Quanto à determinação da resistência à compressão através de relações empíricas entre resistências dos elementos e da argamassa convêm referir que tais relações resultam do tratamento estatístico duma compilação de trabalhos experimentais desenvolvidos sobretudo na Europa do Norte, particularmente na Alemanha [126,127,128]. As expressões propostas têm merecido alguma contestação pelas seguintes razões [97,129,130] :

- resultam de ensaios realizados sobretudo com elementos cerâmicos, cujas geometrias apresentam reduzida percentagem de furação;
- os referidos elementos apresentam resistências mecânicas relativamente elevadas;
- as argamassas utilizadas apresentam resistências moderadas;
- as condições referidas são diferentes das correntemente usadas na Europa do Sul.

Com carácter ilustrativo apresenta-se na fig. 4.3 o conjunto de resultados relativos a uma argamassa de assentamento com resistência à compressão de 5 MPa [126], usados para estabelecer a correlação do *EC6*.

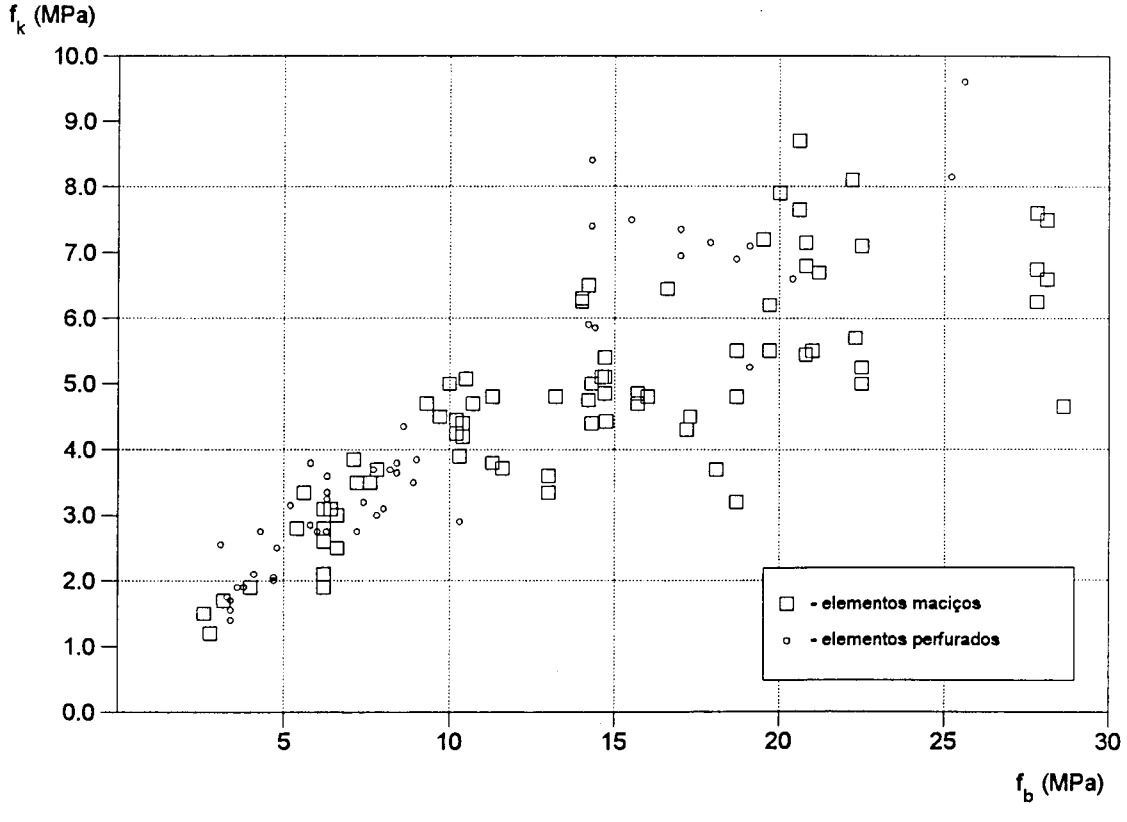


Fig. 4.3 - Resistência característica à compressão das alvenarias (f_k), versus resistência normalizada dos elementos (f_b), para uma argamassa com resistência à compressão de 5 MPa [126]

4.3.5 - Modelos numéricos

Conforme tem vindo a ser referido, não se dispõe ainda de um modelo analítico que consiga traduzir com toda a generalidade a influência dos múltiplos factores que condicionam a resistência à compressão das alvenarias. A generalidade dos regulamentos adoptam correlações empíricas entre a resistência da alvenaria à compressão e a resistência à compressão dos elementos e da argamassa.

Uma via alternativa bastante usada tem sido a determinação da resistência à compressão através do ensaio de provetes de alvenaria de 3 ou 4 fiadas "*muretes*", dado que estes provetes incluem o efeito do elemento, da argamassa de assentamento e das condições de execução. Esta via coloca no entanto alguns problemas associados sobretudo aos requisitos das máquinas de ensaio, manuseio dos provetes e custo.

Como irá ser discutido de forma mais detalhada no Capítulo 6, a proliferação, nos últimos anos, dos computadores pessoais e estações de trabalho, tem conduzido ao desenvolvimento de técnicas avançadas de análise numérica. Actualmente o método dos elementos finitos atingiu um elevado grau de sofisticação, permitindo a análise de qualquer geometria arbitrária sob as mais diversas condições de carga.

Bastantes investigadores têm vindo a utilizar a modelação teórica por recurso à técnica dos elementos finitos para estudar o comportamento das alvenarias. Este método permite avaliar a influência dos diversos parâmetros que condicionam o comportamento mecânico das alvenarias.

Os primeiros estudos do comportamento das alvenarias, através do recurso a modelação pelo método dos elementos finitos, foram desenvolvidos para tijolos maciços, admitindo em geral comportamento linear, elástico e isotrópico e aderência perfeita entre os elementos e a argamassa. No caso do estudo de problemas de compressão simples ou biaxial foram adoptados modelos bidimensionais. As hipóteses adoptadas nos primeiros trabalhos são pouco realistas. O 1º estudo que se conhece com uma abordagem mais cuidada foi conduzido por PAGE e remonta aos anos 70 [131], respeitando a alvenarias de tijolos maciços carregados no seu plano. Os tijolos são assimilados a elementos rectangulares com propriedades isotrópicas e elásticas. As juntas são assimiladas a elementos de junta com comportamento não linear, integrando os fenómenos de descolamento, escorregamento e atrito.

Conhecem-se trabalhos desenvolvidos com dois níveis de discretização - micromodelação e macromodelação.

A 1ª hipótese - micromodelação - corresponde à tradução em termos de modelo, da estrutura real da alvenaria, assumindo uma discretização coincidente com a subdivisão em elementos e juntas de argamassa. Relativamente ao elemento, a não - linearidade e a consideração da fissuração podem ser tidos em conta, modificando as relações constitutivas através dum processo incremental. Relativamente às juntas de argamassa, a discretização deve ser cuidada dado ser nestas que, se inicia a propagação das fissuras. Há autores que adoptam elementos de junta ou, outros modelos,, procurando traduzir todos os fenómenos que aí ocorrem. A discretização através de micromodelação obriga a uma discretização fina, com uma malha tanto mais apertada quanto mais complexa for a geometria dos elementos, não sendo em geral possível discretizar situações reais de paredes, sem o recurso a meios muito potentes de cálculo. Esta via é assim adoptada sobretudo na investigação mais pormenorizada do comportamento das alvenarias. Sempre que os elementos apresentam geometrias complexas, a simulação deve ser efectuada a 3D.

A 2ª hipótese - macromodelação - corresponde à assimilação da alvenaria a um meio contínuo homogéneo, discretizado através de elementos finitos, cuja malha não respeita a divisão entre elementos e juntas. A lei constitutiva adoptada deve representar o comportamento conjunto da alvenaria, implicando em geral algumas simplificações. Esta técnica revela-se mais adequada para o estudo de paredes reais sob diversas condições de carga.

4.4 - PRINCIPAIS FACTORES CONDICIONANTES DO COMPORTAMENTO DAS ALVENARIAS SUJEITAS A ACÇÕES VERTICAIS

4.4.1- Generalidades

Pretende-se discutir a influência dos principais factores condicionantes do comportamento mecânico das alvenarias sujeitas a acções verticais, com destaque para as alvenarias à base de blocos de betão, preferencialmente de inertes leves. Para o efeito recorre-se a resultados de ensaios e de simulações numéricas a que se teve acesso.

A informação disponível foi obtida em condições muito diferentes. Os provetes de parede foram realizados de forma diversa e as técnicas de ensaio, que condicionam bastante os resultados, não são coincidentes. Os resultados sendo provenientes de diferentes países, resultam do recurso a elementos e argamassas muito variadas. Assim, embora se possam formular conclusões relativamente gerais, as comparações, particularmente quantitativas, deverão ser cautelosas.

Os principais factores que parece condicionarem o comportamento mecânico das alvenarias e que irão ser discutidas com mais detalhe são:

- resistência à compressão dos elementos;
- geometria interna e dimensões do elemento;
- resistência e características da argamassa;
- juntas de assentamento;
- aparelho de assentamento;
- qualidade de execução.

4.4.2 - Resistência à compressão dos elementos

A resistência à compressão dos elementos que constituem a alvenaria é provavelmente o factor que mais condiciona o comportamento mecânico das alvenarias.

a) **Obtenção da resistência à compressão dos elementos**

Como se sabe, e ao contrário de outros materiais estruturais, como o aço e o betão por exemplo, em que a obtenção das suas características mecânicas é efectuada segundo técnicas de ensaio praticamente universais, no domínio dos elementos para alvenaria é habitual adoptar procedimentos convencionais de ensaio bastante diversificados.

Assim, as técnicas de ensaio para determinação da resistência à compressão dos elementos para alvenaria apresentam diferenças sensíveis nas diferentes normalizações, variando mesmo frequentemente no mesmo país com a constituição dos elementos (cerâmica, betão, etc.). Mesmo a normalização em preparação no *CEN* relativa a técnicas de ensaio visando a uniformização a nível europeu, embora adopte a mesma metodologia para diferentes tipos de elementos, permite dois tipos diferentes de regularização dos elementos: desgaste por via húmida ou regularização com argamassa de cimento e areia ao traço 1:1 (em volume).

Como não há a garantia de que estes procedimentos convencionais não influenciam as características mecânicas, diversos investigadores têm-se debruçado sobre este assunto, procurando esclarecer a influência dos diversos factores no comportamento dos elementos quando ensaiados à compressão [132,133,134].

Os aspectos mais convencionais nas técnicas de ensaio são a forma de rectificação das faces dos blocos em contacto com os pratos da máquina, e as condições de humidade dos provetes na altura de ensaio.

Quanto à rectificação das faces dos provetes, podem ser adoptados diferentes procedimentos:

- regularização com pasta de cimento;
- regularização com argamassa de cimento e areia;
- regularização com pasta de enxofre;
- desgaste mecânico;
- interposição de placas de diferentes tipos de materiais compressíveis (cartão, aglomerados de madeira e materiais elastómeros).

Um estudo levado a cabo no *CSTB*, visando a caracterização da resistência à compressão de alvenarias realizadas com blocos de betão de diversas proveniências [135], rectificados com pasta de cimento, pasta de enxofre e argamassa de cimento e areia, permitiu concluir que :

- a regularização com pasta de enxofre conduz a tensões médias de rotura mais elevadas, enquanto a regularização com argamassa de cimento e areia conduz a tensões médias de rotura mais baixas;
- se bem que variando com o tipo de bloco, as diferenças obtidas com diferentes técnicas de regularização são da ordem dos 25%.

Esta variação dos valores da resistência mecânica com o tipo de material usado na rectificação, deve-se, fundamentalmente, às diferentes características de deformação lateral destes materiais, conduzindo normalmente os materiais menos deformáveis transversalmente a roturas para tensões de compressão mais elevadas. Este efeito está também associado à rigidez dos pratos da máquina, situação aliás que não é exclusiva das alvenarias.

Relativamente às condições de conservação, os elementos são normalmente ensaiados secos ao ar ou saturados.

A normalização em preparação no *CEN* preconiza que a tensão de rotura dos blocos de betão secos, para efeitos de cálculo, seja obtida multiplicando por 1.2 os valores correspondentes a ensaios realizados com blocos saturados. Coeficientes de correlação entre a resistência de blocos de betão secos e saturados próximos de 1.2 são referidos noutros trabalhos [97,132,136].

Um outro parâmetro, cuja influência nos resultados dos ensaios de compressão dos blocos não pode ser negligenciada, é a relação altura / espessura dos provetes, designada "*factor de forma*".

Com efeito, e em analogia com o que se passa por exemplo nos betões, os pratos da prensa exercem sobre os provetes um constrangimento que produz tensões adicionais na vizinhança dos pratos - efeito de cintagem. Existem dispositivos de ensaio que permitem atenuar este efeito [134], mas a sua aplicação não é prática em ensaios correntes. Por forma a ter em conta este efeito e permitir uniformizar resistências à compressão de elementos com diferentes relações altura / espessura, diversa normalização relativa a estruturas de alvenarias preconiza a adopção de coeficientes de correcção que corrigem as tensões de rotura resultantes do ensaio, transformando-as em tensões de rotura para cálculo.

Essas correcções apresentam valores superiores à unidade para elementos "esbeltos" e valores inferiores à unidade para elementos com baixa relação altura / espessura.

No caso da normalização *CEN* as dimensões do elemento de referência são 100 mm para a altura e espessura, ou 150 mm para a altura e 200 mm para a espessura [125], transcrevendo-se no Quadro 4.4 as correcções a adoptar segundo o mesmo documento.

Quadro 4.4 - Factor corrector multiplicativo - δ -, a aplicar à resistência à compressão dos elementos, para obtenção da resistência normalizada

ALTURA	***Factor de forma*** δ				
	Espessura mínima do elemento (mm)				
(mm)	**50**	**100**	**150**	**200**	**≥ 250**
50	0.85	0.75	0.70	-	-
65	0.95	0.85	0.75	0.70	0.65
100	1.15	1.00	0.90	0.80	0.75
150	1.30	1.20	1.10	1.00	0.95
200	1.45	1.35	1.25	1.15	1.10
≥250	1.55	1.45	1.35	1.25	1.15

Chama-se a atenção para o facto da própria forma de calcular a tensão de rotura à compressão não ser também uniforme na diferente normalização. Existem diferenças na secção do bloco a considerar e no carácter da tensão, média ou característica. Sintetiza-se no Quadro 4.5 um resumo da secção de cálculo e forma de expressão da tensão, constante de alguma normalização de referência.

Quadro 4.5 - Aspectos relativos à determinação da resistência à compressão de blocos de betão - f_b'

NORMA	Nº DE ELEMENTOS (1)	SECÇÃO DE CÁLCULO DA TENSÃO DE ROTURA	FORMA DE EXPRESSÃO DA TENSÃO DE ROTURA - f_b' (2)
FRANÇA NF P 14-304 [137]	8	- Juntas Contínuas -Secção aparente - Juntas Descontínuas - Secção comum ao bloco e à argamassa das juntas	Valor característico .
GRÃ-BRETANHA BS 6073 [138]	10	Secção aparente	
EUA ASTM C140 [139]	———	Secção aparente ou secção média efectiva de betão	Valor médio
CEN pr EN 772-1 [122]	≥10 ou 6 (se coef. var. ≤15%)	Secção aparente	Valor médio

(1) - Para efeitos de ensaios de recepção

(2) - A resistência à compressão dos elementos para alvenaria f_b', não é afectada de coeficientes correctores associados à forma dos elementos, ao contrário da resistência normalizada - f_b

b) **Influência da resistência à compressão dos elementos na resistência à compressão da alvenaria**

A resistência à compressão das alvenarias é muito condicionada pela resistência à compressão dos elementos que a constituem. Essa importância está patente no facto da generalidade dos modelos de comportamento das alvenarias fazerem depender a resistência à compressão da alvenaria da resistência dos elementos. No entanto a relação entre as duas grandezas varia sensivelmente com a geometria do elemento, orientação e percentagem de furação.

Relativamente a alvenarias realizadas com blocos de betão de inertes leves de argila expandida, não se conhecem resultados de ensaios. Dispõe-se no entanto de resultados estrangeiros relativos a blocos de betão de inertes normais, com geometrias próximas das correntes em Portugal [45,135,140] e de resultados dum trabalho de Tese efectuado no LNEC com blocos correntes em Portugal [136].

Uma primeira constatação, corroborada aliás pelas expressões do modelo simplificado de Delmotte et al [95] e mesmo pelas expressões do Eurocódigo 6 [96], é o facto da resistência da alvenaria à compressão ser sempre inferior à resistência dos blocos que a constituem. Essa resistência cresce à medida que melhora a resistência da argamassa de assentamento, embora tendendo assimptoticamente para um valor inferior a f_b (situado aproximadamente entre 0.7 e 0.9 f_b para os blocos de betão). Salienta-se no entanto que essa tendência pode não ser tão nítida no caso de alvenarias realizadas com blocos de reduzida resistência. A fig. 4.4 adaptada de Hurez [45], procura explicitar a influência mútua entre as resistências à compressão da alvenaria do bloco e da argamassa.

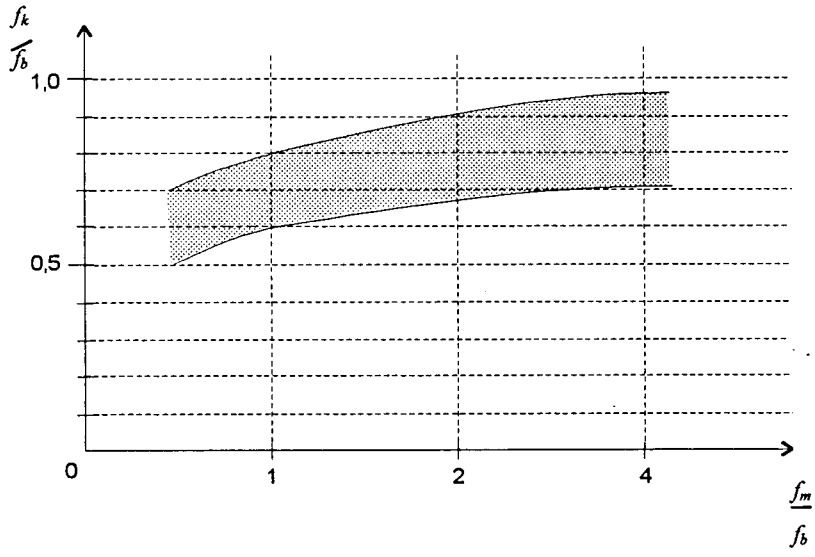


Fig. 4.4 - Relação entre as resistências à compressão da alvenaria (f_k) e da argamassa (f_m), expressas relativamente à resistência do bloco (f_b)

Uma segunda constatação tem a ver com o mecanismo de rotura da alvenaria de blocos de betão que está muito dependente da resistência e deformabilidade dos elementos e da argamassa.

Para resistências da argamassa de assentamento claramente inferiores à resistência do elemento, a rotura ocorre por punçoamento da argamassa de assentamento. À medida que a resistência da argamassa de assentamento vai aumentando, a rotura passa a ser comandada pelas tensões de tracção perpendiculares à força de compressão, suscitadas pelo impedimento à livre deformação da argamassa das juntas (vd. fig. 4.1). Para argamassas de assentamento muito resistentes, a rotura passa a ocorrer por esmagamento do material constituinte dos blocos.

Convêm ter presente que para resistências moderadas da argamassa, o mecanismo de rotura da alvenaria é diferente do mecanismo de rotura do bloco quando ensaiado isolado.

4.4.3 - Geometria interna e dimensões dos elementos

Não se conhecem muitos estudos relativos à influência da geometria interna e dimensões dos elementos e os que se conhecem não são facilmente extrapoláveis para as geometrias correntes em Portugal, já que são provenientes dos Estados Unidos e Canadá. Como se sabe nesses países e também na Grã-Bretanha, a geometria dos blocos de betão é mais simples, caracterizada em geral pela existência de 2 septos longitudinais exteriores, travados por septos transversais que definem um número limitado de furos. Normalmente os furos atravessam todo o bloco e as larguras máximas não ultrapassam os 200 mm.

Noutros países da Europa, com os quais Portugal tem mais afinidades, a geometria comporta um maior número de furos, dispostos em várias fiadas, limitadas por septos longitudinais interiores e exteriores. Por outro lado, normalmente, os blocos dispõem total ou parcialmente dum fundo cego para colocação da argamassa. Dado que estes elementos são em alguns casos usados em parede simples, a sua espessura pode ultrapassar os 200 mm e os betões usados na sua composição são normalmente menos resistentes, mas mais isolantes, que os seus homólogos da América do Norte.

a) **Percentagem de furação**

Um primeiro indicador que reflecte parcialmente a influência da geometria interna do elemento é a percentagem de furação. Este indicador é usado na normalização como base para a classificação dos elementos para alvenaria, sendo em geral a resistência à compressão da alvenaria maior, para a mesma composição do elemento, à medida que a percentagem de furação dos elementos que a constituem for menor. Directa ou indirectamente as diferentes normalizações limitam a percentagem de furação, sendo em geral esses limites inferiores, quando a alvenaria têm funções estruturais. No entanto a percentagem de furação por si só poderá não ser suficiente para explicitar toda a influência da geometria. Com efeito, é facilmente perceptível que alvenarias realizadas com blocos com a mesma constituição e percentagem de furação poderão ter desempenhos mecânicos diferentes, em função dos seguintes aspectos:

- espessura mínima dos septos, por forma a que os mesmos não rompam por encurvadura;
- desenvolvimento mínimo de septos nas duas direcções, por forma a travar convenientemente os septos dispostos ortogonalmente e a absorver os esforços de tracção provocados pela argamassa das juntas;
- forma como se sobrepõem os septos dos blocos das diferentes fiadas, se é evidente que os septos longitudinais se sobrepõem sempre, a não sobreposição dos septos transversais pode provocar esforços tangenciais importantes [141];
- no caso de blocos assentes com juntas descontínuas, rentabilização da secção segundo a qual se faz a transmissão das cargas, de forma a maximizar a relação dessa secção comparativamente à secção total do bloco.

b) **Dimensões dos elementos**

Quanto às dimensões do elemento, o comprimento e a largura parecem não ser relevantes para a mesma percentagem de furação. Relativamente à altura, a "esbelteza" do elemento condiciona a sua resistência, devendo efectuar-se as correcções par as dimensões normalizadas, de acordo com o Quadro 4.4 . O aumento da altura do elemento, traduzido por uma redução da densidade de juntas, será em geral favorável do ponto de vista mecânico.

4.4.4 - Resistência e características da argamassa

O tipo de argamassa usada na realização das juntas de assentamento condiciona diversos aspectos do desempenho das paredes, conforme já foi discutido. A importância desta influência acentua-se actualmente, na medida em que as acções de optimização das alvenarias passam normalmente pelos métodos de assentamento e configuração das juntas.

Sob um ponto de vista exclusivamente mecânico, as juntas de argamassa desempenham as seguintes funções:

- atenuam os pontos duros de contacto entre as superfícies, reduzindo a concentração de tensões e permitindo à parede adaptar-se às deformações;
- permitem corrigir, fiada a fiada, a horizontalidade e verticalidade da parede;
- contribuem durante a construção para a auto-estabilidade da parede.

Em Portugal predominam ainda as argamassas feitas em obra e com composições pouco variadas. Noutros países é vulgar a utilização de argamassas prontas ou pré-doseadas. Nestes casos existe um leque mais alargado de escolha, compreendendo argamassas para juntas correntes (10 a 12 mm), com inertes normais ou leves e argamassas para juntas delgadas (1.5 a 3 mm). A composição destas argamassas, que inclui normalmente adjuvantes, é habitualmente estabelecida de acordo com a resistência e deformabilidade pretendida.

Na avaliação dos condicionalismos ao comportamento mecânico da alvenaria associados às características mecânicas das argamassas, sobressai como dificuldade a constatação de que tais características, determinadas a partir dos ensaios correntemente usados (meios prismas obtidos do ensaio de flexão), têm fraca correlação com a resistência efectiva da junta de argamassa na alvenaria.

Diferentes autores referem esta limitação [95,142,143] chegando mesmo a sugerir técnicas de ensaio alternativas, em que se extraem provetes de argamassa de juntas de assentamento [143] ou se deduz indirectamente o comportamento da junta a partir de ensaios de provetes realizados com tijolos maciços e juntas de argamassa [142].

Embora se reconheça esta realidade, por facilidade continua-se a adoptar estes provetes porque se reconhece a diminuta influência da resistência à compressão da argamassa no comportamento da alvenaria. Esta conclusão pode ser inferida pelas expressões já referidas do modelo simplificado e do *EC6*, bem como por inúmeros trabalhos de carácter experimental e de simulação numérica que se conhecem [140,141,144,145,146].

A resistência da argamassa na alvenaria é condicionada por um conjunto de parâmetros que se procuram sintetizar na fig. 4.5 [143].

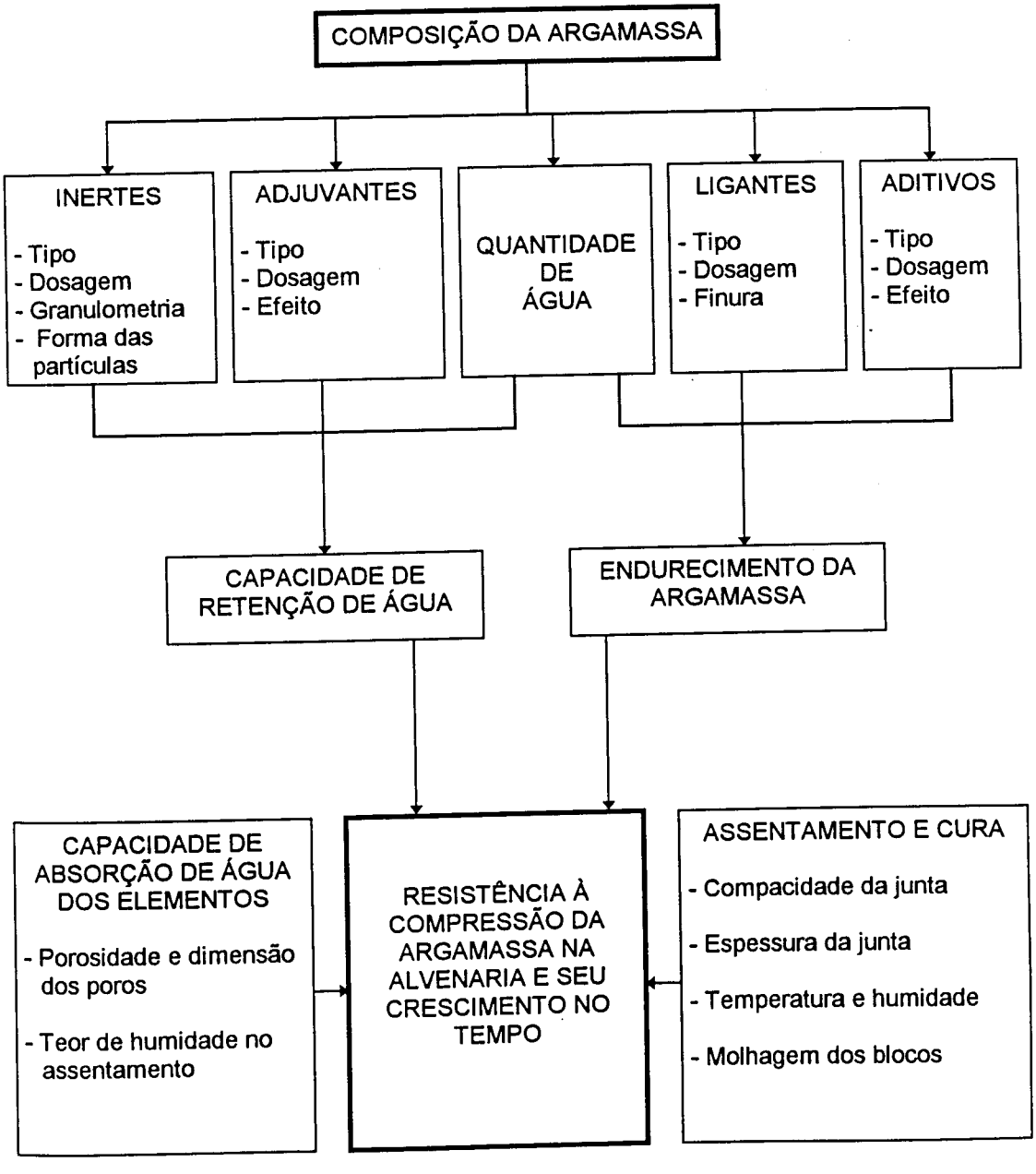


Fig 4.5 - Condicionantes da resistência à compressão da argamassa na alvenaria [143]

A influência desses parâmetros é a seguinte:

- *Quantidade de água* - relacionando-se com a consistência e a trabalhabilidade da argamassa, o seu correcto estabelecimento passa pelo conhecimento da capacidade de retenção de água que se consegue obter (dependente das características dos inertes disponíveis e adjuvantes eventualmente utilizados), e pela capacidade de absorção de água dos elementos e o seu estado de humedecimento.

- *Capacidade de absorção de água dos elementos* - ligada à porosidade e dimensão dos poros, determina a capacidade de absorção de água pelos elementos a partir da argamassa e o tempo que a mesma irá durar. Elementos com elevada capacidade de absorção deverão ser molhados, a menos que a argamassa tenha uma boa capacidade de retenção de água.

- *Capacidade de retenção de água pela argamassa* - é muito importante sobretudo quando os elementos são muito absorventes (pode ser melhorada aumentando a dosagem de partículas finas e / ou através de adjuvantes).

- *Condições ambientais* - a argamassa nos primeiros dias deverá ser protegida dado que, sobretudo no exterior, pode sofrer por condições atmosféricas perda de água necessária à sua cura.

Entre nós, e no trabalho de Tese já referido realizado no *LNEC* [136], o emprego de uma argamassa com resistência dupla de outra conduziu a um aumento da resistência da alvenaria que não ultrapassou 10%. Esta ordem de grandeza concorda com os valores constantes das referências já citadas.

Quanto à possibilidade de utilizar argamassa de inertes leves na realização das alvenarias, a sua influência na resistência final da alvenaria é semelhante à da argamassa realizada com inertes correntes. No entanto, e dada a maior deformabilidade deste tipo de argamassas, alvenarias realizadas com argamassa de inertes leves apresentam menores resistências que alvenarias realizadas com os mesmos elementos (tijolos maciços) e com argamassas de inertes correntes de igual resistência [147]. Esta diferença acentua-se à medida que cresce a resistência dos elementos.

4.4.5 - Juntas de assentamento

A influência dos aspectos intrínsecos, associados à composição e tipo de argamassa, foram discutidos em 4.4.4.

Pretende-se agora discutir a influência dos seguintes aspectos, na resistência mecânica das alvenarias:

- espessura das juntas;
- juntas horizontais contínuas / descontínuas;
- juntas verticais preenchidas / secas.

a) **Espessura das juntas**

As juntas constituem, sob o ponto de vista mecânico, um ponto fraco das alvenarias. O aumento da espessura das juntas prejudica a resistência da parede conforme tem sido verificado em inúmeros estudos experimentais realizados [145,148,149]. A título de exemplo refere-se uma caracterização experimental efectuada por DRYSDALE [145], em que a duplicação da espessura das juntas, de 9.5 mm para 19 mm, implicou uma redução da resistência à compressão da alvenaria da ordem de 16% (ensaio de prismas de blocos de betão correntes na América do Norte).

Diversos estudos numéricos apontam também no mesmo sentido [150]. A análise das expressões simplificadas de DELMOTTE et al. [95], evidencia que a resistência da alvenaria tende para a resistência do bloco quando a espessura da junta tende para zero.

Esta constatação é também traduzida pelas expressões preconizadas pelo *EC6*, que favorecem as juntas delgadas realizadas com argamassa - cola relativamente às juntas de espessura corrente.

b) **Juntas horizontais contínuas / descontínuas**

A adopção de juntas horizontais de assentamento descontínuas prejudica a resistência a acções verticais das alvenarias, comparativamente à adopção de juntas de assentamento contínuas.

A existência da referida descontinuidade vai solicitar os septos transversais em flexão, originando tensões de tracção máximas na face inferior dos mesmos septos, conforme se ilustra na fig. 4.6. Este efeito é agravado pelo facto dos septos disporem, por razões associadas à produção, de uma ligeira inclinação.

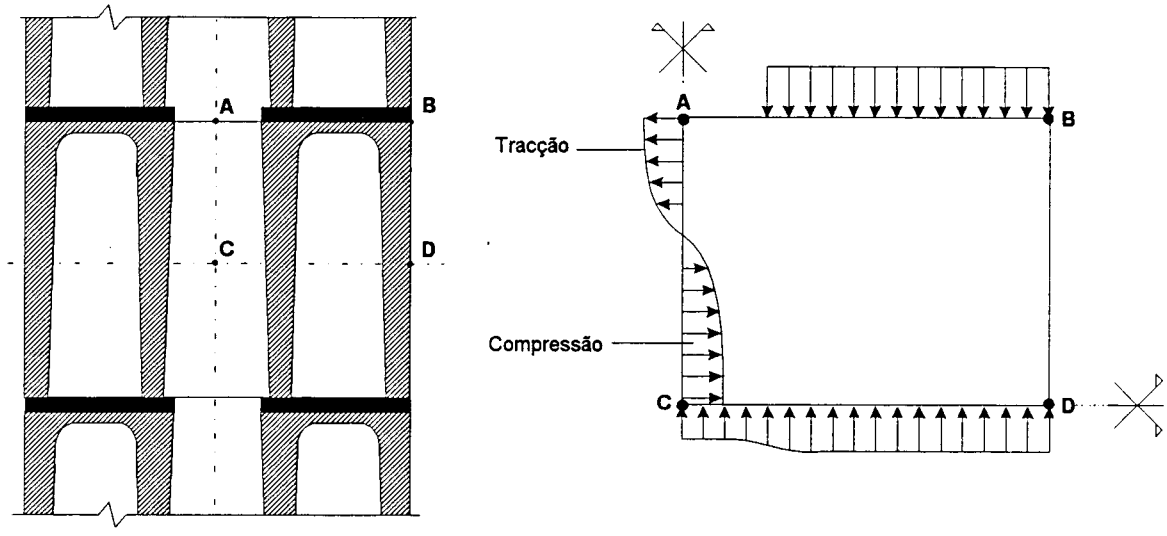


Fig 4.6 - Mecanismo de equilíbrio e tensões nos septos transversais

Este assunto tem sido estudado por diversos autores, através de modelos numéricos e modelos experimentais, mas em geral com geometrias de blocos correntes na América do Norte e no Grã-Bretanha [141,146,151].

A quantificação da importância desta disposição, está dependente da dimensão da descontinuidade e da resistência dos blocos. No entanto constata-se na generalidade dos estudos, um agravamento significativo das tensões de tracção desenvolvidas na vizinhança das juntas, muito superior à relação entre a secção argamassada e a secção aparente [141,146].

No caso da determinação da resistência das alvenarias por recurso a ensaio de "muretes", tratando-se de blocos com juntas de assentamento descontínuas, a regularização das faces em contacto com os pratos da máquina deverá ser também descontínua. A regularização em contínuo conduz nestes casos a resistências inferiores às obtidas com regularização descontínua, pois as condições de equilíbrio impõem uma maior solicitação dos septos transversais.

A regulamentação de referência, *EC6*, relativamente a alvenarias realizadas com juntas descontínuas, preconiza a utilização das expressões adoptadas para as juntas contínuas, com a condição da resistência do elemento ser determinada solicitando-o de forma descontínua.

c) **Juntas verticais preenchidas / secas**

Conforme já foi referido, por questões de economia e produtividade há um interesse crescente na supressão total ou parcial da argamassa das juntas verticais, sobretudo na Europa, onde os materiais para alvenarias têm larguras maiores e são concebidos para outras funções que não exclusivamente resistentes. Os elementos concebidos para a realização de alvenarias com juntas total ou parcialmente secas, dispõem correntemente de topos com geometria em perfis macho - fêmea.

A generalidade da informação disponível relativa a alvenarias com juntas verticais secas, aponta para uma redução pouco significativa da resistência a acções verticais, embora a resistência ao corte seja mais penalizada.

Um trabalho de Tese realizado em França [45], aponta para uma redução da resistência à compressão entre 10 a 12% por supressão total das juntas verticais. O mesmo estudo refere que a existência de dispositivos de encaixe pode melhorar a transmissão dos esforços de corte, em alvenarias com juntas verticais não argamassadas .

Esta orientação é também seguida pelo *EC6* que não penaliza a resistência vertical das alvenarias por supressão da argamassa das juntas verticais de assentamento, mas em termos de resistência ao corte a penalização é da ordem dos 40%.

4.4.6 - Aparelho de assentamento e qualidade de execução

O aparelho de assentamento tem importância no comportamento mecânico das alvenarias. Na bibliografia de referência americana não há muitos estudos sobre este assunto, já que a alvenaria é normalmente assente com argamassagem das juntas longitudinais e os ensaios são realizados sobre prismas sem juntas verticais, obtidos pela simples justaposição de vários elementos, de acordo com o preconizado na especificação americana ASTM E 447-84 [152] fig. 4.7.

Este tipo de provete, designado na terminologia norte americana por "*stack bond*", não traduz a influência do aparelho de assentamento e das juntas verticais, sendo os resultados em geral superiores aos obtidos com "*muretes*" que traduzem as condições reais de assentamento, designados na terminologia norte americana por "*run bond*".

Esta conclusão foi obtida na caracterização experimental efectuada no *LNEC* e já referida [136], bem como em trabalhos de simulação numérica [141]. Neste último trabalho mostra-se que a forma como os septos transversais se dispõem influencia as tensões axiais e tangenciais ao longo do provete, reduzindo-se ambas, especialmente as tensões tangenciais, caso a geometria dos blocos possibilite uma sobreposição total dos septos entre fiadas sucessivas.

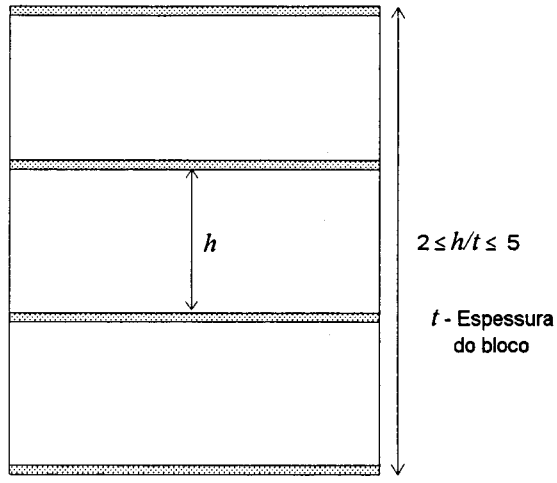


Fig 4.7 - Provete para ensaio de alvenaria à compressão
segundo ASTM E 447-84 "*stack bond*"

A qualidade de execução tem um efeito relevante sobre o comportamento mecânico das alvenarias, mas muito difícil de parametrizar. Os aspectos associados à qualidade de execução das juntas, traduzidos no seu correcto preenchimento, numa boa compacidade e aderência da argamassa aos blocos são determinantes. A correcta execução da parede, com um aparelho regular e sem desvios de verticalidade é também importante.

Não se conhecem muitas referências que quantifiquem a importância deste parâmetro. Numa campanha de caracterização mecânica, sob acções verticais, de alvenarias de blocos realizada no *CSTB* na década de 70 [140], a acumulação de diferentes tipos de defeitos construtivos (desaprumo, elementos mal assentes, etc.), conduziu a uma redução de capacidade resistente da parede de cerca de 50%.

Os documentos de carácter regulamentar contemplam também a influência deste parâmetro. No caso do *EC6* a qualidade de execução influencia os coeficientes parciais de segurança relativos aos materiais, conforme se explicita no Quadro 4.6. Os requisitos relativos à definição da categoria associada ao controlo de qualidade na produção dos elementos, foram sintetizados no Quadro 4.2.

Quadro 4.6 - Coeficientes parciais de segurança relativos às propriedades dos materiais, segundo *EC6*

Controlo de qualidade na produção dos elementos	**Controlo da qualidade de construção**		
	CATEGORIA		
CATEGORIA	**A**	**B**	**C**
I	1.7 *	2.2 *	2.7 *
II	2.0 *	2.5 *	3.0*

* - valores indicativos, podendo os estados membros especificar outros valores

As condições requeridas pelo *EC 6* para inclusão nas diferentes categorias de controlo de qualidade na construção, são:

- Categoria A
  - realização por pessoal qualificado e experiente;
  - inspecção regular dos trabalhos por entidade independente;
  - estudo de composição da argamassa de assentamento ou conhecimento prévio da mesma, por forma a garantir-se que a resistência pretendida é alcançada;
  - ensaios regulares da argamassa;
  - produção da argamassa através de meios mecânicos, com doseamento ponderal dos constituintes, sendo o doseamento volumétrico permitido apenas se existirem recipientes que permitam uma medição precisa.

- Categoria B
  - realização por pessoal qualificado e experiente;
  - estudo de composição da argamassa de assentamento ou conhecimento prévio da mesma, por forma a garantir-se que a resistência pretendida é alcançada;
  - ensaios com periodicidade não estabelecida da argamassa de assentamento;
  - produção da argamassa através de meios mecânicos, com doseamento ponderal dos constituintes, sendo o doseamento volumétrico permitido apenas se existirem recipientes que permitam uma medição precisa.

- Categoria C
  - realização por pessoal qualificado e experiente.

CAPÍTULO 5

BLOCOS DE BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA - CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR

CAPÍTULO 5

BLOCOS DE BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA - CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR

ÍNDICE

(resumido)

5.1 - INTRODUÇÃO
5.2 - GENERALIDADES SOBRE BETÕES LEVES
- 5.2.1 - Definição de betão leve
- 5.2.2 - Classificação dos inertes quanto à massa volúmica
- 5.2.3 - Terminologia associada aos betões leves
- 5.2.4 - Técnicas de obtenção dos diferentes betões leves
- 5.2.5 - Resenha histórica da utilização de betões leves e perspectivas actuais[159,167]

5.3 - O INERTE LEVE ARGILA EXPANDIDA
- 5.3.1 - Descrição do processo de fabrico da argila expandida
- 5.3.2 - Principais propriedades da argila expandida

5.4 - COMPOSIÇÃO, FABRICO, COLOCAÇÃO E CURA DOS BETÕES DE ARGILA EXPANDIDA
- 5.4.1 - Composição
- 5.4.2 - Fabrico
- 5.4.3 - Transporte, colocação e compactação
- 5.4.4 - Cura

5.5 - PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA
- 5.5.1 - Introdução
- 5.5.2 - Massa volúmica
- 5.5.3 - Resistência à compressão
- 5.5.4 - Resistência à tracção
- 5.5.5 - Características elásticas
- 5.5.6 - Variações dimensionais
- 5.5.7 - Características térmicas
- 5.5.8 - Outras características

5.6 - PARTICULARIDADES DOS BETÕES DE ARGILA EXPANDIDA PARA FABRICO DE BLOCOS PARA ALVENARIA
- 5.6.1 - Composição e fabrico
- 5.6.2 - Cura
- 5.6.3 - Variações dimensionais

5.7 - CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DE UM BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA USADO NA REALIZAÇÃO DE BLOCOS
- 5.7.1 - Composição, fabrico e cura
- 5.7.2 - Caracterização do betão
- 5.7.3 - Apreciação dos resultados

5.8 - PRINCIPAIS EXIGÊNCIAS NORMATIVAS APLICÁVEIS A BLOCOS DE BETÃO DE INERTES LEVES
- 5.8.1 - Generalidades
- 5.8.2 - Exigências normativas relativas a blocos de betão de inertes leves

CAPÍTULO 5

BLOCOS DE BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA - CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR

5.1 - INTRODUÇÃO

Os betões leves são betões de massa volúmica inferior à dos betões normais, conseguida pela utilização de inertes leves ou pela criação de uma estrutura celular.

Nos betões leves, comparativamente aos betões normais, sobressaem como aspectos positivos a diminuição da massa da construção, a melhoria do isolamento térmico e da resistência ao fogo.

Como aspectos negativos sobressaem as variações dimensionais, a menor resistência mecânica, eventualmente o maior preço de alguns tipos de inertes e a maior dificuldade em dispor de caracterizações e procedimentos de dimensionamento.

Embora os betões de inertes leves sejam utilizados desde a antiguidade, sabe-se que os romanos utilizavam a pedra-pomes como inerte [153, 154], o desenvolvimento efectivo dos mesmos apenas se generalizou após a 2ª Guerra Mundial.

Neste Capítulo, a seguir à apresentação geral dos betões leves, dedica-se especial atenção ao inerte argila expandida. Aborda-se o processo de fabrico e propriedades da argila expandida, do betão leve produzido a partir da mesma e respectivas características, com destaque para os betões destinados ao fabrico de blocos para alvenaria.

Visando a utilização desses resultados, no desenvolvimento do trabalho apresentam-se e apreciam-se os resultados de uma caracterização experimental, incidindo sobre betão de argila expandida usado na realização de blocos para alvenaria.

Por último referem-se as exigências normativas relativas a blocos de betão de inertes leves.

5.2 - GENERALIDADES SOBRE BETÕES LEVES

5.2.1 - Definição de betão leve

Os betões leves diferenciam-se dos betões correntes sobretudo pela sua massa volúmica e condutibilidade térmica que são inferiores às destes.

A classificação funcional dos betões leves mais generalizada é a proposta pela *RILEM* [155] que se transcreve no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Classificação dos betões leves segundo a recomendação *RILEM* [155]

CLASSE FUNCIONAL	I	II	III
Tipo de betão leve	**Betão estrutural**	**Betão estrutural e de isolamento térmico**	**Betão de isolamento térmico**
Massa volúmica seca (kg/m^3)	< 2000	Não estabelecida	Não estabelecida
Resistência à compressão (MPa)	> 15.0	> 3.5	> 0.5
Coeficiente de condutibilidade térmica (W/(m.°C))	-	< 0.75	< 0.3

O limite máximo da massa volúmica dos betões leves de 2000 kg/m^3 [155,156,157,158] não é genericamente adoptado, sendo frequente a limitação do valor máximo da massa volúmica destes betões a valores mais baixos, de cerca de 1800 kg/ m^3 [159,160,161,162].

5.2.2 - Classificação dos inertes quanto à massa volúmica

Embora os inertes possam ser classificados segundo diferentes pontos de vista, segundo alguns autores [159,163,164] a classificação mais prática é a associada à massa volúmica, propondo-se a classificação constante do Quadro 5.2.

Segundo uma Recomendação *RILEM* relativa a terminologia e definições de betões leves [165], são considerados inertes leves aqueles cuja massa volúmica aparente (inerte seco e não compactado), é inferior a 1200 kg/ m^3 para a fracção fina[1] e 1000 kg/m^3 para a fracção grossa[1] do inerte.

[1] Considera-se fracção fina dum inerte a parcela do mesmo cuja máxima dimensão não excede 4.75 mm, sendo a fracção grossa a complementar [166]

Quadro 5.2 - Classificação dos inertes quanto à massa volúmica e principais aplicações do betão com ele fabricado [159]

Classificação do inerte	Massa volúmica (kg/m^3)	Exemplos de inertes	Aplicação do betão
Ultraleve	< 300	. Poliestireno expandido . Vermiculite expandida . Perlite expandida . Vidro celular	Funções predominantemente de isolamento térmico, sem função estrutural
Leve	300 a 1200 (areia) 300 a 950 (inerte grosso)	. Argila expandida . Xisto expandido . Escória de alto forno expandida . Cinzas volantes sinterizadas . Pedra-pomes	Funções de isolamento térmico, estrutural e redução do peso
Denso (normal)	1200 (areia) ou 950 a1700 (inerte grosso)	. Areia . Godo . Rocha britada	Funções estruturais
Extradenso	> 1700	. Limonite . Magnetite . Barita	Funções de protecção contra as radiações e estruturais

A definição de inertes leves apresentada, abrange uma vasta gama de materiais de características bastante diversas quanto à origem, forma, dimensões, estrutura porosa e textura superficial das partículas, bem como no que se refere à sua massa volúmica, resistência, deformabilidade e absorção de água.

As características dos inertes leves influenciam propriedades importantes dos betões com eles fabricados (nomeadamente trabalhabilidade, massa volúmica, resistência, módulo de elasticidade, retracção, fluência e condutibilidade térmica), existindo assim inertes leves com menores ou maiores vocações para aplicações específicas.

5.2.3 - Terminologia associada aos betões leves

A terminologia e definições correntes associadas ao betão leve são as propostas pela *RILEM* [165], que considera os pontos de vista que se transcrevem no Quadro 5.3 .

Quadro 5.3 - Terminologia e classificação *RILEM* para betões leves [165]

Tipos de betões leves [1]	Betão compacto de inertes leves Betão semi-cavernoso Betão cavernoso Betão celular obtido por reacção química Betão celular obtido por acção física
Tipos de ligantes	Cimento Cal Mistura de cimento e cal Gesso Ligantes orgânicos
Tipos de inertes para betão leve [1]	Materiais naturais não preparados[1] . Pedra-pomes . Escórias e tufos vulcânicos Materiais naturais preparados[1] . Vermiculite esfoliada . Perlite expandida . Argila expandida ou sinterizada . Xisto expandido ou sinterizado Desperdícios industriais não preparados[1] . Escória de alto forno . Cinzas volantes Desperdícios industriais preparados[1] . Escória de alto forno expandida . Cinzas volantes expandidas . Vidro expandido Materiais orgânicos[1] . Granulado de cortiça
Tipos de cura	Cura a temperatura e pressão normais Cura a temperatura elevada e pressão normal Cura a temperatura e pressão elevada (em autoclave) Métodos combinados de cura

1 A enumeração dos diferentes exemplos de inertes em cada classe encontra-se reduzida relativamente à recomendação *RILEM*

5.2.4 - Técnicas de obtenção dos diferentes betões leves

Relativamente aos tipos de betões leves constantes da classificação apresentada em 5.2.3, refere-se seguidamente de forma sucinta a forma como esses betões são produzidos sob o ponto de vista tecnológico e quais os principais objectivos da sua utilização [165,167]:

- *Betão compacto* - betão tradicional, no qual os inertes normais foram substituídos total ou parcialmente por inertes leves. A vocação destes betões poderá ser qualquer uma das classes funcionais já referidas: estrutural, estrutural -isolante e isolante.

- *Betão semi-cavernoso* - betão cuja leveza resulta em primeiro lugar da retenção de ar entre os grãos por efeito de uma compactação deliberadamente limitada. A utilização destes betões visa a melhoria do isolamento, bem como uma economia conseguida pelo maior rendimento destes.

- *Betão cavernoso* - betão constituído por um esqueleto de inertes, leves ou não, sensivelmente com a mesma dimensão e uma pasta de ligante assegurando o envolvimento e ligação destes elementos entre si. São assim betões em que se suprimiram todos os finos e o ligante se limita a envolver os inertes grossos e a ligá-los, resultando um volume significativo de vazios. Este betão é também designado por betão sem finos ("*no fines concrete*", na terminologia inglesa).
Os betões cavernosos podem ser utilizados em aplicações isolante ou estrutural-isolante. A sua utilização visa o aligeiramento e a melhoria do isolamento térmico, a par de uma economia significativa, conseguida pela supressão do inerte fino e pela redução do consumo de ligante. Estes betões desenvolveram-se sobretudo a seguir à 2ª Guerra Mundial, na Europa, dada a penúria de materiais de construção.

- *Betão celular obtido por reacção química* - betão constituído por uma pasta de areia siliciosa e ligante mineral na qual se originam pequenas bolhas (diâmetro aproximadamente de 1 mm), por adição de um produto químico gerador de gás na massa, durante a fase líquida ou plástica, funcionando como uma levedura. A produção destes betões pode ser complementada por uma autoclavagem que permite uma nítida melhoria das características do material por reacção sílico-calcária. A percentagem de ar contido é significativa. Estes betões são diferentes dos betões correntes com ar introduzido, onde a dimensão das bolhas de ar é muito menor e o volume global das mesmas também. Em sentido estrito, os betões celulares estão mais próximos das argamassas do que dos betões, dado não existirem inertes grossos. O objectivo principal destes betões é o isolamento térmico, tendo-se desenvolvido inicialmente nos países do Norte da Europa.

- *Betão celular obtido por acção física* - betão de constituição análoga ao anterior, mas onde a estrutura porosa é produzida pela introdução de bolhas de ar microscópicas, ou por acção de substâncias "espumantes" adicionadas à mistura (detergentes, sabões, resinas especiais). Estas bolhas ficam retidas durante a presa duma forma uniforme. Tratam-se, como no caso dos betões anteriores, mais de argamassas do que de betões e as suas vocações são análogas às dos betões anteriores.

5.2.5 - Resenha histórica e perspectivas actuais da utilização de betões leves [159,167]

É preciso recuar bastante no tempo para encontrar as primeiras realizações em betões leves. Com efeito, para além de realizações na Antiguidade já referidas, uma das primeiras aplicações foi a construção de barcos durante a 1ª Guerra Mundial, cujo comportamento se revelou satisfatório.

Os betões à base de inertes naturais, como a pedra-pomes e a pozolana, por exemplo, embora tenham sido objecto de ensaios antes de 1920 só começaram a ter utilização a partir dos anos 50, na Europa, Estados Unidos e ex-URSS.

Os betões leves à base de inertes artificiais apareceram por volta dos anos 20. Embora a descoberta da argila expandida tenha ocorrido em 1885, só em 1918 o americano Hayde desenvolveu um procedimento de expansão e cozedura da argila em forno rotativo, cujo princípio de funcionamento é similar ao actualmente utilizado. A produção comercial começou aproximadamente em 1928.
A utilização destes betões desenvolveu-se rapidamente nos Estados Unidos e também na ex-URSS, com destaque para a utilização estrutural na realização de edifícios, pontes e mesmo barcos, muito antes da utilização generalizada na Europa Ocidental. Para este facto terá contribuído a carência de inertes normais naturais em vastas zonas desses países, pelo que tiveram necessidade de desenvolver produções de inertes artificiais para ultrapassar esta carência. Na Europa Ocidental o desenvolvimento destes inertes só ocorreu após a 2ª Guerra Mundial, sendo nos anos 60 que se generalizaram as fábricas produtoras em grande parte dos países, bem como algumas utilizações estruturais e obras menos correntes.

Os betões celulares, cujas primeiras patentes ocorreram na Suécia e Dinamarca nos anos 20 e 30, só se desenvolveram a partir de 1945, nos países do Norte da Europa e ex-URSS. Na década de 70 a produção destes betões, sobretudo do betão celular autoclavado, generalizou-se um pouco por todo o mundo, embora nos Estados Unidos e Canadá nunca tenha tido expressão.

Apesar de actualmente os betões leves poderem ser utilizados em grande parte dos domínios dos betões normais, verifica-se que em muitos países o consumo de inertes leves é pouco significativo e orienta-se sobretudo para a produção de artefactos de betão (blocos de betão para alvenaria, blocos de cofragem para pavimentos, divisórias, painéis pré-fabricados, etc.). Entretanto, com a dificuldade em explorar inertes naturais, por questões de esgotamento de recursos e por problemas ecológicos, presume-se que os inertes leves venham a ter maior utilização, sobretudo em betões estruturais, havendo para o efeito algum enquadramento orientador [156,162].

Em Portugal o consumo de inertes leves é pouco significativo. Os inertes mais utilizados têm sido a argila expandida, na sequência da instalação no país em 1970, de uma unidade fabril - *ARGILEX*, e,

em menor escala, as escórias vulcânicas, usadas apenas nos Açores, onde ocorrem naturalmente. Estes inertes têm sido utilizados sobretudo no fabrico de artefactos de betão, como blocos de betão para alvenaria e blocos de cofragem para pavimentos.

Com a paralisação da actividade da empresa produtora de inertes de argila expandida no nosso país durante alguns anos, assistiu-se a uma acentuada diminuição do seu consumo, com importação de material de Espanha, bem como à utilização de outros produtos, particularmente em enchimentos e isolamento térmico de coberturas. As outras soluções utilizadas foram sobretudo o emprego de granulado de cortiça mineralizada e a utilização de betão celular emulsionado por acção física. A partir de 1990 a unidade fabril produtora de argila expandida retomou a produção integrada no grupo norueguês "*AKER EXCLAY*", sob a designação de *LECA PORTUGAL*.

O betão celular autoclavado, destinado à produção de blocos para alvenaria, foi produzido em Portugal numa fábrica que iniciou a produção em 1971 e paralisou em 1983 ; esta unidade retomou a produção em 1988 integrada no grupo *YTONG*.

Não se tem conhecimento entre nós da utilização de betões leves com fins estruturais, embora a primeira produção de argila expandida tivesse intenção de produzir um inerte designado por " *LECA DURA*" com esse objectivo, tendo sido efectuados pelo *LNEC* estudos nesse domínio [168,169].

5.3 - O INERTE LEVE ARGILA EXPANDIDA

5.3.1 - Descrição do processo de fabrico da argila expandida

5.3.1.1 - Sequência do processo de fabrico

No processo de fabrico dos inertes leves de argila expandida os procedimentos adoptados dependem, segundo ALBENQUE et al. [170], dos seguintes aspectos:

- matérias-primas utilizadas;
- modo de preparação (via seca, semi-seca ou húmida);
- sistema de cozedura, compreendendo a secagem, cozedura / expansão e arrefecimento, que pode ser realizado de diferentes formas.

Todavia, todos os sistemas assentam nos mesmos princípios:

- necessidade de conformar os grãos antes da cozedura;
- assegurar a eliminação da água de modelação de forma suficientemente lenta, para evitar a explosão dos grãos durante a cozedura;

- provocar um aquecimento rápido no fim da cozedura, para que a superfície dos grãos possa tornar-se estanque, com uma película dura e resistente, sem que os grãos se aglomerem.

Estes princípios comuns conduzem a um processo de cozedura em que o produto tem que estar em movimento, à semelhança do que se verifica na produção do clinquer do cimento .

O processo global pode ser esquematizado de acordo com o indicado na fig. 5.1.

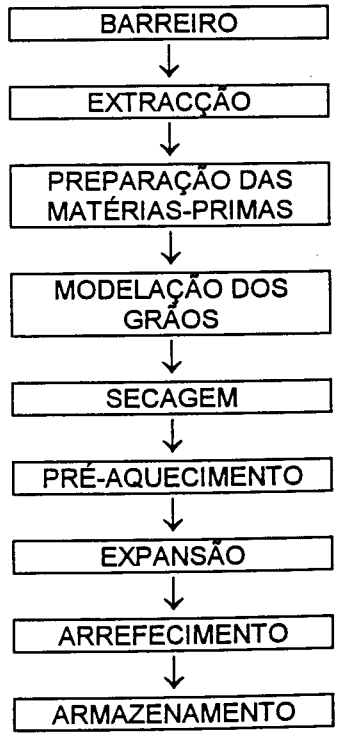


Fig. 5.1 - Esquema geral de fabrico dos inertes de argila expandida [170]

5.3.1.2 - Matéria-prima e sua aptidão para a expansão

O fabrico dos grãos de argila expandida requer uma argila expansiva. Esta expansão pode ser ajudada artificialmente misturando à argila pirite, hematite, dolomite, calcite, carvão ou combustíveis líquidos em pequena percentagem como fuel-oil, nafta, etc. [167].

A expansão das argilas é um fenómeno complexo em que numerosos factores actuam simultaneamente, o que torna a compreensão das influências respectivas mais difícil. A expansão tem origem numa libertação gasosa no seio da matéria mais ou menos viscosa, após a ocorrência de uma série de reacções químicas provocadas por um aumento importante de temperatura. Os gases que provocam a expansão são o monóxido e dióxido de carbono, dióxido e trióxido de enxofre. As

pequenas cavidades, mais ou menos esféricas, que se formam na argila no estado viscoso, originam assim a estrutura celular do material. Os factores principais influenciando a expansão parecem ser a viscosidade, a tensão superficial da massa em vias de fusão e a libertação de produtos gasosos no interior desta massa.

As condições requeridas pela expansão são:

- presença, em quantidade suficiente na argila, de constituintes minerais ou orgânicos susceptíveis de provocar libertações gasosas à temperatura de fusão;

- formação, a uma temperatura determinada, de uma fase de fusão cuja viscosidade seja suficientemente elevada, para poder aprisionar os gases que se libertam.

É assim necessário que exista um certo sincronismo entre os fenómenos piroplásticos de fusão da argila e a aparição das libertações gasosas. Por outro lado a vitrificação da superfície exterior do grão deve ser suficiente, para que esta película seja bem fechada e o mais possível isenta de poros.

A partir do referido anteriormente é facilmente perceptível que nem todas as argilas são susceptíveis de expansão por acção do calor, pelo que as composições químicas, mineralógicas e granulométricas das argilas deverão satisfazer a determinadas exigências. É possível, através de ensaios laboratoriais, avaliar a aptidão de uma argila para se expandir. Segundo [170], estes ensaios podem ser de dois tipos:

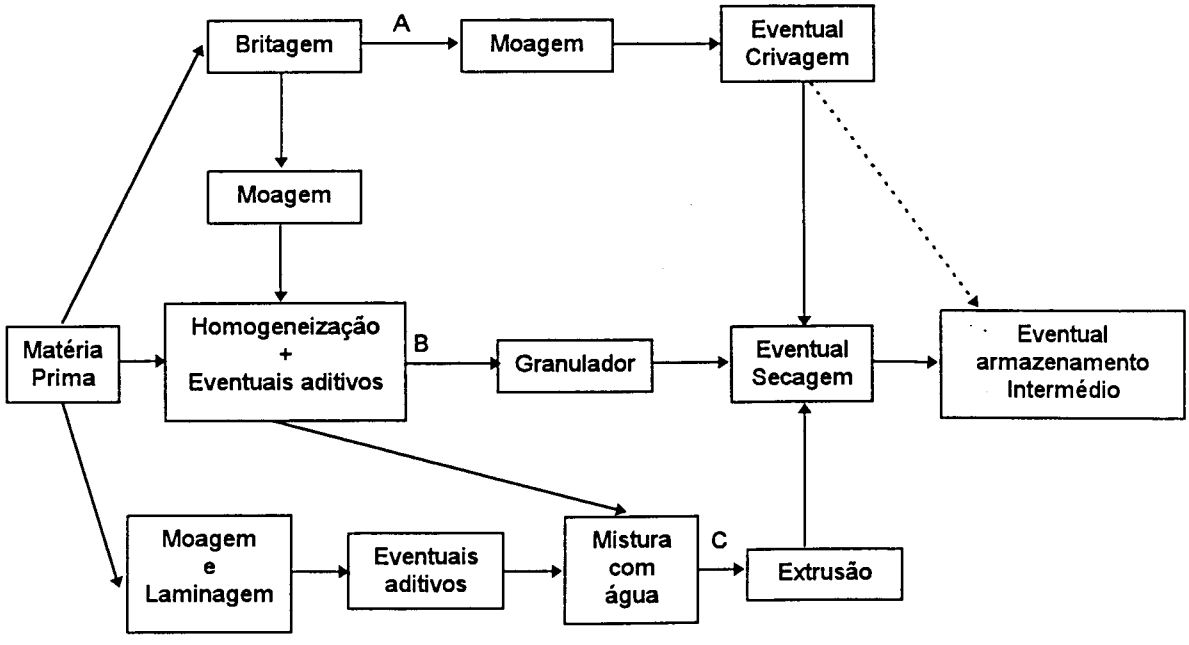
- ensaios rápidos de primeira selecção;
- ensaios de cozedura em forno estático e rotativo.

Os ensaios rápidos consistem na determinação da evolução da resistência eléctrica de grãos de argila, em função da elevação da temperatura de cozedura. Quanto mais fraca for a viscosidade, mais o mineral argiloso é deformável e mais reduzida é a sua resistência eléctrica. A curva de variação da resistência eléctrica com a temperatura permite assim avaliar a aptidão da argila à expansão.

Os ensaios de cozedura em forno estático e rotativo permitem definir a temperatura de cozedura óptima, influência das condições de cozedura, temperatura e velocidade de subida, sobre as características de massa volúmica e resistência dos grãos. A cozedura em forno rotativo permite avaliar a eventual tendência dos grãos à colagem.

5.3.1.3 - Preparação da matéria-prima

A extracção das argilas é efectuada no barreiro, por procedimentos análogos aos utilizados na indústria cerâmica. Após a extracção, as matérias-primas são transportadas para a fábrica e armazenadas. Seguidamente tem início a preparação antes do tratamento térmico, que consiste na transformação do material bruto em grãos calibrados. Esta transformação pode ser efectuada por um dos três processos seguintes: via seca, via semi-húmida e via húmida. A escolha entre os diversos procedimentos depende de diversos factores. Sintetiza-se na fig.5.2, extraída de [170], o esquema das fases constituintes dos 3 processos.



A - Via seca

B - Via semi - húmida

C - Via húmida

Fig. 5.2 - Fases de preparação da matéria-prima segundo diferentes processos [170]

Em qualquer dos processos é necessário eliminar os corpos estranhos (pedras, etc.) e metálicos.

No processo por via seca a preparação resume-se a uma britagem e moagem de matéria-prima que exclui a possibilidade de eventuais correcções através de aditivos. Só pode ser aplicada a matérias-primas homogéneas e naturalmente expansivas.

O procedimento por via semi-húmida convém a matérias-primas pulverulentas homogéneas. As eventuais correcções podem ser efectuadas por incorporação de agentes expansivos na matéria-prima, ou simplesmente uma parte do combustível necessária ao tratamento térmico posterior. A

moldagem dos grãos é conseguida através da adição de água à argila moída (humidade de 10% aproximadamente). O princípio de funcionamento consiste na aglomeração espontânea do pó, na presença de uma ligeira quantidade de água (em geral menos de 10%), no interior de um tambor circular de fundo plano em rotação contínua.

A granulação por via húmida passa inicialmente pela preparação de uma pasta plástica homogénea, na qual são eventualmente incorporados os aditivos necessários à expansão. As técnicas e o equipamento utilizado na preparação desta pasta são idênticos aos utilizados na indústria do barro vermelho. Os procedimentos de formação dos grãos podem ser de vários tipos:

- extrusão de uma pasta húmida (20 a 25% de humidade), para formar pequenos nódulos cilíndricos cortados a fio após a saída da fieira - "peletes";
- prensagem de uma pasta húmida (18 a 20% de humidade), numa máquina de moldagem horizontal;
- fragmentação de uma pasta húmida por cadeias dispostas no tubo secador.

5.3.1.4 - Cozedura

A cozedura comporta diversas fases:

- secagem até cerca de 600 °C;
- pré-aquecimento entre 900 e 950 °C;
- expansão entre 1200 e 1300 °C;
- arrefecimento.

Estas operações podem ocorrer num único ou em vários fornos. Existem diferentes tipos de fornos que, conjuntamente com os processos de preparação da matéria-prima, caracterizam as diferentes fábricas.

O sistema mais corrente é o forno rotativo. De forma sucinta, trata-se de um tubo de eixo ligeiramente inclinado relativamente à horizontal, em que o produto é carregado superiormente progredindo por gravidade. O calor é fornecido pelas paredes e pelos fumos que percorrem o forno em sentido ascendente. Inicialmente os fornos eram monotubo, análogos aos das cimenteiras, e foram evoluindo para fornos em várias partes (duas ou três), em linha ou cascata, rodando a velocidades iguais ou diferentes.

As principais vantagens e inconvenientes deste processo de cozedura são as seguintes:

- Vantagens:
  - fabrico de grãos de forma relativamente esférica;

- utilização simples;
- possibilidade de recuperação de calor;
- controlo em geral fácil dos fenómenos de expansão;
- possibilidade de fabrico de grãos de massas volúmicas diferentes .

- Inconvenientes:
  - os fornos monotubo são muito longos;
  - os fornos coaxiais, em duas ou três partes, põem problemas de estanquidade;
  - os fornos em cascata requerem equipamento mais delicado e estão mais sujeitos a avarias.

Um sistema menos utilizado é o da grelha móvel. Trata-se de um transportador com grelha em aço especial, através da qual o ar pode circular. Sobre esta grelha são colocados os materiais a expandir numa espessura de cerca de 300 mm. O tapete avança para o forno no qual os queimadores verticais cozem os materiais à medida do seu avanço. Para uma boa cozedura é necessário uma aspiração potente dos gases sobre a grelha. O produto cozido apresenta-se sob uma forma rígida e ininterrupta, necessitando posteriormente de ser britado.

As principais vantagens e desvantagens deste processo de cozedura são as seguintes [171] :

- Vantagens:
  - instalações económicas;
  - técnica válida para diversos materiais;
  - possibilidade de paragens sem inconvenientes.

- Desvantagens:
  - perdas de calor importantes;
  - produto acabado obtido por britagem de forma irregular;
  - velocidade de avanço do tapete de determinação delicada .

5.3.2 - Principais propriedades da argila expandida

Os inertes leves apresentam características específicas diferentes das dos inertes normais. Essas características influenciam as propriedades dos betões leves. No caso da argila expandida as propriedades mais importantes, eventualmente com correspondência em exigências normativas, são as que se passam a descrever [156,160,170]:

a) **Características geométricas**

Forma dos grãos - Está associada ao processo de fabrico. No caso dos materiais produzidos em forno rotativo apresentam forma arredondada, aproximadamente esférica. A forma dos grãos influencia relativamente pouco a resistência, já que a rotura se dá pelos grãos antes da aderência entre a matriz e o inerte ter sido atingida. O betão produzido a partir dos grãos arredondados, comparativamente aos grãos angulares, requer menos água para a mesma trabalhabilidade, e a quantidade de pasta que penetra nos poros é menor. Todavia com os grãos arredondados há um risco maior de segregação dos constituintes.

Classes granulométricas - As classes granulométricas disponíveis são normalmente bastante alargadas. As classes granulométricas utilizadas estão associadas ao tipo de betão pretendido. O emprego de inertes de maiores dimensões conduz em geral à diminuição da massa volúmica, diminuição da condutibilidade térmica e menores resistências mecânicas. Normalmente os processos de fabrico produzem relativamente poucos finos, resultando os mesmos ou da abrasão dos grãos ou da britagem de grossos.

Grãos partidos[1] - O processo de fabrico conduz em geral a uma percentagem de grãos partidos não desprezável. Atendendo ao seu efeito negativo sobre algumas propriedades destes betões deve procurar limitar-se. Esta preocupação é expressa, em geral, em documentos normativos relativos a estes inertes, pelo estabelecimento de limites superiores para esta característica. Em alguns casos os valores das exigências são diferentes com o tipo de utilização do betão [172] .

b) **Características físicas**

Aspecto da superfície e textura - Influenciam as propriedades do betão de forma análoga à descrita na forma dos grãos.

Massa volúmica aparente seca - É habitualmente utilizada como indicador da aptidão do inerte para determinadas aplicações (vd. Quadro 5.2). É função da massa volúmica real do inerte, sua forma e granulometria.

Massa volúmica aparente húmida - É importante como indicador da humidade contida nos inertes. A humidade tem repercussões no empolamento dos inertes e influencia o correcto estabelecimento da composição do betão.

[1] Um grão é considerado partido se a percentagem da sua superfície exterior, deixando aparecer a sua estrutura, ultrapassa 20% [172].

Massa volúmica real - Expressa a relação entre a massa seca do provete e o volume ocupado pelos grãos sólidos, compreendendo os vazios constituintes dos mesmos. Depende da massa volúmica absoluta da matéria, do teor em vazios e da dimensão dos grãos, pois normalmente as classes granulométricas maiores sofreram maiores expansões e apresentam portanto menores massas volúmicas.

Massa volúmica absoluta da matéria - Expressa a relação entre a massa seca do provete e o volume ocupado pela parte sólida dos grãos, descontando os vazios. É diferente conforme as origens do material, mas varia pouco. Tem um interesse limitado.

Percentagem total de vazios dos grãos - É maior que nos inertes normais; globalmente atinge 50 a 75%, representando a porosidade fechada uma parcela relativamente reduzida destes vazios (5 a 20%). A quantidade e a dimensão dos poros influenciam a velocidade de absorção de água pelo material [160].

Absorção de água - Devido à sua estrutura porosa, os inertes leves têm uma capacidade de absorção de água superior à dos inertes normais.

A absorção da água influencia a trabalhabilidade do betão fresco, bem como propriedades importantes do betão endurecido (resistência, massa volúmica, retracção, etc.). A trabalhabilidade destes betões varia de forma mais acentuada do que nos betões normais, sendo a quantidade de água absorvida pelos grãos desde o início da mistura até ao fim da compactação fundamental e fortemente condicionante do prazo de colocação em obra.

A saturação completa da argila expandida por imersão requer um tempo bastante longo, embora ao fim de 48 horas já tenha ocorrido uma parcela significativa da absorção total.

O conhecimento da capacidade de absorção de água dos grãos é importante e normalmente limitado na normalização, pois pode ter efeitos nefastos nas propriedades do betão endurecido. Assim, um teor em água elevado nos poros do grão, potencia o aumento das tensões internas por retracção não uniforme no processo de secagem, aumentando o risco de fissuração. A água absorvida aumenta ainda a massa volúmica e a condutibilidade térmica. A água retida nos poros tem ainda influência no processo evolutivo de crescimento da resistência, revelando estes betões tendências para um crescimento da mesma mais longo no tempo.

Condutibilidade térmica - A condutibilidade térmica para a maioria dos inertes secos a 20 °C, segundo CORMON [167], é próxima de 0.12 W /(m.°C). A produção de argila expandida realizada em Portugal, segundo ensaios recentes efectuados no *LNEC*, apresenta , para duas classes granulométricas com diferentes massas volúmicas, valores de 0.11 W/(m.°C) [173].

c) **Características mecânicas**

Resistência dos grãos e estrutura interna - Enquanto no betão normal o inerte é habitualmente mais resistente que a pasta e a rotura é condicionada sobretudo por esta, no caso dos betões leves a resistência dos grãos influencia muito a resistência do betão.

A resistência dos grãos é bastante influenciada pela porosidade, pela existência ou não de uma casca dura e pela massa volúmica real do grão. As dimensões e distribuição dos poros tem também um papel importante. Para o mesmo grau de porosidade, os pequenos alvéolos uniformemente distribuídos são preferíveis relativamente às grandes cavidades. Da mesma forma, a existência da casca dura e o aumento da sua espessura melhoram a resistência mecânica dos grãos.

A determinação da resistência mecânica dos grãos põe problemas, dado os mesmos não poderem ser moldados ou cortados e os ensaios mecânicos de base não lhes serem aplicáveis. Habitualmente usam-se três ensaios para caracterização mecânica dos grãos:

- Determinação da força de compressão necessária para enterrar 20 mm um pistão num recipiente com forma cilíndrica, normalizado, cheio de grãos. É o ensaio mais generalizado que habitualmente aparece referido na normalização [172,174] . Este método tem como inconvenientes a obtenção da resistência de um lote de grãos, não permitindo individualizar relações entre um grão e as suas características próprias;

- Compressão isostática, através da pressão hidrostática necessária ao esmagamento de um grão, introduzido numa manga flexível e mergulhado num banho de óleo sob pressão. Esta técnica foi desenvolvida em França pelo *CTTB* [170,175]. Este método permite caracterizar os grânulos um a um e a dispersão dos mesmos.

- Rotura dos grãos através dum fio que envolve o grão e por tracção provoca o seu rompimento. Como resultado aparece a "resistência ao fio", expressa como quociente entre a força de tracção exercida no fio quando da rotura e a secção da superfície de rotura. Este ensaio foi desenvolvido por ARMINES. Além das vantagens já referidas para o ensaio de compressão isostática, é de fácil realização mesmo em obra. [170]

Módulo de deformação dos grãos - A transmissão de forças internas no betão é função da relação entre a rigidez dos seus constituintes. Devido às dimensões dos grãos, só podem efectuar-se determinações dinâmicas. As retracções ocorridas nos betões leves estão fundamentalmente associadas a esta característica por estes inertes não terem capacidade

de contrariar a retracção da pasta, ao contrário dos betões normais. Esta tendência acentua-se à medida que os betões vão sendo mais leves.

d) **Características químicas**

A generalidade dos inertes leves e particularmente a argila expandida são quimicamente inertes e isentos de substâncias prejudiciais. É habitual as normas limitarem o teor em enxofre [172,176].

No caso da argila expandida produzida a partir de material extraído de locais onde camadas de argila alternam com calcário, as partículas podem conter cal viva que se desintegrará quando do contacto com a água, provocando eventualmente crateras à superfície do betão. Este risco é tanto maior quanto maior for a dimensão das incrustações de cal.

5.4 - COMPOSIÇÃO, FABRICO, COLOCAÇÃO E CURA DOS BETÕES DE ARGILA EXPANDIDA

5.4.1 - Composição

5.4.1.1 - Aspectos de base

A resistência de um betão só pode atingir a resistência da pasta constituinte da sua matriz (cimento, areia natural, caso exista, e água), se a resistência e a rigidez do inerte for, igual ou superior à da pasta. Embora esta condição seja habitualmente satisfeita nos betões normais, nos betões de inertes leves, a resistência e a rigidez dos grãos são normalmente inferiores às dos inertes correntes e mesmo inferiores aos valores da pasta [156,170]. Assim, a transferência de resistência processa-se de modo análogo à dos betões normais apenas até um certo limite, variável em função da rigidez e da resistência do inerte leve. Este limite, designado limite da pasta [156,170] corresponde ao valor da resistência que confere à pasta uma deformabilidade igual à dos grãos. A fig. 5.3 [156] precisa esta noção.

É possível fabricar betões leves com resistências mais elevadas do que as dos limites já referidos, à custa da melhoria da resistência e rigidez da pasta. No entanto a resistência final do betão continua a situar-se aquém da resistência da matriz.

Um outro aspecto a ter presente, é o facto de normalmente os betões de inertes leves apresentarem uma estrutura granulométrica mais descontínua do que os betões normais. Este facto acentua a fronteira entre a pasta e os inertes leves, o que facilita a interpretação apresentada nos pontos anteriores.

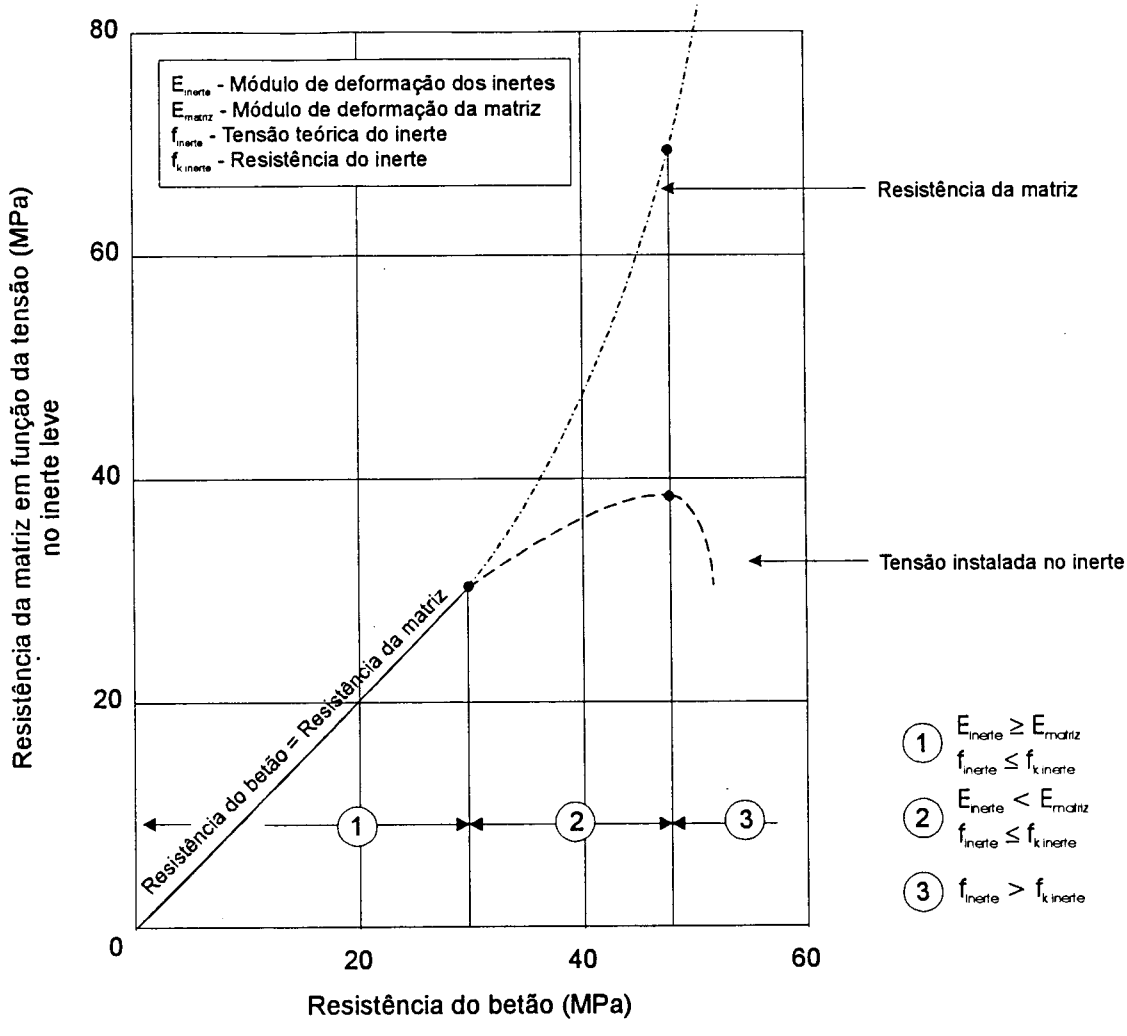


Fig. 5.3 - Relação simplificada entre a resistência do betão, resistência da matriz e a tensão teórica e transmitida pelo inerte [156]

Um terceiro aspecto está ligado à quantidade de água absorvida pela generalidade dos inertes leves, muito superior à dos inertes normais. Este facto altera as relações água/cimento habituais e obriga à decomposição da água total em água livre ou "efectiva" e água contida nos poros dos grânulos do inerte. Este problema é ainda mais delicado pelo facto da absorção inicial de água ser significativa, existindo migrações de água, mesmo durante o fabrico do betão, que fazem variar a quantidade de água livre em função do tempo de amassadura [156,177].

5.4.1.2 - Estudo de composição

Com ligeiras adaptações é possível aplicar os métodos de composição de betões tradicionais aos betões leves [161,170]. Todavia na formulação do problema existe um dado novo que é a massa volúmica seca do betão de inertes leves pretendida.

Em geral, é habitual correlacionar a resistência à compressão do betão leve com a massa volúmica real ou aparente do inerte.

O manual *CEB-FIP* [156] apresenta relações aproximadas entre a massa volúmica real granular do inerte e a massa volúmica seca do betão leve pretendida, constantes do Quadro 5.4.

Quadro 5.4 - Relação aproximada entre massa volúmica do inerte e massa volúmica do betão leve [156]

Massa volúmica real granular média do inerte (incluindo areia natural, se existir) (kg/m^3)	**Massa volúmica seca do betão leve** (kg/m^3)
800	1000
1150	1200
1450	1400
1700	1600
2000	1800
2300	2000

Nos betões normais a granulometria do inerte influencia principalmente a quantidade de água de amassadura necessária para assegurar uma trabalhabilidade satisfatória. O aumento dos finos aumenta a necessidade de água, o que vai em princípio diminuir a resistência do betão. Há assim nestes betões todo o interesse em maximizar a proporção de grossos e a máxima dimensão do inerte compatível com a trabalhabilidade pretendida. Nos betões leves esta relação entre o teor em água e a resistência do betão é ainda válida, mas associada a outros aspectos.

Em geral o módulo de deformação, a resistência e massa volúmica dos grãos diminuem com o aumento da dimensão dos grãos, o que provoca um abaixamento da resistência do betão, por diminuição da resistência do inerte e por um alargamento da malha da matriz em torno dos grãos. A introdução de areia natural melhora a trabalhabilidade e a resistência do betão, mas aumenta a sua massa volúmica. A introdução de areia natural acentua a segregação da mistura, devido ao aumento da diferença de massa volúmica entre a matriz, incluindo a areia natural, e os inertes leves grossos.

O tipo de curva granulométrica dos inertes tem também importância nas características do betão. As granulometrias contínuas asseguram uma melhor coesão do betão fresco e reduzem o risco de segregação. Sob o ponto de vista de trabalhabilidade e de resistência, o Manual *CEB-FIB* [156] recomenda diversas curvas granulométricas, função do tipo de betão pretendido.

A dosagem de cimento necessária para assegurar uma dada resistência do betão, varia em função do tipo de inerte e de diversos factores, sendo em geral a quantidade exacta obtida através de composições experimentais. O aumento da dosagem de cimento produz menores crescimentos nas resistências do que nos betões normais, para além de aumentar a massa volúmica.

Para os betões normais a relação água/cimento é muito importante. Com efeito sabe-se que a resistência do betão varia essencialmente em função da resistência do cimento e da relação água / cimento [156,159], tendo os outros factores uma influência menor. Nos betões leves a relação água / cimento tem menor importância pelos seguintes aspectos:

- o teor em água a ter em consideração é apenas a água efectiva ou livre;
- a correlação entre a resistência e a relação água livre / cimento varia com o tipo de inerte;
- a influência da resistência do cimento na resistência do betão não é linear;
- o teor em vazios é normalmente mais elevado e menos uniforme que nos betões normais.

Os efeitos resultantes do emprego de aditivos e adjuvantes no betão leve são similares aos obtidos no betão de inertes correntes. É necessário no entanto ter presente que o efeito do adjuvante é função do grau de saturação do inerte.

Referidos em bibliografia existem vários exemplos e métodos de cálculo da composição de betões leves, adaptados dos métodos usados nos betões normais [156,161,167,170]. Em geral estes métodos foram desenvolvidos para betões leves estruturais, dada a importância das características mecânicas neste tipo de aplicação. Relativamente aos betões mais isolantes, não é possível encontrar grandes referências, sendo em geral os estudos de composição efectuados de modo mais empírico, em função dos meios de colocação e vibração.

5.4.2 - Fabrico

O fabrico do betão leve apresenta algumas particularidades comparativamente aos betões normais.

A armazenagem dos inertes deve ser efectuada por forma a não provocar:

- misturas entre inertes de natureza, origens e classes granulométricas diferentes;
- segregações excessivas;
- grãos partidos devido às técnicas de carga e descarga.

A generalidade dos inertes leves requer uma pré-molhagem antes da amassadura. Diferente bibliografia [156,160], situa em 10%, (expresso como a absorção em peso, por imersão às 48 horas) o limite da absorção, a partir do qual considera necessária a pré-molhagem. Com efeito, o

desempenho do betão é função da quantidade de água contida nos inertes antes da amassadura. Água em excesso provoca uma má aderência entre o inerte e a pasta. Falta de água provoca uma absorção de água da pasta pelo inerte, com uma sub-hidratação do ligante e uma diminuição rápida da plasticidade do betão. Em ambos os casos há uma diminuição do desempenho do betão. A velocidade com que o inerte absorve a água condiciona também a necessidade de pré-molhagem.

A pré-molhagem pode ser efectuada no armazenamento ou na amassadura. O 1º processo consiste em molhar os inertes no seu local de armazenamento, algum tempo antes da sua utilização. O 2º processo consiste na introdução dos inertes leves na betoneira e na mistura destes com uma certa quantidade de água. A quantidade de água deverá ser ajustada por estudos ou por experiências de fabrico. Esta 2ª solução parece ser a que dá melhores resultados, porque não requer nenhum dispositivo particular de molhagem, a quantidade de água adicionada é facilmente controlável e a humidificação é mais homogénea. Apresenta como principal inconveniente o aumento do tempo de amassadura que pode condicionar o ciclo produtivo, por exemplo em indústrias de pré-fabricação [167].

O doseamento dos inertes leves deve ter presente que os mesmos apresentam variações com algum significado da massa volúmica aparente, devido às flutuações inerentes ao processo de fabrico e à quantidade de água absorvida. Por outro lado, os inertes leves finos apresentam um "empolamento" superior ao das areias naturais. É habitual considerar-se que para os inertes leves com dimensão acima de 3 a 4 mm [154,167] é preferível o doseamento volumétrico, pois introduz menos erros do que o doseamento ponderal. O doseamento do ligante é análogo ao dos betões normais. O doseamento da água, excluída a água absorvida pelos inertes, é similar ao dos betões normais, convindo no entanto referir que erros na dosagem da água são mais importantes nos betões leves do que nos betões normais, pelas razões já referidas.

A amassadura dos betões de inertes leves pode efectuar-se com equipamento análogo ao usado para os betões normais. Diferentes autores [156,160,167] referem que nas betoneiras correntes de tambor há a tendência dos finos e o cimento formarem uma camada nas paredes interiores do tambor que, ou provoca deficiência de finos em algumas amassaduras ou, destacando-se posteriormente, altera a proporção da mistura nas amassaduras seguintes. Nas betoneiras misturadoras este problema não ocorre, se as pás estiverem convenientemente ajustadas, além da mistura ser mais homogénea.

5.4.3 - Transporte, colocação e compactação

Aplicam-se em geral aos betões leves os métodos de transporte utilizados nos betões normais. É necessário ter presente, no entanto, que quando os grãos do inerte leve estão insuficientemente molhados, produz-se uma perda de trabalhabilidade proporcional ao tempo de transporte. Outra preocupação adicional, é a necessidade de evitar a segregação dos inertes leves durante o

transporte. A bombagem é mais difícil nos betões leves que nos betões normais, principalmente porque o inerte absorve água enquanto o betão se encontra sobre pressão.

A colocação do betão leve em obra é similar à betonagem com betões normais. É importante impedir a segregação e ter a garantia que o betão apresenta a trabalhabilidade adequada à aplicação.

A medição da trabalhabilidade em estaleiro, através do ensaio de abaixamento no cone de Abrams não é muito eficaz. Com efeito, o betão leve é extremamente sensível à dosagem de água, passando o abaixamento, para ligeiras variações da dosagem de água, de muito reduzido para muito elevado. Este facto levou ao desenvolvimento de outros métodos de medição da trabalhabilidade mais adequados ao betão leve, [156,160,170].

A compactação e vibração dos betões leves é mais difícil do que a dos betões normais. A porosidade dos inertes leves provoca um amortecimento das vibrações. Os betões leves sem areia natural, bem como os betões cavernosos ou semi-cavernosos, são praticamente impossíveis de vibrar com vibrador de agulha. Para betões secos, como os usados nas fábricas de artefactos de betão, usam-se preferencialmente mesas vibratórias associadas a prensagem. Nos betões leves a acção da vibração provoca uma tendência inversa da que ocorre nos betões normais, fazendo aflorar à superfície os grãos em vez da "leitada" da pasta .

5.4.4 - Cura

As precauções a tomar durante as primeiras horas a seguir à betonagem, para proteger os betões de inertes leves de uma dessecação prematura, são idênticas às dos betões normais. Os betões de inertes leves apresentam, em condições ambientais análogas, condições de cura mais favoráveis, por disporem do seu próprio aprovisionamento de água no seio dos grãos. Esta água transfere-se para a matriz à medida que a evaporação de água pela superfície do betão vai tendo lugar. Este movimento contínuo tem lugar durante um período variável com as condições ambientais. Em climas temperados esta transferência pode ser suficiente para uma hidratação apropriada sem disposições especiais. Nos climas quentes poderão ser necessárias disposições para impedir a secagem da superfície.

Quando as cadências de fabrico requerem descofragens rápidas é necessário acelerar o endurecimento através de calor. Todavia, como os inertes leves são mais isolantes que os inertes normais, por um lado são mais difíceis de aquecer, mas por outro lado o calor de hidratação que se liberta durante a cura tem mais dificuldade em escapar, contribuindo desta forma, para o acelerar do endurecimento. A técnica de cura em estufa revela-se mais eficaz, pelas razões já referidas, nos betões leves do que nos betões normais. O gradiente de crescimento da temperatura não deve ser superior a 20 °C/ h e a temperatura máxima não deve ultrapassar os 50 a 60 °C, sob pena de prejudicar as características mecânicas do betão. No caso de elementos com espessura superior a

0.15 m, ou com massas volúmicas abaixo de 1000 kg/m^3 ,o gradiente de crescimento da temperatura não deverá ultrapassar 10 °C / h [178].

5.5 - PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA

5.5.1 - Introdução

Apresentam-se neste ponto os valores assumidos correntemente pelas principais propriedades do betão de argila expandida , procurando interpretar as causas que estão na origem das diferenças relativamente aos betões de inertes correntes. Destaca-se a massa volúmica, resistências à compressão e tracção, características elásticas, variações dimensionais e características térmicas.

5.5.2 - Massa volúmica

Como já atrás foi referido a massa volúmica é uma característica fundamental dos betões leves, dependendo principalmente da massa volúmica dos inertes utilizados e da composição do betão.

Recorrendo à argila expandida é possível fabricar todos os tipos de betões leves, com uma gama alargada de massas volúmicas, de acordo com o referido no Quadro 5.1, desde betões estruturais, até betões exclusivamente com funções de isolamento térmico. Este facto, associado à disponibilidade de matéria-prima, faz com que os betões de argila expandida sejam o tipo de betão leve mais divulgado a nível mundial.

A evolução da massa volúmica dos betões de argila expandida, em condições de conservação extremas, parece variar da forma que se explicita de seguida.

a) **Na imersão**

De acordo com resultados experimentais obtidos em França [170], um betão de argila expandida estrutural, com massa volúmica de 1500 kg/m^3, apresentou absorções de água na imersão que não ultrapassaram 40 kg/m^3 ao fim de 6 anos, tendo esta absorção ocorrido de forma rápida no tempo (mais de 40% ao fim de 1 mês). Comparativamente, em betões tradicionais conservados nas mesmas condições, este acréscimo de peso foi de cerca de 30 kg/m^3.

b) **Secagem ao ar**

A evolução da massa volúmica do betão durante a secagem depende bastante das condições de conservação, temperatura e humidade do ar e da geometria da peça.

Segundo resultados obtidos na caracterização já referida [170], a velocidade de secagem é muito influenciada pela geometria da peça, parecendo que apenas uma camada exterior de cerca de 50 mm perde efectivamente água por evaporação para o ar.

5.5.3 - Resistência à compressão

Conforme já foi referido em 5.4.1, a resistência dos grãos constituintes dos inertes leves condiciona bastante a resistência destes betões. No entanto parece não haver uma relação única entre a resistência dos grãos e a resistência do betão. Para além deste aspecto, condicionam também a resistência à compressão do betão a existência e quantidade de inertes naturais, a dosagem de cimento, a dosagem de água, a forma e dimensão dos grãos. A resistência à compressão destes betões correlaciona-se de forma aproximada com a massa volúmica do betão.

Recorrendo a inertes leves de argila expandida é possível obter betões de resistências muito diversas, dependentes sobretudo da incorporação ou não de inertes naturais e da dosagem de cimento. Apresentam-se na fig. 5.4 os intervalos aproximados em que situam as resistências possíveis, em função da massa volúmica.

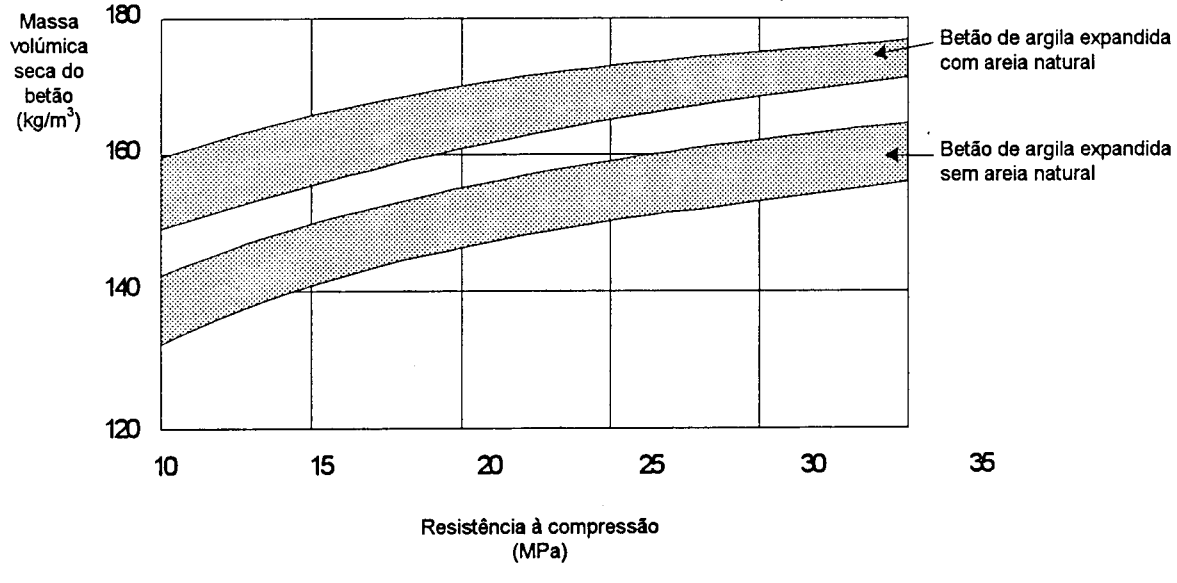


Fig.5.4 - Relação aproximada entre massa volúmica e resistência à compressão de betões de argila expandida

É genericamente aceite que o crescimento da resistência à compressão do betão de inertes leves é mais rápido do que o do betão tradicional. Este aumento é ainda mais significativo quanto mais baixa for a massa volúmica. Este facto radica-se no carácter isolante do betão leve que armazena mais calor da reacção de hidratação do cimento, e ainda devido à da resistência do betão ser limitada superiormente pela resistência dos inertes leves.

A análise da influência das condições de conservação, na evolução da resistência à compressão do betão leve de argila expandida, de acordo com a grande campanha de ensaios realizada em França sobre betões estruturais e de isolamento térmico [170], indicia que estes betões são menos sensíveis às condições de conservação que os betões correntes.

5.5.4 - Resistência à tracção

Existem três ensaios diferentes para determinação da resistência à tracção do betão:

- ensaio de tracção simples;
- ensaio de tracção por compressão diametral, dito "brasileiro";
- ensaio de tracção por flexão.

O 1º e 2º ensaios são puros, embora o 1º seja de difícil realização. O ensaio de tracção por flexão já não é um ensaio puro, pois existe uma plastificação limitada em tracção.

As referências relativas à resistência à tracção de betões leves de argila expandida são sobretudo relativas a betões estruturais. CORMON [167] refere que as resistências à tracção oscilam aproximadamente entre 0.5 e 3 MPa para betões isolantes e estruturais, respectivamente.

Como se sabe, existe uma certa proporcionalidade entre a resistência à tracção dos betões e a sua resistência à compressão. A generalidade dos autores refere que a relação resistência à compressão / resistência à tracção é superior nos betões leves comparativamente aos betões tradicionais. Esta diferença é tanto mais acentuada quanto menos resistente for o betão [160,170].

Tendo em vista aplicações estruturais do betão de argila expandida, correspondentes a betões com resistências médias em geral acima dos 20 MPa, referem-se as seguintes correlações:

- Manual *CEB-FIB* [156]:

$$f_{ct\ comp.\ diam.} = 0.23 f_c^{\ 2/3} \tag{5.1}$$

$$f_{ct\ flexão} = 0.46 f_c^{\ 2/3} \tag{5.2}$$

Sendo:

- $f_{ct\ comp.\ diam.}$ - resistência do betão à tracção por compressão diametral (MPa)
- $f_{ct\ flexão}$ - resistência do betão à tracção por flexão (MPa)
- f_c - resistência à compressão simples do betão (MPa)

- Estudo experimental aprofundado realizado por GOQUILLAT em França [170]:

  - Betão de inertes corrente

$$f_{ct} = f_{ct\ simples} = 0.72\, f_{ct\ comp.\ diam.} = 0.378\, f_{ct\ flexão} \tag{5.3}$$

  - Betão leve de argila expandida

$$f_{ct} = f_{ct\ simples} = 0.875\, f_{ct\ comp.\ diam.} = 0.503\, f_{ct\ flexão} \tag{5.4}$$

  Sendo:

  - f_{ct} - resistência do betão à tracção (MPa)

  - $f_{ct\ simples}$ - resistência do betão à tracção simples ou pura (MPa)

  - os restantes símbolos têm o significado referido em (5.1) e (5.2).

  Propõe ainda as seguintes relações entre a resistência à tracção simples e a resistência à compressão, válidas para valores médios ou característicos:

  Betão de inertes correntes:

$$f_{ct} = 0.6 + 0.06 f_c \tag{5.5}$$

  Betão leve de argila expandida

$$f_{ct} = 0.55 + 0.055 f_c \tag{5.6}$$

  em que os símbolos têm o significado referido nas expressões (5.1) a (5.4).

Apenas com carácter comparativo, refere-se que o *REBAP* [157] propõe a seguinte expressão para relacionar a resistência média à tracção simples, com a resistência característica à compressão simples de betões correntes:

$$f_{ctm} = 0.30\, f_{ck}^{2/3} \tag{5.7}$$

Sendo:

f_{ctm} - resistência média do betão à tracção simples (MPa)

f_{ck} - resistência característica do betão à compressão simples (MPa)

A influência das condições de conservação na resistência à tracção dos betões de argila expandida, pode resumir-se à constatação de que, comparativamente à conservação em água, a conservação em ambiente seco provoca reduções importantes da resistência à tracção e superiores às reduções

da resistência à compressão. No que diz respeito ao valor relativo desta redução, comparativamente aos betões correntes, não há unanimidade nos diferentes autores. Enquanto os autores da campanha de ensaios realizada em França [170] concluem que as reduções de resistência por conservação em atmosfera seca são mais reduzidas que nos betões correntes, há quem refira que essa redução é maior [156].

5.5.5 - Características elásticas

Para a mesma resistência à compressão, o módulo de elasticidade dos betões leves é consideravelmente inferior ao do betão corrente [179]. A fig. 5.5 ilustra essa diferença.

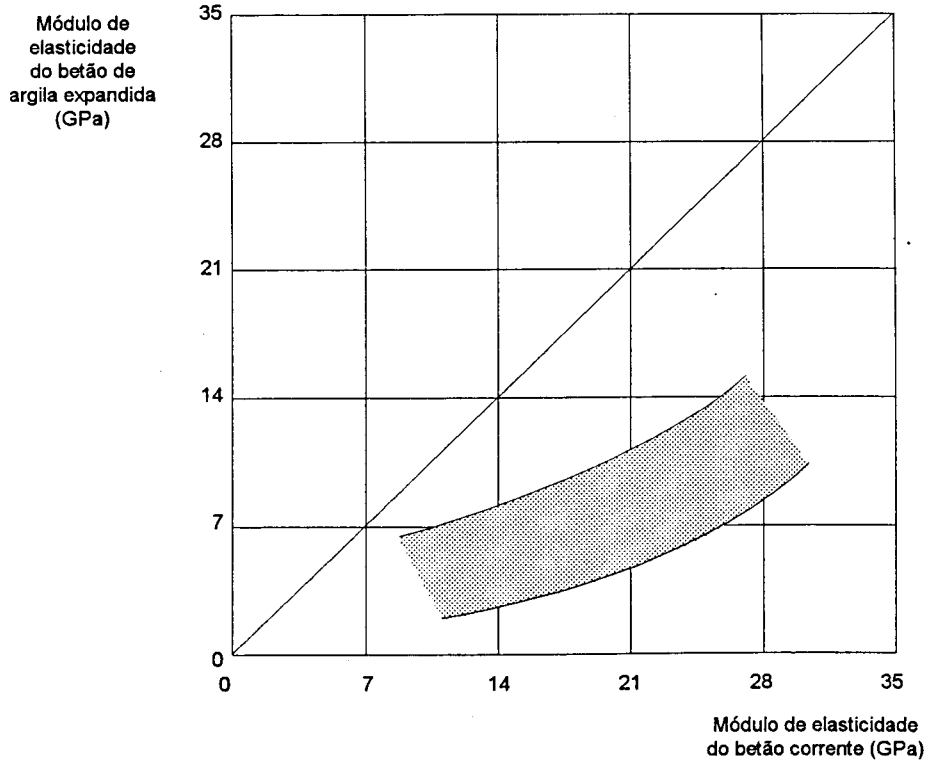


Fig. 5.5 - Relação entre módulos de elasticidade de betão corrente e betão de argila expandida com a mesma resistência à compressão [179]

Se este facto pode ter repercussões negativas ao nível das utilizações estruturais, noutras aplicações pode revelar-se favorável, nomeadamente nos artefactos de betão.

O aspecto da lei tensão-deformação para os betões leves é similar e próximo do dos betões correntes, correspondendo ao diagrama parábola rectângulo.

As principais referências quantificadas dizem respeito a betões de argila expandida estruturais.

- Campanha de ensaios realizada em França no fim da década de 70 [170]:

  Apresenta a seguinte expressão empírica para o módulo de elasticidade tangente, válida apenas para as unidades referidas:

$$E_{co,j} = 50.5\sqrt{\rho_s{}^3 f_{cj}} \tag{5.8}$$

  Sendo :

  $E_{co,j}$ - módulo de elasticidade tangente do betão, aos j dias de idade (MPa)

  ρ_s - massa volúmica seca ao ar do betão (kN / m^3)

  f_{cj} - resistência à compressão simples do betão, aos j dias de idade (MPa)

- O Manual *CEB-FIB* [156] apresenta uma expressão empírica idêntica, sujeita aos mesmos condicionalismos, para o módulo de elasticidade secante relativo a 1/3 da carga de rotura:

$$E_{c,j} = 40\sqrt{\rho_s{}^3 f_{cj}} \tag{5.9}$$

  Sendo :

  $E_{c,j}$ - módulo de elasticidade secante do betão (MPa)

  os restantes símbolos têm o significado referido em (5.8).

- Com carácter mais prático apresentam-se no Quadro 5.5 valores referidos em [156], como pertencentes ao regulamento alemão de betão leve.

Quadro 5.5 - Módulo de elasticidade de betões leves em função da sua massa volúmica [156]

Massa volúmica seca ao ar do betão (kN/m^3)	**Módulo de elasticidade** (MPa)
8 a 10	5000
10 a 12	8000
12 a 14	11000
14 a 16	15000
16 a 18	19000
18 a 20	23000

O coeficiente de Poisson normalmente referido para betões de inertes leves não fissurados é 0.2 [160,162].

5.5.6 - Variações dimensionais

Segundo diferentes autores [162,167], a retracção final do betão leve é superior à do betão corrente. Esse aumento da retracção, no caso dos betões de argila expandida, poderá variar entre cerca de 30 a 50% [170].No caso de betões estruturais com massa volúmica próxima de 1500 kg/m^3, conservados a 20 ºC e 50% H.R , a retracção situar-se-á aproximadamente entre 600 x10 $^{-6}$ a 1000 x 10 $^{-6}$ [179].

A retracção está ligada à contracção da matriz, que é contrariada pelos inertes. Esta reacção à contracção é tanto maior quanto mais rígidos forem os inertes. Os inertes leves, sendo mais deformáveis, contrariam menos a retracção potencial.

Relativamente aos betões correntes, a evolução da retracção em função do tempo nos betões leves processa-se mais lentamente. Este efeito é devido ao papel de reserva desempenhado pela água absorvida pelos inertes. Numa primeira fase a evaporação da água da pasta é compensada, total ou parcialmente, por migração da água absorvida pelos inertes para a pasta. Deste facto resulta que a perda de água na pasta seja mais lenta do que nos betões tradicionais. Quando os inertes leves cederem à pasta toda a água absorvida passível de ser transferida, a retracção processa-se naturalmente. A quantidade de água contida nos inertes, a espessura da peça, as condições de cura e ambientais, são assim determinantes na evolução da retracção, tendo-se mesmo em alguns ensaios verificado ligeiras expansões iniciais.

Existe ainda uma relação entre o valor final da retracção e a quantidade de água evaporada. Esta relação é proporcional à quantidade de água de amassadura e não à quantidade de água total contida no betão, pois a retracção depende da quantidade de água que o betão contém na pasta na altura da cristalização. Após cristalização, a migração de parte da água contida nos inertes para a pasta vai apenas ter o efeito de retardamento já referido.

Relativamente à expansão por imersão, os valores conhecidos para o betão de argila expandida são superiores aos do betão corrente. De acordo com a caracterização que se tem vindo a referir, a expansão por imersão média de um betão estrutural de argila expandida com massa volúmica de 1500 kg /m^3 é de 78 x 10^{-6} ,enquanto um betão corrente nas mesmas condições apresenta uma expansão de 55 x 10^{-6} [170].

A expansão do betão está ligada à absorção pela pasta de uma certa quantidade de água que vem ocupar os vazios anteriormente preenchidos pelo ar. A expansão efectiva vai depender da rigidez da pasta e dos grãos, de forma inversa à da retracção e segundo as mesmas leis.

5.5.7 - Características térmicas

Os parâmetros térmicos normalmente associados aos betões são a condutibilidade térmica, o coeficiente de dilatação térmica e o calor específico.

a) **Condutibilidade térmica**

Para produtos originários das mesmas matérias-primas, a condutibilidade térmica dos materiais depende fundamentalmente da sua massa volúmica, variando inversamente com esta. Além da massa volúmica, a humidade de equilíbrio influencia também a condutibilidade térmica. Em termos práticos a condutibilidade térmica útil deverá corresponder ao teor em água de equilíbrio, convencionado para representar a humidade que nas aplicações correntes o material conterá. Um aspecto importante a ter presente nos betões leves é o tempo necessário para que o material atinja a humidade de equilíbrio que pode ser demorado. No caso da aplicação de revestimentos muito estanques sobre betões jovens, a condutibilidade térmica real pode afastar-se significativamente da teórica.

Existem inúmeras publicações que incluem tabelas de condutibilidades térmicas de diferentes materiais. Em Portugal tem larga divulgação o documento francês "Régles Th-K 77" [76] que esteve na origem dos valores propostos na regulamentação térmica portuguesa [8,74], apresentando para os betões em análise os valores constantes do Quadro 5.6. Neste documento consideram-se como teores de humidade de equilíbrio da generalidade dos betões, valores entre 2 a 5% em peso. Relativamente aos betões leves é habitual considerar uma humidade de equilíbrio de 5%, para os betões cuja dosagem de cimento é igual ou superior a 300 kg/m^3 ,e de 3% para os betões cuja dosagem de cimento não ultrapassa os 250 kg/m^3 [170].

Quadro 5.6 - Condutibilidade térmica útil de betões de argila expandida [74,76]

Betão	Massa volúmica aparente (kg/m^3)	Condutibilidade térmica útil - λ W/(m.°C)
- Dosagem de cimento $\geq$ 300 kg/m^3 - Massa volúmica aparente dos inertes $\geq$ 350 kg/m^3	1600 - 1800 1400 - 1600 1200 - 1400 1000 - 1200	1.05 0.85 0.70 0.46
- Dosagem de cimento $\leq$ 250 kg/m^3 (e massa volúmica aparente dos inertes $\leq$ 350 kg/m^3 no caso de betões com massa volúmica< 600 kg/m^3)	800 - 1000 600 - 800 $\leq$ 600	0.33 0.25 0.20

Parece-nos interessante referir , pelo seu carácter expedito, a expressão constante do *ACI* - Guide for Structural Lightweight Concrete[162]:

$$\lambda_s = 0.072.\,e^{(0.00125\rho_s)} \quad (W/(m.^oC)) \qquad (5.10)$$

Sendo:

λ_s . condutibilidade térmica seca do betão (W/(m.°C))

ρ_s - massa volúmica seca do betão (kg/m^3)

A partir desta expressão, admitindo um agravamento de cerca de 20 % no valor da condutibilidade térmica para teores de humidade de equilíbrio de cerca de 3%, propõe a seguinte expressão para a condutibilidade térmica útil - $\lambda_{útil}$.

$$\lambda_{util} = 0.0865.\,e^{(0.00125\rho_s)} \quad (W/(m.^oC)) \qquad (5.11)$$

em que os símbolos têm o significado referido em (5.10).

b) **Coeficiente de dilatação térmica**

O coeficiente de dilatação térmica dos betões leves não difere sensivelmente do dos betões normais, embora frequentemente possa ter valores mais reduzidos.

Em diferentes publicações são referidos valores para betões leves [156,162] entre : 7 a 11 x 10^{-6} °C^{-1}

Para os betões correntes os valores referidos são [179]:

- Inertes siliciosos 9 a 13x 10^{-6} °C^{-1}

- Inertes calcários 6 a 9 x 10^{-6} °C^{-1}

A regulamentação portuguesa apresenta para os betões correntes o valor de 10 x 10^{-6} °C^{-1} [157].

c) **Calor específico**

O calor específico do betão leve é superior ao do betão corrente, sendo referidos os seguintes valores [156] :

Betão corrente - 1.0 kJ /(kg.°C)

Betão de argila expandida - 1.5 kJ /(kg.°C)

5.5.8 - Outras características

a) **Comportamento acústico**

O comportamento acústico aos ruídos aéreos de elementos de construção é principalmente função da sua massa. Segundo ensaios realizados em diferentes países [156,170] parece poder afirmar-se que betões de inertes leves de argila expandida, com textura superficial compacta, apresentam um comportamento mais favorável do que o sugerido pela lei da massa.

b) **Comportamento ao fogo**

Em termos de reacção ao fogo, os betões de inertes leves incluem-se na classe M_0 , correspondente a materiais não combustíveis.
A resistência ao fogo avalia o comportamento face ao fogo de elementos construtivos, relativamente à capacidade dos mesmos desempenharem determinadas funções em caso de incêndio. Esta classificação está assim associada aos elementos construtivos e não aos materiais, podendo no entanto referir-se que, em geral, os elementos construtivos à base de betão de inertes leves apresentam melhores resistências ao fogo que os seus congéneres em betão normal. Este facto deve-se à sua menor condutibilidade térmica, menor coeficiente de dilatação térmica e a uma estabilidade ao fogo muito maior dos inertes que foram previamente aquecidos a temperaturas elevadas.

c) **Durabilidade**

A durabilidade dos betões depende da capacidade destes em não se deixarem atravessar por substâncias agressivas, que lhes vão provocar ataques físicos e químicos.

A durabilidade dos betões depende de múltiplas características cujos efeitos se cruzam, tais como a dosagem máxima de ligante, relação água / cimento máxima, resistência à compressão do betão, compacidade e propriedades dos inertes, entre outras.

A tendência para, de forma simplista, correlacionar a durabilidade dos betões com a sua resistência à compressão tem vindo a ser prejudicada pela valorização das propriedades do betão à superfície, região efectivamente exposta à agressividade ambiente. Adquirem assim importância relevante a forma como os betões são revestidos. Sob um ponto de vista físico, a durabilidade está muito dependente da capacidade do betão se deixar atravessar por gases e líquidos.

Os betões de inertes leves sendo constituídos em geral por inertes mais porosos, são normalmente mais sensíveis aos ataques físicos e químicos que os betões de inertes correntes. Todavia a

estabilidade aos ataques químicos pode ser melhorada, em função da natureza e quantidade de ligante, enquanto a resistência aos fenómenos de gelo degelo destes betões é maior, quando comparada com os betões correntes, devido à maior quantidade de ar contido.

A resistência à abrasão é normalmente menor nos betões de inertes leves do que nos betões normais. Este facto está associado à menor dureza do inerte.

5.6 - PARTICULARIDADES DOS BETÕES DE ARGILA EXPANDIDA PARA FABRICO DE BLOCOS PARA ALVENARIA

5.6.1 - Composição e fabrico

O fabrico de blocos para alvenaria em betão de argila expandida não apresenta grandes diferenças, relativamente à realização de blocos de betão normal. Trata-se de betões semi-cavernosos de produção industrializada, realizados com inertes leves, cujas granulometrias não ultrapassam os 10 mm, incorporando frequentemente areia natural. As dosagens de cimento são baixas, em geral próximas dos 10% da massa volúmica do betão. A dosagem em água também é baixa, visando a obtenção de um betão seco, de consistência terra-húmida, a moldar por vibração e prensagem rápida, seguida de desmoldagem imediata sobre pranchas.

Os principais aspectos associados à produção industrial de betões, a utilizar na confecção de blocos e a ter presentes são:

- limitar a dimensão máxima do inerte a valores compatíveis com a espessura dos septos dos blocos;
- conseguir uma curva granulométrica o mais contínua possível, o que obriga em geral à introdução de uma areia natural, dado as argilas expandidas terem deficiência de finos, (a introdução de inertes naturais prejudica a redução da massa volúmica e da condutibilidade térmica);
- assegurar teores de humidade estáveis nos inertes, normalmente recorrendo à pré-molhagem dos inertes leves;
- limitar a dosagem em água de amassadura a valores compatíveis com a trabalhabilidade pretendida;
- minimizar o tempo de vibração e compactação, assegurando todavia a obtenção de uma textura o mais fechada possível que possibilite a desmoldagem imediata dos blocos.

5.6.2 - Cura

O processo de cura dos betões usados na confecção de blocos está condicionado pela necessidade de, após o fabrico, ser possível manuseá-los e transportá-los para o parque de armanezamento o

mais rapidamente possível. Nas produções industrializadas os blocos moldados em prensa fixa sobre pranchas de madeira são imediatamente conduzidos, ainda sobre as pranchas e através de carros transportadores, para câmaras de cura onde vão permanecer durante algum tempo. Estas câmaras são fechadas após o seu enchimento. Nas câmaras a cura pode ser natural ou acelerada, através de fornecimento de vapor de água aquecido.

A optimização do ciclo produtivo, visando a libertação das câmaras de cura, obriga a que os blocos permaneçam nestas relativamente pouco tempo. Conforme o tempo que os blocos vão permanecer nas câmaras, assim se poderão usar diferentes procedimentos de cura. Os mais habituais são:

- Cura natural em câmaras fechadas sem aquecimento, utilizando principalmente o calor de hidratação. Este procedimento é económico, mas conduz a acréscimos de calor moderados e requer permanências nas câmaras de cura de 24 a 36 horas [178], apresentando-se os blocos nesta idade ainda relativamente frágeis. Convém que as câmaras sejam isoladas termicamente, podendo o processo ser melhorado através da utilização de betão aquecido.

- Aquecimento através de vapor de água livre, processo muito usado na indústria de betão e que consiste na injecção de vapor saturado a uma pressão de 0.1 a 1.0 MPa na câmara de cura. O tratamento, após um período de permanência nas condições naturais da câmara, comporta 3 fases: elevação de temperatura, manutenção da temperatura máxima e arrefecimento. A duração total do tratamento oscila entre cerca de 8 a 16 horas. A duração do período de manutenção nas condições naturais da câmara, o gradiente de elevação de temperatura e a temperatura máxima deverão ser estabelecidos por forma a influenciarem o mínimo possível as características do produto. No que respeita ao primeiro aspecto, há que atender a que durante o fornecimento de vapor, este abandona o seu calor latente e condensa nas superfícies mais frias, absorvendo os produtos uma certa quantidade de água no início do tratamento que pode ser prejudicial. É normalmente reconhecido [170,178], que o tratamento térmico penaliza a resistência mecânica dos blocos endurecidos e reduz as variações dimensionais por retracção.

5.6.3 - Variações dimensionais

As variações dimensionais dos blocos de betão por retracção são importantes no comportamento das alvenarias, pois a parcela ocorrida na parede já executada pode afectar desfavoravelmente o seu desempenho. Os blocos de betão estão sujeitos à retracção de secagem ou hidráulica, por movimento de água, e à retracção de carbonatação, por combinação do dióxido de carbono da atmosfera com os componentes hidratados do cimento. Estas retracções são sempre acompanhadas por variações de massa dos blocos, embora em sentidos opostos, dando-se a primeira com diminuição de massa e a segunda com aumento da massa [136].

Para além da retracção de secagem e de carbonatação, predominantemente irreversíveis, os blocos de betão, como a generalidade dos materiais porosos, sofrem variações dimensionais reversíveis quando sujeitos a humedecimento ou secagem, em geral com valores inferiores aos das retracções já referidas. A substituição, total ou parcial, da fracção granulométrica mais fina dos inertes leves por areia natural, habitualmente utilizada na confecção de blocos, conduz a reduções sensíveis da retracção.

Como já foi referido em 5.5.6, a retracção nos blocos de inertes leves de argila expandida, comparativamente aos blocos de inertes correntes, é maior e mais diferida no tempo. Sabe-se também que a cura acelerada por tratamento térmico reduz a retracção [167,168].

O conhecimento dos valores absolutos que a retracção pode atingir, bem como a sua evolução no tempo, são importantes para o estabelecimento da idade mínima de fornecimento e assentamento.

A possibilidade de expansão por humedecimento deve também ser tida em conta, quer durante o armazenamento em parque, quer em obra, podendo ser controlável através de disposições adequadas.

5.7 - CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DE UM BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA USADO NA REALIZAÇÃO DE BLOCOS

5.7.1 - Composição, fabrico e cura

Por forma a ser possível dispor de um conhecimento mais aprofundado das características do betão usado na confecção de blocos de argila expandida, procedeu-se a uma caracterização preliminar deste betão.

Para esse efeito moldaram-se na *PAVILECA* blocos maciços com dimensões nominais 500 mm x 300 mm x 200 mm (comprimento x largura x altura), nas condições habituais de produção, dos quais se extraíram por corte os provetes usados normalmente na caracterização de betões.

Os materiais utilizados no fabrico dos blocos foram os seguintes:

- argila expandida proveniente da *LECA PORTUGAL*, nas classes granulométricas nominais 2/4 e 3/8[1].
- areia fina do mar da zona de S. Jacinto - Aveiro;
- cimento Portland CPN, classe 42.5 .

[1] As classes granulométricas efectivas correspondem a limites diferentes.

Os inertes e o cimento são armazenados em silos. Todas as operações relativas ao fabrico são comandadas automaticamente.

Os inertes são doseados em volume e o cimento em peso. Na amassadura os inertes são pré-humedecidos no tambor da betoneira, durante cerca de 1.5 minutos, antes da introdução do cimento e da parte restante da água. A água de amassadura é ajustada em função da humidade dos inertes, por forma a assegurar condições adequadas de trabalhabilidade. A composição do betão é a constante do Quadro 5.7.

Quadro 5.7- Composição do betão usado na confecção dos blocos de argila expandida, por amassadura e por m^3

MATERIAL	COMPOSIÇÃO DO BETÃO POR AMASSADURA (1 m^3 de inertes)	COMPOSIÇÃO APROXIMADA POR M^3 DE BETÃO COMPACTADO[1]
Cimento (kg)	120	154
Areia fina (m^3)	0,250	0,320
Leca fina 2/4 (m^3)	0,250	0,320
Leca média 3/8 (m^3)	0,500	0,640
Água de amassadura (m^3)	52	66,6

[1] Admitiu-se uma massa volúmica do betão fresco de 1280 kg/m^3

No Anexo I apresentam-se informações mais detalhadas relativamente aos inertes, particularmente curva granulométrica, teor de humidade e massa volúmica.

O betão é moldado, vibrado e compactado numa bloqueira do tipo fixo, sobre tabuleiros de madeira, sendo todas as operações comandadas automaticamente. Feita a desmoldagem dos blocos, estes, assentes nos tabuleiros, são conduzidos para câmaras onde sofrem uma cura natural por auto-aquecimento, ou acelerada através de vapor de água aquecido, conforme o ritmo de fabrico permita ou não permanências mais dilatadas nas câmaras. No caso em apreço, os blocos permaneceram em cura natural nas câmaras durante dois dias. Posteriormente mantiveram-se durante três semanas armazenados no Laboratório da Fábrica, sendo posteriormente transportados para o *LNEC*, onde foram efectuados os ensaios.

5.7.2 - Caracterização do betão

A partir dos blocos produzidos, retiraram-se provetes para caracterização do betão. Sintetizam-se no Quadro 5.8 os ensaios efectuados:

Quadro 5.8 - Ensaios do betão usado na realização de blocos de betão de argila expandida

Característica / Ensaio	Nº de Provetes e dimensões (m)	Idade (dias)	Técnica ensaio	Forma de obtenção dos provetes
Massa volúmica no estado natural	3-0.200x0.200x0.400 3-0.200x0.200x0.200	28	-	1
Massa volúmica no estado seco	3-0.200x0.200x0.400 3-0.200x0.200x0.450 9-0.100x0.100x0.450	-	-	
Condutibilidade térmica	5-0.300x0.300x0.085	-	*ISO* 8301 [69]	obtidos por corte a partir dos blocos maciços
Tensão de rotura à compressão segundo direcção de prensagem	6-0.200x0.200x0.200	39	NP-1383 [180]	obtidos por corte a partir dos blocos maciços
	2-0.200x0.200x0.200	90	*RILEM* CPC 3.2 [181]	
Tensão de rotura à compressão segundo direcção perpendicular à prensagem	6-0.200x0.200x0.400	39	NP-1383 [180]	obtidos por corte a partir dos blocos maciços
	3-0.200x0.200x0.200	66	*RILEM* CPC 3.2 [181]	
	3-0.200x0.200x0.400	90		
Tensão de rotura à tracção por flexão	7-0.100x0.100x0.450	39	*ISO* 4013 [182]	obtidos por corte a partir dos blocos maciços
Módulo de elasticidade em compressão segundo direcção de prensagem	3-0.200x0.200x0.200	39	*RILEM* CPC 8 [183]	1
Módulo de elasticidade em compressão segundo direcção perpendicular à prensagem	3-0.200x0.200x0.400	39	*RILEM* CPC 8 [183]	1

1 Os provetes para estes ensaios foram os usados na determinação da tensão de rotura à compressão

5.7.2.1 - Caracterização física

a) **Massa volúmica aparente do betão**

Os provetes destinados à caracterização mecânica foram obtidos por corte, a partir dos blocos maciços já referidos, sendo conservados em sala de ensaio não condicionada. Determinou-se a sua massa volúmica aparente no estado natural, e após secagem em estufa a 70° C até massa constante. Sintetizam-se no Quadro 5.9 os valores obtidos.

Quadro 5.9 - Massa volúmica aparente do betão constituinte dos blocos no estado natural e seco

Provete		Idade	Massa volúmica no estado natural		Massa volúmica no estado seco	
Nº	Dimensões nominais(m)	(dias)	Individual (kg/m³)	Média (kg/m³)	Individual (kg/m³)	Média (kg/m³)
1			1267		1178	
2	0.200 x 0.200 x 0.200	28	1263	1269	1166	1175
3			1277		1181	
1			1258		1164	
2	0.200 x 0.200 x 0.400	28	1219	1249	1126	1159
3			1269		1186	
1					1170	
2					1095	
3					1135	
4					1126	
5	0.100 x 0.100 x 0.450	28	-	-	1150	1149
6					1094	
7					1221	
8					1181	
9					1168	

b) **Condutibilidade térmica**

Determinou-se a condutibilidade térmica sobre cinco provetes, através do método fluximétrico, segundo a técnica constante da norma *ISO* 8301 [69]. Os provetes foram previamente secos em estufa. Os ensaios foram realizados no *LNEC*, de acordo com o Boletim que se apresenta no Anexo I. A condutibilidade térmica média obtida foi de 0.43 W/(m.°C).

5.7.2.2 - Caracterização mecânica

a) **Tensão de rotura à compressão**

Efectuaram-se ensaios tendentes à determinação da tensão de rotura à compressão do betão na

direcção de prensagem, equivalente à direcção habitual de assentamento do bloco, e na direcção perpendicular a esta, por forma a avaliar eventuais anisotropias do material. Com esse objectivo, retiraram-se, por corte dos blocos, provetes cúbicos de 0.200 m de aresta e prismáticos com 0.200 m x 0.200 m x 0.400 m. Esta diferença de dimensões resulta do facto destes provetes serem também usados na determinação do módulo de elasticidade em compressão, onde se privilegiam provetes com esbelteza entre 2 e 4. Todavia, a limitação física das dimensões do bloco donde foram extraídos os provetes, bem como o equipamento disponível para determinação das extensões, obrigaram à adopção de provetes com dimensões diferentes, na determinação do módulo de elasticidade, segundo as duas direcções. Apesar disto, procurou despistar-se a importância das dimensões do provete, através do ensaio de provetes cúbicos de 0.200 m de aresta na direcção perpendicular à prensagem.

Os provetes, secos ao ar, foram regularizados com pasta de cimento Portland Composto (60%) e Aluminoso (40%), de acordo com a técnica preconizada na norma NF P 14-304 [137] para blocos de betão. Os provetes foram ensaiados no *LNEC* numa máquina SEIDNER de 5000 kN, com uma velocidade de carregamento de 0,2 MPa / s. Na fig. 5.6 apresenta-se o aspecto geral dos provetes após rotura à compressão. Sintetizam-se no Quadro 5.10 os resultados obtidos.

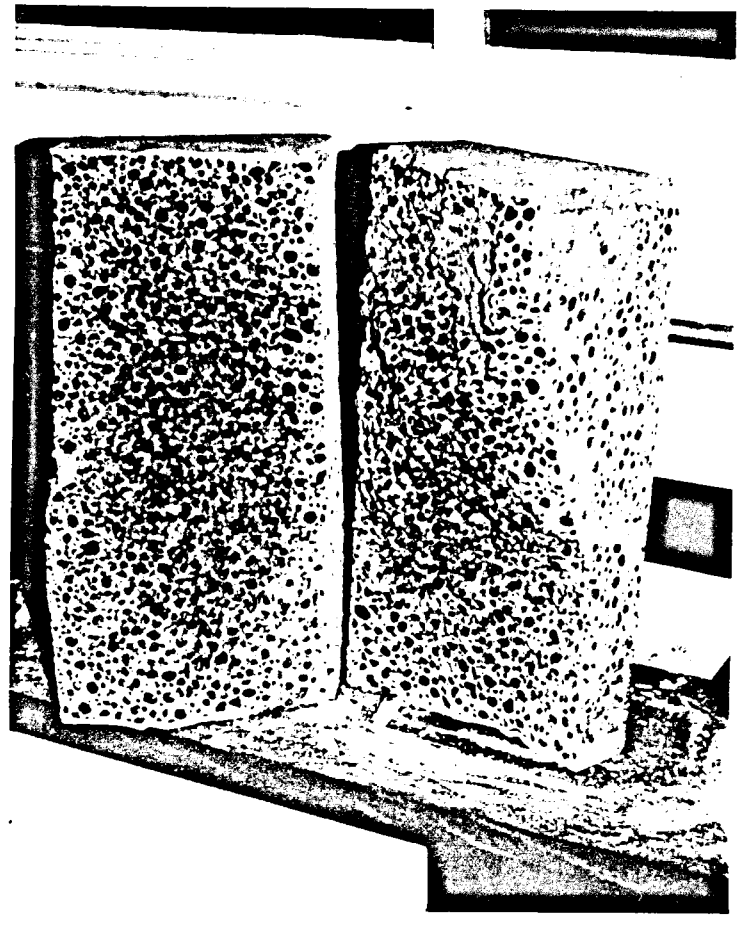
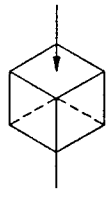
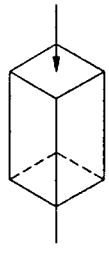
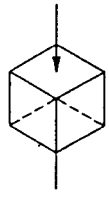


Fig. 5.6 - Aspecto geral dos provetes após ensaio de rotura à compressão

Quadro 5.10 - Tensão de rotura à compressão dos provetes de betão constituinte dos blocos

Nº do provete	Configuração e dimensões nominais do provete (m)	Direcção de carregamento	Idade	Tensão de rotura f_c		
				Individual	Média	Coef. var.
			(dias)	(MPa)	(MPa)	(%)
1 *				10.43		
2 *		Segundo		9.20		
4		direcção de	39	10.80	9.98	6.0
5		prensagem		10.23		
8				9.67		
9				9.57		
3 *			90	11.08	11.02	
7				10.96		
10				6.57		
11			66	9.50	8.39	
12	0.200 x 0.200 x 0.200			9.09		
1 *				9.99		
4				9.32		
5			39	10.26	9.71	5.5
7		Segundo		9.83		
8		direcção		8.83		
9		perpendicular		10.02		
2 *		à		8.92		
3 *		prensagem	90	10.22	10.09	
6	0.200x 0.200 x 0.400			11.14		
10				8.93		
11			66	8.30	8.92	
12				9.52		
	0.200 x 0.200 x 0.200					

*** Provetes secos em estufa, usados na determinação da massa volúmica**

b) **Tensão de rotura à tracção por flexão**

Retiraram-se por corte dos blocos provetes prismáticos, aproximadamente com 0.100 m x 0.100 m x 0.450 m, para determinação da tensão de rotura à tracção por flexão. Os provetes secos em estufa foram ensaiados de acordo com o preconizado na norma ISO 4013 [182], fig. 5.7.

Os ensaios foram efectuados no *LNEC*, numa prensa SEIDNER de 3000 kN, na escala de 15 kN, com uma velocidade de carregamento de 70 kN / s, provocando acréscimos de tensão por flexão de 0.02 MPa /s. Sintetizam-se no Quadro 5.11 os resultados obtidos. Na Fig. 5.8 apresenta-se o aspecto geral do ensaio.

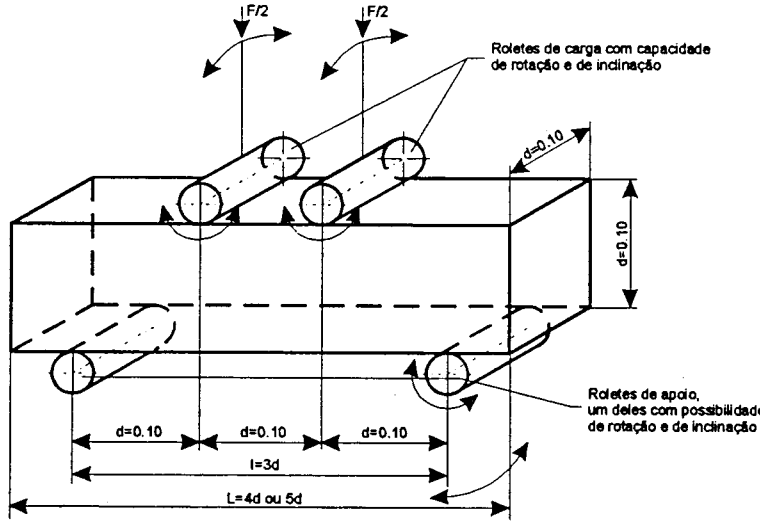
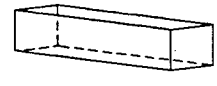


Fig. 5.7 - Dimensões do provete e dispositivo de carga segundo *ISO* 4013 [182]

Quadro 5.11 - Tensão de rotura à tracção por flexão de provetes de betão constituinte dos blocos

Nº do provete	Conf. e dimensões nominais do provete (m)	Idade (dias)	Tensão de rotura $f_{ct\,flexão}$ Individual (MPa)	Média (MPa)	Coef. var. (%)
3			1.70		
4			1.59		
5			1.65		
6		39	1.63	1.68	4.9
7			1.79		
8			1.79		
9	0.100 x 0.100 x 0.450		1.61		

c) **Módulo de elasticidade em compressão**

De acordo com o referido em a), os provetes utilizados na determinação da tensão de rotura à compressão, foram usados para determinação do módulo de elasticidade em compressão nas duas direcções já referidas, de prensagem e perpendicular a esta. Determinou-se o módulo de elasticidade correspondente ao módulo instantâneo secante, determinado após um certo número de ciclos de carga. Usou-se a técnica de ensaio constante da Recomendação *RILEM* CPC8 [183]. Resumidamente a técnica de ensaio consiste em efectuar um carregamento cíclico com incremento estabelecido, entre uma tensão residual mínima de 0.5 MPa e 1/3 da tensão de rotura estimada para

o provete, efectuando-se paragens de 90 s na tensão máxima e mínima, para estabilização da carga e leitura das deformações. O ensaio compreende 10 ciclos de carga e descarga, sendo o valor do módulo de elasticidade determinado a partir das deformações do 11º carregamento que deverá prosseguir até à rotura. A medição das deformações é efectuada através de aparelhos de leitura de elevada precisão, fixados em duas faces opostas, com uma base de medida mínima igual a 2/3 da dimensão das bases do provete e a uma distância das faces em contacto com a máquina não inferior a 1/4 da altura. Para que o resultado seja fiável é necessário que a tensão de rotura obtida não varie mais de 20% da estimada e que as deformações medidas nas diferentes bases de medida não variem mais de 10%.

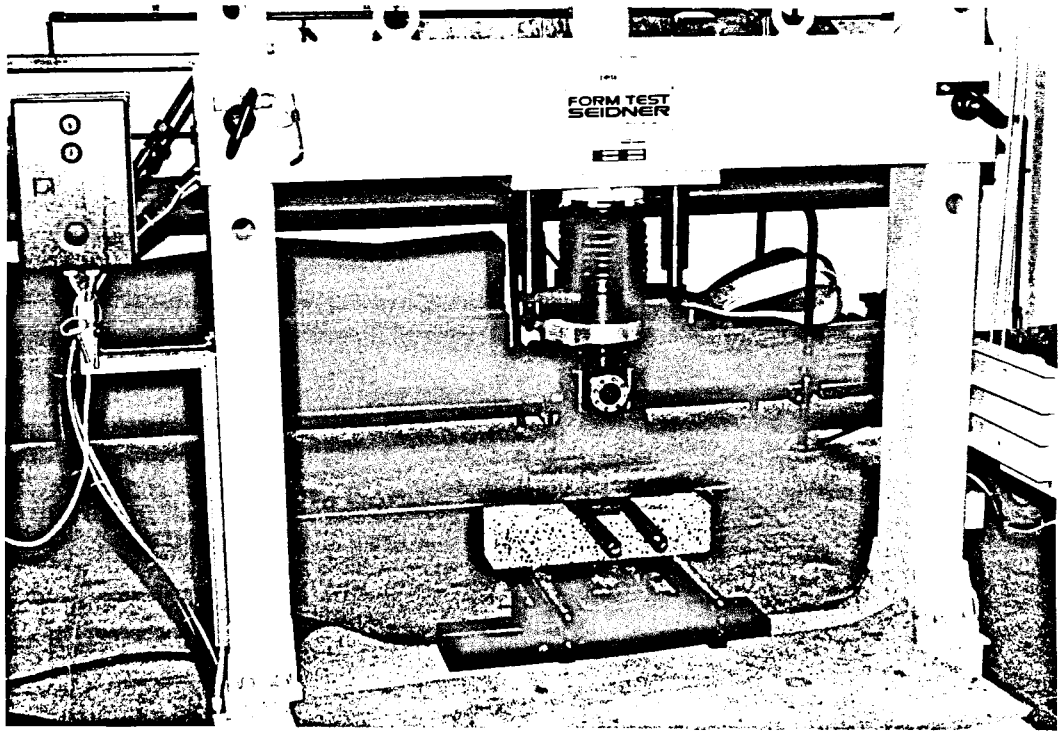


Fig.5.8 - Aspecto geral dos dispositivos de ensaio de tracção por flexão

No caso em apreço ensaiaram-se dois tipos de provetes, conservados e regularizados conforme já foi referido: cubos de 0.200 m de aresta para a determinação do módulo de elasticidade na direcção de prensagem, prismas de 0.200 m x 0.200 m x 0.400 m para a direcção perpendicular à prensagem. No caso dos cubos de 0.200 m, embora não satisfeitas as condições de esbelteza e de comprimento da base de medida constantes da Recomendação *RILEM*, pelos condicionalismos já referidos, a análise dos resultados obtidos parece permitir afirmar que essas limitações não condicionaram de forma importante os resultados. Os provetes foram ensaiados com o equipamento já referido para a determinação da tensão de rotura por compressão, usando-se para determinação da deformação transdutores eléctricos ligados directamente à máquina de ensaio. Admitiu-se que a

tensão de rotura era de 9 MPa, tendo o carregamento efectuado ciclos entre 24 e 120 kN (aproximadamente 0.6 e 3.0 MPa). A velocidade de carregamento foi de 0,2 MPa /s. Na fig. 5.9 apresenta-se o aspecto geral de um provete e dispositivo de ensaio.

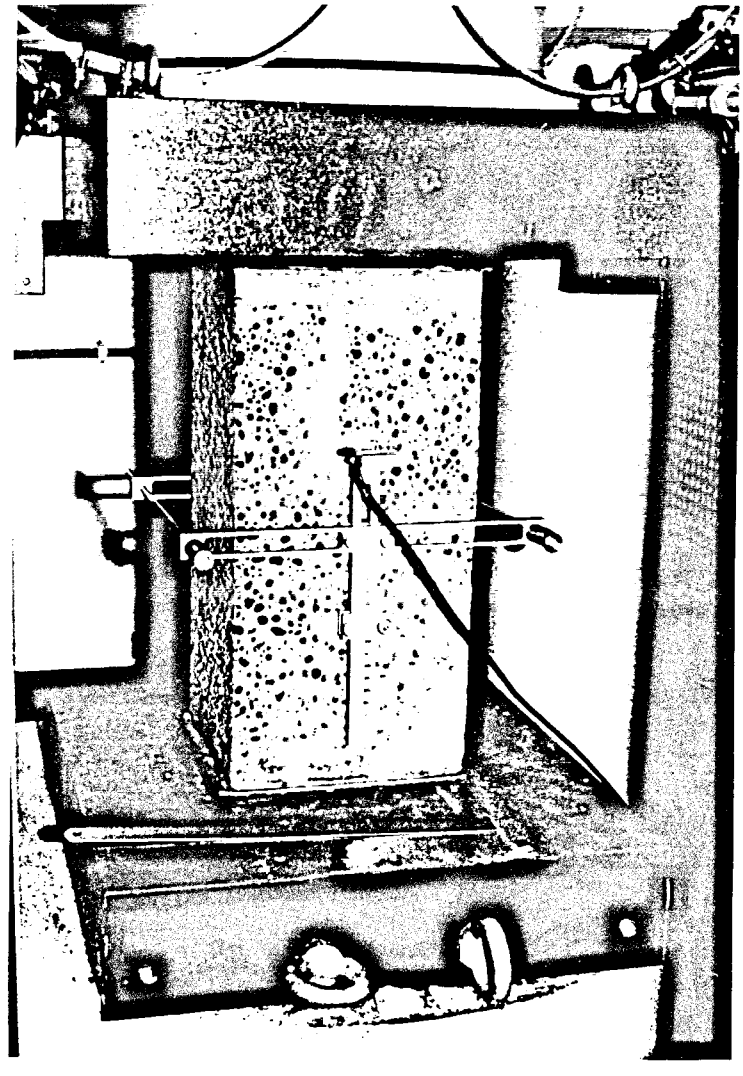
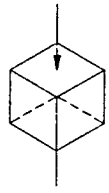
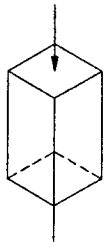


Fig.5.9 - Aspecto geral do provete e dispositivo de ensaio para determinação do módulo de elasticidade

No Quadro 5.12 apresentam-se os resultados obtidos. No decurso dos ensaios não se verificou qualquer anomalia e todos os resultados podem ser considerados válidos, de acordo com os critérios da recomendação *RILEM* CPC 8 [183].

As leituras intermédias efectuadas permitem afirmar que o comportamento do betão entre estas duas tensões é elástico e linear.

Quadro 5.12 - Módulo de elasticidade em compressão dos provetes do betão constituinte dos blocos

Nº do provete	Conf. e dimensões nominais do provete (m)	Base de medida h (mm)	Direcção de carregamento	Idade (dias)	Δh (μm)	$\Delta\varepsilon$ 1 (10^{-4})	$\Delta\sigma$ 2 (MPa)	E_c 3 (MPa)	E_{cm} (MPa)
1		68	Segundo direcção de prensagem	39	19.8	2.912	2.427	8333	8426 coef. var 7.1%
4					18.2	2.676	2.425	9064	
8					21.0	3.088	2.434	7882	
	0.200 x 0.200 x 0.200								
1		137	Segundo direcção perpendicular à prensagem	39	44.0	3.212	2.432	7570	8200 coef. var. 6.7%
4					39.4	2.876	2.435	8467	
5					40.0	2.920	2.499	8560	
	0.200 x 0.200 x 0.400								

1 - $\Delta\varepsilon$ - variação da extensão

2 - $\Delta\sigma$ - variação da tensão

3 - E_c - módulo de elasticidade secante instantâneo em compressão do betão

5.7.3 - Apreciação dos resultados

5.7.3.1 - Massa volúmica aparente do betão

A massa volúmica aparente do betão no estado seco apresentou um valor médio próximo de 1150 kg/m^3. Este valor enquadra-se dentro dos valores de massas volúmicas de produções do mesmo tipo onde é incorporada uma areia natural [184,185].

Em produções de blocos maciços ou perfurados, com menores percentagens de furação, em que o betão apenas incorpora inertes leves de argila expandida, há referência a massas volúmicas mais baixas, próximas de 850 kg/m^3 [185]. Normalmente as normas de produtos não especificam massas

volúmicas, mas apenas valores máximos da mesma, e desvios permitidos relativamente à massa volúmica declarada pelo fabricante, para que os blocos sejam classificados como de inertes leves.

5.7.3.2 - Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica obtida em condições normalizadas carece de correcções para ter em conta a situação efectiva de utilização do material. Este assunto foi discutido no Capítulo 3. Relativamente aos valores obtidos eles enquadram-se nas referências que se conhecem e que já foram referidas em 5.5.6.

Uma produção do mesmo tipo caracterizada nos anos 80 no *LNEC*, apresentou uma condutibilidade térmica de 0.30 W/(m.ºC), para uma massa volúmica de 1013 kg/m^3 [184]. Na fig. 5.10 representam-se os resultados de ensaios de determinação da condutibilidade térmica realizados ao longo do tempo no *LNEC* (ensaios realizados com vários tipos de equipamento), relacionando a referida propriedade com a massa volúmica.

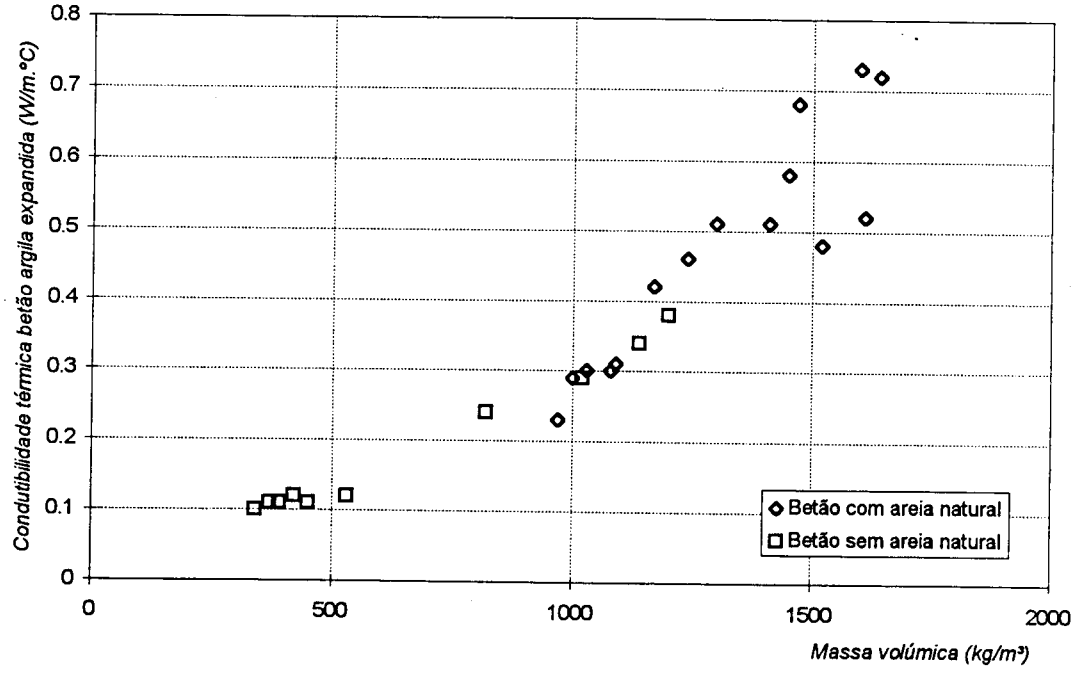


Fig.5.10 - Condutibilidades térmicas de betões de argila expandida, em função da sua massa volúmica, determinadas no *LNEC*

5.7.3.3 - Características mecânicas

Não se conhecem muitos valores de referência para betões deste tipo, dado apresentarem baixas dosagens de cimento e de água, enquanto os estudos mais divulgados se referem a betões estruturais ou estruturais/ isolantes com maiores dosagens de cimento e de água.
As normas relativas a blocos de betão de inertes leves que se conhecem são omissas relativamente às características mecânicas do betão constituinte. A norma francesa NF P 14-304 [137] refere que os blocos maciços ou perfurados devem apresentar uma resistência à compressão compatível com a integração em 3 classes, com resistência característica mínima de 3.5, 4.5 e 7.0 MPa.

Apresenta-se no Quadro 5.13 uma comparação entre os resultados obtidos na caracterização efectuada, e valores de referência para betões estruturais tipo, publicados em França [187]. Os valores de referência foram extraídos dum estudo mais vasto, tendo-se seleccionado o betão cuja massa volúmica e tipo de inertes mais se aproximava da caracterização efectuada.

Embora a comparação de valores deva ter presente as utilizações distintas pretendidas para os dois betões, podem formular-se as seguintes conclusões:

- Ao nível da composição dos betões sobressaem as diferenças de dosagem de cimento e água de amassadura, que são na composição de referência praticamente o dobro da caracterização efectuada.

- Ao nível das características físicas dos inertes, a resistência convencional dos grãos é também muito superior na composição de referência.

- Quanto às características mecânicas dos betões, a resistência à compressão do betão de referência é aproximadamente o dobro da caracterização efectuada, enquanto os valores dos módulos de elasticidade são próximos, parecendo ser menos dependentes das características mecânicas, como aliás é expresso no Quadro 5.5. A resistência à tracção não pode ser comparada de forma directa, dado os resultados respeitarem a técnicas de ensaio diferentes, no entanto as expressões referidas em 5.5.4 relativas a correlações entre as resistências à compressão e à tracção, revelam-se medianamente ajustadas.

Quadro 5.13 - Comparação entre os resultados da caracterização efectuada e valores de referência franceses

	Caracterização efectuada					Valores de referência (ITBTP)				
1. Composição dos Betões										
• Inertes (composição volumétrica)										
- Leca Fina			25%					33%		
- Leca média			50%					0%		
- Leca grossa			0%					60%		
- Areia fina			25%					7%		
• Características físicas	Classe granul. real	Teor de Hum. (%)	Massa volúmica aparente (kg/m³) Seca	Húmida	Resistência Convenc. dos grãos (1) (MPa)	Classe granul. real	Teor de Hum. (%)	Massa Volúmica aparente (kg/m³) Seca	Húmida	Resistência Convenc. dos grãos (2) (MPa)
- Leca fina	1.2/5	2.5	580	725	2.0	0/4	25	500	-	-
- Leca média	2.4/12	7.9	340	370	0.7	-	-	-	-	
- Leca grossa	-	-	-	-	-	6/16	10	410	-	5.3
- Areia fina	0.2/1.2	4.1	1578	1274	-	-	-	-	-	-
• Cimento (kg)			154					330		
• Adjuvantes			-					Plastificante		
• Água de amassadura adicionada (l/m³)			67					125		
2. Massas volúmicas aparentes dos betões (kg/m³)										
• Fresco			≅ 1280					1240		
• Conservado a 20°C - 50% H.R.			-					1180		
• Seco em estufa a 70°			1156					1110		
3. Características mecânicas dos betões aos 28 dias (MPa)										
• Resistência à compressão f_c			9.8					19.5		
• Resistência à tracção :										
- $f_{ct\ comp.diam}$			-					2.2		
- $fct_{\ flexão}$			1.7					-		
• Módulo de elasticidade estático E_c			8300					9100		

(1) Técnica de ensaio segundo projecto de norma *CEN* [174]

(2) Obtido segundo técnica de ensaio NF P 18-309 [189]

5.8 - PRINCIPAIS EXIGÊNCIAS NORMATIVAS APLICÁVEIS A BLOCOS DE BETÃO DE INERTES LEVES

5.8.1 - Generalidades

Apresenta-se uma síntese comparada das exigências normativas aplicáveis a blocos de betão de inertes leves. Convêm ter presente que, com excepção da normativa francesa, as restantes normas são genéricas para diferentes tipos de blocos, pelo que a comparação deverá ser cautelosa, tanto mais que as técnicas de ensaio admitidas na diferente normalização não são idênticas. Recorda-se que de acordo com a normalização francesa, NF P 14-304 [137], se consideram blocos de betão de inertes leves aqueles que apresentam uma massa volúmica seca do betão constituinte não superior a 1700 kg/m^3. Sublinha-se ainda que duma forma geral na Grã-Bretanha e nos Estados Unidos da América, os blocos têm geometrias mais simples, caracterizadas pela existência de apenas 2 septos longitudinais exteriores, travados por septos transversais que definem um número reduzido de furos. Estes blocos são correntemente usados em paredes duplas e as suas espessuras têm limites máximos inferiores às espessuras correntes em França, Itália e em Portugal. Este aspecto deve ser tido em conta na comparação de algumas exigências, particularmente as características geométricas.

Utilizaram-se nesta síntese as normas constantes do Quadro 5.14.

Quadro 5.14 - Normas exigênciais de blocos de betão correntes de inertes leves analisadas

ORIGEM	NORMA	ANO	DESIGNAÇÃO
França	NF P 14-101[190]	1983	Agglomérés-Blocs en béton pour murs et cloisons. Definitions
	NF P 14-304[137]	1983	Agglomérés-Blocs en betón de granulats légers pour murs et cloisons
	NF P 14-402[191]	1983	Agglomérés-Blocs en béton pour murs et cloisons. Dimensions
Grã-Bretanha	BS 6073:1 [192]	1981	Precast concrete masonry units. Specification for precast concrete masonry units
	BS 6073:2 [138]	1981	Precast concrete masonry units. Method for specifying precast concrete masonry units
EUA	ASTM C90 [193]	1990	Load-bearing concrete masonry units
	ASTM C129 [194]	1990	Non load-bearing concrete masonry units
CEN	pr EN 771-3 [118] (draft)	1992	Specification for masonry units - Part 3: Aggregate concrete masonry units (dense and lightweight aggregates)

Sintetizam-se no Quadros 5.15 as características relativamente às quais essas normas apresentam exigências.

Quadro 5.15 - Características previstas nas normas exigenciais de blocos de betão de inertes leves

CARACTERÍSTICAS		NORMA
Características geométricas	Forma	NF P 14-304 pr EN 771-3
	Geometria interna	NF P 14-304 BS 6073:1 ASTM C90 e C129 pr EN 771-3
	Dimensões exteriores	NF P 14-402 BS 6073:1 pr EN 771-3
	Tolerância das dimensões exteriores	NF P 14-402 BS 6073:1 ASTM C90 e C129 pr EN 771-3
	Percentagem de furação	NF P 14-101 BS 6073:1 ASTM C90 e C129 pr EN 771-3
Características físicas	Aspecto e textura	NF P 14-304 BS 6073:1 ASTM C90 e C129
	Massa volúmica	NF P 14-304 pr EN 771-3
	Variações dimensionais	NF P 14-304 BS 6073:1 ASTM C90 e C129
	Absorção de água por imersão	ASTM C90
Características mecânicas	Resistência à compressão	NF P 14-304 BS 6073:1 ASTM C90 e C129 pr EN 771-3
Recepção do produto	Identificação e data de fabrico	NF P 14-304 BS 6073:1 ASTM C90 e C129 pr EN 771-3
	Ensaios de recepção	NF P 14-304 BS 6073:1

5.8.2 - Exigências normativas relativas a blocos de betão de inertes leves

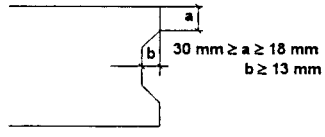
5.8.2.1 - Características geométricas

5.8.2.1.1 - *Forma*

a) **NF P 14-304**

Os topos dos blocos devem permitir a realização de juntas verticais contínuas ou descontínuas, de acordo com a fig. 5.11.

a) Juntas verticais contínuas



b) Juntas verticais descontínuas

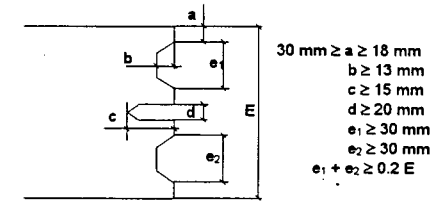


Fig. 5.11 - Configuração dos topos dos blocos segundo NF P 14-304

As faces horizontais dos blocos devem permitir a execução de juntas horizontais contínuas, ou descontínuas. Neste último caso, a largura das partes argamassadas deve ser no mínimo 40% da espessura dos blocos. Além das prescrições anteriores, preconiza-se ainda que a configuração dos blocos deve ser tal que permita a continuidade entre as juntas verticais e horizontais, na caso dos blocos com juntas descontínuas, de acordo com a fig. 5.12 .

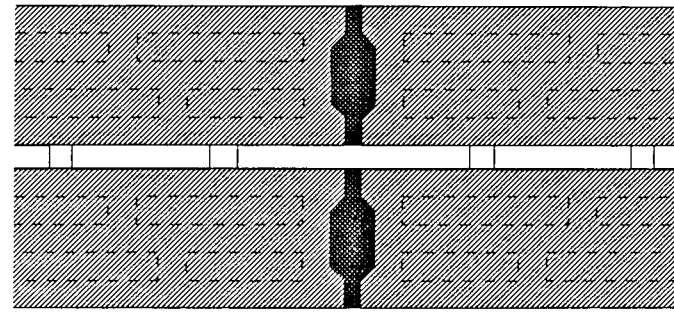


Figura 5.12 - Disposição preconizada para os blocos com juntas descontínuas, relativamente à continuidade das juntas verticais e horizontais

b) **pr EN 771-3**

Recomenda que os elementos apresentem reentrâncias ou dispositivos de encaixe nas juntas. Fixa exigências para as arestas, planeza e ortogonalidade das faces, admitindo dois tipos de tolerâncias, normal e fina.

5.8.2.1.2 - *Geometria interna*

a) **NF P 14-304**

A espessura dos septos exteriores, medida a meia altura, deve ser no mínimo 20 mm. A espessura da lâmina de betão na face de assentamento, medida ao fundo dos alvéolos- fundo "cego" - deve ser no mínimo 5 mm. Para os blocos com juntas descontínuas, a largura dos alvéolos que materializam a descontinuidade, medida na face de apoio, deve ser no mínimo 15 mm.

b) **BS 6073:1**

A espessura mínima dos septos exteriores na face de apoio, não deve ser inferior a 15 mm ou 1.75 vezes a máxima dimensão do inerte.

c) **ASTM C90 e C129**

Para blocos de betão a utilizar em paredes estruturais, as espessuras mínimas de septos, em função da largura nominal do bloco, são as constantes do Quadro 5.16, de acordo com a ASTM C 90.

Para blocos de betão a utilizar em paredes não resistentes, a espessura mínima para os septos longitudinais exteriores é de 13 mm, de acordo com a ASTM C 129.

d) **pr EN 771-3**

A espessura mínima dos septos interiores e exteriores na face de apoio não deve ser inferior a 20 mm, ou 1.5 vezes a máxima dimensão do inerte.

Quadro 5.16 - Espessuras mínimas dos septos exteriores e interiores de blocos de betão destinados a paredes estruturais, segundo ASTM C90

ESPESSURAS MÍNIMAS DE SEPTOS (mm)			
ESPESSURA NOMINAL DO BLOCO (mm)	SEPTOS LONGITUDINAIS EXTERIORES	SEPTOS TRANSVERSAIS	
		ESP. MÍNIMA (mm)	ESP. MÍNIMA EQUIVALENTE[1] (mm/m)
76,2 e 102	19	19	136
152	32	25	188
203	32	25	188
254	35	29	209
-	32 (2)	29	209
305	38	29	209
-	32 (2)	29	209

1 - Soma das espessuras de todos os septos transversais do bloco, multiplicada por 12 e dividida pelo comprimento do elemento

2 - Em condições de carga especiais

5.8.2.1.3 - *Dimensões exteriores*

a) **NF P 14-402**

As dimensões exteriores nominais dos blocos de betão devem ser as indicadas no Quadro 5.17.
As dimensões de coordenação são obtidas a partir das dimensões nominais, adicionando ao comprimento e à altura a espessura da junta, normalmente 10 mm para a junta horizontal e 6 mm para a junta vertical. A espessura de coordenação obtêm-se adicionando à espessura nominal a espessura do reboco em ambas as faces.

Quadro 5.17 - Dimensões exteriores de coordenação e nominais dos blocos segundo a NF P 14-402

DIMENSÕES EXTERIORES DE COORDENAÇÃO E NOMINAIS (mm)					
ALTURA		ESPESSURA		COMPRIMENTO	
COORDENAÇÃO	NOMINAL	COORDENAÇÃO	NOMINAL	COORDENAÇÃO	NOMINAL
200	190	75	50	300	294
		100	75		
250	240	125	100	400	394
		150	125		
300	290	175	150	500	494
		200	175		
		225	200	600	594
		250	225		
		275	250		
		300	275		
		325	300		
		350	325		

b) **BS 6073:1**

As dimensões exteriores nominais recomendadas para os blocos de betão são as indicadas no Quadro 5.18.

Quadro 5.18- Dimensões exteriores nominais dos blocos segundo BS 6073:2

DIMENSÕES EXTERIORES NOMINAIS (mm)																
ALT.	COMP.	ESPESSURA														
		60	75	90	100	115	125	140	150	175	190	200	215	220	225	250
190	390	X	X	X	X	X		X	X		X	X				
140	440	X	X	X	X			X	X		X	X			X	
190	440	X	X	X	X			X	X		X		X	X		
215	440	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
290	440	X	X	X	X			X	X		X	X	X			
140	590		X	X	X			X	X		X	X	X			
190	590		X	X	X			X	X		X	X	X			
215	590		X	X	X		X	X	X	X		X	X		X	X

c) **pr EN 771-3**

Limita apenas as dimensões máximas dos elementos aos seguintes valores:

- comprimento 1500 mm, espessura 500 mm, altura 650 mm.

5.8.2.1.4 - *Tolerância das dimensões exteriores*

a) **NF P 14-402**

As tolerâncias definidas, para as dimensões efectivas exteriores dos blocos, relativamente às dimensões nominais de fabrico, são as constantes do Quadro 5.19.

Quadro 5.19 - Tolerâncias de dimensões exteriores segundo NF P 14-402

TOLERÂNCIA DAS DIMENSÕES EXTERIORES (mm)		
ALTURA	ESPESSURA	COMPRIMENTO
± 4	± 4 para espessuras nominais até 100 ± 5 para as restantes	± 5

b) **BS 6073:1**

Para cada uma das três dimensões do bloco, as tolerâncias definidas para as dimensões efectivas dos blocos, relativamente às dimensões nominais correspondentes, são as constantes do Quadro 5.20.

Quadro 5.20 - Tolerâncias de dimensões exteriores segundo BS 6073:1

TOLERÂNCIA DAS DIMENSÕES EXTERIORES (mm)		
ALTURA	ESPESSURA	COMPRIMENTO
+3 -5	± 2 para a média das 7 medições efectuadas em cada bloco ± 4 para qualquer medição individual	+3 -5

c) **ASTM C90 e C129**

Para cada uma das três dimensões do bloco, a média das medições efectuadas não pode diferir da dimensão nominal mais de 3.2 mm.

d) **pr EN 771-3**

As tolerâncias definidas para as dimensões efectivas dos blocos de betão são as constantes do Quadro 5.21.

Quadro 5.21 - Tolerâncias de dimensões exteriores segundo pr EN 771-3

TOLERÂNCIA DAS DIMENSÕES EXTERIORES (mm)		
TIPO DE TOLERÂNCIA	DIMENSÃO RESULTANTE DA SUPERFÍCIE DO MOLDE	DIMENSÃO RESULTANTE DO ENCHIMENTO
normal	4	5
fina	2	3

5.8.2.1.5 - *Percentagem de furação*

a) **NF P 14-101**

Para qualquer tipo de inertes, correntes ou leves, a NFP14-101, distingue 3 tipos de blocos:

- Blocos maciços - sem qualquer furação
- Blocos perfurados - percentagem de furação não superior a 25%
- Blocos vazados - percentagem de furação superior a 40 %

A NF P 14-304 obriga ainda a que a superfície de apoio dos blocos seja no mínimo 1/3 da secção bruta, o que equivale a limitar superiormente a percentagem de furação aproximadamente a 67%.

b) **BS 6073:1**

Para qualquer tipo de inertes, distingue 3 tipos de blocos:

- blocos maciços - sem qualquer furação;
- blocos com furos não atravessantes - com um ou mais alvéolos que não atravessam totalmente o bloco;
- blocos com furos atravessantes - com um ou mais alvéolos atravessando o bloco.

Não estabelece limites para a percentagem de furação.

c) **ASTM C90 e C129**

Apenas a ASTM C90 distingue entre 2 tipos de blocos:

- blocos maciços - percentagem de furação não superior a 25%;
- blocos furados - todos os que não sejam maciços e aos quais se aplicam apenas as exigências de espessuras mínimas de septos.

d) **pr EN 771-3**

Não fixa exigências. Com carácter informativo refere a seguinte classificação, sob o ponto de vista de percentagem de furação :

- elementos maciços ou equivalentes - furação vertical limitada a 25%;
- elementos perfurados - furação vertical maior que 25 % e não ultrapassando 50 %;
- elementos vazados - furação vertical superior a 50 %;

- elementos furados horizontalmente - furação horizontal não superior a 50 %.

5.8.2.2 - Características físicas

5.8.2.2.1 - *Aspecto e textura*

a) **NF P 14-304**

Os blocos não devem apresentar defeitos aparentes como fissuras ou deformações. As suas faces devem ser planas e as arestas rectilíneas. A textura das faces deve ser suficientemente rugosa para assegurar uma boa aderência dos rebocos e da argamassa das juntas.

b) **BS 6073:1**

Refere apenas que as faces e os topos dos blocos devem ser perpendiculares entre si, respeitando as tolerâncias dimensionais.

c) **ASTM C90 e C129**

Os blocos não devem apresentar fissuras ou outros defeitos que interfiram com o seu assentamento, provoquem redução da resistência ou durabilidade da construção. Pequenos defeitos, acidentais no processo de fabrico, ou resultantes dos processos habituais de transporte, carga e descarga não são motivo de rejeição. Os blocos para revestir devem apresentar rugosidade suficiente para garantir uma boa aderência.

5.8.2.2.2 - *Massa volúmica*

a) **NF P 14-304**

A massa volúmica seca do betão constituinte dos blocos não deve afastar-se de + 100 kg/m^3 a - 200 kg/m^3 do valor nominal declarado pelo fabricante. A massa volúmica seca do betão constituinte dos blocos não deve ultrapassar 1700 kg/m^3.

b) **pr EN 771-3**

A massa volúmica seca do bloco e a massa volúmica seca do betão constituinte, não podem diferir mais de ± 7.5 % do valor declarado pelo fabricante.

5.8.2.2.3 - *Variações dimensionais*

a) **NF P 14-304**

As variações dimensionais, obtidas em condições convencionais definidas na técnica de ensaio, de retracção por secagem e de expansão por imersão, contadas a partir da data de fornecimento, têm os seguintes limites:

- variação dimensional entre estados convencionais extremos, de retracção e expansão $\leq 450 \times 10^{-6}$;
- amplitude da expansão convencional $\leq 300 \times 10^{-6}$.

b) **BS 6073:1**

As variações dimensionais por retracção, em condições convencionais de ensaio, não podem exceder 600×10^{-6} .

c) **ASTM C90 e C129**

As variações dimensionais por retracção, em condições convencionais de ensaio, não podem exceder 650×10^{-6} .

5.8.2.2.4 - *Absorção de água por imersão*

a) **ASTM C90**

Esta norma especifica para blocos com funções estruturais, as absorções de água por imersão, em função da massa volúmica do betão, constantes do Quadro 5.22.

Quadro 5.22 - Absorção máxima de água por imersão de blocos de betão com função resistente, segundo ASTM C90

TIPO DE BETÃO DO BLOCO 1	ABSORÇÃO MÁXIMA DE ÁGUA POR IMERSÃO (kg/m^3)
LEVE	
≤ 1682 kg/m^3	288
MÉDIO	
1682 a 2002 kg/m^3	240
NORMAL	
≥ 2002 kg/m^3	208

1 - massa volúmica seca do betão constituinte dos blocos

5.8.2.3 - Características mecânicas

5.8.2.3.1 - *Resistência à compressão*

a) **NF P 14-304**

Os blocos devem apresentar no mínimo, à data de fornecimento, a resistência característica à compressão, expressa relativamente à secção aparente do bloco, constante do Quadro 5.23. Independentemente destes resultados, nenhum valor individual pode ser inferior a 80 % dessa resistência.

Quadro 5.23 - Classes e resistências características de blocos de betão de inertes leves segundo NF P 14-304

CLASSES DE RESISTÊNCIA			
BLOCOS MACIÇOS E PERFURADOS		**BLOCOS VAZADOS**	
CLASSE	**RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA (MPa)**	**CLASSE**	**RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA (MPa)**
L35	3.5	L25	2.5
L45	4.5	L40	4.0
L70	7.0		

b) **BS 6073:1**

Blocos de espessura igual ou superior a 75 mm deverão apresentar resistências médias à compressão, expressas relativamente à secção aparente do bloco, não inferiores a 2.8 MPa. Qualquer mínimo individual não deverá ser inferior a 2.25 MPa.

Os blocos de espessura inferior a 75 mm deverão apresentar resistências médias à flexão iguais ou superiores a 0.65 MPa.

c) **ASTM C90 e C129**

De acordo com estas normas a resistência à compressão expressa-se relativamente à secção efectiva e não relativamente à secção aparente como é comum na restante normalização.

Os blocos devem apresentar resistência à compressão, função da utilização dos mesmos, de acordo com o Quadro 5.24. Os blocos para utilização não estrutural deverão ter essa indicação assinalada de forma inequívoca, para excluir a sua utilização como blocos estruturais.

Quadro 5.24 - Resistência média e mínima à compressão de blocos de betão, em função da sua utilização, segundo ASTM C90 e C129

UTILIZAÇÃO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO [1] (MPa)	
	MÉDIA DE 3 BLOCOS	MÍNIMA
ESTRUTURAL	13.1	11.7
NÃO ESTRUTURAL	4.14	3.45

(1) Expressa como quociente entre a carga de rotura e a secção efectiva do bloco, diferente das outras normas em análise

d) **pr EN 771-3**

O valor mínimo da resistência à compressão, expressa relativamente à secção aparente, de qualquer elemento, não pode ser inferior a 1.8 MPa. O valor médio deverá ser maior ou igual a 1.25 o valor mínimo.

5.8.2.4 - Recepção do Produto

5.8.2.4.1 - *Identificação e data de fabrico*

a) **NF P 14-304**

A data de fabrico e a identificação da empresa produtora devem figurar no mínimo em 5% dos blocos (excepto nos blocos de 50 e 75 mm em que essa percentagem pode ser reduzida a 3%). As guias de remessa devem conter a indicação da data de fabrico mais recente. São dadas indicações relativamente ao tempo mínimo de permanência em parque para que, atendendo às condições de fabrico, os blocos apresentem características de acordo com o especificado na norma. Para os blocos de inertes leves não titulares do direito de utilização da marca de conformidade *NF*, esse prazo é de 6 semanas. Para os blocos titulares desse direito o prazo pode ser reduzido, nunca sendo no entanto inferior a 10 dias.

b) **BS 6073:1**

A guia de remessa ou certificado do fornecedor deve conter a seguinte informação para cada fornecimento:

- identificação do produtor;
- resistência à compressão dos elementos de acordo com a norma em apreço;
- dimensões exteriores dos blocos;
- tipo de bloco, em termos de percentagem de furação, de acordo com 5.8.2.1.5 b).

c) **ASTM C90 e C129**

Especificam apenas que à data de expedição os blocos devem apresentar características conformes às especificadas nas normas. Os blocos para utilização não estrutural devem ter essa informação assinalada de forma inequívoca.

d) **pr EN 771-3**

A embalagem ou a guia de remessa devem conter no mínimo a seguinte informação:

- identificação do produtor;
- data de produção.

Deve haver um sistema de identificação claro dos elementos, preferencialmente através de marcação dos mesmos.

5.8.2.4.2 - *Ensaios de recepção*

a) **NF P 14-304**

As condições de recepção são as que seguidamente se descrevem, excepto para os produtos titulares da marca NF, certificados por entidade independente, de acordo com o definido no regulamento da marca .

As características a controlar são as seguintes:

- aspecto;
- características geométricas;
- amplitude das variações dimensionais;
- massa volúmica;
- resistência à compressão.

A recepção é efectuada para cada tipo de bloco ou classe de resistência solicitada.

As verificações e ensaios são efectuados num Laboratório aceite pelo fornecedor e comprador. A data de ensaio é acordada entre as partes.

O fornecimento é dividido em lotes de 5000 blocos no máximo, procedentes duma mesma produção. Um fornecimento ou uma fracção inferior a 5000 blocos são tratados como um lote.

Constituem-se duas amostras, 1 e 2, de 15 e 20 blocos cada, retirados aleatoriamente do lote e marcados de forma a identificar o lote e a amostra a que pertencem.

As verificações são efectuadas sucessivamente para as características atrás enunciadas, sendo o número de elementos requeridos para ensaio de cada uma das características o constante do Quadro 5.25. Em caso de rejeição de um lote por não conformidade de uma das características os ensaios restantes não são efectuados. A recepção é decidida através dum plano de amostragem duplo por atributos, servindo a amostra nº 2 para comprovação em caso de não conformidade da amostra nº 1.

Os blocos titulares da marca *NF* não estão em geral sujeitos a ensaios de recepção, salvo no que respeita à marcação.

Quadro 5.25 - Número de elementos constituintes das amostras, para ensaios de recepção, segundo NF P 14-304

CARACTERÍSTICAS A CONTROLAR	Nº DE ELEMENTOS REQUERIDOS POR FORNECIMENTO DE 5000 OU FRACÇÃO	
	AMOSTRA Nº 1	AMOSTRA Nº 2
Aspecto	15	8
Características geométricas	8	8
Variações dimensionais	6	2 x 6
Massa volúmica	3	2 x 3
Resistência mecânica	8	8

b) **BS 6073:1**

Deve-se colher uma amostra representativa para ensaios de recepção. Cada amostra deve ser marcada para identificação do fornecimento e do tipo de bloco. A data de colheita e de fabrico devem ser registadas. A amostra deve ser protegida de condições atmosféricas extremas.

O número de elementos constituintes da amostra para a realização dos ensaios é o constante do Quadro 5.26

Quadro 5.26 - Número de elementos constituintes da amostra para ensaios de recepção segundo BS 6073:1

CARACTERÍSTICAS A CONTROLAR	Nº DE ELEMENTOS REQUERIDOS POR FORNECIMENTO DE 1000 OU FRACÇÃO	
	ESPESSURA ≥ 75 mm	ESPESSURA < 75 mm
Dimensões	10 (disponíveis para ensaios subsequentes)	10 (disponíveis para ensaios subsequentes)
Resistência à compressão	10	-
Resistência à flexão	-	5
Variações dimensionais por retracção	4	4

CAPÍTULO 6

MODELO DE SIMULAÇÃO TÉRMICA

CAPÍTULO 6

MODELO DE SIMULAÇÃO TÉRMICA

ÍNDICE

6.1 - INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS
6.2 - MODELAÇÃO DOS PROBLEMAS TÉRMICOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS
6.2.1 - Introdução
6.2.2 - Descrição geral do Método dos Elementos Finitos
6.3 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA UTILIZADO
6.3.1 - Características e potencialidades do programa
6.3.2 - Elementos contemplados pelo programa
6.3.3 - Entrada de dados e saída de resultados
6.3.4 - Verificação de fiabilidade
6.4 - PRESSUPOSTOS DE ANÁLISE
6.4.1 - Regime e processo de transmissão
6.4.2 - Condições fronteira
6.4.3 - Características físicas admitidas para os materiais
6.4.4 - Tratamento dos alvéolos
6.4.5 - Obtenção do coeficiente de transmissão térmica - K
6.5 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE
6.5.1 - Geometria dos blocos
6.5.2 - Parâmetros a considerar na simulação
6.5.2.1 - Parâmetros geométricos
6.5.2.2 - Parâmetros físicos
6.5.3 - Tipo de elemento finito e nível de discretização
6.5.4 - Situações simuladas e resultados
6.6 - SIMULAÇÃO DE CASOS REAIS
6.6.1 - Geometrias correntes simuladas
6.6.2 - Geometria melhorada simulada
6.6.3 - Parâmetros a variar na simulação
6.6.4 - Tipos de elementos e níveis de discretização
6.6.5 - Situações simuladas e resultados
6.6 - APRECIAÇÃO DOS RESULTADOS

CAPÍTULO 6

MODELO DE SIMULAÇÃO TÉRMICA

6.1. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

Nos Capítulos 2 e 3 discutiu-se a forma de melhorar o comportamento térmico dos elementos para alvenaria a usar na envolvente das construções.

Conforme foi referido nesses Capítulos, o parâmetro que melhor caracteriza o desempenho térmico das paredes que constituem a envolvente dos edifícios é o coeficiente de transmissão térmica da parede - K (W / (m^2.ºC)).

Entre os métodos possíveis de determinação deste parâmetro, para além do recurso a valores tabelados que enfermam de alguma generalização, sobressaiam as determinações experimentais (vide 3.2.2) e o recurso a técnicas de cálculo numérico. As técnicas de cálculo numérico, ao contrário das técnicas experimentais, têm a vantagem de permitir simular diferentes geometrias e características dos materiais constituintes com custos reduzidos.

Sendo objectivo deste trabalho analisar em que medida os aspectos associados à geometria dos elementos se reflectem no seu comportamento térmico e concomitantemente no seu comportamento mecânico, optou-se por efectuar uma simulação numérica do comportamento térmico dos elementos para alvenaria, recorrendo ao método dos elementos finitos. Para o efeito utilizou-se um programa disponível na FEUP - *COSMOS/M* [193], cujas características se consideraram adequadas para o fim em vista, dado não caber no âmbito deste trabalho a produção do "*software*" eventualmente necessário.

A simulação numérica subdivide-se em 2 partes:

- Visando avaliar a influência dos principais factores que condicionam o desempenho térmico dos elementos para alvenaria e das paredes, na 1ª parte efectuou-se uma análise de sensibilidade especulativa, recorrendo a elementos, alguns sem possibilidade de materialização prática. Entre outros, os aspectos considerados mais importantes que se fizeram variar foram a orientação da furação, o número de fiadas, posição relativa, dimensões e características térmicas dos alvéolos, a condutibilidade térmica do material

constituinte dos elementos e a influência das juntas. A análise foi principalmente a duas dimensões (2D) e em alguns casos também tridimensional (3D).

- Na 2ª parte simulou-se o comportamento térmico de paredes realizadas a partir de blocos fazendo parte da produção corrente da empresa *PAVILECA*. Desenvolve-se ainda um bloco experimental, com carácter de protótipo, designado bloco *melhorado*, cujas características térmicas se simulam e que irá ser também usado na caracterização experimental.

Ao longo do Capítulo, além da descrição e caracterização do programa e dos pressupostos de análise, apresentam-se os resultados das duas vertentes da simulação.

6.2 - MODELAÇÃO DOS PROBLEMAS TÉRMICOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

6.2.1 - Introdução

O *Método dos Elementos Finitos* é actualmente uma das técnicas mais utilizadas na solução de problemas da mecânica dos meios contínuos e, em particular, tem vindo progressivamente a substituir o *Método das Diferenças Finitas*, tradicionalmente utilizado na resolução de problemas térmicos. A sua aplicação a este tipo de problemas foi por um lado incentivada pelo sucesso alcançado no domínio da Mecânica Estrutural, e por outro lado, devido à facilidade com que permite modelar geometrias e/ou condições de fronteira irregulares e complexas.

Um outro aspecto que tem contribuído para a crescente utilização do Método dos Elementos Finitos - m.e.f. - tem a ver com o grande desenvolvimento e banalização dos computadores, que permite aos investigadores dispor de poderosas ferramentas de trabalho nos mais variados domínios.

6.2.2 - Descrição geral do *Método dos Elementos Finitos*

Os principais passos da aplicação do m.e.f. são:

- formulação integral do problema (pelo método dos resíduos pesados, por métodos variacionais ou outros);
- discretização do meio contínuo;
- resolução do sistema de equações resultante.

Muitos problemas com que nos deparamos actualmente são regidos, num domínio Ω, por equações diferenciais da forma :

$$A(u) = \mathcal{R}u + p = 0 \qquad \text{em } \Omega \tag{6.1}$$

onde $\mathcal{R}$ é um operador diferencial e p é independente de u.

A equação (6.1) pode estar ainda sujeita a condições de fronteira (em Γ) que podem ter também a forma diferencial

$$B(u) = \mathcal{T}u + r = 0 \qquad \text{em } \Gamma \tag{6.2}$$

em que $\mathcal{T}$ é um operador diferencial e r é independente de u.

De um modo geral só para alguns casos simples se conhecem soluções analíticas para estas equações diferenciais, pelo que a determinação da função desconhecida u, terá de ser feita recorrendo-se a métodos numéricos. Um dos métodos mais utilizados é o *Método dos Resíduos Pesados.*

O primeiro passo na aplicação do *Método dos Resíduos Pesados* é considerar que a função u pode ser aproximada em todo o domínio Ω por

$$u \cong \hat{u} = \sum_{m=1}^{M} N_m a_m = N\,a \tag{6.3}$$

em que a_m (m = 1,2,..., M) são parâmetros a calcular e N_m (m = 1,2, ..., M) é um conjunto de funções independentes, designadas habitualmente por *funções de forma* ou de *aproximação.* Este conjunto de funções de forma deve ser escolhido de maneira a assegurar uma melhoria na aproximação, à medida que aumenta o número M de funções utilizadas, em particular $\hat{u} \rightarrow u$ à medida que $M \rightarrow \infty$.

Considera-se que $\hat{u}$ é uma boa aproximação de u, se o resíduo R_Ω no domínio Ω for pequeno [194], em que:

$$R_\Omega = A(\hat{u}) = \mathcal{R}\hat{u} + p \neq 0 \qquad \text{em } \Omega \tag{6.4}$$

No Método dos Resíduos Pesados os parâmetros a_m (m = 1,2,..., M) são escolhidos de modo a tornar nulo não R_Ω mas sim certas médias pesadas, escrevendo-se então

$$\int_\Omega W_i R_\Omega \qquad i = 1,2, ..., M \tag{6.5}$$

onde W_i (i = 1,2, ...M) é um conjunto de funções peso independentes.

No Método dos Elementos Finitos o domínio Ω é dividido em subdomínios não sobrepostos, aos quais se dá a designação de elementos. A cada elemento está associado um número de pontos discretos, os nós, localizados na sua fronteira e no interior.

Uma aproximação $\hat{u}$ da função desconhecida u, no interior de cada elemento é obtida por interpolação das variáveis nodais do elemento, através das funções de forma N_m

$$u^e \cong \hat{u} = \sum_{m=1}^{n} N_m a_m \tag{6.6}$$

sendo n o número de nós do elemento.

Se as funções de forma N_m forem definidas de modo a assumirem o valor unitário no nó m e zero em todos os restantes nós do elemento, então pode-se escrever:

$$u^e \cong \hat{u} = \sum_{m=1}^{n} N_m u_m \qquad \text{em } \Omega^e \tag{6.7}$$

onde u_m corresponde ao valor da função u no nó m. Pode-se concluir assim que *no Método dos Elementos Finitos*, quando se definem as funções de forma de acordo com o que ficou definido atrás, os parâmetros da aproximação têm um significado concreto, dependendo apenas do problema em análise (sejam temperaturas, deslocamentos, velocidades de escoamento, pressões, etc.).

O *Método dos Elementos Finitos* pode ser considerado como uma extensão *do Método dos Resíduos Pesados*, no qual as funções de forma globais (abrangendo todo o domínio e não apenas um elemento), em cada nó m, podem ser interpretadas como o resultado da associação das funções de forma dos elementos que tenham em comum esse nó [194].

Deste modo a função de forma global para o nó m, N_m, é apenas diferente de zero nos elementos ligados a esse nó, sendo nula em todos os restantes elementos. Por este motivo a matriz global resulta numa matriz em banda, o que é extremamente vantajoso em termos de redução do espaço de memória necessário para o seu armazenamento e facilita a resolução do sistema de equações respectivo.

Uma vantagem do *Método dos Elementos Finitos* consiste no facto de se utilizarem funções de forma mais simples do que as funções globais citadas anteriormente, as quais se referem a uma pequena parte do domínio (elementos). Outra vantagem reside no facto de o mesmo procedimento poder ser repetido de uma forma sistemática para todos os elementos que constituem o domínio, tornando o método atractivo para implementação em computador.

A escolha do tipo de elementos e das funções a utilizar em cada problema depende da função e do domínio a aproximar, da precisão pretendida e dos custos computacionais envolvidos. Estes aspectos são tratados por Zienkiewicz [194], por Bathe [195], entre outros, e, no caso concreto do problema da condução de calor, por Damjanic [196,197], onde foram utilizados elementos isoparamétricos de 4, 8 e 12 nós. Para o problema em estudo (condução de calor em regime estacionário) os elementos de 4 nós conduzem a bons resultados.

6.3 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA UTILIZADO

6.3.1 - Características e potencialidades do programa

Na simulação numérica utilizou-se o programa de elementos finitos *COSMOS/M* [193] (versão 1.61). Este programa desenvolvido *pela SRAC -Structural Research and Analysis Corporation* - é de origem americana, podendo ser utilizado em micro-computadores. Apresenta uma estrutura modular comportando análise estática linear, análise dinâmica linear, análise térmica, análise não linear e análise de escoamento viscoso.

Como a maioria dos programas comerciais o *COSMOS/M* é constituído por um pré-processador interactivo que controla todo o programa, um processador e um pós-processador. Dispõe ainda de um módulo de pré e pós-processamento alternativo por recurso a *CAD*.

O pré-processamento permite de uma forma interactiva desenvolver a geometria do modelo, malha, condições fronteira e submeter o modelo ao processamento. O programa dispõe de múltiplas possibilidades de verificação da coerência dos dados e ajuda "*on line*".

O acesso ao pós-processamento pode ser efectuado em qualquer altura para verificação dos dados. Após o processamento permite, além das saídas numéricas, a exibição gráfica dos resultados, através do recurso a palhete de cores para interpretação dos deslocamentos, tensões e temperaturas. Permite ainda o traçado de gráficos das diferentes variáveis em função do tempo.

O programa permite a resolução de problemas complexos por recurso à subestruturação, bem como problemas em 3D, estando limitado a 15000 nós ou elementos e 60000 graus de liberdade.

O módulo térmico permite analisar, em 2D e 3D, condução, convecção e radiação para problemas em regime estacionário ou transitório. É possível estudar problemas em que as propriedades dos materiais não são isotrópicas, dependem da temperatura e, ainda, de condições fronteira variáveis no tempo. O programa permite a consideração de diferentes materiais no mesmo problema.

6.3.2 - Elementos contemplados pelo programa

O programa *COSMOS/M* [193] dispõe de uma biblioteca de elementos para utilização em problemas de índole térmica, em 2D ou 3D. Sintetizam-se no Quadro 6.1 as características principais de cada tipo de elemento.

Quadro 6.1 - Elementos finitos possíveis de utilizar na análise térmica no programa *COSMOS/M*

ELEMENTO				CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS PARA ANÁLISE TÉRMICA (1)		OBSERVAÇÕES
TIPO	NOME	NÓS	GRAUS LIB. NÓ	GEOMÉTRICAS	FÍSICAS	
Barra	TRUSS 2D TRUSS 3D	2	2 (2D) 3(3D)	A, P	λ, ρ, Cp, β	
Viga	BEAM 2D BEAM 3D	2	3(2D) 6(3D)	A, P	$\lambda, \rho, Cp\ \beta$	
Massa concentrada	MASSA	1	6	-	q	
Placa	PLANE 2D	4 a 8	2	e	$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z, \rho, Cp, \beta_x, \beta_y, \beta_z$	Modelos planos ou axissimétricos
Casca triangular	SHELL 3	3	6	e ΔT	λ, ρ, Cp, β	Modelos isotrópicos e não isotrópicos
Casca quadrilatera	SHELL 4	4	6	e ΔT	λ, ρ, Cp, β	Modelos isotrópicos e não isotrópicos
Sólido	SOLID	8 a 20	3	-	$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z, \rho, Cp, \beta_x, \beta_y, \beta_z$	Modelos ortotrópicos
Sólido tetraedrico	TETRA 4 TETRA 10	4 10	3	-	λ, ρ, Cp, β	
Radiação térmica	RLINK	2	1	A, F	σ, ε	Simula a radiação térmica entre 2 nós
Convecção térmica	CLINK	2	1	A	h	Simula a convecção térmica entre 2 nós

(1) Simbologia - ***A*** *- área,* ***P*** *- Perímetro,* ***e*** *- espessura,* ***F*** *- factor de forma,* ***q*** *- produção de calor,* λ *- condutibilidade térmica,* ρ *- massa volúmica,* ***Cp*** *- calor específico a pressão constante,* β *- coeficiente de dilatação térmica,* ε *- emissividade,* σ *- constante Stefan -Boltzman,* ***h*** *- condutância térmica*

Na simulação do comportamento térmico de elementos para alvenaria, os elementos finitos mais adequados no caso de análise plana (2D), são o "*PLANE 2D*", "*SHELL 3*" e "*SHELL 4*". Estes elementos podem ser usados em problemas isotrópicos ou não.

Os elementos "*PLANE 2D*" e "*SHELL 3*" conduzem a soluções convergentes. A opção pelos elementos triangulares ou rectangulares está associada à geometria do modelo. Os primeiros são mais adequados à definição automática da malha.

Para uma análise tridimensional (3D) os elementos mais adequados são os elementos "*SOLID*" (8 nós). A malha de elementos finitos 3D por recurso ao elemento finito "*SOLID*", pode ser obtida por extrusão da malha gerada em 2D com o elemento "*PLANE 2D*"

6.3.3 - Entrada de dados e saída de resultados

a) **Entrada de dados**

A simulação numérica do comportamento térmico dos elementos para alvenaria por recurso ao programa *COSMOS/M* requer a definição geométrica do modelo e da malha respectiva.

O programa permite efectuar essa definição de forma relativamente simples e interactiva. A definição da malha pode ser automática ou manual.

A sequência de introdução de dados é a seguinte:

- definição dos nós do problema;
- definição de um grupo de elementos, compreendendo selecção do tipo de elemento, características geométricas, definição das características físicas do material e geração da malha da zona onde existe o material em apreço;
- repetição do processo para outros grupos de elementos;
- definição das condições fronteira;
- verificação da coerência dos dados, definição do tipo de resultados pretendidos dentro das possibilidades do programa;
- processamento.

A geração dos nós e malhas é facilitada pela existência de múltiplas possibilidades e ferramentas pré-definidas que simplificam esta fase do trabalho.

Conforme já foi referido, as características geométricas e propriedades físicas são função do tipo de elemento e do tipo de problema em análise.

As condições fronteira contempladas pelo programa, em análise térmica, são:

- estabelecimento de temperaturas nos nós;
- estabelecimento de produção interna de calor em nós ou elementos;
- estabelecimento de fluxo de calor em nós ou faces de elementos;
- estabelecimento de convecção na superfície dos elementos;
- estabelecimento de condições associadas a radiação nas faces do elemento.

Estas condições podem ser estabelecidas de forma estacionária ou variável no tempo.

b) **Saídas de resultados**

Os resultados da simulação térmica que podem apresentar-se de forma numérica ou gráfica são:

- temperaturas nos nós para um dado intervalo de tempo;
- gradiente de temperatura [(1)] nos nós para um dado intervalo de tempo (vd.3.4.2);
- fluxo nos nós na unidade de tempo, ou acumulado para todos os intervalos de tempo.

c) **Exemplo**

Com o objectivo de ilustrar de forma prática o que se acabou de descrever apresenta-se no Anexo II, para um problema de referência (vd. 6.3.3), listagem dos ficheiros de entrada de dados e saída de resultados.

6.3.4 - Verificação de fiabilidade

Um dos problemas associados aos métodos de simulação numérica é a determinação do erro da solução obtida, dado que estes métodos apenas fornecem uma aproximação da solução exacta.

Os erros de arredondamento, devido ao facto dos computadores trabalharem com um número finito de algarismos, são muito pequenos, uma vez que as máquinas trabalham hoje com um número grande de algarismos significativos. O erro resultante da discretização efectuada depende do tamanho dos elementos e das funções de interpolação utilizadas (funções de forma), uma vez que elas têm de ser capazes de reproduzir a solução exacta.

No m.e.f. o erro diminui, aumentando a convergência, à medida que a dimensão característica do elemento diminui, ou aumenta o grau dos polinómios das funções interpoladoras[194].

---

(1) O gradiente térmico segundo uma dada direcção x, é igual à derivada parcial da temperatura em ordem a x, $\partial T/\partial x$

Com o objectivo de verificar a fiabilidade do programa, o manual do mesmo apresenta um conjunto de problemas resolvidos para cada domínio e a comparação dos resultados conseguidos por recurso ao programa *COSMOS/M* com os resultados obtidos por via analítica. Nos problemas apresentados os resultados são muito próximos ou iguais aos resultados teóricos.

Conforme já foi referido em 3.3.2.3, no caso da determinação através de cálculo numérico das características térmicas dos elementos e das alvenarias, existe um projecto de norma *CEN* [64] que para além de definir os requisitos a que devem satisfazer os programas de cálculo numérico, apresenta algumas geometrias de elementos para alvenaria de referência, com as respectivas características térmicas. Os resultados obtidos por recurso a qualquer programa, devem, de acordo com o referido projecto de norma, não diferir mais de 2% dos resultados apresentados.

Efectuou-se esta verificação para a geometria constante da fig. 6.1, tendo-se admitido os pressupostos e obtido os resultados constantes do Quadro 6.2. Os resultados constantes do documento *CEN* [64] e os resultados obtidos por recurso ao programa *COSMOS/M* diferem apenas de 0.4 %, pelo que se considera que o programa respeita as exigências do documento de referência.

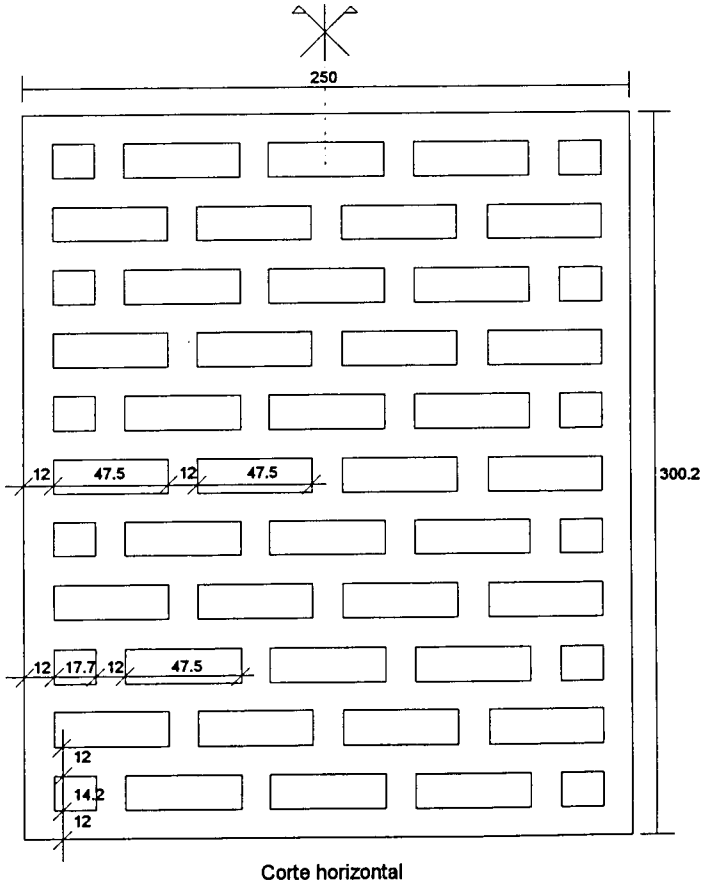


Fig. 6.1 - Geometria do elemento de referência

Quadro 6.2 -Verificação da fiabilidade do programa para elemento de referência - Síntese de pressupostos e resultados

COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DO ELEMENTO DE REFERÊNCIA		
Pressupostos comuns		
• λ material constituinte	-	0.35 W / (m .ºC)
• Condições fronteira (resistências térmicas superficiais)		$1/h_i$ = 0.13 m^2.ºC / W (1) $1/h_e$ = 0.04 m^2.ºC / W
• Espaços de ar 0,0142m x 0,0475m - 0,0142m x 0,0177m -		 R = 0.1731 m^2.ºC / W R = 0.1920 m^2.ºC / W
• Simplificação de simetria		

Resultados em 2D	
Valor de Referência *CEN*	*COSMOS/M*
K = 0.5656 W/(m^2.ºC)	Tipo de elemento - PLANE 2D Nº de elementos - 207 K = 0.5677(2) W/(m^2.ºC)

(1) valor não coincidente com o preconizado no *RCCTE* [8]

6.4 - PRESSUPOSTOS DE ANÁLISE

6.4.1 - Regime e processo de transmissão

Sendo o coeficiente de transmissão térmica da parede - K - o parâmetro que melhor caracteriza o comportamento térmico das paredes que realizam a envolvente dos edifícios, os documentos de carácter regulamentar fixam o valor máximo que o mesmo poderá atingir, em função das características climáticas da zona onde se localiza a construção.

No caso da regulamentação portuguesa, *RCCTE* [8], a apresentação dos valores de referência e máximo do - K- foi efectuada para as três zonas climáticas de Inverno em que o país se divide, no Quadro 2.7. Á luz do *RCCTE*, o coeficiente de transmissão térmica das paredes da envolvente é imprescindível para a quantificação das necessidades nominais de aquecimento, sob o ponto de

vista de conforto de Inverno e, também, no cálculo das necessidades nominais de arrefecimento, sob o ponto de vista de conforto de Verão. O cálculo destas necessidades admite condições convencionais no interior e exterior do edifício para as duas estações típicas, permitindo comparar de uma forma objectiva diferentes edifícios.

Por esse facto, considerou-se que a forma mais objectiva de avaliar o comportamento térmico dos elementos que temos vindo a analisar neste trabalho, quando usados na realização da alvenaria de paredes exteriores, será determinar o coeficiente de transmissão térmica da parede com eles realizada, através de modelo de simulação numérica, em regime permanente e condições estacionárias de temperatura interior e exterior. Subsiste, no entanto, o problema da parede de alvenaria ser constituída não exclusivamente pelos elementos principais (tijolos, blocos, etc.), mas também por elementos complementares, cuja existência deve ser considerada. Destacam-se as juntas verticais e/ou horizontais que aglutinam os elementos, os revestimentos que de um ou ambos os lados da parede a homogeneízam e lhe dão um aspecto acabado, e mesmo outros elementos que poderão integrar a parede como, por exemplo, os isolantes térmicos. Acresce ainda o facto de estes materiais e produtos se poderem combinar de múltiplas formas, fazendo crescer de forma significativa o número de soluções alternativas.

Achou-se conveniente admitir que todas as paredes são rebocadas interior e exteriormente, com argamassa de 20 mm de espessura. Quanto às juntas, considerou-se que as alvenarias eram sempre argamassadas com juntas horizontais, no mínimo. No entanto, admitiram-se argamassas de assentamento e reboco com espessura, configuração das juntas e características físicas (particularmente condutibilidade térmica) diversas.

Atendendo ao interesse óbvio em poder comparar o coeficiente de transmissão térmica obtido por simulação numérica, com as exigências regulamentares para as hipotéticas soluções de parede, preferiu-se fazer intervir, além das resistências térmicas do tosco da parede e respectivos revestimentos, as resistências térmicas superficiais interior e exterior constantes do *RCCTE*, para paredes sujeitas a fluxo horizontal. Esta assunção, bem como a de admitir-se a existência do reboco em ambas as faces, tem como inconveniente o facto de diluir parcialmente a influência dos elementos para alvenaria, sob o efeito conjunto destes factores. Considera-se, no entanto que as vantagens já referidas são mais importantes, tanto mais que a influência dos revestimentos e das resistências térmicas superficiais é mais relevante nas soluções de paredes menos isolantes.

Dado que o referido coeficiente de transmissão térmica - K - se expressa por unidade de área e por unidade do gradiente de temperatura entre dois ambientes, a área da parede constituinte da envolvente e o valor arbitrado para as temperaturas que se admitem estacionárias no interior e exterior da construção, não têm importância.

6.4.2 - Condições fronteira

De acordo com o expresso anteriormente, optou-se por considerar como limites da zona a modelar o volume associado às dimensões de coordenação do elemento, isto é, as dimensões do elemento para alvenaria, acrescidas de metade das juntas horizontais e verticais adjacentes ao elemento, fig. 6.2. Admitiram-se as seguintes condições fronteira:

- temperatura interior imposta e estacionária - 20 °C;
- convecção e radiação na superfície interior do revestimento da parede - $1/h_i$ (*RCCTE*) - 0.12 m^2.°C/W;
- temperatura exterior imposta e estacionária - 0 °C;
- convecção e radiação na superfície exterior do revestimento da parede - $1/h_e$ (*RCCTE*) - 0.04 m^2.°C/W;
- limites vertical e horizontal da unidade elementar a estudar considerados como fronteiras adiabáticas.

As condições de fronteira adiabática são reais e resultam da geometria e condições de simetria da parede.

As condições estacionárias de temperatura, convecção e radiação no exterior e interior são convencionais e têm por objectivo permitir comparar os resultados com os requisitos regulamentares, como já foi discutido no ponto anterior. Quanto ao gradiente de temperatura de 20 °C admitido entre os ambientes interior e exterior, o seu estabelecimento foi arbitrário, procurando traduzir situações típicas de paredes exteriores em Portugal durante o Inverno. O valor do referido gradiente não afecta o valor do coeficiente de transmissão térmica.

Efectuou-se uma simulação a 2D e 3D. Na simulação a 2D não é possível avaliar a influência das juntas horizontais nem da variação da geometria do elemento segundo "*Z*", pois apenas se avaliam as transmissões de calor no plano "*XY*". Na simulação a 3D o efeito das juntas horizontais já é quantificado.

A generalidade da simulação foi efectuada em 2D, pois requer menos tempo de cálculo e permite avaliar a influência dos aspectos geométricos que condicionam a concepção dos elementos para alvenaria mais importantes. Em algumas geometrias efectuou-se a simulação a 3D, para avaliar a influência dos parâmetros que a simulação a 2D não permite explicitar, fundamentalmente associados às juntas horizontais e eventual existência de fundos cegos. O tipo de elementos utilizados a 2D e 3D são necessariamente diferentes, bem como o nível de discretização no plano "*XY*" que é muito superior à discretização segundo "*Z*".

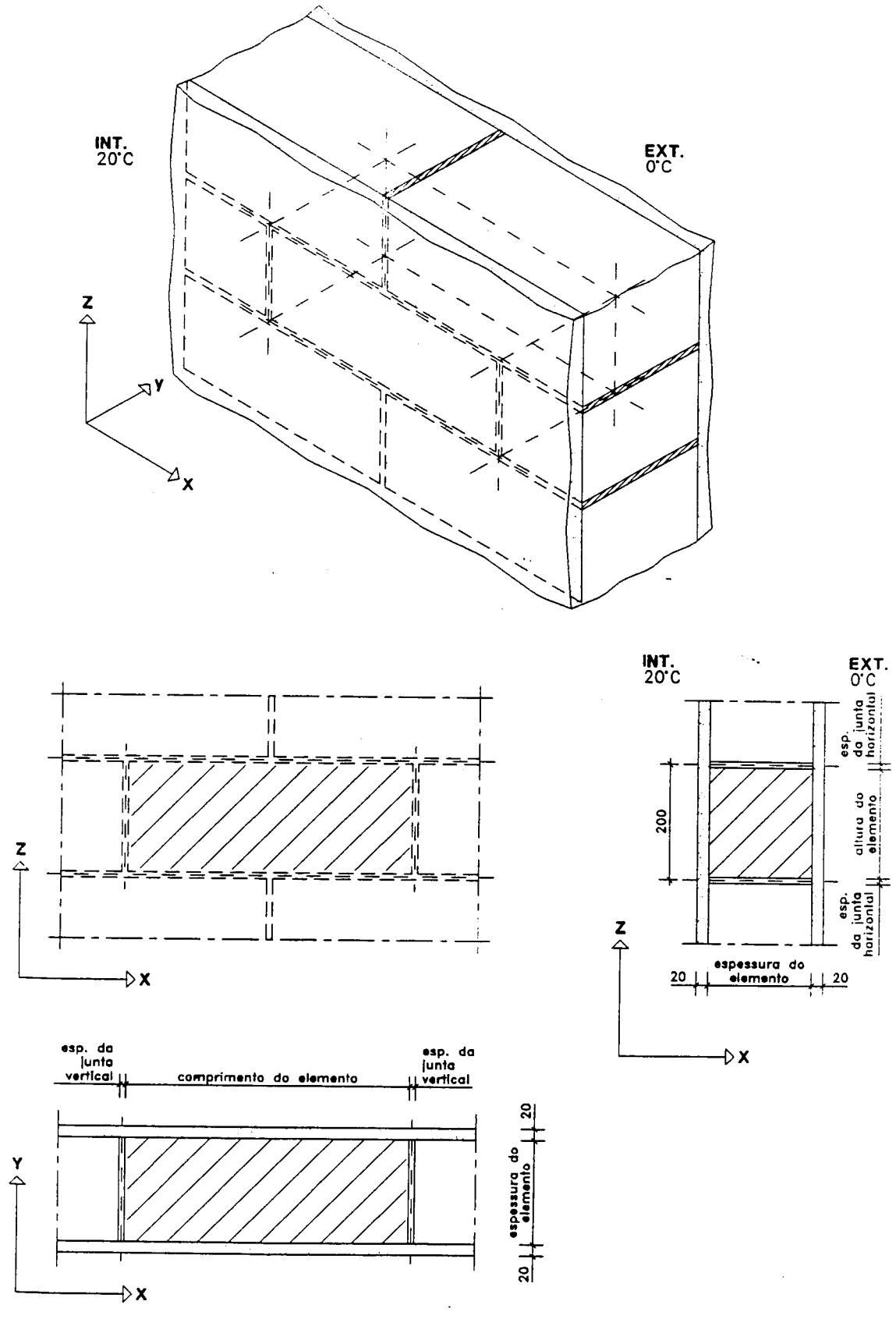


Fig. 6.2 - Unidade elementar a simular

6.4.3 - Características físicas admitidas para os materiais

Conforme já foi referido a simulação respeitou a 2 situações:

- análise de sensibilidade;
- simulação de casos reais.

As características físicas requeridas para a simulação são apenas:

λ - condutibilidade térmica (W/(m.ºC)).

No caso da simulação de casos reais, a condutibilidade térmica e massa volúmica do betão usado na confecção dos blocos, bem como das argamassas de assentamento e reboco utilizadas, foram objecto de determinação experimental.

No caso da simulação especulativa arbitraram-se valores da condutibilidade térmica dos materiais constituintes da parede, nomeadamente betão usado na confecção dos blocos, argamassa de assentamento e reboco, variando entre pouco isolantes e muito isolantes, mas todos eles passíveis de produção industrial.

6.4.4 - Tratamento dos alvéolos

A discussão dos fenómenos de condução, radiação e convecção em espaços de ar, foi efectuada no Capítulo 3. Correntemente a parcela de transmissão que se revela mais importante é a devida à radiação.

Atendendo ao tipo de análise que se pretende levar a cabo, a determinação rigorosa da resistência térmica dos alvéolos é fundamental.

O programa *COSMOS/M* permite simular o comportamento térmico de espaços sujeitos a fenómenos de convecção e radiação, embora, dado tratar-se de um programa comercial, não seja possível conhecer todas as hipóteses subjacentes a essa determinação.

Assim sendo, optou-se por efectuar um pequeno programa que em separado determinasse a resistência térmica do alvéolo.

A elaboração da referida subrotina seguiu a seguinte metodologia:

- estabelecer dimensões do alvéolo (vd. fig. 3.4 - alvéolo rectangular);
- arbitrar, de forma aproximada, o gradiente de temperaturas entre as faces do alvéolo perpendiculares ao fluxo;
- admitir que as propriedades do ar são constantes e relativas a uma temperatura média de 10 °C;
- determinar as condutâncias térmicas da seguinte forma:

  - Convecção - h_c (vd. 3.4.3)

    - calcular os números ***Pr*** e ***Gr***, para o ar a 10 °C:

      $$\boldsymbol{Ra} = 12.2808 \times 10^7 \, \Delta T.e^3$$

      $$\boldsymbol{Gr} = 17.2 \times 10^7 \, \Delta T.e^3$$

    - adoptar, das expressões (3.21) a (3.23), a mais ajustada à geometria do alvéolo, para o cálculo de ***Nu*** ;
    - Calcular $h_c = (\boldsymbol{Nu}.\lambda_{ar}) / e$;

  - Radiação - h_r (vd. 3.4.4)

    - arbitrar a temperatura nas faces do alvéolo paralelas ao fluxo $T_m = (T_1 + T_2) / 2 = 283$ K;
    - determinar os factores de forma do alvéolo - F_{kj};
    - resolver o sistema (3.48) em ordem a q_k, com $q_k = Q_k / A_k$;
    - calcular $h_r = q_{max} / \Delta T$

  - Total - h (vd. 3.4.5)

  - A condutância térmica total $h = h_c + h_r$ e a resistência térmica respectiva:

    $R = 1/(h_c + h_r)$.

Determinada a resistência térmica do espaço de ar em função das suas características efectivas, a mesma é transformada numa resistência térmica equivalente:

$$\lambda_{equiv} = e/R = e.(h_c + h_r) = e.h_c + e.h_r = \lambda_{equiv\,c} + \lambda_{equiv\,r} \qquad (6.8)$$

Esta condutibilidade térmica equivalente resulta do quociente da resistência térmica pelo desenvolvimento do alvéolo na direcção do fluxo. De forma simplista, equivale a transformar o espaço de ar num material equivalente que assegure uma resistência térmica idêntica, podendo ser subdividida na parcela de convecção e de radiação.

O conceito de condutibilidade equivalente aparece referido em algumas referências:

- a bibliografia de origem alemã aplica este conceito não só aos alvéolos, mas mesmo à totalidade da alvenaria, dividindo o coeficiente de transmissão térmica -K - pela espessura da parede [88];

- os documentos *CEN* que enquadram os métodos de determinação das características térmicas das alvenarias e produtos para alvenaria usam também este conceito [64,65].

6.4.5 - Obtenção do coeficiente de transmissão térmica - K

Referiram-se em 6.3.3 as saídas de resultados contempladas pelo programa *COSMOS/M* e ilustradas no Anexo II.

A partir do ficheiro de resultados contendo o fluxo nos nós dos elementos, a determinação do coeficiente de transmissão térmica -K - seguiu a seguinte metodologia:

- somatório dos fluxos nos nós ao longo da face em contacto com o ambiente exterior ou interior (os fluxos são iguais em valor absoluto e de sinal contrário);
- determinação do - K -"como quociente do somatório dos fluxos parcelares, pela área da face em contacto com o exterior e pelo gradiente de temperatura:

$$K = \frac{Q}{A.\Delta T} \tag{6.9}$$

em que :

Q - Fluxo de calor (W);

A - Área em contacto com o exterior (m^2);

ΔT - Gradiente de temperatura entre o ar interior e exterior (ºC).

6.5 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

6.5.1 - Geometria dos blocos

Já foram referidos nos pontos anteriores os pressupostos em que se fundamentaram a análise de sensibilidade e a simulação de casos reais, com destaque para o regime permanente de transmissão, condições fronteira interiores e exteriores e dimensões do módulo base a tratar.

No caso da análise de sensibilidade, admitiu-se um conjunto de geometrias que permitem individualizar a influência dos principais parâmetros de carácter geométrico que condicionam o desempenho térmico dos elementos para alvenaria. Todas estas geometrias respeitam a dimensão de coordenação 500 mm x 290 mm x 200 mm (comp. x larg. x alt.), sendo as dimensões efectivas do elemento 490 mm x 250 mm x 190 mm (comp. x larg. x alt.), as juntas verticais e horizontais de 10 mm e o reboco de 20 mm em ambas as faces.

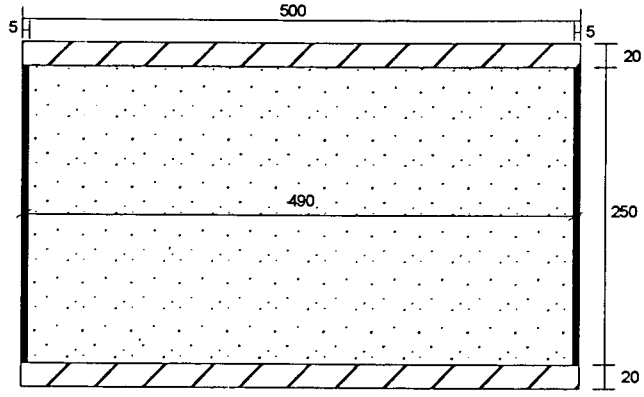
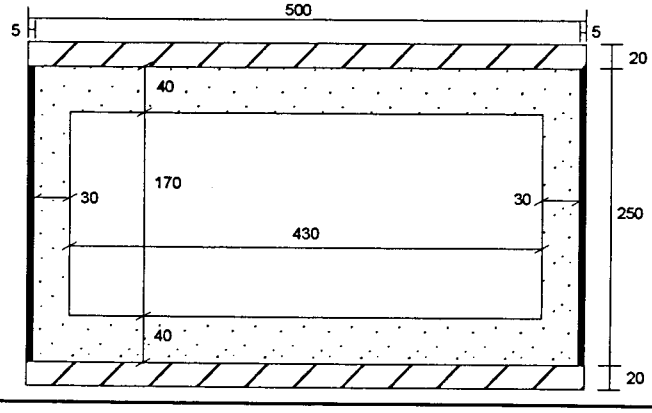
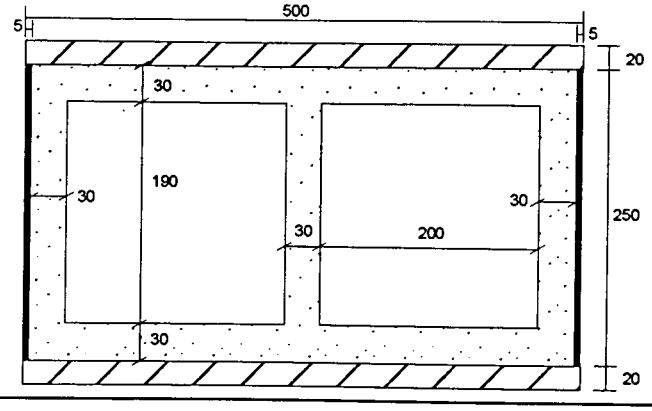
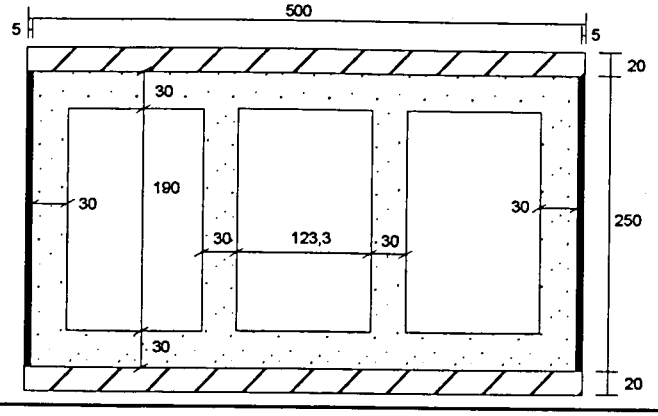
Grande parte destas geometrias seriam passíveis de produção industrial, embora na sua definição se tenha sempre privilegiado a explicitação dos aspectos geométricos em análise, em prejuízo da possibilidade de materialização física .

No conjunto de Quadros 6.3 apresenta-se a definição em planta das diferentes geometrias.

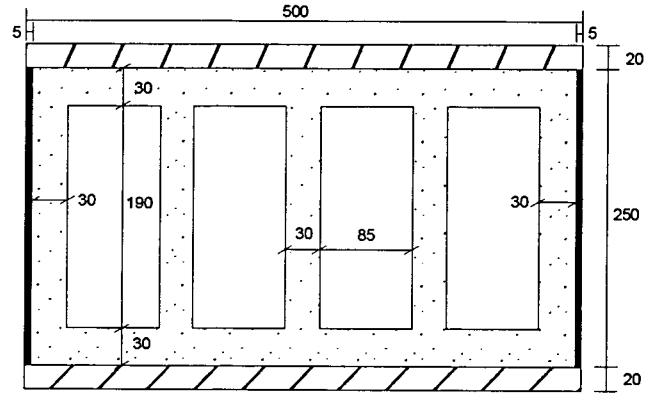
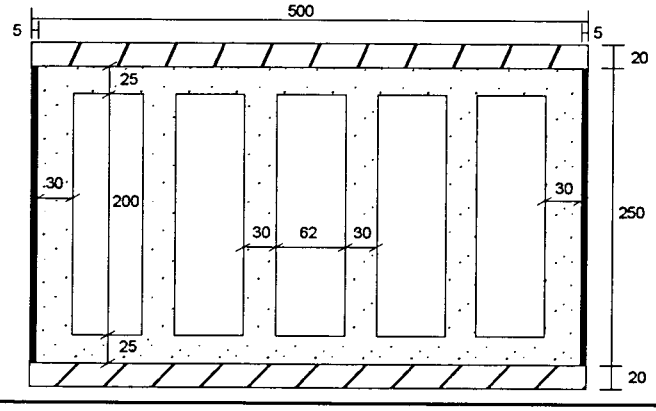
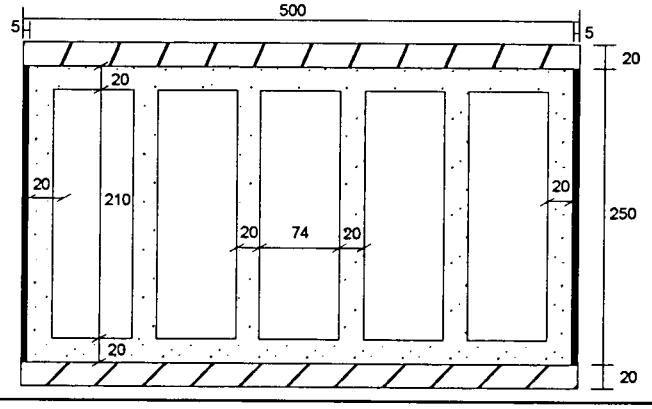
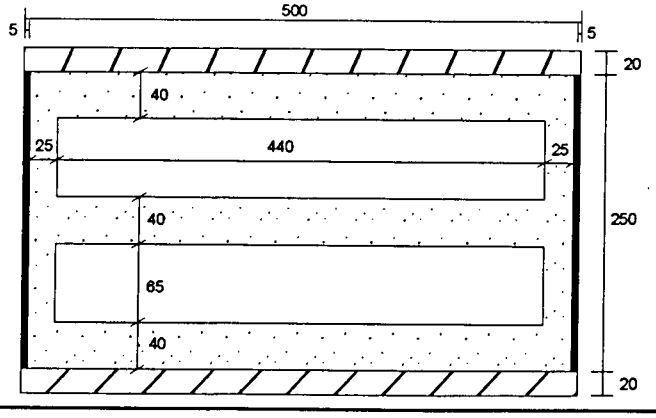
Com interesse apenas para a análise em 3D, refere-se que foi considerada a existência de um fundo cego de 10 mm em todas as geometrias para suporte da junta horizontal de argamassa , fig. 6.3.

Na análise em 3D considerou-se ainda a possibilidade da alvenaria ter juntas horizontais delgadas, de 3 mm de espessura, realizadas com argamassa-cola. Neste caso admitiu-se que a espessura do fundo cego para receber a argamassa era apenas de 5 mm, dado os elementos para assentamento com juntas delgadas serem objecto dum maior rigor dimensional.

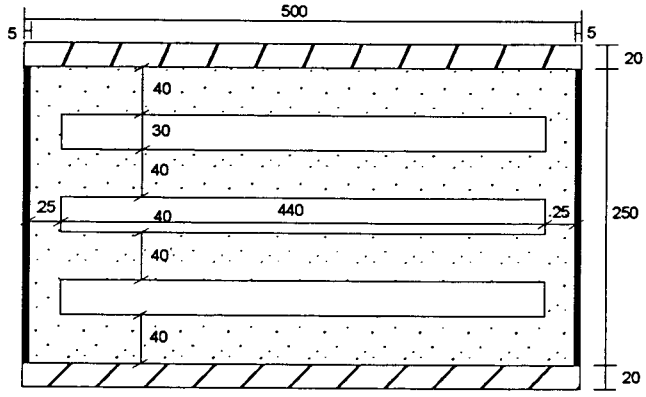
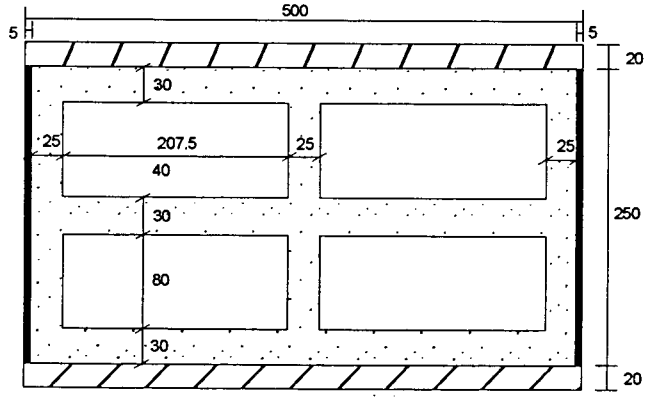
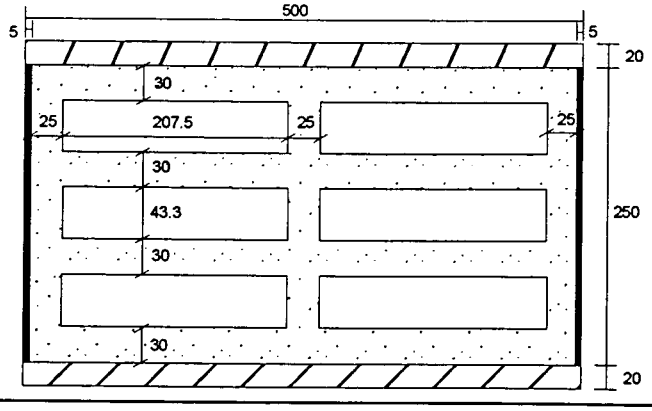
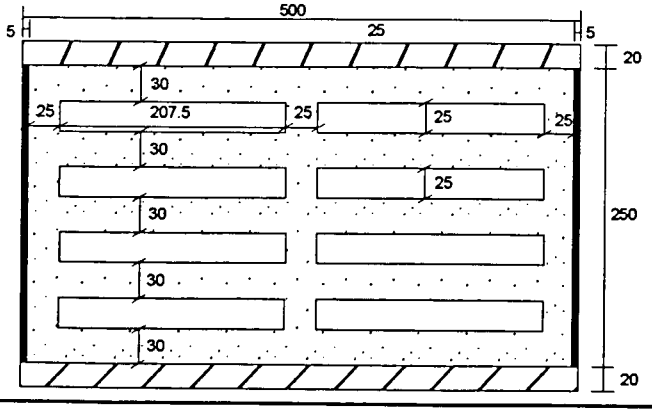
Quadro 6.3 - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade - I

REF[a]	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B01		16
B02		1
B03		4
B04		1

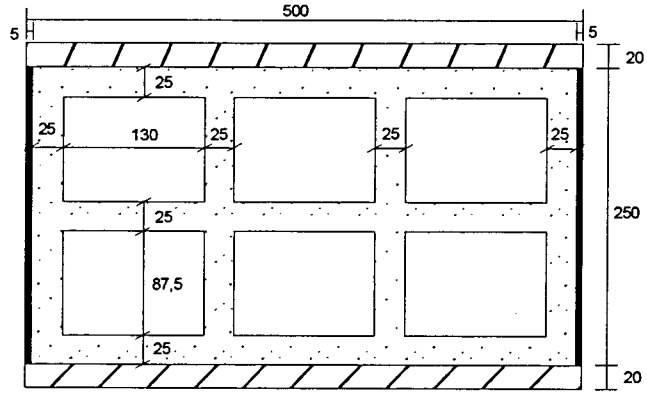
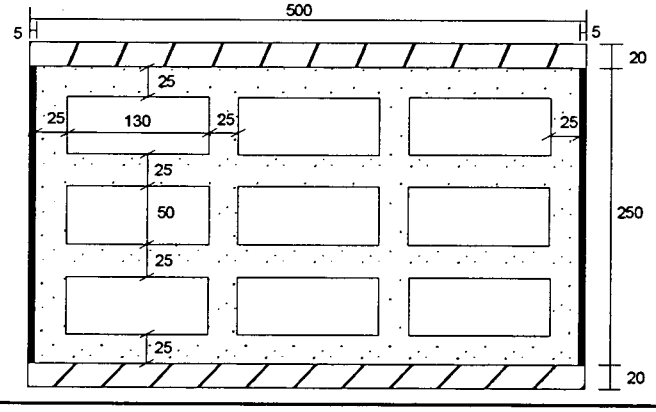
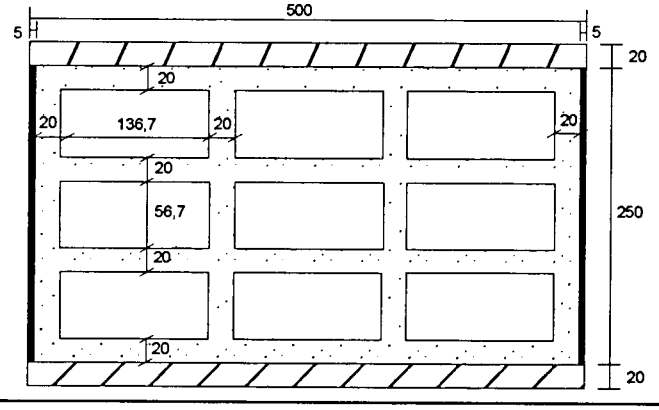
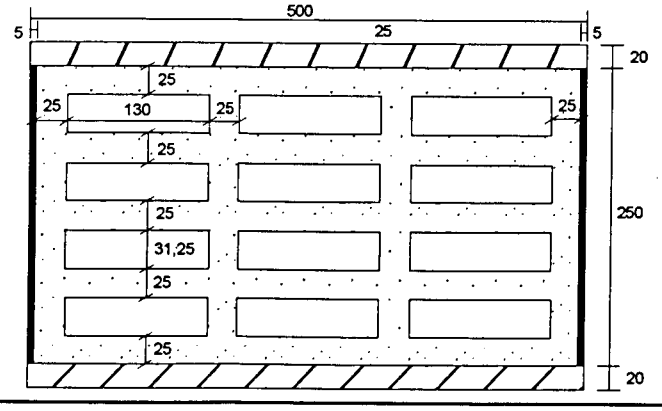
Quadro 6.3 (cont.) - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade -II

REF[a]	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B05		1
B06		6
B06A		3
B07		1

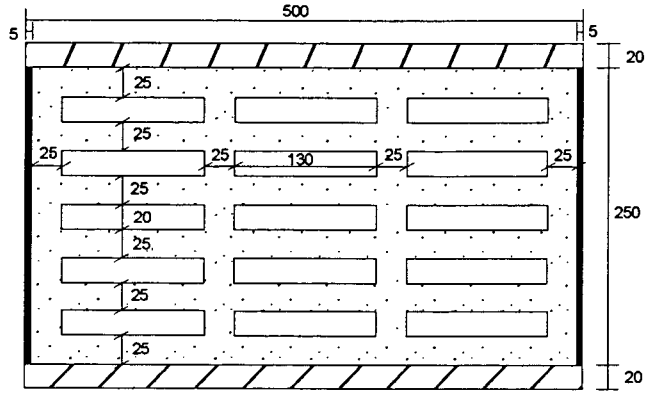
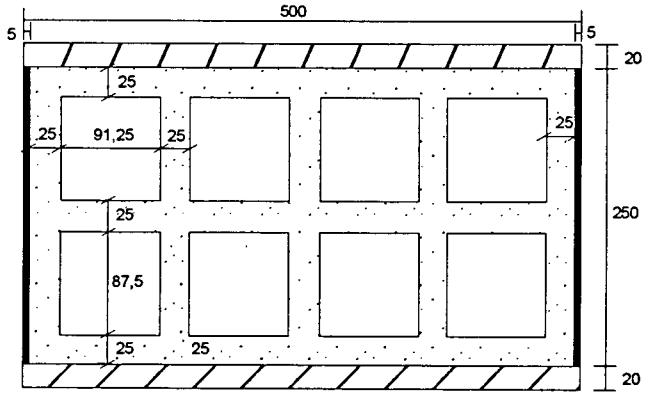
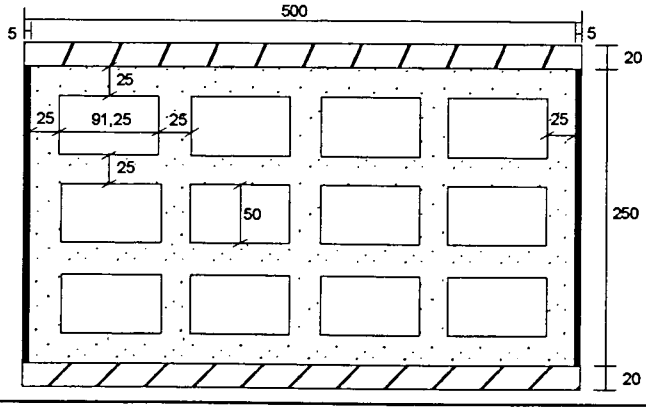
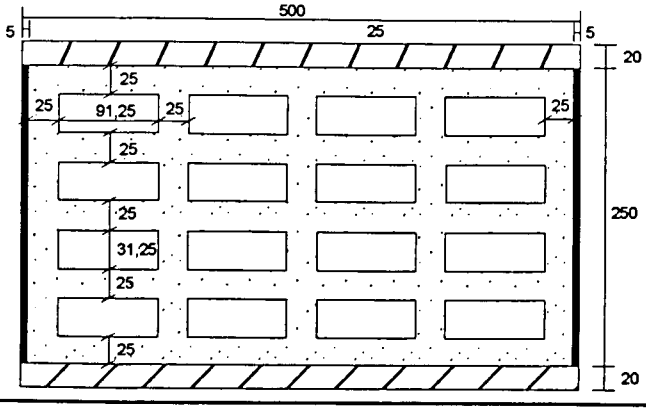
Quadro 6.3 (cont.) - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade -III

REF[a]	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B08		13
B09		4
B10		1
B11		14

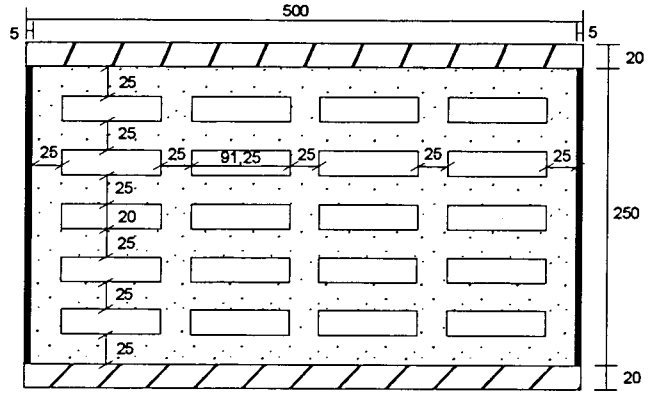
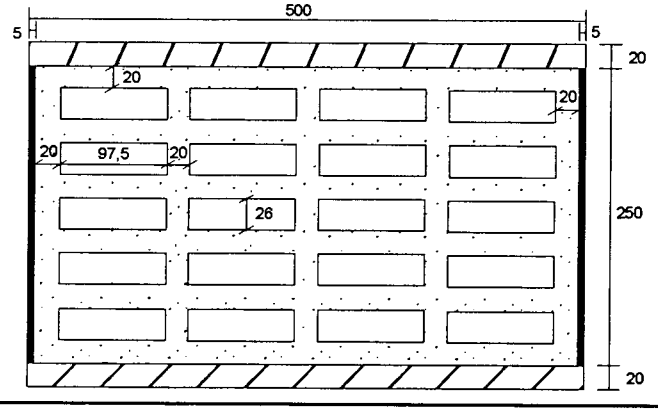
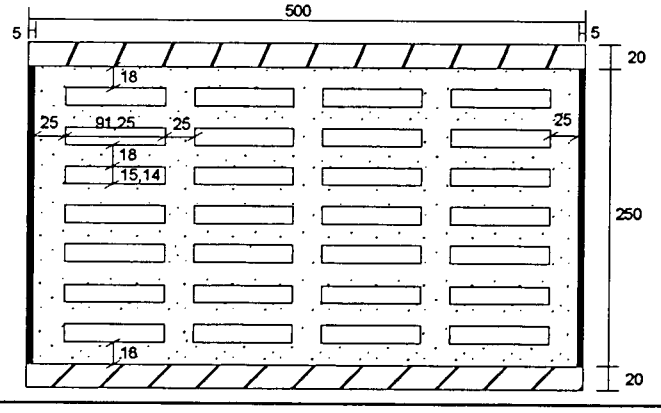
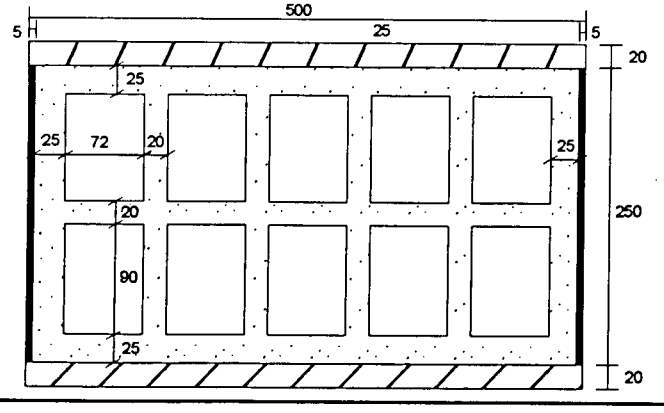
Quadro 6.3 (cont.) - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade -IV

REF[a]	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B12		1
B13		4
B13A		3
B14		1

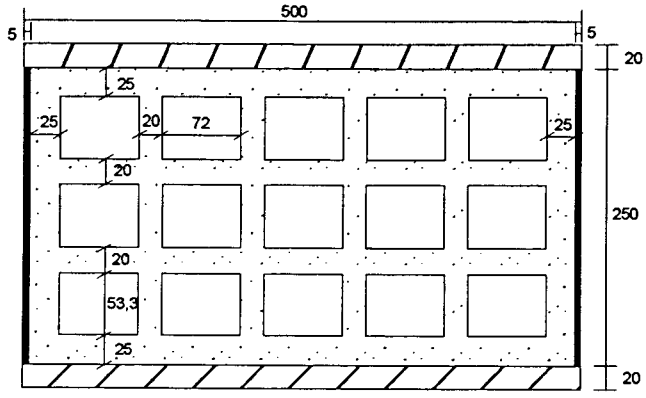
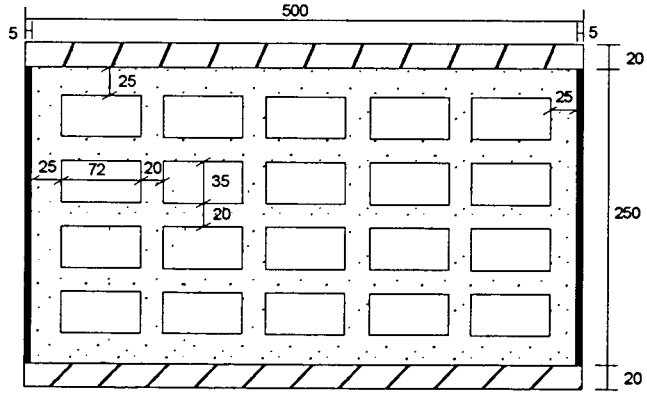
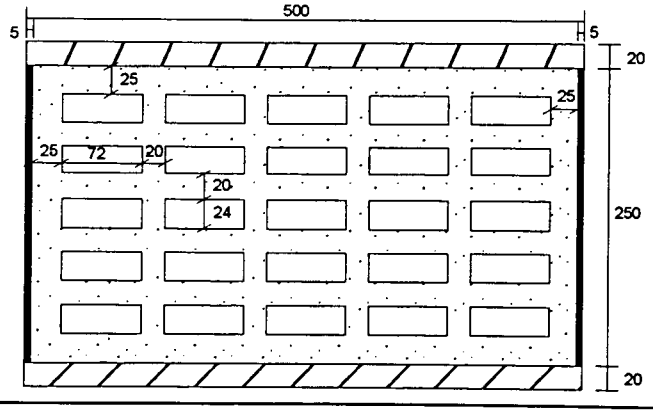
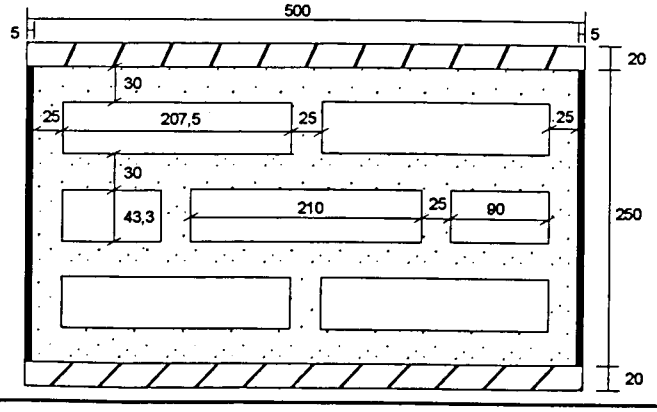
Quadro 6.3 (cont.) - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade -V

REF[a]	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B15		17
B16		1
B17		4
B18		1

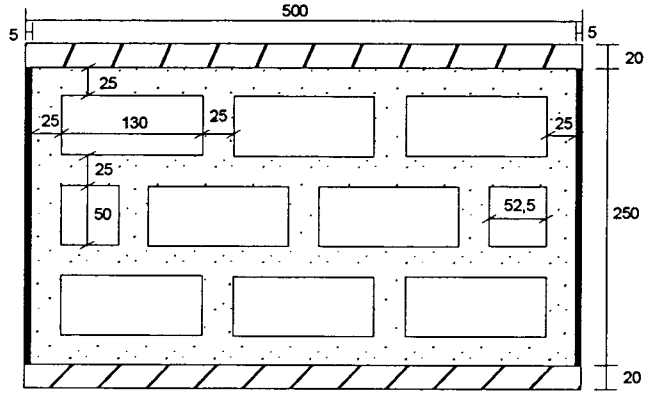
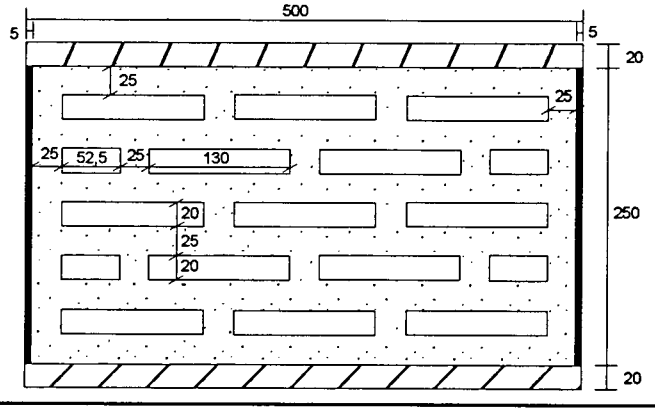
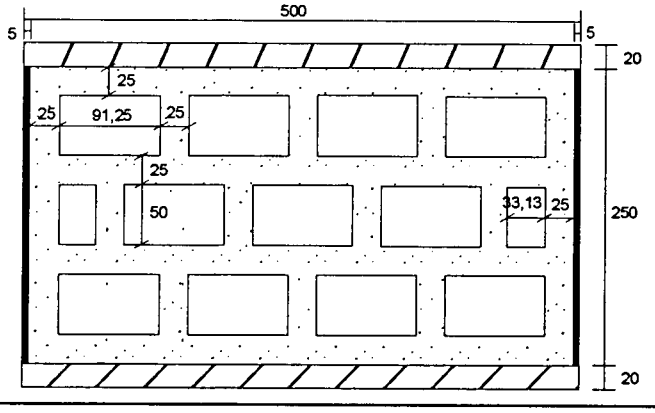
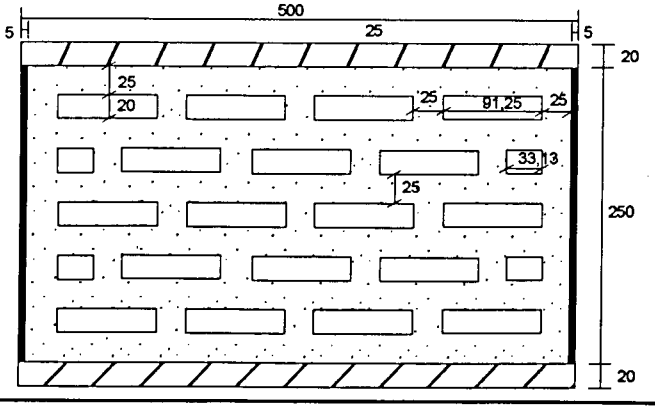
Quadro 6.3 (cont.) - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade -VI

REF[a]	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B19		16
B19A		3
B20		8
B21		1

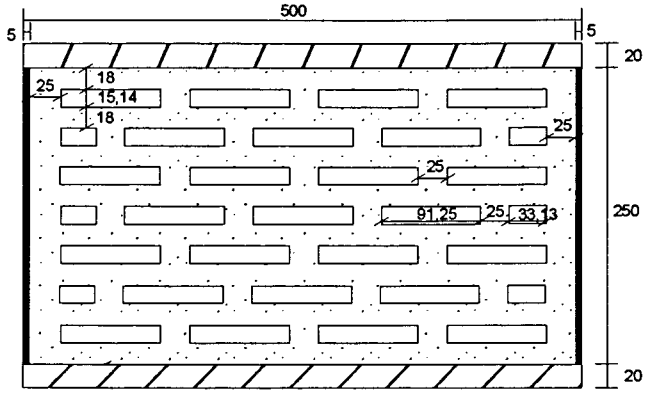
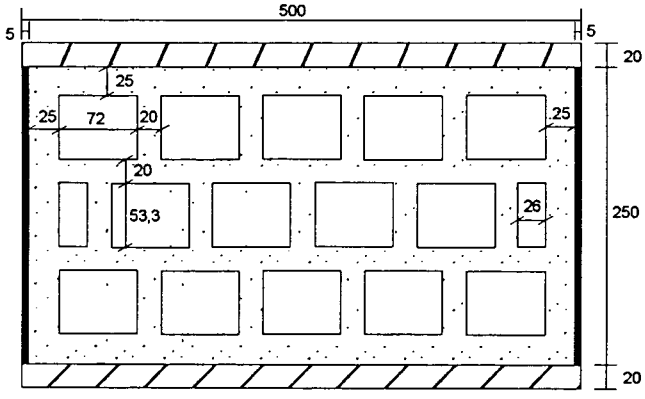
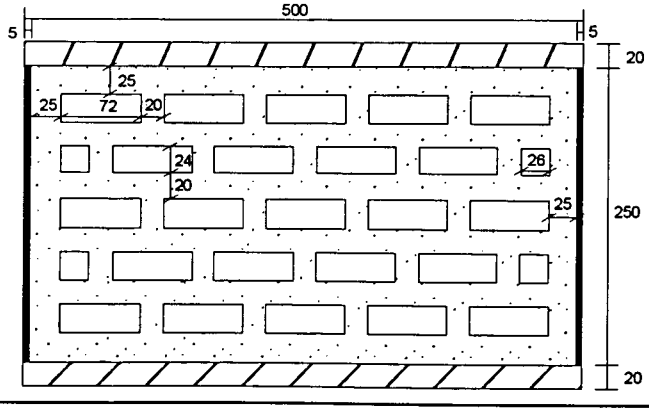
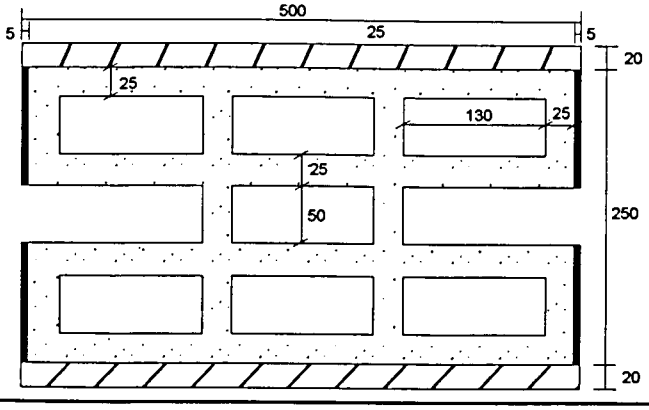
Quadro 6.3 (cont.) - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade -VII

REFª	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B22		4
B23		1
B24		14
B25		1

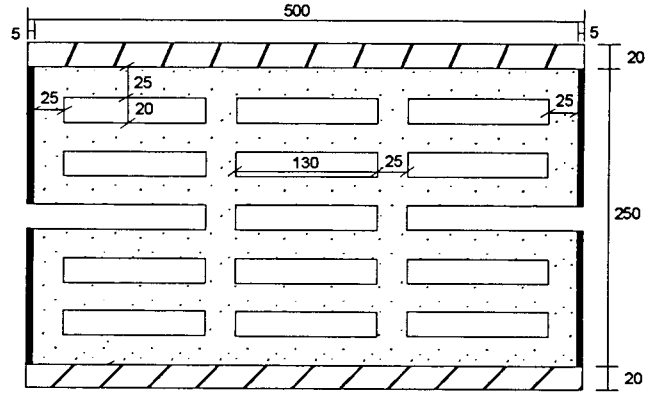
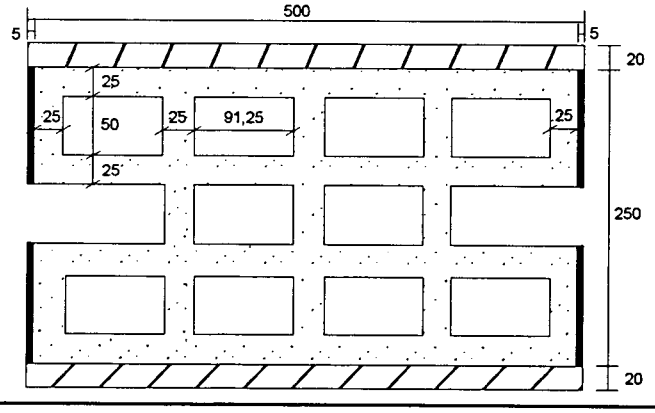
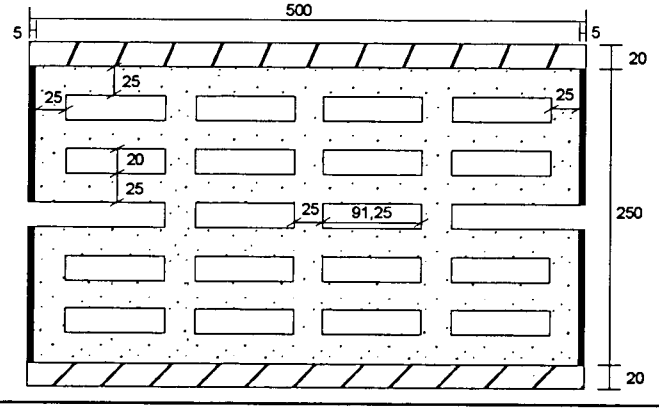
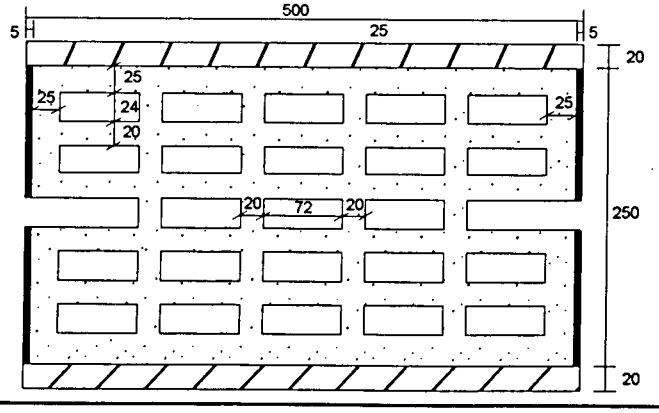
Quadro 6.3 (cont.) - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade -VIII

REF[a]	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B26		4
B27		16
B28		4
B29		8

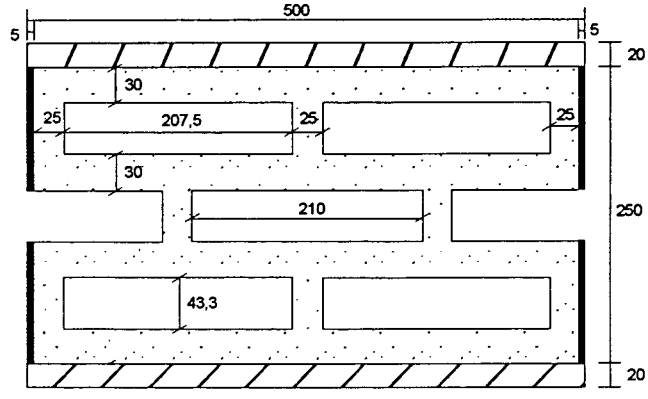
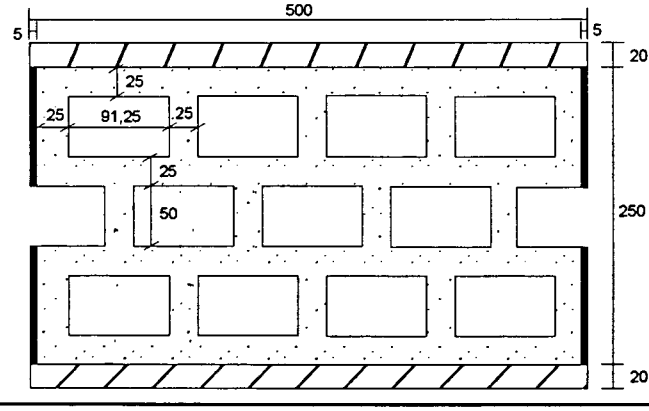
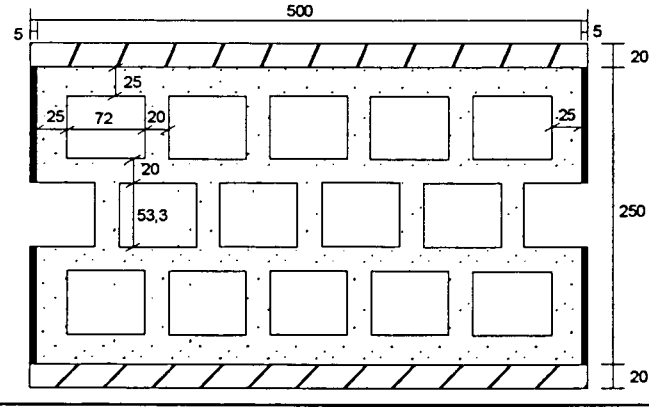
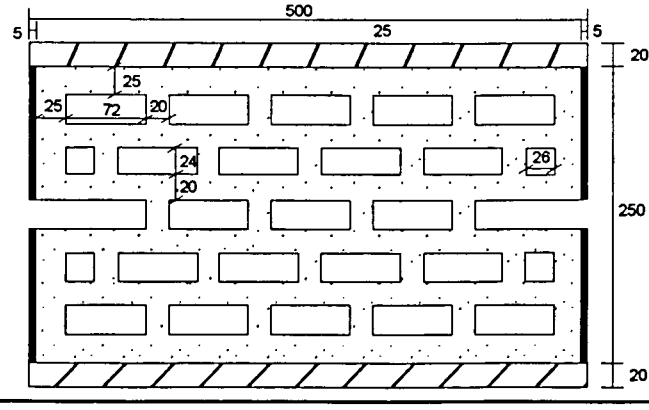
Quadro 6.3 (cont.) - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade -IX

REF[a]	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B30		9
B31		4
B32		7
B33		3

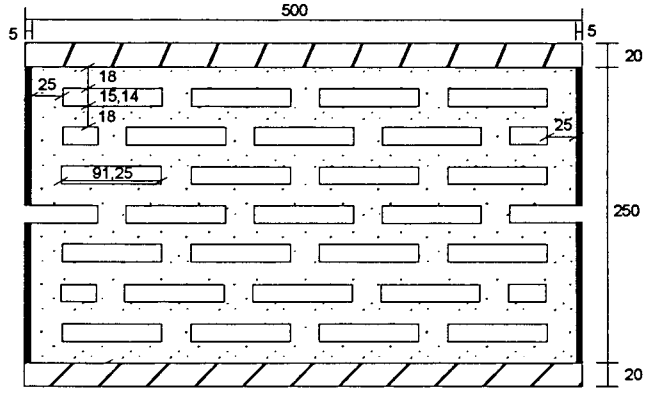
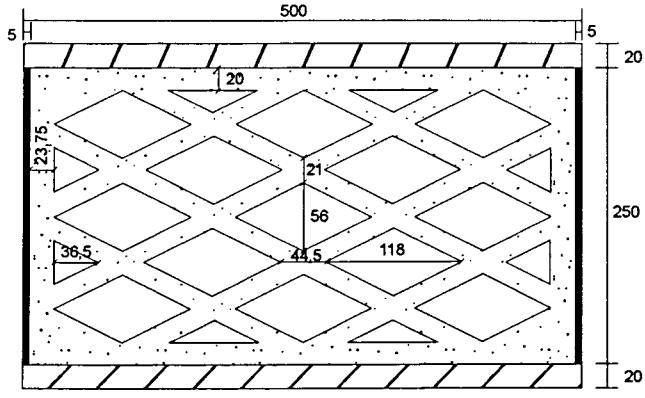
Quadro 6.3 (cont.) - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade - X

REF[a]	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B34		1
B35		1
B36		2
B37		1

Quadro 6.3 (cont.) - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade -XI

REF[a]	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B38		1
B39		1
B40		2
B41		1

Quadro 6.3 (cont.) - Geometria dos blocos usados na análise de sensibilidade -XII

REF[a]	GEOMETRIAS (CORTE HORIZONTAL)	SITUAÇÕES SIMULADAS
B42		8
B43		8

A generalidade das geometrias usadas na simulação apresenta alvéolos rectangulares. A possibilidade de realizar alvéolos não rectangulares, com formas termicamente optimizadas, está muito condicionada pelos custos e dificuldade de produção dos moldes e mesmo dos próprios elementos, bem como em geral pela penalização do comportamento estrutural das alvenarias realizadas com esse tipo de elementos.

Salienta-se que a produção de elementos para alvenaria com geometrias dos alvéolos não rectangulares, é mais fácil nos elementos cerâmicos do que nos elementos à base de betão, por limitações tecnológicas. Na análise em apreço apenas se considerou o elemento B43 com alvéolos em losango.

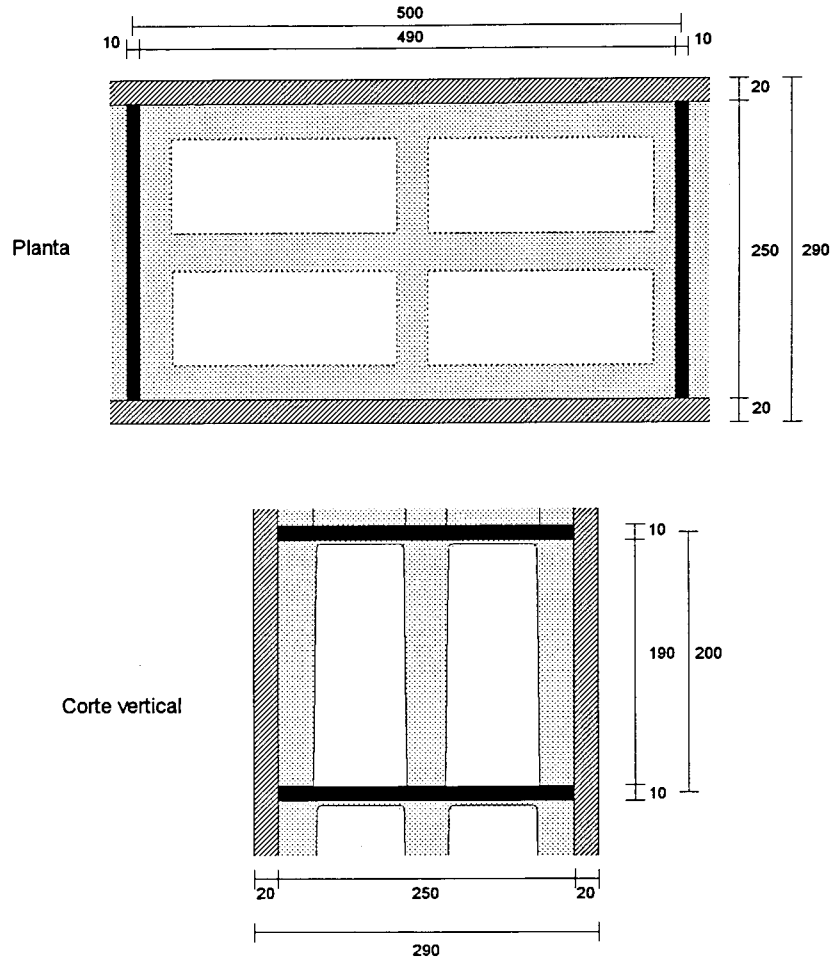


Fig. 6.3 - Corte vertical tipo das geometrias consideradas

6.5.2 - Parâmetros a considerar na simulação

6.5.2.1 - Parâmetros geométricos

Definiram-se um conjunto de atributos considerados relevantes em termos de características geométricas dos alvéolos para alvenaria. Consideraram-se os seguintes atributos principais na simulação :

- orientação preferencial da furação;
- número de fiadas de alvéolos;
- posição relativa dos alvéolos;
- percentagem de furação.

a) **orientação preferencial da furação**

A orientação preferencial da furação pode ser paralela ou perpendicular ao sentido do fluxo, conforme se explicita na fig. 6.4 .

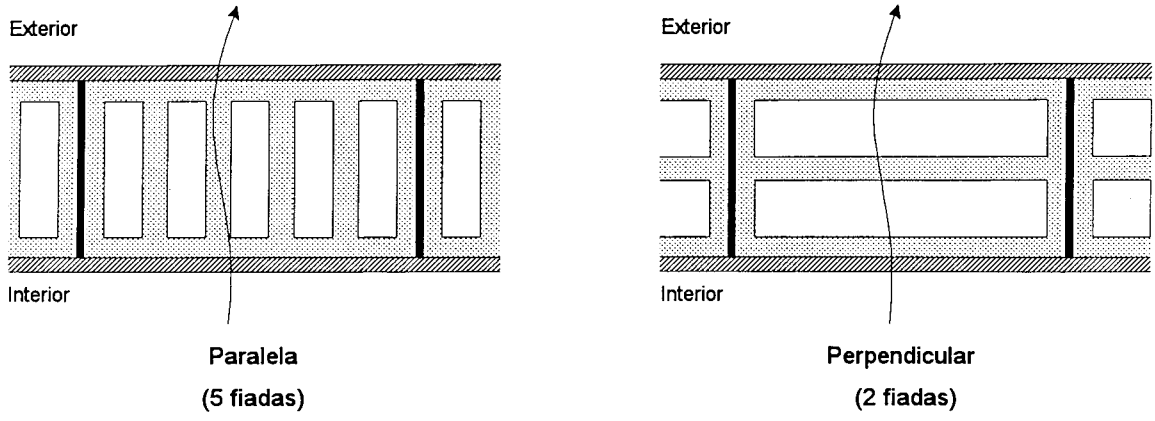


Fig. 6.4 - Orientação preferencial da furação relativamente ao fluxo

b) **Número de fiadas de alvéolos**

Número de fiadas de alvéolos, paralelas ou perpendiculares ao fluxo, conforme se ilustra na fig. 6.4.

c) **Posição relativa dos alvéolos**

Os alvéolos podem encontrar-se alinhados ou desalinhados em fiadas sucessivas conforme se ilustra na fig. 6.5 .

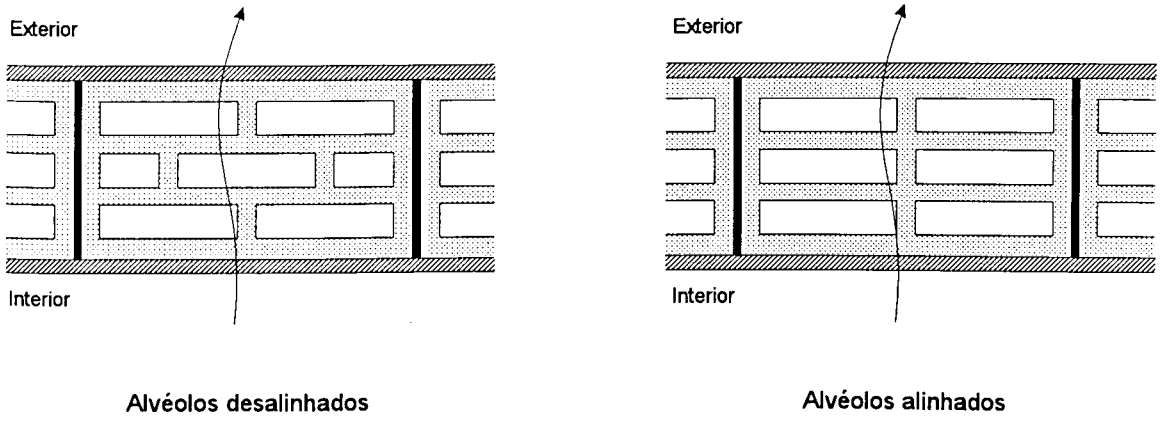


Fig. 6.5 - Posição relativa dos alvéolos

d) **Percentagem de furação**

A percentagem de furação é uma grandeza de utilização corrente no domínio das alvenarias, que expressa a relação percentual entre a área de vazios e área total aparente da secção.

e) **Agrupamento de geometrias por atributos geométricos**

Relativamente aos 3 primeiros atributos as geometrias consideradas podem ser agrupadas em 10 "agrupamentos". Sublinha-se que uma geometria pode pertencer a mais de um "agrupamento". É o caso particular da geometria B01 - bloco maciço ou de referência - que pertence a todos os "agrupamentos".

Sintetizam-se no Quadro 6.4 os dez agrupamentos possíveis .

6.5.2.2 - Parâmetros físicos

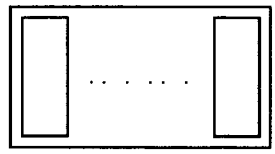
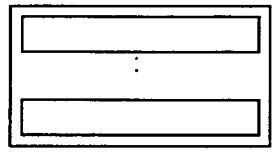
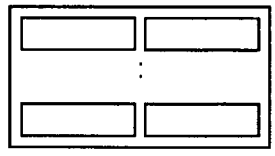
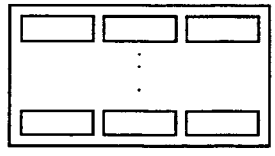
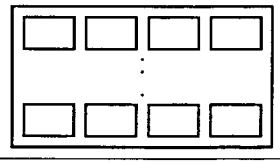
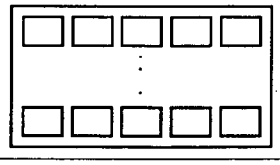
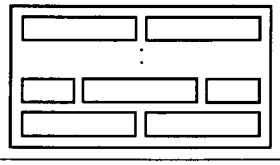
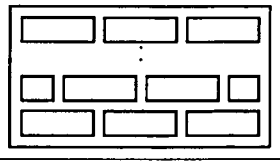
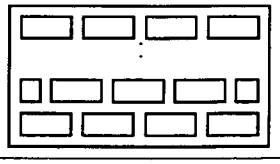
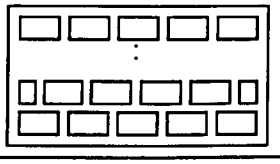
Referiram-se em 6.5.2.1 alguns aspectos geométricos que se consideraram relevantes na simulação. Além desses aspectos consideraram-se ainda os seguintes parâmetros associados a características físicas, constituição dos elementos, e forma de execução das alvenarias:

- condutibilidades térmicas dos materiais constituintes do elemento, das juntas e do reboco;
- preenchimento ou não das juntas verticais;
- existência ou não de juntas descontínuas;
- realização de juntas horizontais delgadas, por recurso a argamassa-cola (3 mm espessura);
- emissividade das superfícies dos alvéolos;
- preenchimento total dos alvéolos com isolante térmico.

A análise da influência de alguns destes parâmetros só é possível por recurso a simulação em 3D. Referem-se como exemplo os aspectos associados às juntas horizontais. Convêm ter presente que a actuação ao nível destas características tem em alguns casos reflexos, não só no comportamento térmico, mas também no comportamento mecânico das alvenarias.

Refere-se de seguida de forma sucinta as particularidades associadas a cada um dos parâmetros.

Quadro 6.4 - Agrupamentos de geometrias por atributos

AGRUPAMENTO / Ref.ª Geometria		ESQUEMA	ORIENTAÇÃO FURAÇÃO	NÚMERO DE FIADAS ALVÉOLOS	POSIÇÃO RELATIVA ALVÉOLOS	LIMITES PERCENTAGEM FURAÇÃO (%)	GEOMETRIAS COM JUNTAS DESCONTÍNUAS
A	B01, B02, B03, B04, B05, B06, B06A		Paralela	0 a 5	Alinhados	0 a 63	—
B	B01, B02, B07 e B08		Perpendicular	0 a 3	Alinhados	0 a 62	—
C	B01, B03, B09,B10 e B11		Perpendicular	0 a 4	Alinhados	0 a 62	—
D	B01, B04, B12, B13, B13A, B14, B15, B33 e B34		Perpendicular	0 a 5	Alinhados	0 a 57	B33 E B34
E	B01, B05, B16, B17, B18, B19, B19A, B20, B35 e B36		Perpendicular	0 a 7	Alinhados	0 a 53	B35 E B36
F	B01, B06, B06A, B21, B22, B23, B24 e B37		Perpendicular	0 a 7	Alinhados	0 a 63	B37
G	B01, B03, B25		Perpendicular	0, 1, 3	Desalinhados	0 a 62	—
H	B01, B04, B26, B27, B38		Perpendicular	0, 1, 3, 5	Desalinhados	0 a 57	B38
I	B01, B05, B28, B29, B30, B39 e B42		Perpendicular	0, 1, 3, 5, 7	Desalinhados	0 a 53	B39 e B42
J	B01, B06, B06A,B31, B32, B40 e B41		Perpendicular	0, 1, 3, 5	Desalinhados	0 a 51	B40 e B41

a) **Condutibilidade térmica**

Em regime permanente, o programa utilizado requer apenas o estabelecimento da condutibilidade térmica dos diferentes materiais intervenientes. Sintetizam-se no Quadro 6.5 os valores considerados.

Quadro 6.5 - Condutibilidades térmicas consideradas na simulação numérica

CONDUTIBILIDADE TÉRMICA λ (W/(m.°C))									
Betão usado na confecção dos blocos						Argamassa de assentamento		Argamassa de reboco	
1	2	3	4	5	6	I	II	i	ii
0.25	0.30	0.40	0.45	0.60	1.40	1.15	0.70	1.15	0.70

b) **Preenchimento das juntas verticais**

Como o preenchimento das juntas verticais no assentamento da alvenaria não é fácil e prejudica a produtividade, analisou-se em algumas geometrias o reflexo do não preenchimento das juntas verticais no coeficiente de transmissão térmica da parede. Admitiu-se no entanto que por questões de tolerância dimensional dos elementos, existia uma lâmina de ar com espessura média de 10 mm,, limitada pelo reboco interior e exterior, posicionada de forma análoga à junta de argamassa.

c) **Existência de juntas descontínuas**

A possibilidade das juntas verticais e horizontais poderem ser descontínuas, é um recurso usado correntemente na concepção de elementos para alvenaria, dado poder melhorar o comportamento térmico da parede bem como a sua estanquidade à água. Normalmente esta descontinuidade é materializada pela interrupção da argamassa de assentamento numa zona central do bloco.

Foram previstas algumas geometrias com essa disposição - B33 a B42 -, sendo assim possível comparar o desempenho destes elementos com os seus homólogos com juntas contínuas.

d) **Realização de juntas horizontais delgadas**

A possibilidade de atenuar a ponte térmica associada às juntas de argamassa, pode ser conseguida pelo emprego de juntas delgadas no assentamento da alvenaria. Este procedimento têm ainda vantagens mecânicas conforme já foi discutido.

A realização destas juntas de assentamento delgadas, obriga ao emprego de elementos com maior precisão dimensional e de argamassa -cola no seu assentamento.
Admitiram-se juntas delgadas de 3 mm de espessura, realizadas com argamassa-cola com condutibilidade térmica análoga à da argamassa corrente. Neste tipo de elementos, atendendo à maior precisão dimensional dos mesmos, supôs-se que o fundo cego tinha 5 mm de espessura.

e) **Emissividade das superfícies dos alvéolos**

A radiação é a componente mais importante da resistência térmica dos espaços de ar que constituem os alvéolos. Variando a emissividade das paredes dos alvéolos, pretende-se analisar em que medida a redução dessa grandeza se reflecte no coeficiente de transmissão térmica - K - da parede.

Para o efeito consideraram-se 2 emissividades:

0,95 - emissividade hemisférica corrente, à temperatura ambiente de cerca de 10 °C, de superfícies em betão;
0,50 - emissividade hemisférica obtida por projecção sobre as superfícies do alvéolo de pintura à base de alumínio, tendo em conta a oxidação da superfície com o tempo.

f) **Preenchimento total dos alvéolos com isolante térmico**

É possível preencher total ou parcialmente os alvéolos com um isolante moldado. Admitiu-se o preenchimento total dos alvéolos com um material isolante com condutibilidade térmica de 0.04 W/(m.°C). Esta condutibilidade térmica é facilmente conseguida com isolantes térmicos da família dos poliestirenos expandidos (EPS). O preenchimento integral dos espaços de ar com isolante térmico anula a resistência térmica anteriormente conferida pelo alvéolo de ar.

6.5.3 - Tipo de elemento finito e nível de discretização

Na determinação do coeficiente de transmissão térmica a 2D, usou-se o elemento finito de placa rectangular "*PLANE 2D*", que se revelou o mais adequado para as geometrias correntes dos elementos para alvenaria com septos ortogonais.

No caso da geometria com alvéolos em forma de losango, usou-se o elemento finito de casca triangular "*SHELL 3*".

Na simulação a 3D usou-se o elemento "*SOLID*" com 8 nós .

A avaliação do nível de discretização a adoptar teve presente a discretização adoptada no elemento de referência, constante do documento de carácter normativo do *CEN* [64] (vide 6.3.3).

No caso da geometria B10 usaram-se 3 níveis de discretização na simulação a 2D para avaliar a convergência dos resultados. Sintetizam-se no Quadro 6.6 os resultados obtidos. Da análise dos resultados parece poder inferir-se que os resultados convergem rapidamente, mesmo para um número reduzido de elementos e que a convergência se dá duma forma conservativa.

Como princípios gerais associados ao nível de discretização referem-se os seguintes aspectos:

- sempre que possível recorreu-se a simplificação de simetria;
- em 2D discretizou-se metade da geometria;
- em 3D extrudiu-se a geometria do elemento em 2D com 8 camadas, adoptando 1 nível de elementos para a meia junta de assentamento inferior, 5 níveis de elementos para a secção corrente, 1 nível de elementos para o fundo cego e 1 nível de elementos para a meia junta superior.

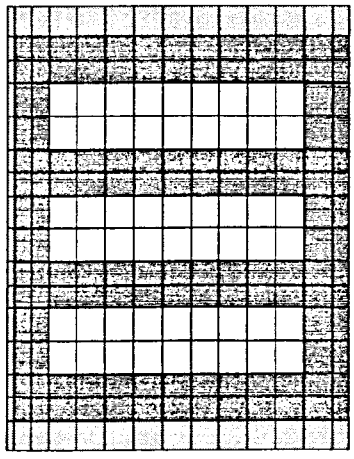
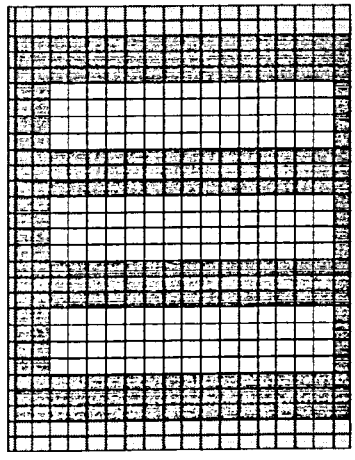
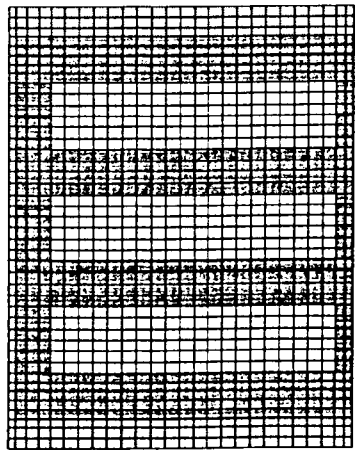
6.5.4 - Situações simuladas e resultados

De acordo com o expresso nos pontos anteriores, obteve-se por simulação numérica o coeficiente de transmissão térmica - K - das paredes realizadas com as 46 geometrias diferentes de elementos em 234 situações.

Sintetizam-se as situações simuladas no Quadro 6.7, enquanto os resultados obtidos com as respectivas hipótese de base constam do Quadro 6.8.

É possível ainda obter uma visualização policromática das temperaturas ao longo da parede e do gradiente térmico segundo "*X*" , "*Y*" ou "*Z*". No Anexo III apresenta-se uma visualização das temperaturas ao longo da parede e dos respectivos gradientes térmicos para algumas geometrias a 2D e a 3D.

Quadro 6.6 - Simulação numérica da parede com blocos B10 para diferentes níveis de discretização

Ref[a]	Malha	Nº de elementos	K (W /(m^2.ºC))	Erro (%)
B10.a		224	1.101	2
B10.b		532	1.092	1.2
B10.c		1092	1.079	-

Quadro 6.7 - Situações simuladas na análise de sensibilidade - I

Refª	Sub-Refª	Simulação	FURAÇÃO						Esp. septos (mm)		Condutibilidade (W/m.ºC)			Juntas Verticais			Juntas Horizontais			Alvéolos			Agrupamento	Obs.
			Orientação(1)	Nº Fiadas	Formato	Nº Alvéolos	Posição Alvéolos	%	Long.	Trans.	Betão	Arg. Assent.	Arg. Reboco	Cont.	Desc.	Secas	Cont.	Desc.	Delgadas	ε	Isolante		
B01	1	2D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	-		A geometria
	2	2D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	-		01 pertence
	3	2D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.45	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	-		a todos os
	4	2D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	-		agrupamentos
	5	2D	-	-	-	-	-	0	-	-	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	-		
	6	2D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.40	0.70	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	-		
	7	2D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	-	-		
	8	2D	-	-	-	-	-	0	-	-	1.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	-	-		
	9	2D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.40	1.15	1.15	-	-	SIM	-	-	-	-	-		
	10	2D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.40	1.15	1.15	-	-	SIM	-	-	-	-	-		
	11	3D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	-	-		
	12	3D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	SIM	-	-	-	-		
	13	3D	-	-	-	-	-	0	-	-	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	-	-		
	14	3D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	-	-		
	15	3D	-	-	-	-	-	0	-	-	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	SIM	-	-		
	16	3D	-	-	-	-	-	0	-	-	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	-	-		
B02	1	2D	//, ⊥	1	Rect.	1	Alinh.	60	40	30	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A, B	
B03	1	2D	//	2	Rect.	2	Alinh.	62	30	30	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A, C, G	
	2	2D	//	2	Rect.	2	Alinh.	62	30	30	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A, C, G	
	3	2D	//	2	Rect.	2	Alinh.	62	30	30	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A, C, G	
	4	2D	//	2	Rect.	2	Alinh.	62	30	30	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A,C, G	
B04	1	2D	//	3	Rect.	3	Alinh.	57	30	30	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A,D,H	
B05	1	2D	//	4	Rect.	4	Alinh.	53	30	30	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A,E,I	
B06	1	2D	//	5	Rect.	5	Alinh.	51	25	30	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A,F,J	
	2	2D	//	5	Rect.	5	Alinh.	51	25	30	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A,F,J	
	3	2D	//	5	Rect.	5	Alinh.	51	25	30	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A,F,J	
	4	2D	//	5	Rect.	5	Alinh.	51	25	30	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A,F,J	
	5	2D	//	5	Rect.	5	Alinh.	51	25	30	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.50	-	A,F,J	
	6	2D	//	5	Rect.	5	Alinh.	51	25	30	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.50	-	A,F,J	

(1) // - Paralela ⊥ - Perpendicular

Quadro 6.7 (cont.) - Situações simuladas na análise de sensibilidade - II

Refª	Sub-Refª	Simulação	FURAÇÃO Orientação(1)	Nº Fiadas	Formato	Nº Alvéolos	Posição Alvéolos	%	Esp. septos (mm) Long.	Trans.	Condutibilidade (W/m.ºC) Betão	Arg. Assent.	Arg. Reboco	Juntas Verticais Cont.	Desc.	Secas	Juntas Horizontais Cont.	Desc.	Delgadas	Alvéolos s	Isolante	Agrupamento	Obs.
B06A	1	2D	//	5	Rect.	5	Alinh.	63	20	20	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A, F, J	
	2	2D	//	5	Rect.	5	Alinh.	63	20	20	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A, F, J	
	3	2D	//	5	Rect.	5	Alinh.	63	20	20	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	A, F, J	
B07	1	2D	⊥	2	Rect.	2	Alinh.	47	40	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	B	
B08	1	2D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	B	
	2	2D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	B	
	3	2D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	B	
	4	2D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	B	
	5	2D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	SIM	B	
	6	2D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	SIM	B	
	7	2D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	0.40	0.70	0.7	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	B	
	8	3D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	B	
	9	3D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	B	
	10	3D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	0.40	0.70	0.7	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	B	
	11	3D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	B	
	12	3D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	B	
	13	3D	⊥	3	Rect.	3	Alinh.	32	40	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	B	
B09	1	2D	⊥	2	Rect.	4	Alinh.	54	30	25	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	C	
	2	2D	⊥	2	Rect.	4	Alinh.	54	30	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	C	
	3	2D	⊥	2	Rect.	4	Alinh.	54	30	25	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	C	
	4	2D	⊥	2	Rect.	4	Alinh.	54	30	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	C	
B10	1	2D	⊥	3	Rect.	6	Alinh.	44	30	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		C	

(1) // - Paralela ⊥ - Perpendicular

Quadro 6.7 (cont.) - Situações simuladas na análise de sensibilidade -III

			FURAÇÃO						Esp. septos (mm)			Condutibilidade (W/m.ºC)			Juntas Verticais			Juntas Horizontais			Alvéolos				
Refª	Sub-Refª	Simulação	Orientação(1)	Nº Fiadas	Formato	Nº Alvéolos	Posição Alvéolos	%	Long.	Trans.		Betão	Arg. Assent.	Arg. Reboco	Cont.	Desc.	Secas	Cont.	Desc.	Delgadas	ε		Isolante	Agrupamento	Obs.
B11	1	2D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	C	
	2	2D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	C	
	3	2D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		0.45	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	C	
	4	2D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	C	
	5	2D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	C	
	6	2D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		0.40	0.70	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	C	
	7	2D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	C	
	8	2D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		0.40	1.15	1.15	-	-	SIM	-	-	-	0.95		-	C	
	9	3D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95		-	C	
	10	3D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95		-	C	
	11	3D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95		-	C	
	12	3D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95		-	C	
	13	3D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95		-	C	
	14	3D	⊥	4	Rect.	8	Alinh.	34	30	25		1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95		-	C	
B12	1	2D	⊥	2	Rect.	6	Alinh.	56	25	25		0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	D	
B13	1	2D	⊥	3	Rect.	9	Alinh.	48	25	25		0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	D	
	2	2D	⊥	3	Rect.	9	Alinh.	48	25	25		0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	D	
	3	2D	⊥	3	Rect.	9	Alinh.	48	25	25		0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	D	
	4	2D	⊥	3	Rect.	9	Alinh.	48	25	25		1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	D	
B13A	1	2D	⊥	3	Rect.	9	Alinh.	57	20	20		0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	D	
	2	2D	⊥	3	Rect.	9	Alinh.	57	20	20		0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	D	
	3	2D	⊥	3	Rect.	9	Alinh.	57	20	20		1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	D	
B14	1	2D	⊥	4	Rect.	12	Alinh.	40	25	25		0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95		-	D	

(1) // - Paralela ⊥ - Perpendicular

Quadro 6.7 (cont.) - Situações simuladas na análise de sensibilidade - IV

Refª	Sub-Refª	Simulação	FURAÇÃO						Esp. septos (mm)		Condutibilidade (W/m.ºC)			Juntas Verticais			Juntas Horizontais			Alvéolos			Obs.
			Orientação(1)	Nº Fiadas	Formato	Nº Alvéolos	Posição Alvéolos	%	Long.	Trans.	Betão	Arg. Assent.	Arg. Reboco	Cont.	Desc.	Secas	Cont.	Desc.	Delgadas	ε	Isolante	Agrupamento	
B15	1	2D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
	2	2D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
	3	2D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.45	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
	4	2D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
	5	2D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
	6	2D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.40	0.70	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
	7	2D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
	8	2D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.5	-	D	
	9	2D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	-	-	SIM	-	-	-	0.95	-	D	
	10	2D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	SIM	D	
	11	2D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	1.40	1.15	1.15	-	-	-	-	-	-	-	SIM	D	
	12	3D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	D	
	13	3D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
	14	3D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
	15	3D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
	16	3D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
	17	3D	⊥	5	Rect.	15	Alinh.	31	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	D	
B16	1	2D	⊥	2	Rect.	8	Alinh.	52	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
B17	1	2D	⊥	3	Rect.	12	Alinh.	45	25	25	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	2	2D	⊥	3	Rect.	12	Alinh.	45	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	3	2D	⊥	3	Rect.	12	Alinh.	45	25	25	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	4	2D	⊥	3	Rect.	12	Alinh.	45	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
B18	1	2D	⊥	4	Rect.	16	Alinh.	37	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	

(1) // - Paralela ⊥ - Perpendicular

Quadro 6.7 (cont.) - Situações simuladas na análise de sensibilidade - V

			FURAÇÃO						Esp. septos (mm)		Condutibilidade (W/m.°C)			Juntas Verticais			Juntas Horizontais			Alvéolos				
Refª	Sub-Refª	Simulação	Orientação(1)	Nº Fiadas	Formato	Nº Alvéolos	Posição Alvéolos	%	Long.	Trans.	Betão	Arg. Assent.	Arg. Reboco	Cont.	Desc.	Secas	Cont.	Desc.	Delgadas	ε	Isolante	Agrupamento	Obs.
B19	1	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	2	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	3	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	0.45	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	4	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	5	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	6	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	0.40	0.70	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	7	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	8	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	0.40	1.15	1.15	-	-	SIM	-	-	-	0.95	-	E	
	9	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	1.40	1.15	1.15	-	-	SIM	-	-	-	0.95	-	E	
	10	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	1.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	11	3D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	E	
	12	3D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	E	
	13	3D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	E	
	14	3D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	E	
	15	3D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	E	
	16	3D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	30	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	E	
B19A	1	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	41	20	20	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	2	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	41	20	20	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	3	2D	⊥	5	Rect.	20	Alinh.	41	20	20	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
B20	1	2D	⊥	7	Rect.	28	Alinh.	34	18	25	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	2	2D	⊥	7	Rect.	28	Alinh.	34	18	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	3	2D	⊥	7	Rect.	28	Alinh.	34	18	25	0.45	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	4	2D	⊥	7	Rect.	28	Alinh.	34	18	25	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	5	2D	⊥	7	Rect.	28	Alinh.	34	18	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	6	2D	⊥	7	Rect.	28	Alinh.	34	18	25	0.40	0.70	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	7	2D	⊥	7	Rect.	28	Alinh.	34	18	25	0.40	1.15	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
	8	2D	⊥	7	Rect.	28	Alinh.	34	18	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	E	
B21	1	2D	⊥	2	Rect.	10	Alinh.	53	25	25/20	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	

(1) // - Paralela ⊥ - Perpendicular

Refª	Sub-Refª	Simulação	FURAÇÃO						Esp. septos (mm)		Condutibilidade (W/m.ºC)			Juntas Verticais			Juntas Horizontais			Alvéolos				
			Orientação(1)	Nº Fiadas	Formato	Nº Alvéolos	Posição Alvéolos	%	Long.	Trans.	Betão	Arg. Assent.	Arg. Reboco	Cont.	Desc.	Secas	Cont.	Desc.	Delgadas	ε	Isolante	Agrupamento	Obs.
B22	1	2D	⊥	3	Rect.	15	Alinh.	47	25/20	25/20	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
	2	2D	⊥	3	Rect.	15	Alinh.	47	25/20	25/20	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
	3	2D	⊥	3	Rect.	15	Alinh.	47	25/20	25/20	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
	4	2D	⊥	3	Rect.	15	Alinh.	47	25/20	25/20	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
B23	1	2D	⊥	4	Rect.	20	Alinh.	41	25/20	25/20	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
B24	1	2D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
	2	2D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
	3	2D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	0.45	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
	4	2D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
	5	2D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
	6	2D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	0.40	0.70	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
	7	2D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	F	
	8	2D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	0.40	1.15	1.15	-	-	SIM	-	-	-	0.95	-	F	
	9	3D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	F	
	10	3D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	F	
	11	3D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	F	
	12	3D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	F	
	13	3D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	F	
	14	3D	⊥	5	Rect.	25	Alinh.	35	25/20	25/20	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	F	
B25	1	2D	⊥	3	Rect.	7	Desal.	43	30	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	G	
B26	1	2D	⊥	3	Rect.	10	Desal.	47	25	25	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	H	
	2	2D	⊥	3	Rect.	10	Desal.	47	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	H	
	3	2D	⊥	3	Rect.	10	Desal.	47	25	25	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	H	
	4	2D	⊥	3	Rect.	10	Desal.	47	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	H	

(1) // - Paralela ⊥ - Perpendicular

Quadro 6.7 (cont.) - Situações simuladas na análise de sensibilidade - VII

Refª	Sub-Refª	Simulação	FURAÇÃO Orientação(1)	Nº Fiadas	Formato	Nº Alvéolos	Posição Alvéolos	%	Esp. septos (mm) Long.	Trans.	Condutibilidade (W/m.ºC) Betão	Arg. Assent.	Arg. Reboco	Juntas Verticais Cont.	Desc.	Secas	Juntas Horizontais Cont.	Desc.	Delgadas	Alvéolos ε	Isolante	Agrupamento	Obs.
B27	1	2D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	H	
	2	2D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	H	
	3	2D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.45	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	H	
	4	2D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	H	
	5	2D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	H	
	6	2D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.40	0.70	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	H	
	7	2D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	H	
	8	2D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	-	-	SIM	-	-	-	0.95	-	H	
	9	2D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.50	-	H	
	10	2D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	SIM	H	
	11	3D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	H	
	12	3D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	H	
	13	3D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	SIM	-	-	0.95	-	H	
	14	3D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	H	
	15	3D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	H	
	16	3D	⊥	5	Rect.	17	Desal.	31	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	SIM	0.95	-	H	
B28	1	2D	⊥	3	Rect.	13	Desal.	44	25	25	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	2	2D	⊥	3	Rect.	13	Desal.	44	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	3	2D	⊥	3	Rect.	13	Desal.	44	25	25	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	4	2D	⊥	3	Rect.	13	Desal.	44	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
B29	1	2D	⊥	5	Rect.	22	Desal.	29	25	25	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	2	2D	⊥	5	Rect.	22	Desal.	29	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	3	2D	⊥	5	Rect.	22	Desal.	29	25	25	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	4	2D	⊥	5	Rect.	22	Desal.	29	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	5	2D	⊥	5	Rect.	22	Desal.	29	25	25	0.40	0.70	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	6	2D	⊥	5	Rect.	22	Desal.	29	25	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	7	2D	⊥	5	Rect.	22	Desal.	29	25	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	SIM	I	
	8	2D	⊥	5	Rect.	22	Desal.	29	25	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	-	SIM	I	

(1) // - Paralela ⊥ - Perpendicular

Quadro 6.7 (cont.) - Situações simuladas na análise de sensibilidade - VIII

Refª	Sub-Refª	Simulação	FURAÇÃO Orientação(1)	Nº Fiadas	Formato	Nº Alvéolos	Posição Alvéolos	%	Esp. septos (mm) Long.	Trans.	Condutibilidade (W/m.ºC) Betão	Arg. Assent.	Arg. Reboco	Juntas Verticais Cont.	Desc.	Secas	Juntas Horizontais Cont.	Desc.	Delgadas	Alvéolos ε	Isolante	Agrupamento	Obs.
B30	1	2D	⊥	7	Rect.	31	Desal.	31	18	25	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	2	2D	⊥	7	Rect.	31	Desal.	31	18	25	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	3	2D	⊥	7	Rect.	31	Desal.	31	18	25	0.45	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	4	2D	⊥	7	Rect.	31	Desal.	31	18	25	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	5	2D	⊥	7	Rect.	31	Desal.	31	18	25	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	6	2D	⊥	7	Rect.	31	Desal.	31	18	25	0.40	0.70	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	7	2D	⊥	7	Rect.	31	Desal.	31	18	25	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	8	2D	⊥	7	Rect.	31	Desal.	31	18	25	1.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
	9	2D	⊥	7	Rect.	31	Desal.	31	18	25	0.25	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	I	
B31	1	2D	⊥	3	Rect.	16	Desal.	46	25/20	25/20	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	J	
	2	2D	⊥	3	Rect.	16	Desal.	46	25/20	25/20	0.40	1.15	1.15	-	-	-	-	-	-	0.95	-	J	
	3	2D	⊥	3	Rect.	16	Desal.	46	25/20	25/20	0.60	1.15	1.15	-	-	-	-	-	-	0.95	-	J	
	4	2D	⊥	3	Rect.	16	Desal.	46	25/20	25/20	1.40	1.15	1.15	-	-	-	-	-	-	0.95	-	J	
B32	1	2D	⊥	5	Rect.	27	Desal.	35	25/20	25/20	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	J	
	2	2D	⊥	5	Rect.	27	Desal.	35	25/20	25/20	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	J	
	3	2D	⊥	5	Rect.	27	Desal.	35	25/20	25/20	0.45	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	J	
	4	2D	⊥	5	Rect.	27	Desal.	35	25/20	25/20	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	J	
	5	2D	⊥	5	Rect.	27	Desal.	35	25/20	25/20	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	J	
	6	2D	⊥	5	Rect.	27	Desal.	35	25/20	25/20	0.40	0.70	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	J	
	7	2D	⊥	5	Rect.	27	Desal.	35	25/20	25/20	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	J	
B33	1	2D	⊥	3	Rect.	7	Alinh.	49	25	25	0.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	D	
	2	2D	⊥	3	Rect.	7	Alinh.	49	25	25	0.60	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	D	
	3	2D	⊥	3	Rect.	7	Alinh.	49	25	25	1.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	D	
B34	1	2D	⊥	5	Rect.	13	Alinh.	33	25	25	0.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	D	
B35	1	2D	⊥	3	Rect.	10	Alinh.	47	25	25	0.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	E	
B36	1	2D	⊥	5	Rect.	18	Alinh.	31	25	25	0.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	E	
	2	2D	⊥	5	Rect.	18	Alinh.	31	25	25	1.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	E	
B37	1	2D	⊥	5	Rect.	23	Alinh.	36	25/20	25/20	0.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	F	
B38	1	2D	⊥	3	Rect.	5	Desal.	49	30	25	0.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	H	
B39	1	2D	⊥	3	Rect.	11	Desal.	46	25	25	0.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	I	
B40	1	2D	⊥	3	Rect.	14	Desal.	48	25/20	25/20	0.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	J	
	2	2D	⊥	3	Rect.	14	Desal.	48	25/20	25/20	1.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	J	
B41	1	2D	⊥	5	Rect.	23	Desal.	35	25/20	25/20	0.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	J	

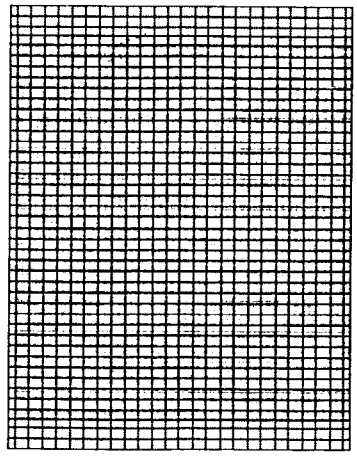
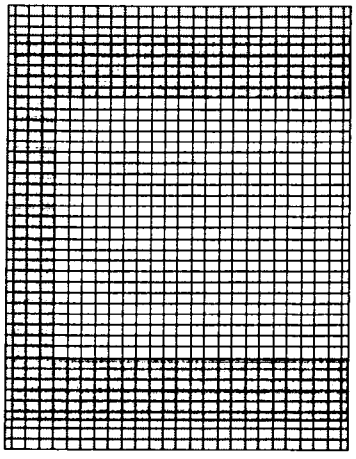
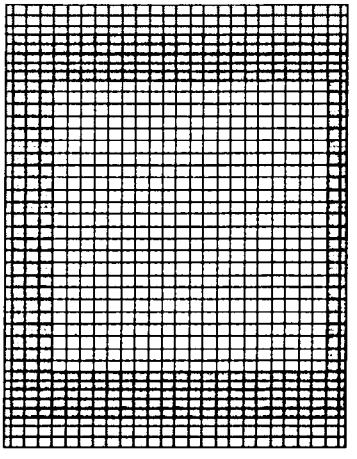
(1) // - Paralela ⊥ - Perpendicular

Quadro 6.7 (cont.) - Situações simuladas na análise de sensibilidade - IX

Ref.ª	Sub-Ref.ª	Simulação	FURAÇÃO						Esp. septos (mm)		Condutibilidade (W/m.ºC)			Juntas Verticais			Juntas Horizontais			Alvéolos			Agrupamento	Obs.
			Orientação(1)	Nº Fiadas	Formato	Nº Alvéolos	Posição Alvéolos	%	Long.	Trans.	Betão	Arg. Assent.	Arg. Reboco	Cont.	Desc.	Secas	Cont.	Desc.	Delgadas	ε	Isolante			
B42	1	2D	⊥	7	Rect.	29	Desal.	32	18	25	0.30	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	I		
	2	2D	⊥	7	Rect.	29	Desal.	32	18	25	0.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	I		
	3	2D	⊥	7	Rect.	29	Desal.	32	18	25	0.45	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	I		
	4	2D	⊥	7	Rect.	29	Desal.	32	18	25	0.60	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	I		
	5	2D	⊥	7	Rect.	29	Desal.	32	18	25	1.40	1.15	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	I		
	6	2D	⊥	7	Rect.	29	Desal.	32	18	25	0.40	0.70	1.15	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	I		
	7	2D	⊥	7	Rect.	29	Desal.	32	18	25	0.40	0.70	0.70	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	I		
	8	2D	⊥	7	Rect.	29	Desal.	32	18	25	1.40	0.70	0.70	-	SIM	-	-	-	-	0.95	-	I		
B43	1	2D	-	-	Losang.	21	-	39	-	-	0.30	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	-		Bloco com
	2	2D	-	-	Losang.	21	-	39	-	-	0.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	-		alvéolos não
	3	2D	-	-	Losang.	21	-	39	-	-	0.45	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	-		rectangulares
	4	2D	-	-	Losang.	21	-	39	-	-	0.60	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	-		
	5	2D	-	-	Losang.	21	-	39	-	-	1.40	1.15	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	-		
	6	2D	-	-	Losang.	21	-	39	-	-	0.40	0.70	1.15	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	-		
	7	2D	-	-	Losang.	21	-	39	-	-	0.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	-		
	8	2D	-	-	Losang.	21	-	39	-	-	1.40	0.70	0.70	SIM	-	-	-	-	-	0.95	-	-		

(1) // - Paralela ⊥ - Perpendicular

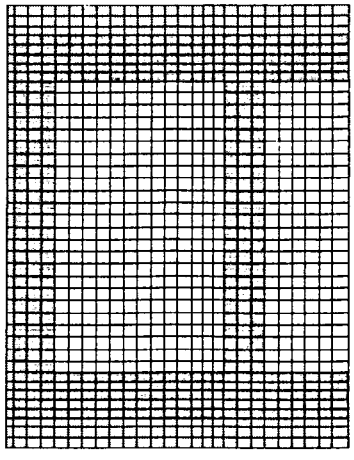
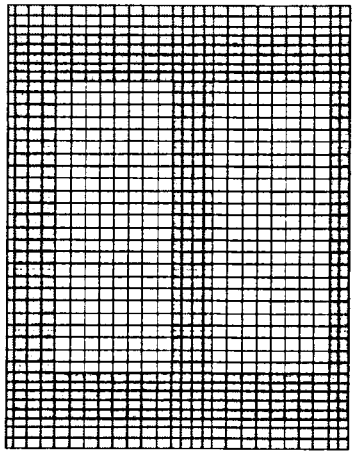
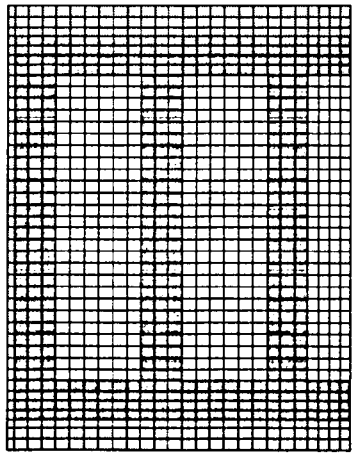
Quadro 6.8- Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - I

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)												
				Condutibilidade (W/(m.ºC)):			Alvéolos					
Ref[a]	GEOMETRIA E MALHA	Sub Ref[a]	Sim.	Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	ε	R (m²ºC/W)	λ_{equiv} W/(m.ºC))	Isolante	K W/(m².ºC)
B01		1	2D	0.30	1.15	1.15	-	-	-	-	1.015
		2	2D	0.40	1.15	1.15	-	-	-	-	1.253
		3	2D	0.45	1.15	1.15	-	-	-	-	1.309
		4	2D	0.60	1.15	1.15	-	-	-	-	1.655
		5	2D	1.40	1.15	1.15	-	-	-	-	2.674
		6	2D	0.40	0.70	1.15	-	-	-	-	1.233
		7	2D	0.40	0.70	0.70	-	-	-	-	1.201
		8	2D	1.40	0.70	0.70	-	-	-	-	2.416
		9	2D[(1)]	0.40	1.15	1.15	-	-	-	-	1.254
		10	2D[(1)]	1.40	1.15	1.15	-	-	-	-	2.416
		11	3D	0.40	1.15	1.15	-	-	-	-	1.330
		12	3D	0.40	0.70	0.70	-	-	-	-	1.232
		13	3D	1.40	1.15	1.15	-	-	-	-	2.660
		14	3D[(2)]	0.40	1.15	1.15	-	-	-	-	1.280
		15	3D[(2)]	0.40	0.70	0.70	-	-	-	-	1.210
	1092 elementos a 2D furação - 0%	16	3D[(2)]	1.40	1.15	1.15	-	-	-	-	2.670
B02		1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.169	1.001	-	1.741
	1092 elementos a 2D furação - 60%										
B03		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.185	1.026	-	1.655
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.185	1.026	-	1.813
		3	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.185	1.026	-	2.025
		4	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.185	1.026	-	2.429
	1040 elementos a 2D furação - 62%										

[(1)] Juntas verticais secas [(2)] Juntas horizontais delgadas

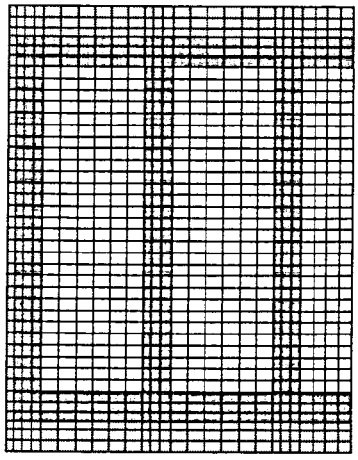
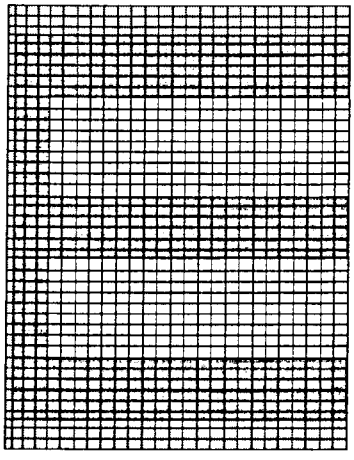
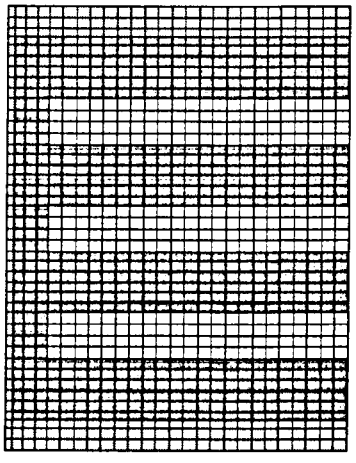
Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - II

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Ref[a]	GEOMETRIA E MALHA	Sub Ref[a]	Sim.	Condutibilidade (W/(m.ºC)) Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	Alvéolos ε	Alvéolos R (m².ºC/W)	Alvéolos λ_{equiv} W/(m.ºC))	Isolante	K W/(m².ºC)
B04	 1040 elementos a 2D furação - 57%	1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.196	1.026	-	1.752
B05	 1040 elementos a 2D furação - 53%	1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.203	0.937	-	1.703
B06	 1040 elementos a 2D furação - 51%	1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.208	0.962	-	1.572
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.208	0.962	-	1.721
		3	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.208	0.962	-	1.855
		4	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.208	0.962	-	2.445
		5	2D	0.40	1.15	1.15	0.50	0.301	0.665	-	1.509
		6	2D	1.40	1.15	1.15	0.50	0.301	0.665	-	2.246

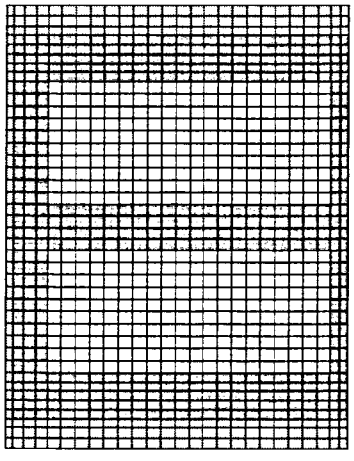
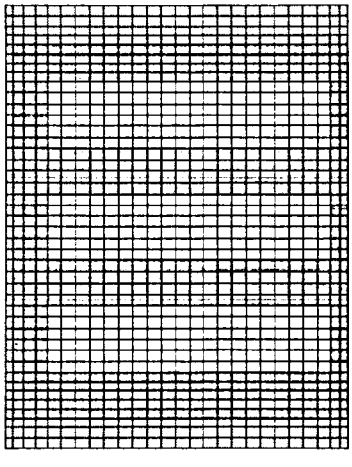
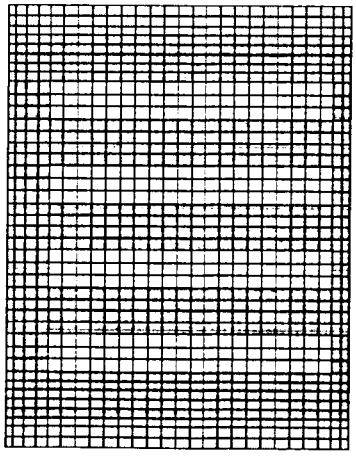
Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - III

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Ref[a]	GEOMETRIA E MALHA	Sub Ref[a]	Sim.	Condutibilidade (W/(m.ºC))			Alvéolos			Isolante	K W/(m^2.ºC)
				Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	ε	R (m^2.ºC/W)	λ_{equiv} W/(m.ºC))		
B06A		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.210	1.000	-	1.748
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.210	1.000	-	1.874
		3	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.210	1.000	-	2.419
	1040 elementos a 2D furação - 63%										
B07		1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.165	0.395	-	1.248
	1092 elementos a 2D furação - 47%										
B08		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.165	0.182	-	0.883
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.165	0.182	-	0.997
		3	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.165	0.182	-	1.159
		4	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.165	0.182	-	1.513
		5	2D	0.40	1.15	1.15	-	-	0.04	SIM	0.536
		6	2D	1.40	1.15	1.15	-	-	0.04	SIM	0.895
		7	2D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.165	0.182	-	0.953
		8	3D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.165	0.182	-	1.120
		9	3D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.165	0.182	-	1.717
		10	3D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.165	0.182	-	1.020
		11	3D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.451	-	1.040
		12	3D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.177	0.451	-	0.979
		13	3D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.451	-	1.620
	1092 elementos a 2D furação - 32%										

Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - IV

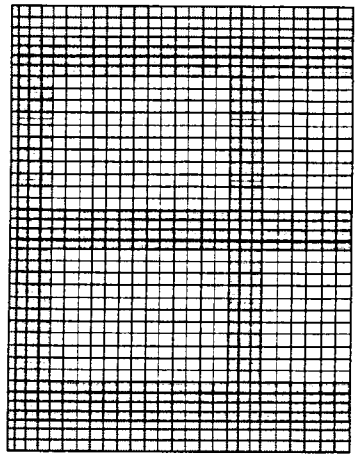
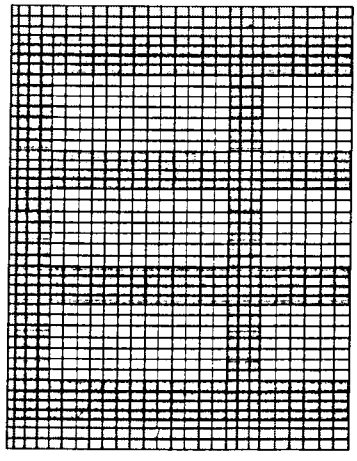
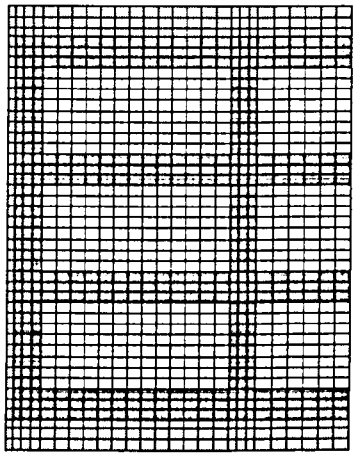
"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Ref[a]	GEOMETRIA E MALHA	Sub Ref[a]	Sim.	Condutibilidade (W/(m.ºC)): Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	Alvéolos: ε	R (m².ºC/W)	λ_{equiv} (W/m.ºC)	Isolante	K W/(m²ºC)
B09		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.177	0.451	-	1.185
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.451	-	1.312
		3	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.177	0.451	-	1.489
		4	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.451	-	1.872
	1040 elementos a 2D furação - 54%										
B10		1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.167	0.259	-	1.079
	1092 elementos a 2D furação - 44%										
B11		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.167	0.149	-	0.824
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.167	0.149	-	0.928
		3	2D	0.45	1.15	1.15	0.95	0.167	0.149	-	0.984
		4	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.167	0.149	-	1.086
		5	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.167	0.149	-	1.487
		6	2D	0.40	0.70	1.15	0.95	0.167	0.149	-	0.894
		7	2D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.167	0.149	-	0.888
		8	2D[(1)]	0.40	1.15	1.15	0.95	0.167	0.149	-	0.929
		9	3D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.167	0.149	-	1.065
		10	3D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.167	0.149	-	1.680
		11	3D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.167	0.149	-	0.966
		12	3D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.167	0.149	-	0.978
		13	3D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.167	0.149	-	0.918
		14	3D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.167	0.149	-	1.590
	1040 elementos a 2D furação - 34%										

(1) Juntas verticais secas

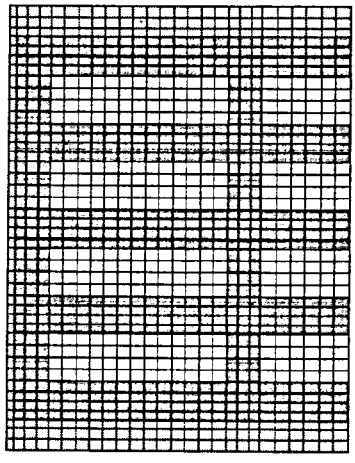
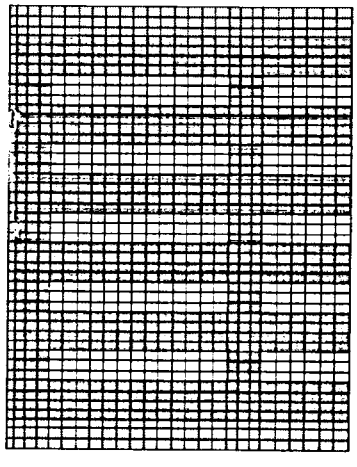
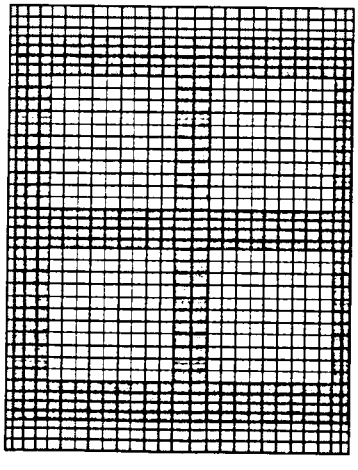
Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - V

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Ref[a]	GEOMETRIA E MALHA	Sub Ref[a]	Sim.	Condutibilidade (W/(m.ºC))			Alvéolos			Isolante	K W/(m²ºC)
				Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	ε	R (m².ºC/W)	λ_{equiv} W/(m.ºC))		
B12		1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.189	0.461	-	1.325
	1040 elementos a 2D furação - 56%										
B13		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.177	0.282	-	0.992
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.282	-	1.104
		3	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.177	0.282	-	1.276
		4	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.282	-	1.715
	1118 elementos a 2D furação - 48%										
B13A		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.179	0.317	-	1.038
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.179	0.317	-	1.136
		3	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.179	0.317	-	1.640
	1118 elementos a 2D furação - 57%										

Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - VI

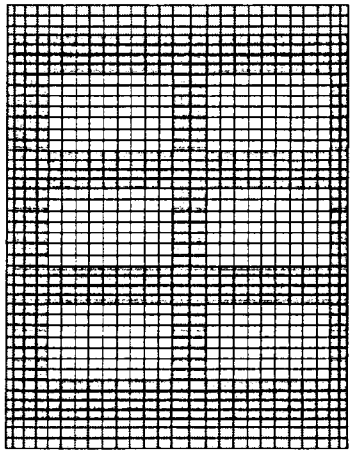
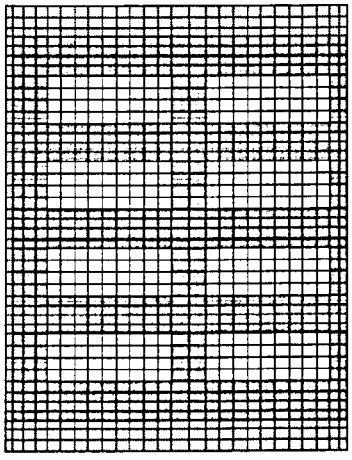
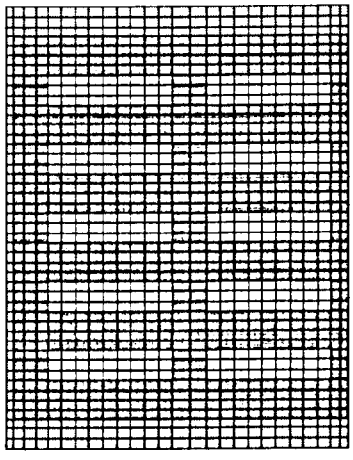
"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Ref[a]	GEOMETRIA E MALHA	Sub Ref[a]	Sim.	Condutibilidade (W/(m.ºC)) Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	Alvéolos ε	R (m².ºC/W)	λ_{equiv} W/(m.ºC)	Isolante	K W/(m²ºC)
B14		1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.169	0.185	-	0.976
	1092 elementos a 2D furação - 40%										
B15		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.168	0.119	-	0.778
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.168	0.119	-	0.883
		3	2D	0.45	1.15	1.15	0.95	0.168	0.119	-	0.929
		4	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.168	0.119	-	1.052
		5	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.168	0.119	-	1.528
		6	2D	0.40	0.70	1.15	0.95	0.168	0.119	-	0.861
		7	2D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.168	0.119	-	0.844
		8	2D	0.40	1.15	1.15	0.50	0.309	0.065	-	0.726
		9	2D[(1)]	0.40	1.15	1.15	0.95	0.168	0.119	-	0.884
		10	2D	0.40	1.15	1.15	-	-	0.04	SIM	0.631
		11	2D	1.40	1.15	1.15	-	-	0.04	SIM	1.268
		12	3D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.168	0.119	-	1.028
		13	3D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.168	0.119	-	1.712
		14	3D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.168	0.119	-	0.930
		15	3D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.168	0.119	-	0.937
	1170 elementos a 2D furação - 31%	16	3D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.168	0.119	-	0.878
		17	3D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.168	0.119	-	1.620
B16		1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.198	0.471	-	1.299
	1040 elementos a 2D furação - 52%										

(1) Juntas verticais secas

Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - VII

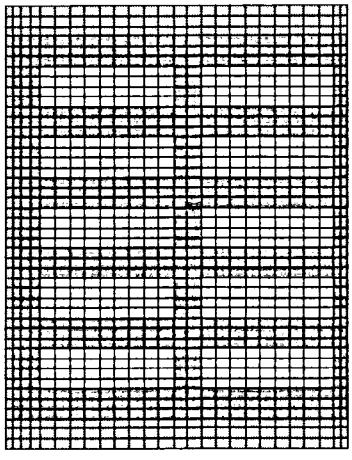
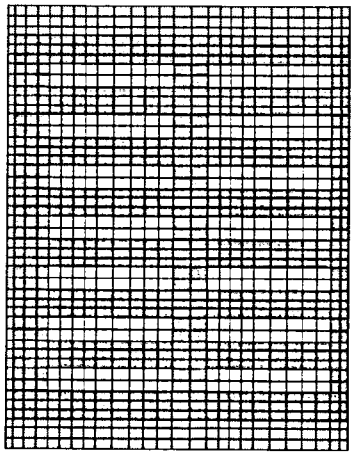
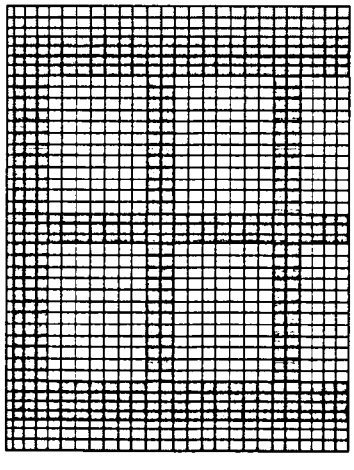
"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Ref[a]	GEOMETRIA E MALHA	Sub Ref[a]	Sim.	Condutibilidade (W/(m.ºC)): Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	Alvéolos: ε	R (m².ºC/W)	λ_{equiv} W/(m.ºC))	Isolante	K W/(m²ºC)
B17		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.184	0.272	-	0.981
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.184	0.272	-	1.144
		3	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.184	0.272	-	1.291
		4	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.184	0.272	-	1.801
	1118 elementos a 2D furação - 45%										
B18		1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.174	0.179	-	0.989
	1092 elementos a 2D furação - 37%										
B19		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.172	0.117	-	0.793
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.172	0.117	-	0.910
		3	2D	0.45	1.15	1.15	0.95	0.172	0.117	-	0.965
		4	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.172	0.117	-	1.104
		5	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.172	0.117	-	1.663
		6	2D	0.40	0.70	1.15	0.95	0.172	0.117	-	0.888
		7	2D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.172	0.117	-	0.871
		8	2D[(1)]	0.40	1.15	1.15	0.95	0.172	0.117	-	0.911
		9	2D[(1)]	1.40	1.15	1.15	0.95	0.172	0.117	-	1.664
		10	2D	1.40	0.70	0.70	0.95	0.172	0.117	-	1.589
		11	3D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.172	0.117	-	1.040
		12	3D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.172	0.117	-	1.787
		13	3D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.172	0.117	-	0.944
	1170 elementos a 2D furação - 30%										

[(1)] Juntas verticais secas

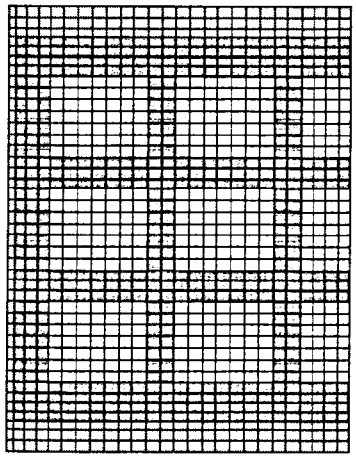
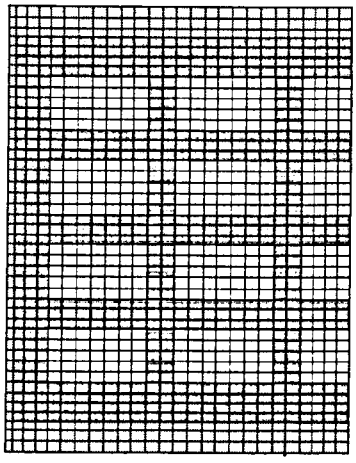
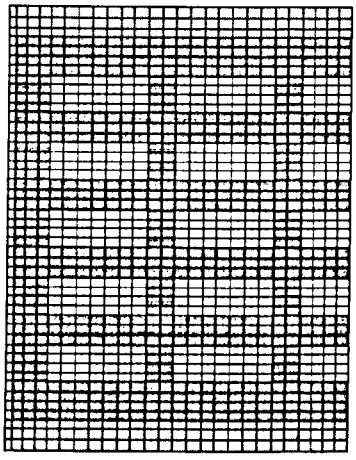
Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - VIII

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Refª	GEOMETRIA E MALHA	Sub Refª	Sim.	Condutibilidade (W/(m.ºC))			Alvéolos			Isolante	K W/(m²ºC)
				Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	ε	R (m².ºC/W)	λ_{equiv} W/(m.ºC)		
B19A		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.175	0.149	-	0.792
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.175	0.149	-	0.898
		3	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.175	0.149	-	1.516
	1170 elementos a 2D furação - 41%										
B20		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.170	0.089	-	0.720
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.170	0.089	-	0.825
		3	2D	0.45	1.15	1.15	0.95	0.170	0.089	-	0.873
		4	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.170	0.089	-	1.004
		5	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.170	0.089	-	1.542
		6	2D	0.40	0.70	1.15	0.95	0.170	0.089	-	0.802
		7	2D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.170	0.089	-	0.787
		8	2D	1.40	0.70	0.70	0.95	0.170	0.089	-	1.474
	1144 elementos a 2D furação - 34%										
B21		1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.206	0.438	-	1.296
	1066 elementos a 2D furação - 53%										

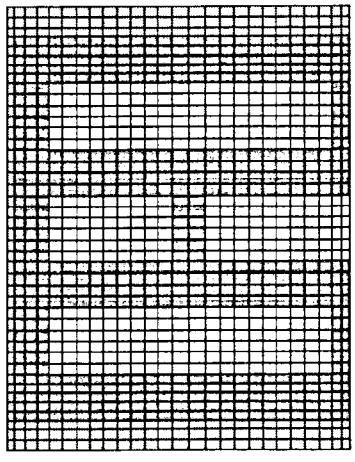
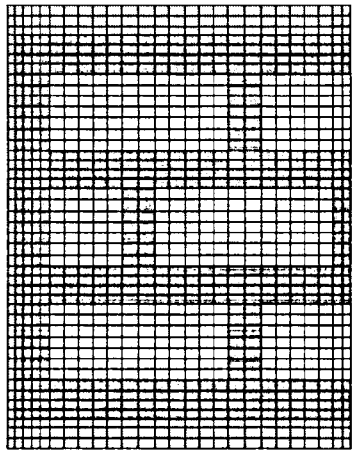
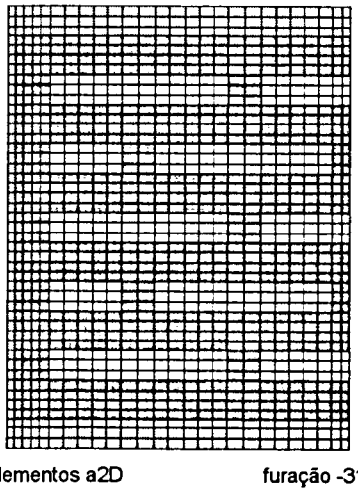
Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - IX

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Ref[a]	GEOMETRIA E MALHA	Sub Ref[a]	Sim.	Condutibilidade (W/(m.ºC)): Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	Alvéolos: ε	R (m².ºC/W)	λ_{equiv} (W/m.ºC)	Isolante	K W/(m²C)
B22		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.191	0.279	-	0.991
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.191	0.279	-	1.080
		3	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.191	0.279	-	1.295
		4	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.191	0.279	-	1.811
	1066 elementos a 2D furação - 47%										
B23		1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.181	0.194	-	0.998
	1118 elementos a 2D furação - 41%										
B24		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.177	0.135	-	0.806
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.135	-	0.921
		3	2D	0.45	1.15	1.15	0.95	0.177	0.135	-	1.117
		4	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.177	0.135	-	1.278
		5	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.135	-	1.677
		6	2D	0.40	0.70	1.15	0.95	0.177	0.135	-	0.899
		7	2D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.177	0.135	-	0.881
		8	2D[(1)]	0.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.135	-	0.922
		9	3D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.135	-	1.056
		10	3D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.135	-	1.819
		11	3D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.177	0.135	-	0.958
		12	3D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.135	-	0.970
		13	3D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.177	0.135	-	0.910
		14	3D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.135	-	1.750
	1196 elementos a 2D furação - 35%										

(1) Juntas verticais secas

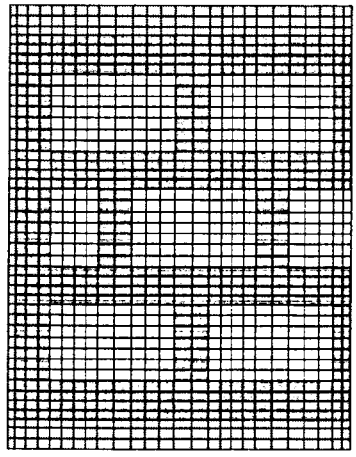
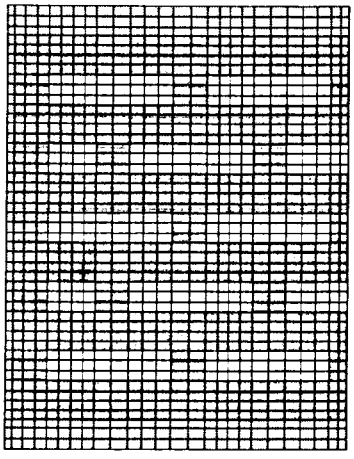
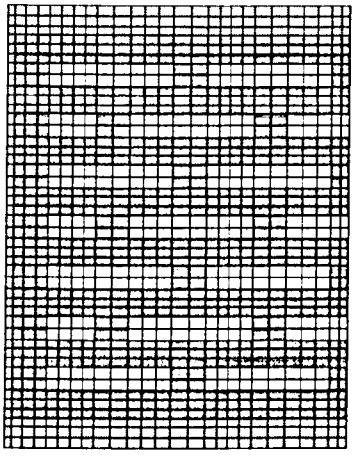
Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - X

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)													
Ref[a]	GEOMETRIA E MALHA	Sub Ref[a]	Sim.	Condutibilidade (W/(m.°C))				Alvéolos		Isolante	K W/(m².°C)
				Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	ε	R (m².°C/W)	λ_{equiv} (W/m.°C)		
B25		1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.167 0.179	0.259 0.242	-	1.079
	1092 elementos a 2D furação - 43%										
B26		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.177 0.197	0.282 0.254	-	0.989
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.177 0.197	0.282 0.254	-	1.104
		3	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.177 0.197	0.282 0.254	-	1.278
		4	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.177 0.197	0.282 0.254	-	1.716
	1118 elementos furação - 47%	1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.168 0.179	0.119 0.112	-	0.780
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.168 0.179	0.119 0.112	-	0.885
		3	2D	0.45	1.15	1.15	0.95	0.168 0.179	0.119 0.112	-	0.931
B27		4	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.168 0.179	0.119 0.112	-	1.049
		5	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.168 0.179	0.119 0.112	-	1.493
		6	2D	0.40	0.70	1.15	0.95	0.168 0.179	0.119 0.112	-	0.863
		7	2D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.168 0.179	0.119 0.112	-	0.846
		8	2D[(1)]	0.40	1.15	1.15	0.95	0.168 0.179	0.119 0.112	-	0.886
		9	2D	0.40	1.15	1.15	0.50	0.309 0.317	0.0647 0.0632	-	0.721
		10	2D	0.40	1.15	1.15	-	- -	0.04 0.04	SIM	0.619
		11	3D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.168 0.179	0.119 0.112	-	1.003
		12	3D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.168 0.179	0.119 0.112	-	1.693
	1170 elementos a2D furação -31%	13	3D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.168 0.179	0.119 0.112	-	0.932

[1)] Juntas verticais secas

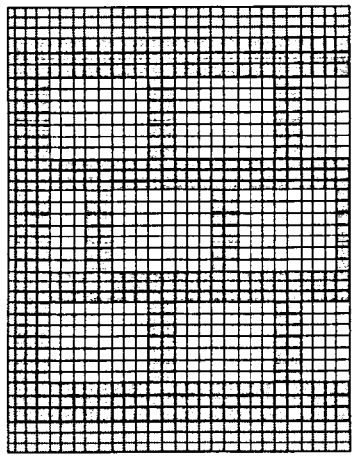
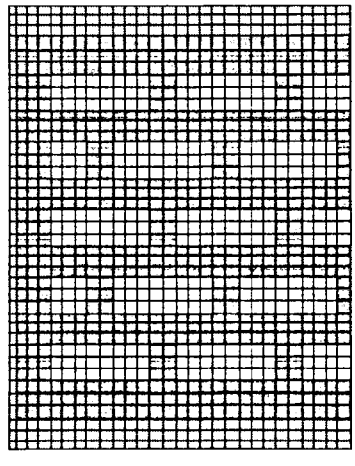
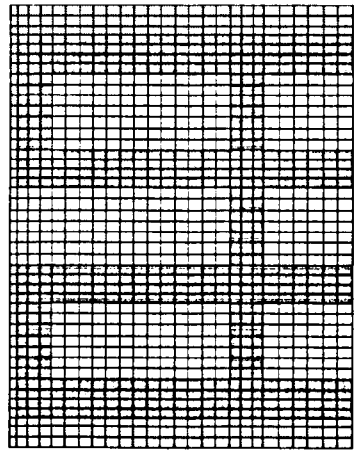
Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - XI

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Refª	GEOMETRIA E MALHA	Sub Refª	Sim.	Condutibilidade (W/(m.°C)) Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	ε	Alvéolos R (m².°C/W)	Alvéolos λ_{equiv} W/(m.°C))	Isolante	K W/(m².°C)
B28		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.184 0.208	0.272 0.241	-	0.979
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.184 0.208	0.272 0.241	-	1.102
		3	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.184 0.208	0.272 0.241	-	1.294
		4	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.184 0.208	0.272 0.241	-	1.802
	1118 elementos a 2D furação - 44%										
B29		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.162 0.187	0.117 0.107	-	0.794
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.162 0.187	0.117 0.107	-	0.910
		3	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.162 0.187	0.117 0.107	-	1.099
		4	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.162 0.187	0.117 0.107	-	1.626
		5	2D	0.40	0.70	1.15	0.95	0.162 0.187	0.117 0.107	-	0.888
		6	2D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.162 0.187	0.117 0.107	-	0.870
		7	2D	0.40	1.15	1.15	-	- -	0.04 0.04	SIM	0.677
		8	2D	1.40	1.15	1.15	-	- -	0.04 0.04	SIM	1.386
	1170 elementos a 2D furação - 29%										
B30		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.710
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.810
		3	2D	0.45	1.15	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.859
		4	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.970
		5	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	1.438
		6	2D	0.40	0.70	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.787
		7	2D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.778
		8	2D	1.40	0.70	0.70	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	1.376
		9	2D	0.25	0.70	0.70	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.660
	1144 elementos a 2D furação - 31%										

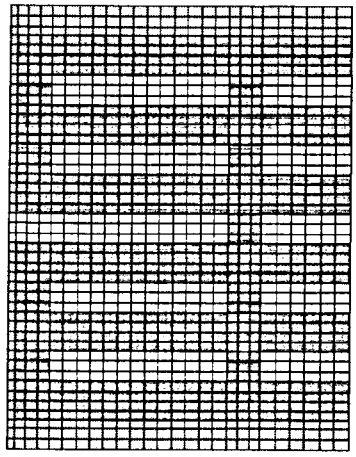
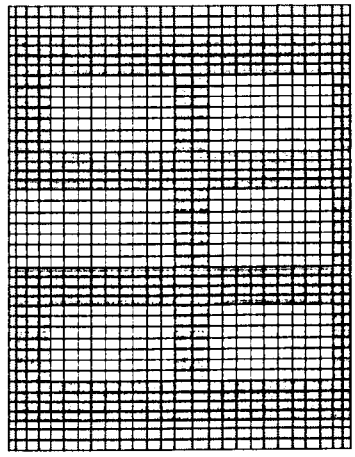
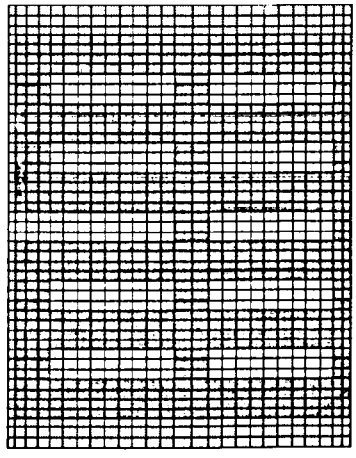
Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - XII

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Refª	GEOMETRIA E MALHA	Sub Refª	Sim.	Condutibilidade (W/(m.°C)): Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	ε	Alvéolos: R (m².°C/W)	Alvéolos: λ equiv. W/(m.°C)	Isolante	K W/(m².°C)
B31		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.194 0.214	0.279 0.234	-	0.988
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.194 0.214	0.279 0.234	-	1.108
		3	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.194 0.214	0.279 0.234	-	1.297
		4	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.194 0.214	0.279 0.234	-	1.811
	1092 elementos a 2D furação -46%										
B32		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.177 0.199	0.135 0.121	-	0.807
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.177 0.199	0.135 0.121	-	0.921
		3	2D	0.45	1.15	1.15	0.95	0.177 0.199	0.135 0.121	-	0.971
		4	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.177 0.199	0.135 0.121	-	1.108
		5	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.177 0.199	0.135 0.121	-	1.642
		6	2D	0.40	0.70	1.15	0.95	0.177 0.199	0.135 0.121	-	0.898
		7	2D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.177 0.199	0.135 0.121	-	0.880
	1232 elementos a 2D furação - 35%										
B33		1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.168 0.177	0.299 0.282	-	1.103
		2	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.168 0.177	0.299 0.282	-	1.248
		3	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.168 0.177	0.299 0.282	-	1.623
	1118 elementos a 2D furação - 49%										

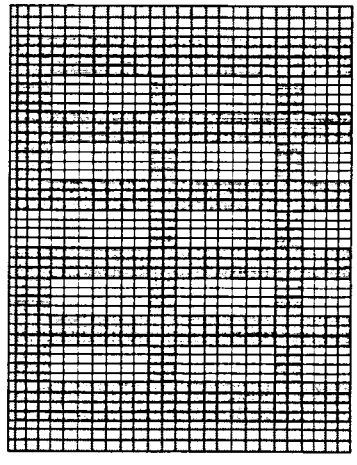
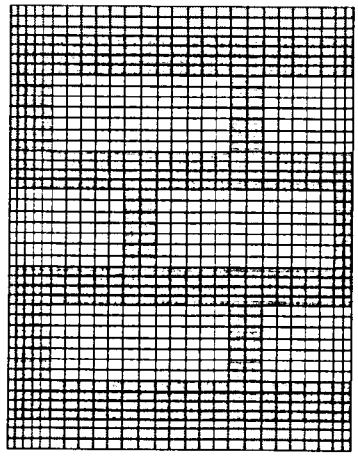
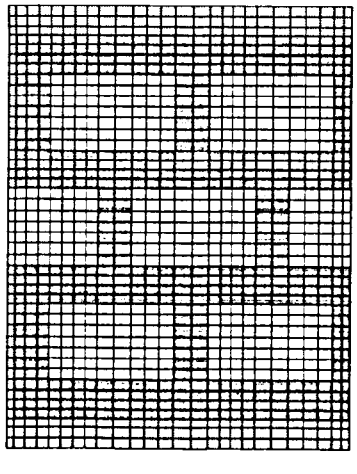
Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - XIII

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Refª	GEOMETRIA E MALHA	Sub Refª	Sim.	Condutibilidade (W/(m.ºC)) Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	ε	Alvéolos R (m².ºC/W)	Alvéolos λ_{equiv} W/(m.ºC)	Isolante	K /(m².ºC))
B34	 1170 elementos a 2D furação - 33%	1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.168 0.163	0.119 0.122	-	0.854
B35	 1118 elementos a 2D furação - 47%	1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.184 0.169	0.272 0.296	-	1.088
B36	 1170 elementos a 2D furação - 31%	1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.172 0.179	0.117 0.112	-	0.880
		2	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.172 0.179	0.117 0.112	-	1.500

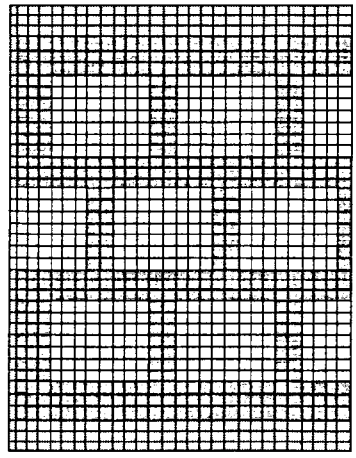
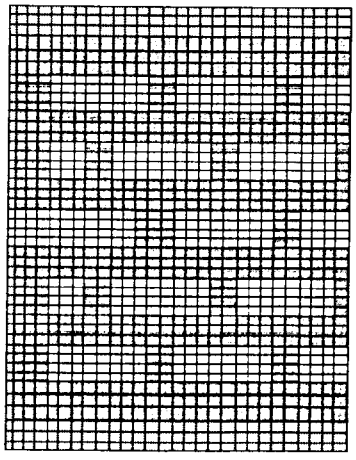
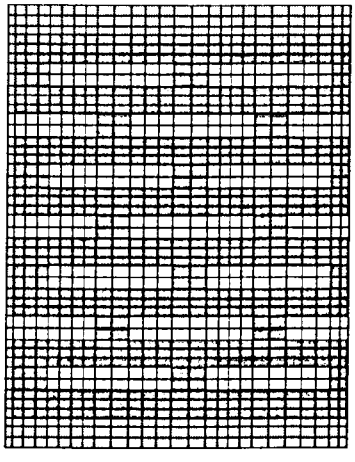
Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - XIV

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

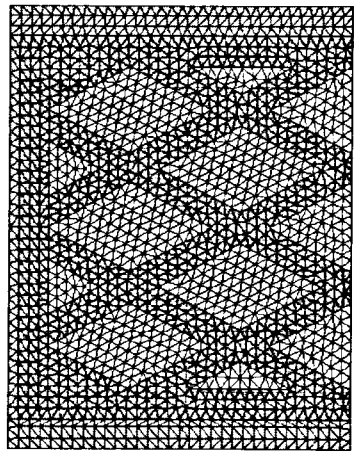
Ref[a]	GEOMETRIA E MALHA	Sub Ref[a]	Sim.	Condutibilidade (W/(m.°C)) Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	ε	Alvéolos R (m².°C/W)	Alvéolos λ_{equiv} W/(m.°C)	Isolante	K W/(m².°C)
B37	 1196 elementos a 2D furação - 36%	1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.177	0.135	-	0.893
B38	 1118 elementos a 2D furação - 49%	1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.174 0.197	0.288 0.254	-	1.089
B39	 1118 elementos a 2D furação -46%	1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.177 0.208	0.282 0.241	-	1.085

Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - XV

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)

Refª	GEOMETRIA E MALHA	Sub Refª	Sim.	Condutibilidade (W/(m.ºC)) Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	ε	Alvéolos R (m².ºC/W)	Alvéolos λ_{equiv} W/(m.ºC)	Isolante	K W/(m².ºC)
B40	 1092 elementos a 2D furação - 48%	1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.181 0.214	0.295 0.241	-	1.091
		2	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.181 0.214	0.295 0.241	-	1.715
B41	 1232 elementos a 2D furação - 35%	1	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.172 0.199	0.140 0.112	-	0.890
B42	 1144 elementos a 2D furação - 32%	1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.657
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.738
		3	2D	0.45	1.15	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.776
		4	2D	0.60	1.15	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.871
		5	2D	1.40	1.15	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	1.237
		6	2D	0.40	0.70	1.15	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.734
		7	2D	0.40	0.70	0.70	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	0.722
		8	2D	1.40	0.70	0.70	0.95	0.170 0.180	0.089 0.084	-	1.200

Quadro 6.8 (cont.) - Resultados da simulação numérica relativa à análise de sensibilidade - XVI

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE(S)												
Ref[a]	GEOMETRIA E MALHA	Sub Ref[a]	Sim.	Condutibilidade (W/(m.°C)): Betão	Arg. assent.	Arg. reboco	ε	Alvéolos: R (m².°C/W)	λ_{equiv} W/(m.°C))	Isolante	K W/(m².°C)
B43		1	2D	0.30	1.15	1.15	0.95			-	0.823
		2	2D	0.40	1.15	1.15	0.95			-	0.923
		3	2D	0.45	1.15	1.15	0.95			-	0.941
		4	2D	0.60	1.15	1.15	0.95			-	1.087
		5	2D	1.40	1.15	1.15	0.95			-	1.557
		6	2D	0.40	0.70	1.15	0.95			-	0.892
		7	2D	0.40	0.70	0.70	0.95			-	0.873
		8	2D	1.40	0.70	0.70	0.95			-	1.483
	2852 elementos a 2D furação - 39%										

6.6 - SIMULAÇÃO DE GEOMETRIAS REAIS

6.6.1 - Geometrias correntes simuladas

Conforme já foi referido, a obtenção por simulação numérica do coeficiente de transmissão térmica de paredes -K - foi efectuada para geometrias teóricas, análise de sensibilidade, e geometrias reais.

A simulação do comportamento de geometrias teóricas, descrita nos pontos anteriores deste Capítulo, visou avaliar a influência dos principais factores condicionantes do desempenho térmico dos elementos para alvenaria.

A simulação das geometrias reais visa caracterizar o desempenho térmico de elementos produzidos industrialmente, ou passíveis de o serem, tanto mais que é objectivo do presente trabalho validar experimentalmente os resultados da simulação, usando provetes de parede realizados com blocos correntes no mercado.

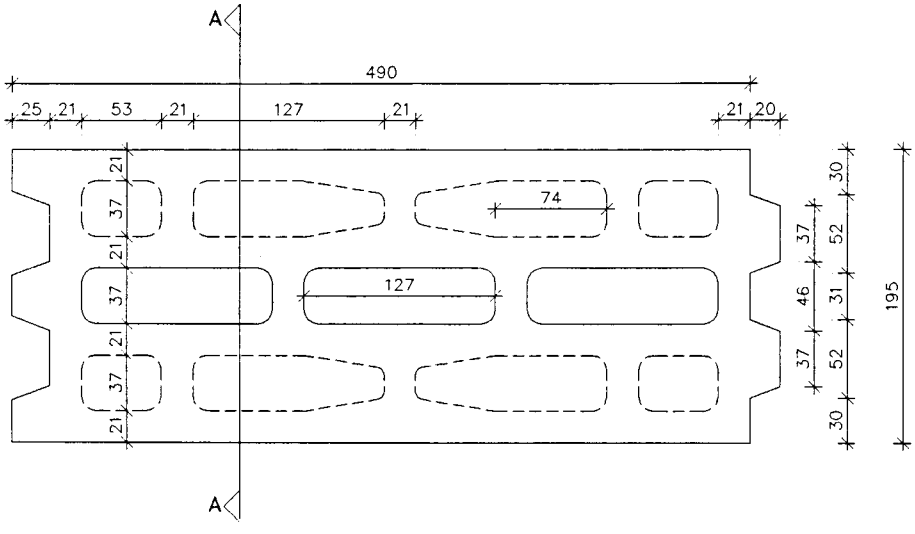
A produção actual da Empresa que colaborou neste trabalho, produtora de blocos de betão para alvenaria tendo por base a utilização de betões incorporando argila expandida, de acordo com a caracterização preliminar referida no Capítulo 5, comporta as geometrias constantes do Quadro 6.9.

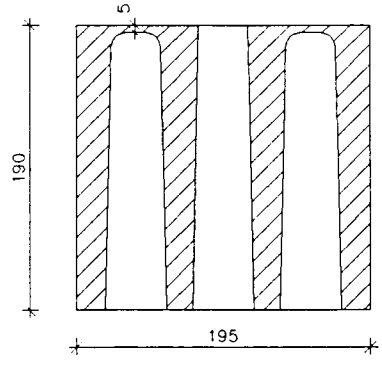
Quadro 6.9 - Geometrias correntes de blocos de betão de argila expandida produzidas

DESIGNAÇÃO	DIMENSÕES EXTERIORES DE COORDENAÇÃO E NOMINAIS (mm)					
	ALTURA		ESPESSURA		COMPRIMENTO	
	COORD.	NOMINAL	COORD.	NOMINAL	COORD.	NOMINAL
Bloco de 10	200	190	100	95	500	490
Bloco de 12	200	190	120	115	500	490
Bloco de 15	200	190	150	145	500	490
Bloco de 20	200	190	200	195	500	490
Bloco de 25	200	190	250	245	500	490
Bloco de 30	200	190	300	295	500	490

Atendendo a que se pretende analisar o desempenho de paredes exteriores em pano simples, consideraram-se apenas as geometrias "*Bloco de 20*", "*Bloco de 25*" e "*Bloco de 30*". Nas figuras 6.6 a 6.8 apresenta-se a geometria desses elementos.

Bloco 500 x 200 x 200





CORTE A.A

Fig. 6.6 - Geometria do bloco " *Bloco de 20*"

Bloco 500 x 200 x 250

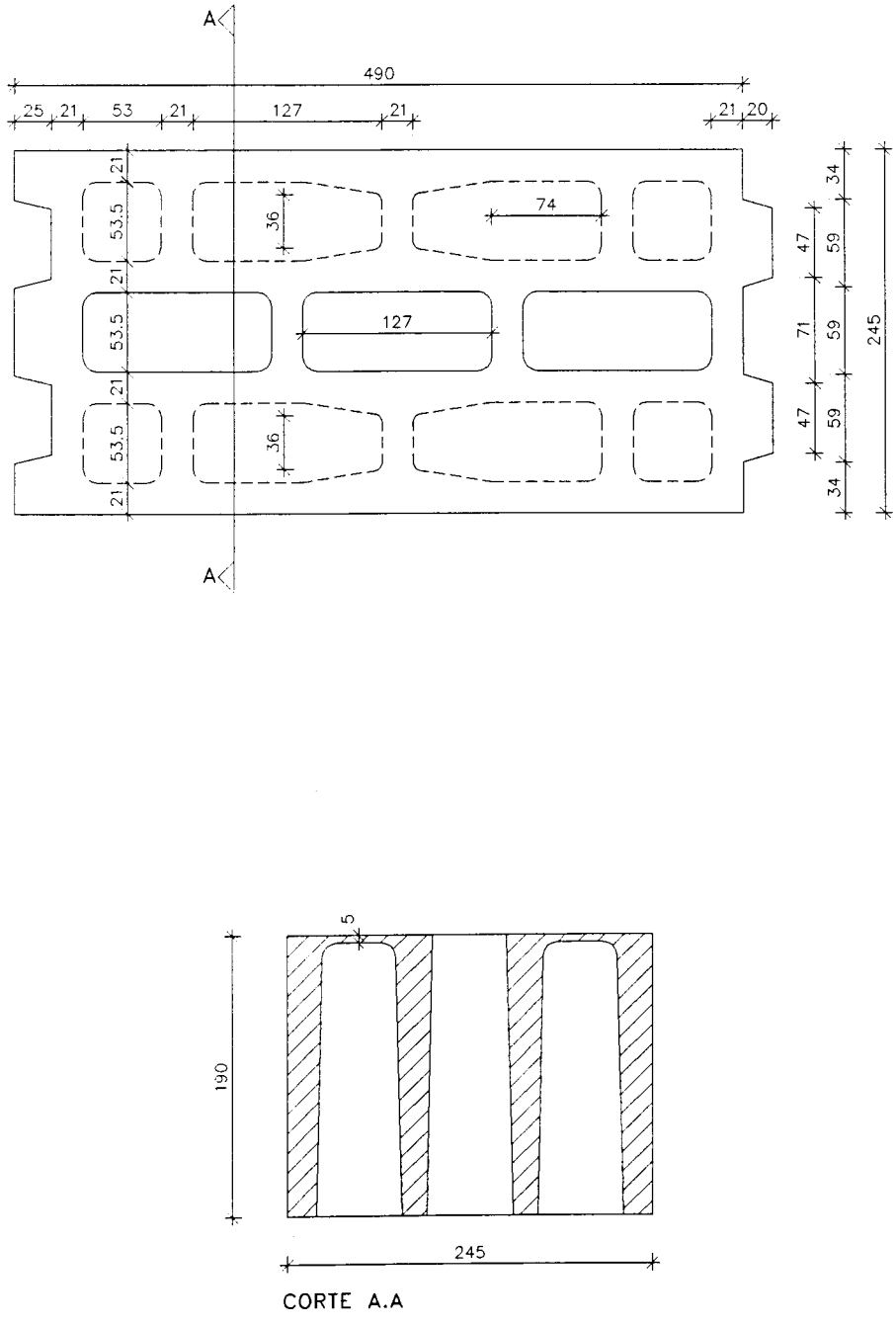


Fig. 6.7 - Geometria do bloco "*Bloco de 25* "

Bloco 500 x 200 x 300

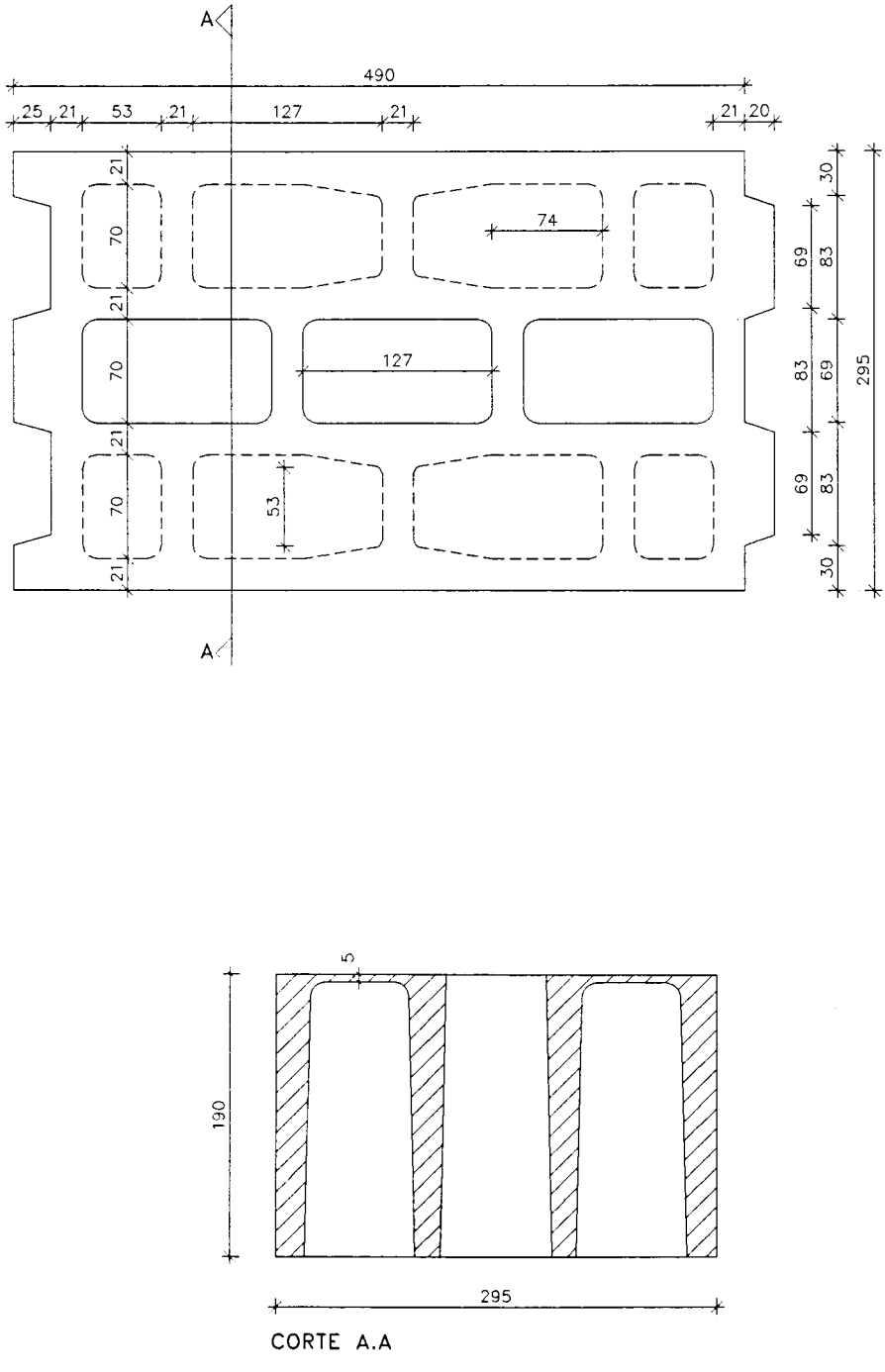


Fig. 6.8 - Geometria do bloco "*Bloco de 30* "

6.6.2 - Geometria melhorada simulada

Sendo objectivo do trabalho promover a melhoria do desempenho térmico e mecânico dos elementos para alvenaria, considerou-se interessante desenvolver uma nova geometria que sendo tecnologicamente exequível, fosse de encontro às preocupações transmitidas durante o trabalho e cujo custo final de venda seja aceitável. Tiveram-se presentes as exigências normativas aplicáveis a blocos de betão de inertes leves (vd. 5.8). Mantiveram-se o comprimento e altura de coordenação de 500 mm e 200 mm respectivamente. Quanto à espessura, optou-se pela espessura de coordenação de 250 mm. Esta espessura permite, em princípio, obter um desempenho térmico compatível com as exigências do *RCCTE* [8], devendo ainda assegurar um desempenho satisfatório relativamente a outras exigências funcionais, com destaque para a estanquidade à água da chuva e conforto acústico.

Concebeu-se um bloco com junta de assentamento horizontal descontínua. Esta descontinuidade localiza-se de forma assimétrica, dividindo o bloco em duas zonas argamassadas, com 75 mm e 145 mm respectivamente, ligadas por uma zona não argamassada de 30 mm. A zona argamassada mais espessa é virada para o exterior.

As juntas verticais dispõem de dispositivos de encaixe tipo macho-fêmea para auxiliar a montagem, embora próximo da face exterior se tenha previsto uma reentrância para preencher com argamassa, constituindo um cordão de junta vertical. Este preenchimento parcial da junta vertical visa melhorar o comportamento da parede à água da chuva.

Optou-se por uma geometria interna do bloco constituída por 5 fiadas de alvéolos dispostas perpendicularmente ao fluxo e 4 fiadas de alvéolos paralelas ao fluxo, mas dispostas de forma desalinhada. A disposição dos septos transversais foi estabelecida de tal forma que, se o aparelho de assentamento for realizado com um desfasamento de 50%, os mesmos sobrepõem-se integralmente. A espessura dos septos é de 20 mm a meia altura do bloco. O bloco dispõe de um fundo cego de 5 mm, excepto nos alvéolos que materializam a descontinuidade. A percentagem de furação deste bloco, designado *melhorado* é de 39.5% enquanto o do bloco corrente com a mesma espessura, produzido pela PAVILECA é de 41.5%.

Procurou-se que a quantidade de betão constituinte deste bloco não fosse muito superior à das geometrias correntes, pois a quantidade de betão reflecte-se no preço final do bloco e numa maior dificuldade de manuseio, com reflexos particularmente no assentamento.

Quanto ao comportamento mecânico deste bloco, comparativamente ao bloco corrente de espessura idêntica, presume-se que o mesmo virá melhorado pelas seguintes razões:

- o bloco apresenta um maior número de septos longitudinais e uma maior secção resistente nessa direcção;
- caso o aparelho de assentamento garanta um desfasamento de 50%, há uma sobreposição total da secção dos blocos entre fiadas.

Apresenta-se na fig. 6.9 a geometria do bloco 500 mm x 200 mm x 250 mm *melhorado*.

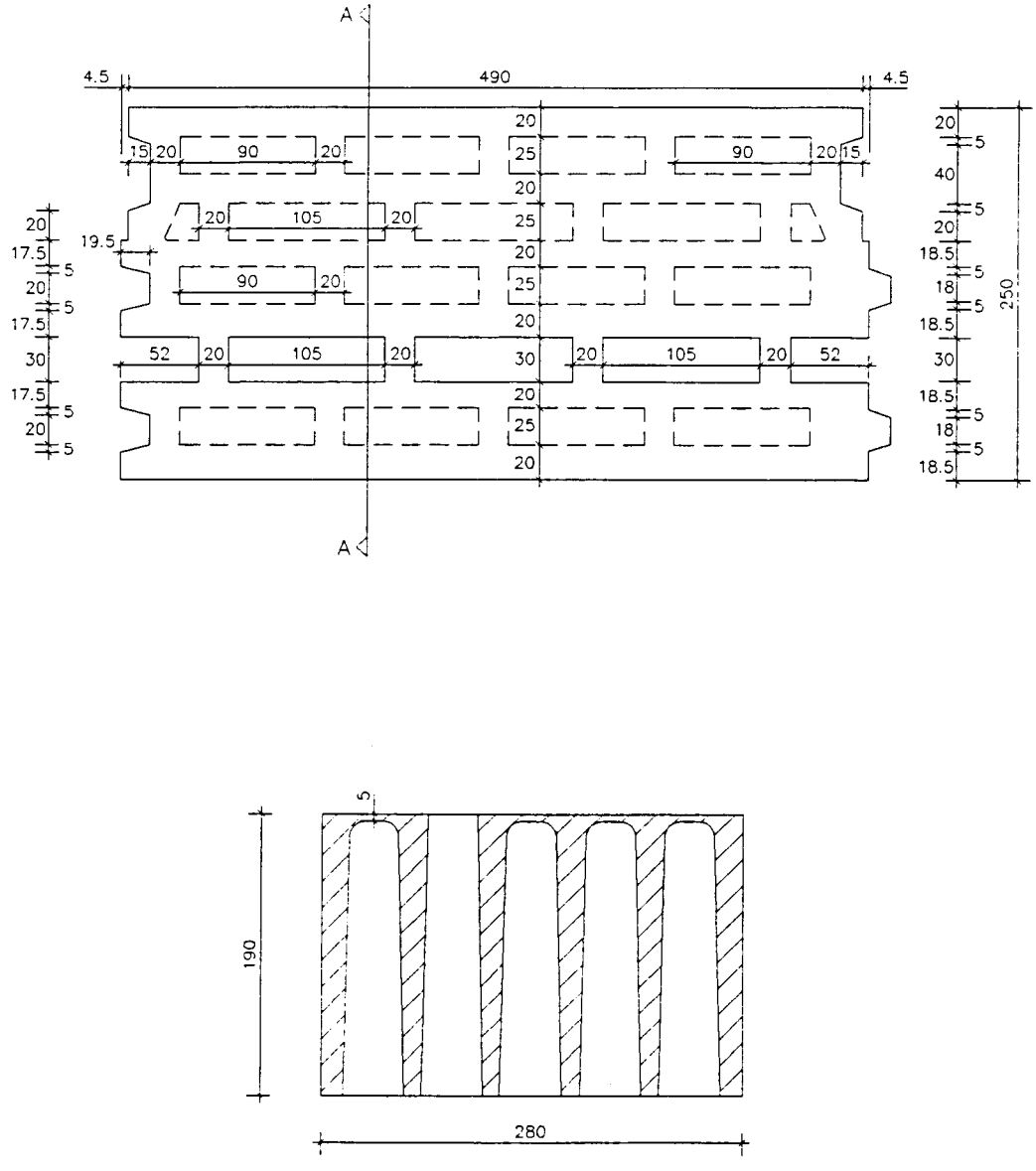


Fig. 6.9 - Geometria do bloco 500 mm x 200 mm x 250 mm *melhorado*

6.6.3 - Parâmetros a variar na simulação

Na simulação de geometrias reais correntes e *melhorada*, fizeram-se variar os parâmetros associados às características físicas dos elementos e forma de execução das alvenarias, a exemplo do efectuado para as geometrias teóricas, nomeadamente condutibilidade térmica do betão constituinte dos blocos, da argamassa das juntas e reboco. Fez-se variar também a espessura da junta horizontal de assentamento, por forma a avaliar as implicações no comportamento térmico da adopção de juntas delgadas. Consideraram-se as condutibilidades térmicas adoptadas para a simulação especulativa e ainda as condutibilidades térmicas obtidas na caracterização experimental dos materiais constituintes dos provetes, Quadro 6.10.

Quadro 6.10 - Condutibilidades térmicas consideradas na simulação de geometrias reais

CONDUTIBILIDADE TÉRMICA λ (W/(m.ºC))												
Betão usado na confecção dos blocos						Argamassa de assentamento				Argamassa de reboco		
						Normal			Leve			
1	2	3	4	5	6*	I	II	III*	III*	i	ii	iii*
0.30	0.40	0.45	0.60	1.40	0.43	1.15	0.70	1.08	0.45	1.15	0.70	0.97

* - Valores resultantes da caracterização experimental

Na simulação das juntas verticais não argamassadas, dispondo de configurações de encaixe nos topos, teve-se em consideração a existência de uma pequena lâmina de ar resultante da configuração geométrica das juntas. Na simulação das juntas argamassadas horizontais, cujo contributo é explicitado a 3D, supôs-se uma espessura para as mesmas de 10 mm, correspondente à espessura das juntas correntes e uma espessura de 3 mm correspondente a uma junta de assentamento delgada.

6.6.4 - Tipos de elementos e nível de discretização

Na simulação do comportamento térmico dos elementos reais para alvenaria em 2D e 3D usaram-se os mesmos elementos usados na simulação de geometrias teóricas e já descritos em 6.5.3. O nível de discretização adoptado nos planos "*XY*" e em "*XYZ*", foi análogo ao usado na simulação de geometrias teóricas. Atendendo à configuração geométrica do topo dos blocos, não foi possível recorrer a simplificação de simetria, pelo que se simulou o comportamento de 2 meios blocos justapostos através de uma junta vertical.

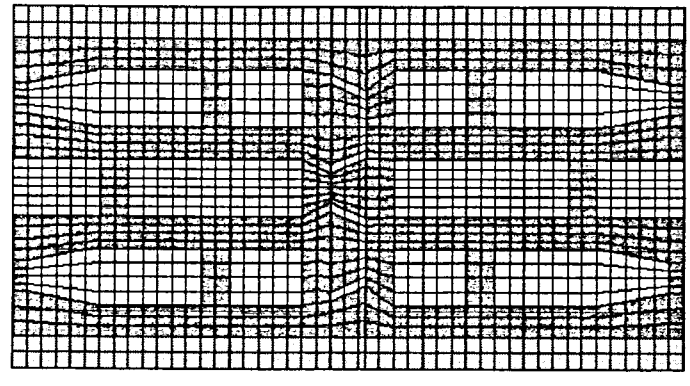
6.6.5 - Situações simuladas e resultados

Sintetizam-se nos Quadros 6.11a 6.14 os resultados obtidos para as quatro geometrias.

Quadro 6.11 - Situações simuladas e resultados da simulação numérica relativa ao bloco real " *Bloco de 20* "

"*K*" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - GEOMETRIAS REAIS

BLOCO 500 X 200 X 200 - GEOMETRIA E MALHA



1504 elementos a 2D — furação 34.2%

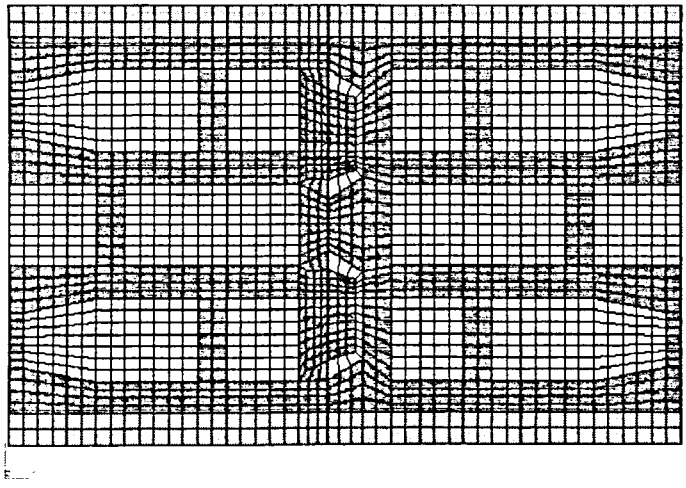
Sub. Refª	Sim.	Juntas horizontais	Condutibilidade (W/(m.ºC)) Betão	Arg. assent.	Arg. reb.	Alvéolos ε	*Rmáx* (m².ºC/W)	*Rmin* (m².ºC/W)	*K* (W/(m².ºC))	Obs.
1	2D	-	0.30	1.15	1.15	0.95	0.189	0.169	1.052	
2	2D	-	0.40	1.15	1.15	0.95	0.189	0.169	1.182	
3	2D	-	0.45	1.15	1.15	0.95	0.189	0.169	1.251	
4	2D	-	0.60	1.15	1.15	0.95	0.189	0.169	1.396	
5	2D	-	1.40	1.15	1.15	0.95	0.189	0.169	1.914	
6	2D	-	0.40	0.70	0.70	0.95	0.189	0.169	1.158	
7	2D	-	1.40	0.70	0.70	0.95	0.189	0.169	1.813	
8	3D	corrente	0.40	1.15	1.15	0.95	0.189	0.169	1.306	
9	3D	corrente	0.40	0.70	0.70	0.95	0.189	0.169	1.235	
10	3D	corrente	1.40	1.15	1.15	0.95	0.189	0.169	2.071	
11	3D	delgada	0.40	1.15	1.15	0.95	0.189	0.169	1.255	
12	3D	delgada	0.40	0.70	0.70	0.95	0.189	0.169	1.209	
13	3D	delgada	1.40	1.15	1.15	0.95	0.189	0.169	2.046	
14	3D	corrente	0.43	1.08	0.97	0.95	0.189	0.169	1.326	1

1 - Características consideradas coincidentes com as observadas na validação experimental

Quadro 6.12 - Situações simuladas e resultados da simulação numérica relativa ao bloco real *"Bloco de 25"*

"K" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - GEOMETRIAS REAIS

BLOCO 500 X 200 X 250 - GEOMETRIA E MALHA



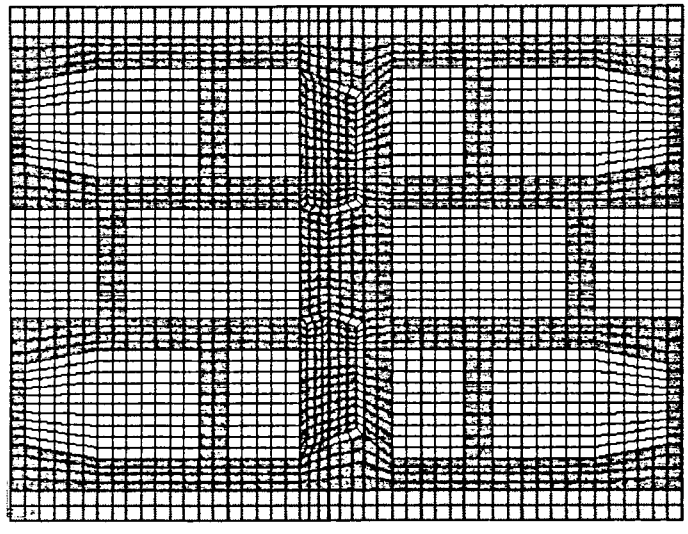
2016 elementos a 2D — furação 41.5%

Sub. Refª	Sim.	Juntas horizontais	Condutibilidade (W/(m.ºC)) Betão	Arg. assent.	Arg. reb.	Alvéolos ε	Rmáx (m².ºC/W)	Rmin (m².ºC/W)	K (W/(m².ºC))	Obs.
1	2D	-	0.30	1.15	1.15	0.95	0.197	0.165	0.980	
2	2D	-	0.40	1.15	1.15	0.95	0.197	0.165	1.100	
3	2D	-	0.45	1.15	1.15	0.95	0.197	0.165	1.151	
4	2D	-	0.60	1.15	1.15	0.95	0.197	0.165	1.281	
5	2D	-	1.40	1.15	1.15	0.95	0.197	0.165	1.740	
6	2D	-	0.40	0.70	0.70	0.95	0.197	0.165	1.073	
7	2D	-	1.40	0.70	0.70	0.95	0.197	0.165	1.635	

Quadro 6.13 - Situações simuladas e resultados da simulação numérica relativa ao bloco real " *Bloco de 30* "

"*K*" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - GEOMETRIAS REAIS

BLOCO 500 X 200 X 300 - GEOMETRIA E MALHA



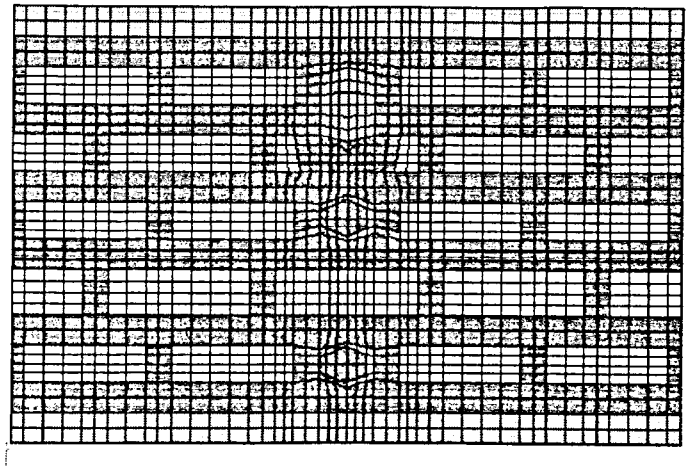
2496 elementos a 2D — furação 51 %

Sub. Refª	Sim.	Juntas horizontais	Condutibilidade (W/(m.ºC)) Betão	Arg. assent.	Arg. reb.	Alvéolos ε	*Rmáx* (m².ºC/W)	*Rmin* (m².ºC/W)	*K* (W/(m².ºC))	Obs.
1	2D	-	0.30	1.15	1.15	0.95	0.198	0.187	0.926	
2	2D	-	0.40	1.15	1.15	0.95	0.198	0.187	1.034	
3	2D	-	0.45	1.15	1.15	0.95	0.198	0.187	1.080	
4	2D	-	0.60	1.15	1.15	0.95	0.198	0.187	1.198	
5	2D	-	1.40	1.15	1.15	0.95	0.198	0.187	1.618	
6	2D	-	0.40	0.70	0.70	0.95	0.198	0.187	1.010	
7	2D	-	1.40	0.70	0.70	0.95	0.198	0.187	1.560	

Quadro 6.14 - Situações simuladas e resultados da simulação numérica relativa ao bloco *melhorado* 500 x 200 x 250

"*K*" - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - GEOMETRIAS REAIS

BLOCO 500 X 200 X 250 - MELHORADO - GEOMETRIA E MALHA



1748 elementos a 2D — furação 39.4%

Sub. Refª	Sim.	Juntas horizontais	Condutibilidade (W/(m.ºC)) Betão	Arg. assent.	Arg. reb.	Alvéolos ε	*Rmáx* (m².ºC/W)	*Rmin* (m².ºC/W)	K (W/(m².ºC))	Obs.
1	2D	-	0.30	1.15	1.15	0.95	0.190	0.180	0.778	
2	2D	-	0.40	1.15	1.15	0.95	0.190	0.180	0.884	
3	2D	-	0.45	1.15	1.15	0.95	0.190	0.180	0.929	
4	2D	-	0.60	1.15	1.15	0.95	0.190	0.180	1.048	
5	2D	-	1.40	1.15	1.15	0.95	0.190	0.180	1.484	
6	2D	-	0.40	0.70	0.70	0.95	0.190	0.180	0.860	
7	2D	-	1.40	0.70	0.70	0.95	0.190	0.180	1.426	
8	3D	corrente	0.40	1.15	1.15	0.95	0.190	0.180	0.980	
9	3D	corrente	0.40	0.70	0.70	0.95	0.190	0.180	0.915	
10	3D	corrente	1.40	1.15	1.15	0.95	0.190	0.180	1.600	
11	3D	delgada	0.40	1.15	1.15	0.95	0.190	0.180	0.920	
12	3D	delgada	0.40	0.70	0.70	0.95	0.190	0.180	0.880	
13	3D	delgada	1.40	1.15	1.15	0.95	0.190	0.180	1.545	
14	3D	corrente	0.43	1.08	0.97	0.95	0.190	0.180	0.990	1
15	3D	corrente	0.43	0.45	0.97	0.95	0.190	0.180	0.920	1

1 - Características consideradas coincidentes com as observadas na validação experimental

6.7 - APRECIAÇÃO DOS RESULTADOS

A validação dos resultados é discutida no Capítulo 7.

A apreciação dos resultados das duas vertentes de simulação, análise de sensibilidade e geometrias reais, é efectuada no Capítulo 8.

A análise comparativa às saídas gráficas de resultados, que se apresentam no Anexo III, nomeadamente gradientes e distribuição de temperatura, permite formular as seguintes conclusões:

a) **Análise de sensibilidade a 2D**

- O valor absoluto do gradiente de temperaturas na direcção do fluxo, segundo y, varia com a condutibilidade térmica do betão constituinte dos blocos e com o contributo do alvéolo para o K do bloco, (traduzindo em que medida a configuração do alvéolo é eficaz para aumentar o seu isolamento);
- A importância relativa dos alvéolos, expressa pela diferença entre o gradiente nos alvéolos e nos septos, cresce nos blocos tendo por base betões pouco isolantes;
- As " pontes térmicas" do bloco, traduzidas pelas variações do gradiente ao longo de secções longitudinais do elemento, são mais importantes nos blocos tendo por base betões pouco isolantes;
- A distribuição de temperaturas ao longo do bloco é mais uniforme nos elementos realizados a partir de betões isolantes. Nestes blocos é menos sensível o efeito das juntas verticais de assentamento, em termos de distribuição de temperatura;
- Nos blocos com alvéolos desalinhados ou em losango as "pontes térmicas" são menos expressivas e a distribuição de temperaturas é mais uniforme do que nos blocos homólogos com alvéolos alinhados.

b) **Análise de sensibilidade a 3D**

- O gradiente de temperatura segundo z tem um peso relativo muito inferior ao peso do gradiente segundo y. O fluxo nesta direcção só assume valores com algum significado nas zonas vizinhas da intersecção dos septos com o fundo cego;
- A distribuição de temperaturas segundo z não sofre variações importantes relativamente à distribuição que é verificada em 2D.

c) **Geometrias reais**

- As conclusões possíveis de formular, tendo por base a análise dos gradientes e distribuição de temperaturas a 2D e a 3D relativa às geometrias reais, são análogas às já formuladas a propósito das outras geometrias. Merece destaque o contributo das juntas verticais de encaixe e a interrupção da junta horizontal de assentamento para o melhor desempenho térmico destes blocos, que são visíveis nessas distribuições.

CAPÍTULO 7

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MODELOS

CAPÍTULO 7

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MODELOS

ÍNDICE

7.1 - INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS
7.2 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS ALVENARIAS
7.2.1 - Descrição do equipamento de ensaio disponível no *LNEC*
7.2.1.1 - Aspectos gerais
7.2.1.2 - Câmara quente
7.2.1.3 - Câmara fria
7.2.1.4 - Porta-provetes
7.2.1.5 - Funcionamento e calibração
7.2.2 - Programa experimental
7.2.2.1 - Provetes e parâmetros analisados
7.2.2.2 - Execução e controlo dos provetes
7.2.2.3 - Instrumentação e registo de informação
7.2.2.4 - Ensaio dos provetes
7.2.2.5 - Caracterização complementar
7.2.2.6 - Fiabilidade e erros
7.2.3 - Resultados
7.2.3.1 - Metodologia de tratamento de dados
7.2.3.2 - Curva de calibração da câmara de ensaio
7.2.3.3 - Características térmicas dos provetes ensaiados
7.2.3.4 - Validação experimental do modelo numérico
7.3 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ALVENARIAS DE BLOCOS DE BETÃO LEVE SOB ACÇÃO DE CARGAS VERTICAIS
7.3.1 - Aspectos gerais
7.3.2 - Elementos de betão leve usados no estudo
7.3.3 - Parâmetros analisados
7.3.3.1 - Resistência à compressão dos blocos de betão de inertes leves
7.3.3.2 - Argamassa de assentamento
7.3.3.3 - Aparelho da alvenaria
7.3.3.4 - Tipo de provete de alvenaria
7.3.4 - Programa de ensaio das alvenarias
7.3.5 - Programa de ensaio dos materiais constituintes das alvenarias
7.3.6 - Controlo e execução dos provetes
7.3.6.1 - Controlo dos blocos e inertes
7.3.6.2 - Controlo da composição da argamassa
7.3.6.3 - Controlo das condições de execução dos provetes
7.3.6.4 - Execução dos provetes
7.3.7 - Ensaio dos provetes
7.3.7.1 - Equipamento de ensaio
7.3.7.2 - Preparação dos provetes para ensaio
7.3.7.3 - Técnica de ensaio e registo
7.3.8 - Resultados do estudo experimental
7.3.8.1 - Materiais constituintes
7.3.8.2 - Resultados dos ensaios de compressão normal

CAPÍTULO 7

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MODELOS

7.1 - INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

Com o objectivo de validar os resultados obtidos na simulação numérica, achou-se necessário proceder a ensaios de caracterização térmica e mecânica de provetes de alvenaria.

No que respeita à caracterização térmica, procedeu-se à determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica, em regime permanente, de alguns provetes de parede realizados com blocos de betão de argila expandida. De acordo com o já referido no Capítulo 3, os métodos normalizados aplicáveis a componentes são o método da câmara quente com guarda e o da câmara quente calibrada. Em Portugal não existia à data de início deste processo equipamento disponível adquirido ou desenvolvido com este objectivo. Existiam, no entanto, referências a equipamento que permitia determinar experimentalmente a resistência térmica global de provetes de grandes dimensões, montado no *LNEC* em 1969 e entretanto desactivado [199], bem como equipamento de carácter provisório desenvolvido pelo *DEMEGI* da *FEUP* que foi destruído num incêndio. No Núcleo de Comportamento de Componentes do *LNEC* existe uma câmara climática calibrada, desenvolvida em 1985 para um trabalho de Tese, cujo objectivo era o estudo teórico e experimental, em condições de Inverno, da transmissão de calor em janelas [12]. Este equipamento com ligeiras adaptações permite o ensaio de paredes. Atendendo a diversas limitações, optou-se por utilizar este último equipamento.
Neste Capítulo faz-se a descrição do equipamento referido, disponível no *LNEC*, das adaptações que foi necessário efectuar no mesmo, dos provetes ensaiados e dos resultados obtidos.

No que respeita à caracterização do comportamento mecânico das alvenarias de blocos de betão de argila expandida sob acção de cargas verticais, identificados os factores principais que condicionam a resistência à compressão das alvenarias, conforme discutido no Capítulo 5, ensaiaram-se alguns provetes por forma a avaliar experimentalmente a influência desses parâmetros.

Foi analisada a influência dos seguintes factores :

- argamassa de assentamento, sendo alguns provetes realizados com argamassa normal de assentamento, enquanto outros com uma argamassa-cola para juntas delgadas;
- aparelho de assentamento;

- geometria dos provetes.

Na realização dos provetes usaram-se blocos de betão de argila expandida, semelhantes aos usados na caracterização térmica.
Os ensaios foram realizados recorrendo a equipamento existente na *FEUP*.

Neste Capítulo faz-se a descrição do programa experimental, com destaque para os elementos usados no estudo, parâmetros analisados, tipo de provetes, técnicas e resultados de ensaio.

7.2 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS ALVENARIAS

7.2.1 - Descrição do equipamento de ensaio disponível no *LNEC*

7.2.1.1 - Aspectos gerais

O equipamento disponível, concebido e desenvolvido no *LNEC* para o estudo teórico e experimental, em condições de Inverno, da transmissão de calor em janelas, baseia-se no princípio da câmara quente calibrada [72,74].

De forma resumida trata-se de duas câmaras termicamente isoladas, ditas câmara quente e câmara fria, que apertam contra um porta-provetes colocado entre as câmaras, no qual está montado o provete. O aperto é realizado por meio de pernos periféricos, fazendo-se o encosto mediante perfis de borracha que simultaneamente conferem isolamento térmico e estanquidade ao ar. Para assegurar constância de aperto existem anéis espaçadores de ambos os lados do porta-provetes.

Ambas as câmaras dispõem de rodas metálicas e deslocam-se sobre carris, permitindo a sua abertura e fecho. A montagem sobre carris assegura ainda o posicionamento constante indispensável ao aperto do conjunto. O porta-provetes está fixo aos carris através de uma estrutura metálica.

A câmara quente calibrada foi desenvolvida para provetes com espessura máxima de 0.200 m e coeficiente de transmissão térmica - K - entre 1 e 8 W/(m^2.°C). As temperaturas limites previstas na concepção do equipamento foram de 40 °C na câmara quente e de -10 °C na câmara fria.

A fig. 7.1 apresenta uma fotografia do conjunto e a fig. 7.2 uma representação esquemática.

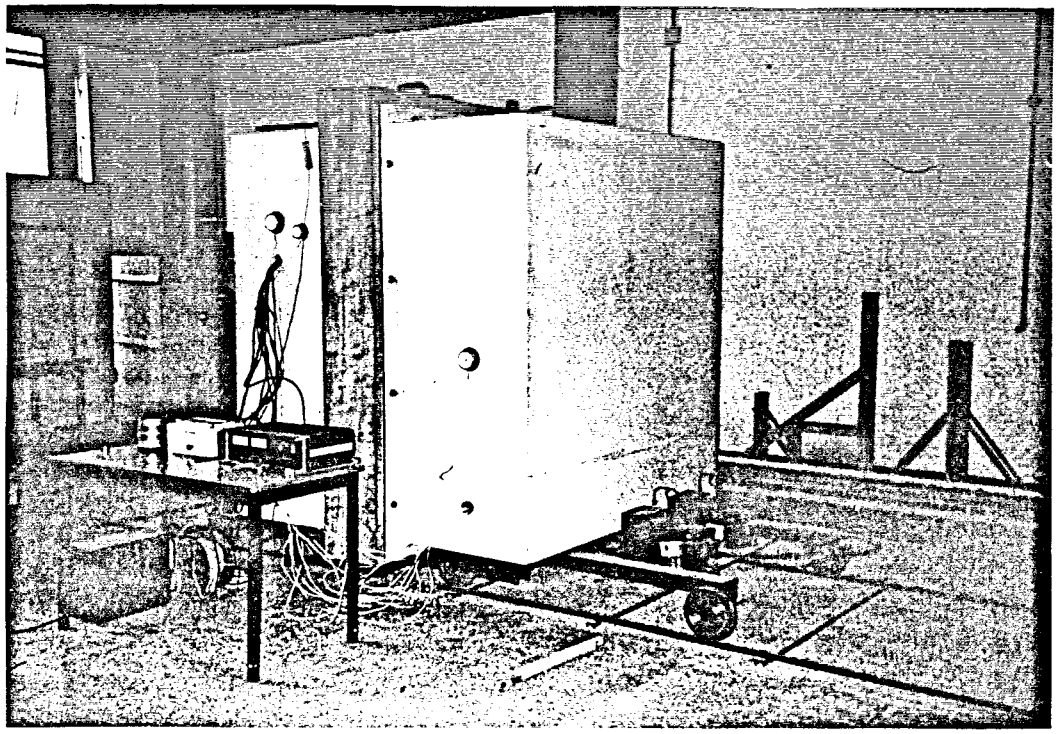


Fig. 7.1 - Conjunto das câmaras e porta-provetes na posição fechada

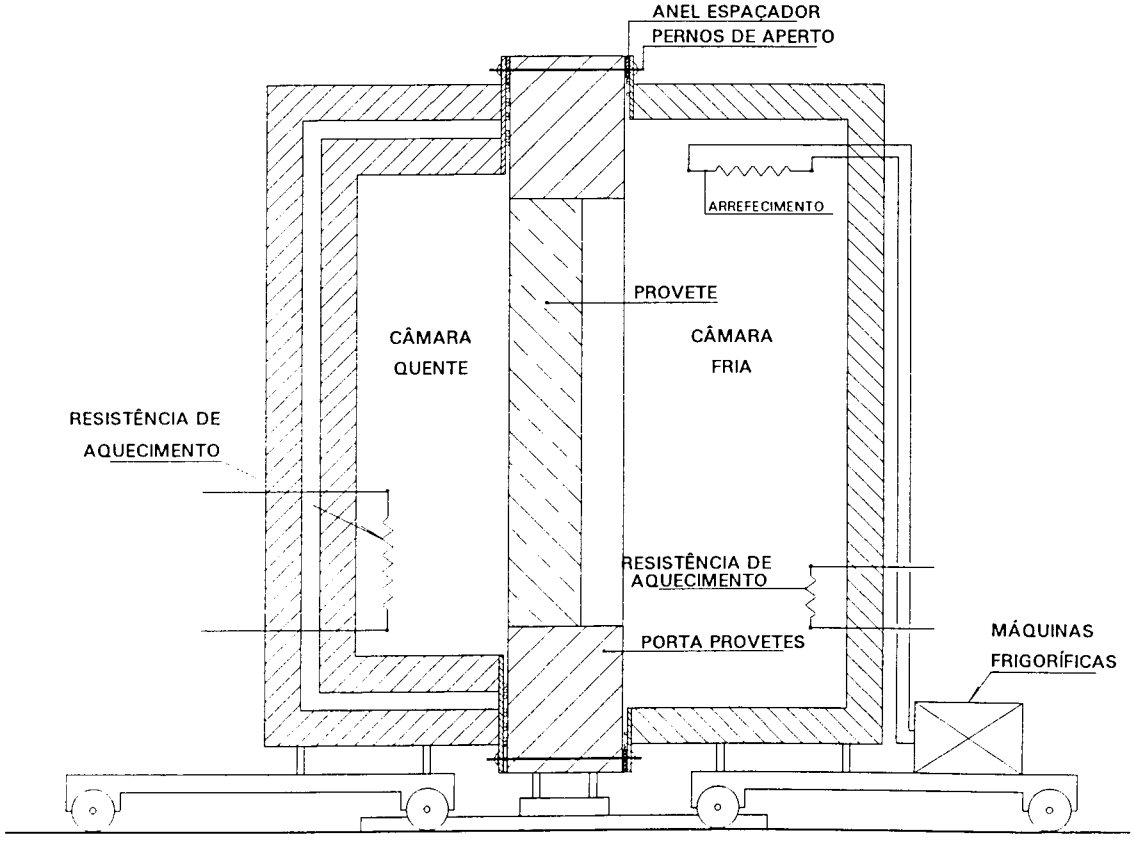


Fig. 7.2 - Esquema do conjunto das câmaras para ensaios térmicos

7.2.1.2 - Câmara quente

De acordo com a norma ASTM C976-90 [74], o fluxo de calibração da câmara quente deve ser inferior a 25% do fluxo através do provete. Esta condição visa garantir que a parcela significativa das perdas da câmara quente se processam através do provete, em condições de fluxo estacionário horizontal. As outras perdas que constituem o fluxo de calibração perturbam estas condições e deverão ser minimizadas. O fluxo de calibração é proporcional ao gradiente entre as temperaturas no interior e exterior da câmara e à área da envolvente da câmara em contacto com o exterior. A exigência atrás enunciada, acentuada para provetes muito isolantes, obriga a limitar ao máximo as dimensões da câmara e a que a mesma seja o mais isolante possível.

A envolvente da câmara em apreço é constituída por duas camadas de 0.100 m de espuma de poliuretano expandido em placa, com 35 kg/m^3, revestidas interior e exteriormente a poliester reforçado com fibra de vidro. A lâmina de ar entre as camadas dispõe de um écran térmico, com face reflectora virada para o interior. A câmara não tem qualquer elemento resistente metálico e tem apenas dois orifícios para passagem de cabos. A estanquidade ao ar é assegurada por um conjunto de seis vedantes, funcionando três por aperto e três por encosto.

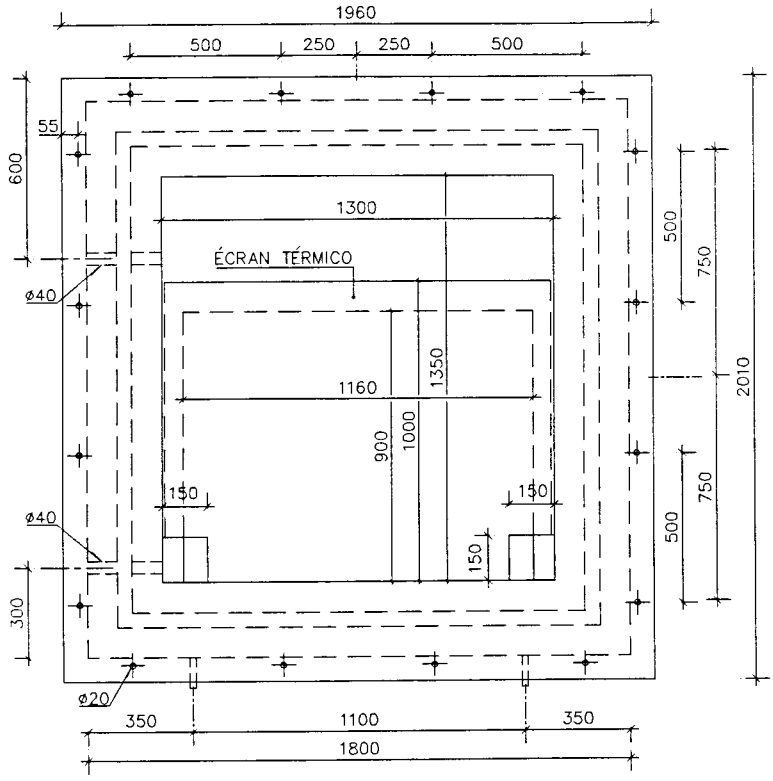
A reprodutibilidade das condições de aperto é assegurada por espaçadores montados entre o porta-provetes e a câmara. A fig. 7.3 representa a câmara quente.

A câmara quente é aquecida através de convector equipado com resistência de aquecimento. O convector foi concebido por forma a que o aquecimento seja o mais uniforme possível e feito por convecção para o ar ambiente. Para provetes correntes, as resistências dissipam potências muito inferiores aos máximos admissíveis.

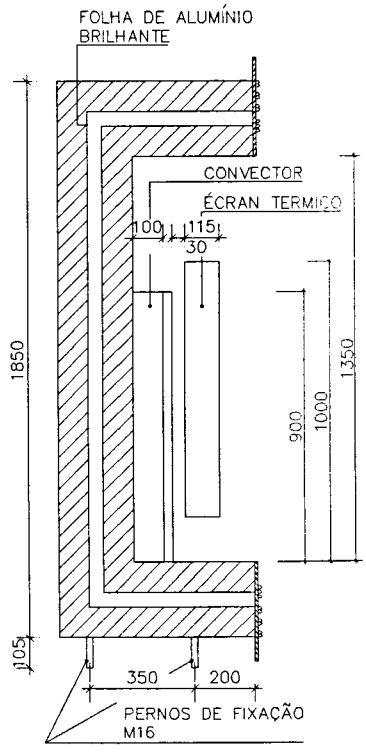
A alimentação eléctrica à câmara quente é assegurada através de uma fonte de corrente contínua regulável. A potência a fornecer em contínuo é determinada por medição da tensão eléctrica aos terminais da resistência e da intensidade de corrente respectiva.

A câmara é pintada pelo interior de preto baço. Dispõe de um écran térmico em grande parte da altura em aço inox. A face do écran virada para o convector é polida e tem uma absorvidade muito reduzida, enquanto a outra face é revestida a papel baço. Conseguem-se assim na face virada para o provete emissividades superiores a 0.95 na banda dos infravermelhos, inserindo o provete num recinto fechado cujas paredes se comportam aproximadamente como corpos negros.

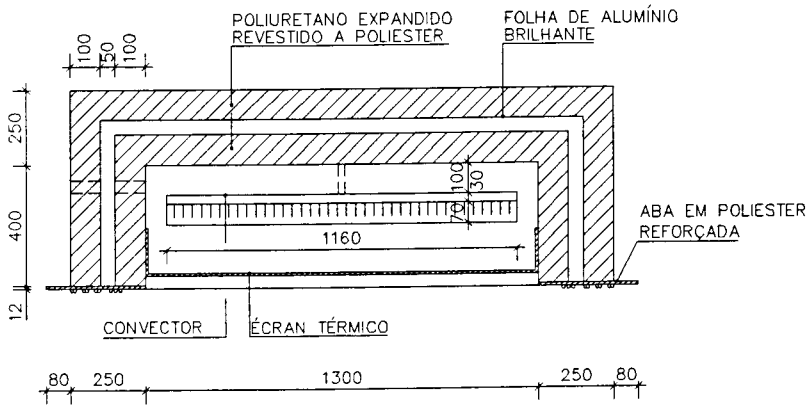
O écran assegura ainda que a circulação de ar no interior da câmara, fundamentalmente por convecção, se processa paralelamente ao provete.



ALÇADO



CORTE VERTICAL



CORTE HORIZONTAL

DIMENSÕES – mm

Fig. 7.3 - Câmara quente

7.2.1.3 - Câmara fria

A câmara fria tem exigências de isolamento inferiores às da câmara quente. É constituída por uma camada de 0.100 m de espuma de poliuretano, revestida com poliester análogo ao da câmara quente. Da mesma forma não apresenta qualquer elemento metálico no seu interior. A estanquidade ao ar é também assegurada por um conjunto de três vedantes, existindo da mesma forma um anel espaçador para garantir a constância do aperto. A fig. 7.4 representa a câmara fria.

A câmara fria dispõe de duas máquinas frigoríficas. No interior estão montados dois evaporadores e ventiladores que asseguram a circulação do ar, bem como um termostato e um convector, alimentado por um autotransformador, que permitem estabilizar a temperatura da câmara fria num valor arbitrário, inferior ou superior à temperatura ambiente.

De forma análoga à câmara quente, todas as paredes interiores da câmara fria são pintadas de preto baço.

7.2.1.4 - Porta-provetes

O porta-provetes original do equipamento tinha sido concebido para janelas, permitia ensaiar no máximo provetes de 0.200 m de espessura e não apresentava resistência mecânica compatível com o suporte de uma parede de alvenaria, pelo que não podia ser utilizado.

Foi assim necessário conceber um porta-provetes que simultaneamente satisfizesse os seguintes requisitos:

- compatibilidade com a câmara;
- isolamento térmico elevado;
- permitir ensaiar paredes de espessura até 0.300 m;
- resistência mecânica compatível com as acções actuantes e pouco deformável;
- permitir a correcta execução dos provetes e a sua movimentação do local de execução para a câmara de ensaio;
- económico, dado o ritmo de ensaios obrigar à execução de um porta-provetes para cada provete a ensaiar.

Optou-se por realizar um porta-provetes geometricamente igual ao original, mas mais espesso, constituído por poliestireno expandido com massa volúmica de 30 kg/m^3, revestido parcialmente a contraplacado marítimo. A rigidez mecânica é conseguida através de duas vigas de madeira, uma superior e outra inferior, e pela contribuição do contraplacado marítimo que liga e envolve o conjunto.

A padieira pode ser montada e desmontada através de um sistema deslizante de encaixe.

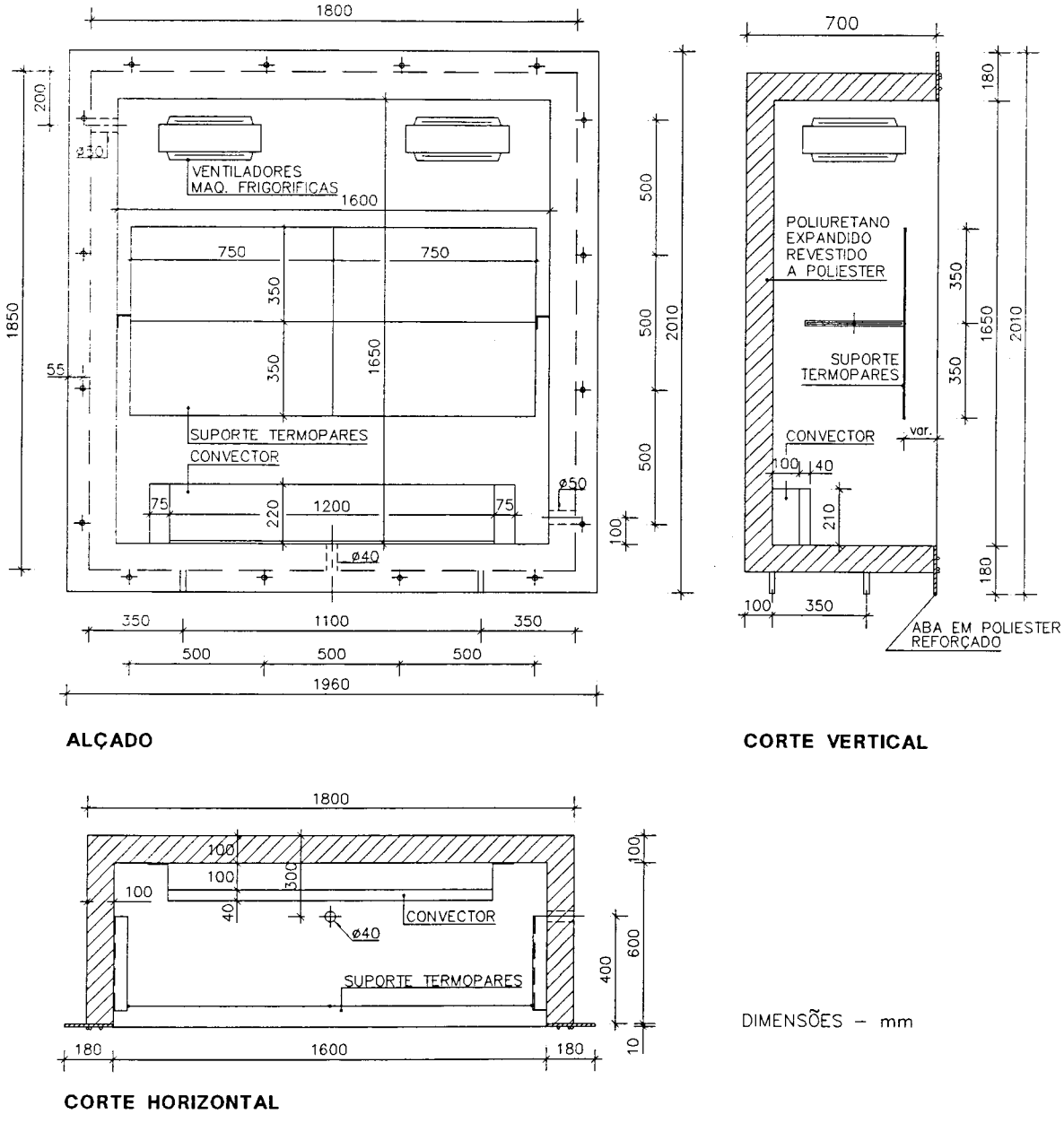
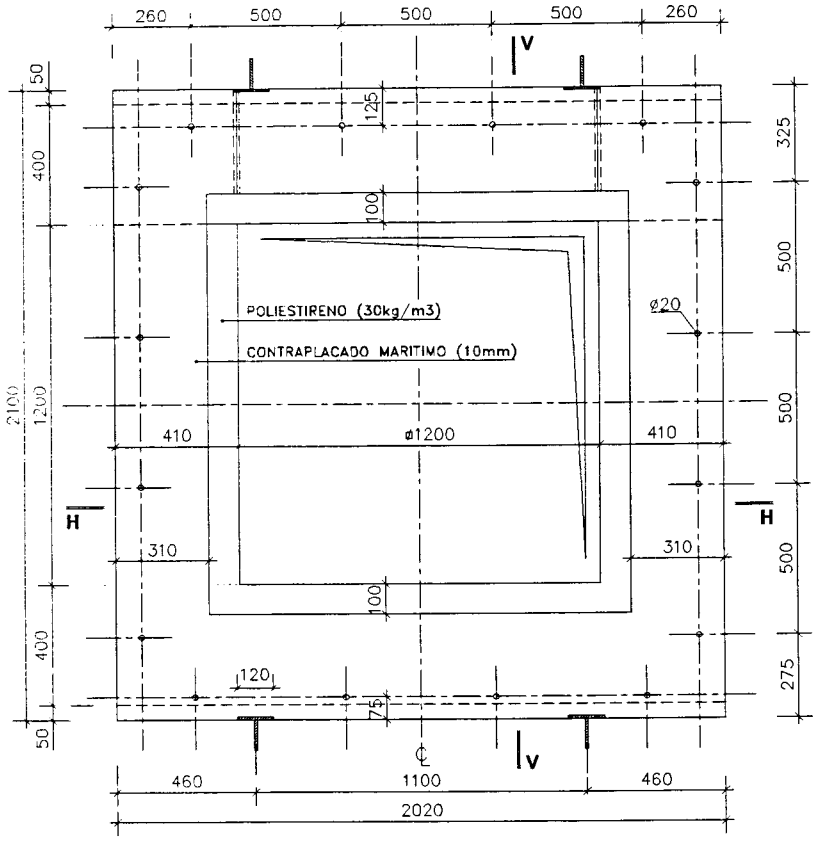
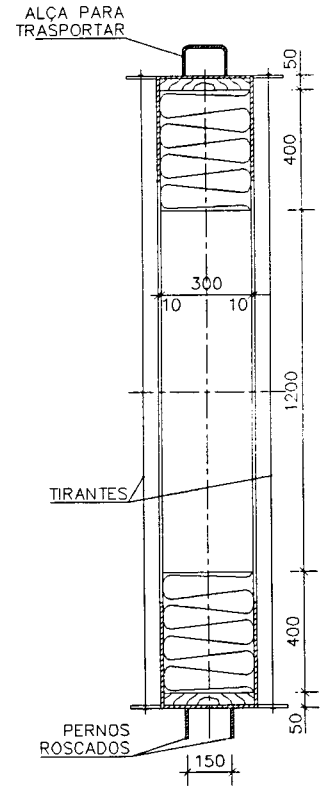


Fig. 7.4 - Câmara fria

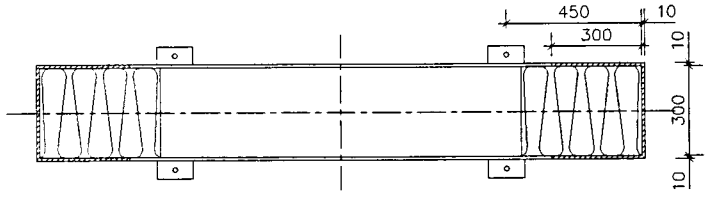
Inferiormente o conjunto dispõe de pernos roscados para fixação à estrutura de suporte. Para o transporte a viga superior dispõe de 2 alças metálicas, sendo o conjunto travado por 4 tirantes em aço, apertados entre as vigas de rigidez. Esta disposição impede a danificação do provete e a abertura das juntas no interface provete/poliestireno. A fig. 7.5 ilustra o que se acabou de descrever.



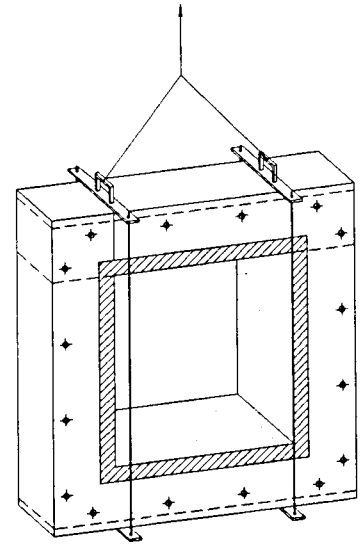
ALÇADO



CORTE V.V



CORTE H.H



PERSPECTIVA DE TRANSPORTE

DIMENSÕES – mm

Fig. 7.5 - Esquema do porta-provetes

7.2.1.5 - Funcionamento e calibração

O equipamento concebido e disponível no *LNEC* estava preparado para provetes de 1.200 x 1.200 m^2, com coeficientes de transmissão térmica entre 1 e 8 W/(m^2.ºC) e temperaturas limites a atingir de 40 ºC e -10 º C na câmara quente e fria respectivamente. Verifica-se no entanto que minimizando a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura na câmara quente, é possível ensaiar provetes com coeficientes de transmissão térmica inferiores a 1 W/(m^2.ºC), pois o fluxo de calibração vem reduzido e não atinge 25% do fluxo que atravessa o provete, condição de ensaio imposta na ASTM C976-90 [74].

O equipamento foi inicialmente concebido para várias situações de funcionamento com destaque para:

- funcionamento como câmara quente calibrada e câmara fria;
- funcionamento como câmara quente calibrada sem câmara fria.

Na determinação da transmissão de calor em janelas, o autor do equipamento usou sobretudo a câmara como câmara quente calibrada sem câmara fria [12]. Esta técnica não pode ser usada nos provetes de parede, apesar de mais simples. Nestes, a sua maior resistência térmica aumenta o peso relativo do fluxo de calibração, obrigando a minimizar o gradiente entre a câmara quente e o ambiente, enquanto o gradiente entre as temperaturas das câmaras quente e fria deverá ser maximizado. Estas condições impõem necessariamente a refrigeração da câmara fria.

A determinação do coeficiente de transmissão térmica dos provetes requer o conhecimento dos seguintes parâmetros:

- potência de aquecimento;
- temperaturas do ar na câmara fria e quente;
- temperaturas nas duas faces do provete, ou em alternativa o fluxo que o atravessa se o mesmo for muito homogéneo;
- temperatura ambiente exterior;
- temperaturas na superfície interior e exterior da câmara quente;
- curva de calibração do equipamento, (dispensável quando se determina directamente o fluxo que atravessa o provete).

A calibração visa determinar, para diferentes gradientes entre a câmara quente e o ambiente exterior, o fluxo perdido pelas paredes da câmara quente e de forma marginal pelo porta-provetes. A calibração é efectuada recorrendo à realização de ensaios com um material de condutibilidade térmica conhecida. A caracterização exaustiva do equipamento foi efectuada pelo seu autor na Tese já referida [12], identificando os regimes de escoamento das câmaras, as condições de repetibilidade dos ensaios, bem como a calibração da câmara quente com o porta-provetes inicial.

7.2.2 - Programa experimental

7.2.2.1 - Provetes e parâmetros analisados

O objectivo primordial da caracterização experimental foi validar a simulação numérica descrita no Capítulo 6. Usaram-se blocos de betão de argila expandida correntes de 200 mm de espessura (designado comercialmente por "Bloco de 20") e o bloco *melhorado* de 250 mm de espessura, concebido especialmente para o efeito, conforme referido em 6.6.2. O primeiro faz parte da produção habitual da fábrica, enquanto o segundo visa melhorar o comportamento térmico e mecânico da geometria corrente, sem penalizar exageradamente o seu custo.

Não se conhecem em Portugal resultados experimentais recentes de caracterização térmica de soluções correntes de paredes. O último trabalho desta índole de que se tem conhecimento remonta a 1970 [199]. Os valores de referência habitualmente utilizados, constantes das tabelas publicadas pelo *LNEC* [75,76] resultam de simulação numérica efectuada pelo método simplificado referido na *ISO* 6946/1 [78]. Atendendo à morosidade e custo deste tipo de ensaios optou-se por realizar apenas 5 provetes:

- *Provete 1* - Provete de alvenaria de tijolo furado 300 mm x 200 mm x 150 mm, assente com argamassa normal de cimento e areia e rebocado em ambas as faces com argamassa bastarda na espessura aproximada de 15 mm em cada face;
- *Provete 2* - Provete de alvenaria de blocos de betão leve de argila expandida, geometria corrente 500 mm x 200 mm x 200 mm, assente com argamassa normal de cimento e areia e rebocado em ambas as faces com argamassa bastarda na espessura aproximada de 15 mm em cada face;
- *Provete 3* - Provete de alvenaria de blocos de betão leve de argila expandida, geometria melhorada 500 mm x 200 mm x 250 mm, assente com argamassa normal de cimento e areia e rebocado em ambas as faces com argamassa bastarda na espessura aproximada de 15 mm em cada face;
- *Provete 4* - Provete de alvenaria de blocos de betão leve de argila expandida, geometria melhorada 500 mm x 200 mm x 250 mm, assente com argamassa leve de cimento, areia e argila expandida, rebocado em ambas as faces com argamassa bastarda na espessura aproximada de 15 mm em cada face;
- *Provete 5* - Provete de calibração, constituído por uma placa de poliestireno expandido extrudido, *DOW*, referência AGMATE XL, originário da Alemanha, com 40 mm de espessura.

Incluiu-se na caracterização um provete de tijolo cerâmico, dado não existirem em Portugal resultados experimentais de qualquer material para alvenaria, podendo este provete contribuir para explicar eventuais discrepâncias entre os resultados obtidos e os valores tabelados. Para analisar o contributo da argamassa de assentamento no isolamento térmico, fez-se variar a mesma nos

provetes 3 e 4. Enquanto em todos os restantes provetes se usou uma argamassa normal de cimento e areia, no provete 4 usou-se uma argamassa de cimento, areia normal e areia leve de argila expandida. Todos os provetes foram rebocados com a mesma argamassa e na mesma espessura, quer porque em termos operativos a argamassa de reboco contribui para a homogeneização da temperatura superficial dos provetes, quer porque em termos de resultados, interessa dispor de valores que possam ser comparados com os disponíveis em tabelas e com as exigências regulamentares.

7.2.2.2 - Execução e controlo dos provetes

Os 4 provetes de alvenaria foram realizados a partir de materiais conhecidos e caracterizados. Os tijolos cerâmicos 300 mm x 200 mm x 150 mm, com 12 furos, eram provenientes duma Cerâmica do Oeste, estando relativamente bem caracterizados dado terem sido usados noutros ensaios efectuados no *LNEC*. Os blocos de betão de argila expandida foram fornecidos pela Empresa produtora de artefactos de betão leve que colaborou neste trabalho. Correspondem a produções objecto de controlo de qualidade realizado em fábrica, incidindo sobre as matérias-primas, o processo e o produto acabado. Todas as características relevantes relativas aos blocos usados nos provetes eram conhecidas. Conforme já foi referido usaram-se duas geometrias de blocos, uma corrente de 500 mm x 200 mm x 200 mm e outra de 500 mm x 200 mm x 250 mm, desenvolvida com carácter de protótipo para este trabalho. Os restantes materiais utilizados são correntes e de características conhecidas:

- cimento Portland *CIMPOR* CPC 32.5 em sacos de 50 kg;
- cal Hidráulica *CABO MONDEGO*, em sacos de 50 kg;
- areia do rio lavada e peneirada extraída na margem Sul do Tejo, zona de Alcochete, usada correntemente em ensaios no *LNEC*;
- areia "*amarela*" de areeiro, proveniente da zona do Alfeite, usada correntemente no *LNEC*;
- argila expandida granulometria 2/4 (designação comercial) fornecida em sacos de 50 l, produzida na *LECA PORTUGAL*.

A execução dos provetes foi precedida de uma programação de trabalhos. Essa programação visou:

- definir a geometria dos provetes;
- definir os traços de argamassa a utilizar;
- efectuar uma escolha prévia dos tijolos e blocos por atributos de aspecto;
- cortar com a dimensão necessária os elementos de remate;
- reunir em quantidade suficiente e em condições idênticas os materiais a usar na realização dos provetes;
- definir quais as características dos materiais que iam ser objecto de controlo complementar.

Nas figuras 7.6 a 7.10 apresenta-se a geometria dos provetes 1 a 5.

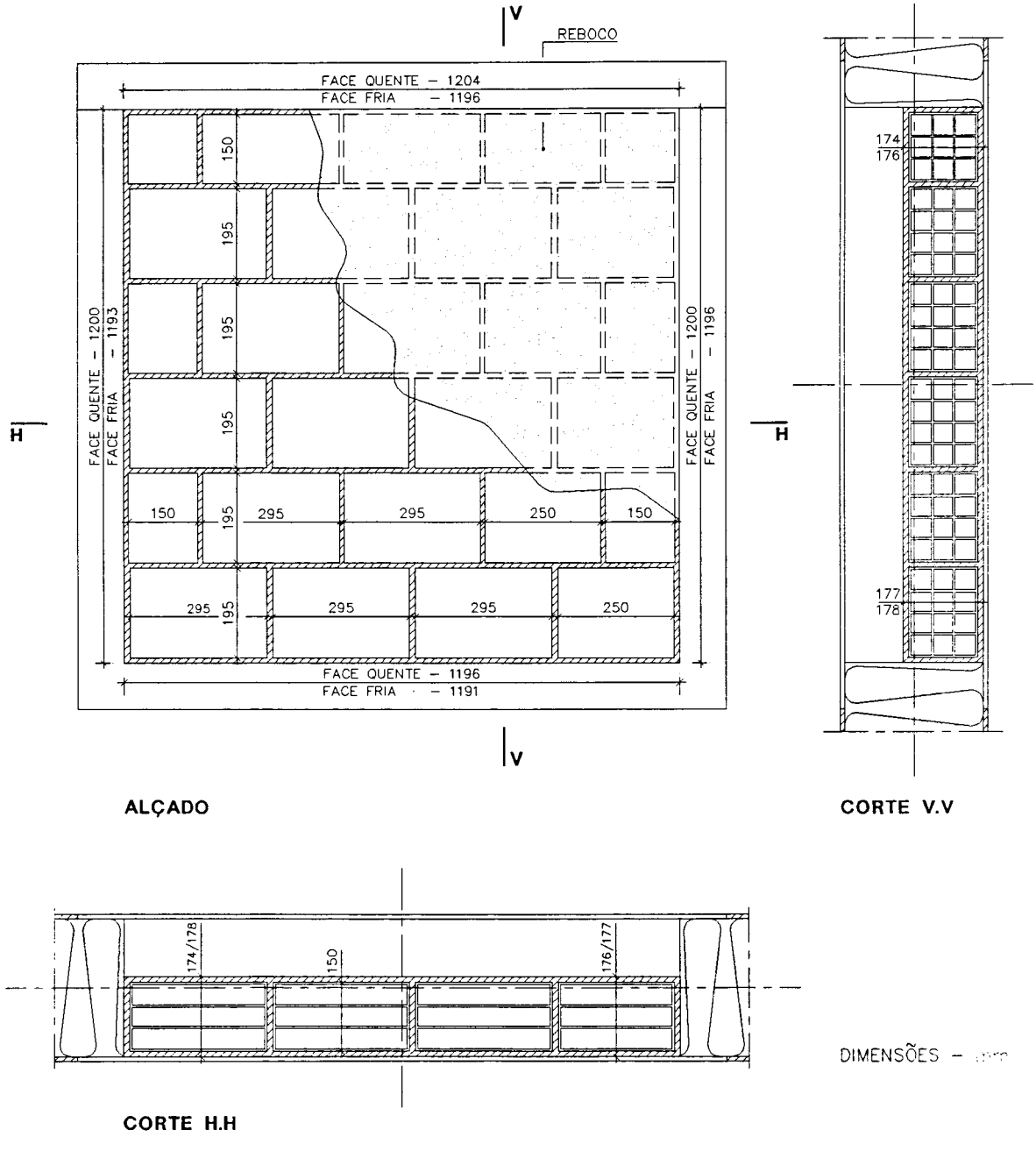


Fig. 7.6 - Geometria do provete 1

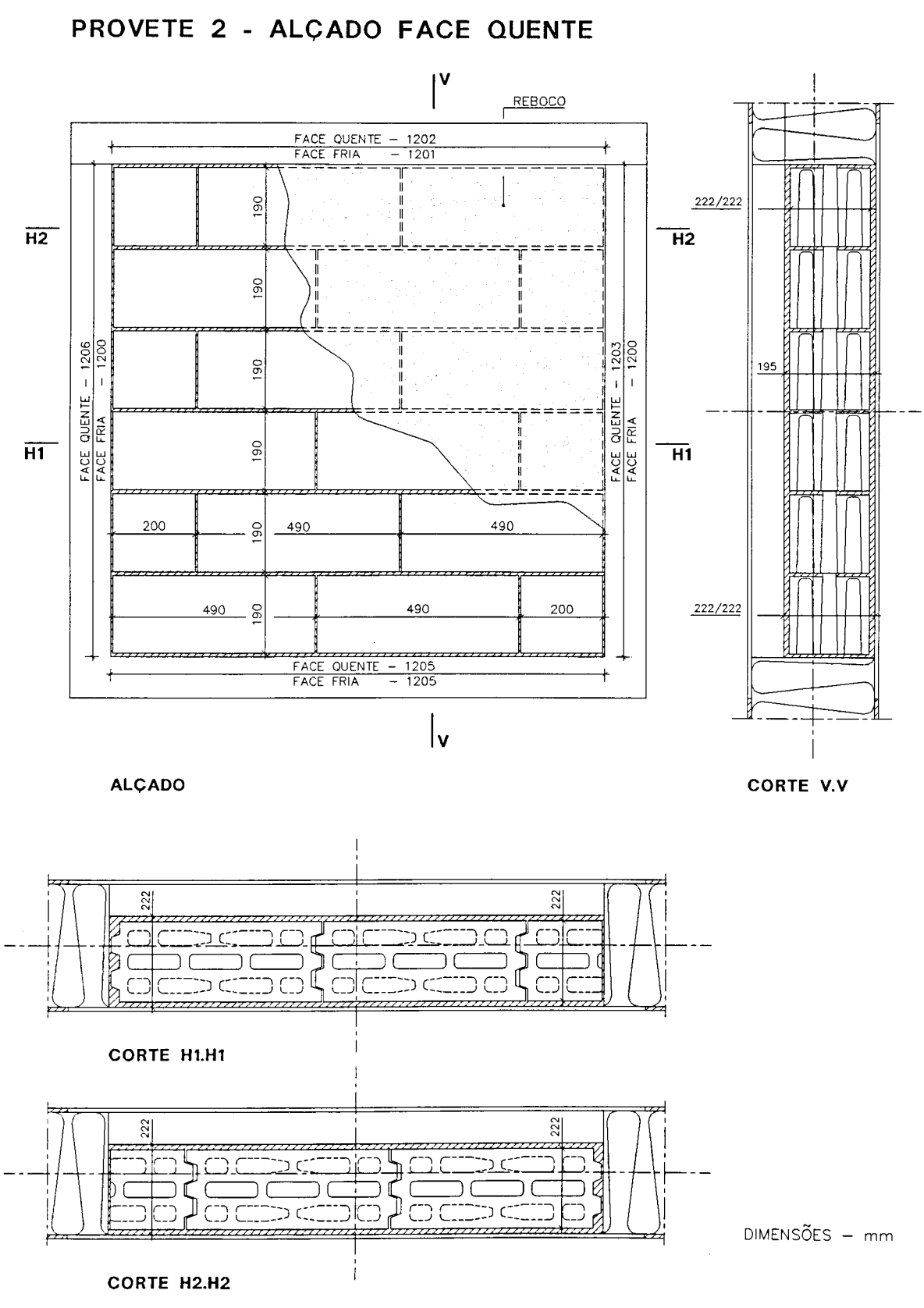


Fig. 7.7 - Geometria do provete 2

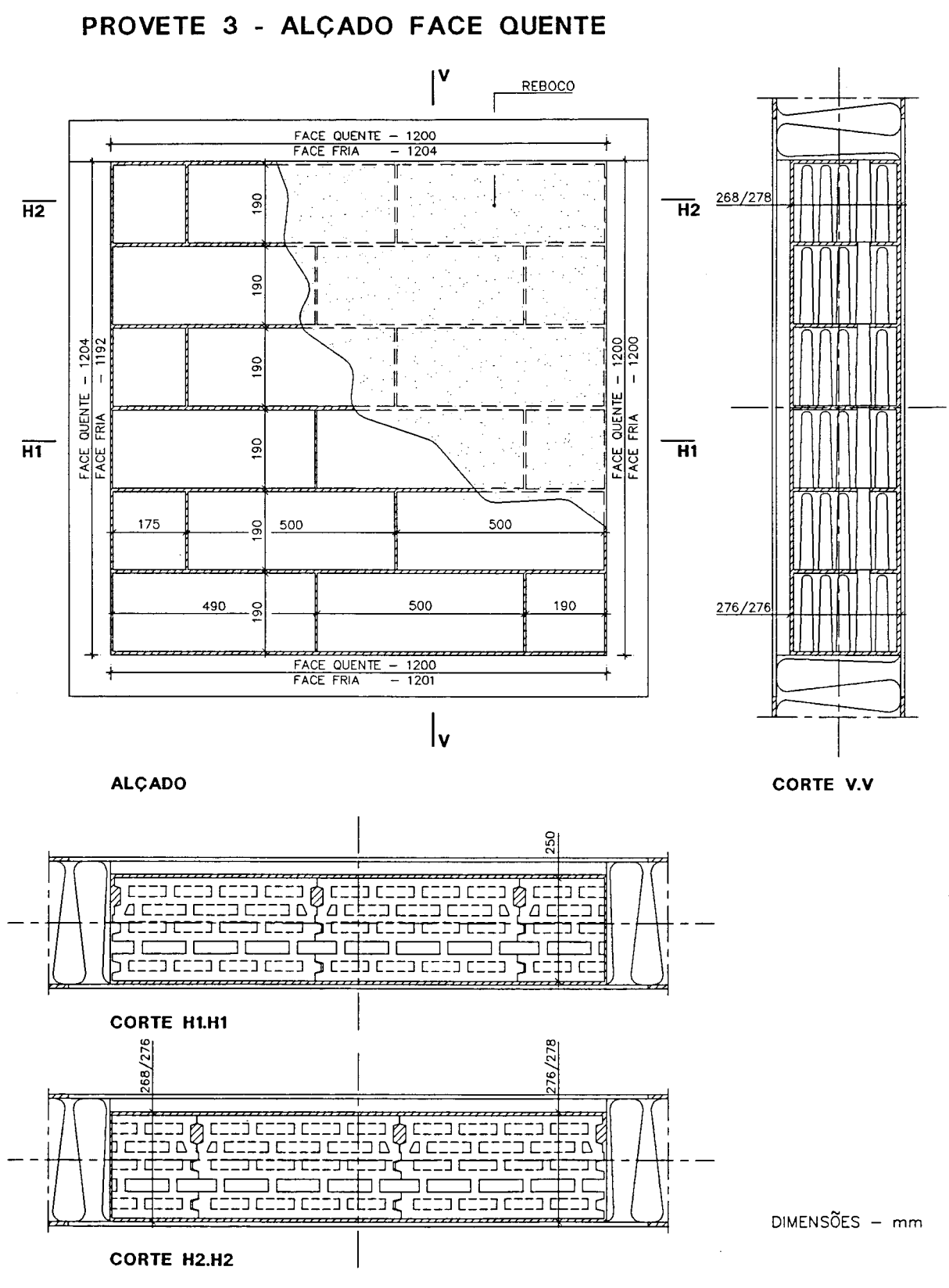


Fig. 7.8 - Geometria do provete 3

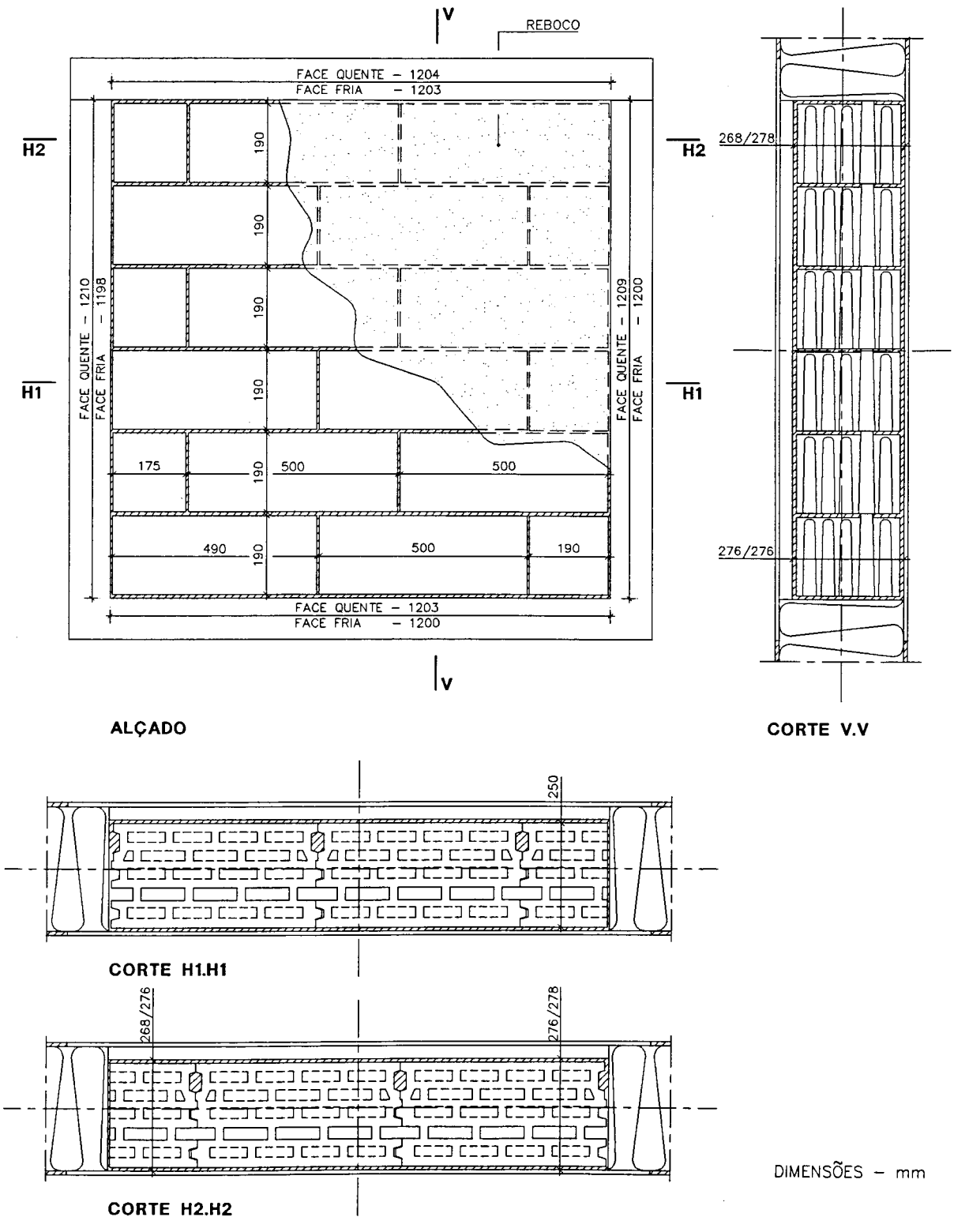


Fig. 7.9 - Geometria do provete 4

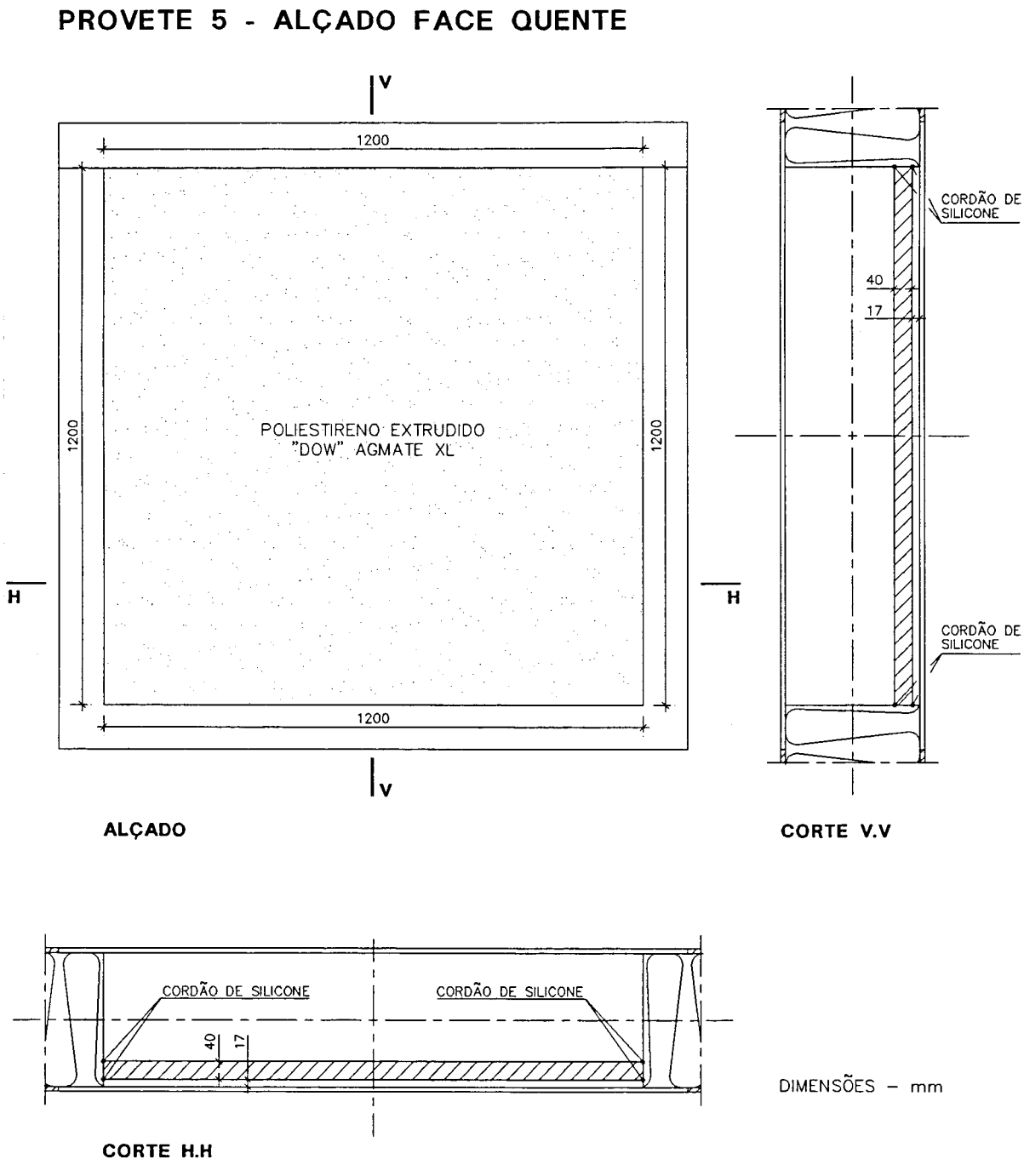


Fig. 7.10 - Geometria do provete 5

Os provetes foram realizados em duas sessões. Na 1ª sessão realizaram-se os provetes 1 a 3 e na 2ª sessão o provete 4. Os provetes foram executados no mesmo local e nas mesmas condições.

Os porta-provetes foram colocados sob um telheiro anexo ao Pavilhão de Componentes do *LNEC*, devidamente apoiados, travados e sem padieira, por forma a ser possível executar a parede. No 1º dia de cada sessão procedeu-se à execução da alvenaria no porta-provetes, colocação da padieira, fixação da mesma e salpico da alvenaria. No dia seguinte executou-se o reboco sobre o salpico em camada única. As argamassas foram sempre produzidas em betoneira e os elementos assentes da mesma forma. A figura 7.11 ilustra aspectos da execução dos provetes. Os Quadros 7.1 e 7.2 sintetizam os aspectos relevantes associados a cada provete.

a) Porta-provetes preparado para o assentamento da 1ª fiada



Fig. 7.11 - Aspectos da execução de provetes

b) Realização da alvenaria no porta-provetes



c) Provetes em diferentes fases de reboco



Fig. 7.11 (cont.) - Aspectos da execução de provetes

Quadro 7.1 - Síntese de dados relativos aos provetes 1 e 2

PROVETE	CONSTITUINTES	ASPECTOS CONSTRUTIVOS	DATAS EXEC. / TRANS.	CARACTERÍSTICAS CONTROLADAS
1	• Tijolo cerâmico 300x200x150 (12 furos) • Assentamento - Argamassa cimento e areia - 1:4 (1) • Salpico - Argamassa cimento e areia - 1:2 (1) • Reboco - Argamassa bastarda cimento, cal hidráulica e areia (1) (2) 1:1:6	• Tijolos assentes secos • Juntas verticais preenchidas com introdução de argamassa por cima • Execução ao ar livre em local abrigado • Padieira fixada contra junta de argamassa fresca, após assentamento • Salpico imediato após assentamento • Reboco 24 h após salpico	Assentamento e salpico -94.05.16 Reboco -94.05.17 Transporte para a nave -94.05.24	**Tijolos** Características dimensionais Resistência à compressão Absorção de água **Inertes** Distribuição granulométrica Módulo de finura Baridade Teor em partículas finas Equivalente de areia **Argamassa assentamento** Composição Massa volúmica Tensão de rotura à tracção por flexão Tensão de rotura por compressão Condutibilidade térmica **Argamassa reboco** Composição Massa volúmica Tensão de rotura à tracção por flexão Tensão de rotura por compressão Condutibilidade térmica
2	• Bloco corrente de inertes *LECA* 500x200x200 • Assentamento - Argamassa cimento e areia - 1:4 (1) • Salpico - Argamassa cimento e areia - 1:2 (1) • Reboco - Argamassa bastarda cimento, cal hidráulica e areia (1) (2) 1:1:6	• Blocos assentes secos • Juntas verticais secas • Junta horizontal descontínua • Execução ao ar livre em local abrigado • Padieira fixada contra junta de argamassa fresca após assentamento • Salpico imediato após assentamento • Reboco 24 h após salpico	Assentamento e salpico -94.05.16 Reboco -94.05.17 Transporte para a nave -94.05.24	**Blocos** Composição do betão (3) Cura (3) Características dimensionais Massa volúmica Resistência à compressão **Inertes** Distribuição granulométrica Módulo de finura Baridade Teor em partículas finas Equivalente de areia **Argamassa assentamento** Composição Massa volúmica Tensão de rotura à tracção por flexão Tensão de rotura por compressão Condutibilidade térmica **Argamassa reboco** Composição Massa volúmica Tensão de rotura à tracção por flexão Tensão de rotura por compressão Condutibilidade térmica

(1) - Traço volumétrico
(2) - Mistura de uma areia de rio e uma areia "amarela" na proporção de 2/1
(3) - Caracterização efectuada no Laboratório do Produtor

Quadro 7.2 - Síntese de dados relativos aos provetes 3, 4 e 5

PROVETE	CONSTITUINTES	ASPECTOS CONSTRUTIVOS	DATAS EXEC. / TRANS.	CARACTERÍSTICAS CONTROLADAS
3	• Bloco *melhorado* de inertes *LECA* 500x200x250 • Assentamento - Argamassa cimento e areia - 1:4 (1) • Salpico - Argamassa cimento e areia - 1:2 (1) • Reboco - Argamassa bastarda cimento, cal hidráulica e areia (1) (2) 1:1:6	• Blocos assentes secos • Juntas verticais secas • Junta horizontal descontínua • Execução ao ar livre em local abrigado • Padieira fixada contra junta de argamassa fresca, após assentamento • Salpico imediato após assentamento • Reboco 24 h após salpico	Assentamento e salpico -94.05.16 Reboco -94.05.17 Transporte para a nave -94.05.24	**Blocos** Composição do betão (3) Cura (3) Características dimensionais Massa volúmica Resistência à compressão **Inertes** Distribuição granulométrica Módulo de finura Baridade Teor em partículas finas Equivalente de areia **Argamassa assentamento** Composição Massa volúmica Tensão de rotura à tracção por flexão Tensão de rotura por compressão Condutibilidade térmica **Argamassa reboco** Composição Massa volúmica Tensão de rotura à tracção por flexão Tensão de rotura por compressão Condutibilidade térmica
4	• Bloco *melhorado* de inertes *LECA* 500x200x250 • Assentamento - Argamassa cimento, areia natural e areia argila expandida - 1:2:2 (1) • Salpico - Argamassa cimento e areia - 1:2 (1) • Reboco - Argamassa bastarda cimento, cal hidráulica e areia (1) (2) • 1:1:6	• Blocos assentes secos • Juntas verticais secas • Junta horizontal descontínua • Execução ao ar livre em local abrigado • Padieira fixada contra junta de argamassa fresca, após assentamento • Salpico imediato após assentamento • Reboco 24 h após salpico	Assentamento e salpico -94.06.22 Reboco -94.06.23 Transporte para a nave -94.07.13	**Blocos** Composição do betão (3) Cura (3) Características dimensionais Massa volúmica Resistência à compressão **Inertes** Distribuição granulométrica Módulo de finura Baridade Teor em partículas finas Equivalente de areia **Argamassa assentamento** Composição Massa volúmica Tensão de rotura à tracção por flexão Tensão de rotura por compressão Condutibilidade térmica **Argamassa reboco** Composição Massa volúmica Tensão de rotura à tracção por flexão Tensão de rotura por compressão Condutibilidade térmica
5	• Poliestireno expandido extrudido, DOW, Refª AGMATE XL, originário da Alemanha (placas 1.200 x 4.000)	• Montado justo no porta-provetes, sendo as juntas refechadas com cordão de silicone em ambas as faces		**Poliestireno expandido extrudido** Espessura Massa volúmica Condutibilidade

(1) - Traço volumétrico
(2) - Mistura de uma areia de rio e uma areia "amarela" na proporção de 2/1
(3) - Caracterização efectuada no Laboratório do Produtor

Procedeu-se à recolha de amostras para caracterização dos diversos constituintes dos provetes: tijolos cerâmicos, blocos de betão, poliestireno extrudido e inertes usados nas argamassas de assentamento e reboco.

Após um período de cura ao ar livre de cerca de uma semana, os provetes foram conduzidos para o interior da nave de ensaio para prosseguirem a cura. O transporte foi efectuado através de ponte rolante e com o porta-provetes devidamente atirantado, para que o provete não sofresse quaisquer danos.

Iniciou-se nesta altura a determinação regular da massa do provete, por forma a avaliar o tempo necessário para obtenção da humidade de equilíbrio. Para o efeito usou-se um dinamómetro *SALTER* com 1000 kg de capacidade e 1 kg de precisão. O dinamómetro era intercalado no guincho da ponte rolante.

O provete 5, de calibração, foi realizado montando no porta-provetes uma placa de poliestireno extrudido de 40 mm de espessura, cortada por forma a ajustar-se correctamente à abertura do porta-provetes. A placa era homogénea e não apresentava qualquer junta.

7.2.2.3 - Instrumentação e registo de informação

Os provetes e a câmara de ensaios foram instrumentados e ligados a um sistema de aquisição e registo de informação, conforme a seguir se refere.

a) **Medição de temperaturas**

Previu-se a determinação de temperaturas nos seguintes pontos:

- no tecto da câmara quente pelo interior ;
- no tecto da câmara quente pelo exterior, em ponto homólogo ao anterior;
- no ar da câmara quente, entre o écran térmico e o provete, em 9 pontos igualmente espaçados;
- no ar da câmara fria, em 9 pontos igualmente espaçados e homólogos aos da câmara quente;
- na face quente dos provetes, em 9 pontos igualmente espaçados;
- na face fria dos provetes, em 9 pontos igualmente espaçados e homólogos aos da câmara quente;
- em 4 pontos suplementares, dois na face quente e dois na face fria do provete de calibração, em zonas próximas do porta-provetes.

A posição dos termopares foi idêntica nas duas câmaras tendo-se respeitado o posicionamento estabelecido na sua construção. A localização dos termopares na face dos provetes foi estabelecida por forma a obter-se um conhecimento representativo das temperaturas nessas faces, respeitando os critérios relativos a número de termopares e posicionamento, constantes da normalização de referência, ASTM C976 - 90 [74]. Para além dos aspectos acabados de referir, procurou-se que existisse uma correspondência entre a posição dos termopares nas câmaras e nas faces do provete, evitando contudo localizar termopares sobre juntas de argamassa ou outros pontos singulares dos provetes que pudessem distorcer os resultados obtidos.

O afastamento aos provetes dos termopares destinados a medir a temperatura do ar nas câmaras, foi estabelecido por forma a haver a garantia de que o plano onde se faziam essas medições se encontrava para além da camada limite térmica.

As características dos termopares utilizados encontram-se no Anexo IV. A figura 7.12 ilustra a instrumentação das câmaras de ensaio, enquanto as figuras 7.13 a 7.16 ilustram a instrumentação dos provetes.

b) **Medição de fluxos**

Nos provetes 1 a 4, além da medição das temperaturas previu-se a medição de fluxos através de fluxímetros fixados do lado quente dos provetes. A localização dos fluxímetros foi estabelecida por forma a ser possível ponderar a diferença de fluxo entre as zonas correspondentes a troços correntes dos blocos e as juntas entre estes. As características dos fluxímetros utilizados encontram-se no Anexo IV.

A fixação dos fluxímetros à face quente do provete foi efectuada com interposição de uma fina camada de pasta de gesso, por forma a minimizar a resistência de contacto. As figuras 7.13 a 7.16 ilustram os pontos de instrumentação dos provetes.

c) **Condicionamento da câmara quente**

Utilizou-se uma fonte de alimentação *PHILIPS* PE 1644 disponível no *LNEC*, reunindo o estabilizador, autotransformador e rectificador, cujas características se encontram no Anexo IV.

De acordo com informação disponível as variações diárias na rede do *LNEC* serão de cerca de ± 5 V, pelo que a variação da tensão de alimentação em corrente contínua será inferior a 2mV.

Como aparelho de medida usou-se um Multímetro *BECKMANN* cujas características se transcrevem no Anexo IV.

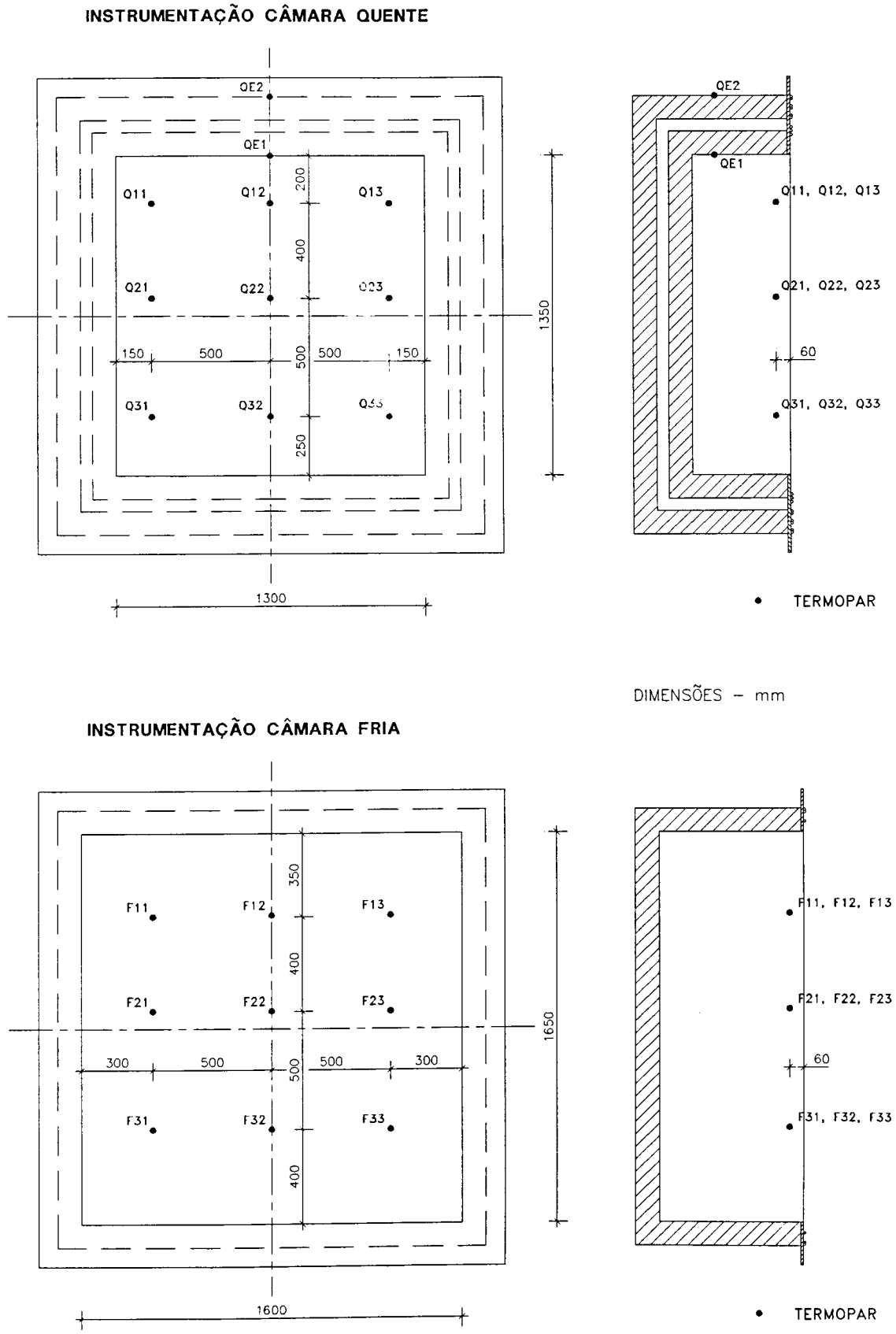


Fig. 7.12 - Instrumentação das câmaras quente e fria

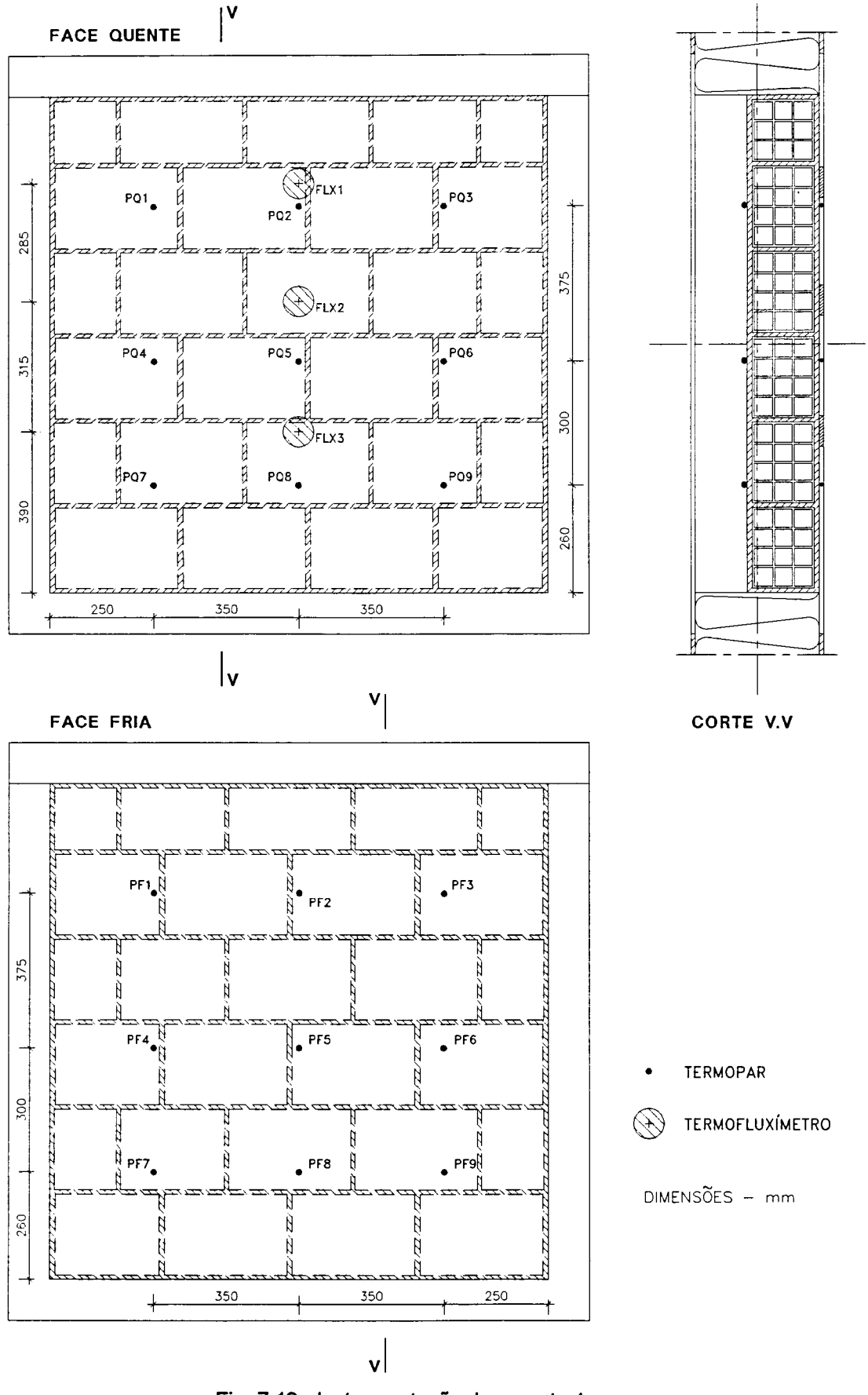


Fig. 7.13 - Instrumentação do provete 1

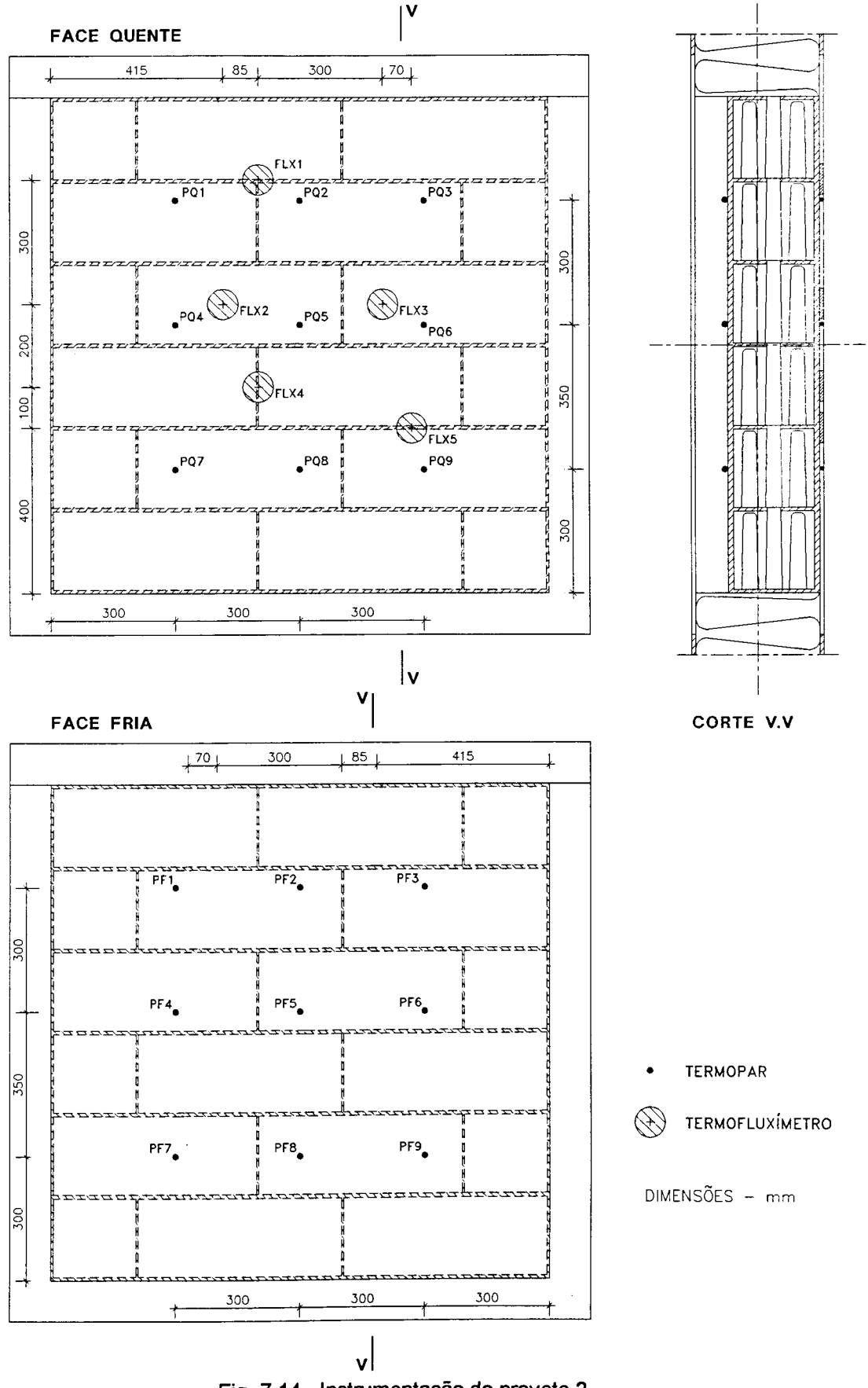


Fig. 7.14 - Instrumentação do provete 2

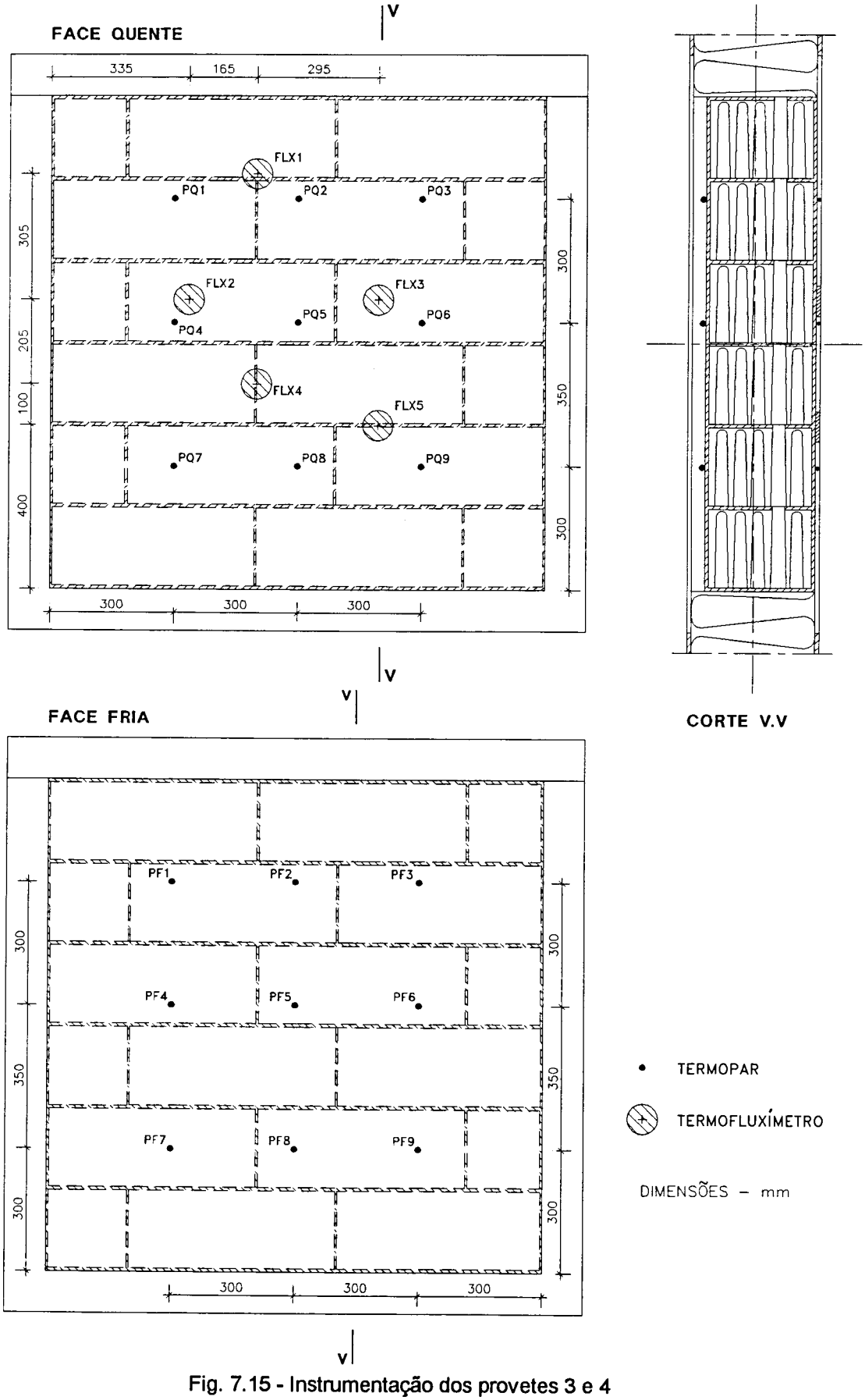


Fig. 7.15 - Instrumentação dos provetes 3 e 4

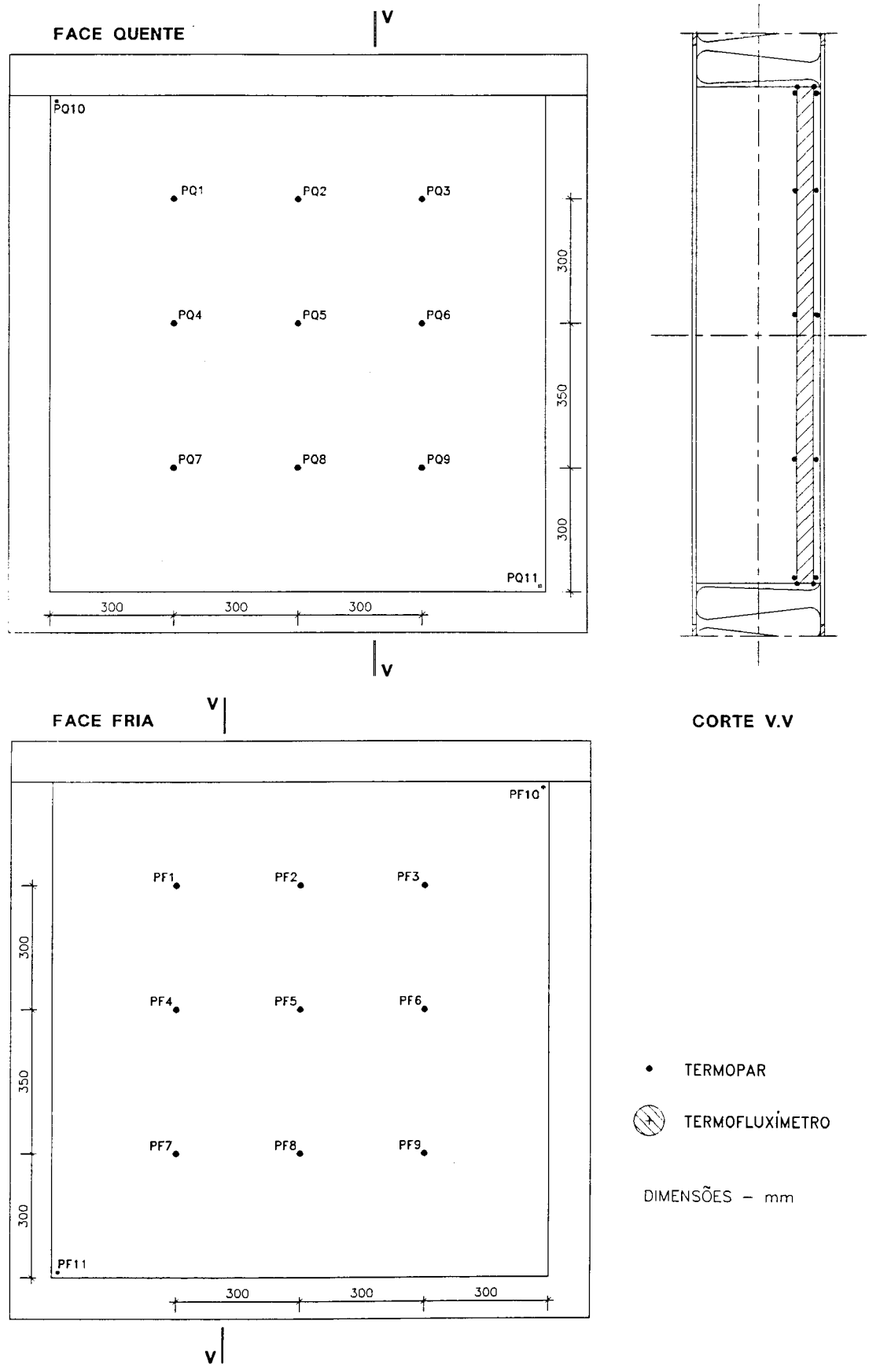


Fig. 7.16 - Instrumentação do provete 5

d) **Condicionamento da câmara fria**

A câmara fria dispõe de 2 circuitos frigoríficos idênticos. Cada um é activado por um compressor *ASPERA*. No interior da câmara fria encontram-se dois evaporadores *FRIMETAL* que extraem cerca de 150 W cada a - 5ºC.

Os compressores são alimentados por um estabilizador de 1000 VA que mantém a tensão de saída em 220 ± 2V, com tensões de entrada variáveis até 10%. O comando é efectuado por um termostato *RANCO*, com temperaturas reguláveis entre -15 ºC e +15 ºC e cujo ajuste mínimo é de 1ºC. Pressostatos individuais asseguram a interrupção de alimentação eléctrica, sempre que a pressão descer abaixo de um valor regulável.

O circuito de aquecimento da câmara fria está ligado ao estabilizador usado na alimentação das máquinas frigoríficas. O autotransformador regulável é um *ZENITH* V8H, cujas características estão referidas no Anexo IV. As medições são efectuadas com o multímetro já referido.

e) **Aquisição de dados**

A leitura da potência de alimentação às câmaras quente e fria foi efectuada manualmente, a intervalos regulares, normalmente diários e a diferentes horas. O ajuste do termostato da câmara fria, localizado no interior desta e que comanda o seu funcionamento, foi efectuado no início e mantido em toda a caracterização, com excepção do provete de calibração.

A leitura e registo das temperaturas foi efectuada por um datalogger *DELTA LOG* disponível no *LNEC*. O datalogger dispõe de software próprio de configuração e conversão de ficheiros. As suas características estão resumidas no Anexo IV. Configuraram-se 50 canais, de acordo com o explicitado no Quadro 7.3.

O datalogger efectuava o varrimento automático a intervalos programados, de acordo com o expresso no Quadro 7.3. Normalmente as leituras eram efectuadas a intervalos mais curtos e o registo apenas das médias das mesmas a intervalos um pouco maiores. Adoptaram-se intervalos mais curtos para os fluxos que apresentam maiores variações. O datalogger era esvaziado a intervalos regulares, normalmente de uma semana. Após conversão, os ficheiros são manipuláveis em folhas de cálculo correntes.

A figura 7.17 ilustra alguns aspectos do equipamento de instrumentação.

Quadro 7.3 - Configuração de canais do sistema de aquisição de dados

Canal	Ref[a]	Descrição	Intervalos		Conversão	Limites
			Leitura (min)	Registo[1] (min)		
1	Ref[a]	Canal de referência	5	30	kOhms/ °C	-20 ° a 60 °C
2 a 10	*Q11* a *Q33*	Temperaturas do ar câmara quente	5	30	mV/ °C	-120 ° a 200° C
11	*QE1*	Temp. interior tecto câmara quente	5	30	mV/ °C	-120 ° a 200 °C
12	*QE2*	Temp. exterior tecto câmara quente	5	30	mV/ °C	-120 ° a 200 °C
13 a 21	*PQ1* a *PQ9*	Temperaturas face quente do provete	5	30	mV/ °C	-120 ° a 200 °C
22 a 26	*FLX1* a *FLX5*	Fluxos	1	10	mV/ (W/m^2)	-100 a 100 W/m^2
27 a 35	*PF1* a *PF9*	Temperatura face fria do provete	5	30	mV/ °C	-120 ° a 200 °C
36 a 44	*F11* a *F33*	Temperaturas do ar câmara fria	5	30	mV/ °C	-120 ° a 200 °C
45	*Tamb*	Temperatura ambiente	5	30	mV/ °C	-120 ° a 200 °C
46 a 50	*PI1* a *PI5*	Temperatura no interior do provete ou temperaturas suplementares nas faces do provete de calibração	5	30	mV/ °C	-120 ° a 200 °C

1 Média das leituras

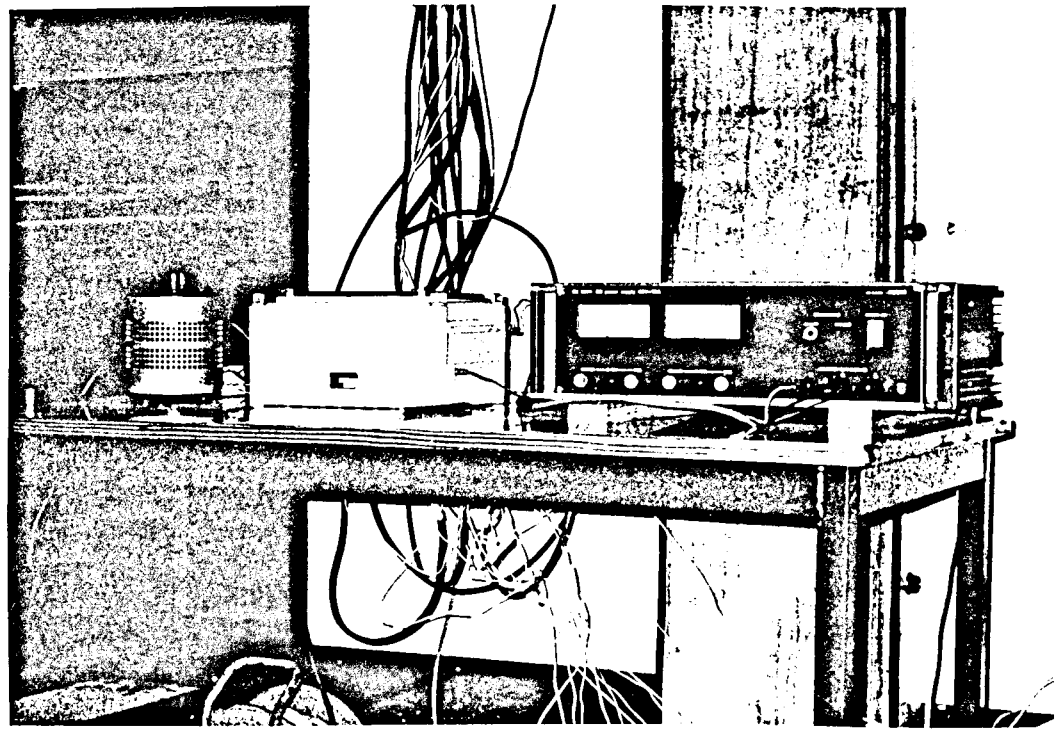


Fig. 7.17 - Aspecto do equipamento de instrumentação utilizado

7.2.2.4 - Ensaio dos provetes

A metodologia seguida na realização dos ensaios dos provetes 1 a 4 foi a seguinte:

- montagem na câmara de ensaio do porta-provetes, contendo o provete, com idade superior a 2 meses;
- determinação da massa do provete;
- inspecção cuidada ao provete, detecção de fissuras no reboco, de juntas abertas na periferia, de juntas abertas no porta-provetes, etc.;
- refechamento de eventuais juntas com cordão de silicone;
- instrumentação do provete, ligação ao datalogger e comprovação de que todas as ligações estavam correctamente executadas;
- encosto, fecho e aperto das câmaras;
- arranque do circuito de refrigeração da câmara fria;
- arranque do circuito de aquecimento da câmara quente, com potência estimada em função das características do provete;
- após um período de estabilização mínimo de cerca de 3 dias, observação dos registos até obtenção de condições que permitam a determinação do coeficiente de transmissão térmica em regime permanente, de acordo com as condições da norma ASTM C976-90 [74];
- alteração da potência e repetição do processo, no mínimo para uma nova potência;
- paragem do ensaio e abertura da câmara;
- inspecção rigorosa do provete após ensaio, desligar instrumentação, retirar provete e pesá-lo;
- continuação da pesagem do provete ao longo do tempo.

No Quadro 7.4 referem-se os aspectos relevantes associados ao ensaio dos provetes 1 a 4.

Quadro 7.4 - Aspectos relevantes relativos ao ensaio dos provetes 1 a 4

Provete	Datas				Nº de potências ensaiadas	Nº de intervalos estacionários
	Fabrico	Transporte para a câmara	Montagem na câmara	Desmontagem		
1	94.05.16	94.05.24	94.07.14	94.07.26	2	4
2	94.05.16	94.05.24	94.07.27	94.08.23	2	4
3	94.05.16	94.05.24	94.08.24	94.09.06	3	4
4	94.06.22	94.07.13	94.09.07	94.10.06	5	8

O provete 5, de calibração, foi sujeito a uma metodologia de ensaio diferente dos outros provetes. Sofreu uma 1ª caracterização enquanto os provetes 1 a 4 eram executados e sujeitos a cura. Após a conclusão dos ensaios relativos aos provetes 1 a 4 voltou a montar-se o provete de calibração, sendo ensaiado em duas situações:

- a 1ª, idêntica à 1ª caracterização, com gradientes entre a câmara quente e fria similares aos adoptados para os outros provetes;
- a 2ª, procurando igualar as temperaturas na câmara quente e fria, recorrendo ao circuito de aquecimento da câmara fria.

No Quadro 7.5 sintetizam-se os aspectos relevantes dos ensaios do provete de calibração.

Quadro 7.5 - Aspectos relevantes relativos aos ensaios do provete de calibração

Séries	Datas		Tipo de ensaio e situações ensaiadas	
	Início	Fim	Com gradiente entre câmaras	Sem gradiente entre câmaras
1ª	94.06.04	94.06.29	Ensaiadas 9 potências	-
2ª	94.10.11	94.10.24	Ensaiadas 4 potências	-
3ª	94.10.07	94.11.10	-	Ensaiadas 2 situações

7.2.2.5 - Caracterização complementar

Já se referiu que o processo de realização e ensaio dos provetes foi acompanhado de ensaios de caracterização complementar, com o objectivo de conhecer de forma mais aprofundada os constituintes dos provetes, permitir interpretar mais correctamente os resultados dos ensaios, bem como despistar a possibilidade de eventuais desajustes.

A caracterização referida incidiu sobre:

- constituintes dos provetes;
- avaliação qualitativa do processo de transmissão de calor e eventual existência de fugas, por recurso a termografia;
- massa dos provetes;
- determinação do campo de velocidades na câmara fria.

Descreve-se de seguida de forma sucinta a caracterização efectuada.

a) **Constituintes dos provetes**

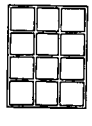
Foram determinadas características dos seguintes constituintes:

- tijolos cerâmicos (não se realizaram ensaios, efectuou-se apenas uma compilação de resultados disponíveis no *LNEC*);
- blocos de betão;
- inertes usados na confecção das argamassas;
- argamassas de assentamento;
- argamassa de reboco;
- poliestireno extrudido do provete de calibração.

Os ensaios foram efectuados no *LNEC* e na *FEUP*. As técnicas de ensaio foram as correntes para os ensaios em questão. No Anexo VI apresenta-se informação mais detalhada e boletins de alguns ensaios. Nos Quadros 7.6 a 7.9 sintetizam-se os resultados.

Quadro 7.6 - Compilação dos resultados disponíveis da caracterização do tijolo cerâmico efectuada pelo *LNEC* [200, 201, 202, 203]

Tijolo 300x200x150		**Características dimensionais**					
Geometria	**Caracterização**	**Comp. (mm)**	**Altura (mm)**	**Largura (mm)**	**Septos ext. (mm)**	**Septos int. (mm)**	**Percentagem furação (%)**
	Verificação periódica - 1987	301 (294-305)	190 (189-192)	150 (149-150)	-	-	60
	Verificação periódica - 1989	297 (294-300)	189 (188-190)	148 (145-150)	8.6	8.3	62
	Verificação periódica - 1990	297 (294-302)	194 (186-202)	147 (146-148)	9.1	7.9	60
	Ensaios isolados	-	-	-	-	-	-

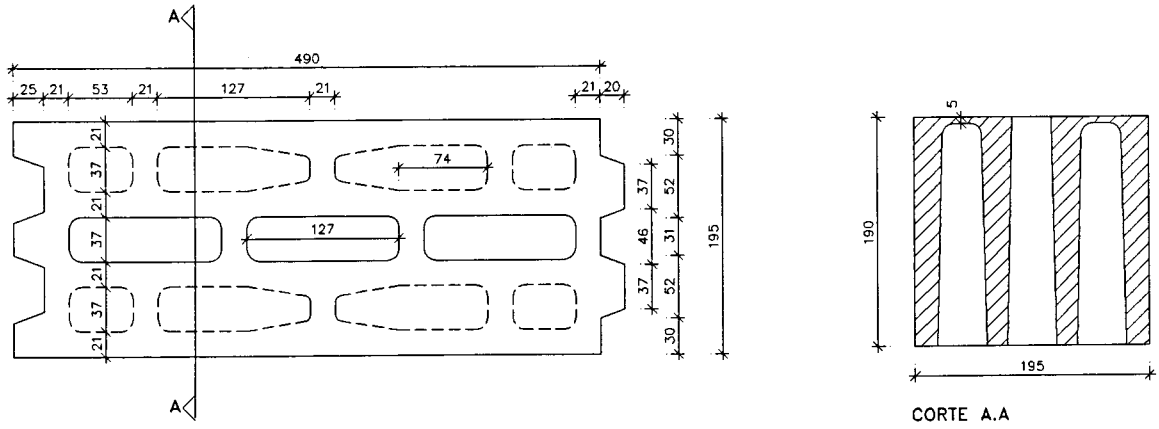


Caracterização	**Características físicas**				
	Massa média condições de fornecimento (kg)	**Absorção de água (%)**	**Resistência à compressão**		**Eflorescências**
			Média (MPa)	**Coef. var. (%)**	
Verificação periódica - 1987	-	-	3.5	19.6	Não apresentou
Verificação periódica - 1989	-	9.4	4.2	16.8	Não apresentou
Verificação periódica - 1990	-	9.1	3.9	23.1	Não apresentou
Ensaios isolados	7.24	-	3.7	20.3	-

Quadro 7.7 - Resultados da caracterização de blocos de betão, relativos à caracterização térmica

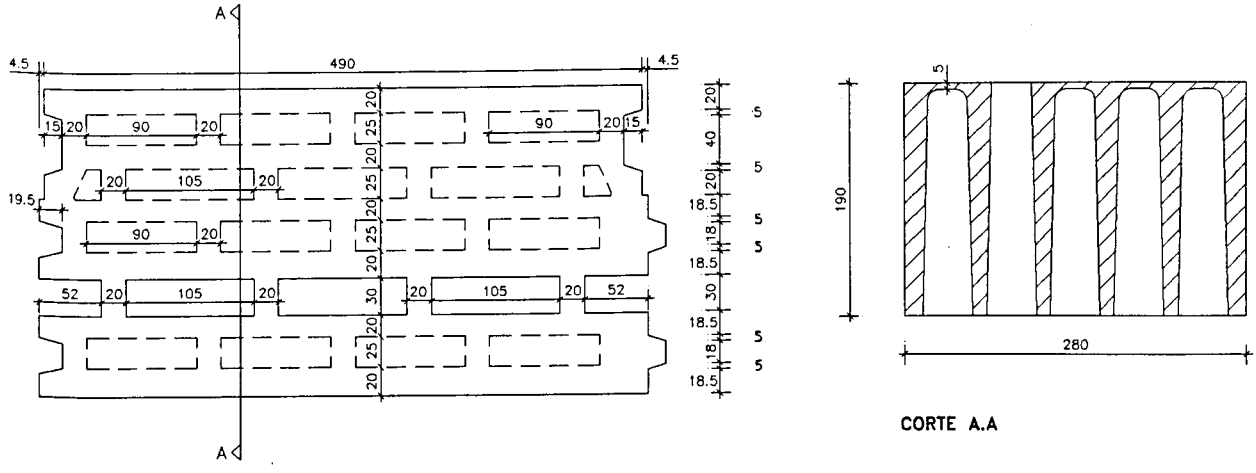
Bloco	Características dimensionais médias (1)					Massa volúmica seca (1)		Teor de humidade (1)	Resistência à compressão (1)	
	Comp. (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Espessura mínima septos (mm)	Percentagem furação (3) (%)	Blocos (kg/m³)	Betão Constituinte (kg/m³)	(%)	Média (MPa)	Coef. variação (%)
500 x200x200	490	189	196	23	34.2	696	1058	12.27	2.20	18.7

GEOMETRIA



500 x200x250 *melhorado*	499 e 490 (2)	190	250	19	39.4	651	1073	14.63	2.06	14.2

GEOMETRIA



1 - Média de 6 blocos para cada geometria
2 - Valores diferentes na face exterior e interior
3 - Preenchimento dos furos com areia

Quadro 7.8 - Resultados da caracterização das argamassas de assentamento e reboco, relativos à caracterização térmica

Argamassa		Massa volúmica aparente seca	Tensão de rotura por flexão [2]		Tensão de rotura por compressão [2]		Cond. térmica λ
Tipo e utilização	Composição	kg/m³	Conservação	Média (MPa)	Conservação	Média (MPa)	(W/(m.ºC))
Normal para assentamento	Traço Volumétrico 1:4 Cimento CPC 32,5 II - 10 l Areia do rio lavada e peneirada - 40 l Água - 10 l	1950	Água doce	2.6	Água doce	10.7	1.08 [5]
			Ambiente da sala de ensaio	3.3	Ambiente da sala de ensaio	14.9	
Leve para assentamento	Traço Volumétrico 1:2:2 Cimento CPC 32,5 II - 10 l Areia do rio lavada e peneirada - 20 l LECA 2/4 - 20 l Água - 9 l	1509	Água doce	2.7	Água doce	12.1	0.45 [4]
			Ambiente da sala de ensaio	3.3	Ambiente da sala de ensaio	12.2	
Normal para reboco	Traço Volumétrico 1:1:6 Cimento CPC 32,5 II - 15 l Cal hidráulica [1] - 15 l Areia do rio lavada e peneirada - 60 l Areia "amarela" - 30 l Água - 25 l	1928	Água doce	2.4	Água doce	12.1	0.97 [5]
			Ambiente da sala de ensaio	3.9	Ambiente da sala de ensaio	14.1 [3]	

1 - Cal hidráulica *CIMPOR - CABO MONDEGO* - Finura Blaine ≥ 6500g cm², Teor em cal livre - 8%, Resistência aos 28 dias - 6 MPa (de acordo com indicações de embalagem)
2 - Provetes compactados manualmente, ensaiados aos 28 dias
3 - Resultados com grandes dispersões entre colheitas
4 - Ensaios efectuados no *LNEC* de acordo com ISO 8301 [70]
5 - Ensaios efectuados na *FEUP* de acordo com ASTM C177-85 [69]

Quadro 7.9 - Resultados da caracterização do poliestireno extrudido

Espessura média (mm)	Massa volúmica aparente após ensaio (kg / m³)	Condutibilidade térmica (W/(m.ºC))
39.6	41.5	0.028

b) **Termografia**

Recorreu-se à termografia [204] com os seguintes objectivos:

- confirmar o poder isolante das câmaras;
- confirmar que não existiam fugas pelas juntas das câmaras;
- confirmar que não existiam fugas pelas juntas entre o provete e o porta-provetes;
- avaliar qualitativamente a heterogeneidade de temperaturas no provete.

Como se sabe a termografia é uma técnica que permite determinar e representar a distribuição de temperatura superficial, por medição da densidade de radiação infravermelha duma superfície. Para o efeito utilizou-se equipamento do *LNEC*. As características técnicas dos equipamentos são apresentadas no Anexo IV. As imagens termográficas foram obtidas nas seguintes situações:

- com as câmaras em funcionamento, para verificar se existia qualquer fuga pela junta de aperto;
- à face quente do provete após a conclusão do ensaio, retirando a câmara quente e mantendo a fria em funcionamento;

Em qualquer situação não foi possível obter uma imagem abrangendo toda a superfície do provete, pelo que se obtiveram imagens parcelares que foram depois justapostas. Os resultados não indiciaram a existência de qualquer fuga entre as câmaras ou entre o provete e o porta-provetes. Na fig. 7.18 apresentam-se algumas imagens.

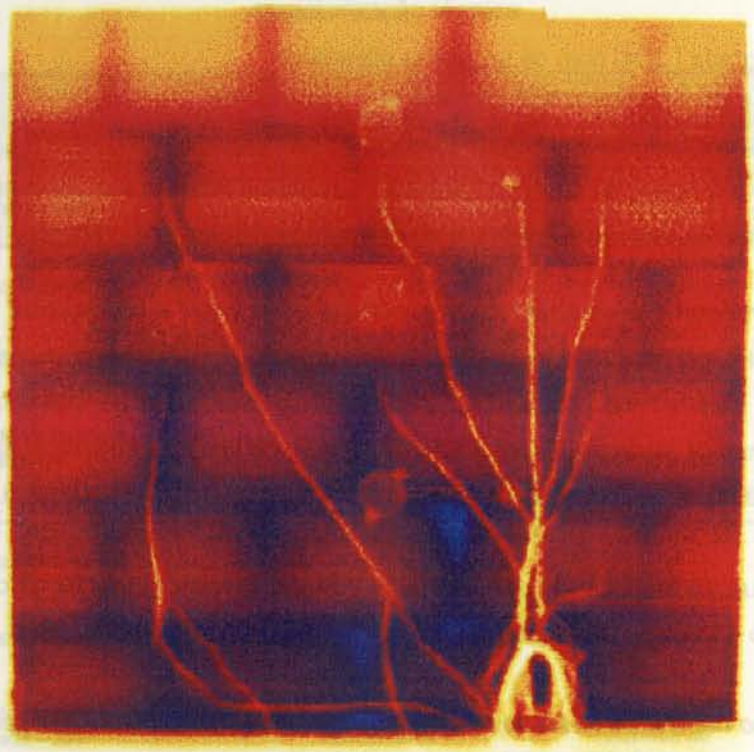
c) **Massa dos provetes**

Os provetes foram pesados com regularidade desde o seu transporte para a nave de ensaios. No mínimo registou-se a massa dos provetes quando transportados para a nave, antes e após ensaio.

A nave de ensaio não é condicionada. Registaram-se em contínuo as condições de temperatura e humidade na local dos ensaios. Constatou-se que durante os meses mais quentes em que decorreram os ensaios (Julho a Setembro de 1994), a temperatura esteve compreendida entre 20 °C e 25 ° C e a humidade relativa entre 40% e 70 %. Nos restantes meses, Maio, Junho, Outubro e Novembro de 1994, a temperatura oscilou entre 15° C e 20 °C, enquanto a humidade relativa variou entre 50% e 85 %.

A perda de massa por secagem foi aproximadamente constante para os provetes 1, 2 e 3. Com efeito verificou-se que no máximo ao fim de cerca de 2 meses, estes provetes tinham perdido aproximadamente 8 kg, correspondendo aproximadamente a 2.5% da sua massa. No caso do provete 4 a perda de massa foi menor, sendo apenas de cerca de 4 kg, ou seja 1.2 %. Verificou-se que a massa dos provetes após ensaio coincidia, para a precisão do equipamento de pesagem, com a massa antes de ensaio.

a) Justaposição de várias imagens relativas ao provete 1



b) Justaposição de várias imagens relativas ao provete de calibração



Fig. 7.18 - Imagens termográficas obtidas durante os ensaios

d) **Campo de velocidades**

Na câmara quente a circulação do ar ocorre apenas por convecção natural. Na câmara fria a circulação é forçada pelos ventiladores dos evaporadores que podem estar em funcionamento individualizado ou simultâneo.

A distribuição das velocidades do ar na face fria do provete, com um ou ambos os ventiladores em funcionamento, foi determinada pelo autor do equipamento na Tese já referida [12]. Segundo esse trabalho as velocidades são maiores quando os dois ventiladores se encontram em funcionamento, não excedendo no entanto 0.25 m/s.

Procedeu-se a nova determinação das velocidades do ar a diferentes níveis da câmara fria. Para o efeito usou-se um anemómetro de elipsóide quente, *Bruel & Kjaer* existente no *LNEC*. Os resultados obtidos apresentam-se na fig. 7.19 e concordam razoavelmente com os obtidos pelo autor do equipamento. Verifica-se igualmente que a velocidade aumenta quando entram os dois ventiladores em funcionamento. Em face destes resultados, e de acordo com as conclusões do autor do equipamento, o campo de velocidades existente na câmara fria, junto à face do provete, é compatível com um regime laminar.

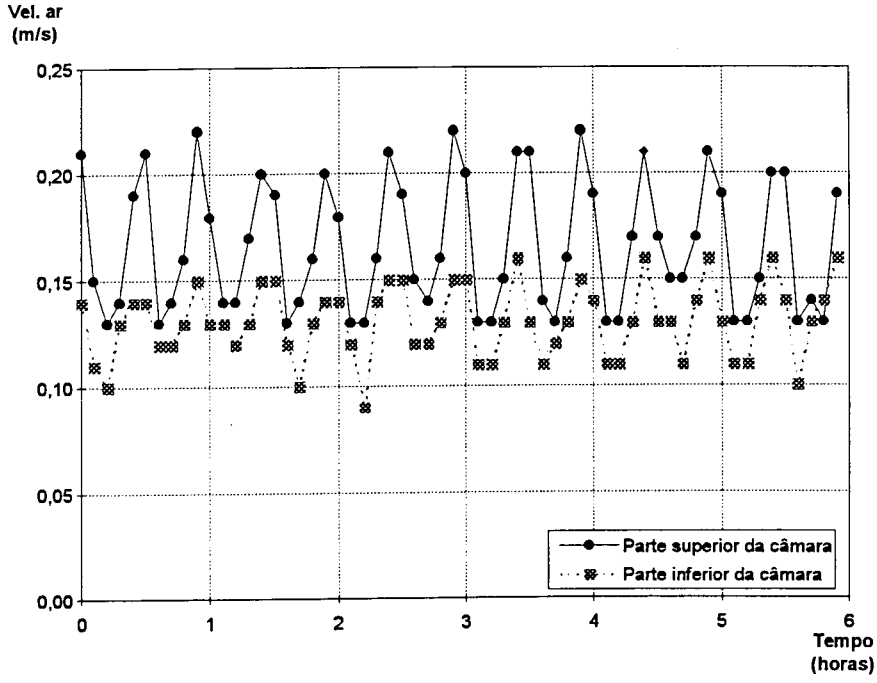


Fig. 7.19 - Distribuição de velocidades do ar na câmara fria ao longo do tempo

7.2.2.6 - Fiabilidade e erros

Na quantificação dos erros do processo de determinação do coeficiente de transmissão térmica, através do equipamento descrito, existem basicamente dois tipos de erros: os devidos aos aparelhos de alimentação e medida e os associados ao próprio método.

a) **Erros associados ao equipamento**

As origens possíveis de erro são:

- fonte de alimentação - erro máximo inferior a 0.01%;
- aparelho de medida da tensão e de corrente - erro máximo inferior a 1%;
- termopares - erro máximo inferior a 5 %;
- datalogger - erro máximo inferior a 0.04%.

Donde se conclui que o valor máximo previsível do erro associado ao equipamento de medida não ultrapassará cerca de 6 %.

b) **Erros associados ao método**

A norma de ensaio, relativa à determinação do coeficiente de transmissão térmica através da câmara quente calibrada [74], não refere características objectivas para a construção de uma unidade deste tipo, mas sobretudo requisitos de funcionamento da instalação. Com efeito, a montagem de uma instalação próxima das condições ideais é muito cara e os seus custos de funcionamento são significativos. Além disso, dado que as condições entre diferentes instalações não são exactamente reprodutíveis, todas as determinações padecem de erros sistemáticos. No entanto, qualquer instalação de ensaio tem o seu valor intrínseco, dado permitir a comparação das características entre diferentes provetes, para além de poder ainda ser usada como instrumento de medição absoluto, se for possível comparar os resultados relativos a um dado provete, com os obtidos numa instalação padrão.

No caso concreto da câmara utilizada, as condições de utilização respeitaram em geral os requisitos referidos na normalização de referência, com excepção da espessura do provete de calibração. Com efeito a norma recomenda que o provete de calibração apresente uma espessura próxima da dos provetes a ensaiar. Não foi possível assegurar essa condição, tendo-se utilizado uma placa de poliestireno extrudido de 40 mm de espessura. Esta placa apresenta uma espessura significativamente inferior à dos provetes em análise, pelo que poderá conduzir a uma sub-avaliação das perdas laterais pelo porta-provetes. Para ponderar este efeito determinou-se também o coeficiente de transmissão térmica por recurso a fluxímetros. Neste caso, atingido o regime

permanente, não é necessária qualquer calibração. Pensa-se que os resultados finais obtidos desta forma deverão ser mais precisos do que os obtidos por recurso ao fluxo de calibração.

7.2.3 - Resultados

7.2.3.1 - Metodologia de tratamento de dados

A partir do conhecimento das características dos provetes, dos materiais constituintes e dos registos obtidos pelo sistema de aquisição de dados, procedeu-se ao tratamento dos dados por forma a obter os resultados finais.

Seguiu-se a seguinte metodologia:

- conversão de todos os ficheiros do sistema de aquisição de dados para uma folha de cálculo tipo "*EXCEL*";
- representação gráfica para um período de tempo alargado, dos seguintes valores:
  - potência fornecida;
  - temperaturas em cada ponto de registo;
  - fluxos em cada um dos fluxímetros;
- análise cuidada, para o período em apreço, da coerência dos diversos resultados, identificação de eventuais pontos singulares anómalos, bem como, ultrapassados os períodos transitórios iniciais, dos períodos de características estacionárias;
- correcção dos ficheiros, compreendendo eliminação dos valores anómalos e sua substituição pela média do valor anterior e consecutivo, atenuação do efeito dente de serra, particularmente nas temperaturas "frias", por substituição de cada valor pela média do mesmo com o anterior e consecutivo;
- para os períodos de 24 horas seleccionados como estacionários, determinação dos valores médio, máximo e mínimo das seguintes grandezas:
  - potência fornecida - P_{ϕ} (W);
  - temperatura ambiente - T_{amb} (°C) ;
  - gradiente de temperaturas entre pontos homólogos na face exterior e interior da câmara quente -ΔT (°C);
  - temperatura do ar na câmara quente - T_{cq} (°C) ;
  - temperatura da superfície quente do provete - T_{pq} (°C) ;
  - temperatura da superfície fria do provete - T_{pf} (°C);
  - temperatura do ar na câmara fria - T_{cf}(°C) ;
  - densidade de fluxo atravessando o provete - Flx (W/m^2) ;

Para o intervalo $[t,\ t + \Delta t]$, com $i \in [t,\ t + \Delta t]$

$$P_{\phi} = \overline{P_{\phi i}} \tag{7.1}$$

$$T_{amb} = \overline{T_{ambi}} \tag{7.2}$$

$$\Delta T = \overline{(QE1_i - QE2_i)} \tag{7.3}$$

$$T_{cq} = \overline{T_{cqi}} \quad \text{em que} \quad T_{cqi} = \frac{Q11_i + \ldots\ldots + Q33_i}{9} \tag{7.4}$$

$$T_{pq} = \overline{T_{pqi}} \quad \text{em que} \quad T_{pqi} = \frac{PQ1_i + \ldots\ldots + PQ9_i}{9} \tag{7.5}$$

$$T_{pf} = \overline{T_{pfi}} \quad \text{em que} \quad T_{pfi} = \frac{PF1_i + \ldots\ldots + PF9_i}{9} \tag{7.6}$$

$$T_{cf} = \overline{T_{cfi}} \quad \text{em que} \quad T_{cfi} = \frac{F11_i + \ldots\ldots + F33_i}{9} \tag{7.7}$$

$$Flx = \overline{Flx_i} \quad \text{em que} \quad Flx_i = \frac{1}{\sum n_k} \cdot \sum \left(n_k \cdot Flx_{ni}\right) \tag{7.8}$$

Sendo:

- $P_{\phi i}$ - potências lidas e registadas, em cada intervalo de tempo i (W);
- T_{ambi} - temperatura ambiente lida e registada automaticamente, em cada intervalo de tempo i (°C);
- $QE1_i$, $QE2_i$, $Q11_i$ a $Q33_i$, $PQ1_i$ a $PQ9_i$, $PF1_i$ a $PF9_i$, $F11_i$ a $F33_i$ - temperaturas dos termopares lidas e registadas automaticamente em cada intervalo de tempo i (°C) ;
- Flx_{ni} - densidade de fluxo associada ao fluxímetro de ordem n, lido e registado automaticamente, em cada intervalo de tempo i (°C);
- n_k - peso atribuído ao fluxímetro da ordem n.

Com estas grandezas é possível determinar o perfil de temperaturas no provete, fig. 7.20.

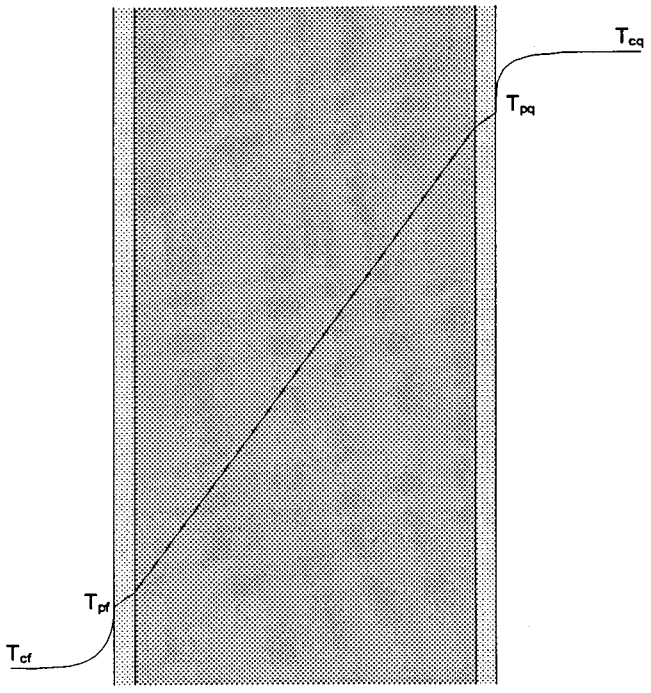


Fig. 7.20 - Perfil de temperaturas do provete

Sendo a potência de calibração - G_ϕ (W) - determinável a partir de ΔT, teremos:

- K_1 - Coeficiente de transmissão térmica do provete nas condições de ensaio (W/(m^2.ºC)):

$$K_1 = \frac{P_\phi - G_\phi}{A\left(T_{cq} - T_{cf}\right)} \tag{7.9}$$

A - Área do provete

- K_2 - Coeficiente de transmissão térmica do provete em condições padronizadas para a envolvente dos edifícios (W/(m^2.ºC)):

$$K_2 = \frac{1}{\frac{A\left(T_{pq} - T_{pf}\right)}{P_\phi - G_\phi} + R_e + R_i} \tag{7.10}$$

R_e - Resistência térmica superficial exterior (m^2.ºC/W)

R_i - Resistência térmica superficial interior (m^2.ºC/W)

ou

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{K_1} - R_q - R_f + R_e + R_i} \tag{7.11}$$

em que:

R_q - Resistência térmica superficial quente de ensaio ($m^2.^oC/W$)

$$R_q = \frac{A(T_{cq} - T_{pq})}{P_\phi - G_\phi} \tag{7.12}$$

R_f- Resistência térmica superficial fria de ensaio ($m^2.^oC/W$)

$$R_f = \frac{A(T_{pf} - T_{cf})}{P_\phi - G_\phi} \tag{7.13}$$

tendo as grandezas o significado já referido.

Em alternativa é possível determinar - k_p ($W/(m^2.^oC)$) - condutância térmica do provete nas condições de ensaio, utilizando os resultados dos fluxímetros. Atribuindo um "peso" a cada fluxímetro, função da sua localização e calculando o fluxo médio ponderado Flx, a condutância térmica da parede será:

$$k_p = \frac{Flx}{T_{pq} - T_{pf}} \tag{7.14}$$

A obtenção do coeficiente de transmissão térmica do provete, nas condições padronizadas para a envolvente dos edifícios virá:

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + R_e + R_i} \tag{7.15}$$

em que as grandezas têm o significado já referido.

7.2.3.2 - Curva de calibração da câmara de ensaio

A obtenção da curva de calibração foi efectuada ensaiando, de forma análoga à dos restantes provetes, um material homogéneo de condutibilidade térmica conhecida. Determinou-se o perfil de temperaturas do provete de calibração de acordo com o referido em 7.2.3.1, fig. 7.21 .

Sendo:

e - espessura do provete de calibração (m);

λ - condutibilidade térmica do material constituinte do provete de calibração($W/(m.^oC)$).

A potência efectiva - Q_ϕ (W) - que atravessa o provete de calibração é dada por:

$$Q_\phi = \frac{(T_{pq} - T_{pf})}{\frac{e}{\lambda}} . A \qquad (7.16)$$

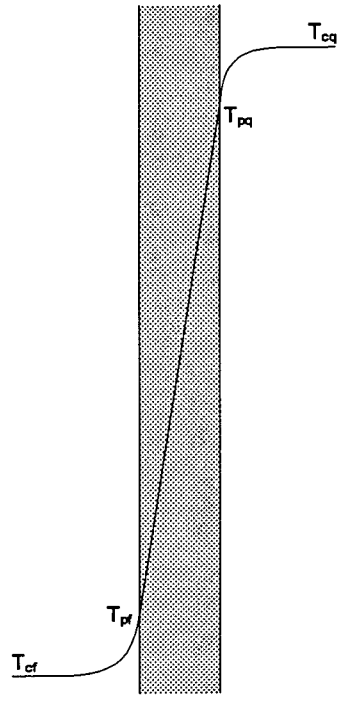


Fig. 7.21 - Perfil de temperatura do provete de calibração

Para um dado gradiente de temperatura entre o exterior e interior da câmara quente - ΔT (ºC)- e potência fornecida - P_ϕ (W) - o fluxo de calibração será:

$$G_\phi = P_\phi - Q_\phi \qquad (7.17)$$

A curva de calibração será obtida representando G_ϕ (W), em função de ΔT (ºC) .

No caso em apreço fizeram-se 15 determinações. No Quadro 7.10 apresenta-se a síntese de resultados que permitem definir a curva de calibração. Informação mais detalhada apresenta-se no Anexo V.

Quadro 7.10 - Síntese de resultados da caracterização experimental térmica do provete de calibração

PROVETE DE CALIBRAÇÃO					
Série	Período estacionário	ΔT (°C)	Potências (W)		
			P_ϕ	Q_ϕ	G_ϕ
1ª	1	8.17	22.80	15.41	7.39
	2	7.55	22.80	15.58	7.22
	3	7.51	22.80	17.23	5.57
	4	4.58	19.90	17.04	2.86
	5	4.83	19.90	17.07	2.83
	6	4.46	17.20	15.83	1.37
	7	4.56	17.20	15.88	1.32
	8	3.35	15.98	14.64	1.34
	9	2.98	15.99	14.99	1.00
2ª	1	3.56	19.93	15.09	4.84
	2	6.01	24.14	16.50	7.64
	3	2.40	15.09	12.50	2.59
	4	11.75	32.72	19.92	13.00
3ª	1	6.74	4.29	-	4.29
	2	5.56	4.29	-	4.29

Na fig. 7.22 apresenta-se a curva de calibração traduzida pelo polinómio de 2º grau que melhor se ajusta ao conjunto de pontos. O coeficiente de correlação obtido foi de 0.90.

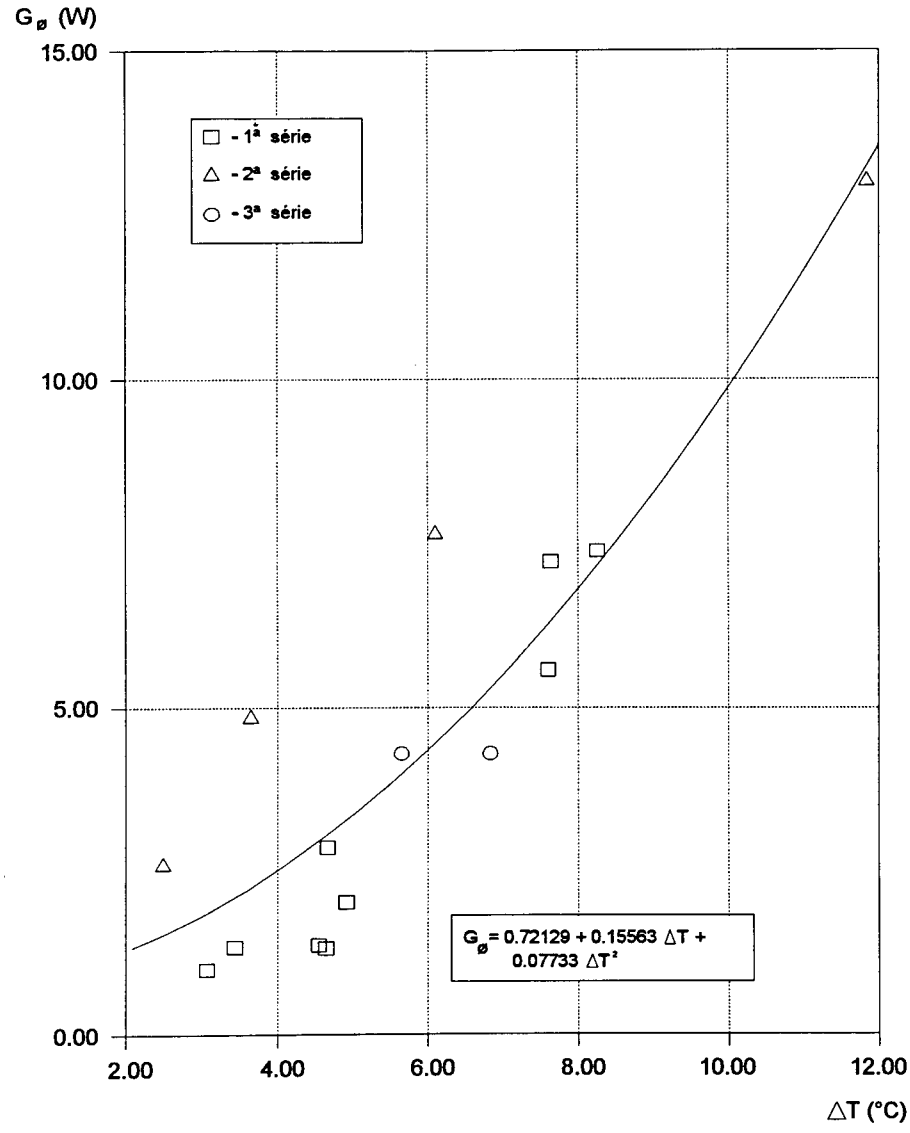


Fig. 7.22 - Curva de Calibração

7.2.3.3 - Características térmicas dos provetes ensaiados

Apresentam-se de seguida, de forma muito sintética, os resultados relativos à caracterização do comportamento térmico das alvenarias representadas pelos provetes ensaiados.

Os resultados são a síntese de um vasto conjunto de informação que foi tratada de acordo com a metodologia referida em 7.2.3.1. Para análise mais detalhada da sequência adoptada no tratamento dos resultados, inclui-se no Anexo V informação complementar relativa a este assunto.

Quadro 7.11 - Síntese de resultados da caracterização térmica dos provetes 1 a 4

PROVETE	PERÍODOS ESTACIONÁRIOS	COEF. TRANSMISSÃO TÉRMICA (W/(m².°C))					
		TERMOPARES			FLUXÍMETROS		
		Ensaio K_1	Padronizado K_2		Ensaio k_p	Padronizado K_2	
1	1	1.999	2.313		3.439	2.218	
	2	2.053	2.307	Média	3.439	2.218	Média
	3	2.032	2.284	**2.30**	3.442	2.219	**2.20**
	4	2.059	2.300		3.419	2.210	
2	1	1.507	1.591		1.832	1.417	
	2	1.508	1.590	Média	1.819	1.409	Média
	3	1.484	1.569	**1.58**	1.594	1.270	**1.34**
	4	1.473	1.557		1.586	1.265	
3	1	1.311	1.344		1.238	1.033	
	2	1.303	1.340	Média	1.222	1.022	Média
	3	1.278	1.330	**1.32**	1.235	1.031	**1.02**
	4	1.275	1.275		1.192	1.001	
4	1	1.139	1.183		1.089	0.927	
	2	1.138	1.182		1.078	0.920	
	3	1.088	1.145		1.058	0.905	
	4	1.073	1.133	Média	1.027	0.882	Média
	5	1.091	1.152	**1.13**	1.004	0.865	**0.89**
	6	1.109	1.160		1.009	0.869	
	7	1.115	1.154		0.979	0.846	
	8	1.029	0.913		1.005	0.866	

7.2.3.4 - Validação experimental do modelo numérico

Os resultados da caracterização experimental do comportamento térmico dos provetes de alvenaria permitem avaliar a justeza do modelo de simulação térmica descrito no Capítulo 6. Para o efeito poderão usar-se os resultados da simulação numérica relativa às geometrias reais que deverão ser comparados com os valores do coeficiente de transmissão térmica determinados experimentalmente para os 4 provetes de parede. Com excepção do provete 1, relativo a uma alvenaria de tijolo de 150 mm de espessura, os três provetes restantes foram simulados numericamente. Na simulação adoptaram-se características geométricas e físicas dos blocos e dos demais constituintes, iguais às constatadas na validação experimental.

No Quadro 7.12 sintetiza-se a comparação entre os resultados obtidos de diferentes formas, como se passa a descrever:

- resultados da simulação numérica tridimensional por recurso ao m. e. f.;
- resultados da caracterização experimental, obtidos de duas formas diferentes, por recurso a termopares ou a fluxímetros, conforme foi descrito em 7.2.3.3;
- valores tabelados, constantes da publicação do *LNEC* ITE 28 relativa aos "Coeficientes de Transmissão Térmica de elementos da Envolvente dos Edifícios " [76].

Quadro 7.12 - Síntese comparada do K para as paredes realizadas com blocos de geometrias reais

COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA - SÍNTESE COMPARADA DE RESULTADOS PARA GEOMETRIAS REAIS (W/(m.ºC))				
GEOMETRIA	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL		VALORES TABELADOS
		Termopares	Fluxímetros	
Tijolo 300x200x150 (*)	___	2.30	2.22	1/(0.31+0.16)=2.13
Bloco inertes leves 500 x 200 x 200 (*)	1.33	1.58	1.34	1/(0.54+0.16)=1.43
Bloco inertes leves 500 x 200 x 250 melhorado Provete 1 (*)	0.99	1.32	1.02	1/(0.56+0.16)=1.39
Bloco inertes leves 500 x 200 x 250 melhorado Provete 2 (**)	0.92	1.13	0.89	___

* - Argamassa de assentamento e reboco corrente

**- Argamassa de assentamento leve

Em face dos resultados apresentados no Quadro 7.12 os aspectos mais relevantes da análise comparativa são:

- os valores obtidos por diferentes vias apresentam uma boa aproximação;
- os valores da caracterização experimental obtidos por recurso aos fluxímetros são sempre inferiores aos obtidos através dos termopares;
- os valores obtidos através da simulação numérica concordam, a menos de 4%, com os obtidos experimentalmente através dos fluxímetros.

7.3 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ALVENARIAS DE BLOCOS DE BETÃO LEVE, SOB ACÇÃO DE CARGAS VERTICAIS

7.3.1 - Aspectos gerais

Conforme foi discutido com detalhe no Capítulo 4, a resistência à compressão das alvenarias é sobretudo influenciada pela resistência à compressão e relação entre a deformabilidade dos seus constituintes principais - elementos e argamassas. Além destes parâmetros principais, a espessura, a geometria das juntas e múltiplos aspectos ligados à qualidade de execução e de cura têm também influência.

Os blocos de betão de inertes leves de argila expandida apresentam algumas especificidades, associadas à baixa resistência mecânica dos elementos e à sua geometria que os transformam em elementos relativamente singulares no universo dos elementos para alvenaria. São pouco numerosos os trabalhos experimentais sobre resistências das alvenarias utilizando este tipo de elementos, mesmo a nível internacional. Em Portugal não se conhece qualquer estudo .

Foi objectivo deste programa experimental, avaliar em que medida parâmetros como a geometria dos elementos, a argamassa de assentamento e o tipo de aparelho se reflectem na resistência à compressão das alvenarias, recorrendo a blocos de betão de inertes leves de argila expandida objecto da caracterização térmica anterior

7.3.2 - Elementos de betão leve usados no estudo

Usaram-se neste estudo blocos de betão de inertes leves de argila expandida, idênticos aos usados na caracterização térmica. Concretamente utilizaram-se os de geometria corrente 500 mm x 200 mm x 250 mm - fig. 6.7 - e os de geometria *melhorada* 500 mm x 200 mm x 250 mm - fig. 6.9.

A composição do betão usada na confecção dos blocos manteve-se constante ao longo de todo o estudo, sendo a mesma dos betões usados na caracterização preliminar referida no Capítulo 5, e na confecção dos blocos utilizados na realização dos provetes objecto de caracterização térmica.

A empresa produtora dispõe de um sistema de controlo de qualidade interno extensível às matérias primas, ao betão e ao produto acabado. Os blocos foram produzidos em data estabelecida,

aplicando-se à produção as acções de controle de qualidade interna preconizadas no Manual de Qualidade. O autor acompanhou a produção e as acções de controlo.

Os blocos das 2 geometrias referidas foram produzidos no mesmo dia (95 / 04 / 03), em amassaduras consecutivas, por forma a garantir que a dispersão das suas características mecânicas fosse o mais reduzida possível. Após a moldagem, os blocos foram conduzidos para a câmara de cura onde permaneceram em cura natural durante dois dias. A seguir foram paletizados, revestidos a folha de polietileno, e armazenados em parque coberto.

Uma semana após a sua produção, os blocos foram objecto de uma escolha na fábrica, visando eliminar:

- elementos apresentando defeitos de aspecto como vértices partidos, fundos cegos defeituosos, etc.;
- elementos cujos desvios de dimensões relativamente às dimensões nominais, particularmente altura, fossem incompatíveis com a constância dimensional pretendida para a espessura das juntas, fundamental no caso de alvenarias assentes com juntas delgadas.

Concluída esta escolha, procedeu-se à programação da montagem, cortando as partes de blocos necessárias à realização dos provetes. Os blocos e partes seleccionadas foram de novo acondicionados para posterior transporte para o Laboratório da *FEUP*.

7.3.3 - Parâmetros analisados

7.3.3.1 - Resistência à compressão dos blocos de betão de inertes leves

Embora a resistência à compressão dos blocos de betão de inertes leves fosse um dos parâmetros que interessava fazer variar, esta pretensão revelou-se impossível pelas seguintes razões:

- a empresa produtora fabrica apenas blocos de uma dada classe resistente, que está associada a uma composição conhecida e já referida; mesmo assim, a resistência dos blocos apresenta algumas dispersões associadas às características resistentes dos inertes leves e a aspectos de fabrico ;
- a obtenção de blocos com resistências diferentes obrigaria ao estabelecimento de outras composições e teria carácter experimental, não sendo possível dispor de uma caracterização tão aprofundada como a disponível para a produção base ;
- não se conhecem entre nós outras produções regulares de blocos deste tipo suficientemente caracterizadas e com diferentes classes resistentes ;

- sendo objectivo deste trabalho conciliar as preocupações de ordem térmica com as de comportamento mecânico, o recurso a blocos com composições diferentes das usadas na caracterização térmica, tornaria difícil a interpretação dos resultados experimentais nas duas perspectivas.

Conforme é referido de forma mais detalhada adiante, a propósito do controlo das características dos materiais constituintes dos provetes, as resistências à compressão dos blocos foram de novo determinadas, em paralelo com o já efectuado nos provetes objecto de caracterização térmica.

7.3.3.2 - Argamassas de assentamento

As características de comportamento das alvenarias são infuenciadas pela argamassa de assentamento, conforme já foi discutido no Capítulo 4. Em linhas gerais poderá referir-se que o aumento da dosagem de cimento se repercute num crescimento da durabilidade e da resistência da argamassa, com prejuízo da capacidade de adaptação a movimentos e da aderência. Sublinha-se que estas variações dependem da natureza e características dos elementos para alvenaria que a argamassa irá aglutinar.

A composição da argamassa é correntemente estabelecida através dum traço volumétrico. Como a massa volúmica das areias pode apresentar uma certa variabilidade associada à sua granulometria e teor em água (as areias têm variações importantes de volume com a humidade), a sua proporção na mistura é habitualmente indicada sob a forma de um intervalo, correspondendo o limite superior a uma areia bem graduada e com uma reduzida percentagem de finos. A ordem de grandeza dos vazios das areias a preencher com ligante, situa o volume de cimento em cerca de 1/3 do volume de areia . Este traço conduz a argamassas muito resistentes e com elevadas retracções, sendo frequente ou reduzir a dosagem de ligante, embora a redução da quantidade de ligante dificulte a trabalhabilidade, ou substituir parcialmente o cimento por outro ligante menos retráctil: cal ou cal hidráulica.

Diferente enquadramento normativo relativo às alvenarias, particularmente de carácter estrutural - BS 5628: Part 1 [109] , Part 3 [51] e pr EN 998-2 [123] que se transcreve no Quadro 7.13, preconiza a adopção de classificações das argamassas em classes, função da sua resistência à compressão.

Na BS 5628: Part 1 [109], são indicados traços convencionais de argamassas com os quais será possível obter, em princípio, resistências médias à compressão das argamassas correspondentes às diferentes classes. A partir da classe resistente da argamassa e do tipo de elementos utilizados, é possível conhecer as características mecânicas da parede necessárias ao seu dimensionamento. As classes resistentes são geralmente definidas pelo valor médio da tensão de rotura à compressão da argamassa aos 28 dias - f_m .

Quadro 7 .13 - Classes de argamassas segundo EN 998-2 [123]

	CLASSES								
	M1	M2.5	M5	M7.5	M10	M12.5	M15	M20	M30
Resistência à compressão (MPa)	1	2.5	5	7.5	10	12.5	15	20	30

Conforme já foi discutido nos Capítulos 2 e 4, uma das tendências a que se assiste actualmente no domínio das alvenarias é a de diminuir o "peso" das juntas, quer através de recurso a alvenarias secas, ou mais correntemente a alvenarias com juntas delgadas. Este tipo de alvenarias requer o emprego de argamassas-cola, normalmente pré-doseadas, às quais basta adicionar água.

Entre nós, na realização de alvenarias, as argamassas correntemente utilizadas são preparadas em obra por uma mistura de cimento, areia e água. Em Portugal, a composição de argamassa mais frequente no assentamento de alvenarias e prescrita correntemente em Cadernos de Encargos, corresponde ao traço volumétrico 1:4 (cimento : areia). O cimento tradicionalmente utilizado é do tipo Portland das classes de resistência mais baixas. O emprego de outros ligantes na composição das argamassa para assentamento de alvenaria, isolados ou misturados com cimento, tem pouca expressão.

Ao contrário de outros países [205,206], não se encontram ainda disponíveis em Portugal cimentos desenvolvidos especialmente para o assentamento e revestimento de alvenarias. Estes cimentos substituem com vantagem os ligantes tradicionais, pois na sua constituição intervêm aditivos que, embora à custa de menores resistências, permitem obter argamassas com melhor trabalhabilidade e capacidade de retenção de água.

As areias utilizadas em Portugal na realização das argamassas de assentamento estão ligadas às disponibilidades da zona onde se localiza a obra. É frequente o emprego de uma única areia, embora seja também comum efectuar uma mistura de areias. Não se dispõe de normalização portuguesa específica relativa às características da areia a usar na realização de argamassas de assentamento de alvenarias, ao contrário do que ocorre noutros países [207]. Todavia aspectos importantes das areias que condicionam o comportamento das argamassas, como sejam os limites granulométricos e o teor excessivo em partículas finas, são normalmente controlados de forma empírica, pois a ocorrência de não conformidades significativas dificulta a trabalhabilidade e o assentamento.

Em face do exposto utilizaram-se os seguintes tipos de argamassa na realização dos provetes de alvenaria para caracterização mecânica:

- argamassa base com traço volumétrico 1:4, utilizando cimento Portland tipo II, classe 32.5 e areia de duna da região de S. Jacinto - Aveiro;
- argamassa-cola para juntas delgadas, proveniente da Alemanha, normalmente comercializada como componente do sistema *YTONG* para alvenarias.

  A utilização desta argamassa surge do interesse em explorar as potencialidades da realização de alvenarias com juntas delgadas coladas, recorrendo a uma argamassa-cola com características bem conhecidas, dado esta argamassa ter sido objecto de uma caracterização recente, associada à homologação do sistema de construção de paredes em alvenaria de blocos de betão celular autoclavado - *YTONG* - DH 383 [198].

Com o objectivo de assegurar a máxima constância das características da argamassa normal de assentamento, efectuaram-se as seguintes acções:

- secagem da areia ao ar livre em local abrigado, depois de crivada para eliminar partículas de maiores dimensões ;
- realização de um traço experimental, visando definir a relação água /cimento considerada adequada pelo operário encarregado da realização dos provetes de alvenaria;
- realização de um provete experimental para definir a quantidade de argamassa consumida em cerca de 1 hora, período considerado compatível com a manutenção da trabalhabilidade adequada por parte da argamassa, embora durante a realização dos provetes de alvenaria o operador possa acrescentar água à argamassa se considerar necessário;
- determinação em laboratório da massa volúmica, sem apiloamento, do cimento e da areia, possibilitando o estabelecimento dos traços ponderais equivalentes ao traço volumétrico;
- pré-doseamento dos traços da argamassa em doses individuais de 30 l de areia e 7.5 l de cimento, correspondendo à quantidade de argamassa consumida na realização dos provetes em cerca de 1.0 h.

Sintetizam-se no Quadro 7.14 as características da argamassa base.

Quadro 7.14 - Características da argamassa base

CONSTITUINTES	COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA		RELAÇÃO ÁGUA/ CIMENTO MÉDIA (2)
	TRAÇO EM VOLUME	TRAÇO EM PESO (1)	
CIMENTO :AREIA	1:4	1:5.6	1.25

(1) Admitindo as seguintes massas volúmicas: Cimento - 1120 kg/m³
Areia de duna - 1565 kg/m³

(2) Relação volumétrica

Esta argamassa foi objecto de controlo durante a execução dos provetes, conforme se descreve em 7.3.5.

7.3.3.3 - Aparelho da alvenaria

Nas alvenarias tradicionais as juntas verticais entre fiadas encontram-se desfasadas duma distância entre 1/2 e1/3 do comprimento do bloco.

Nos elementos para alvenaria de furação vertical, como é o caso dos blocos, o elemento é constituído por um determinado número de septos longitudinais travados por septos transversais.
Em geral é impossível garantir uma sobreposição dos septos transversais em fiadas consecutivas,, salvo se na concepção da geometria do elemento tal for tido em conta, e se no assentamento o desfasamento for constante e igual a metade do comprimento do bloco. Caso contrário, a transmissão das cargas verticais processa-se exclusivamente pelos septos longitudinais, limitando-se os transversais à absorção dos esforços desenvolvidos perpendicularmente ao plano dos septos longitudinais.

Considerou-se pertinente avaliar em que medida o aparelho aleatório, sem garantia de sobreposição dos septos transversais dos elementos entre fiadas consecutivas, ou um aparelho que garanta essa sobreposição, têm reflexos na resistência da alvenaria à compressão.

No caso do bloco 500 mm x 200 mm x 250 mm corrente, a obtenção de um aparelho com sobreposição dos septos transversais, obriga a um desfasamento próximo de 1/3 do comprimento do bloco. A geometria definida para o bloco 500 mm x 200 mm x 250 mm *melhorado*, com desfasamento de 1/2 bloco, permite uma sobreposição total dos septos transversais.

Assim sendo planearam-se 2 tipos de provetes:

- Provete com aparelho assegurando desfasamento de 1/2 bloco. No caso do bloco 500 x 200 x 250 *melhorado* garante a sobreposição de todos os septos entre fiadas. No caso do bloco 500 x 200 x 250 corrente garante apenas a sobreposição dos septos longitudinais;
- Provete com aparelho assegurando desfasamento de 1/3 do bloco. No caso do bloco 500 x 200 x250 corrente garante a sobreposição da totalidade dos septos entre fiadas. Para o bloco 500 x 200 x250 *melhorado* garante apenas a sobreposição dos septos longitudinais.

7.3.3.4 - Tipo de provete de alvenaria

Tradicionalmente, os tipos de provetes usados nos ensaios de compressão normal de alvenarias eram de dois tipos, conforme se sintetiza na fig. 7.23:

- tipo "europeu", procurando reproduzir a forma de assentamento real da parede, incorporando juntas horizontais e verticais. Não existe uniformidade a nível internacional relativamente ao comprimento e número de fiadas do provete [109,208];
- tipo "americano", que utiliza um provete sem juntas verticais, obtido pela simples justaposição de elementos [152].

PROVETE TIPO "EUROPEU"

PROVETE TIPO "AMERICANO"
ASTM E 447 - 84 [152]

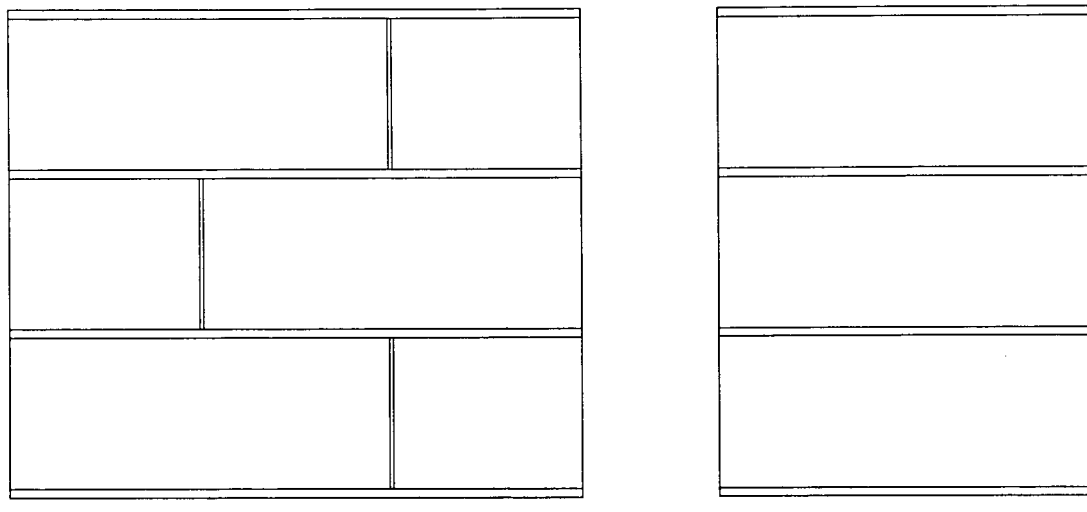


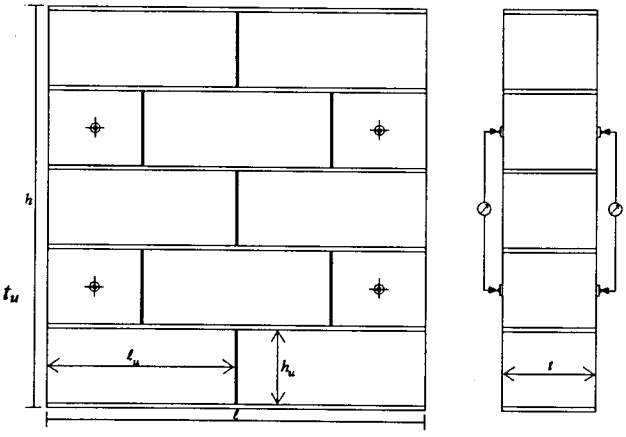
Fig. 7.23 - Geometrias tradicionais dos provetes, para ensaio de alvenarias à compressão [109,208]

A tendência americana, embora conduzindo a ensaios muito mais simples poderá conduzir a desajustes importantes entre os resultados laboratoriais e o comportamento efectivo da parede, dado menosprezar alguns dos aspectos que se pretendem avaliar neste estudo, como sejam a influência do aparelho da alvenaria e das juntas verticais.

A uniformidade a nível europeu começou a ser alcançada com o desenvolvimento dos trabalhos do *CEN,* concretamente o projecto de uma norma europeia neste domínio - pr EN 1052-1 (Nov 1994) - "Method of test for Masonry- Part 1: Determination of compressive strength" - [125].

Segundo este projecto de norma as dimensões do provete deverão ser obtidas de acordo com as dimensões constantes do Quadro 7.15, respeitando as observações indicadas.

Quadro 7.15 - Dimensões dos provetes para determinação da resistência à compressão das alvenarias segundo pr EN 1052 - 1 [125]

Dim. do elemento (mm)		Dimensões do provete (mm)			Configuração geométrica (1)
Comp. l_u	Altura h_u	Comp l	Altura h	Esp. t	
≤300	≤150	$l \geq 2\,l_u$	$h \geq 5h_u$		
	>150		$h \geq 3h_u$	$3t \leq h \leq 10\,t$ e $h \geq l$	
>300'	≤150	$l \geq 1.5\,l_u$	$h \geq 5h_u$	$t \geq t_u$	
	>150		$h \geq 3h_u$		

(1) - Caso a altura do provete, de acordo com o critério exposto, ultrapasse 1000 mm, poderão reduzir-se as dimensões cortando os elementos usados na 1ª e última fiada, por forma a conseguir a altura de 1000 mm, desde que sejam respeitadas as seguintes condições:

- $l \geq 400$ mm e $l \geq l_u$;
- o provete deve incluir pelo menos 1 junta de assentamento e uma junta vertical;
- as faces primitivas dos elementos antes do corte devem ser as argamassadas.

A aplicação deste princípio aos blocos objecto do presente estudo, conduziu a um provete com as dimensões constantes da fig. 7.24.

De acordo com o referido projecto de norma *CEN*, o provete terá que ter 4 fiadas, devido à exigência da altura não ser inferior ao comprimento. Esta exigência não era habitual em versões anteriores do mesmo documento, ou ainda segundo as recomendações da *RILEM* [208], em que bastava que o provete tivesse 3 fiadas. Optou-se assim por ensaiar também um provete alternativo apenas com 3 fiadas, fig. 7.25, por forma a avaliar se as diferenças encontradas são relevantes .

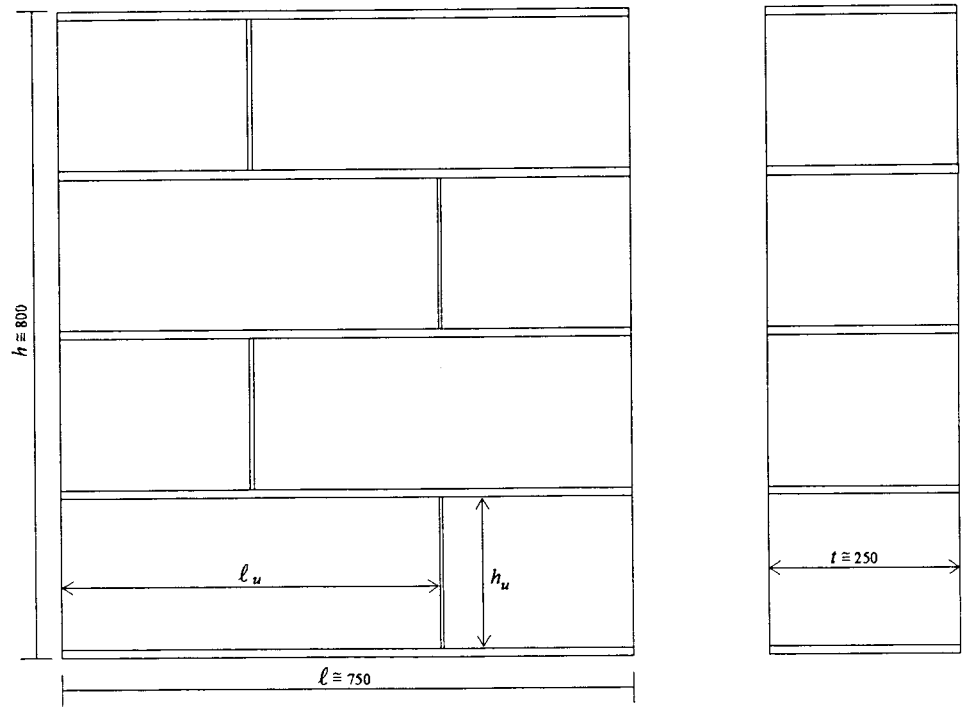


Fig. 7.24 - Dimensões do provete de blocos 500 x 200 x 250 segundo pr EN 1052-1[125]

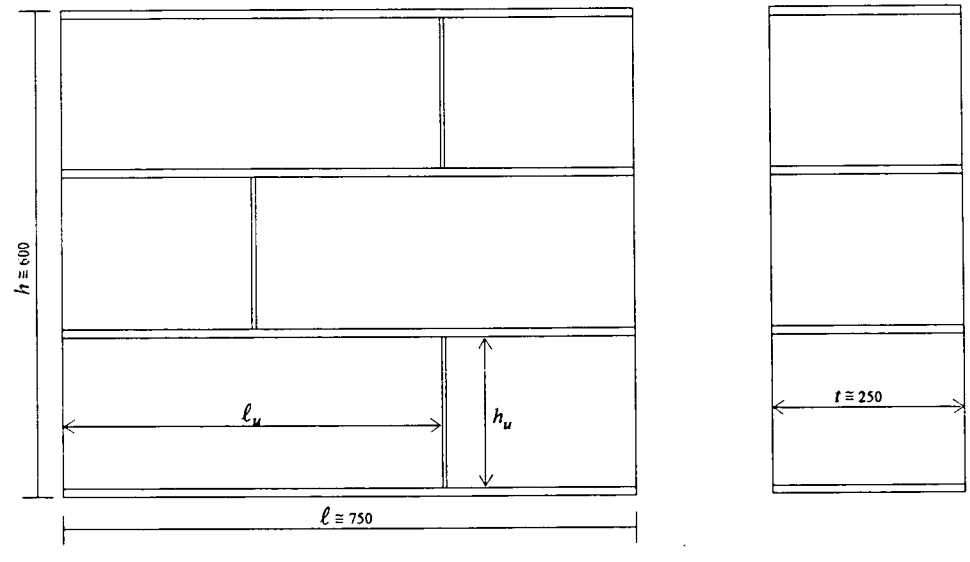


Fig. 7.25 - Dimensões do provete alternativo de blocos 500 x 200 x 250

7.3.4 - Programa de ensaios das alvenarias

Na concretização do estudo relativo ao comportamento à compressão de alvenarias de blocos de betão de argila expandida, conforme foi referido, intervieram:

- **2 tipos de blocos** - tipo "A" - 500 x 200 x 250 corrente;
  - tipo "B" - 500 x 200 x 250 *melhorado*;
- **2 tipos de argamassa** - argamassa de cimento e areia, traço volumétrico 1:4;
  - argamassa-cola pronta *YTONG*;
- **3 tipos de provetes**:
  - *provete base* - 4 fiadas de altura, de bloco e meio cada, com desfasamento de 1/2 bloco;
  - *provete variante 1* - 4 fiadas de altura, de bloco e meio cada, com desfasamento de 1/3 bloco;
  - *provete variante 2* - provete de 3 fiadas de altura, de bloco e meio cada, com desfasamento de 1/2 bloco.

Definiram-se 4 séries de provetes para cada tipo de bloco, conforme se indica no Quadro 7.16, numeradas de I a IV, sendo a série I de referência.

Quadro 7.16 - Síntese das séries de provetes de alvenaria de blocos para os ensaios de compressão

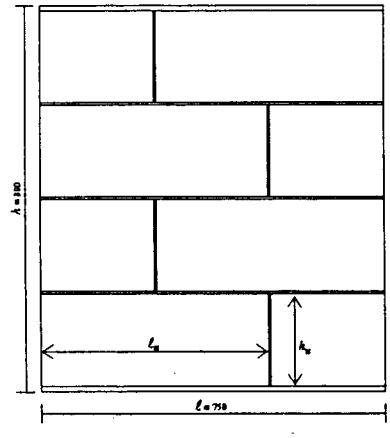
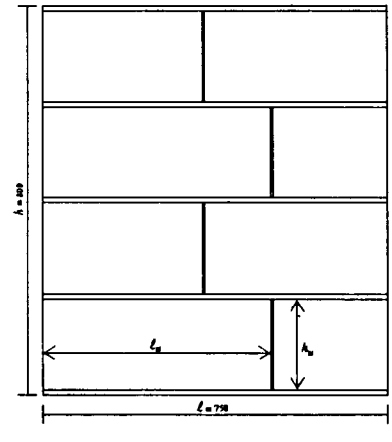
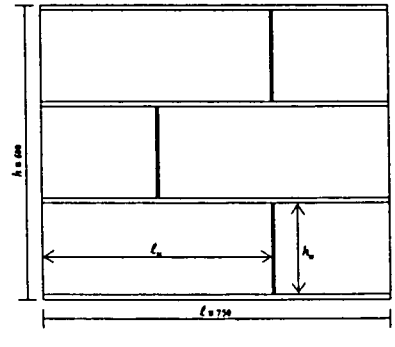
SÉRIE	GEOMETRIA DO BLOCO		ARGAMASSA		TIPO DE PROVETES		
	A	B	TRAÇO 1:4	COLA "YTONG"	4 FIADAS DESFASADAS A 1/2	4 FIADAS DESFASADAS A 1/3	3 FIADAS DESFASADAS A 1/2
A - I [1]	+		+		+		
A - II	+			+	+		
A - III	+		+			+	
A - IV	+		+				+
B - I [1]		+	+		+		
B - II		+		+	+		
B - III		+	+			+	
B - IV		+	+				+

1 - Série de referência

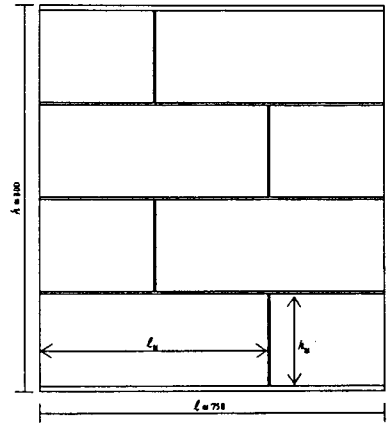
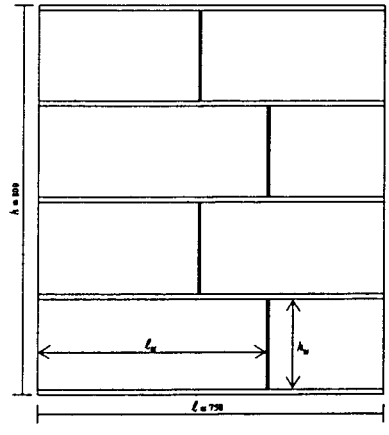
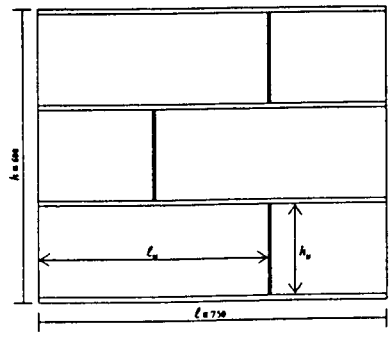
Atendendo ao volume de trabalho associado a este tipo de ensaios e considerando que a dispersão da resistência à compressão dos blocos não é muito acentuada, adoptaram-se 3 provetes para cada

série, número compatível com o especificado na pr EN 1052-1 [125].Nos Quadros 7.17 e 7.18 identificam-se os 24 provetes realizados.

Quadro 7.17 - Identificação dos provetes de alvenaria de blocos de betão leve correntes 500 x 200 x 250

TIPO DE PROVETE	SÉRIE	Nº DE PROVETES	IDENTIFICAÇÃO
	I	3	A - I - 1 A - I - 2 A - I - 3
	II	3	A - II - 1 A - II - 2 A - II - 3
	II	3	A - III - 1 A - III - 2 A - III - 3
	IV	3	A - IV - 1 A - IV - 2 A - IV - 3

Quadro 7.18 - Identificação dos provetes de alvenaria de blocos de betão leve *melhorados* 500 x 200 x 250

TIPO DE PROVETE	SÉRIE	Nº DE PROVETES	IDENTIFICAÇÃO
	I	3	B - I - 1 B - I - 2 B - I - 3
	II	3	B - II - 1 B - II - 2 B - II - 3
	III	3	B - III - 1 B - III - 2 B - III - 3
	IV	3	B - IV - 1 B - IV - 2 B - IV - 3

7.3.5 - Programa de ensaios dos materiais constituintes das alvenarias

À semelhança do efectuado nos provetes usados na caracterização térmica, efectuou-se uma caracterização dos materiais constituintes dos provetes, compreendendo ensaios de identificação e de comportamento que seguidamente se referem:

a) **Blocos de betão**

- composição do betão;
- cura;
- características dimensionais - dimensões exteriores;
  - espessura dos septos;
  - percentagem de furação;
- características mecânicas - resistência à compressão.

Sublinha-se que o betão usado na realização dos blocos tinha sido objecto de uma caracterização preliminar referida no Capítulo 5.

b) **Constituintes e argamassas de assentamento**

b1) Cimento

Dado que o cimento Portland utilizado na argamassa ao traço 1:4 está bem caracterizado e apresenta características uniformes, não se efectuou qualquer ensaio ao cimento.

b2) Areia de duna

- análise granulométrica;
- massa volúmica;
- módulo de finura;
- teor em partículas finas.

b3) Argamassa de assentamento no estado endurecido

- composição ;
- massa volúmica;
- tensão de rotura à tracção por flexão;
- tensão de rotura à compressão.

b4) Argamassa - cola YTONG

Não se efectuou qualquer caracterização, dado tratar-se de uma argamassa pré-doseada em pó, recentemente caracterizada duma forma exaustiva no âmbito do DH 383 - [198].

7.3.6 - Controlo e execução dos provetes

7.3.6.1 - Controlo dos blocos e inertes

Já foi referido que os blocos de betão utilizados foram produzidos no mesmo dia, com composição, condições de fabrico e cura perfeitamente controladas. Sofreram uma escolha segundo atributos de aspecto e desvios dimensionais, sendo de seguida efectuados os cortes necessários à obtenção das partes dos blocos necessárias à realização dos provetes.

A areia de duna utilizada na argamassa foi retirada do mesmo lote, tendo sofrido uma crivagem de modo a eliminar as partículas de maiores dimensões. Posteriormente foi seca ao ar em local arejado e abrigado.

7.3.6.2 - Controlo da composição das argamassas

Com o objectivo de assegurar a constância da composição da argamassa ao traço 1:4 determinou-se a massa volúmica dos seus constituintes e efectuou-se o pré-doseamento da areia e do cimento em Laboratório, em doses correspondentes à argamassa consumida em cerca de 1 hora de assentamento. A descrição detalhada das acções empreendidas foi efectuada em 7.3.3.2.

A argamassa - cola pronta, fornecida em sacos de 12 kg de pó aos quais basta juntar água, não foi objecto de qualquer controlo.

7.3.6.3 - Controlo das condições de execução dos provetes

Os aspectos associados à execução, sobretudo a mão-de-obra, influenciam o comportamento das alvenarias, particularmente a resistência à compressão, conforme foi discutido no Capítulo 4. Para reduzir este efeito, os provetes foram realizados pelo mesmo operário, que já havia realizado os provetes para os ensaios de caracterização térmica e se encontrava consciente dos objectivos do trabalho a realizar.

7.3.6.4 - Execução dos provetes

A construção dos provetes foi efectuada, em instalações cedidas provisoriamente à *FEUP* pelo *CICCOPN* na Maia, numa sala onde se encontra a prensa de ensaios à compressão.
Como não se pretendiam mover os provetes até à data de ensaio e por limitações de espaço, parte dos provetes foram realizados sobre bancada nivelada com acabamento a chapa de aço, enquanto os restantes foram realizados em bancadas niveladas apoiadas no pavimento, improvisadas para o efeito.

Para possibilitar o manuseio dos provetes do local de fabrico para o prato de prensa por 4 pessoas,, todos os provetes foram realizados sobre uma tábua de 40 mm de espessura e 300 mm de largura, preparada para ser atravessada por 2 varões. Estas tábuas encontravam-se perfeitamente regularizadas e desempenadas.

Os 24 provetes foram executados em 4 dias por um operário especializado e um auxiliar, sob orientação permanente do autor. A ordem de execução foi aleatória, salvo no que respeita aos provetes a realizar com argamassa-cola que foram deixados para o fim.

Controlou-se e registou-se a informação respeitante à execução dos provetes, particularmente:

- data, hora de início e de conclusão do provete;
- referência da amassadura, hora de fabrico, quantidade de água adicionada e provetes em que foi usada;
- relação entre os prismas de argamassa moldados para ensaios de caracterização, e a referência da amassadura e do provete em que foi usada;
- identificação dos provetes, imediatamente após a construção e posteriormente, com etiqueta identificativa no próprio provete.

Atendendo a que os constituintes da argamassa já se encontravam pré-doseados, os blocos encontravam-se escolhidos, cortados e arrumados, provete a provete, a sequência de execução foi a seguinte:

- preparação da base, incluindo verificação de nivelamento da tábua e aplicação de descofrante na mesma;
- amassadura da argamassa normal em betoneira de eixo horizontal;
- amassadura da argamassa-cola através de adição aos 12 kg de produto em pó, contido em cada saco, de 4 l de água, seguida de amassadura manual até obtenção de uma pasta homogénea;
- aplicação de um leito de argamassa de cimento e areia, mesmo no caso do provete com juntas coladas, por forma a constituir a camada de regularização da face inferior do provete;
- assentamento dos blocos não humedecidos em fiadas sucessivas, incluindo interrupção da junta horizontal de assentamento, realização da junta vertical parcial no caso dos blocos 500 x 200 x 250 *melhorados* e verificação, através de nível, do correcto posicionamento dos blocos;
- rectificação da face superior do provete com uma camada de argamassa de cimento e areia, mesmo no caso do provete com juntas coladas, recorrendo a duas réguas de madeira fixadas por grampos.

A espessura das juntas foi mantida aproximadamente constante por recurso a "bitolas" de madeira,, tendo sido de cerca de 10 a 12 mm no caso das juntas realizadas com argamassa corrente e 3 mm para as juntas coladas.

Os blocos de 500 x 200 x 250 *melhorados*, dispõem de uma reentrância para aplicação de argamassa em parte da junta vertical. Esta cavidade foi preenchida com argamassa introduzida superiormente, antes da realização da junta horizontal da fiada seguinte.

Após a execução, os provetes foram cobertos com folha de polietileno durante os três primeiros dias, de acordo com o especificado no projecto de norma pr EN 1052-1 [125]. Os provetes permaneceram imóveis até aos 28 dias de idade, altura em que se iniciaram os ensaios mecânicos.

A figura 7.26 ilustra alguns aspectos mais sugestivos da execução dos provetes.

a) Aplicação de descofrante nas tábuas de suporte

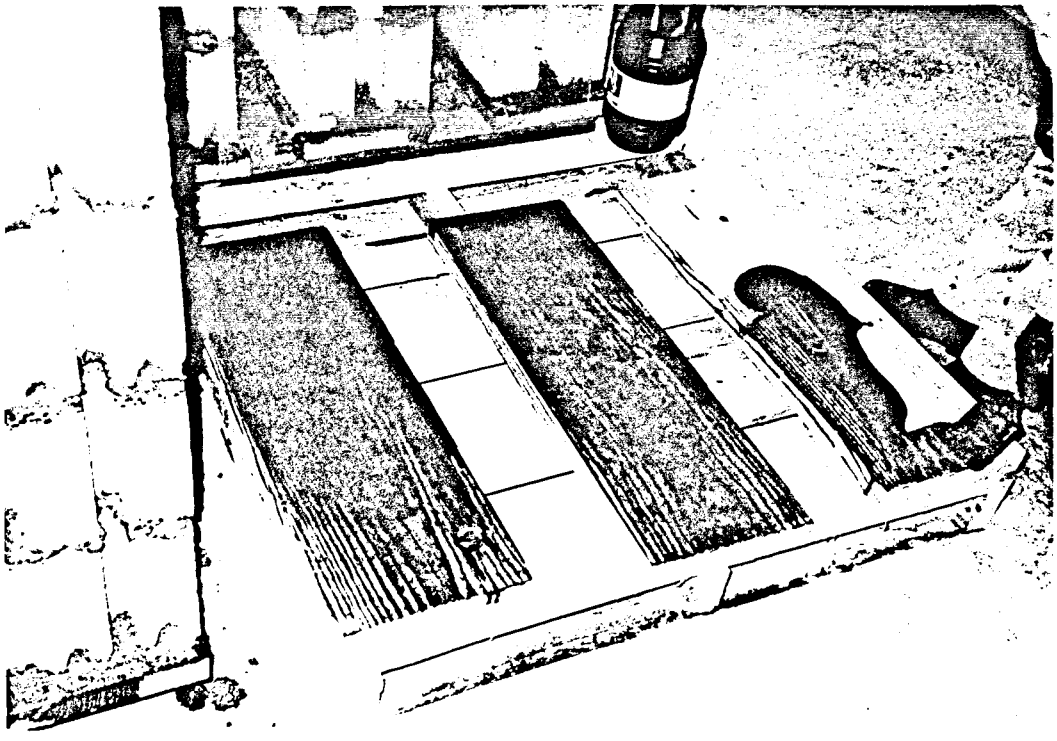
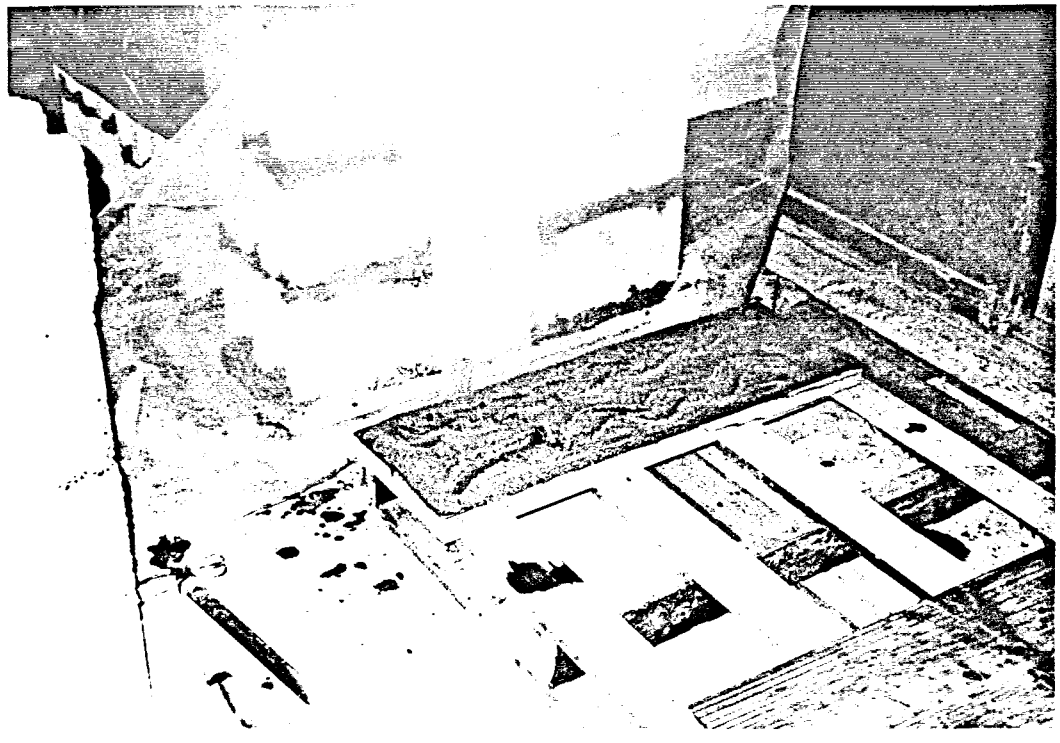


Fig. 7.26 - Aspectos de execução dos provetes para ensaios mecânicos

b) Aplicação de argamassa de regularização inferior



c) Assentamento da 1ª fiada e verificação de nivelamento

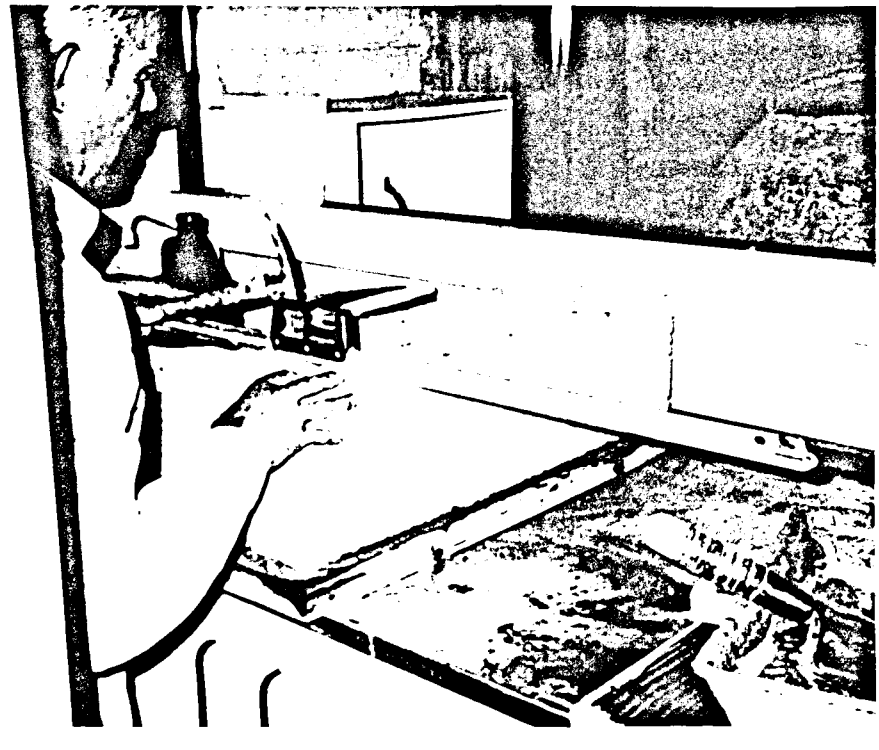
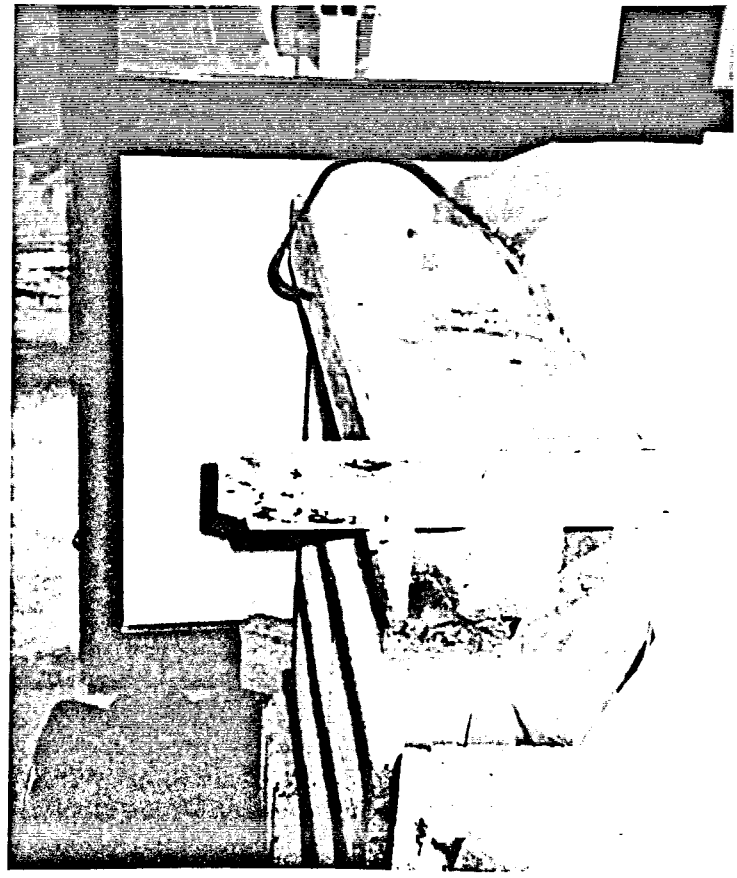


Fig. 7.26 (cont.) - Aspectos de execução dos provetes para ensaios mecânicos

d) Regularização superior do provete



e) Realização de provete com argamassa-cola



Fig. 7.26 (cont.). - Aspectos de execução dos provetes para ensaios mecânicos

7.3.7 - Ensaio dos provetes

7.3.7.1 - Equipamento de ensaio

Os ensaios foram realizados no local já referido, em espaço das instalações do *CICCOPN* - Maia, cedido provisoriamente à *FEUP*, onde está localizada uma prensa *SEIDNER* de 3000 kN, entre outro equipamento. Esta máquina de ensaios tem 4 colunas rígidas, classe 1 de precisão e pratos de dimensões 600 mm x 400 mm, sendo o superior provido de rótula esférica. O prato inferior encontra-se sobreelevado relativamente ao pavimento da sala de cerca de 600 mm. O prato superior é solidário com um cabeçote móvel, podendo a câmara de ensaio atingir 1500 mm. A unidade de comando e controlo permite, em compressão, variar a velocidade de carregamento e efectuar ciclos e patamares de carga.

Para a medição das deformações usou-se o alongâmetro *LNEC* de 400 mm de base e 0.001 mm de precisão.

Dado que o comprimento dos provetes ultrapassava o comprimento dos pratos da prensa, intercalou-se entre ambos chapas de base em aço finamente rectificadas, com 60 mm de espessura. A inferior foi simplesmente pousada, enquanto a superior foi rigidamente fixada ao prato superior da prensa.

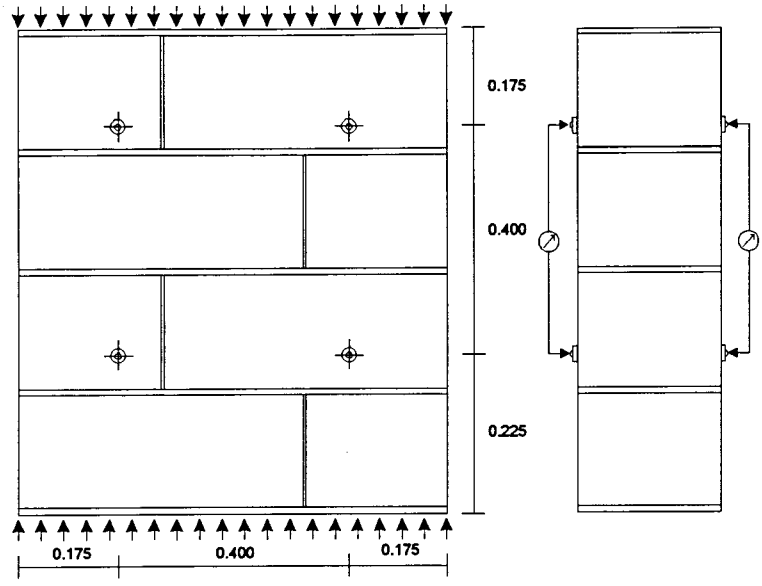
7.3.7.2 - Preparação dos provetes para ensaio

Antes da realização dos ensaios efectuou-se um levantamento por medição, das dimensões dos provetes necessárias à determinação das tensões de compressão. O levantamento incidiu sobre o comprimento, altura e espessura dos provetes. Efectuaram-se 4 medições por dimensão, com precisão de 1 mm, adoptando-se no cálculo a média dessas medições.

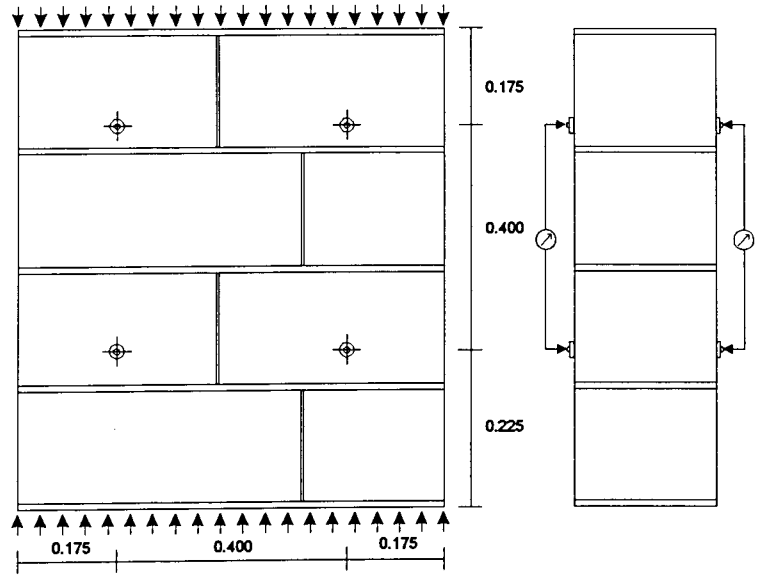
Colocaram-se em cerca de 2/3 dos provetes bases para leitura das deformações ocorridas ao longo do ensaio. As bases de leitura foram fixadas com uma resina epoxy, de acordo com a disposição das Fig. 7.27.

Efectuou-se também nesta altura a verificação do estado de regularização das faces inferiores dos provetes que tinham ficado em contacto com a tábua de suporte, tendo-se em alguns casos procedido a ligeiras correcções com pasta de cimento .

a) Provete base



b) Provete variante 1



b) Provete variante 2

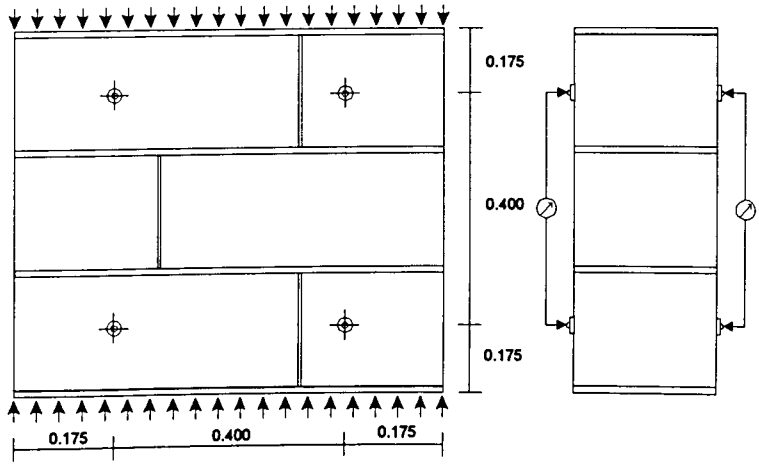


Fig. 7.27 - Aspecto da disposição das bases de leitura do alongâmetro nos diferentes provetes

7.3.7.3 - Técnica de ensaio, registo e forma de expressão dos resultados

Segundo o projecto de norma europeia já referido, pr EN 1052-1 [125], deverão ensaiar-se no mínimo 3 provetes idênticos, com a configuração geométrica referida no Quadro 7.15. Nos primeiros 3 dias após o fabrico, os provetes deverão ser cobertos com folha de polietileno. Os provetes devem ser ensaiados em sala com temperatura de 20 °C ± 5 °C e humidade relativa de 60 % ± 10 %. A carga deve ser aplicada uniformemente em toda a área. A velocidade de carregamento deve ser tal que a rotura ocorra entre 15 a 30 min após o início do carregamento. No caso da determinação do módulo de elasticidade, deverão registar-se até cerca de 50% da carga máxima, no mínimo 4 deslocamentos, em pontos localizados de acordo com o constante da figura do Quadro 7.15.

A tensão de rotura de cada provete, f_i, será obtida dividindo a carga máxima suportada pelo provete pela área carregada:

$$f_i = \frac{F_{i\,max}}{A} \tag{7.18}$$

em que:

f_i - tensão de rotura à compressão individual, de um provete de alvenaria

$F_{i\,max}$ - Força de rotura máxima atingida por um provete individual

A - Área carregada

Sendo f, a média das tensões de rotura individuais:

$$f = \overline{f_i} \tag{7.19}$$

A resistência característica à compressão da alvenaria, f_k, será:

$$f_k = \text{mínimo}\,(f/1.2\,,f_{min}) \tag{7.20}$$

em que:

f_{min} - menor tensão de rotura á compressão individual, de um provete de alvenaria

Ainda de acordo com o referido documento, cada valor individual do módulo de elasticidade é o correspondente ao módulo secante entre a origem e aproximadamente 1/3 da tensão de rotura, determinado através da média de 4 determinações da deformação vertical, duas em cada face do provete:

$$E_i = \frac{F_{i\,max}}{\varepsilon_i \cdot 3 \cdot A} \tag{7.21}$$

em que:

ε_i - extensão vertical média de um provete, relativa a 4 deformações, 2 em cada face, correspondentes aproximadamente a 1/3 de $F_{i\,max;}$

E_i - módulo de elasticidade individual de um provete.

Sendo o valor do módulo de elasticidade E, a média das determinações individuais:

$$E = \overline{E_i} \tag{7.22}$$

Na caracterização efectuada a técnica de ensaio respeitou o especificado no pr EN 1052-1 [125].O provete, com a idade de cerca de 28 dias, era deslocado manualmente do local onde permaneceu em cura para o prato inferior da prensa, interpondo-se entre ambos uma placa de cartão prensado. De seguida ajustou-se a sua posição, por forma a que o eixo do provete coincidisse com o eixo da máquina. Entre a face superior do provete e o prato da máquina era igualmente colocada uma placa de cartão prensado. Em alguns casos foi necessário descarregar e reiniciar o carregamento por forma a assegurar a igualdade de deformação nas duas faces do provete.

Procurou-se regular a velocidade de aplicação de carga por forma a que a duração de ensaio fosse próxima de 15 min, no caso do ensaio sem medição de deformações, e que estivesse compreendida entre 25 e 35 min no caso de ensaio com medição de deformações, o que conduziu à aplicação dum incremento de carga de 0.6 kN/s.

No caso dos ensaios com medição das deformações, a carga foi aplicada por incrementos, mantendo-se o provete sem acréscimo de carregamento durante cerca de 2 min, para estabilização,, antes da leitura da deformação. Os incrementos eram definidos por forma a ser possível efectuar até bastante próximo da rotura cerca de 10 leituras de deformações, embora nem sempre tal tenha sido possível.

Em todos os ensaios registou-se a seguinte informação :

- referência do provete;
- dimensões do provete;
- data, hora de início e conclusão do ensaio;
- velocidade do carregamento;
- carga correspondente à primeira fissura;

- carga de rotura;
- carga máxima;
- configuração de rotura;
- registo das leituras do alongâmetro para os diferentes níveis de carga, no caso dos provetes em que se acompanhou a deformação;
- registo fotográfico do provete no fim do ensaio.

O cálculo das tensões de rotura e módulo de elasticidade foi efectuado de acordo com o expresso anteriormente.

7.3.8 - Resultados do estudo experimental

7.3.8.1 - Materiais constituintes

a) **Blocos de betão**

Apresenta-se no Quadro 7.19 a síntese dos resultados da caracterização dimensional e mecânica efectuada nas duas geometrias de blocos. Os blocos usados nos provetes de caracterização térmica já tinham sofrido uma caracterização semelhante, para além de ensaios preliminares incidindo sobre o betão, de acordo com o programa definido no Capítulo 5.

Quadro 7.19 - Resultados da caracterização de blocos de betão, relativos à caracterização mecânica

Bloco		**Características dimensionais**						**Tensão**
					Espessura septos (mm)		**Percentagem furação (3)**	**de rotura**
Tipo	Resultado	**Comp.** (mm)	**Altura** (mm)	**Largura** (mm)	Interior	Exterior	(%)	f_b' (MPa)
500 x 200 x 250 corrente	Média (1)	494	190	247	23	23	41.5	1.73
	Coef. var. (%)	-	-	-	-	-	0.6	12
500 x 200 x 250 *melhorado*	Média (1)	498/489 (2)	190	251	19	19	39.4	2.04
	Coef. var. (%)	-	-	-	-	-	0.5	11

(1) - Média de 6 blocos para cada geometria
(2) - Valores diferentes na face exterior e interior
(3) - Preenchimento dos furos com areia - BS 6073: Part 2 [138]

b) **Constituintes e argamassa de assentamento**

As características da areia utilizada nas argamassas apresentam-se no Anexo VI.

As características mecânicas das argamassas endurecidas estão sintetizados no Quadro 7.20.

Quadro 7.20 - Resultados da caracterização das argamassas de assentamento, relativos à caracterização mecânica

Argamassa		Massa volúmica aparente seca	Tensão de rotura por flexão (1)		Tensão de rotura por compressão (1)	
Tipo e utilização	Composição	(kg/m^3)	Conservação	(MPa)	Conservação	(MPa)
Normal para assentamento	Traço Volumétrico 1:4 Cimento CPC 32,5 II - 7,5 l Areia de duna - 30 l Água aproximada- 10,5 l	Média 2165 Coef. variação 0.2 %	Água doce	Média 2.0 Coef. variação 6.5 %	Água doce	Média 6.8 Coef. variação 6.6 %

(1) -Provetes compactados manualmente, ensaiados aos 28 dias

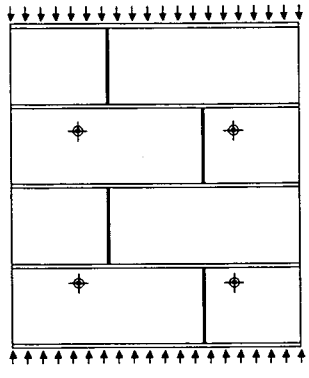
7.3.8.2 - Resultados dos ensaios de compressão normal

Os objectivos, programa, metodologia e técnica de ensaio usados na determinação da resistência à compressão simples dos provetes de alvenaria, realizados com blocos de betão de inertes leves de argila expandida, já foram referidos nos pontos anteriores.

Nos Quadros 7.21 a 7.28 apresenta-se a síntese dos resultados, para as oito séries, sendo cada série constituída por 3 provetes. A tensão de rotura foi determinada relativamente à secção aparente efectiva do provete, determinada por medição do comprimento e largura, nas secções inferior e superior do provete.

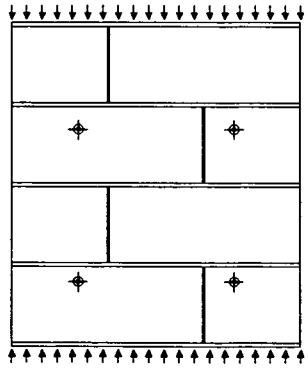
A determinação do módulo de elasticidade respeitou o expresso na norma pr EN 1052-1 [125]. Corresponde ao módulo secante entre a origem e cerca de 1/3 da tensão de rotura, sendo calculado a partir da média das 4 determinações da deformação vertical, 2 em cada face do provete. No Anexo VI apresentam-se os diagramas tensões-extensões obtidos até próximo da rotura.

Quadro 7.21 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série A - I

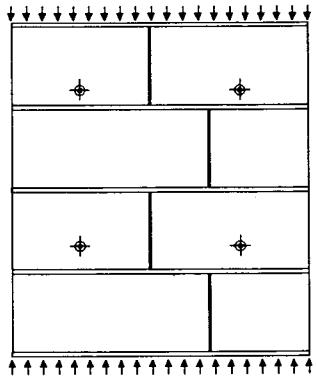
GEOMETRIA DA SÉRIE	Provete	Idade (dias)	Secção (m^2)	Carga de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
	A - I - 1	29	0.1820	401	2.20	-
	A - I - 2	29	0.1826	400	2.19	(1)
	A - I - 3	29	0.1833	358	1.95	5458
			Valor Médio		**2.1**	**5460**
(juntas argamassadas)			Valor Característico		**1.8**	**-**

(1) Ensaio anulado devido à não estabilização das leituras

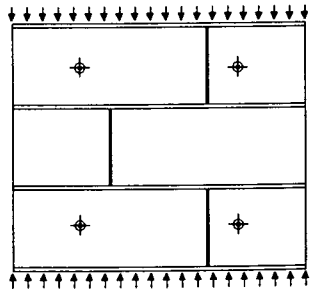
Quadro 7.22 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série A - II

GEOMETRIA DA SÉRIE	Provete	Idade (dias)	Secção (m^2)	Carga de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
	A - II - 1	33	0.1825	395	2.14	6342
	A - II - 2	33	0.1831	436	2.38	5464
	A -II - 3	28	0.1830	351	1.92	-
			Valor Médio		**2.2**	**5900**
(juntas coladas)			Valor Característico		**1.8**	**-**

Quadro 7.23 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série A - III

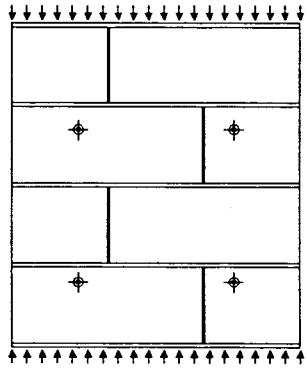
GEOMETRIA DA SÉRIE	Provete	Idade (dias)	Secção (m^2)	Carga de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
	A - III - 1	36	0.1857	382	2.06	5429
	A - III - 2	29	0.1822	344	1.89	7740
	A - III - 3	28	0.1818	378	2.08	-
	Valor Médio				**2.0**	**6590**
(juntas argamassadas)	Valor Característico				**1.7**	**-**

Quadro 7.24 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série A - IV

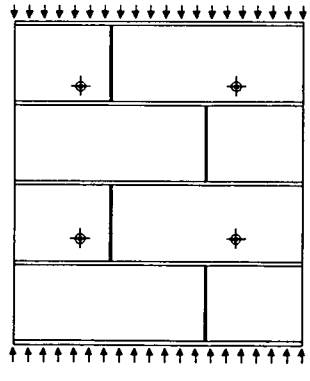
GEOMETRIA DA SÉRIE	Provete	Idade (dias)	Secção (m^2)	Carga de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
	A - IV - 1	30	0.1825	458	2.51	-
	A - IV - 2	30	0.1822	449	2.46	(1)
	A - IV - 3	30	0.1835	340	1.85	5900
	Valor Médio				**2.3**	**5900**
(juntas argamassadas)	Valor Característico				**1.9**	**-**

(1) Ensaio anulado devido à não estabilização das leituras

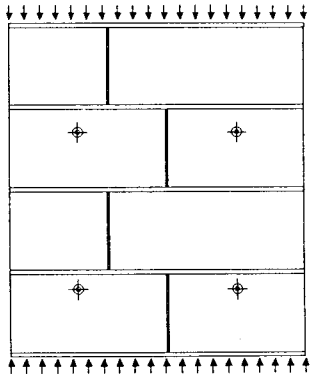
Quadro 7.25 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes série B - I

GEOMETRIA DA SÉRIE	Provete	Idade (dias)	Secção (m^2)	Carga de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
 (juntas argamassadas)	B - I - 1	30	0.1890	380	2.01	5439
	B - I - 2	30	0.1884	402	2.13	5321
	B - I - 3	30	0.1900	426	2.24	-
		Valor Médio			**2.1**	**5380**
		Valor Característico			**1.8**	**-**

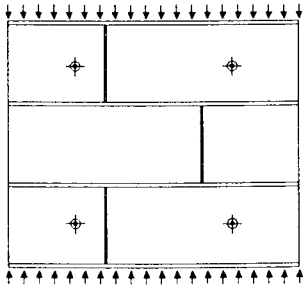
Quadro 7.26 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série B - II

GEOMETRIA DA SÉRIE	Provete	Idade (dias)	Secção (m^2)	Carga de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
 (juntas coladas)	B - II - 1	32	0.1890	381	2.02	-
	B - II - 2	32	0.1880	492	2.62	5858
	B - II - 3	32	0.1891	356	1.88	5692
		Valor Médio			**2.2**	**5780**
		Valor Característico			**1.8**	**-**

Quadro 7.25 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série B - III

GEOMETRIA DA SÉRIE	Provete	Idade (dias)	Secção (m^2)	Carga de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
	B - III - 1	30	0.1880	385	2.05	5040
	B - III- 2	30	0.1890	394	2.08	-
	B - III- 3	30	0.1892	416	2.20	5287
		Valor médio			**2.1**	**5160**
(juntas argamassadas)		Valor característico			**1.8**	-

Quadro 7.26 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes, série B - IV

GEOMETRIA DA SÉRIE	Provete	Idade (dias)	Secção (m^2)	Carga de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
	B - IV - 1	29	0.1910	509	2.66	5950
	B - IV - 2	29	0.1874	406	2.17	-
	B - IV - 3	29	0.1910	419	2.19	(1)
		Valor médio			**2.3**	**5950**
(juntas argamassadas)		Valor característico			**2.0**	-

(1) Ensaio anulado devido à não estabilização das leituras

A fendilhação associada à rotura apresentava, nas faces maiores do provete, configuração horizontal, em geral próxima das faces inferior e superior do provete, por esgotamento de capacidade resistente do betão dos septos. Em alguns casos, estas fendas de desenvolvimento horizontal, ocorreram em fiadas intermédias do provete. Em dois ou três casos ocorreu desenvolvimento de fissuras verticais, correspondendo aproximadamente ao prolongamento das juntas entre blocos. Lateralmente eram normalmente visíveis fendas verticais e em alguns casos esmagamento do provete junto aos topos em contacto com os pratos da máquina. Estas fissuras tinham em geral correspondência com a rotura interior do provete, ao longo dos septos transversais, na zona de interrupção da junta de assentamento.

Na fig. 7.28 apresentam-se algumas fotografias de configurações de rotura dos provetes, ilustrativas do que se acabou de referir. Embora em alguns provetes não tenha havido vestígios de fissuração prenunciadora de rotura, na generalidade dos provetes a 1ª fissura ocorreu para valores próximos de 80% da carga de rotura.

a) Esmagamento das fiadas próximas dos pratos da prensa

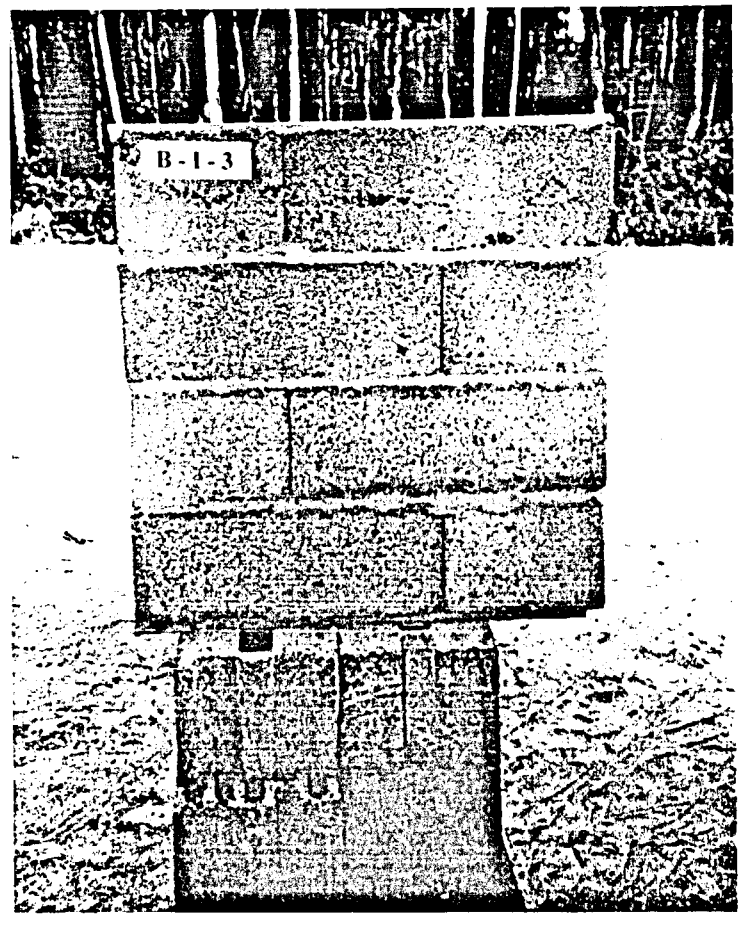
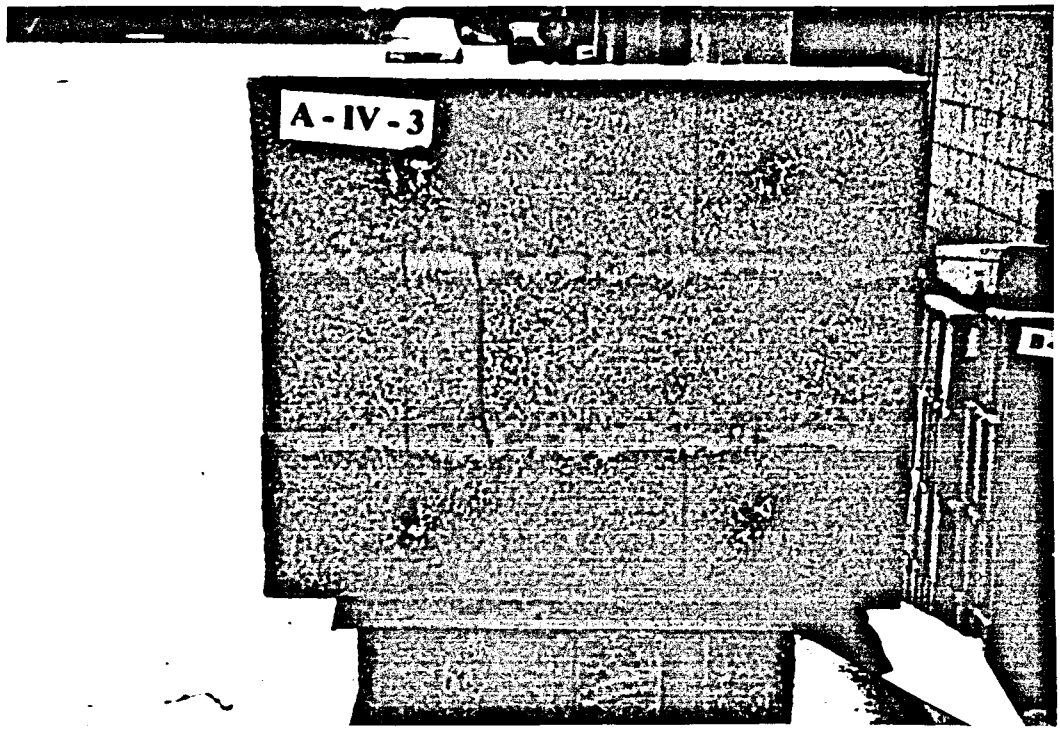


Fig. 7.28 - Configurações típicas de rotura dos provetes

b) Fissuração vertical



c) Exemplo de rotura interior do provete

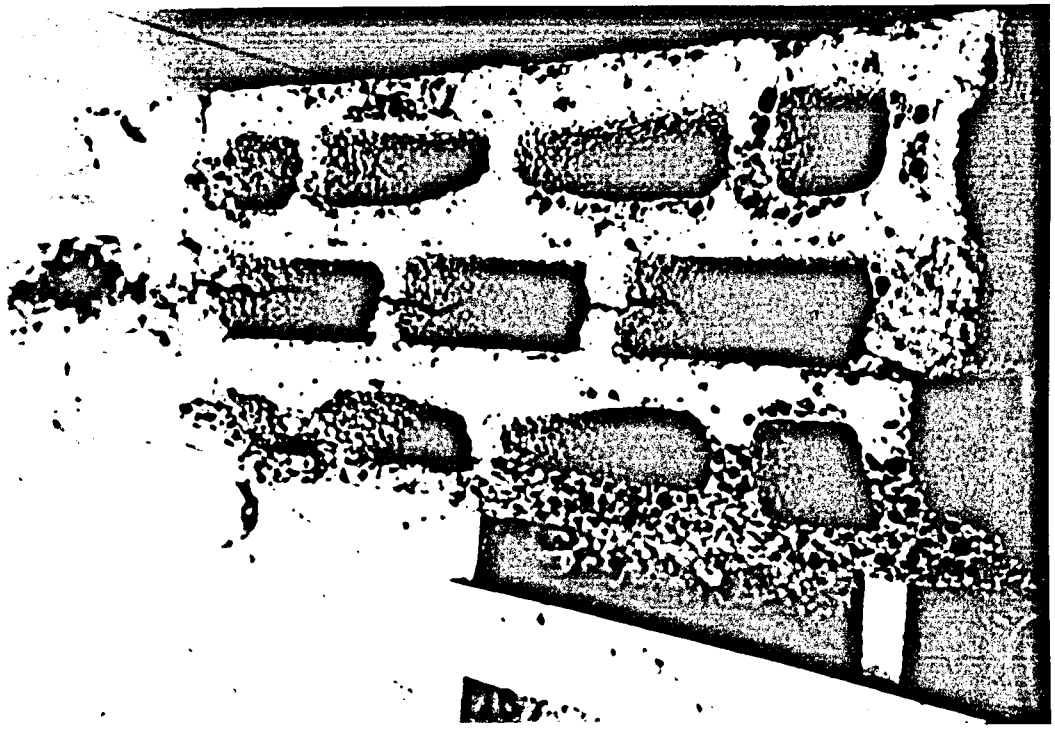


Fig. 7.28 (cont.)- Configurações típicas de rotura dos provetes

CAPÍTULO 8

APRECIAÇÃO DOS RESULTADOS

CAPÍTULO 8

APRECIAÇÃO DOS RESULTADOS

ÍNDICE

8.1 - INTRODUÇÃO
8.2 - COMPORTAMENTO TÉRMICO
8.2.1 - Fiabilidade do modelo numérico
8.2.2 - Modelo de simulação térmica - Análise de sensibilidade
8.2.2.1 - Introdução
8.2.2.2 - Percentagem de furação
8.2.2.3 - Número de fiadas de alvéolos paralelas ao sentido do fluxo
8.2.2.4 - Número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao sentido do fluxo
8.2.2.5 - Posição relativa dos alvéolos
8.2.2.6 - Alvéolos de configuração não rectangular
8.2.2.7 - Influência das juntas horizontais
8.2.2.8 - Condutibilidade térmica dos constituintes
8.2.2.9 - Preenchimento das juntas verticais
8.2.2.10 - Existência de juntas descontínuas
8.2.2.11 - Juntas horizontais delgadas
8.2.2.12 - Emissividade das superfícies dos alvéolos
8.2.2.13 - Preenchimento total dos alvéolos com isolante térmico
8.2.3 - Geometrias reais - Simulação numérica
8.3 - COMPORTAMENTO MECÂNICO
8.3.1 - Materiais constituintes
8.3.1.1 - Blocos de betão
8.3.1.2 - Argamassa base
8.3.1.3 - Argamassa- cola
8.3.2 - Análise dos resultados dos ensaios de compressão normal
8.3.2.1 - Relação entre a resistência dos provetes e os seus constituintes
8.3.2.2 - Comparação entre os resultados experimentais e os obtidos através das expressões do EC6
8.3.2.3 - Avaliação da influência dos parâmetros analisados
8.3.2.4 - Configuração de rotura

CAPÍTULO 8

APRECIAÇÃO DOS RESULTADOS

8.1 - INTRODUÇÃO

É objectivo deste Capítulo apreciar os resultados obtidos na simulação numérica e na caracterização experimental do comportamento térmico e mecânico das alvenarias realizadas com os blocos de betão de argila expandida objecto deste trabalho.

Na apreciação das características de comportamento térmico analisam-se:

- os resultados obtidos na simulação numérica relativa à análise de sensibilidade em 2D e 3D, incluindo apreciação da influência dos factores associados aos seguintes aspectos: geometria dos elementos (nomeadamente percentagem de furação, orientação preferencial da furação, número de fiadas e posição relativa dos alvéolos), características físicas e constituição dos elementos, forma de execução das alvenarias;
- os resultados obtidos na simulação numérica do comportamento dos blocos reais.

No respeitante ao comportamento mecânico apreciam-se :

- os resultados obtidos na caracterização experimental relativa às características dos materiais constituintes da alvenaria: blocos e argamassas;
- os resultados obtidos na caracterização experimental relativa ao comportamento à compressão dos provetes de alvenaria, com destaque para a relação entre a resistência dos provetes e a dos seus constituintes;
- os resultados obtidos na caracterização experimental relativa ao comportamento à compressão dos provetes de alvenaria, quando comparados com os valores resultantes da aplicação das expressões constantes do EC 6;

- a influência dos diversos parâmetros que se fizeram variar na caracterização experimental, nomeadamente características dos blocos, tipos de argamassa de assentamento, aparelho da alvenaria e configuração do provete;
- a configuração de rotura.

8.2 - COMPORTAMENTO TÉRMICO

8.2.1 - Fiabilidade do modelo numérico

Na sequência da caracterização experimental, discutiu-se em 7.2.3 a validação do modelo numérico adoptado para simulação do comportamento térmico das paredes.

Da comparação dos resultados obtidos por diferentes vias e que se sintetizaram no Quadro 7.12, pode concluir-se que:

- o valor obtido para o coeficiente de transmissão térmica da envolvente através da simulação numérica a 3D, por recurso ao método dos elementos finitos, com uma discretização fina ao nível da geometria dos elementos, permite obter excelentes resultados que se consideram praticamente exactos;
- o valor obtido para o coeficiente de transmissão térmica da envolvente, através de simulação numérica a 2D, por recurso ao método dos elementos finitos, com uma discretização fina da geometria, permite obter resultados com uma boa aproximação do valor exacto.

Face aos resultados da análise de sensibilidade, considera-se que é possível, por actuação ao nível da geometria dos elementos para alvenaria e do seu assentamento, conseguir melhorias significativas do desempenho térmico das paredes constituintes da envolvente. Discute-se de seguida quais as principais vias de actuação visando esse objectivo.

Refere-se por último que os resultados obtidos por simulação numérica e experimentalmente, concordam razoavelmente com os tabelados na publicação de referência [76] para as geometrias correntes. No caso de geometrias optimizadas os valores tabelados são conservativos.

8.2.2 - Modelo de simulação térmica - Análise de sensibilidade

8.2.2.1 - Introdução

Discute-se ao longo deste ponto a influência das diversas actuações possíveis associadas à melhoria do comportamento térmico dos elementos para alvenaria, enunciadas no Capítulo 6. Salienta-se que essas actuações poderão ter efeitos diferentes sobre o comportamento térmico dos elementos.

8.2.2.2 - Percentagem de furação

Analisou-se a eventual correlação entre o coeficiente de transmissão térmica das paredes, obtido através do modelo de simulação térmica a 2D, e a percentagem de furação dos blocos usados na realização das paredes.

Nas figuras 8.1 e 8.2 representa-se o universo dos resultados obtidos, em função da percentagem de furação, relativos à análise de sensibilidade de alvenarias realizadas com um conjunto de blocos que apresentavam as seguintes características:

- geometrias teóricas com alvéolos de emissividade 0.95, realizadas com betões de condutibilidade térmica 1.40 e 0.40 W/(m.ºC) respectivamente, na fig. 8.1 e 8.2;
- assentes com juntas contínuas de argamassa corrente, com condutibilidade térmica de 1.15 W/(m.ºC) e rebocados em ambas as faces com argamassa de condutibilidade térmica 1.15 W/(m.ºC).

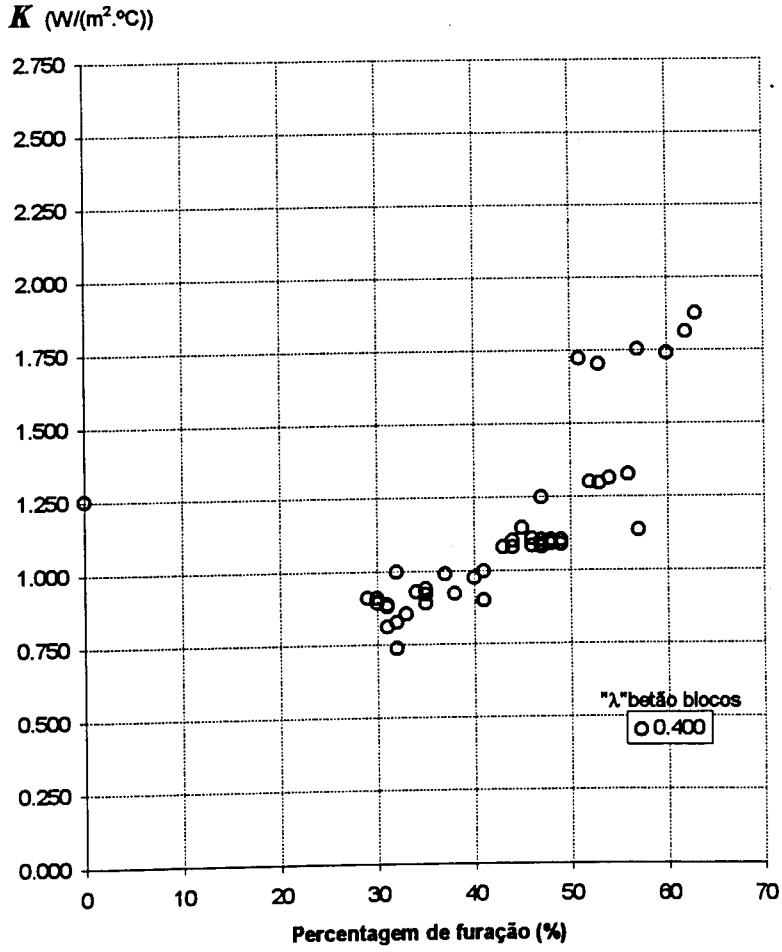


Fig. 8.1 - Coeficiente de transmissão térmica, em função da percentagem de furação, para os resultados de simulação numérica - análise de sensibilidade em 2D, para betão com $\lambda = 0.40$

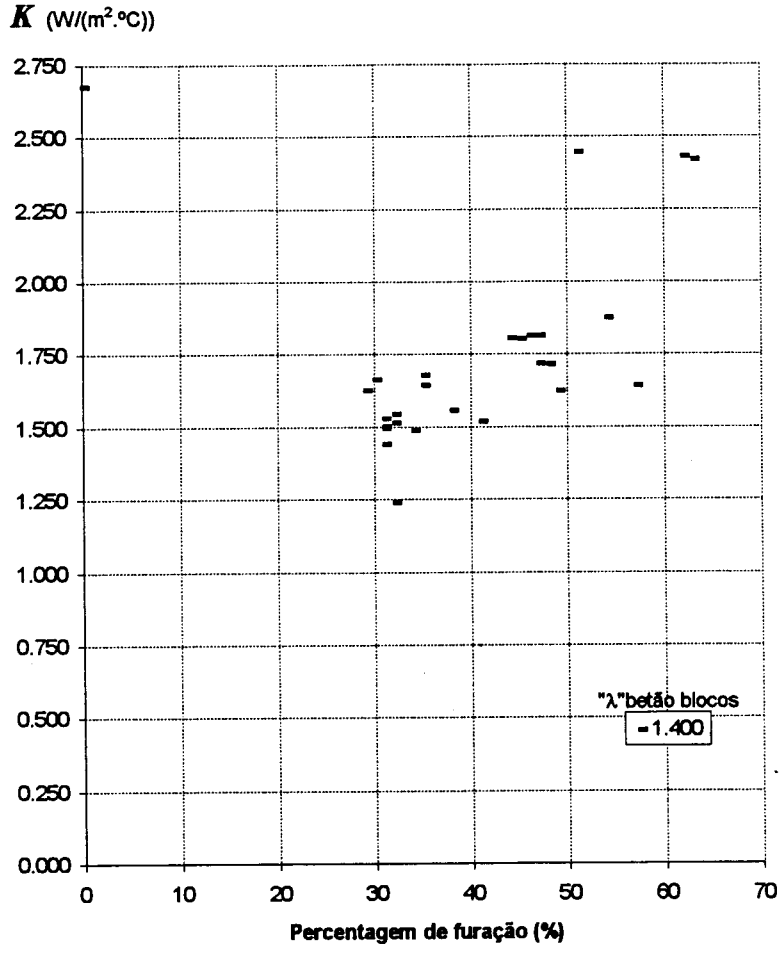


Fig. 8.2 - Coeficiente de transmissão térmica, em função da percentagem de furação, para os resultados de simulação numérica - análise de sensibilidade em 2D, para betão com $\lambda = 1.40$

Da análise das figuras podem retirar-se as seguintes conclusões:

- o coeficiente de transmissão térmica correlaciona-se com a percentagem de furação;
- o K reduz-se à medida que aumenta a percentagem de furação, até um mínimo situado aproximadamente entre 30 e 40%, voltando a aumentar com o crescimento da percentagem de furação;
- a referida correlação é função da condutibilidade térmica do betão, apresentando alguma variabilidade devido ao facto da percentagem de furação poder reflectir diversos aspectos geométricos, nem sempre com o mesmo efeito no K.

Para esclarecer melhor o último aspecto, apresenta-se na fig. 8.3, para as mesmas condutibilidades térmicas do betão constituinte, um gráfico do coeficiente de transmissão de 3 geometrias (6, 13 e 19 - vd. Quadro 6.8), relativamente às quais se simularam variantes (6A, 13A e 19A - vd. Quadro 6.8), com maior percentagem de furação por redução da espessura dos septos.

A análise do gráfico da fig. 8.3 permite concluir:

- o K das 2 séries de geometrias - 6, 13 e 19 - e - 6A, 13A e 19A - diminui com a redução da percentagem de furação dessas geometrias;
- para blocos homólogos, em que o aumento da percentagem de furação se deve exclusivamente à redução da espessura dos septos, o referido aumento tem efeitos diferentes função da condutibilidade térmica do betão constituinte dos blocos. Enquanto para um betão pouco isolante (λ = 1.400 W/(m.ºC)), o bloco variante tem sempre um K menor do que o bloco base, para um betão constituinte de baixa condutibilidade térmica (λ = 0.400 W/(m.ºC)) a tendência é inversa;
- as variações referidas têm pesos diferentes para as diferentes geometrias.

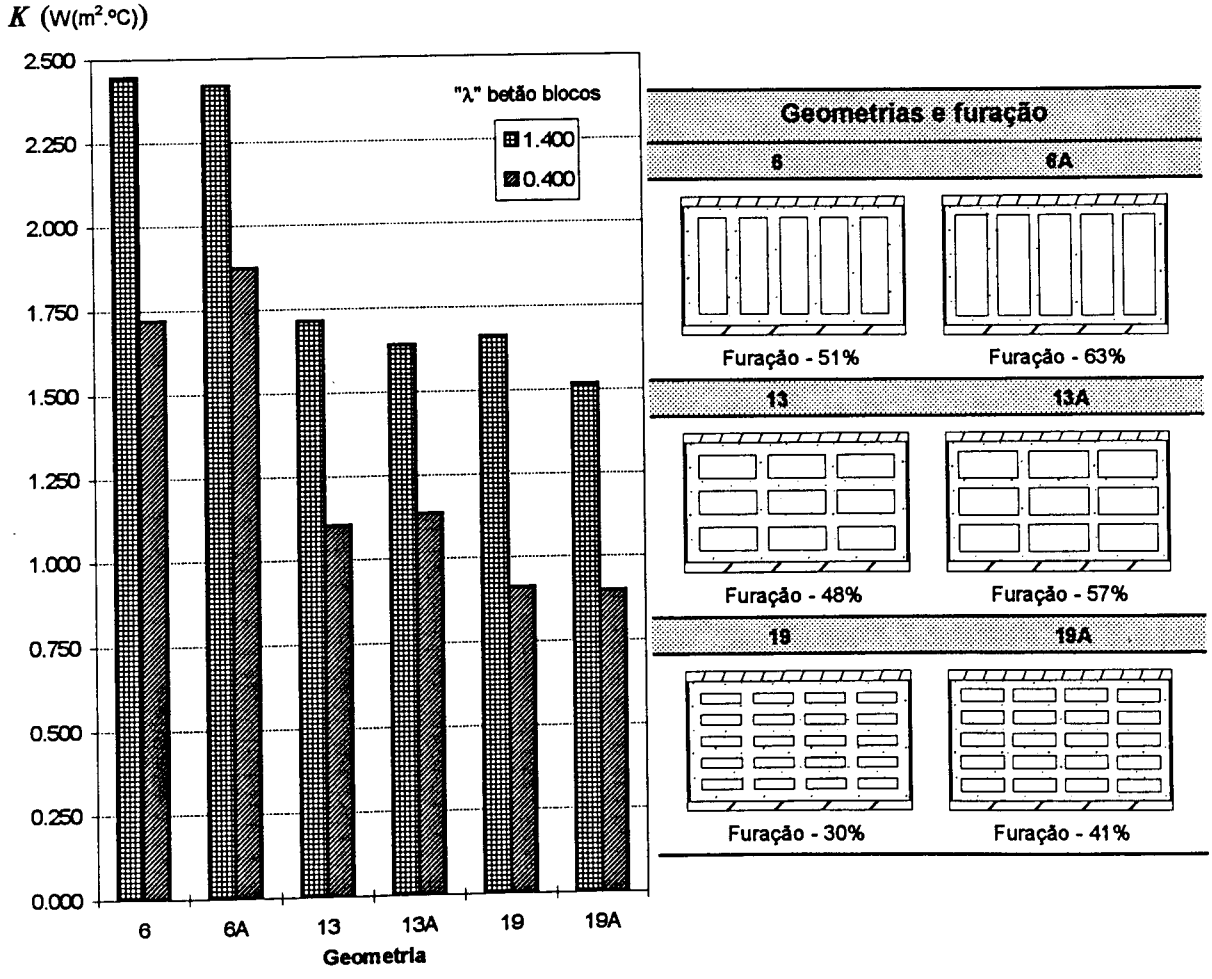


Fig. 8.3 - Coeficiente de transmissão térmica das geometrias 6, 6A, 13, 13A, 19 e 19A, para diferentes condutibilidades térmicas do betão constituinte

8.2.2.3 - Número de fiadas de alvéolos paralelas ao sentido do fluxo

Tendo por base o mesmo universo de resultados da simulação numérica referida em 8.2.2.2, representa-se na fig. 8.4 a variação do K com o número de fiadas de alvéolos paralelas ao fluxo, contidas pelos blocos que realizam as paredes, para o agrupamento de geometrias " A ", em que existe apenas furação paralela ao sentido do fluxo.

A análise da fig. 8.4 indicia claramente a reduzida dependência do K desse parâmetro, sendo evidente que o aumento do número de fiadas de alvéolos paralelos ao fluxo produz poucas alterações no coeficiente de transmissão térmica. Apenas com a passagem de elementos maciços para furados existe alguma variação, embora dependente da condutibilidade térmica do betão constituinte.

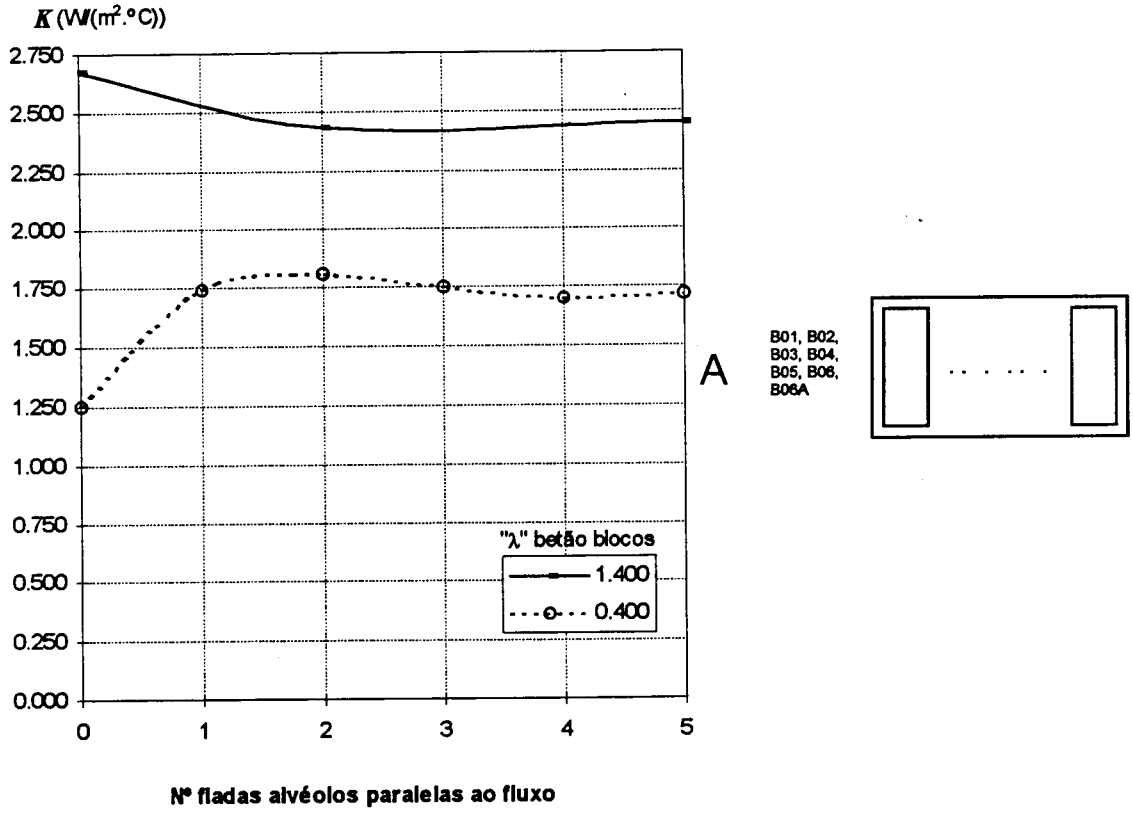


Fig. 8.4 - Coeficiente de transmissão térmica, em função do número de fiadas de alvéolos paralelas ao fluxo, para o agrupamento de geometrias "A" - análise de sensibilidade em 2D

8.2.2.4 - Número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao sentido do fluxo

Para as hipóteses já referidas nos pontos anteriores apresenta-se na fig. 8.5 a variação do K - coeficiente de transmissão térmica - das diferentes soluções de parede, em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, contidas pelos blocos que realizam as paredes. A

análise da figura evidencia uma forte dependência entre os dois parâmetros em apreço. É patente a tendência para o decrescimento de K à medida que o número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo cresce. No entanto o valor absoluto desta redução é variável com a condutibilidade térmica do material constituinte dos blocos. A influência atenua-se à medida que diminui a condutibilidade térmica do betão constituinte.

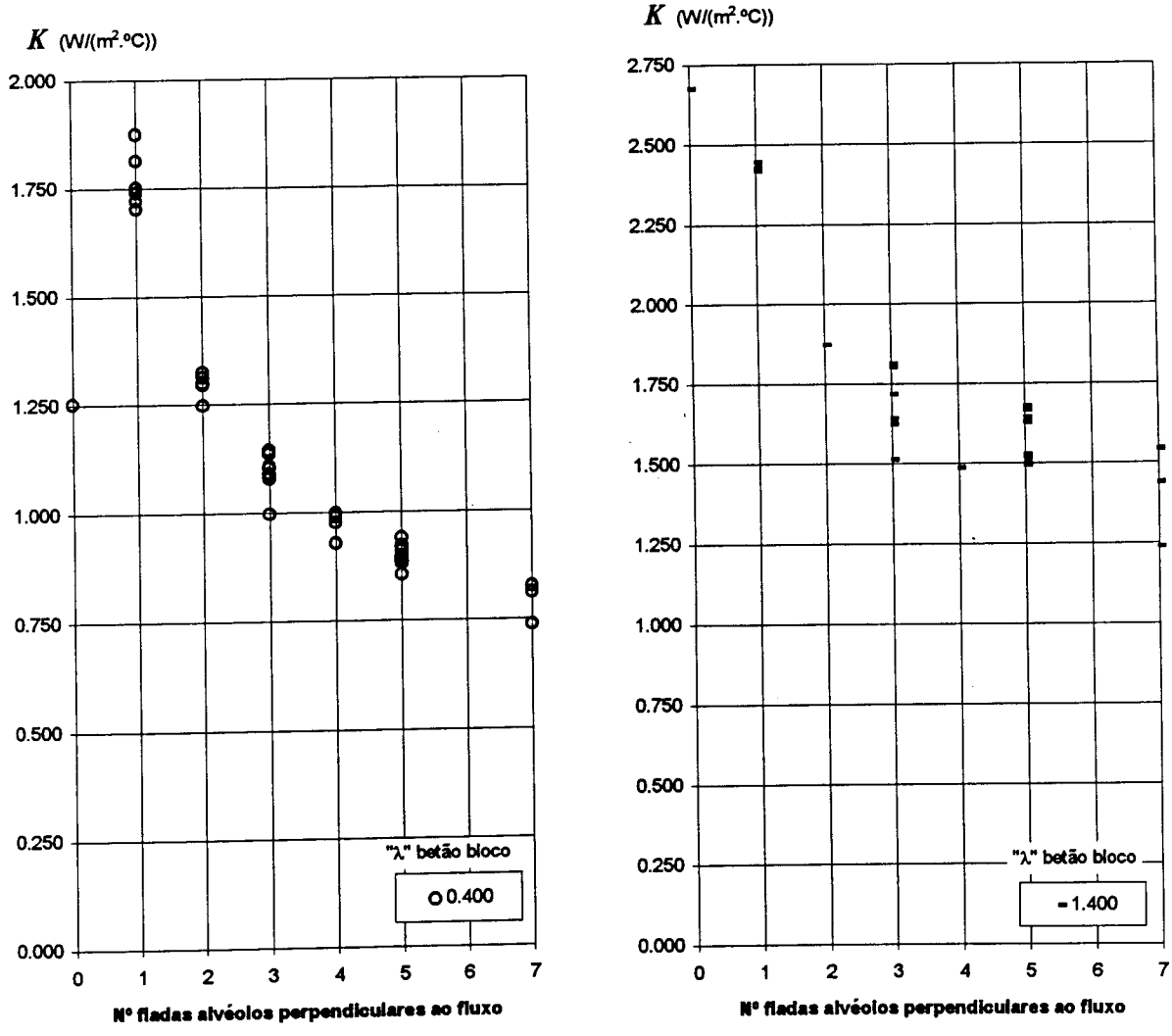


Fig. 8.5 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, para os resultados de simulação numérica - análise de sensibilidade em 2D

O acréscimo de isolamento obtido pelo aumento do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo tem a ver com o isolamento conferido pelos espaços de ar, que é pouco dependente da sua espessura.

No caso dos blocos realizados com betões pouco isolantes, o aumento do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo produz melhorias substanciais no K, enquanto no caso de blocos realizados a partir de betões de baixa condutibilidade térmica essas melhorias são mais reduzidas. Conforme é patente nas figuras, em blocos realizados com betões de baixa condutibilidade térmica, a existência de um número limitado de fiadas de alvéolos, inferior a 3, conduz a soluções de parede menos isolantes do que as realizadas com blocos maciços tendo por base o mesmo betão.

Com efeito, enquanto nos blocos realizados com betões pouco isolantes há sempre interesse na introdução de alvéolos, independentemente da sua geometria e disposição, no caso dos blocos realizados com betões isolantes tal não acontece. No limite, em betões muito isolantes (betão celular autoclavado por exemplo), a maximização do isolamento só é conseguida com blocos maciços. De forma simplista essa avaliação pode ser efectuada pela comparação da condutibilidade térmica equivalente do alvéolo - λ_{equiv} -, com a do material constituinte do bloco (vd. 3.4.5). Sob o ponto de vista de optimização térmica, só há interesse em substituir betão por alvéolos de ar, se a condutibilidade térmica equivalente do alvéolo for inferior à condutibilidade térmica do betão constituinte do bloco. Nas figuras 8.6 a 8.10 apresentam-se gráficos do mesmo tipo, mas apenas relativos aos agrupamentos B, C, D, E e F, que reiteram as conclusões já referidas.

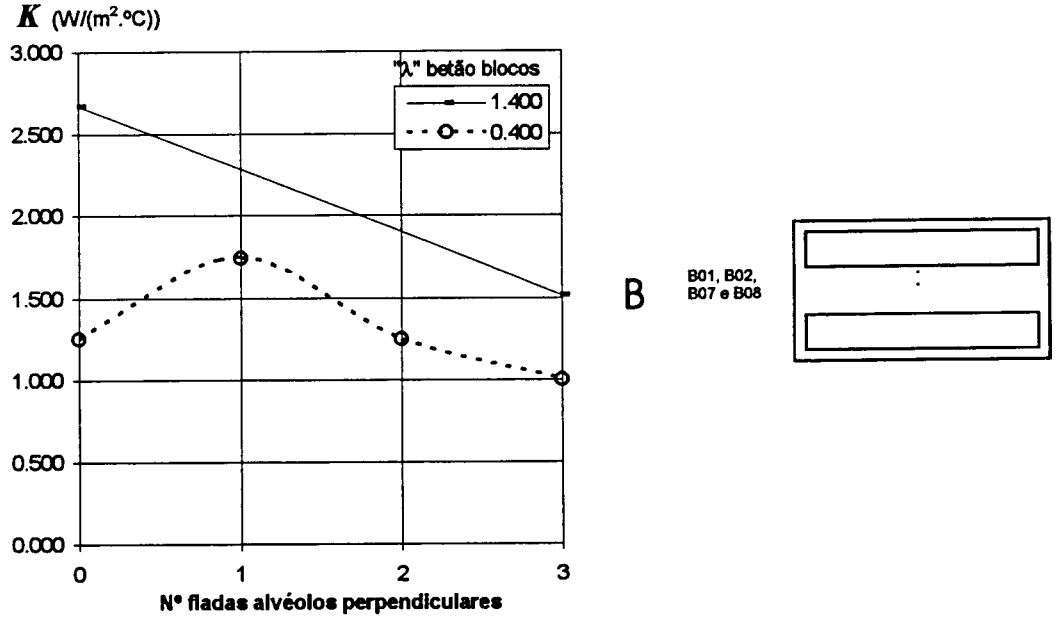


Fig. 8.6 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, para o agrupamento "B" - análise de sensibilidade em 2D

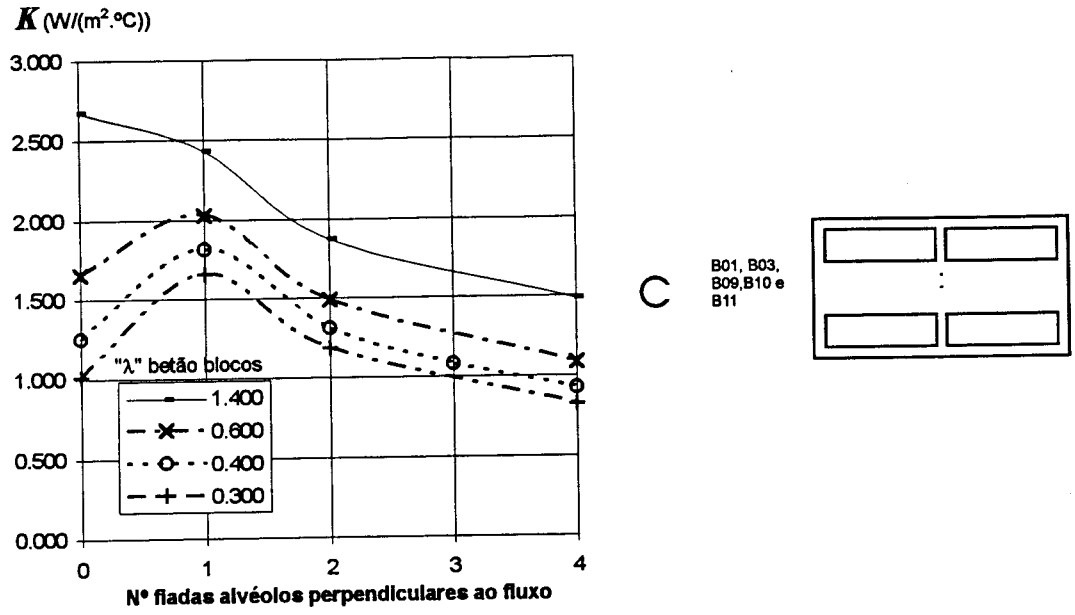


Fig. 8.7 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo para o agrupamento "C" - análise de sensibilidade em 2D

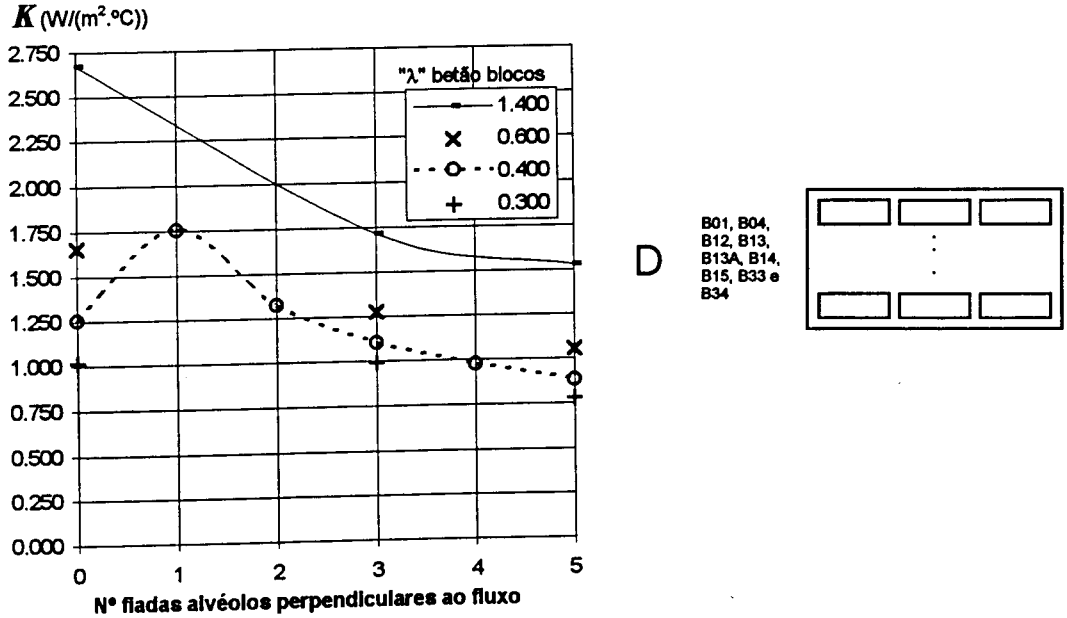


Fig. 8.8 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, para o agrupamento "D" - análise de sensibilidade em 2D

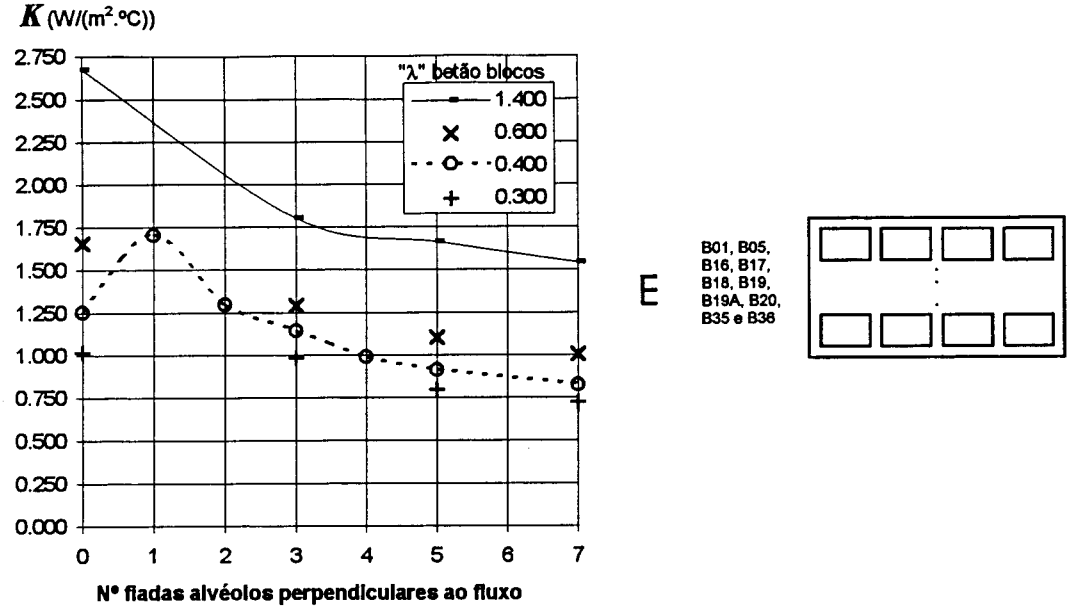


Fig. 8.9 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, para o agrupamento "E" - análise de sensibilidade em 2D

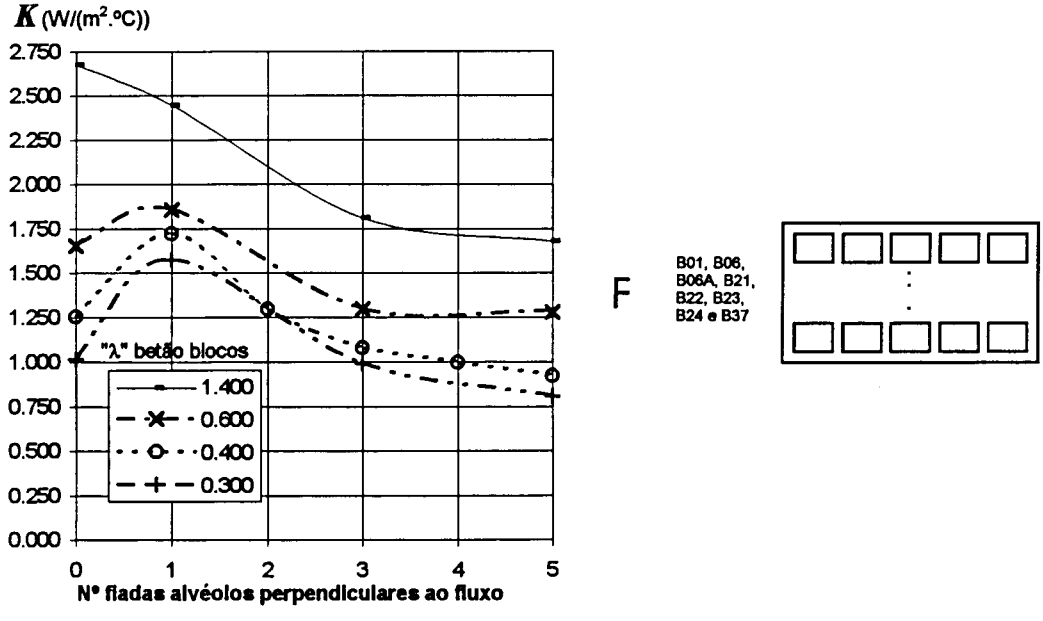


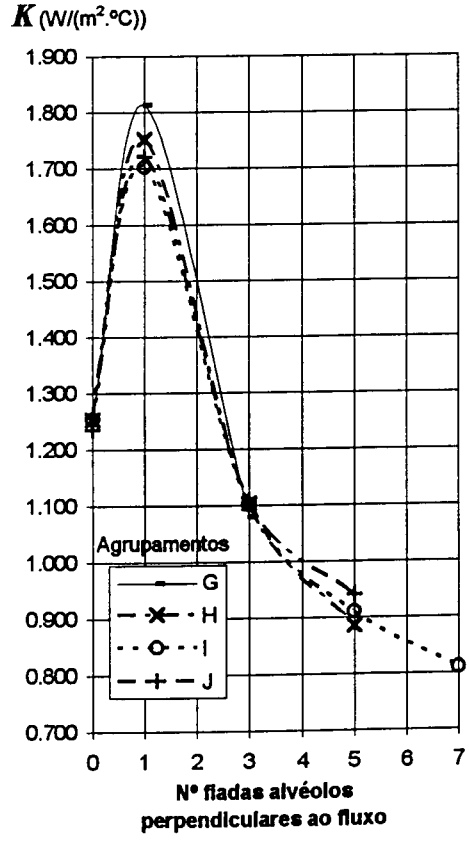
Fig. 8.10 - Coeficiente de transmissão térmica em função do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo para o agrupamento "F" - análise de sensibilidade em 2D

8.2.2.5 - Posição relativa dos alvéolos

Consideraram-se na simulação numérica geometrias com alvéolos em fiadas sucessivas alinhados ou desalinhados. Na fig. 8.11 apresentam-se, para betões com condutibilidades térmicas de 0.4 e 1.4 W/(m.°C), gráficos correlacionando o coeficiente de transmissão térmica da parede com o número de fiadas de alvéolos desalinhados perpendiculares ao fluxo, para 4 agrupamentos de geometrias de blocos - G. H, I, J. Para permitir uma comparação mais objectiva apresenta-se na fig. 8.12 um gráfico representando o quociente entre o K de vários grupos de blocos homólogos, com alvéolos alinhados e desalinhados.

A análise das figuras evidencia que nas geometrias com alvéolos desalinhados, o aumento do número de fiadas de alvéolos produz no coeficiente de transmissão térmica da parede um efeito semelhante ao produzido nas geometrias com alvéolos alinhados. Conforme foi referido em 8.2.2.4 esse efeito é muito dependente da condutibilidade térmica do betão constituinte dos blocos. Constata-se ainda, que o facto da geometria comportar fiadas de alvéolos desalinhados, comparativamente à adopção de fiadas de alvéolos alinhados, tem um efeito no desempenho térmico final da parede pouco sensível.

a) λ = 0.4 W/(m.°C)



b) λ = 1.4 W/(m.°C)

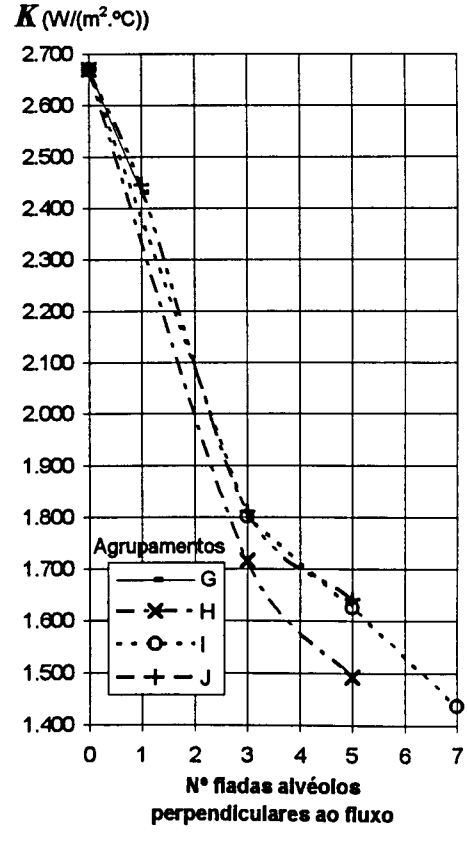


Fig. 8.11 - Coeficiente de transmissão térmica, em função do número de fiadas de alvéolos desalinhadas perpendiculares ao fluxo, para 2 tipos de betões e 4 agrupamentos de geometrias

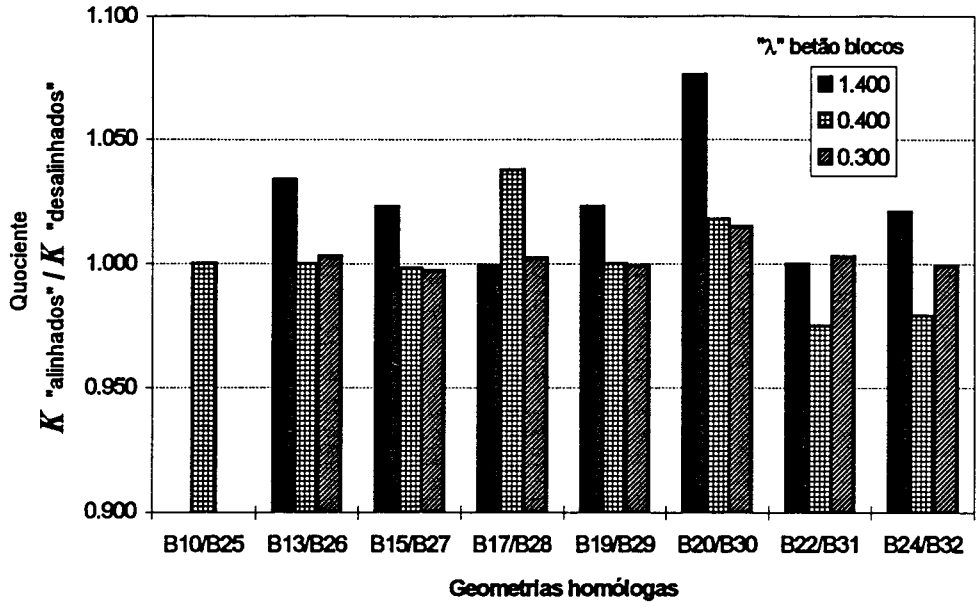


Fig. 8.12 - Quociente entre o coeficiente de transmissão térmica de blocos homólogos, com igual número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo, alinhados ou desalinhadas

8.2.2.6 - Alvéolos de configuração não rectangular

Analisou-se o desempenho térmico de uma parede realizada a partir duma geometria de blocos com alvéolos de configuração não rectangular.

Constata-se que a geometria B43, com alvéolos em losango, apresenta, para betões de baixa condutibilidade térmica, um coeficiente de transmissão térmica da ordem de grandeza do obtido em paredes realizadas a partir de blocos de alvéolos rectangulares, com percentagem de furação próxima. No entanto, no caso de blocos realizados com betões menos isolantes, os blocos com alvéolos em losango têm um desempenho térmico melhor. Este facto deve-se à diminuição do peso relativo da transmissão de calor por radiação nesse tipo de alvéolos.

8.2.2.7 - Influência das juntas horizontais

A consideração do efeito das juntas horizontais de assentamento, bem como do fundo cego do bloco, no coeficiente de transmissão térmica das paredes, só é possível de explicitar na análise de sensibilidade a 3D, conforme foi discutido no Capítulo 6 (vd. 6.4).

A consideração das referidas juntas horizontais de argamassa corrente, com espessura de 10 mm, bem como a existência dum fundo cego de 10 mm nos blocos, tiveram os seguintes efeitos no K - coeficiente de transmissão térmica das paredes:

- no caso de blocos de betão realizados a partir de betões com condutibilidades térmicas de 0.40 W/(m.ºC), conduziu a um agravamento do K de cerca de 12.5%;
- no caso de blocos de betão realizados a partir de betões com condutibilidades térmicas de 1.40 W/(m.ºC), esse agravamento foi de cerca de 9%;

8.2.2.8 - Condutibilidade térmica dos constituintes

Discute-se de seguida a influência da condutibilidade térmica de diversos constituintes da alvenaria, no coeficiente de transmissão térmica das paredes, à luz da análise de sensibilidade efectuada.

a) **Betão dos blocos**

Sintetizam-se no Quadro 8.1 relações médias entre o coeficiente de transmissão térmica de paredes realizadas com blocos geometricamente iguais, efectuados com betões de condutibilidade térmicas diferentes.

Quadro 8.1 - Relação entre o coeficiente de transmissão térmica de paredes tendo por base blocos com a mesma geometria, realizados com betões de condutibilidade térmica diferente

Relação entre coef. trans. térmica	Relação entre a condutibilidade térmica dos betões constituintes dos blocos			
	0.30/0.40	0.45/0.40	0.60/0.40	1.40/0.40
Nº Geometrias consideradas	21	10	22	22
Média	0.88	1.06	1.18	1.60
Máxima	0.91	1.21	1.32	2.13
	(B03)	(B24)	(B01)	(B01)
Mínima	0.81	1.01	1.08	1.34
	(B01)	(B30)	(B06)	(B03)
Coef. var. (%)	2.8	4.6	5.1	10.6

A figura 8.13 sintetiza sob a forma gráfica, a influência da condutibilidade térmica do betão no coeficiente de transmissão térmica de paredes de blocos geometricamente iguais, realizadas com betões diferentes.

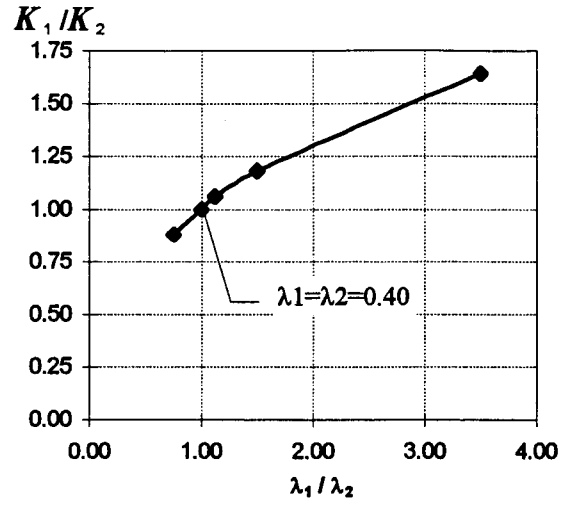


Fig. 8.13 - Relações médias entre coeficientes de transmissão térmica de blocos iguais (K_1/K_2), realizados com betões de condutibilidades térmicas diferentes (λ_1 / λ_2)

b) **Juntas verticais de assentamento**

A partir da análise de sensibilidade efectuada a 2D, pode-se afirmar que a substituição da argamassa de assentamento corrente das juntas verticais, com condutibilidade térmica de 1.15 W/(m.ºC) por uma argamassa mais isolante, com condutibilidade térmica de 0.70 W/(m.ºC), teve os seguintes efeitos:

- no caso de paredes realizadas a partir de blocos de betão incorporando inertes leves, condutibilidade térmica 0.40 W/(m.ºC), reduziu o coeficiente de transmissão térmica aproximadamente de 2.5%;
- no caso de paredes realizadas a partir de blocos de betão de inertes correntes, condutibilidade térmica 1.4 W/(m.ºC), essa redução atingiu 10%.

c) **Reboco**

A análise de sensibilidade efectuada a 2D permite afirmar que a substituição da argamassa de reboco corrente, com condutibilidade térmica de 1.15 W/(m.ºC), por uma argamassa mais isolante, com condutibilidade térmica de 0.70 W/(m.ºC), produziu os seguintes efeitos:

- no caso de paredes realizadas a partir de blocos de betão incorporando inertes leves, condutibilidade térmica 0.40 W/(m.ºC), reduziu o coeficiente de transmissão térmica em cerca de 2%;

- no caso de paredes realizadas a partir de blocos de betão de inertes correntes, condutibilidade térmica 1.40 W/(m.°C), essa redução foi de 5%.

d) **Conjunto argamassa de assentamento e reboco**

A consideração, por recurso à simulação em 3D, do efeito conjugado da redução da condutibilidade térmica das argamassas de assentamento e reboco, passando de 1.15 W/(m.°C) para 0.70 W/(m.°C), produziu uma redução de 5% no coeficiente de transmissão térmica de paredes realizadas a partir de blocos de betão incorporando inertes leves, (condutibilidade térmica 0.40 W/(m.°C)).

8.2.2.9 - Preenchimento das juntas verticais

A análise de sensibilidade em 2D evidencia que a supressão das juntas verticais de argamassa e a sua substituição por um espaço de ar, com espessura aproximada de 10 mm e comprimento idêntico à espessura do bloco, manteve praticamente inalterado o coeficiente de transmissão térmica da parede. A existência deste espaço de ar resulta dos desvios dimensionais e da rugosidade das faces de topo dos elementos, que impedem o seu ajuste perfeito.

8.2.2.10 - Existência de juntas descontínuas

A análise do efeito da adopção de juntas de assentamento descontínuas no coeficiente de transmissão térmica da parede foi efectuada apenas em 2D, correspondendo à descontinuidade das juntas verticais.

A existência dessa descontinuidade produziu uma redução de cerca de 3.5% no coeficiente de transmissão térmica da parede, no caso de blocos de betão de inertes leves, com condutibilidade térmica 0.40 W/(m.°C). No caso de blocos de betão de inertes correntes, condutibilidade térmica 1.4 W/(m.°C), essa redução foi de cerca de 9%.

Crê-se que a consideração da referida descontinuidade também nas juntas horizontais, bem como a inexistência nessa zona de fundo cego, acentuaria as reduções obtidas na análise em 2D. Esta conclusão será possível de formular a partir da análise dos resultados da simulação dos blocos reais.

8.2.2.11 - Juntas horizontais delgadas

Na simulação a 3D analisou-se o efeito da adopção de juntas horizontais de assentamento delgadas no coeficiente de transmissão térmica. Admitiram-se juntas com espessura de 3 mm, conjuntamente com fundos cegos dos blocos de 5 mm, comparativamente à realização de juntas correntes com 10 mm de espessura e fundos de 10 mm. As reduções no K sintetizam-se no Quadro 8.2

Quadro 8.2 - Redução do K de paredes de alvenaria, por adopção de juntas horizontais delgadas, comparativamente a juntas correntes

Redução do Coeficiente de Transmissão Térmica das Paredes (%)				
GEOMETRIAS	Condutibilidade térmica do betão constituinte dos blocos (W/(m.ºC))			
	0.40			1.40
	Condutibilidade térmica das argamassas de assentamento e reboco (W/(m.ºC))			
	1.15	0.70	0.70/1.15 (1)	1.15
B01	3.8	1.8	9.0	- 0.3
B08	7.1	4.0	12.6	5.6
B11	8.2	5.0	13.8	5.4
B15	8.9	5.6	14.6	5.4
B24	8.1	5.0	13.8	3.8

(1) A condutibilidade térmica das argamassas de assentamento e reboco na solução de juntas correntes é de 1.15 W/(m.ºC), enquanto na solução de juntas coladas é de 0.70 W/(m.ºC)

Da análise dos valores apresentados no Quadro 8.2 constata-se que a adopção de juntas de assentamento delgadas pode conduzir a reduções não desprezáveis do coeficiente de transmissão térmica das paredes. Com efeito, as juntas horizontais de assentamento constituem pontes térmicas cujo efeito é minorado no caso das juntas de assentamento delgadas.

8.2.2.12 - Emissividade das superfícies dos alvéolos

Analisou-se em 3 geometrias a influência da redução de emissividade da superfície dos alvéolos, no coeficiente de transmissão térmica de paredes realizadas com blocos de betão de condutibilidade térmica 0.40 W/(m^2.ºC), por simulação a 2D. Sintetizam-se no Quadro 8.3 as reduções obtidas.

Constata-se que a redução de emissividade da superfície dos alvéolos produz melhorias do coeficiente de transmissão térmica das paredes com significado, e crescentes à medida que o bloco é mais isolante.

Quadro 8.3 - Redução do K de paredes de alvenaria por alteração da emissividade da superfície dos alvéolos

Geometria	Redução do coeficiente de transmissão térmica (1) (%)
B06	12.3
B15	17.8
B27	18.5

(1) Condutibilidade térmica do betão dos blocos de 0.40 W/(m².ºC) e das argamassas de assentamento e reboco de 1.15 W/(m.ºC)

8.2.2.13 - Preenchimento total dos alvéolos com isolante térmico

Analisou-se em 4 geometrias, por simulação em 2D, a influência no coeficiente de transmissão térmica da parede, do preenchimento da totalidade dos alvéolos com um isolante térmico de condutibilidade térmica 0.04 W/(m.ºC). No Quadro 8.4 sintetizam-se as reduções obtidas.

Quadro 8.4 - Redução do K de paredes de alvenaria, por preenchimento total dos alvéolos com isolante térmico

Redução do coeficiente de transmissão térmica das paredes (1) (%)		
	Condutibilidade térmica do betão constituinte dos blocos (W/(m.ºC))	
Geometria	0.40	1.40
B08	46.2	40.8
B15	28.5	17.0
B27	30.1	-
B29	25.7	14.8

(1) Condutibilidade térmica do isolante térmico de 0.04 W/(m.ºC) e das argamassas de assentamento e reboco de 1.15 W/(m.ºC)

Verifica-se que o preenchimento total dos alvéolos com um isolante, a incorporar em fábrica, pode ter um contributo importante para a redução do coeficiente de transmissão térmica das paredes, embora variável com a configuração geométrica dos blocos.

8.2.3 - Geometrias reais - Simulação numérica

Apresenta-se seguidamente uma síntese das conclusões mais relevantes que se podem retirar dos resultados obtidos relativamente à simulação de 3 geometrias reais produzidas pela *PAVILECA*, com espessuras de 200, 250 e 300 mm, e da geometria *melhorada* de 250 mm de espessura (vd. 6.6).

a) **Comparação entre o desempenho térmico das diferentes soluções**

Sintetiza-se no Quadro 8.5 a informação mais importante relativa às 4 geometrias caracterizadas por simulação numérica a 2D.

A análise do Quadro 8.5 evidencia o melhor comportamento térmico do bloco *melhorado*, comparativamente às outras geometrias. Constata-se que, sob o ponto de vista térmico, os blocos correntes estão pouco optimizados, particularmente os blocos mais espessos, em que o crescimento da espessura teve poucas repercussões na redução do coeficiente de transmissão térmica.

Quadro 8.5 - Síntese de aspectos relevantes relativos às geometrias reais simuladas

Geometria	Características Geométricas		Coeficiente de Transmissão Térmica - Simulação 2D- (1) (W/(m².ºC))			
	Espessura	Percentagem furação	Condutibilidade térmica betão constituinte dos blocos (W/(m.ºC))			
	(m)	(%)	0.30	0.40	0.60	1.40
500 x 200 x 200	195	34.2	1.052	1.182	1.396	1.914
500 x 200 x 250	245	41.5	0.980	1.100	1.281	1.914
500 x 200 x 300	295	51.0	0.926	1.034	1.198	1.618
500 x 200 x 250 *melhorado*	250	39.4	0.778	0.884	1.048	1.484

(1) Condutibilidade térmica das argamassas de assentamento e reboco de 1.15 W/(m.ºC)

b) **Influência das juntas horizontais correntes**

Sintetiza-se no Quadro 8.6 o agravamento do coeficiente de transmissão térmica das paredes devido à consideração das juntas horizontais correntes de assentamento, bem como do fundo cego. Este agravamento é apenas explicitável através da simulação em 3D, quando comparada com os resultados obtidos na simulação em 2D onde não é possível incluir as juntas horizontais.

Quadro 8.6 - Agravamento do K de paredes realizadas com blocos de geometrias reais, por consideração das juntas horizontais correntes de assentamento

Agravamento do Coeficiente de Transmissão Térmica (%)			
Geometria	Condutibilidade térmica do betão constituinte dos blocos (W/(m.ºC))		
	0.40		1.4
	Condutibilidade térmica das argamassas de assentamento e reboco (W/(m.ºC))		
	1.15	0.70	1.15
500 x 200 x 200	10.5	6.6	8.2
500 x 200 x 250 *melhorado*	10.8	6.4	7.8

Constata-se que o agravamento é menor do que o verificado na análise de sensibilidade, devido ao facto das juntas de assentamento serem descontínuas.

c) **Influência das juntas horizontais delgadas**

Analisou-se o efeito da adopção de juntas de assentamento delgadas na realização das paredes. Sintetiza-se no Quadro 8.7 a redução do coeficiente de transmissão térmica das paredes respectivas. As reduções conseguidas são da ordem de grandeza das referidas em 8.2.2.11 para a análise de sensibilidade.

Quadro 8.7 - Redução do K de paredes realizadas com blocos de geometrias reais, por adopção de juntas horizontais delgadas, comparativamente a juntas correntes

Redução do Coeficiente de Transmissão Térmica (%)				
GEOMETRIAS	Condutibilidade térmica do betão constituinte dos blocos (W/(m.ºC))			
	0.40			1.40
	Condutibilidade térmica das argamassas de assentamento e reboco (W/(m.ºC))			
	1.15	0.70	0.70/1.15 (1)	1.15
500 x 200 x 200	3.9	2.1	7.4	1.2
500 x 200 x 250 *melhorado*	6.1	3.8	10.2	3.4

(1) A condutibilidade térmica das argamassas de assentamento e reboco na solução de juntas correntes é de 1.15 W/(m.ºC), enquanto na solução de juntas coladas é de 0.70 W/(m.ºC)

8.3 - COMPORTAMENTO MECÂNICO

8.3.1 - Materiais Constituintes

8.3.1.1 - Blocos de Betão

Tomando como referência os critérios definidos na normalização *CEN* relativa a blocos de betão de inertes leves de argila expandida, já discutidos em 5.8.2.3, as exigências sob o ponto de vista mecânico são as que se sintetizam no Quadro 8.8.

Os blocos de betão ensaiados apresentaram as características resistentes que se sintetizam no Quadro 8.9. Constata-se que as resistências à compressão dos elementos utilizados são baixas. Outras caracterizações dos mesmos elementos, particularmente os usados nos ensaios térmicos, apontam para valores da mesma ordem de grandeza. Estes valores situam-se no limiar inferior das resistências exigidas pela normalização de referência *CEN*, sendo esta normativa menos exigente que outra referida em 5.8.2.3.

Quadro 8.8 - Exigências mecânicas relativas a blocos de betão de inertes leves segundo normativa *CEN*

CRITÉRIO	EXPRESSÃO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NORMALIZADA f_b (1) (MPa)
pr EN 771.3 [118]	Valor mínimo para amostra de 10 blocos de betão, ou 6 se coef. var. ≤ 15%	1.8
	Valor médio da mesma amostra	1.25 x 1.80 = 2.3
EC 6 [96]	Valor mínimo	2.0

(1) - Resistência convertida para as condições de seco ao ar e "factor de forma" normalizado.

A caracterização do betão usado no fabrico destes blocos, descrita no Capítulo 5, apontava já para resistências à compressão relativamente baixas, atendendo à massa volúmica apresentada pelo betão.

Pensa-se que para a baixa resistência mecânica destes betões, e concomitantemente dos blocos realizados com os mesmos, contribui, para além da reduzida dosagem de cimento, sobretudo a baixa resistência mecânica dos inertes leves de argila expandida.

Quadro 8.9 - Resistência à compressão dos blocos ensaiados

GEOMETRIA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO f_b'		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NORMALIZADA (1) f_b	
	Média (MPa)	**Mínima** (MPa)	**Média** (MPa)	**Mínima** (MPa)
500 x 200 x 250 corrente	1.73	1.49	1.90	1.64
500 x 200 x 250 *melhorado*	2.04	1.72	2.24	1.89

(1) valores obtidos a partir da resistência à compressão não corrigida, afectada do factor corrector "δ" associado ao factor de forma (vd. 4.4.2).

As dispersões encontradas não são muito acentuadas. No entanto atendendo a que se trata de uma produção industrial e de uma amostra objecto de uma escolha prévia, poderiam ser mais reduzidas.

Relativamente à comparação entre a resistência à compressão dos 2 tipos de geometrias, verifica-se que embora as resistências sejam igualmente baixas, o bloco *melhorado* apresentou resistências à compressão um pouco superiores (cerca de 15%), apesar do aumento da quantidade de betão constituinte do mesmo ter sido apenas de cerca de 5%.

As configurações de rotura observadas são análogas para os dois tipos de blocos e correspondem a duas situações típicas : esmagamento localizado junto aos topos dos blocos, ou rotura com fissuras horizontais longitudinais nas faces exteriores.

8.3.1.2 - Argamassa base

A argamassa base utilizada foi realizada com um pré-doseamento ponderal, para apresentar menor variabilidade, mas procurando corresponder a uma argamassa de traço volumétrico 1:4. Esta argamassa, conservada em água, apresentou uma resistência média à compressão de 6.8 MPa.
De acordo com a norma inglesa BS 5628: Part 1 [109] a composição adoptada permitiria integrar a argamassa no tipo II, cuja resistência à compressão se deverá situar entre 6.5 e 4.5 MPa, o que é verificado neste caso. Em termos de normalização *CEN* [123] (vd. Quadro 7.13), a resistência apresentada pela argamassa permite enquadrá-la na classe resistente M5. De acordo com o EC 6 uma argamassa da classe M5 pode ser usada em qualquer tipo de alvenaria resistente.

Sublinha-se que se encontraram disparidades importantes entre as resistências das argamassas de assentamento dos provetes usados na caracterização térmica e mecânica, apesar de aparentemente

realizadas com o mesmo traço. As primeiras apresentaram resistências nitidamente superiores. Este facto não é de estranhar e tem sido aliás sublinhado por outros autores [136], pois na resistência da argamassa influem muitos factores para além do traço, que apenas dá uma indicação grosseira da resistência à compressão.

As discrepâncias observadas deverão radicar-se sobretudo nos seguintes aspectos:

- o doseamento dos constituintes das argamassas usadas na caracterização mecânica foi mais cuidado;
- os inertes utilizadas nos dois tipos de argamassa foram diferentes. Nos provetes para ensaios térmicos usou-se uma areia do rio lavada da zona de Lisboa, mas com partículas argilosas. Nos provetes para ensaios mecânicos usou-se uma areia de duna corrente na zona de Aveiro, com origem mineralógica diferente, granulometria mais fechada e mais fina.

8.3.1.3 - Argamassa-cola

Conforme já foi referido a argamassa-cola utilizada não foi objecto de qualquer caracterização, dado tratar-se de um produto pré-doseado, objecto de ensaios de identificação recentes efectuados no *LNEC* no âmbito do DH 383. Com carácter informativo transcreve-se no Quadro 8.10 as características mais relevantes da argamassa, de acordo com o DH 383 [198]

Quadro 8.10 - Características principais da argamassa-cola YTONG, segundo DH 383 [198]

CARACTERÍSTICAS	CURA	
	20 °C e 90% HR	20 °C e 50% HR
Massa volúmica (kg/m³)	1475	1200
Tensão de rotura à compressão (MPa)	4.8	5.3
Tensão de rotura à tracção por flexão (MPa)	1.7	1.9

De acordo com o critério do EC 6 esta argamassa enquadrar-se-ia aproximadamente na classe resistente M5, podendo ser usada em alvenarias resistentes.

8.3.2 - Análise dos resultados dos ensaios de compressão normal

8.3.2.1 - Relação entre a resistência dos provetes e os seus constituintes

Conforme foi discutido de forma detalhada no Capítulo 4, a generalidade dos modelos de comportamento das alvenarias procuram correlacionar a resistência mecânica das alvenarias à compressão, com a dos seus constituintes principais - elementos e argamassa. Essa abordagem é também referida no EC 6 que se tem tomado como referência.

Apresenta-se no Quadro 8.11 a síntese dos resultados obtidos experimentalmente, relativos aos elementos, argamassa e alvenaria.

Quadro 8.11 - Síntese de resultados experimentais relativos à alvenaria e seus constituintes

GEOMETRIA	SÉRIE DE ENSAIO	CARACTERÍSTICAS RESISTENTES (MPa)						f_k/f_b
		Elementos		Argamassa	Alvenaria			
		f_b'	f_b	f_m	f	f_k	E	
A	I	1.73	1.90	6.8	2.1	1.8	5460	0.95
	II *	1.73	1.90	5.0	2.2	1.8	5900	0.95
	III **	1.73	1.90	6.8	2.0	1.7	6590	0.90
	IV ***	1.73	1.90	6.8	2.3	1.9	5900	1.00
B	I	2.04	2.24	6.8	2.1	1.8	5380	0.80
	II *	2.04	2.24	5.0	2.2	1.8	5780	0.80
	III **	2.04	2.24	6.8	2.1	1.8	5160	0.80
	IV ***	2.04	2.24	6.8	2.3	2.0	5950	0.90

* - Provete de alvenaria realizado com argamassa-cola

** - Aparelho do provete de alvenaria diferente da série de referência

*** - Provete de alvenaria apenas com 3 fiadas

Dos resultados apresentados é possível retirar as seguintes conclusões:

- os elementos ensaiados apresentam resistências à compressão bastantes baixas;
- conforme é referido na generalidade dos modelos de comportamento, verificou-se que a resistência característica das alvenarias à compressão simples é inferior à resistência dos

elementos que a constituem, embora pouco inferior, sobretudo na geometria A, em que a relação f_k/f_b é próxima de 0.95;

- apesar do elemento - B - bloco 500 x 200 x 250 *melhorado* apresentar, quando isolado, melhores características resistentes do que o elemento - A - bloco 500 x 200 x 250 corrente, as alvenarias realizadas com os dois tipos de blocos apresentam resistências muito próximas;
- apesar da argamassa-cola ser mecanicamente menos resistente do que a argamassa corrente utilizada, a resistência à compressão dos provetes realizados com argamassa-cola foi superior à dos seus homólogos realizados com argamassa corrente, na linha do referido no Capítulo 4;
- nas duas geometrias, a série IV, correspondente a um provete apenas de 3 fiadas, apresentou sempre resistências mais elevadas;
- o módulo de elasticidade encontrado para a generalidade dos provetes variou pouco, e situa-se próximo de valores referidos em caracterizações efectuadas com blocos mais resistentes .

Em face do exposto pensa-se que:

- O facto de no ensaio dos elementos isolados, não se ter em conta que os mesmos se destinam a serem aplicados com rotura de junta de assentamento, faz com que a relação f_k/f_b venha aumentada. Com efeito, se os blocos tivessem sido regularizados apenas na zona destinada a aplicação de argamassa, provavelmente a sua resistência seria ainda menor.

- O menor aproveitamento da capacidade resistente dos blocos de geometria B, quando comparada com os da geometria A, pode radicar-se no facto de nos blocos "melhorados" a rotura de junta se localizar de forma excêntrica e a espessura dos septos ser menor do que a dos blocos correntes. Estes factores poderão contribuir para o aumento das tensões nos septos transversais e criar algumas excentricidades na transmissão de esforços entre fiadas.

8.3.2.2 - Comparação entre os resultados experimentais e a determinação através das expressões do EC 6

Apresenta-se no Quadro 8.12 a síntese das características da alvenaria obtidos a partir das relações empíricas constantes do EC 6, que relacionam a resistência característica da alvenaria à compressão, com a resistência dos elementos e da argamassa.

Quadro 8.12 - Síntese das características das alvenarias obtidas a partir da resistência dos elementos e da argamassa, por recurso às expressões do EC 6

ELEMENTO			ARGAMASSA		ALVENARIA			
Geometria	Grupo (1)	Resistência normalizada f_b (MPa)	Tipo	Resistência normalizada f_m (MPa)	Expressão de cálculo (2)	Resistência característica f_k (MPa)	Módulo de elasticidade E (MPa)	f_k/f_b
A	2A	1.90	Corrente	6.8	**4.5 sem restrições**	1.4	1400	0.75
					4.5 com restrições	1.0	1000	0.50
	2A	1.90	Cola	5.0	**4.7 sem restrições**	1.4	1400	0.75
					4.7 com restrições	1.1	1100	0.60
B	2A	2.24	Corrente	6.8	**4.5 sem restrições**	1.5	1500	0.65
					4.5 com restrições	1.1	1100	0.50
	2A	2.24	Cola	5.0	**4.7 sem restrições**	1.5	1500	0.65
					4.7 com restrições	1.2	1200	0.55

(1) Classificação do EC6 em termos de geometria e furação (vd. Quadro 4.2)

(2) Expressão **4.5** - $f_k = K f_b^{\,0.65} f_m^{\,0.25}$ (MPa) Restrições $f_m \leq$ min (20 MPa, f_b)

Expressão **4.7** - $f_k = K f_b^{\,0.65}$ (MPa) Restrições $f_b \leq 15$ MPa

Por último, nas fig. 8.14 e 8.15 sintetiza-se em gráficos de barras a comparação entre a resistência característica da alvenaria obtida por via experimental, ou por recurso às expressões numéricas do EC6.

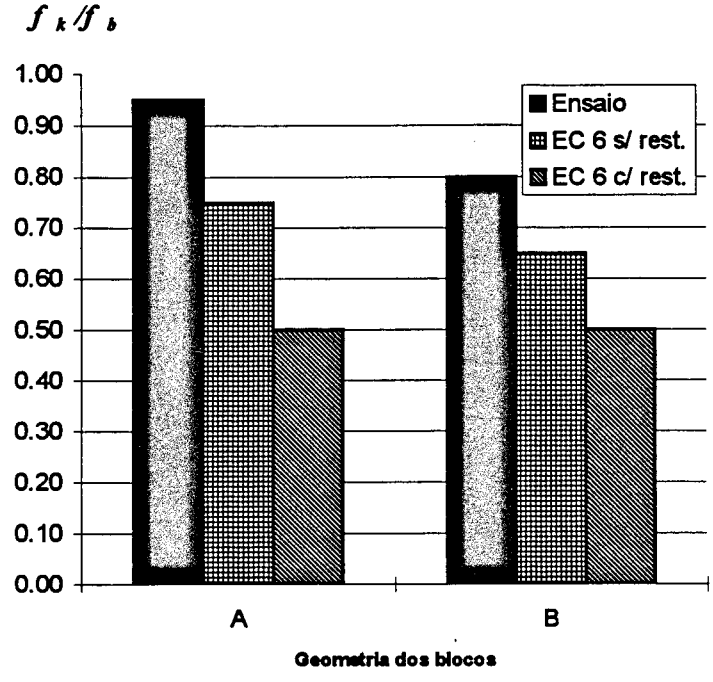


Fig. 8.14 - Comparação entre a resistência característica das alvenarias realizadas com argamassa corrente, obtida por via experimental ou através do EC6

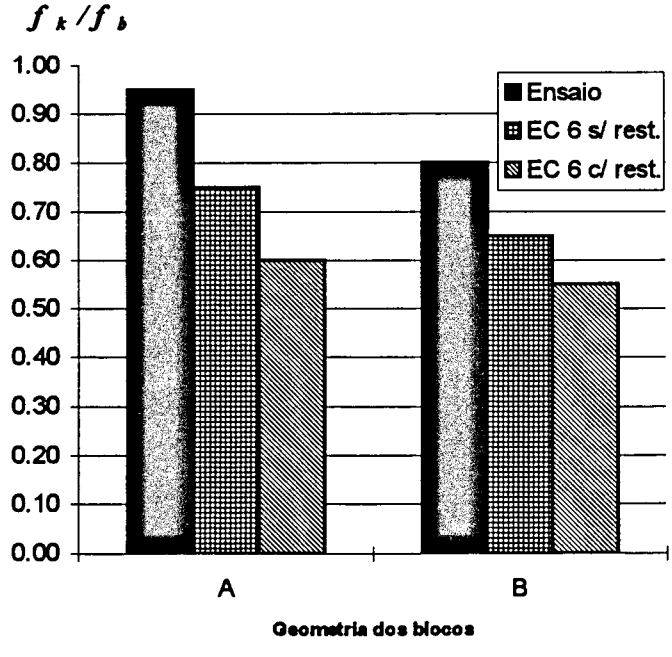


Fig. 8.15 - Comparação entre a resistência característica das alvenarias realizadas com argamassa-cola, obtida por via experimental ou através do EC6

Os aspectos mais relevantes patenteados pela análise comparativa são:

- para este tipo de elemento, as expressões propostas pelo EC 6 conduzem a resistências características da alvenaria à compressão bastante inferiores às obtidas experimentalmente, a diferença é maior no caso da geometria A;
- a adopção dos limites constantes das expressões do EC 6 e que visam, em nosso entender, eliminar algumas descontinuidades das expressões empíricas, acentuam ainda mais a diferença entre os resultados.
- no caso do módulo de elasticidade, o desajuste entre os valores obtidos experimentalmente e por recurso às expressões é ainda maior.

Em face do exposto pensa-se que:

- as expressões propostas no EC 6 resultaram do tratamento estatístico dum conjunto muito vasto de dados, (vd. 4.3.4) em que praticamente não existiam elementos com resistências inferiores a 2.5 MPa;
- a utilização de elementos de reduzida resistência, assentes com argamassas que, embora correntes, apresentam resistências muito superiores às destes, poderá conduzir a alvenarias cujas resistências e módulos de elasticidade não sejam adequadamente avaliados pelas expressões propostas pelo EC 6.

8.3.2.3 - Avaliação da influência dos parâmetros analisados

Aborda-se seguidamente, à luz dos resultados obtidos, a influência de cada um dos parâmetros tidos em conta no planeamento de trabalhos.

a) **Características dos blocos**

Entre as características das alvenarias com repercussões no comportamento mecânico, sobressai a resistência à compressão dos blocos.
Apesar da resistência do betão constituinte dos blocos ser reduzida, tentou-se desenvolver um bloco - 500 x 200 x 250 *melhorado* - que, com uma quantidade de betão próxima da do bloco corrente de espessura análoga, apresentasse maior resistência à compressão. Sublinha-se que complementarmente o referido bloco *melhorado* tem o seu desempenho aumentado sob outros pontos de vista, particularmente térmico.

Apesar do bloco *melhorado* apresentar, em média, uma resistência à compressão superior em cerca de 15% ao bloco corrente, a resistência da alvenaria realizada com os dois tipos de blocos não apresentou diferenças dignas de registo.

Pensa-se, como já foi referido, que a este facto não serão alheios o posicionamento da interrupção da junta horizontal de assentamento, a redução da espessura dos septos e por último o facto da rotura de junta existir também no topo dos blocos.

Crê-se ainda que, se na execução dos blocos fosse utilizado um betão de melhores características mecânicas, o comportamento da alvenaria realizada com os blocos ditos *melhorados* seria superior ao da alvenaria realizada com os blocos correntes.

b) **Argamassa de assentamento**

As argamassas base e cola utilizadas apresentaram resistências à compressão bastante superiores à resistência dos elementos.
Esta maior resistência da argamassa deverá ter possibilitado, em termos de resistência da alvenaria, a exploração da resistência dos elementos praticamente até ao seu limite.

Quanto à comparação do comportamento da alvenaria realizada com a argamassa base, em juntas de espessura corrente, comparativamente à alvenaria realizada com argamassa-cola em juntas delgadas, verificou-se que a alvenaria realizada com juntas coladas apresentou sempre um comportamento mecânico ligeiramente melhor, na linha do referido noutras caracterizações e nos modelos teóricos. Isto, apesar de em termos absolutos a argamassa-cola ser mecanicamente menos resistente.

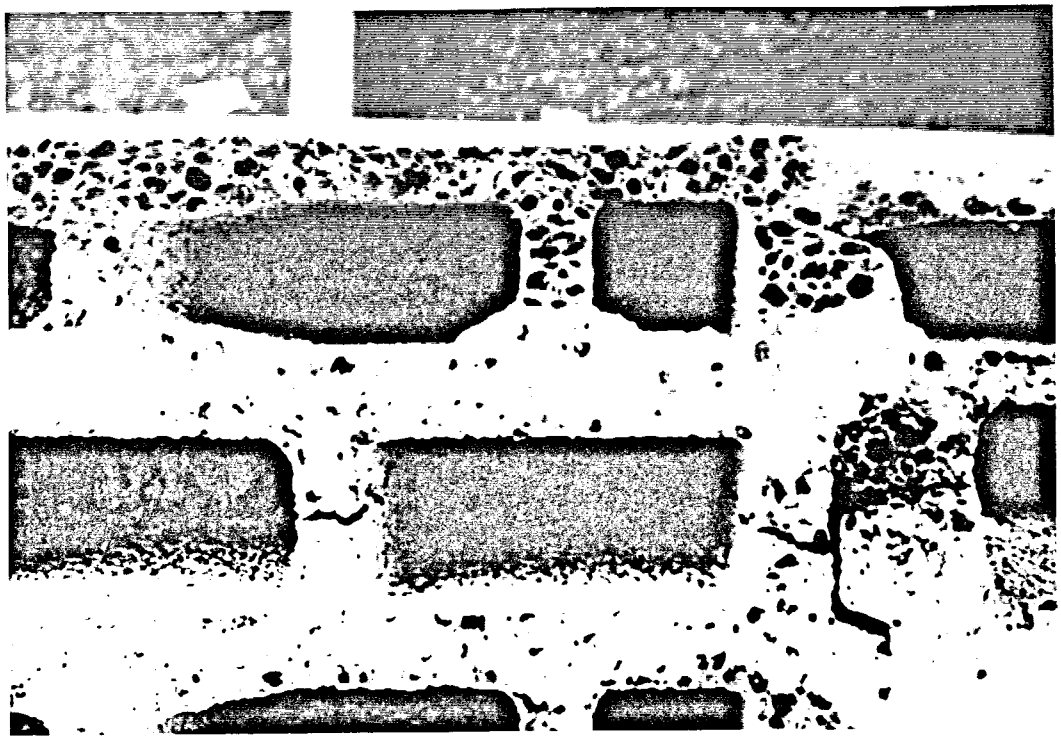
c) **Aparelho da alvenaria**

Contrariamente ao que se esperava, a variação do aparelho de assentamento da alvenaria não teve praticamente efeitos na resistência da alvenaria à compressão.

De acordo com informação disponível, já referida no Capítulo 4, julgava-se que ao assegurar-se entre fiadas, uma sobreposição total dos septos transversais dos blocos, se pudesse ter uma melhoria do comportamento mecânico da alvenaria.
Os resultados experimentais não permitiram validar essa hipótese. Pensa-se que tal facto se deve mais à reduzida resistência dos blocos do que à incorrecção do pressuposto.

Apresenta-se no entanto na fig. 8.16 duas fotografias de provetes após rotura, em que é perceptível alguma diferença de comportamento entre o provete com sobreposição total dos septos transversais entre fiadas e o provete em que tal não ocorre.

a) Provete sem sobreposição dos septos transversais entre fiadas



b) Provete com sobreposição total dos septos transversais entre fiadas

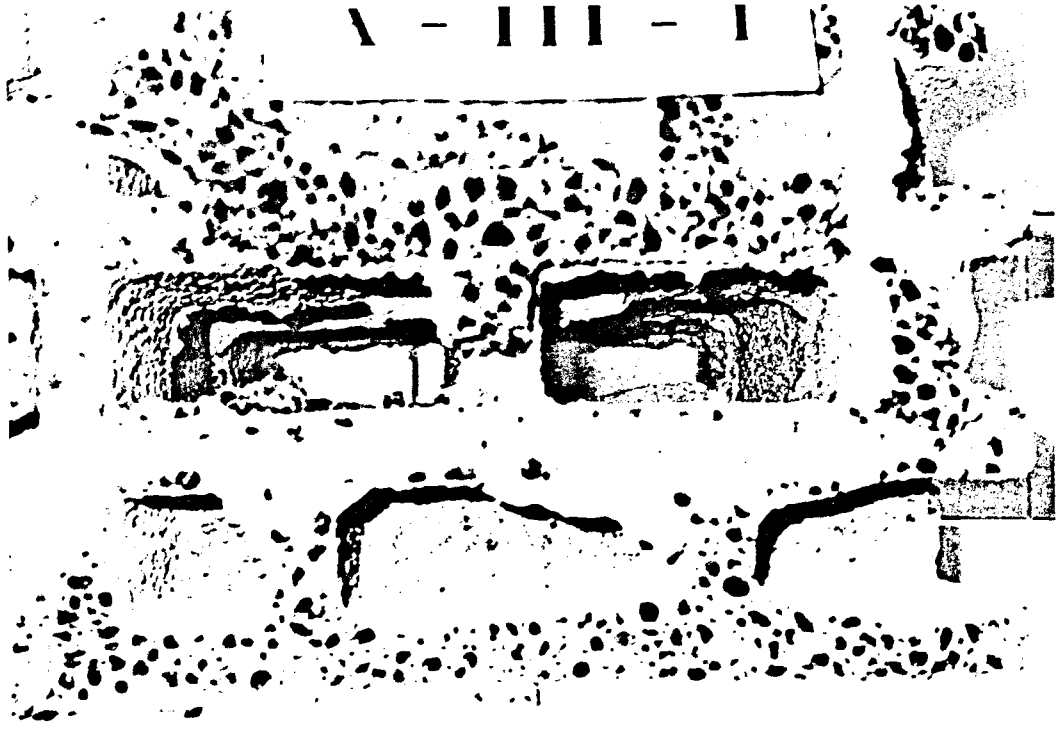


Fig. 8.16 - Aspecto de provetes após rotura

d) **Tipo de provetes**

A determinação da resistência à compressão das alvenarias por recurso a um provete alternativo com 3 fiadas de blocos, desrespeitando o actualmente expresso na normalização de referência *CEN*, conduziu a resistências diferentes relativamente ao provete de referência de 4 fiadas. Com efeito os provetes de 3 fiadas apresentaram sempre resistências superiores aos seus homólogos de 4 fiadas. Sintetiza-se na fig. 8.17 a comparação entre a resistência apresentada pelos dois tipos de provetes.

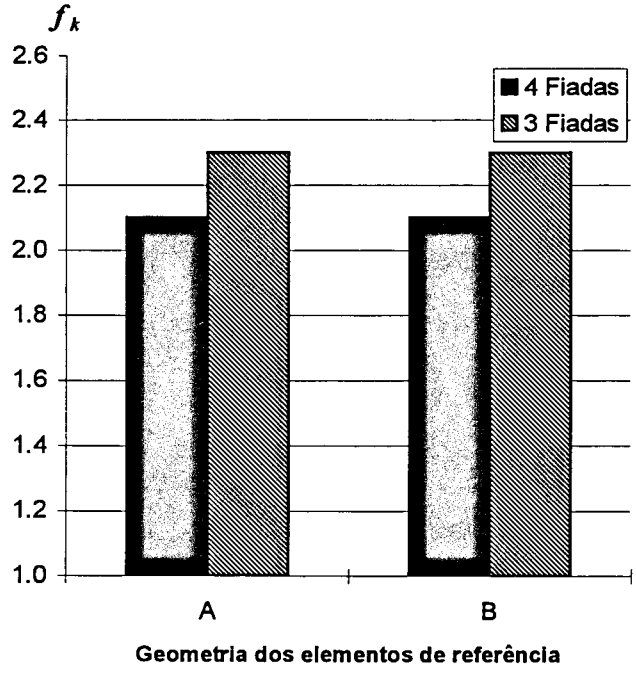


Fig. 8 17 - Resistência comparada do provete de referência de 4 fiadas e do provete alternativo de 3 fiadas

Este facto deverá ser tido em conta na interpretação de resultados de outras caracterizações. Pensa-se que para este comportamento contribuirão a influência da esbelteza do provete, bem como o facto da resistência da parede decrescer à medida que o número de elementos incorporados no provete aumenta, pois a resistência do provete passa a ser condicionada pela resistência mínima dos elementos presentes.

8.3.2.4 - Configuração de rotura

As configurações de rotura observadas parecem reiterar a interpretação do comportamento da alvenaria já apresentada:

- esgotamento de capacidade resistente do betão dos septos verticais, sobretudo na vizinhança dos pratos da prensa onde o constrangimento à deformação é maior;
- forte solicitação dos septos transversais que materializam a descontinuidade da junta de assentamento, com fissuração vertical por flexão dos mesmos;
- alguma concentração de esforços no topo dos provetes, devido à fragilização por corte de parte dos blocos para concretização dos provetes, justificando o esmagamento localizado dessas zonas observado em bastantes provetes, sendo este efeito mais sensível nos blocos melhorados;
- desenvolvimento de fissuras verticais em alguns provetes em que existiam sintomas de ligação entre blocos menos conseguida.

CAPÍTULO 9

SÍNTESE, CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO

CAPÍTULO 9

SÍNTESE, CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO

ÍNDICE

9.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS
9.2 - CONCLUSÕES
9.3 - PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO

CAPÍTULO 9

SÍNTESE, CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO

9.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Discutiu-se ao longo deste trabalho a possibilidade de melhorar o comportamento térmico e mecânico das alvenarias por actuação na geometria dos elementos, visando sobretudo a aplicação a blocos de betão de argila expandida, destinados à realização de paredes exteriores em pano simples de edifícios.

Para a clara percepção do problema, desenvolveram-se os principais aspectos relevantes envolventes:

- enquadramento do objectivo nas tendências internacionais e nacionais;
- condicionalismos exigênciais da envolvente dos edifícios em pano único;
- métodos de determinação das características térmicas dos materiais e produtos para alvenaria;
- modelos de comportamento mecânico das alvenarias sob acções verticais e principais factores condicionantes desse comportamento;
- especificidades dos betões de inertes leves, particularmente de argila expandida, vocacionados para o fabrico de elementos para alvenaria;
- exigências aplicáveis a blocos de betão de argila expandida.

A análise mais aprofundada incidiu nos seguintes aspectos:

- caracterização experimental do betão constituinte dos blocos;
- desenvolvimento de um modelo, por recurso ao m. e. f., para simular o comportamento térmico das paredes em regime permanente, que permita identificar os factores condicionantes do coeficiente de transmissão térmica;

- validação do modelo numérico através de determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica de algumas paredes, por recurso a ensaio em câmara climática calibrada;
- caracterização experimental do comportamento mecânico de provetes de parede, para verificar a influência de alguns factores tidos como condicionantes desse comportamento;
- comparação dos resultados experimentais relativos ao comportamento mecânico das alvenarias, com os obtidos por aplicação das expressões constantes do Eurocódigo 6.

As principais dificuldades do trabalho prenderam-se sobretudo com os seguintes aspectos:

- carácter lato do objectivo que obriga a abordar diferentes domínios, nem sempre com a profundidade que os mesmos requereriam;
- a discretização fina dos elementos para alvenaria adoptada no modelo de simulação numérica, requer um tempo de cálculo considerável;
- a caracterização experimental, térmica e mecânica, de provetes de alvenaria é custosa e requer bastante trabalho e recursos;
- a execução e ensaio dos provetes é influenciada por múltiplos aspectos que têm que ser cuidadosamente inventariados, por forma a despistar a sua influência e interpretar correctamente os resultados obtidos.

Pensa-se que os aspectos positivos do trabalho são:

- contribuir, mesmo que de forma modesta, para uma visão integrada de alguns dos aspectos essenciais do comportamento das paredes exteriores;
- corresponder às preocupações de alguns sectores industriais que entenderam que os materiais para alvenaria, bem como as soluções de paredes exteriores têm um peso económico e funcional relevante na construção de edifícios, devendo ser objecto de maiores atenções;
- verificar que é possível, recorrendo a elementos em cuja produção intervêm matérias-primas isolantes, efectuar paredes exteriores em pano simples satisfazendo as exigências de conforto térmico aplicáveis ao nosso país;
- constatar que as paredes exteriores referidas no ponto anterior poderão ter algum contributo estrutural, embora limitado;
- constatar que é possível, por actuação ao nível da geometria dos elementos e da forma de assentamento, melhorar de forma não desprezável o comportamento térmico e mecânico das alvenarias.

9.2 - CONCLUSÕES

a) **Betões de argila expandida para o fabrico de blocos**

Os betões de argila expandida usados na produção de blocos de betão leve para alvenaria apresentam especificidades relativamente aos outros betões.

Caracterizam-se por serem betões semi-cavernosos, realizados com inertes cuja máxima dimensão é limitada e que incorporam em geral, além dos inertes leves, areia natural. As dosagens de cimento e água são baixas, a 1ª por questões económicas e a 2ª visando a moldagem seguida de desmoldagem imediata.

A cura deste betões está associada ao ciclo de fabrico dos blocos, sendo geralmente efectuada em câmara de cura com ou sem fornecimento de vapor. Estes betões caracterizam-se ainda por apresentarem variações dimensionais maiores e mais diferidas no tempo do que os betões correntes.

A caracterização experimental efectuada sobre o betão usado no fabrico dos blocos de betão de argila expandida permitiu concluir:

- a massa volúmica do betão, próxima de 1150 kg/m^3, é corrente para este tipo de betões, quando incorporam uma areia natural;
- a resistência à compressão apresentada, próxima de 11 MPa, é baixa para betões com esta massa volúmica. Tal facto estará associado à baixa resistência mecânica dos grãos de argila expandida. Das restantes características mecânicas do betão, o módulo de elasticidade parece ser a menos dependente da resistência dos grãos.
- A condutibilidade térmica apresentada pelo betão caracterizado enquadra-se no habitualmente referidos para betões deste tipo, com a mesma massa volúmica.

b) **Comportamento térmico da alvenaria**

A proximidade obtida para os valores do coeficiente de transmissão térmica relativo a paredes exteriores de edifícios, determinado por diferentes vias, permite formular as conclusões que seguidamente se enumeram:

- o modelo numérico adoptado para a simulação do coeficiente de transmissão térmica de paredes, através do método dos elementos finitos, com uma discretização fina da geometria dos elementos, revelou-se uma ferramenta potente e fiável;

- a adopção de uma versão mais simplificada do modelo numérico de simulação, a 2D, com discretização apenas no plano perpendicular à parede, embora não tendo em conta a influência da transmissão no plano da parede permitiu obter resultados bastante aproximados;
- o recurso ao modelo numérico tridimensional (3D), com o mesmo nível de discretização da simulação plana, permite obter resultados excelentes;
- os resultados obtidos experimentalmente, através do ensaio de provetes de parede em câmara climática calibrada, permitiram validar os resultados do modelo numérico;
- na validação experimental determinou-se o K através de duas vias: por medição de temperaturas (o que obriga à calibração das câmaras), e através da medição directa dos fluxos, o que dispensa essa calibração. Apesar do primeiro método ser o constante da normalização, é mais sensível às condições de calibração e de fronteira, pelo que o 2º método conduziu a resultados mais próximos da simulação numérica e que se consideram mais exactos.

Em termos de actuações visando a melhoria do comportamento térmico dos elementos para alvenaria, passíveis de produção industrial, a análise de sensibilidade permitiu formular as seguintes conclusões:

- as acções de optimização térmica dos elementos para alvenaria são variáveis com a condutibilidade térmica do material constituinte dos elementos; enquanto nos elementos realizados a partir de materiais pouco isolantes, há em geral interesse em substituir material por ar, quando os elementos forem realizados a partir de materiais mais isolantes esse interesse é questionável;
- sob o ponto de vista térmico só há interesse em incluir nos elementos alvéolos de ar, se a condutibilidade térmica equivalente dos alvéolos for inferior à do material constituinte dos elementos para alvenaria;
- o aumento do número de fiadas de alvéolos perpendiculares ao fluxo térmico permite melhorar o K das paredes, embora o valor relativo dessa melhoria varie com a condutibilidade térmica do material constituinte;
- a disposição dos alvéolos em fiadas sucessivas desalinhados permite melhorar o K; a referida melhoria decresce à medida que a condutibilidade térmica do material constituinte dos elementos se vai reduzindo, de tal forma que para condutibilidades térmicas baixas, o K de blocos com e sem alvéolos desalinhados são praticamente coincidentes;
- actuações ao nível das juntas horizontais e verticais de assentamento, como o recurso a juntas horizontais delgadas ou juntas descontínuas, bem como a supressão das juntas verticais de assentamento, permitem melhorar o K das paredes entre cerca de 5 % e

10%, embora essa melhoria seja função da geometria do elemento e condutibilidade térmica do material constituinte;

- reduções significativas do K das paredes podem ser conseguidas por actuações ao nível da emissividade dos alvéolos, ou pelo seu preenchimento total com um isolante térmico;
- utilizando betões de argila expandida visando a realização de blocos tecnologicamente exequíveis, com espessura de 0.250 m, não será possível obter soluções de parede cujo K seja inferior a cerca de 0.70 W/(m^2·ºC) (sem inclusão de isolante nos alvéolos ou actuações na emissividade dos mesmos).

c) **Comportamento mecânico das alvenarias**

Face aos resultados obtidos na caracterização experimental relativa ao comportamento mecânico das alvenarias à compressão simples, pode-se afirmar que:

- os blocos utilizados na realização dos provetes ensaiados situam-se na gama limite inferior de resistências à compressão para este tipo de blocos; este facto "mascara" e atenua algumas das conclusões que se poderiam formular;
- o bloco de geometria *melhorada* apresentou, quando isolado, uma resistência à compressão superior à do bloco homólogo corrente; no ensaio dos provetes de parede essa diferença esbateu-se. Este comportamento será parcialmente devido à menor espessura dos septos do bloco *melhorado* e ainda com o facto da descontinuidade da junta de assentamento se localizar de forma excêntrica;
- o recurso a juntas de assentamento delgadas, realizadas com argamassa-cola, conduziu a alvenarias mecanicamente mais resistentes do que as realizadas com argamassa corrente;
- o aparelho de assentamento, particularmente a sobreposição integral dos septos transversais em fiadas sucessivas, não conduziu a acréscimos da resistência da alvenaria à compressão, ao contrário do que as referências que se conhecem e o bom senso faziam prever; pensa-se que este comportamento será justificado pelo facto dos elementos apresentarem resistência mecânica muito baixa;
- a avaliação da capacidade resistente das alvenarias por adopção de um provete de 3 fiadas de blocos, conduziu sempre a maiores resistências do que as obtidas adoptando um provete análogo, mas de 4 fiadas;
- a aplicação das expressões constantes do EC 6, que permitem avaliar a resistência das alvenarias a partir da resistência dos seus constituintes, conduziu a sub-avaliações grosseiras da resistência de alvenaria.

d) **Melhoria conjugada do comportamento térmico e mecânico**

A obtenção de melhorias conjugadas do comportamento térmico e mecânico das alvenarias, por actuações associadas aos elementos usados na sua realização, pode ser conseguida sobretudo pelas vias seguintes:

- recorrendo a elementos produzidos a partir de matérias-primas de baixa condutibilidade térmica, natural ou artificialmente porosas, com boa resistência mecânica;
- recorrendo a geometrias optimizadas dos elementos para alvenaria, preferencialmente espessas, de forma regular, incorporando múltiplas fiadas de alvéolos rectangulares perpendiculares ao fluxo (outros formatos são de difícil execução tecnológica e penalizam o comportamento mecânico);
- incorporando isolantes térmicos nos elementos, sempre que se pretendam alvenarias termicamente muito isolantes (K < 0.70 W/(m^2.ºC)), sem aumentar exageradamente a espessura dos blocos;
- minimizando a influência negativa das juntas de assentamento: por redução do seu número, redução da sua espessura e mesmo eventual supressão no caso das juntas verticais. O recurso a argamassas-cola de assentamento, se possível com condutibilidade térmica próxima da do material constituinte dos elementos, permite obter os efeitos referidos.

9.3 - PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO

Apesar dos resultados deste estudo terem permitido identificar alguns aspectos que tornam possível melhorar o comportamento térmico e mecânico dos elementos para alvenaria, pensa-se que haverá ainda muito a fazer neste domínio.

Para o efeito poderão ser prosseguidas vias analíticas e experimentais.

a) **Via analítica**

- Simular o comportamento térmico da parede em regime não estacionário e a sua repercussão nos aspectos analisados ao longo deste trabalho;
- analisar o efeito das solicitações de ordem térmica ou assimiláveis (variações de temperatura, choques térmicos e retracções) em panos de paredes exteriores;
- simular, através do m. e. f. com uma discretização fina tridimensional, o efeito dos aspectos referidos ao longo do trabalho no comportamento mecânico da alvenaria Salientam-se a influência relativa das características mecânicas dos elementos e da

argamassa, a espessura das juntas, a descontinuidade das juntas horizontais, a supressão das juntas verticais e a dimensão dos elementos.

b) **Via experimental**

- Testar, em termos de estanquidade à água da chuva, o comportamento de panos exteriores de paredes simples. Avaliar a influência de diferentes aspectos de índole tecnológica nesse comportamento. Ter em conta o contributo dos revestimentos, bem como a influência das acções de choque térmico.
- Explorar a influência de outros parâmetros no comportamento mecânico das alvenarias à compressão: resistência dos elementos, resistência da argamassa, defeitos de execução, esbelteza das paredes, etc..
- Estender a análise efectuada neste trabalho relativa ao comportamento mecânico de blocos de betão de argila expandida, a outros tipos de matérias-primas e elementos para alvenaria com aplicação em Portugal e comparar os resultados obtidos com o preconizado no Eurocódigo 6.

REFERÊNCIAS

1 - BEZELGA, A. - *Edifícios de Habitação. Caracterização e Estimação Técnico-Económica.* Lisboa. UTL - INCM, 1984.

2 - SOUSA, H. - *Materiais para Alvenaria. Apreciação de Algumas Produções e Sugestões Visando a Melhoria da sua Qualidade.* Tese de Mestrado. Porto, FEUP, 1989.

3 - *A Arquitectura Portuguesa.* Ano XXIV - 2ª Série. Lisboa, Março de 1931.

4 - FAUP - *Revista de Arquitectura.* Ano 1º, Nº 0. Porto, Outubro de 1987.

5 - FERNANDES, J. - *Arquitectura Modernista em Portugal [1890 - 1940].* Lisboa, Gradiva, 1993.

6 - FARIA, F. - *Análise dos Sistemas Construtivos Portugueses.* Tese de Mestrado. Porto, FEUP, 1995.

7 - GOMES, R.J.; ZUQUETE, E. - *Informação Coordenada Sobre Produtos Cerâmicos para a Construção.* Memória nº 246. Lisboa, LNEC, 1965.

8 - PORTUGAL - Leis, Decretos, etc. - *Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios.* D.L. nº 40/90 de 6 de Fevereiro 1990.

9 - PORTUGAL - Leis, Decretos, etc. - *Regulamento Geral das Edificações Urbanas.* D.L. 38382 de 7 de Agosto de 1951.

10 - PORTUGAL - Leis, Decretos, etc. - *Recomendações Técnicas para Habitação Social.* Despacho do M.S.E. D.R. 2ª série nº 38 de 14 de Fevereiro de 1985, 3º Suplemento.

11 - DIAS, A., SOUSA, H., LUCAS, J. - *Estudo do Redesenho do Tijolo.* APICC.Coimbra, 1993.

12 - MIMOSO, J. M. - *Transmissão de Calor em Janelas. Estudo Teórico e Experimental em Condições de Inverno.* Tese para obtenção do Grau de Especialista Lisboa, LNEC, 1985.

13 - TUBI, N. - *Confronto tra le Carateristiche Prestazionale dei Prodotti e Componenti e Prognosi a Medio Termine.* L' Industria Italiana dei Laterizi , pp. 163 a 181, nº 5/1982.

14 - ACERMI - *Réglement Technique du Certification de Qualification des Produits Manufacturés Isolants thermiques du Bâtiment.* ACERMI, CSTB - LNE, Paris 1992.

15 - STEIN, H. - *The Heat Insulation of Single-Leaf Masonry Walls.* Betonwerk, Fertigteil-Technik. Nº 9, pp. 526 a 534, Sep. 1979.

16 - REICHERT.H. - *Murature in Blocchi di Calcestruzzo Normale e Leggero.* Prefabbricazione. Nº 6, pp. 309 a 316, Vol. 16, Jun. 1980.

17 - HOHWILLER, F. - *Leichtbetonsteine Mit Integrierter Wärmedämmung Beton.* Nº 6, pp. 222 a 223. Jun. 1982.

18 - SCHELLBACH, G. - *Miglioramento dell' Isolamento Termico Delle Murature.* L' Industria Italiana dei Laterizi, pp. 257 a 265, Nº6 /1986.

19 - SCHABEL, H. - *Improvement of the Heat Insulation of Monolithic Masonry During the Last 15 Years, Demonstrated on Lightweight Concrete Blocks.* Proceedings of the 9th IBMaC Conference.

pp. 1183 a 1189. Berlin, October 1991.

20 - LANG, J. - *Der Warmeschutz von Wanden aus Hohlblocksteinen aus Lecabeton.* Neues von Bau. Nº 7-8, pp. 6 a 11, August 1979.

21 - TONBERGER, G. - *Il Controllo delle Caracteristiche di Isolamento Termico delle Murature in Laterizio - Determinazione Analitica Oppure Misura Diretta?* L' Industria Italiana dei Laterizi, pp. 3 a 7, Nº 1 /1987.

22 - LANG, J. - *Hohlblocksteine mit Beliebigen Zuschlägen.* Neues von Bau. Nº 11-12, pp. 1 a 5, Vol. 36, Dec. 1990.

23 - VALORE, R. - *Calculation of U - Values of Hollow Concrete Masonry.* Concrete International. Nº 2, pp. 40 a 36, Vol. 2, ACI. USA, 1980.

24 - DUTRUEL, F.; DRAN, F. - *Les Blocs en Béton de Granulats Légers et l'Isolation Thermique.* Publication Technique nº 40. Epernon, CERIB, 1979.

25 - DUTRUEL, F.; DRAN, F. - *Recherches Récentes Menées au CERIB en Matiére d'Isolation Thermique des Blocs et Planchers en Béton.* Annales ITBTP nº 386 - Série Materiaux. Paris, ITBTP, Sep. 1980.

26 - CSTB MAGAZINE - *Les Maçonneries Isolantes* . CSTB Magazine nº 34, pp. 2 a 6. Paris, CSTB, Mars 1985.

27 - DUTRUEL, F.; BRUSIN, M.; DRAN, F. - *Les Bétons de Polystyrene Expansé. Examples d'Applications à l'Industrie du Béton Manufacturé.* Publication Technique nº 82. Epernon, CERIB, 1986.

28 - MERLET, J. - *Les Maçonneries Isolantes dans la Construction d'Aujourd'hui.* Revue Technique du Bâtiment et des Constructions Industrielles. Nº 113, pp. 45 a 56, Mars-Avril 1986.

29 - PIMIENTA, P.; CHANDELLIER, J.; RUBAUD, M.; DUTRUEL, F.; NICOLE, H. - *Études de Faisibilité des Procédés de Constructions à Base de Béton de Bois.* Cahiers du CSTB nº 2703. Livraison 346, Janvier-Fevrier 1994.

30 - LOUDON, A. - *Thermal Properties of Slotted Blockwork.* Concrete pp. 22 a 26, July 1981.

31 - BECKER, R. - *Thermal resistance of masonry walls. Analysis and test results.* Proceedings of CIB W 40, Meeting in Sopron - Hungary, 1993.

32 - GIORDANO, V. - *Ottimizzazione del Comportamento Térmico dei Laterizi da Parete in Relazione alla Loro Forma* - Atti del 15º Congesso Nazionale Andi, 1980, pp. 217 a 231. Laterconsult , Roma, 1982.

33 - BONDI, P. ; BUIZZA, A. - *Note Sullo Sfruttamento Ottimale Della Prestazione Termica dei Manufatti in Laterizio* . L' Industria Italiana dei Laterizi, pp. 117 a 122, Nº 4 /1982.

34 - CANAVESIO, G. - *L'Uso del Laterizio Nella Construzione Semplificate. Ipotesi di Nuovo Prodotti.* L' Industria Italiana dei Laterizi, pp. 95 a 102, Nº 3/1986.

35 - BONACINA, C.; STEVAN, A.; STRADA, M. - *Heat Conductance Determination of Hollow Lightweight Clay Blocks by the Finite Element Method.* Proceedings of 8th IBMaC , Dublin, pp. 1238 a 1247 . Elsevier Apllied Science, London, 1988.

36 - WALDUM, A.M. - *The Performance of Masonry Walls in Wet and Cold Norwegian Climat.* Proceedings of the 6th Canadian Masonry Symposium, pp. 469 a 476 Saskatoon, Canada 1992.

37 - AMIRI, B.; KRAUSE, G.; TADROS, M. - *Lightweight High-Performance Concrete Masonry*

Block Mix Design. ACI Materials Journal, pp. 495 a 501, Sept-Oct. 1994.

38 - AMIRI, B.; KRAUSE, G.; TADROS, M.; COMBS, G. - *Mix Design of Lightweight High-Performance Masonry Block.* Proc. 6th NAMC. pp. 1037 a 1051 Philadelphia. June 1993.

39 - CAMARGO, A. - *Minas de Entulho.* Téchne Nº 15, pp. 15 a 19, Mar/Abr. 1995.

40 - GANESAN, T.; KALYANASUNDARAM, P.; AMBALAVANAN, R.; RAMAMURTHY, K. - *Structurally Efficient Hollow Concrete Blocks in Load Bearing Masonry.* Proc. of 8th IBMaC - Dublin, pp. 1427 a 1436. Elsevier Applied Science. Sept 1988.

41 - LOW, S.; ATDROS, M.; EINEA, A.; KHALIFA, M.; MAGZOUB, A.; STAAB, E. - *Shape Optimization of Concrete Masonry Units.* Proc. 6th NAMC, pp. 837 a 847. Philadelphia. June 1993.

42 - JUNG, E. - *Guide to the Calculation of Statically Advantageous Cross-Sections of Thermal Insulating Bricks and Blocks.* pp. 117 a 139.

43 - OHLER, A. - *Rationalization of Masonry Construction in Germany.* Proceedings of the 26th Meeting of CIB W23, Darmstad. CIB Publication 131, pp. 97 a 109. Germany, Sept. 1989.

44 - ZEUS, K. - *About the Thermal Insulation and Bearing Capacity of Masonry of Vertical Coring Lightweight Bricks.* Proceedings 5th. NAMC, pp. 889 a 900, Illinois at Urban-Champaign. 1990.

45 - HUREZ, M; HERRER, F. - *Étude du Comportement Mécanique de Maçonneries Réalisées à L'aide de Blocs Montés Traditionnellement et sans Joints Verticaux.* Publication Technique nº 88 CERIB. Epernon, 1986.

46 - DUTRUEL, F.; DEGAS, G. - *Reflexions sur la Sécurité Relative au choix des Produits en Béton Manufacturé.* Publication Technique nº 87. CERIB, Epernon, 1986.

47 - PORTUGAL - Leis, Decretos, etc. - *Regulamento Geral sobre o Ruído* - D. L. n.º 251/87 de 24 de Junho de 1987.

48 - PAIVA, J. V. - *Caracterização de Paredes Exteriores de Edifícios - Análise dos Resultados da Caracterização por Via Analítica das Paredes de Alvenaria de Tijolo Furado. LNEC, Lisboa, 1973.*

49 - CARVALHO, F.; LUCAS, J. A. - *Desenvolvimento de Novos Blocos para Alvenaria.* Relatório 88/89, NPC - LNEC, Lisboa 1989.

50 - CSTC, IC - IB, SECO - *Guide des Performances des Bâtiments.* Bruxelles, CSTC, 1979.

51 - BSI - BS 5628 : Part 3 - *British Standard Code of Practice for Use of Masonry - Part 3 - Materials and Components Design and Workmanship.* BSI, London, 1985.

52 - CSTB - DTU 20.1 - *Parois et Murs en Maçonnerie de Petits Éléments.* Paris, CSTB, 1985.

53 - UEAtc - *Directivas Comuns UEAtc Relativos a Choques em Elementos de Construção Verticais Opacos.* UEAtc - Tradução 769, LNEC, Lisboa, 1981.

54 - PORTUGAL - Leis, Decretos etc. - *Regulamento de Segurança Contra Incêndio em Edifícios de Habitação.* D. L. nº 64/90 de 90.2.21, de 21 de Fevereiro de 1990.

55 - LNEC - *Curso de Especialização sobre Segurança Contra Incêndios em Edifícios - Volumes I e II.* LNEC, Lisboa, 1993.

56 - PAIVA, J. V. - *Humidade nas Edificações* - Tese para obtenção do Grau de Especialista. Lisboa, LNEC, 1969.

57 - HENRIQUES, F. M. - *Acção da Humidade em Paredes - Formas de Manifestação, Critérios de Quantificação e Análise de Soluções de Reparação.* Lisboa, LNEC, INCE 4, 1993.

58 - LUCAS, J. A. - *Classificação e Descrição Geral de Revestimentos para Paredes de Alvenaria ou de Betão.* Lisboa, LNEC, ITE 24, 1990.

59 - MAMILLAN, M. - *Le Mouvement de l' Eau dans les Murs.* Annales ITBTP, Nº 217. Paris, ITBTP, Janvier 1966.

60 - LASKA, W; OSTRANDER, C. - *Cavity Walls. A case of High Performance.* Proc. of the British Masonry Society, nº 2. BMS, Stoke-on-Trent, April 1988.

61 - MERLET, J. D.; DELMOTTE; MESUREUR, B.; REMY, D.; SALAGNAC, J. L. - *Les Maçonneries à Montage Simplifié.* Cahiers du CSTB nº 2623. CSTB, Paris, Déc. 1992.

62 - ISO/TC 163 - TECHNICAL REPORT 9165 - *Practical Thermal Properties of Building Materials and Products.* Genéve, ISO, Dec.1988.

63 - CEN/TC 89 - Draft pr EN 30211 - *Building Components and Building Elements - Thermal Resistance and Thermal Transmittance - Calculation Method.* CEN, Brussels, Sept. 1992.

64 - CEN/TC 125/CG/TG1 - Draft pr EN 1745 - *Masonry and Masonry Products. Methods for Determining Declared and Design Thermal Values.* CEN, Brussels, Nov. 1994.

65 - CEN/TC 89 - Draft comments on pr EN 1745 - *Masonry and Masonry Products - Methods for Determining Declared and Design Thermal Values.* CEN, Stockholm, 1995.

66 - ISO/TC 163 ; CEN /TC 89 -Technical Report 9165 - *Methods for Determining Declared and Design Thermal Values for Building Materials and Products.* ISO/CEN 10456, 1994.

67 - IGPAI - NP-116 - *Materiais de Construção. Determinação da Condutibilidade Térmica pelo Processo da Placa Quente.* Lisboa, IGPAI, 1962.

68 - ISO - ISO 8302 - *Thermal Insulation - Determination of Steady State Thermal Resistance and Related Properties. Guarded Hot Plate Apparatus.* Genéve, ISO, 1991.

69 - ASTM - ASTM C177-85 - *Standard Test for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot-Plate Apparatus.* ASTM, Philadelphia,1991.

70 - ISO - ISO 8301-*Thermal insulation-Determination of Steady-State Thermal Resistance and Related Properties-Heat flow meter apparatus.* Genéve, ISO, 1991.

71 - ASTM - ASTM C518-91 - *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.* ASTM. Philadelphia, 1991.

72 - ISO - ISO/DIS 8990 - *Isolation Thermique - Détermination des Propriétés de Transmission Thermique en Régime Stationnaire - Méthodes à la Bôite Chaude Gardée et Calibrée.* Genéve, ISO, 1987.

73 - ASTM - ASTM C236-87 - *Standard Test Method for Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box.* ASTM. Philadelphia, 1991.

74 - ASTM - ASTM C976-90 - *Standard Test Method for Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Calibrated Hot Box.* ASTM. Philadelphia, 1991.

75 - PINA DOS SANTOS, C. A.; PAIVA, J. V. - *Caracterização Térmica de Paredes de Alvenaria.*

ITE 12, Lisboa, LNEC, 1986.

76 - PINA DOS SANTOS, C. A.; PAIVA, J. V. - *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios.* ITE 28. Lisboa, LNEC, 1990.

77 - GROUPE DE COORDINATION DES TEXTES TECHNIQUES - *Régles Th-K77- Régles de Calcul des Caractéristiques Thermiques Utiles des Parois de Construction et Mise à Jour Partant sur la Definition des Valeurs Utiles et des Caracteristiques Thermiques des Pierres et Materiaux Isolants.* Cahiers du CSTB. Cahier 1478 (1977) et 2032 (1985). CSTB, Paris.

78 - ISO - ISO 6946/1 - *Isolation Thermique - Règles de Calcul - Partie 1: Propriétés Thermiques des Composants et Éléments de Bâtiment en Régime Stationnaire.* Genéve, ISO, 1986.

79 - CHAPMAN, J. - *Heat Transfer.* 4th Edition. Macmillan Publishing Company. New York, 1984.

80 - MIMOSO, J. M. - *Transmissão de Calor. Bases Teóricas para Aplicação à Térmica de Edifícios.* ITE 14, Lisboa, LNEC, 1987.

81 - CANHA DA PIEDADE, A. - *Térmica de Edifícios.* Seminário 297. Lisboa, LNEC, 1982.

82 - ASHRAE - *1993 ASHRAE Handbook. Fundamentals. S.I. Edition.* ASHRAE, Atlanta, 1993.

83 - ELSHERBINY, S.M.; RATHBY, G.D.; HOLLANDS, R.G.T. - *Heat Transfer by Natural Convection Across Vertical and Inclined Air Layers.* Journal of Heat Transfer - Transactions of the ASME, pp. 96 a 102, Vol. 104, 1982.

84 - SIEGEL, R.; HOWELL, J. - *Thermal Radiation Heat Transfer.* McGraw Hill. USA, 1972.

85 - DAVIES M.G. - *A Thermal Circuit for Radiant Exchange.* Building and Enviromment, pp. 43 a 46, Vol. 14, England 1979.

86 - ANTON, H. - *Thermal Conductivity of Brickwork. Study of Influencing Variables and the Simplification of Measuring Methods in Quality Control.* Ziegelindustrie International, pp. 162 a 166, nº 3/89.

87 - CEN TC 89/WG1 - Draft pr EN 32573 - *Thermal Bridges in Building Construction - Heat Flows and Surface Temperatures- Part 1- General Calculation Method.* CEN, Brussels,1993.

88 - ELSNER, M. - *Heat and Moisture Transport in Vertical Coring Lightweight Bricks.* Ziegelindustrie Internationale, pp. 266 a 273, nº 6/88.

89 - SALIN, S. - *Structural Masonry.* Prentice Hall, 1971.

90 - PAGE, W. - *The Biaxial Compressive Strength of Brick Masonry.* Proc. Inst. Civ. Eng. pp. 893 a 906, 1981.

91 - HILSDORF, H. K. - *Investigation into the Failure Mechanism of Brick Masonry Loaded on Axial Compression.* Proceedings Int. Conf. on Masonry Structural Systems, pp. 34 a 41. Austin, Texas, 1969.

92 - JESSOP, E. L.; SHRIVE, N. G.; ENGLAND, G. L. - *Elastic and Creep Properties of Masonry.* Proc. of North American Masonry Conf. University of Colorado, Boulder, Colorado. 1978.

93 - BENEDETTI, D.; BINDA, L.; CARABELLI, E.; CONTRO, R.; CORRADI DELL'ACQUA, L.; FRANCHI, A.; GENNA, F.; GIODA, G.; MACCHI, G.; NOVA, R.; PEANO, A.; ROSSI, P.- *Comportament Stático e Sismico delle Strutture Murare.* CLUP - Milano. 1978.

94 - ZIENKIEWICZ, O. C., et al. - *Analysis of Non Linear Problems in Rock Mechanics with Particular Reference to Jointed Rock Systems.* Proceedings of the Second Congress of the

International Society for Rock Mechanics, pp. 501 a 509. Belgrade, Yugoslavia, 1970.

95 - DELMOTTE, P; LUGEZ, J.; MERLET, J. A. - *Résistance des Maçonneries sous Charges Verticales. Proposition d' un modèle simplifié de calcul.* Cahiers du CSTB nº 2553. CSTB, Paris, Jan. Fev. 1992.

96 - CEN - *Eurocode 6 - Design of Masonry Structures. Part 1.1 General Rules for Buildings.* CEN, ENV 1996.1.1, 1994.

97 - DRAN, F. - *Résistance en Compression des Maçonneries à Base de Blocs en Beton et les Nouvelles Normes Européenes.* CERIB, Epernon, Juillet 1990.

98 - DRAN, F. - *Compressive Strength of Hollow Concrete Block Masonry Compared with Eurocode 6.* Proceedings of the Second International Masonry Conference. British Masonry Society. Stoke-on-Trent. July 1990.

99 - PORTUGAL - Leis, Decretos, etc - *Regulamento de Segurança das Construções Contra os Sismos.* D. L. nº 41659 de 31/5/1958.

100 - TRIGO, J. T. - *Regulamentação e Normalização da Construção de Alvenaria. Planeamento de Estudos.* Relatório 23/84, NPC, Lisboa, 1994.

101 - DIN - DIN 1053 - Part 1 - *Masonry. Calculation and Construction.* Berlin, DIN, 1971.

102 - DIN - DIN 1053 - Part 2 - *Masonry. Masonry Designed on the Basis of Suitable Tests. Design and Construction.* Berlin, DIN, 1984.

103 - DIN - DIN 1053 - Part 4 - *Masonry. Buildings of Prefabricated Brickwork Components.* Berlin, DIN, 1978.

104 - STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA - *AS 3700 - Masonry in Buildings.* Sydney 1988.

105 - NBN - IBN B24-301 - *Conception et Calcul des Maçonneries.* Bruxelles, IBN, 1980.

106 - NBN - IBN B24-401 - *Execution des Maçonneries.* Bruxelles, IBN, 1981.

107 - ACI - *Building Code Requirements for Masonry Structures* (ACI 530-92 / ASCE 5-92 / TMS 402-92). ACI Manual of Concrete Practice, 1995.

108 - ACI - *Commentary on Building Code Requirements for Masonry Structures* (ACI 530-92 / ASCE 5-92 / TMS 402-92). ACI Manual of Concrete Practice 1995.

109 - BSI - BS 5628: Part 1 - *Structural Use of Masonry. Part 1 - Unreinforced Masonry.* London, BSI, 1978.

110 - BSI - BS 5628: Part 2 - *Use of Masonry. Part 2 - Structural Use of Reinforced and Prestressed Masonry.* London, BSI, 1985.

111 - ITÁLIA - LEIS - Norme Tecniche Relative alle Construzioni Sismiche. Roma, Gazzetta Ufficiale, 12/5/1986.

112 - ITÁLIA - LEIS - *Norme Tecniche per la Progettazione, Esecuzione e Collaudo Degli Edifici in Murature e per il Loro Consolidamento.* Roma, Gazzeta Ufficiale, 14/6/1987.

113 - SIA - *Recommendation V177/2. Design of Masonry Walls.* Zurique, SIA, 1989.

114 - CEN - *Eurocode 8 - Earthquake Resistant Design of Structures - Part 1: General Rules for Buildings.* CEN, ENV 1988.1.1, 1993.

115 - CIB - W23 - *International Recommendations for Design and Erection of Unreinforced and Reinforced Masonry Structures with an Appendix on Recommendations for Seismic Design of Unreinforced, Confined and Reinforced Masonry Structures.* Publication 94. CIB, Rotterdam, 1987.

116 - CEN - TC 125 - pr EN 771 - 1 - *Specification for Masonry Units. Clay Masonry Units.* CEN, 1993.

117 - CEN - TC 125 - pr EN 771 - 2 - *Specification for Masonry Units. Calcium Silicate Masonry Units.* CEN, 1993.

118 - CEN - TC 125 - pr EN 771 - 3 - *Specification for Masonry Units. Aggregate Concrete Masonry Units.* CEN, 1993.

119 - CEN - TC 125 - pr EN 771 - 4 - *Specification for Masonry Units. Autoclaved Aerated Concrete Masonry Units.* CEN, 1993.

120 - CEN - TC 125 - pr EN 771 - 5 - *Specification for Masonry Units. Manufactured Stone Masonry Units.* CEN, 1993.

121 - CEN - TC 125 - pr EN 771 - 6 - *Specification for Masonry Units. Natural Stone Masonry Units.* CEN, 1993.

122 - CEN - TC 125 - pr EN 772 - 1 - *Methods of Test for Masonry Units. Determination of Compressive Strength.* CEN, 1993.

123 - CEN - TC 125 - pr EN 998 - 2 - *Specification for Mortar for Masonry. Mortar for Masonry.* CEN, 1993.

124 - CEN - TC 125 - pr EN 1015 - 11 - *Methods of Test for Masonry Mortar. Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar.* CEN, 1993.

125 - CEN - TC 125 - pr EN 1052 - 1 - *Methods of Test for Masonry. Determination of Compressive Strength.* CEN, 1994.

126 - KIRTSCHIG, K.; ANSTÖTZ, W. - *Testing the Compressive Strength of Brickwork.* Proceedings of the 8th IBMaC. Dublin, pp. 1363 a 1372. Elsevier Applied Science, London 1988.

127 - KIRTSCHIG, K.; MEYER, J. - *On the Evaluation of Masonry Tests in Compression.* Proceedings of the 8th IBMaC. Dublin, pp. 1373 a 1383. Elsevier Applied Science, London 1988.

128 - KIRTSCHIG, K. - *The Present Idea on the Compressive Strength of Masonry in the Latest Drafts on International Specifications.* Proc. of the 20th Meeting of CIB W23, pp. 41 a 50. Publication 131, Darmstadt 1989.

129 - MERLET, J. D. - *Behaviour of Hollow Units Masonry.* Proc. of the 20th Meeting of CIB W23, pp. 87 a 96. Publication 131, Darmstadt 1989.

130 - SANTOS, S. - *O Comportamento da Alvenaria Estrutural e a Normalização Europeia. Contribuição para o estudo das Estruturas de Alvenaria em Portugal.* Lisboa, LNEC, 1994.

131 PAGE, A. - *Finite Element Model for Masonry.* J. of Struct. Division, ST 8, August 1978.

132 - ROBERTS, J. - *The effect of Different Test Procedures Upon the Indicated Strength of Concrete Blocks in Compression.* Magazine of Concrete Research, pp. 87 a 98, Vol. 25, Nº 83, June 1973.

133 - KLEEMAN, P.; PAGE, A. - *The In-situ Properties of Packing Materials Used in Compression Tests.* Masonry International, pp. 68 a 74, Vol. 4, Nº 2, 1990.

134 - PAGE, A.; KLEEMAN, L. - *The Influence of Capping Material and Platen Restraint in the Failure of Hollow Masonry Units and Prisms.* pp. 662 a 670

135 - SCHUMACHER, J. - *Résistance des Maçonneries en Blocs de Béton Soumises à des Charges Verticales.* Cahiers du CSTB Nº 129, Cahier 1101. Paris, CSTB, Mai 1972.

136 - CARVALHO, F. - *Comportamento Mecânico das Alvenarias. Influência de Alguns Parâmetros nas suas Resistências à Compressão e ao Corte.* Tese para obtenção do Grau de Especialista. Lisboa, LNEC 1990.

137 - AFNOR - NF P 14-304 - *Agglomerés. Blocs en Béton de Granulats Légers pour Murs et Cloisons.* AFNOR, Paris, Sept. 1983.

138 - BSI - BS 6073: Part 2 - *Precast Concrete Masonry Units. Method for Specifying Precast Concrete Masonry Units.* BSI, London, 1981.

139 - ASTM - ASTM C140-91 - *Standard Methods of Sampling and Testing Concrete Masonry Units.* ASTM, Philadelphia, 1991.

140 - SCHUMACHER, J. - *Quelques Essais Montrant l'Influence de la Mise en Oeuvre et du Mortier des Joints sur la Résistance de Maçonneries en Briques Creuses.* Cahiers du CSTB Nº 117, Cahier 1017. Paris, CSTB, Mars 1971.

141 - GANESAN, T.; RAMAMURTHY K. - *Behavior of Concrete Hollow Block Masonry Prisms Under Axial Compresion.* J. Struct. Engnr. pp. 1751 a 1769. Vol. 118, Nº 7, July 1992.

142 - MOUNAJED, G. - *La Modélisation de la Maçonnerie Armée par la Méthode des Éléments Finis. Élaboration d'un Módèle de Calcul Moca.* Cahier du CSTB 2639, Livraison 337. Paris, CSTB, Mars 1993.

143 - SCHUBERT, P. - *The Influence of Mortar on the Strength of Masonry.* Proc. 8th IBMac. Dublin, pp. 162 a 174. Elsevier Applied Science, London, 1988.

144 - SUTHERLAND, R. - *Brick and Block Masonry in Engineering* . Proc. Inst. Civ. Engnr. Part 1, pp. 31-63, 1981.

145 - DRYSDALE, R.; HAMID, A. - *Behavior of Concrete Block Masonry Under Axial Compression.* ACI Journal, pp. 707 a 721, June 1979.

146 - HAMID, A.; CHUKWUNENYE, A. - *Compression Behavior of Concrete Masonry Prisms.* J. Struct Engnr. pp. 605 a 613.Vol. 112, Nº 3, March 1986.

147 - SCHUBERT, P. - *Influence of Lightweight Mortars on the Loadbearing Capacity and Deformation Characteristics of Masonry,* pp. 327 a 335. ZiegelIndustrie International, June 1985.

148 - SHAAN, R.; TORRENTI, J. - *Étude Expérimentale de la Maçonnerie Sous Sollicitations Uniaxiales et Biaxiales.* Annales ITBTP Nº 486, Série Essais et Mesures, Nº 229. Paris, ITBTP, Sept. 1990.

149 - SHAAN, R.; TORRENTI J. - *Influence de la Variation de Type et d'Épaisseur des Joints sur le Comportement de la Maçonnerie.* Annales ITBTP Nº 490. Série Essais et Mesures, Nº 232. Paris, ITBTP, Jan. 1991.

150 - FRANCIS, A.; HORMAN, C.; JERREMS, L. - *The Effect of Joint Thickness and Other Factors on the Compressive Strength of Brickwork.* Proc. 2nd IBMaC. Stoke-on-Trent, 1970.

151 - SHRIVE, N. - *The Failure Mechanism of Face-Shell Bedded (ungrouted and unreiforced) Masonry.* The International Journal of Masonry Construction, pp. 115 a 128. Nº 3, Vol. 2, 1982.

152 - ASTM - ASTM E 447-84 - *Standard Test Methods for Compressive Strenght of Masonry Prism.* ASTM, Philadelfia, 1991.

153 - VENAUT, M. -*Les bétons légers.* Ciments, Betons, Plâtres Chaux, pp. 319 a 321, Nº 6/77.

154 BOUZERAR, R.; BURLION, N.; DELAPLACE, A. - *Génie des Bétons Hydrauliques. Les Granulats Légers.* Textes ENS Cachan. DEA Maise, 1993.

155 - RILEM - *Classification fonctionelle des bétons légers.* Recommandation de la RILEM LC2. RILEM, Octobre 1978.

156 - CEB - FIP - *Lightweight Aggregate Concrete. CEB/FIP Manual of Design and Technology* .1st Edition, London, The Construction Press, 1977.

157 - PORTUGAL - Leis, Decretos etc.- *Regulamento das Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado.* D.L. nº 349-C/83 de 30 de Julho de 1983.

158 - CEN/TC 94 e 104 - ENV 206 - *Betão - Comportamento, produção, colocação em obra e critérios de conformidade (versão portuguesa).* ONS/ATIC . Lisboa, 1990.

159 - SOUSA COUTINHO, A. - *Fabrico e Propriedades do Betão.* 2ª edição. Lisboa, LNEC, 1988.

160 - ITBTP - *Recommandations provisoires pour l'utilisation des bétons de granulats légers* - Annales ITBTP, Série Béton, nº 155 - Supplement au Nº 337. ITBTP, Paris, Mars 1976.

161 - ACI COMMITTEE 211 - *Standard Pratice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2 - 91).* ACI - Manual of Concrete Practice, 1992.

162 - ACI COMMITTEE 213 - *Guide for Structural Lightweight Concrete (ACI 213 R-87).* ACI-Manual of Concrete Practice, 1992.

163 - HARRISON, B. - *Synthetic Aggregate. Sources and Resources.* Concrete, pp. 41 a 44. Nº 11 Vol. 8, Nov. 1974.

164 - LYDON, F.D. - *Artificial Aggregates for Concrete.* Concrete, pp. 49 a 52. Nº 9, Vol. 9, Sept. 1975

165 - RILEM - *Terminologie et Definitions des Bétons Légers.* Recommandation de la RILEM LC1. RILEM, Février 1975.

166 - IGPAI - NP 1379 - *Inertes para Argamassas e Betões. Análise Granulométrica.* IGPAI, Lisboa, 1976.

167 - CORMON, P. - *Bétons légers d'aujourd'hui.* Paris, Editions Eyrolles, 1973.

168 - VASCONCELLOS, RENATO DA FONSECA - *Propriedades do Betão Leve de Argila Expandida "LECA".* Lisboa, LNEC, 1974.

169 - LIMA, J.A. ; MONTEIRO, V. M. ; APPLETON, J. A. - *Caracterização dum Betão de Inertes Leves "LECA" do Ponto de Vista da sua Utilização Estrutural.* Lisboa, LNEC, 1973.

170 - ARNOULD, M.; VIRGOLEUX, M. - *Le Béton Léger.* Paris, Presses de l'École Nationale de Ponts et Chaussées, 1986.

171 - ITBTP - *Bétons de Granulats Légers Artificiels* - Annales de d'ITBTP, Série Béton Nº 142, Supplement Nº 321. ITBTP, Paris, Oct. 1974.

172 - AFNOR - NF P 18-309 - *Granulats. Granulats d' Argile ou de Schiste Expansés Fabriqués en*

Four Rotatif Destinés à la Confection de Bétons. AFNOR, Paris, 1982.

173 - CARVALHO, F.; PINA DOS SANTOS, C.A. - *Caracterização Experimental de Grânulos de Argila Expandida " Leca".* Relatório Confidencial 92/93. Lisboa, LNEC, 1993.

174 - CEN/TC88/WG15/TG2 -N65 - *In Situ Formed Thermal Insulation Products for Buildings. Expanded Clay Lightweight Agregate Loose Fill for Roofs, Ceilings and Floors. Part 1: Specification for Expanded Clay Lightweight Aggregate Loose Fill, 2nd Working Draft.* CEN, August 1991.

175 - ALBENQUE, M.; FONTAINE, T. - *Une Méthode de Mesure de la Résistance Unitaire des Granulats Légers d'Argile et de Schiste Expansés.* Annales ITBTP Nº 367, Série Essais et Mesures Nº 162. ITBTP, Paris, Dec. 1978.

176 - BSI - BS 3797 - *Specification for Lightweight Aggregates for Masonry Units and Structural Concrete.* BSI, London, 1990.

177 - HAMLOT, F. H. - *Estudo do Betão com Inertes de Argila Expandida LECA* - Relatório, Lisboa, LNEC, 1972.

178 - DARCEMONT M. - *L'Acceleration de Durcissement des Produits en Béton par Traitement Thermique.* Monographie nº 9, CERIB, França, 1979.

179 - SHORT, A.; KINNIBURGH, W. - *Lightweight Concrete* - 3rd Edition. Applied Science Publishers, England, 1978.

180 - IGPAI - NP-1383 - *Betões - Preparação de Provetes para Ensaios de Compressão e de Flexão.* IGPAI, 1976.

181 - RILEM - *Recommandations de la RILEM - CPC 3.2 - Surfacage des Eprouvettes en Béton.* Matériaux et Constructions, pp. 234 a 241. Vol. 12, Nº 69, Mai - Juin 1979.

182 - ISO - ISO 4013 - *Concrete - Determination of Flexural Strength of Test Specimens.* Géneve, ISO 1978.

183 - RILEM - *Recommandation de la RILEM - CPC 8 - Module d'elasticité du béton en compression.* Matériaux et Constructions. Vol. 6, Nº 30, 1972.

184 - CARVALHO, F.; TRIGO, J. T. - *Estudo para homologação dos blocos de betão para alvenaria "Argibetão".* Relatório Confidencial 65/86 - NPC. Lisboa, LNEC, 1986.

185 - TRIGO, J. T.; CASTRO, A.T. - *Parecer sobre alvenarias de blocos LECA.* Lisboa , LNEC, 1972.

186 - DIAS, J. M. - *Caracterização Experimental de Blocos de Betão de Inertes Leves de Argila Expandida "LECA", para Paredes de Alvenaria, da Fábrica Norueguesa do Grupo AKER EXCLAY.* Relatório Confidencial 269/91 - NPC, Lisboa, LNEC, 1991.

187 - ITBTP - *Fiches d'information I - Granulats légers pour bétons de structure. II - Granulats légers pour bétons légers isolants et porteurs.* Annales ITBTP Nº 381. Série Béton Nº 193. ITBTP, Paris, 1980.

188 - AFNOR - NF P 14-101 - *Agglomérés. Blocs en Béton pour Murs et Cloisons Definitions.* AFNOR, Paris, 1983.

189 - AFNOR - NF P 14-402 - *Agglomérés. Blocs en Béton pour Murs et Cloisons Dimensions.* AFNOR, Paris, 1983.

190 - BSI - BS 6073: Part 1 - *Precast Concrete Masonry Units. Specification for Precast Concrete*

Masonry Units. BSI, London, 1981.

191 - ASTM - ASTM C90-90 - *Standard Specification for Load-Bearing Concrete Masonry Units.* ASTM, Philadelphia, 1991.

192 - ASTM - ASTM C129 - 85 - *Standard Specification for Non Load-Bearing Concrete Masonry Units.* ASTM, Philadelphia, 1991.

193 - LASHKARI, M - *Cosmos/M - User Guide - Stress, Vibration, Buckling, Dynamics, Fluid, Electromagnetics and Heat Transfer Analysis.* Version 1.6. SRAC, California, 1990.

194 - ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. - *The Finite Element Method.* 4th Ed. McGraw Hill Book Company, U.K, 1989.

195 - BATHE, K. J. - *Finite Procedures in Engineering Analysis.* Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1982.

196 - DAMJANIC, F. B. - *Reinforced Concrete Failure Prediction Under Both Static and Transient Conditions* - Ph. D. Thesis, University College, Swansea, 1983.

197 - DAMJANIC, F. B; OWEN, D. R. J. - *Practical Considerations for Thermal Transient Finite Element Analysis Using Isoparametric Elements. Nuclear Engng* Design, pp. 109-129. Vol. 69, 1982.

198 - LNEC - DH 383 - YTONG - *Sistema de Construção de Paredes de Alvenaria de Blocos de Betão Celular Autoclavado.* LNEC, Lisboa, Dezembro de 1993.

199 - DELGADO, B. M.- *Estudo Experimental para Caracterização Térmica de Paredes em Regime Permanente.* Lisboa, LNEC, 1970.

200 - ALMEIDA, J. V. - *Verificação da Qualidade de Tijolos e Telhas "Torreense".* Relatório de 1987. Relatório Confidencial 85/88 - NCP. Lisboa, LNEC, 1988.

201 - ALMEIDA, J. V; LUCAS, J. A. - *Verificação Periódica da Qualidade de Tijolos Cerâmicos da "Cerâmica Torrense".* Relatório Relativo à Produção de 1989. Relatório Confidencial - NCP. Lisboa, LNEC, 1980.

202 - ALMEIDA, J. V; LUCAS, J. A. - *Verificação Periódica da Conformidade com as Normas NP - 80 e NP - 834 dos Tijolos Cerâmicos da "Cerâmica Torrense".* Relatório Relativo à Produção de 1990. Relatório Confidencial 109/91 - NCP. Lisboa, LNEC, 1991.

203 - LNEC - *DMC. Boletim nº 1149/94.* Lisboa, LNEC, 1994.

204 - ISO - ISO 6781 -*Thermal insulation - Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes - Infrared Method* .ISO,1983.

205 - AFNOR - NF P 15-307 - *Liants Hydrauliques. Ciments à Maçonner CM.* Paris, AFNOR, Oct. 1969.

206 - ASTM - ASTM C91-91 - *Standard Specification for Masonry Cement.* ASTM, Philadelphia, 1991.

207 - ASTM - ASTM C144-91 - *Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar.* ASTM, Philadelphia, 1991.

208 - RILEM - *Recommandations Générales pour les Méthodes d'Essai des Murs Porteurs. Recommandations Provisoires.* Matériaux et Constructions, pp. 431 a 445. Vol. 13, Nº 78, RILEM, 1980.

209 - IGPAI - NP 956 - *Inertes para Argamassas e Betões. Determinação dos Teores em Água Total*

e em Água Superficial. IGPAI, Lisboa, 1973.

210 - IGPAI - NP 955 - *Inertes para Argamassas e Betões. Determinação da Baridade.* IGPAI, Lisboa, 1973.

211 - LNEC - E 199 - *Solos. Ensaio do Equivalente de Areia.* Lisboa, LNEC, 1967.

212 - IPQ - NP EN 196-1 - *Métodos de Ensaios de Cimentos. Determinação das Resistências Mecânicas.* Lisboa, IPQ, 1990.

213 - ABRANTES, V. - *Análise Numérica e Experimental do Comportamento Térmico de Coberturas com Desvão. Tese de Doutoramento.* Porto, FEUP, Nov. 1984.

214 - CARVALHO, F. - *Granulado de Cortiça para Betões. Sua Utilização em Blocos para Alvenaria.* Relatório 174/87. Lisboa, LNEC, 1987.

ANEXO I

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO BETÃO USADO NA REALIZAÇÃO DE BLOCOS DE BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA

ANEXO I

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO BETÃO USADO NA REALIZAÇÃO DE BLOCOS DE BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA

ÍNDICE

I.1 - GENERALIDADES
I.2 - CARACTERÍSTICAS DOS INERTES UTILIZADOS
I.3 - CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO BETÃO

ANEXO I

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO BETÃO USADO NA REALIZAÇÃO DE BLOCOS DE BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA

I.1 - GENERALIDADES

Apresenta-se neste Anexo I informação complementar relativa à caracterização experimental do betão usado na realização de blocos de betão de argila expandida, não referida no Capítulo 5.

I.2 - CARACTERÍSTICAS DOS INERTES UTILIZADOS

Características dos inertes usados na realização do betão de argila expandida :

a) **Areia fina**

- Teor de humidade - (NP -956 [209]) - 4.1 %
- Massa volúmica seca - (NP - 955 [210]) - 1578 kg/ m^3
- Massa volúmica húmida - (NP - 955 [210]) - 1274 kg/ m^3

- Análise granulométrica

Abertura da malha do peneiro (mm)	**Percentagem total de inerte retido no peneiro** (%)
4.8	0
2.4	1
1.2	3
0.6	19
0.3	69
0.15	99
0.075	100
resto	0

b) **Leca 2 / 4**

- Teor de humidade - (NP -956 [209]) - 25 %
- Massa volúmica seca - (NP - 955 [210]) - 580 kg/ m^3
- Massa volúmica húmida - (NP - 955 [210]) - 725 kg/ m^3
- Resistência ao esmagamento - (CEN/TC88/WG15/TG2 [174]) - 2.0 MPa

- Análise granulométrica

Abertura da malha do peneiro (mm)	**Percentagem total de inerte retido no peneiro** (%)
9.5	0
4.8	1
2.4	89
1.2	95
0.6	97
0.3	98
0.15	99
0.075	99
resto	1

c) **Leca 3 / 8**

- Teor de humidade - (NP -956 [209]) - 7.9 %
- Massa volúmica seca - (NP - 955 [210]) - 340 kg/ m^3
- Massa volúmica húmida - (NP - 955 [210]) - 370 kg/ m^3
- Resistência ao esmagamento - (CEN/TC88/WG15/TG2 [174]) - 0.7 MPa

- Análise granulométrica

Abertura da malha do peneiro (mm)	**Percentagem total de inerte retido no peneiro** (%)
12.5	0
9.5	21
4.8	88
2.4	99
resto	1

I.3 - CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO BETÃO

Apresenta-se seguidamente o boletim de ensaio 12/93 - LNEC/LEPC que sintetiza os procedimentos e resultados.

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

O ENG. CHEFE DO DEPARTAMENTO
J. Vasconcelos Paiva

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referencia ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização.
Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas nas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do Laboratório.

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS
Núcleo de Comportamento das Construções
LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE PLÁSTICOS CELULARES (LNEC/LEPC)

OBRA 083/53/385
PROC° 083/73/11484 **BOLETIM n° 12/93 - LNEC/LEPC**

ENTIDADE REQUISITANTE:
ENDEREÇO:
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: 5/93
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA: Betão de argila expandida
DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA:
DATA DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO: 93/08/07

BETÃO DE ARGILA EXPANDIDA "LECA"
DETERMINAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

1 — NORMA/ESPECIFICAÇÃO DE ENSAIO

Norma Internacional ISO 8301 — "Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow metter apparatus".

O ensaio incidiu sobre 5 provetes com as seguintes dimensões médias: comprimento e largura iguais a 300 mm e espessuras de ensaio indicadas no quadro 1 (vd.3).

Cada provete era constituído por dois elementos idênticos (300 mm x 150 mm) justapostos.

Os provetes submetidos a ensaio foram inicialmente secos em estufa ventilada à temperatura de 110±5°C.

O ensaio decorreu num ambiente caracterizado por uma temperatura de 23±1°C e uma humidade relativa de 50±3%.

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

O ENG. CHEFE DO DEPARTAMENTO
J. Vasconcelos Paiva

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas nas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do Laboratório.

2 — PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM

A amostragem foi efectuada pela firma LECA PORTUGAL - Argilas expandidas Lda.

Os provetes submetidos a ensaio foram preparados por técnicos do LNEC.

3 — RESULTADOS DO ENSAIO

Os resultados dos ensaios são apresentados no quadro 1.

Quadro 1 — Valores médios obtidos no ensaio de determinação da condutibilidade térmica de provetes de betão de argila expandida "LECA"

Provete	Características dos provetes				Condições de ensaio				Resultados do ensaio
	Espessura de ensaio l (mm)	Massa inicial (g)	Massa após ensaio (g)	Massa vol. apar. após ensaio (kg/m³)	Dir. / sent. do fluxo	Tempª da face quente T_q (°C)	Tempª da face fria T_c (°C)	Tempª média T_m (°C)	Condutibilidade térmica λ (W/m.°C)
A	85,3	8714,0	8739,8	1130,9	vert. / asc.	16,3	-0,1	8,1	0,45
B	85,8	8721,0	8743,0	1113,6	vert. / asc.	16,5	-0,2	8,2	0,43
C	85,4	8698,6	8722,7	1119,9	vert. / asc.	16,3	-0,2	8,1	0,43
D	86,1	8663,4	8690,0	1110,3	vert. / asc.	16,6	-0,2	8,2	0,41
E	87,1	8774,7	8801,0	1107,9	vert. / asc.	16,4	-0,2	8,1	0,44
Média	**85,9**	-	-	**1116,5**	-	-	-	**8,1**	**0,43**

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

O ENG. CHEFE DO DEPARTAMENTO
J. Vasconcelos Paiva

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização.
Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas nas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do Laboratório.

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS
Núcleo de Comportamento das Construções
LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE PLÁSTICOS CELULARES (LNEC/LEPC)

4 — OBSERVAÇÕES

Os resultados dos ensaios dizem exclusivamente respeito aos provetes ensaiados.

O equipamento fluximétrico para determinação da condutibilidade térmica é calibrado, por técnicos do LNEC/LEPC, mensalmente para a temperatura média de ensaio de 10°C e semestralmente na gama de temperatura média de ensaio de 0°C a 30°C. Utiliza-se um provete de referência do National Instutute for Science and Tecnology (NIST, ex-NBS), identificado por "SRM 1450b. Fibrous Board Insulation Material", cuja curva de calibração se encontra em arquivo no LNEC/LEPC. Os procedimentos de calibração constam, igualmente, deste arquivo.

LISBOA, 11 de Setembro de 1993

O Técnico Experimentador
Luís Matias
Bolseiro de Investigação

O Chefe do LNEC/LEPC
Assist. Investigação

O CHEFE DO NCCt

ANEXO II

EXEMPLO DE FICHEIROS DE ENTRADA DE DADOS E DE RESULTADOS DO PROGRAMA *COSMOS/M*

ANEXO II

EXEMPLO DE FICHEIROS DE ENTRADA DE DADOS E DE RESULTADOS DO PROGRAMA *COSMOS/M*

ÍNDICE

II.1 - GENERALIDADES
II.2 - GEOMETRIA E MALHA DO ELEMENTO DE REFERÊNCIA
II.3 - FICHEIRO DE ENTRADA DE DADOS
II.4 - FICHEIRO DE RESULTADOS

ANEXO II

EXEMPLO DE FICHEIROS DE ENTRADA DE DADOS E DE RESULTADOS DO PROGRAMA *COSMOS/M*

II.1 - GENERALIDADES

Com o objectivo de ilustrar a forma de utilização do programa *COSMOS/M*, apresenta-se neste Anexo II , um exemplo de ficheiros de entrada de dados e saída de resultados relativos ao elemento de referência referido no Capítulo 6.

II.2 - GEOMETRIA E MALHA DO ELEMENTO DE REFERÊNCIA

Apresenta-se na Fig. II.1 a geometria e malha adoptada na simulação bidimensional do comportamento térmico, do elemento de referência, em regime estacionário, através do método dos elementos finitos.

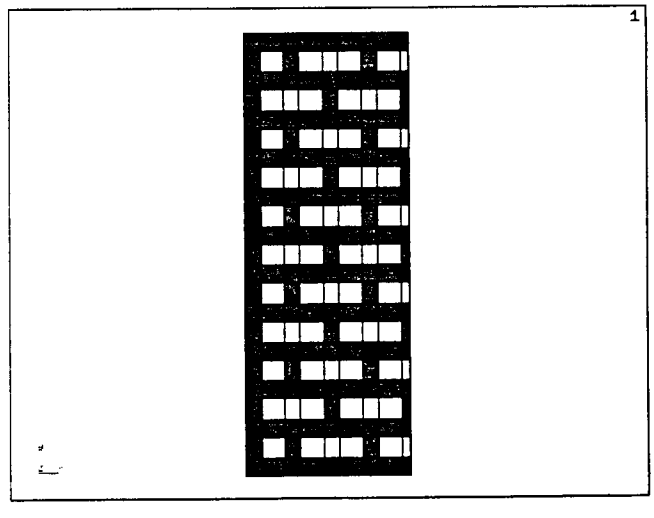


Fig. II.1 - Geometria e malha adoptada na simulação do elemento de referência
(Corte horizontal ,com simplificação de simetria)

II.3 - FICHEIRO DE ENTRADA DE DADOS

Apresenta-se de seguida o ficheiro de entrada de dados do elemento de referência.

FICHEIRO DE ENTRADA DE DADOS DO ELEMENTO DE REFERÊNCIA

```
C*  ================================================
C*  Input to the problem : ELEMENTO DE REFERENCIA
C*  Created on                  2/05/1994  11:39
C*  ================================================
EG,1,SHELL4
RC,1,1,.1
KX, ,.35
KY
KX,2,.082
KY,2
KX,3,.074
KY,3
NODE,1
NODE,2,.012
NODE,3,.0297
NODE,4,.0417
NODE,5,.05945
NODE,6,.07145
NODE,7,.0892
NODE,8,.1012
NODE,9,.119
NODE,10,.125
NGEN,1,10,1,10,1, ,.012
NGEN,1,20,1,10,1, ,.0262
NGEN,1,30,1,10,1, ,.0382
NGEN,1,40,1,10,1, ,.0524
NGEN,1,50,1,10,1, ,.0644
NGEN,1,60,1,10,1, ,.0786
NGEN,1,70,1,10,1, ,.0906
NGEN,1,80,1,10,1, ,.1048
NGEN,1,90,1,10,1, ,.1168
NGEN,1,100,1,10,1, ,.131
NGEN,1,110,1,10,1, ,.143
NGEN,1,120,1,10,1, ,.1572
NGEN,1,130,1,10,1, ,.1692
NGEN,1,140,1,10,1, ,.1834
NGEN,1,150,1,10, , ,.1954
NGEN,1,160,1,10, , ,.2096
NGEN,1,170,1,10, , ,.2216
NGEN,1,180,1,10, , ,.2358
NGEN,1,190,1,10, , ,.2478
NGEN,1,200,1,10, , ,.262
NGEN,1,210,1,10, , ,.274
NGEN,1,220,1,10, , ,.2882
NGEN,1,230,1,10, , ,.3002
E,1,1,2,12,11
EGEN,8,1,1
EGEN,22,10,1,9,1
ACTIVE MAT 2
E,13,14,15,25,24
EGEN,10,20,13,13,1, , , ,18
E,14,15,16,26,25
EGEN,5,40,14,14,1, , , ,36
E,15,16,17,27,26
EGEN,10,20,15,15,1, , , ,18
E,17,18,19,29,28
```

```
EGEN,10,20,17,17,1, , , ,18
E,18,19,20,30,29
EGEN,5,40,18,18,1, , , ,36
E,29,32,33,43,42
EGEN,4,40,29,29,1, , , ,36
E,30,33,34,44,43
EGEN,4,40,30,30,1, , , ,36
E,34,37,38,48,47
EGEN,4,40,34,34,1, , , ,36
ACTIVE MAT 3
E,11,12,13,23,22
EGEN,5,40,11,11,1, , , ,36
EC,1,1,25,0,9
EC,199,3,7.62,20,207,1
PRINT, , , , , ,1,1,1
RENUMBER
```

II.4 - FICHEIRO DE RESULTADOS

Apresenta-se de seguida o ficheiro de resultados do elemento de referência.

FICHEIRO DE RESULTADOS ELEMENTO DE REFERÊNCIA

Structural Research and Analysis Corporation HSTAR 1.6 9/20/1995 Page 1

Total number of nodes = 240
Total number of elements = 207
Total number of words in stiffness matrix = 2756
Maximum half bandwidth = 12
Total number of stiffness blocks = 1

Type of analysis :Linear Steady State

Temperatures at time step = 1 (Time = 0.0000E+00)

Node	Temperature	Node	Temperature	Node	Temperature	Node	Temperature
1	0.56976	2	0.55942	3	0.51149	4	0.47424
5	0.40525	6	0.40278	7	0.46311	8	0.46211
9	0.40432	10	0.38813	11	1.1538	12	1.0111
13	0.94312	14	0.93101	15	0.69912	16	0.69642
17	0.91084	18	0.91107	19	0.69100	20	0.69598
21	1.9091	22	2.0163	23	1.8945	24	1.8909
25	2.1957	26	2.1928	27	1.8808	28	1.8762
29	2.1869	30	2.1842	31	2.6566	32	2.5025
33	2.2378	34	2.2648	35	2.5627	36	2.5607
37	2.2550	38	2.2540	39	2.5285	40	2.6119
41	3.4918	42	3.6394	43	3.8689	44	3.8236
45	3.5122	46	3.5088	47	3.8008	48	3.7986
49	3.5264	50	3.4433	51	4.2560	52	4.1383
53	4.2005	54	4.1920	55	3.8825	56	3.8779
57	4.1698	58	4.1722	59	3.8705	60	3.8746
61	5.0680	62	5.1843	63	5.1108	64	5.1140
65	5.4125	66	5.4119	67	5.1142	68	5.1100
69	5.4094	70	5.4052	71	5.8364	72	5.6858
73	5.4433	74	5.4810	75	5.7811	76	5.7809
77	5.4828	78	5.4826	79	5.7527	80	5.8356
81	6.6838	82	6.8338	83	7.0729	84	7.0323

85	6.7274	86	6.7257	87	7.0201	88	7.0189
89	6.7479	90	6.6650	91	7.4537	92	7.3364
93	7.4050	94	7.3998	95	7.0961	96	7.0941
97	7.3880	98	7.3912	99	7.0910	100	7.0951
101	8.2693	102	8.3865	103	8.3168	104	8.3215
105	8.6238	106	8.6252	107	8.3304	108	8.3268
109	8.6266	110	8.6225	111	9.0396	112	8.8893
113	8.6491	114	8.6889	115	8.9924	116	8.9935
117	8.6982	118	8.6990	119	8.9696	120	9.0524
121	9.8879	122	10.038	123	10.279	124	10.240
125	9.9384	126	9.9379	127	10.235	128	10.234
129	9.9641	130	9.8813	131	10.658	132	10.541
133	10.612	134	10.608	135	10.307	136	10.306
137	10.603	138	10.607	139	10.307	140	10.311
141	11.473	142	11.590	143	11.523	144	11.529
145	11.835	146	11.838	147	11.546	148	11.543
149	11.844	150	11.840	151	12.241	152	12.092
153	11.855	154	11.897	155	12.204	156	12.206
157	11.914	158	11.916	159	12.188	160	12.271
161	13.087	162	13.237	163	13.482	164	13.446
165	13.150	166	13.152	167	13.454	168	13.455
169	13.186	170	13.103	171	13.852	172	13.737
173	13.814	174	13.812	175	13.519	176	13.522
177	13.824	178	13.829	179	13.530	180	13.534
181	14.659	182	14.777	183	14.721	184	14.733
185	15.050	186	15.059	187	14.772	188	14.771
189	15.077	190	15.073	191	15.418	192	15.272
193	15.051	194	15.101	195	15.422	196	15.429
197	15.142	198	15.147	199	15.423	200	15.507
201	16.242	202	16.397	203	16.672	204	16.655
205	16.373	206	16.382	207	16.700	208	16.705
209	16.430	210	16.346	211	16.976	212	16.874
213	17.015	214	17.026	215	16.742	216	16.754
217	17.079	218	17.086	219	16.776	220	16.779
221	17.709	222	17.852	223	17.953	224	17.987
225	18.260	226	18.275	227	18.061	228	18.063
229	18.298	230	18.294	231	18.263	232	18.283
233	18.372	234	18.447	235	18.569	236	18.583
237	18.509	238	18.513	239	18.597	240	18.617

Gradients at time step = 1 (Time = 0.0000E+00)

Node	Gradient - X	Gradient - Y	Gradient - Z	Gradient - N
1	-0.86184	48.666	0.00000E+00	48.674
2	-1.7849	37.637	0.00000E+00	37.679
3	-2.9062	35.969	0.00000E+00	36.086
4	-3.4956	38.065	0.00000E+00	38.225
5	-2.0463	24.489	0.00000E+00	24.574
6	1.5966	24.471	0.00000E+00	24.523
7	1.6579	37.311	0.00000E+00	37.348
8	-1.6652	37.413	0.00000E+00	37.450
9	-2.9721	23.890	0.00000E+00	24.074
10	-2.6972	25.654	0.00000E+00	25.795
11	-11.891	50.931	0.00000E+00	52.301
12	-7.8648	54.215	0.00000E+00	54.782
13	-2.4236	51.482	0.00000E+00	51.539
14	-7.0367	52.833	0.00000E+00	53.299
15	-6.6446	64.940	0.00000E+00	65.279
16	5.9277	64.925	0.00000E+00	65.195
17	6.0494	52.810	0.00000E+00	53.156
18	-6.1724	52.690	0.00000E+00	53.051
19	-5.7669	64.619	0.00000E+00	64.876
20	0.82963	65.230	0.00000E+00	65.235
21	8.9312	57.744	0.00000E+00	58.431

22	1.0231	55.655	0.00000E+00	55.665
23	-3.5888	47.802	0.00000E+00	47.936
24	8.4378	49.380	0.00000E+00	50.095
25	8.4649	67.989	0.00000E+00	68.514
26	-8.9072	68.018	0.00000E+00	68.599
27	-8.9812	49.745	0.00000E+00	50.550
28	8.5352	49.725	0.00000E+00	50.452
29	8.5024	66.905	0.00000E+00	67.443
30	-0.45200	70.221	0.00000E+00	70.223
31	-12.843	60.551	0.00000E+00	61.898
32	-13.901	60.291	0.00000E+00	61.873
33	-6.3507	71.738	0.00000E+00	72.019
34	9.5194	70.465	0.00000E+00	71.105
35	8.3063	48.727	0.00000E+00	49.430
36	-8.6949	48.711	0.00000E+00	49.481
37	-8.6529	70.021	0.00000E+00	70.553
38	7.6680	70.127	0.00000E+00	70.545
39	14.658	49.370	0.00000E+00	51.501
40	13.896	47.093	0.00000E+00	49.100
41	12.308	61.250	0.00000E+00	62.475
42	12.635	60.817	0.00000E+00	62.116
43	4.5945	71.252	0.00000E+00	71.400
44	-10.658	70.233	0.00000E+00	71.038
45	-8.9156	48.860	0.00000E+00	49.666
46	8.0825	48.764	0.00000E+00	49.430
47	8.1329	69.802	0.00000E+00	70.274
48	-7.7382	69.955	0.00000E+00	70.382
49	-14.575	49.475	0.00000E+00	51.577
50	-13.863	47.245	0.00000E+00	49.237
51	-9.8123	60.435	0.00000E+00	61.227
52	-3.1483	57.616	0.00000E+00	57.702
53	1.4009	45.869	0.00000E+00	45.890
54	-9.0753	47.816	0.00000E+00	48.669
55	-8.9071	69.302	0.00000E+00	69.872
56	8.0320	69.395	0.00000E+00	69.858
57	8.3238	48.627	0.00000E+00	49.334
58	-8.3726	48.588	0.00000E+00	49.304
59	-8.1374	68.521	0.00000E+00	69.002
60	0.67635	71.866	0.00000E+00	71.869
61	9.6904	60.609	0.00000E+00	61.379
62	2.7684	57.729	0.00000E+00	57.795
63	-1.9406	45.906	0.00000E+00	45.947
64	8.5448	47.758	0.00000E+00	48.516
65	8.3820	69.235	0.00000E+00	69.740
66	-8.4125	69.387	0.00000E+00	69.895
67	-8.5624	48.612	0.00000E+00	49.361
68	8.2334	48.546	0.00000E+00	49.239
69	8.0627	68.493	0.00000E+00	68.966
70	-0.69420	71.830	0.00000E+00	71.833
71	-12.551	61.854	0.00000E+00	63.115
72	-13.127	61.321	0.00000E+00	62.710
73	-5.2804	71.235	0.00000E+00	71.431
74	10.026	69.913	0.00000E+00	70.628
75	8.4428	48.676	0.00000E+00	49.403
76	-8.4085	48.643	0.00000E+00	49.364
77	-8.4036	69.489	0.00000E+00	69.995
78	7.5808	69.621	0.00000E+00	70.033
79	14.494	49.349	0.00000E+00	51.433
80	13.813	47.138	0.00000E+00	49.120
81	12.506	61.916	0.00000E+00	63.166
82	13.005	61.364	0.00000E+00	62.727
83	5.0606	71.219	0.00000E+00	71.398
84	-10.281	69.935	0.00000E+00	70.686
85	-8.6581	48.682	0.00000E+00	49.446

86	8.2237	48.618	0.00000E+00	49.309
87	8.2424	69.459	0.00000E+00	69.947
88	-7.6624	69.607	0.00000E+00	70.028
89	-14.521	49.338	0.00000E+00	51.430
90	-13.818	47.125	0.00000E+00	49.109
91	-9.7730	60.800	0.00000E+00	61.580
92	-2.9493	57.915	0.00000E+00	57.990
93	1.7189	45.944	0.00000E+00	45.977
94	-8.7725	47.767	0.00000E+00	48.566
95	-8.6387	69.158	0.00000E+00	69.695
96	8.1944	69.260	0.00000E+00	69.743
97	8.4135	48.511	0.00000E+00	49.235
98	-8.2976	48.458	0.00000E+00	49.163
99	-8.0920	68.366	0.00000E+00	68.843
100	0.68012	71.702	0.00000E+00	71.705
101	9.7621	60.815	0.00000E+00	61.594
102	2.9131	57.925	0.00000E+00	57.998
103	-1.7731	45.951	0.00000E+00	45.986
104	8.7118	47.764	0.00000E+00	48.552
105	8.5721	69.150	0.00000E+00	69.679
106	-8.2489	69.261	0.00000E+00	69.750
107	-8.4510	48.510	0.00000E+00	49.240
108	8.2731	48.452	0.00000E+00	49.153
109	8.0780	68.360	0.00000E+00	68.836
110	-0.68388	71.695	0.00000E+00	71.698
111	-12.528	61.965	0.00000E+00	63.218
112	-13.049	61.411	0.00000E+00	62.782
113	-5.1267	71.251	0.00000E+00	71.436
114	10.207	69.940	0.00000E+00	70.681
115	8.5964	48.667	0.00000E+00	49.420
116	-8.2714	48.601	0.00000E+00	49.300
117	-8.2857	69.423	0.00000E+00	69.916
118	7.6333	69.566	0.00000E+00	69.984
119	14.504	49.309	0.00000E+00	51.398
120	13.807	47.098	0.00000E+00	49.081
121	12.538	61.950	0.00000E+00	63.206
122	13.079	61.401	0.00000E+00	62.778
123	5.1841	71.253	0.00000E+00	71.442
124	-10.133	69.931	0.00000E+00	70.661
125	-8.5279	48.663	0.00000E+00	49.404
126	8.3355	48.608	0.00000E+00	49.317
127	8.3451	69.434	0.00000E+00	69.933
128	-7.6007	69.570	0.00000E+00	69.984
129	-14.492	49.315	0.00000E+00	51.400
130	-13.805	47.105	0.00000E+00	49.086
131	-9.7421	60.772	0.00000E+00	61.548
132	-2.8705	57.880	0.00000E+00	57.951
133	1.8282	45.932	0.00000E+00	45.969
134	-8.6447	47.748	0.00000E+00	48.524
135	-8.4903	69.153	0.00000E+00	69.672
136	8.3259	69.284	0.00000E+00	69.783
137	8.5071	48.540	0.00000E+00	49.280
138	-8.2457	48.485	0.00000E+00	49.182
139	-8.0639	68.420	0.00000E+00	68.894
140	0.69030	71.756	0.00000E+00	71.760
141	9.7795	60.718	0.00000E+00	61.501
142	2.9960	57.846	0.00000E+00	57.923
143	-1.6374	45.905	0.00000E+00	45.934
144	8.8666	47.755	0.00000E+00	48.571
145	8.7447	69.177	0.00000E+00	69.728
146	-8.1022	69.277	0.00000E+00	69.749
147	-8.3447	48.545	0.00000E+00	49.257
148	8.3558	48.511	0.00000E+00	49.225
149	8.1275	68.448	0.00000E+00	68.929

150	-0.67279	71.791	0.00000E+00	71.794
151	-12.463	61.789	0.00000E+00	63.033
152	-12.930	61.239	0.00000E+00	62.589
153	-4.9540	71.112	0.00000E+00	71.284
154	10.401	69.877	0.00000E+00	70.647
155	8.7625	48.695	0.00000E+00	49.477
156	-8.1358	48.653	0.00000E+00	49.329
157	-8.1540	69.573	0.00000E+00	70.049
158	7.7331	69.747	0.00000E+00	70.174
159	14.572	49.447	0.00000E+00	51.549
160	13.852	47.228	0.00000E+00	49.217
161	12.557	61.660	0.00000E+00	62.925
162	13.186	61.150	0.00000E+00	62.555
163	5.4297	71.139	0.00000E+00	71.346
164	-9.8214	69.819	0.00000E+00	70.507
165	-8.2535	48.675	0.00000E+00	49.370
166	8.5901	48.707	0.00000E+00	49.459
167	8.5617	69.645	0.00000E+00	70.170
168	-7.5185	69.779	0.00000E+00	70.183
169	-14.500	49.479	0.00000E+00	51.560
170	-13.840	47.267	0.00000E+00	49.251
171	-9.6063	60.328	0.00000E+00	61.088
172	-2.6213	57.457	0.00000E+00	57.516
173	2.1076	45.788	0.00000E+00	45.837
174	-8.3461	47.685	0.00000E+00	48.410
175	-8.1368	69.289	0.00000E+00	69.765
176	8.6430	69.524	0.00000E+00	70.059
177	8.7252	48.780	0.00000E+00	49.554
178	-8.1815	48.735	0.00000E+00	49.417
179	-8.0425	68.813	0.00000E+00	69.281
180	0.71237	72.162	0.00000E+00	72.165
181	9.8253	60.015	0.00000E+00	60.814
182	3.3253	57.254	0.00000E+00	57.351
183	-1.0782	45.684	0.00000E+00	45.696
184	9.4355	47.764	0.00000E+00	48.687
185	9.2865	69.423	0.00000E+00	70.041
186	-7.7365	69.523	0.00000E+00	69.952
187	-8.1165	48.806	0.00000E+00	49.476
188	8.5669	48.835	0.00000E+00	49.581
189	8.2588	68.901	0.00000E+00	69.394
190	-0.65582	72.274	0.00000E+00	72.277
191	-12.118	60.633	0.00000E+00	61.832
192	-12.305	60.228	0.00000E+00	61.472
193	-4.1500	70.818	0.00000E+00	70.940
194	11.132	70.044	0.00000E+00	70.923
195	9.3055	48.977	0.00000E+00	49.854
196	-7.8005	48.971	0.00000E+00	49.588
197	-7.8607	70.291	0.00000E+00	70.729
198	7.9705	70.512	0.00000E+00	70.961
199	14.757	49.898	0.00000E+00	52.034
200	13.993	47.645	0.00000E+00	49.658
201	12.889	59.609	0.00000E+00	60.986
202	14.207	59.477	0.00000E+00	61.151
203	7.0655	71.384	0.00000E+00	71.733
204	-8.6447	70.151	0.00000E+00	70.681
205	-7.5782	48.843	0.00000E+00	49.428
206	9.3234	49.067	0.00000E+00	49.945
207	9.1537	70.641	0.00000E+00	71.232
208	-7.5073	70.742	0.00000E+00	71.139
209	-14.708	49.853	0.00000E+00	51.977
210	-14.003	47.565	0.00000E+00	49.583
211	-8.5067	56.364	0.00000E+00	57.002
212	-0.25711	54.309	0.00000E+00	54.310
213	4.4268	47.320	0.00000E+00	47.526

214	-7.5704	49.270	0.00000E+00	49.848
215	-7.4918	68.822	0.00000E+00	69.228
216	9.6613	69.062	0.00000E+00	69.734
217	9.4616	50.374	0.00000E+00	51.255
218	-8.4090	50.305	0.00000E+00	51.003
219	-8.4661	67.991	0.00000E+00	68.516
220	0.50465	71.371	0.00000E+00	71.373
221	11.948	48.899	0.00000E+00	50.337
222	8.8201	52.407	0.00000E+00	53.144
223	4.2501	50.459	0.00000E+00	50.638
224	9.1075	53.006	0.00000E+00	53.782
225	8.3314	66.322	0.00000E+00	66.844
226	-5.4041	66.391	0.00000E+00	66.610
227	-5.9346	53.235	0.00000E+00	53.565
228	6.6851	53.136	0.00000E+00	53.555
229	6.2552	66.038	0.00000E+00	66.333
230	-0.66570	66.796	0.00000E+00	66.799
231	1.6792	46.194	0.00000E+00	46.224
232	3.3370	35.925	0.00000E+00	36.080
233	5.6250	34.896	0.00000E+00	35.347
234	6.5628	38.344	0.00000E+00	38.901
235	4.0310	25.716	0.00000E+00	26.030
236	-1.4986	25.652	0.00000E+00	25.696
237	-1.9171	37.300	0.00000E+00	37.350
238	2.5284	37.461	0.00000E+00	37.546
239	4.0291	24.891	0.00000E+00	25.215
240	3.3561	26.902	0.00000E+00	27.110

Heat flow entering at time step = 1 (Time = 0.0000E+00)

Node	Heat flow / Unit time	Cumulative heat flow
1	-0.84689E-02	-0.84689E-02
2	-0.20316E-01	-0.20316E-01
3	-0.19240E-01	-0.19240E-01
4	-0.17150E-01	-0.17150E-01
5	-0.15817E-01	-0.15817E-01
6	-0.15666E-01	-0.15666E-01
7	-0.16545E-01	-0.16545E-01
8	-0.16578E-01	-0.16578E-01
9	-0.12611E-01	-0.12611E-01
10	-0.29717E-02	-0.29717E-02
231	0.78951E-02	0.78951E-02
232	0.19174E-01	0.19174E-01
233	0.18553E-01	0.18553E-01
234	0.17365E-01	0.17365E-01
235	0.16604E-01	0.16604E-01
236	0.16346E-01	0.16346E-01
237	0.16643E-01	0.16643E-01
238	0.16611E-01	0.16611E-01
239	0.12987E-01	0.12987E-01
240	0.31853E-02	0.31853E-02

==========
SOLUTION TIME LOG
==========

Input phase	=	194.000
Assemblage of matrices	=	15.000
Calculation of effective heat flow vectors	=	0.000
Triangularization of conductivity matrix	=	0.000
Solution of equations	=	0.000
Miscellaneous calculations	=	30.000

TOTAL SOLUTION TIME = 239.000 Seconds

ANEXO III

VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

ANEXO III

VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

ÍNDICE

III.1 - GENERALIDADES
III.2 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE A 2D
III.3 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE A 3D
III.4 - GEOMETRIAS REAIS A 2D E 3D

ANEXO III

VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

III.1 - GENERALIDADES

Com o objectivo de ilustrar os resultados relativos à simulação numérica do comportamento térmico das soluções de parede de envolvente incorporando blocos de betão de argila expandida, apresentam-se neste Anexo III, alguns exemplos das saídas gráficas fornecidas pelo programa *COSMOS/M*.

III.2 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE A 2D

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

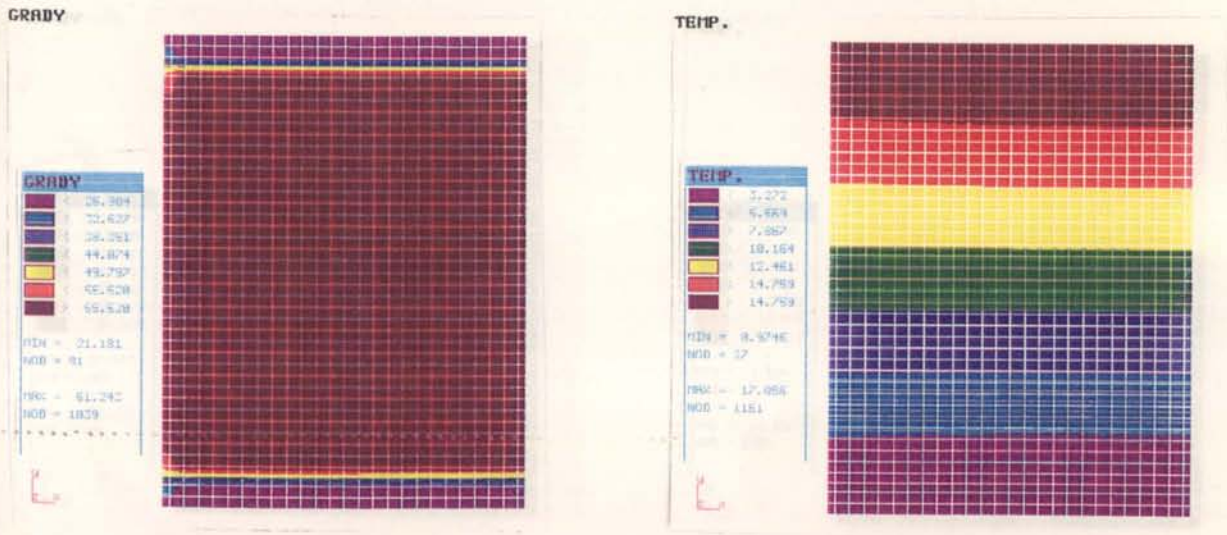


Fig. III.1 - Geometria B01 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

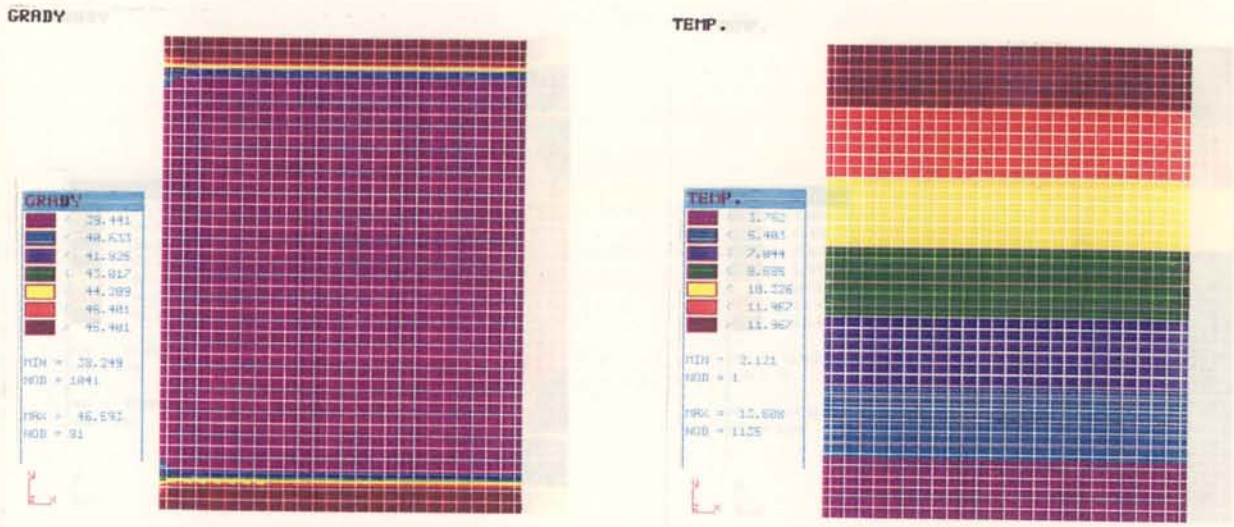


Fig. III.2 - Geometria B01 - sub-ref^a 5 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 1.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

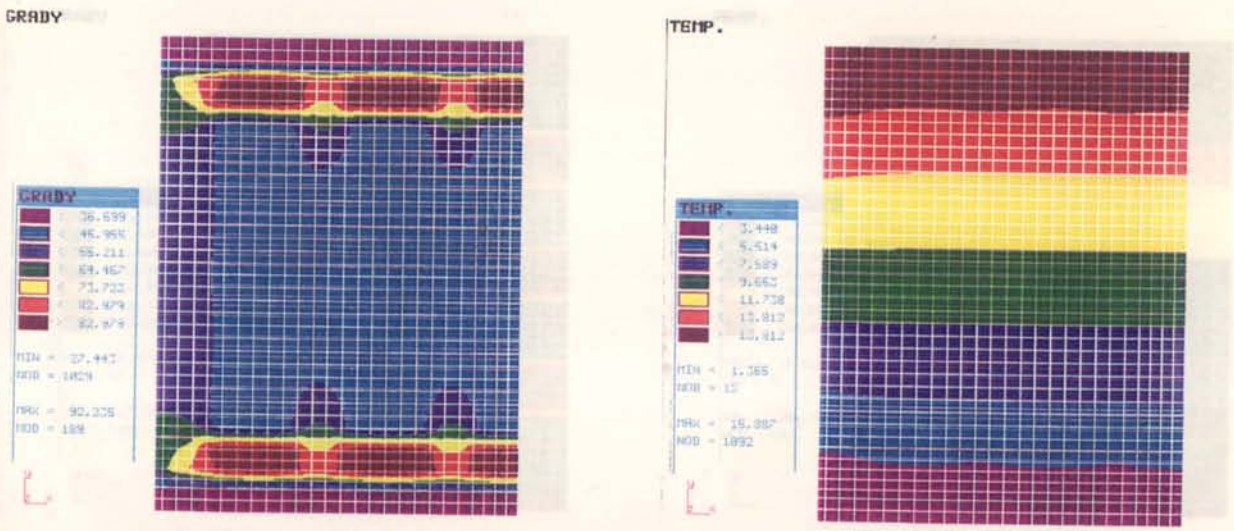


Fig. III.3 - Geometria B06 - sub-ref^a 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

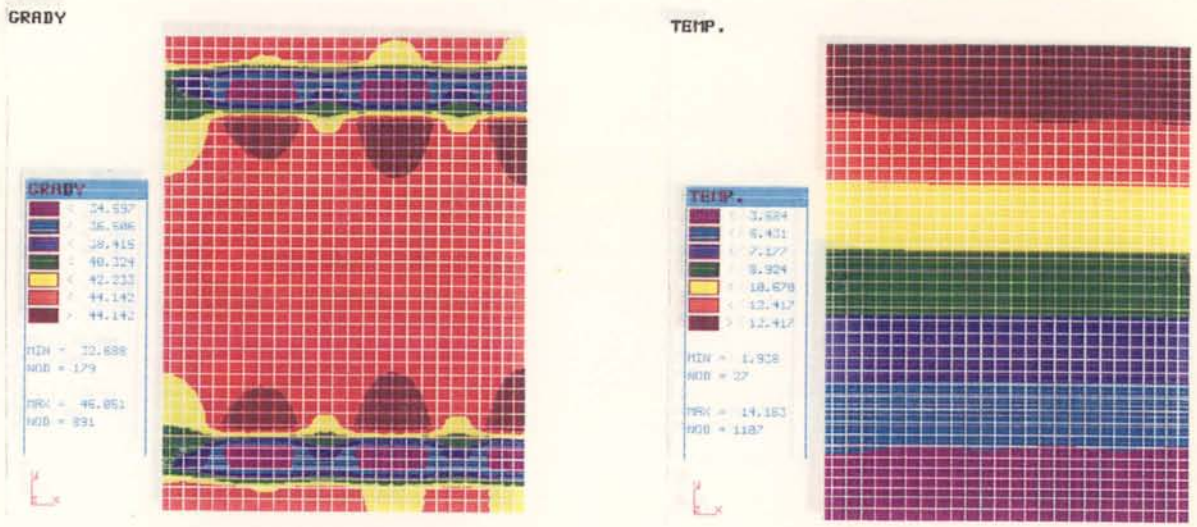


Fig. III.4 - Geometria B06 - sub-refª 4 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 1.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

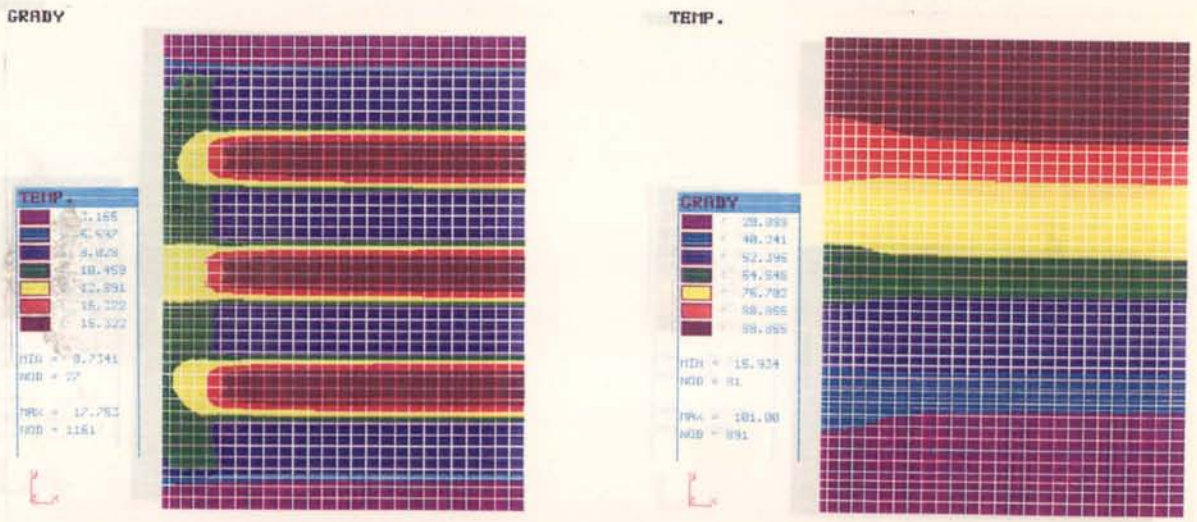


Fig. III.5 - Geometria B08 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

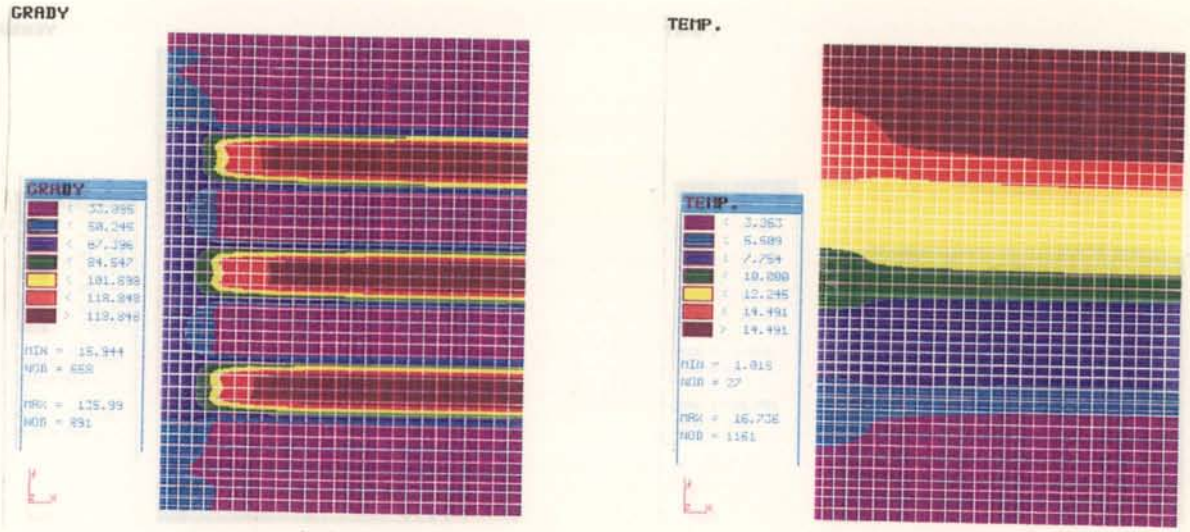


Fig. III.6 - Geometria B08 - sub-refª 4 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 1.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

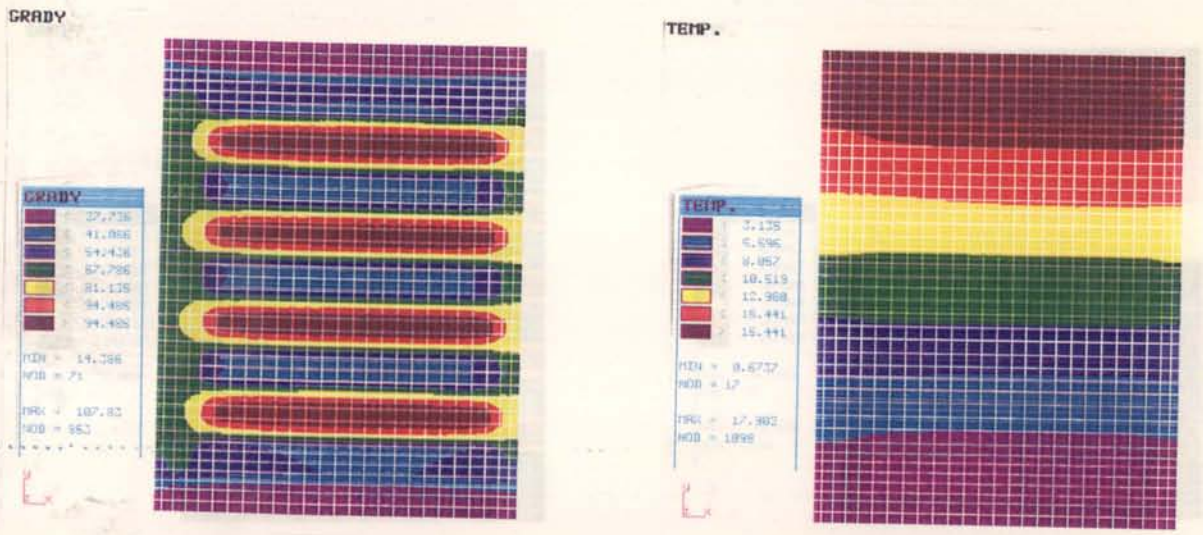


Fig. III.7 - Geometria B11 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

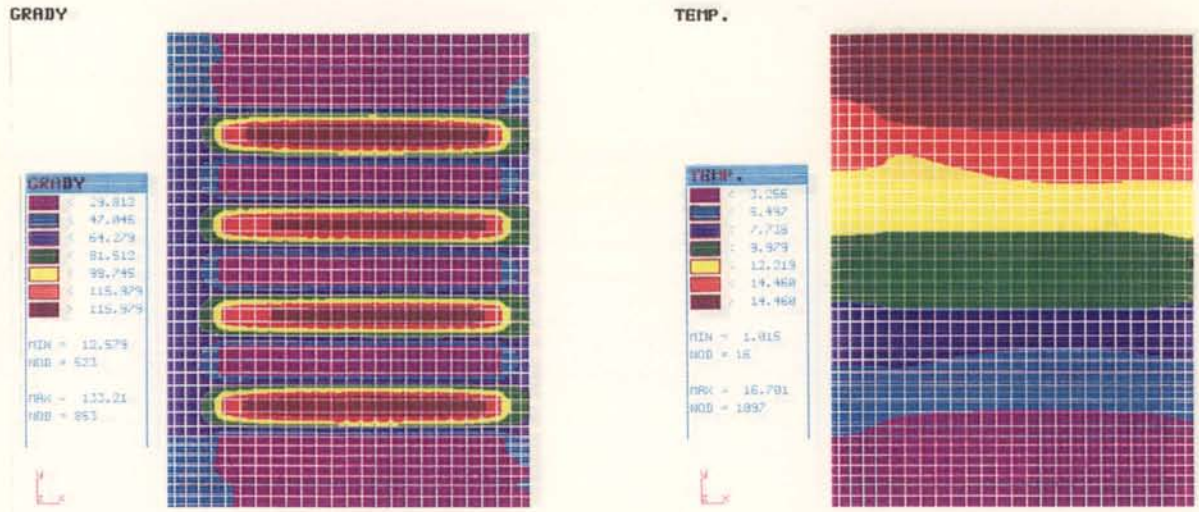


Fig. III.8 - Geometria B11 - sub-refª 5 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 1.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

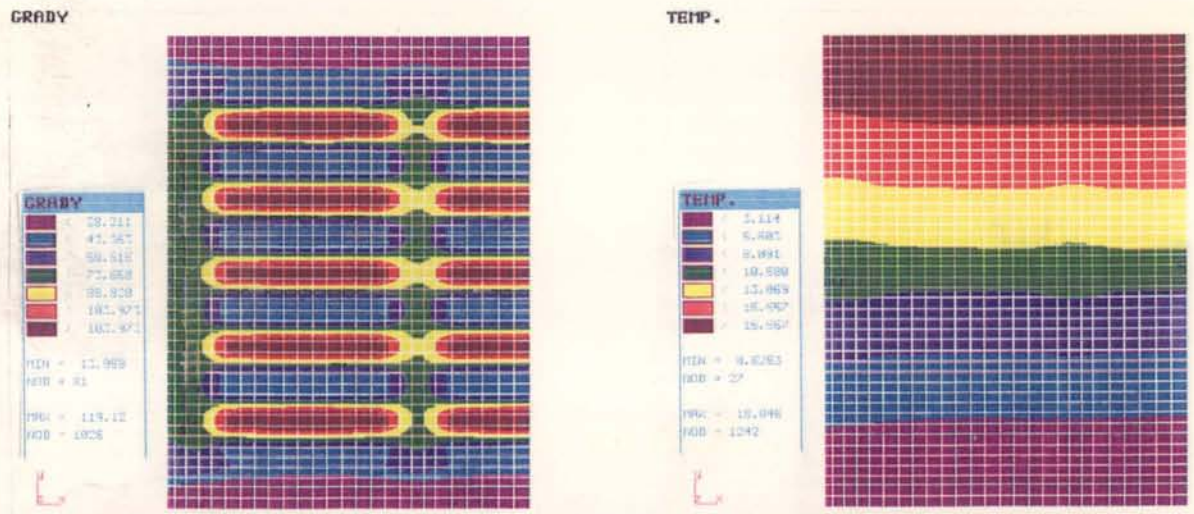


Fig. III.9 - Geometria B15 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas (λ betão = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo *y*

b) Distribuição de temperaturas a 2D

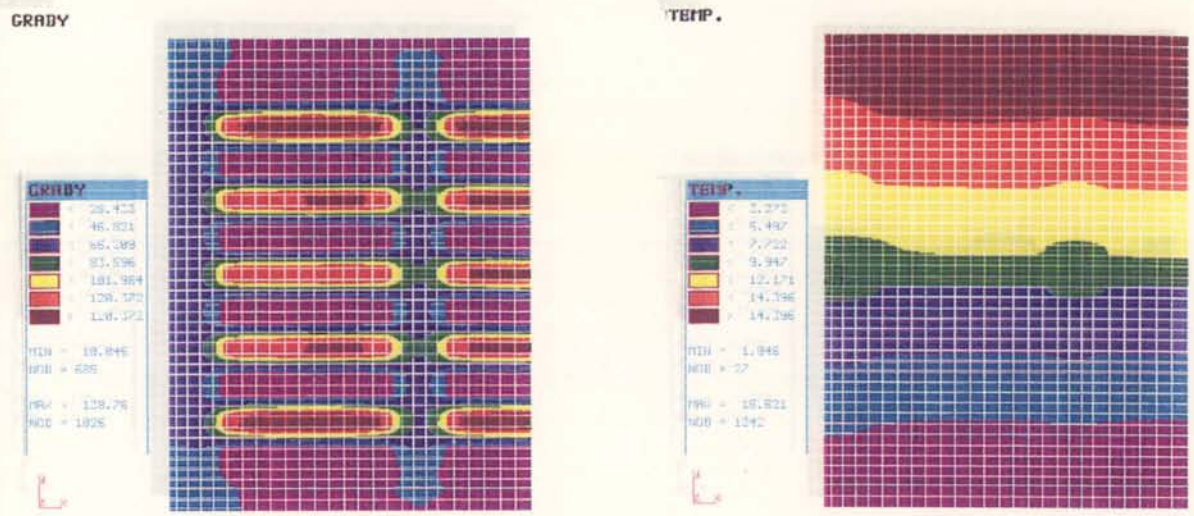


Fig. III.10 - Geometria B15 - sub-refª 5 - Gradiente térmico segundo *y* e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 1.40)

a) Gradiente térmico segundo *y*

b) Distribuição de temperaturas a 2D

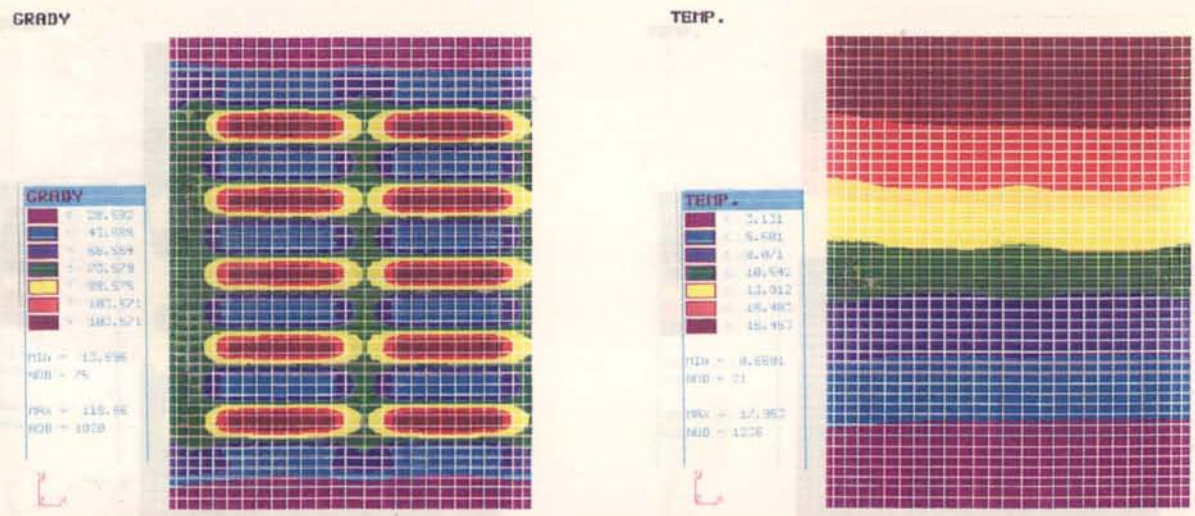


Fig. III.11 - Geometria B19 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo *y* e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

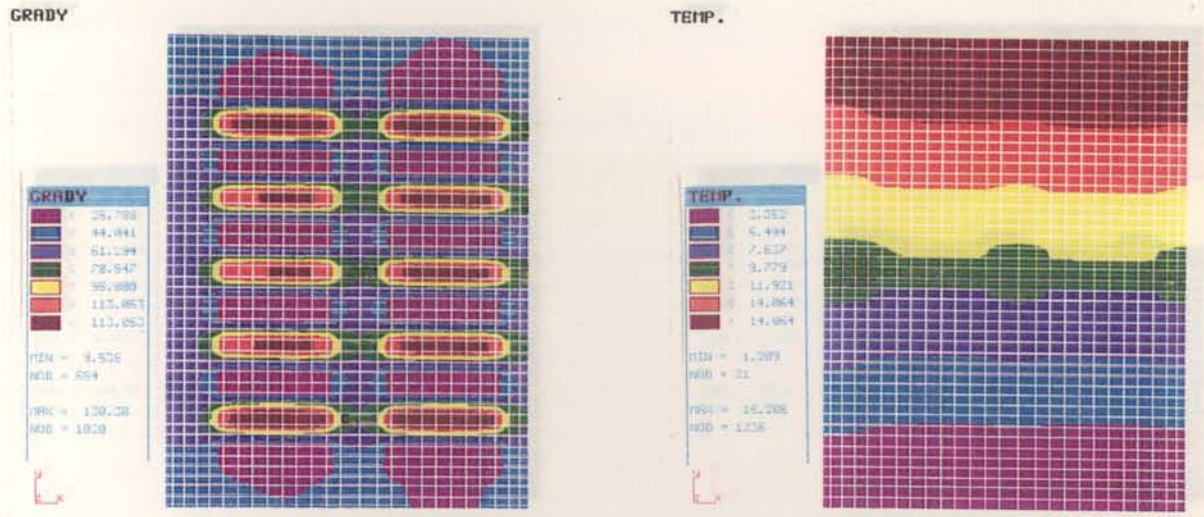


Fig. III.12 - Geometria B19 - sub-refª 5 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 1.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

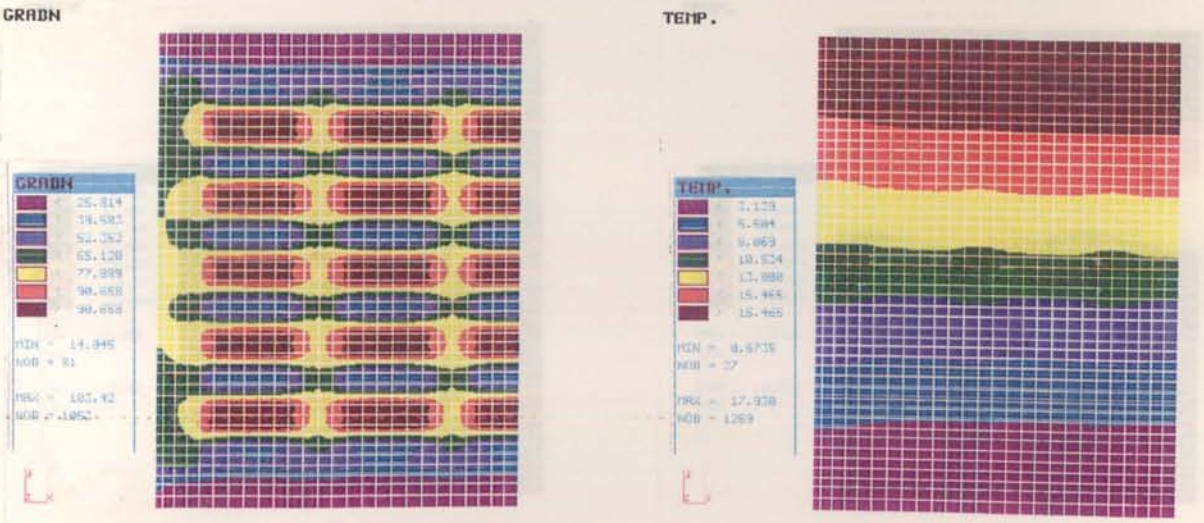


Fig. III.13 - Geometria B24 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

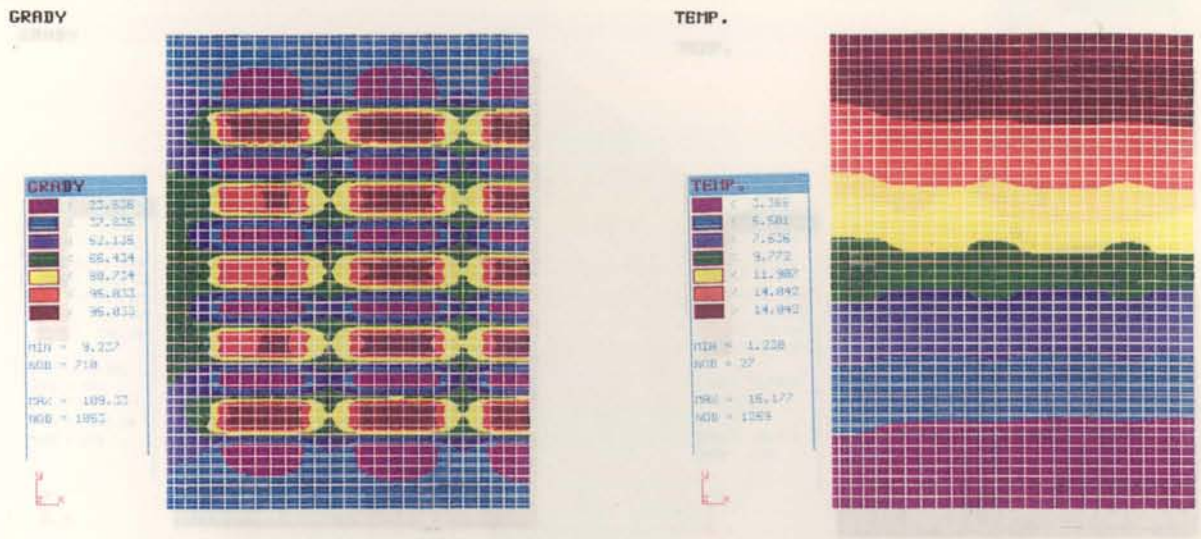


Fig. III.14 - Geometria B24 - sub-refª 5 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 1.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

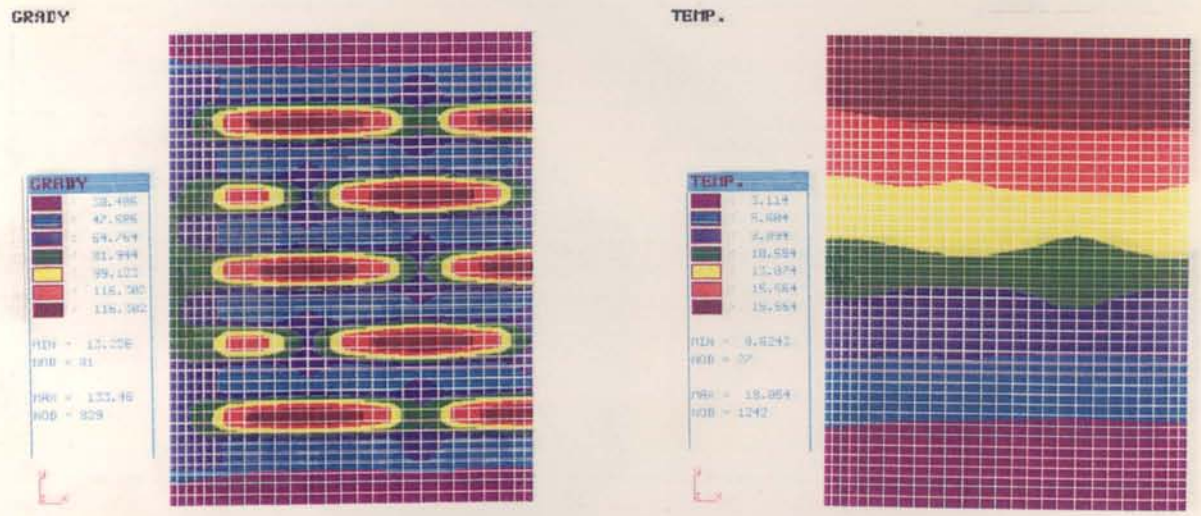


Fig. III.15 - Geometria B27 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo y

b) Distribuição de temperaturas a 2D

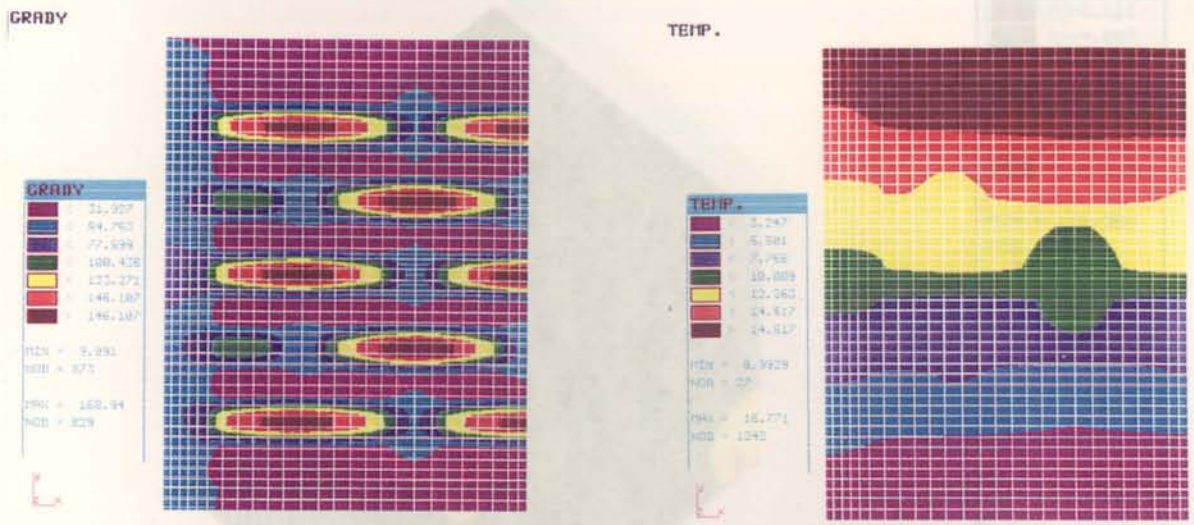


Fig. III.16 - Geometria B27 - sub-refª 5 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 1.40)

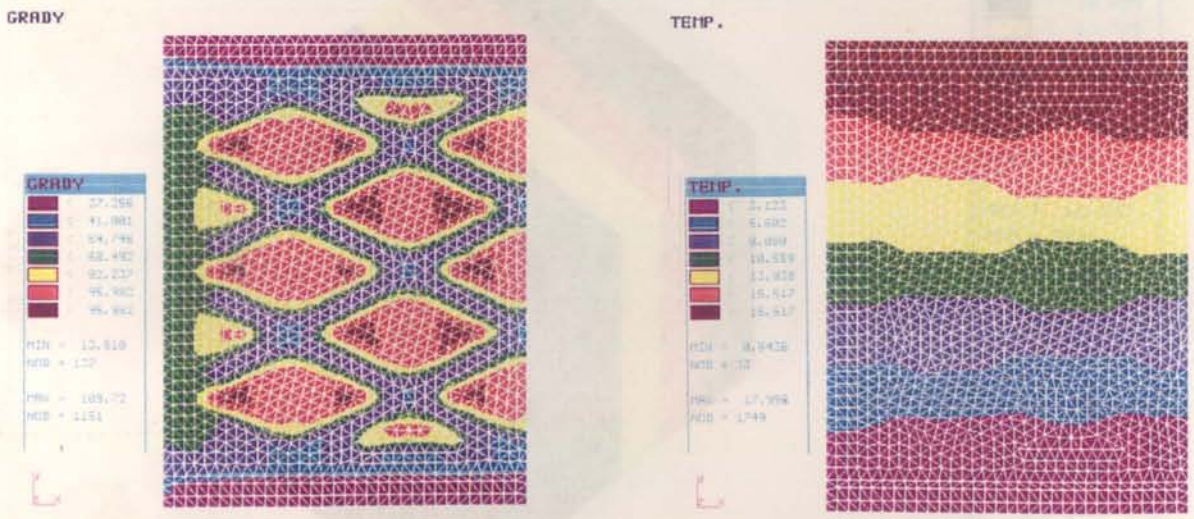
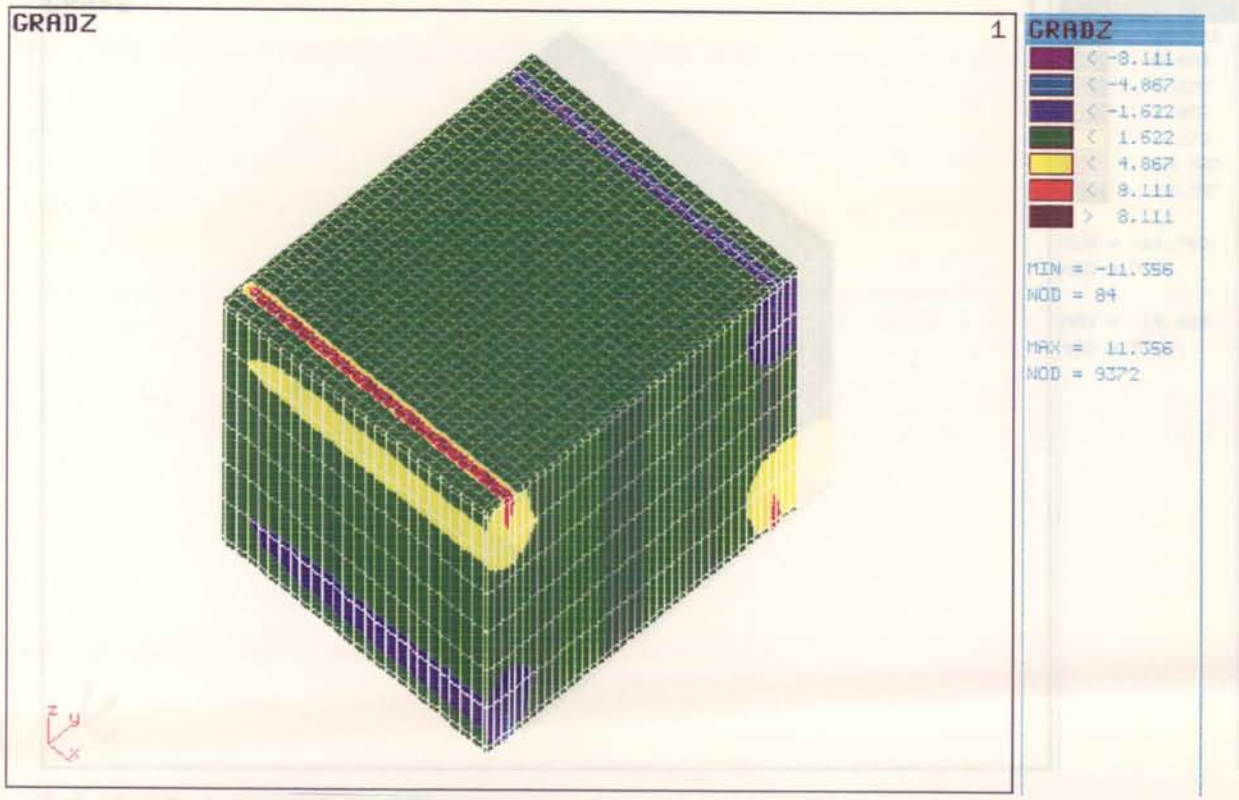


Fig. III.17 - Geometria B43 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo y e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

III.3 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE A 3D

a) Gradiente térmico segundo *z*



b) Distribuição de temperaturas a 3D

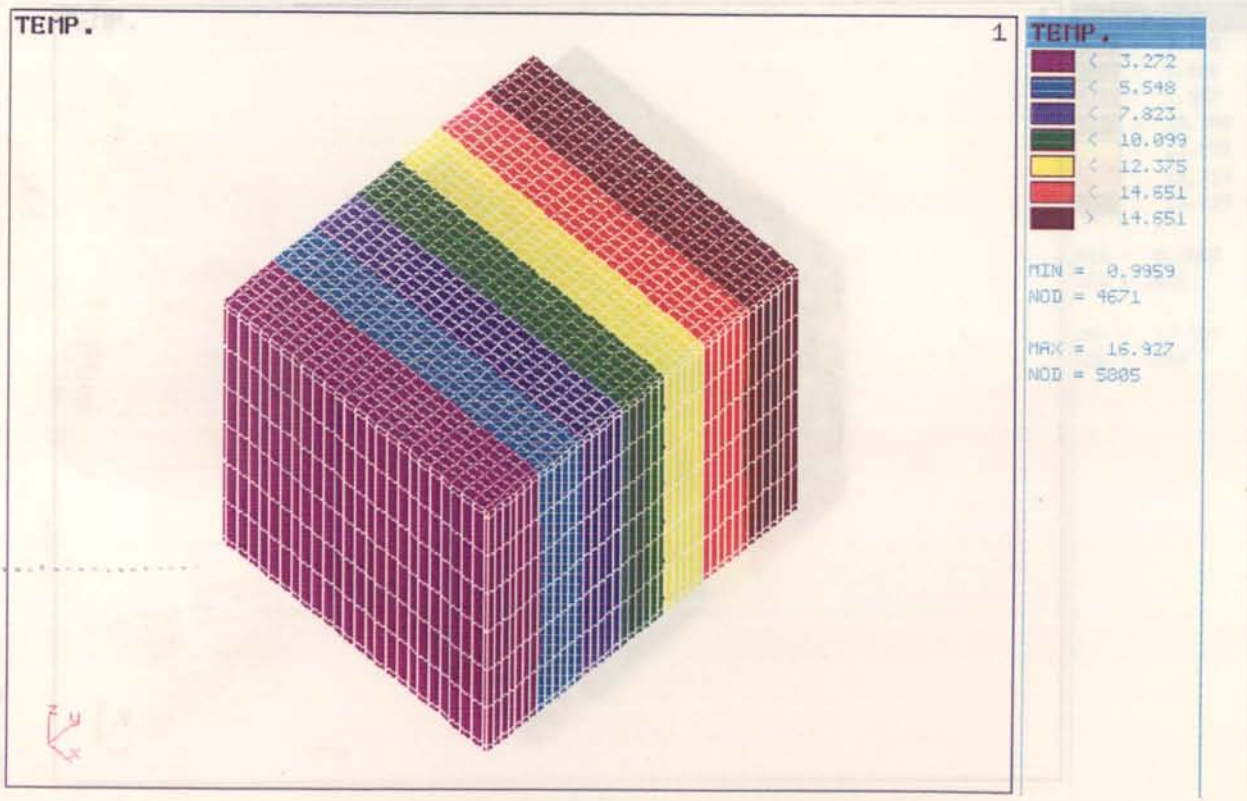
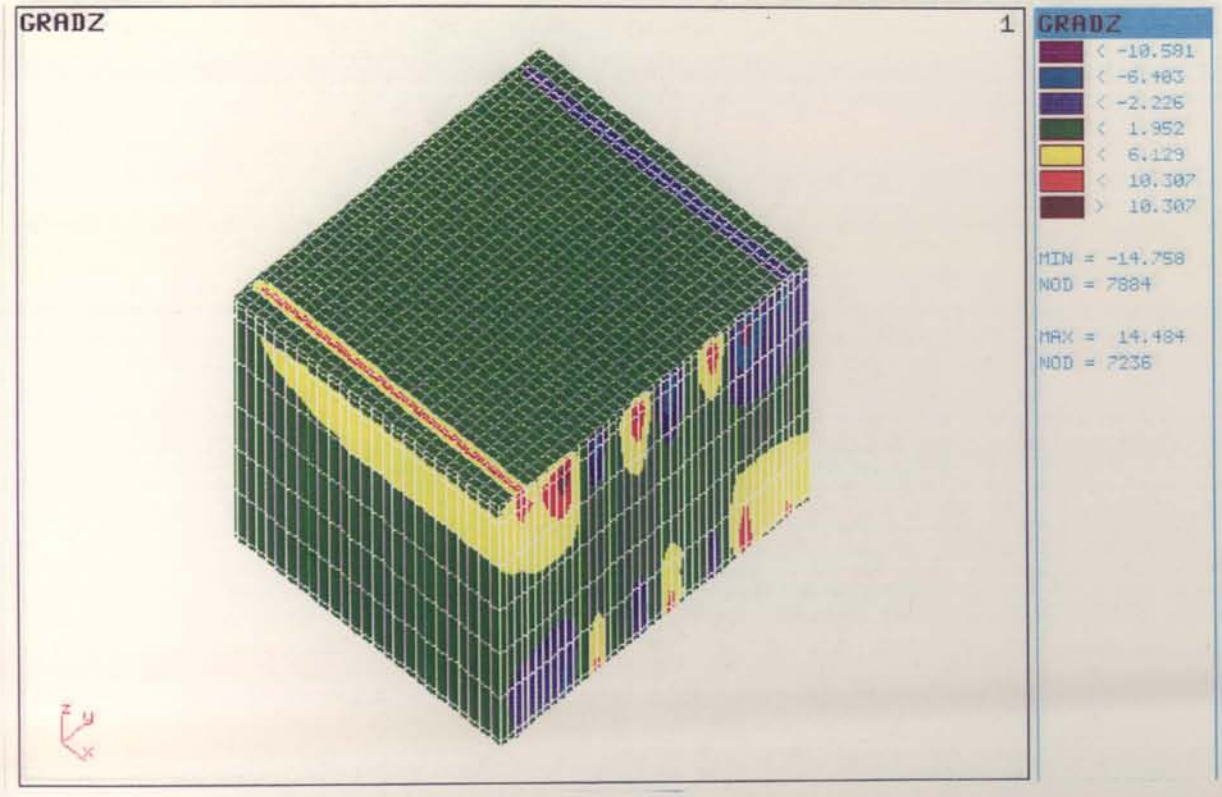


Fig. III.18 - Geometria B01 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo *z* e distribuição de temperaturas a 3D

($\lambda_{betão}$ = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo z



b) Distribuição de temperaturas a 3D

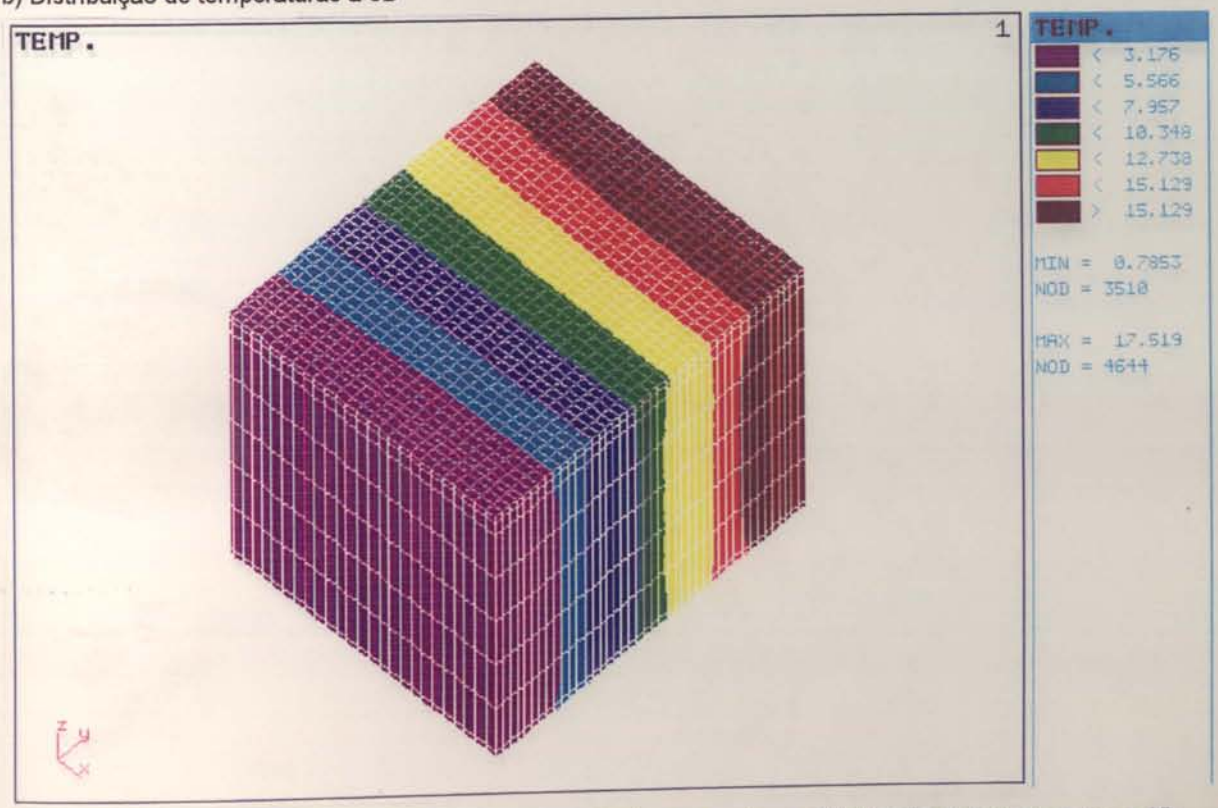
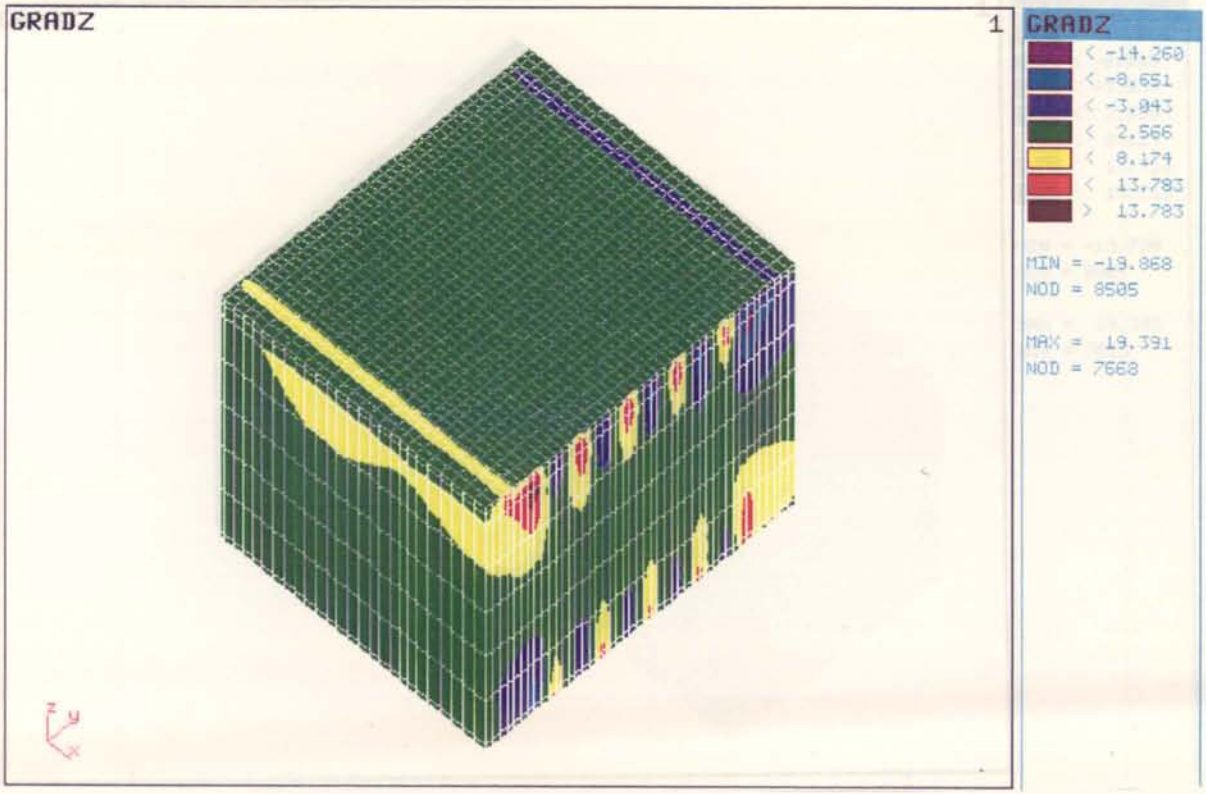


Fig. III.19 - Geometria B08 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo z e distribuição de temperaturas a 3D ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo z



b) Distribuição de temperaturas a 3D

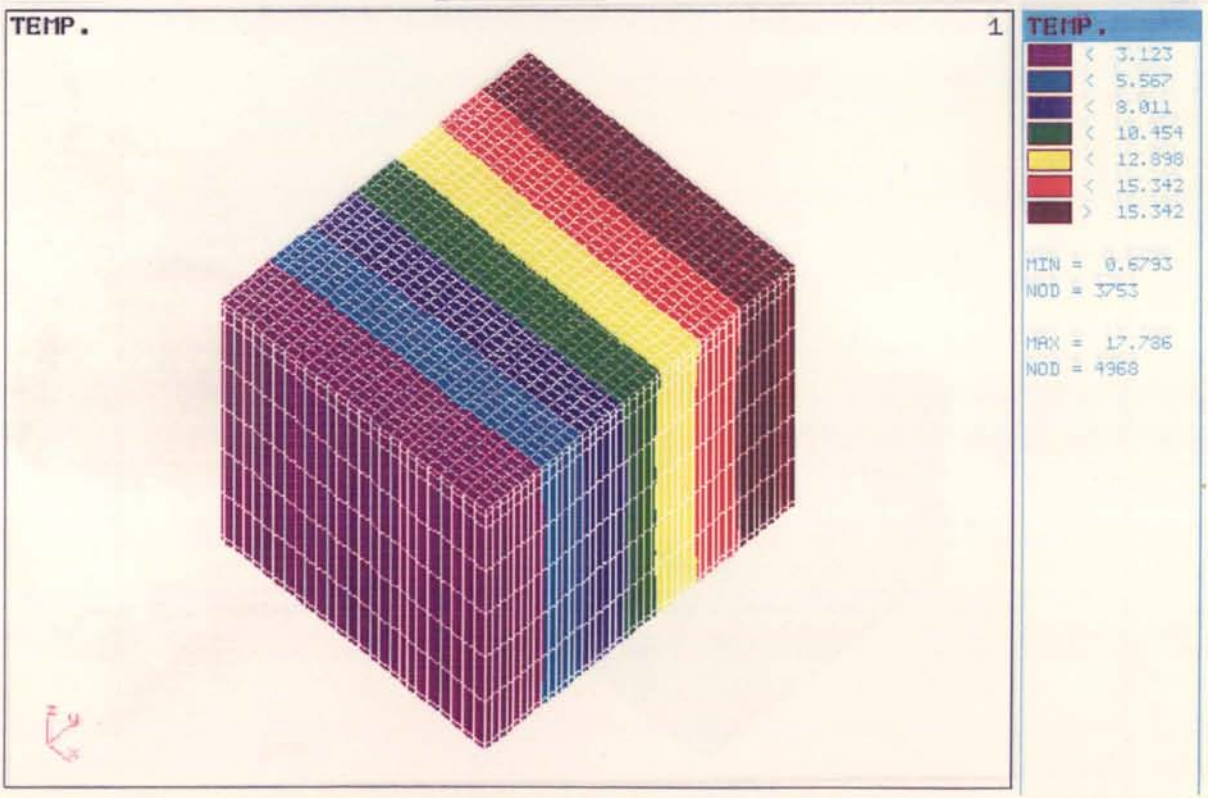
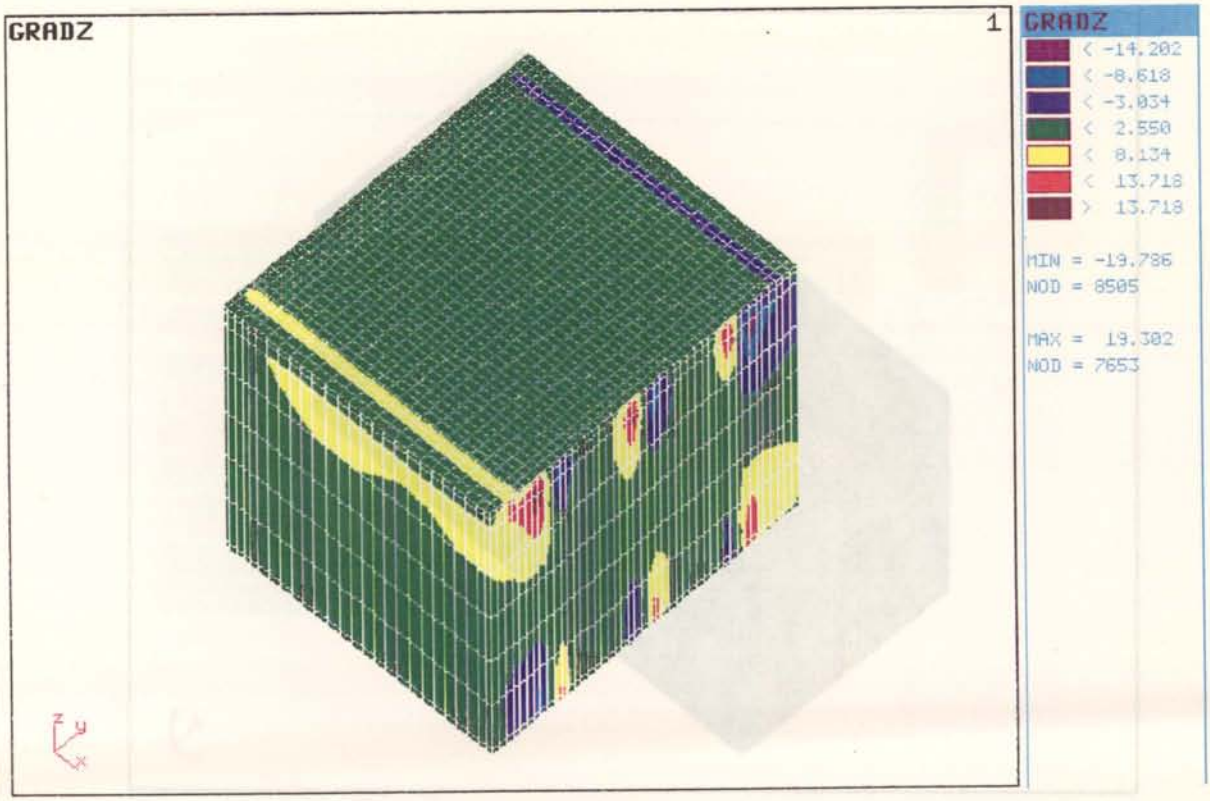


Fig. III.20 - Geometria B15 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo z e distribuição de temperaturas a 3D ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo z



b) Distribuição de temperaturas a 3D

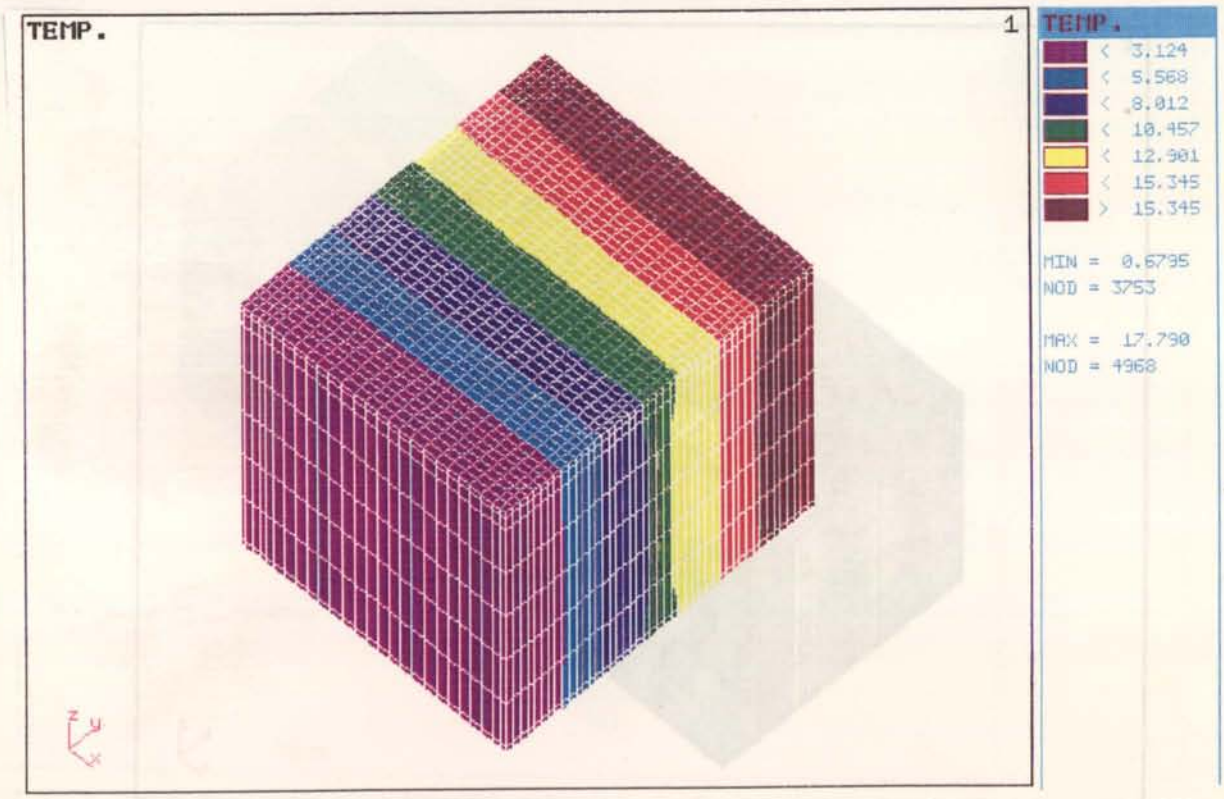


Fig. III.21 - Geometria B27 - sub-refª 2 - Gradiente térmico segundo z e distribuição de temperaturas a 3D ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

III.4 - GEOMETRIAS REAIS A 2D E 3D

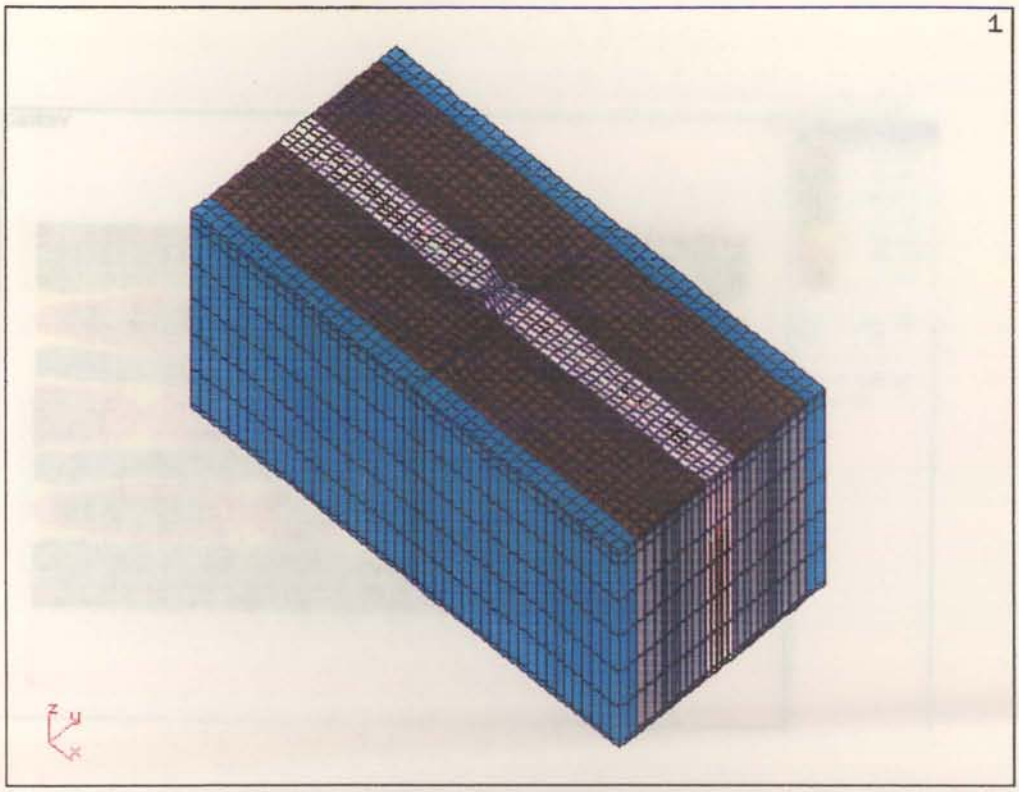


Fig. III.22 - Geometria corrente 500 x 200 x 200 - Malha a 3D

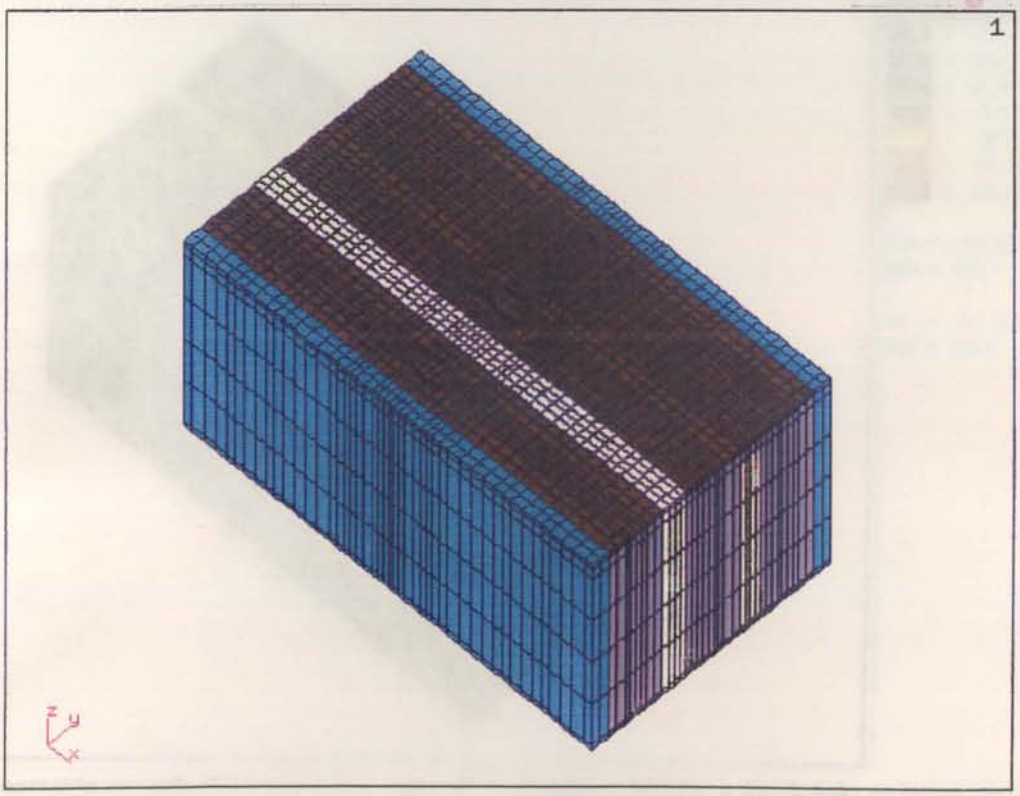
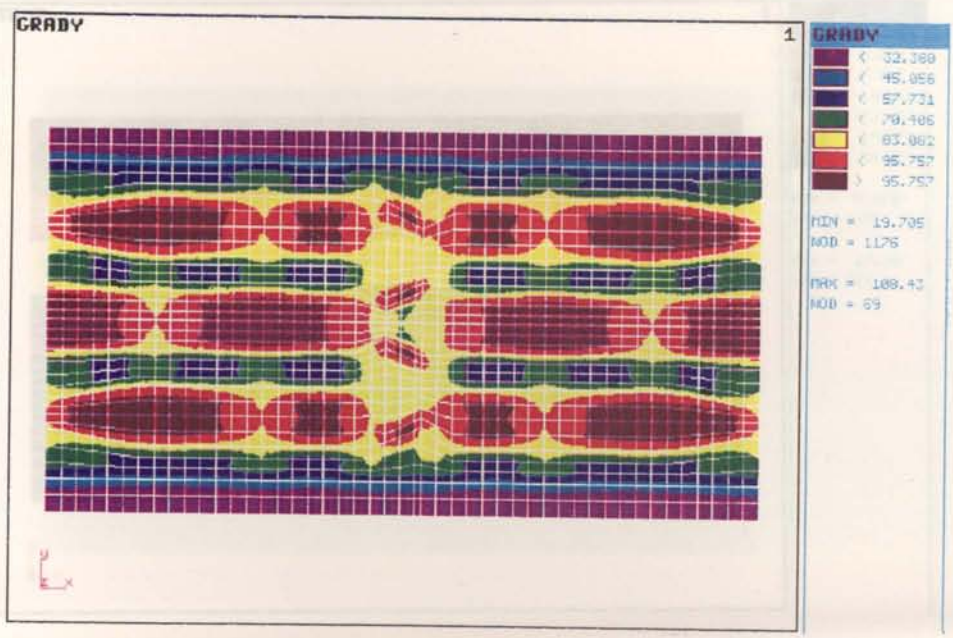


Fig. III.23 - Geometria *melhorada* 500 x 200 x 250 - Malha a 3D

a) Gradiente térmico segundo *y*



b) Gradiente térmico segundo *z*

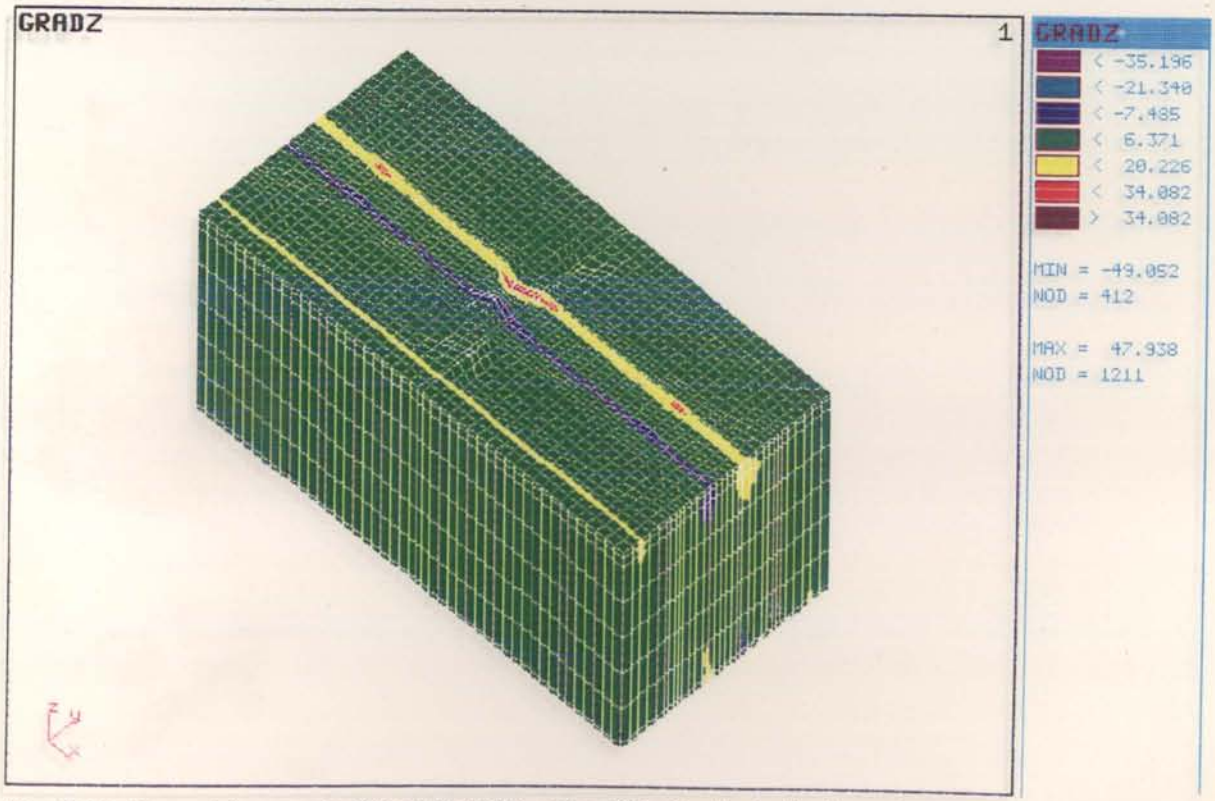
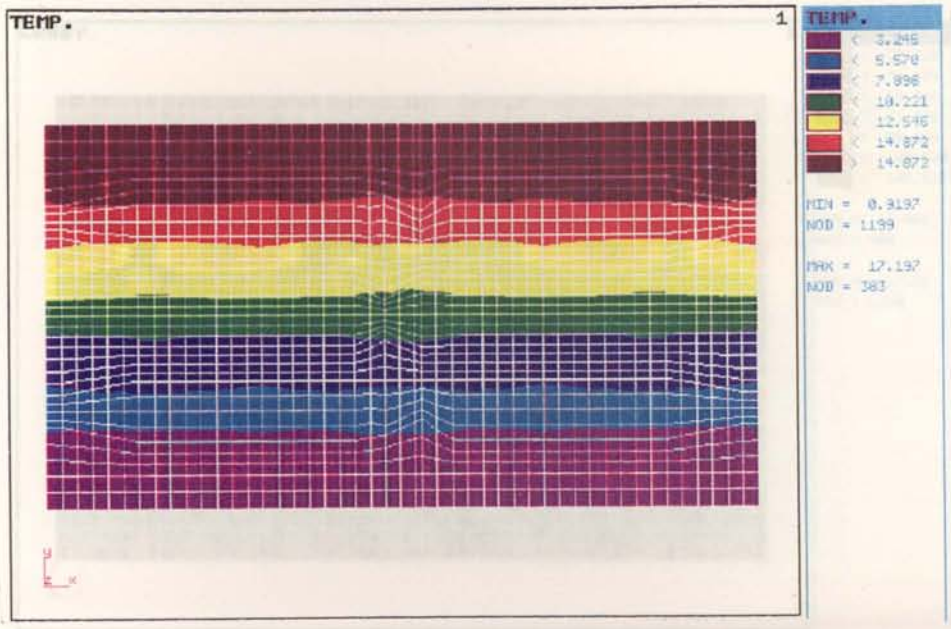


Fig. III.24 - Geometria corrente 500 x 200 x 200 - sub-ref^{a} 2 - Gradiente térmico e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

c) Distribuição de temperaturas a 2D



d) Distribuição de temperaturas a 3D

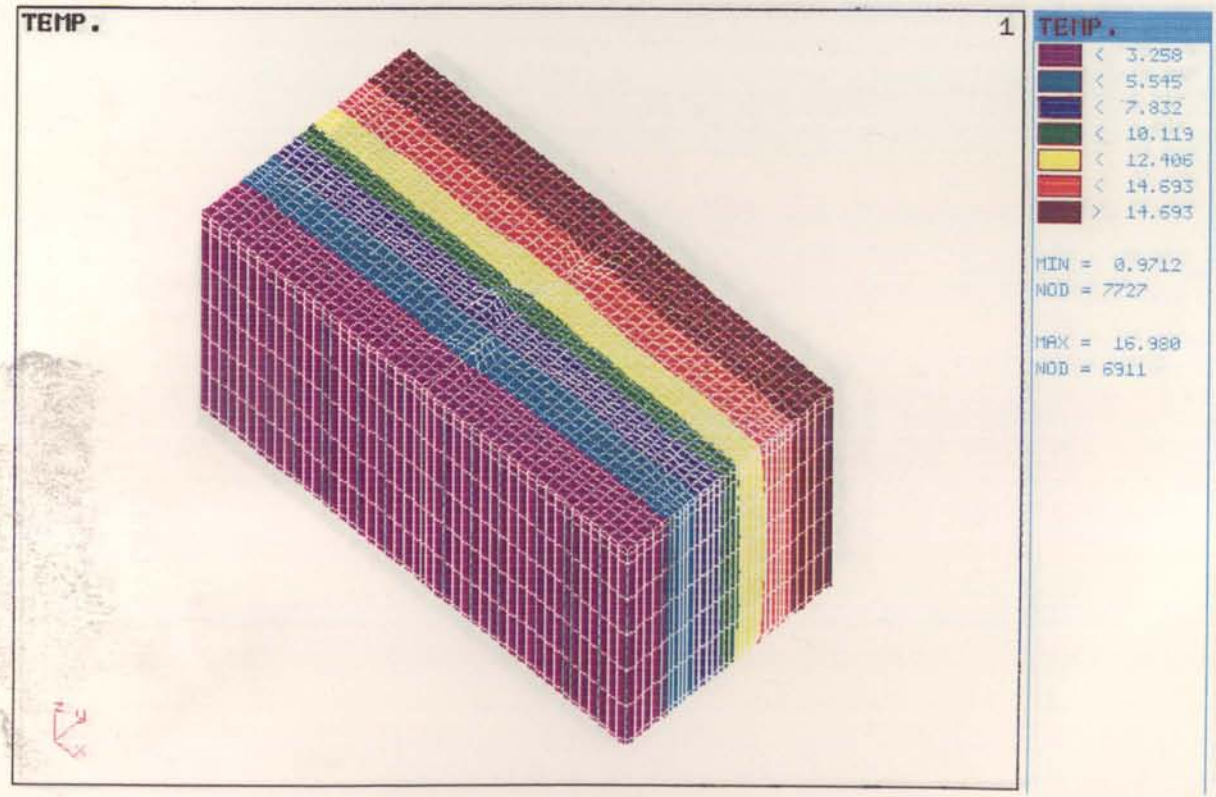
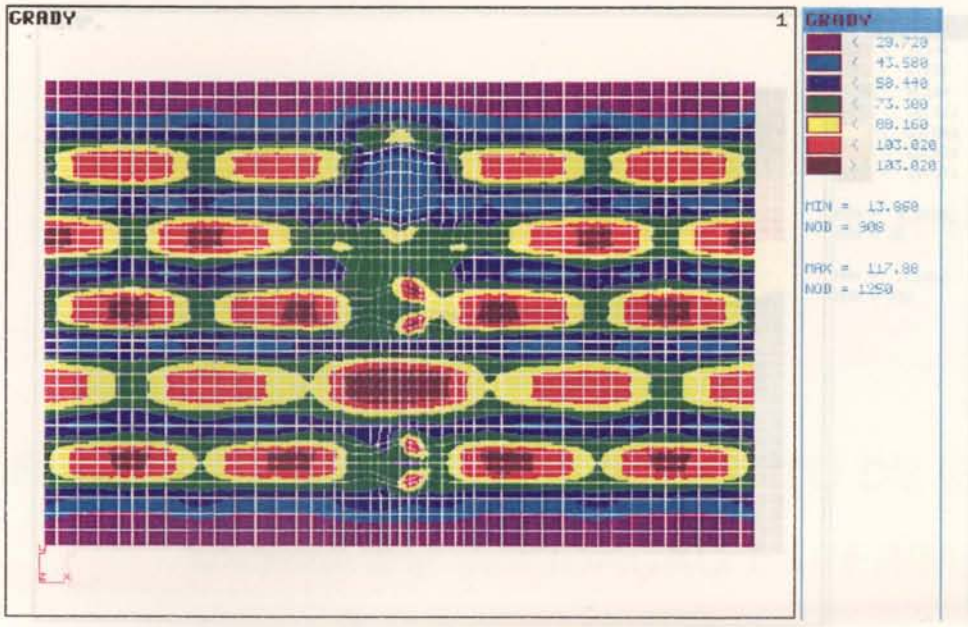


Fig. III.24 (cont.) - Geometria corrente 500 x 200 x 200 - sub-refª 2 - Gradiente térmico e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

a) Gradiente térmico segundo *y*



b) Gradiente térmico segundo *z*

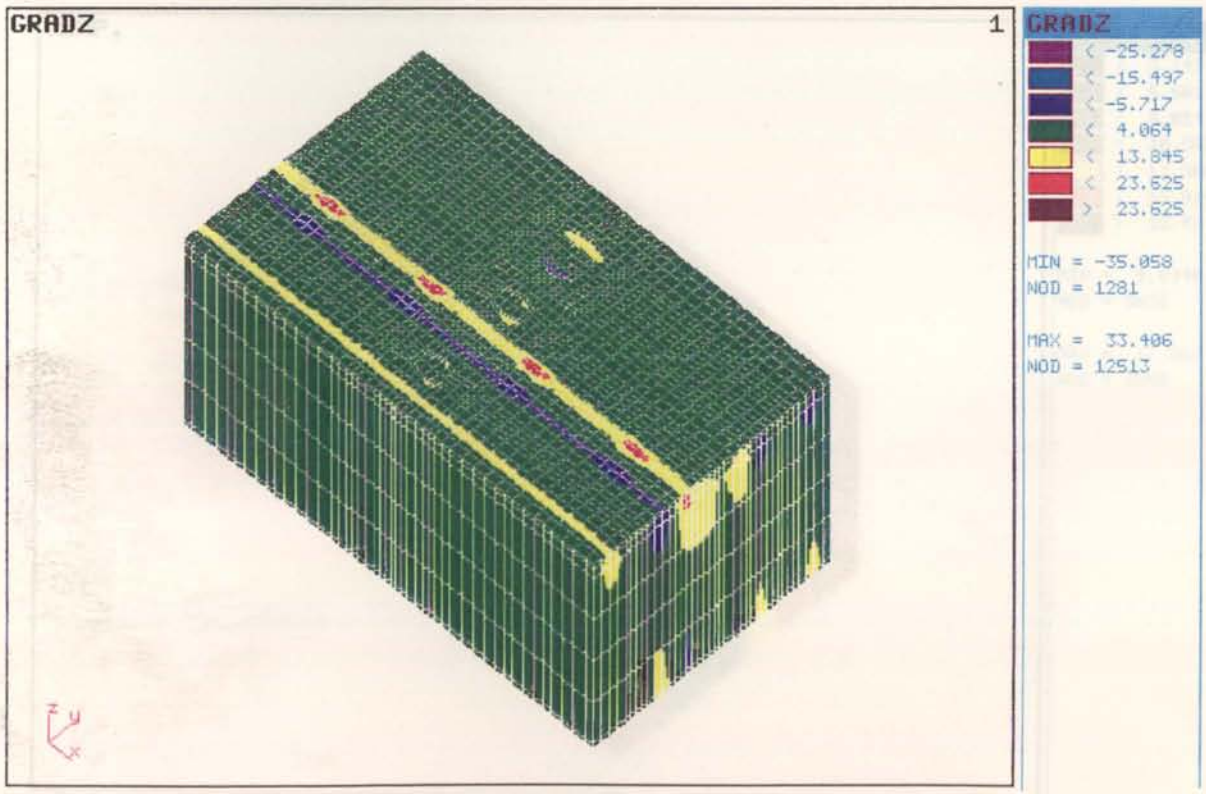
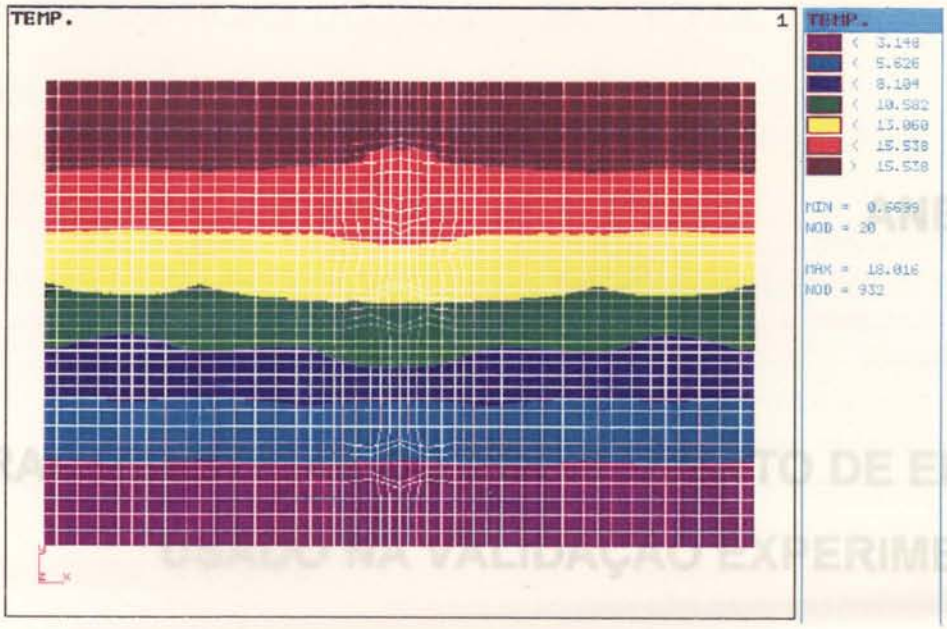


Fig. III.25 - Geometria *melhorada* 500 x 200 x 250 - sub-refª 2 - Gradiente térmico e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

c) Distribuição de temperaturas a 2D



d) Distribuição de temperaturas a 3D

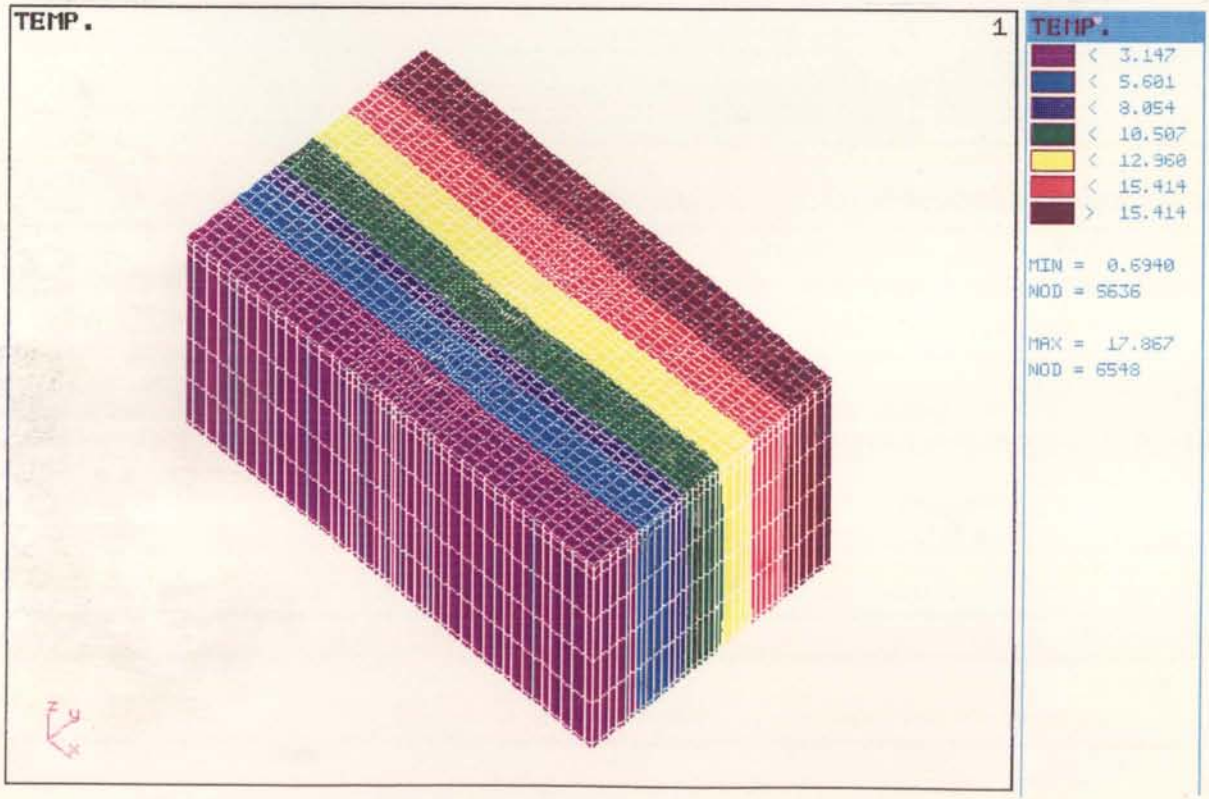


Fig. III.25 (cont.) - Geometria *melhorada* 500 x 200 x 250 - sub-refª 2 - Gradiente térmico e distribuição de temperaturas ($\lambda_{betão}$ = 0.40)

ANEXO IV

CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO USADO NA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

ANEXO IV

CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO USADO NA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

ÍNDICE

IV.1 - GENERALIDADES
IV.2 - EQUIPAMENTO UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA
IV.2.1 - Temperaturas
IV.2.2 - Fluxos
IV.2.3 - Fonte de alimentação estabilizada
IV.2.4 - Multímetro digital
IV.2.5 - Autotransformador regulável
IV.2.6 - Aquisição de dados e registo automático
IV.2.7 - Observações termográficas
IV.3 - EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS MECÂNICOS
IV.3.1 - Resistência à compressão

ANEXO IV

CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO USADO NA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

IV.1 - GENERALIDADES

Com o objectivo de melhor documentar os resultados da validação experimental apresenta-se neste Anexo IV as características não referidas no Capítulo 7 do equipamento de ensaio utilizado.

IV.2 - EQUIPAMENTO UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA

IV.2.1 - Temperaturas

Quadro IV.1 - Características dos termopares

CARACTERÍSTICAS	TEMPERATURAS	
	AR E SUPERFICIAL	INTERIOR ELEMENTOS
Tipos de Sensor	Termopares tipo T (Cu/CuNi) de condutores unifilares com 0.5 mm	Termopares planos PHILIPS PR 6452 A tipo T (Cu/CuNi), soldados a condutores unifilares de 0.5mm
Gama de medida	- 50 a + 105 ºC	- 50 a +105 ºC
Precisão	± 0.5 ºC (estimada)	± 0.5 ºC (estimada)
Protecção contra a radiação	Cilindro de folha de alumínio, com 10 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento	-
Aplicação	Colagem com cola epoxídica	Colagem com cola epoxídica

IV.2.2 - Fluxos

Quadro IV.2 - Características dos fluxímetros

CARACTERÍSTICAS	
Tipo de sensor	Termopilha
Marca	Technisch Phisiche Dieust (TNO)
Dimensões (mm)	∅ = 75 esp. = 3
Sensibilidade [1] (mV/Wm^2)	—
Precisão [2] (%)	5
Temperatura de utilização (°C)	< 90
Condutibilidade térmica (W/(m.°C))	0.25

[1] valor indicado pelo fabricante para cada fluxímetro

[2] valor indicado pelo fabricante

IV.2.3 - Fonte de alimentação estabilizada

Fonte de alimentação estabilizada, de corrente contínua regulável *PHILIPS* (PE 1644), com as características indicadas no Quadro IV.3.

Quadro IV.3 - Características da fonte de alimentação estabilizada

Entrada	**Saída (ajustável)**					
V = 220V ± 10%	Tensão			Intensidade		
f = 50 - 60 Hz	Ajuste	Ajuste fino	Resolução	Ajuste grosseiro	Ajuste fino	Resolução
I max = 40 A	grosseiro					
Rendimento = 73%	0 - 40 V	0 - 0.4 V	1.0 mV	0 - 10 A	0 - 0.3 A	5 mA

Fonte a funcionar como estabilizador de tensão

Flutuação intrínseca	Efeito de	Flutuação por efeito de carga	Efeito de
Vm = -10% + 10%	restabelecimento	(0% - 100% ; 100% - 0%)	restabelecimento
0,01% - 0.5 mV	0.01% - 0.5 mV	± 10 mV	± 10 mV

Fonte a funcionar como estabilizador de corrente

Flutuação intrínseca	Efeito de	Flutuação por efeito de carga	Efeito de
Vm = -10% + 10%	restabelecimento	(0% - 100% ; 100% - 0%)	restabelecimento
± 2 mA	± 1 mA	± 2 mA	± 1 mA

IV.2.4 - Multímetro digital

Multímetro *Beckman Industrial (modelo 4410B)*, para leitura de sinais eléctricos, com as características indicadas no Quadro IV.4.

Quadro IV.4 - Características do multímetro digital

Leitura de tensões em corrente contínua (VDC)		
Gama de medida	Resolução	Precisão (23 °C ± 5 °C)
0 ± 200mV	10 μ V	0,05 % ± 2 dígitos
0 ± 2V	100 μ V	0,06 % ± 2 dígitos
0 ± 20V	1 mV	0,07 % ± 2 dígitos
0 ± 200V	10 mV	0,07 % ± 2 dígitos
0 ± 1500V	100 mV	0,07 % ± 2 dígitos
Leitura de intensidade em corrente contínua (DCA)		
Gama de medida	Resolução	Precisão (23 ± 5°C)
0 ± 200 μA	10 nA	
0 ± 2 mA	100 nA	0,2% ± 2 dígitos
0 ± 20 mA	1 μA	0,3% ± 2 dígitos
0 ± 200 mA	10 μA	
0 ± 2 A	100 μA	0,3% ± 2 dígitos
0 ± 10 A	1 mA	1,0% ± 2 dígitos

IV.2.5 - Autotransformador regulável

Autotransformador regulável *Zenith V8H*, com as características constantes no Quadro IV.5.

Quadro IV.5 - Características do autotransformador regulável

Características	
Entrada	V = 220 V
Carga nominal	f = 50 - 60 Hz
	1 - 1.5 kVA
Saída	0 - 240 V
I_{max}	4.8 A
Corrente nominal	4 A

IV.2.6 - Aquisição de dados e registo automático

Sistema de aquisição de dados e registo automático *DELTA LOGGER (DELTA - T DEVICES LTD)*, calibrado periodicamente no *LNEC*, com as características constantes do Quadro IV.6.

Quadro IV.6 - Características do sistema de aquisição e registo automático

Características	
Canais analógicos (entradas)	≤ 60
Tipo de sensores	com sinal em tensão e resistência inferior a 10 MΩ
Leitura de tensão	12 bits e sinal, simples ou diferencial, resolução desde 1 V (escala 0-4 mV), precisão ± 0,04% (a 20 °C)
Leitura de resistência	12 bits, 2 ou 3 fios, corrente de 2 A a 2 mA, resolução desde 0.01; precisão de ± 0.04% (0.1% com corrente de 2 A)
Canais digitais (entradas)	≤ 62
Leituras digitais	16 bits, frequência máxima 1000 Hz
Saídas analógicas	relés para actuação de sensores
Configuração de registo/leitura	programável com "software" próprio IBM PC compatível e RS 232
Memória	RAM expansível (8 kbytes a 128 kbytes)
Alimentação	7-15/ dc
Temperatura de utilização	-20 °C a + 60 °C

IV.2.7 - Observações termográficas

Equipamento *NIPON AVIONICS CO. LTD*, modelo *Compact thermo TVS - 2100 ST* de acordo com características do Quadro IV.7.

Quadro IV.7 - Características do equipamento de termografia

Características	
Tipo de sensor	InSb, matriz de 10 elementos
Arrefecimento	eléctrico
Campo de visão	15° x 10°
Gama de medida (radiação IV)	3 μm a 5.4 μm
Compensação de emissividade	ajustável a 0.1 a 1.00
Resolução mínima de diferença de temperatura	0.1 °C (a 30 °C)

IV.3 - EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS MECÂNICOS

IV.3.1 - Resistência à compressão

Prensa de ensaios à compressão *SEIDNER* existente na *FEUP*, cujas características se sintetizam no Quadro IV.8.

Quadro IV.8 - Características da prensa de compressão

Características	
Modelo	Seidner SWP 3000 VE
Colunas	4
Capacidade	3000 kN
Classe de precisão	1
Altura da câmara	50 a 1500 mm
Dimensões dos pratos	600 mm x 400 mm
Curso do pistão	100 mm
Distância entre colunas	480 mm
Tipo de cilindro	simples efeito
Unidade de controlo	ESS Servo
Carregamento	Linear crescente, função ramp, medição de deslocamentos
Alimentação	380 V / 10 kV

ANEXO V

SEQUÊNCIA DE TRATAMENTO DE RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS ALVENARIAS

ANEXO V

SEQUÊNCIA DE TRATAMENTO DE RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS ALVENARIAS

ÍNDICE

V.1 - GENERALIDADES
V.2 - SEQUÊNCIA DE TRATAMENTO DOS RESULTADOS
V.3 - SÍNTESE DE RESULTADOS

ANEXO V

SEQUÊNCIA DE TRATAMENTO DE RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS ALVENARIAS

V.1 - GENERALIDADES

Neste Anexo V apresenta-se de forma mais detalhada a sequência de tratamento dos dados e os resultados da caracterização experimental do comportamento térmico das alvenarias, que foram sintetizados no capítulo 7.

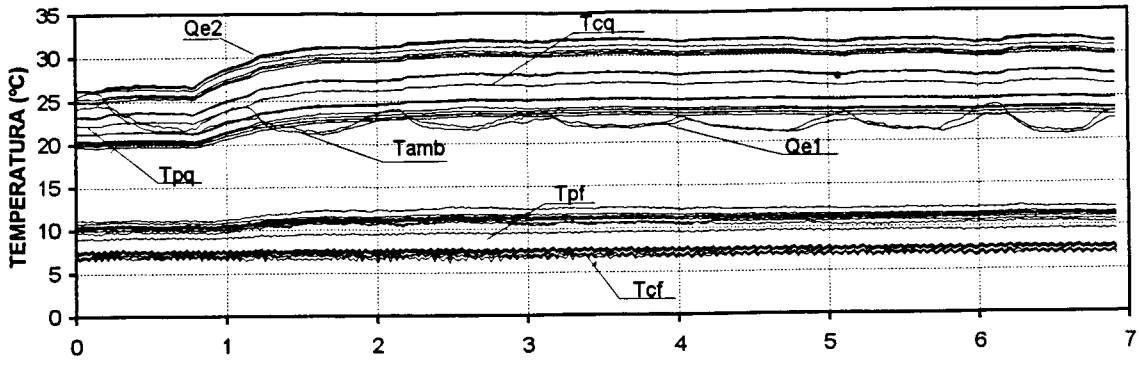
V.2 - SEQUÊNCIA DE TRATAMENTO DOS RESULTADOS

Apresenta-se de seguida a sequência de tratamento de resultados relativos aos ensaios na câmara quente calibrada, para os provetes 1 a 4. As figuras ilustram o aspecto geral dos resultados para um período alargado e a evolução do seu tratamento recorrendo à informação dos termopares e fluxímetros.

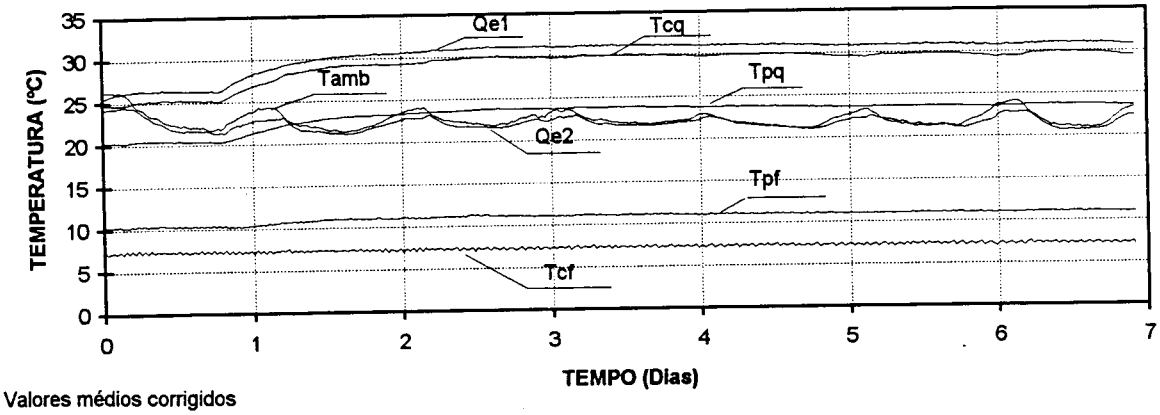
V.3 - SÍNTESE DE RESULTADOS

Apresenta-se nos Quadros V.1 e V.3 a síntese de resultados relativos aos provetes 1 a 5.

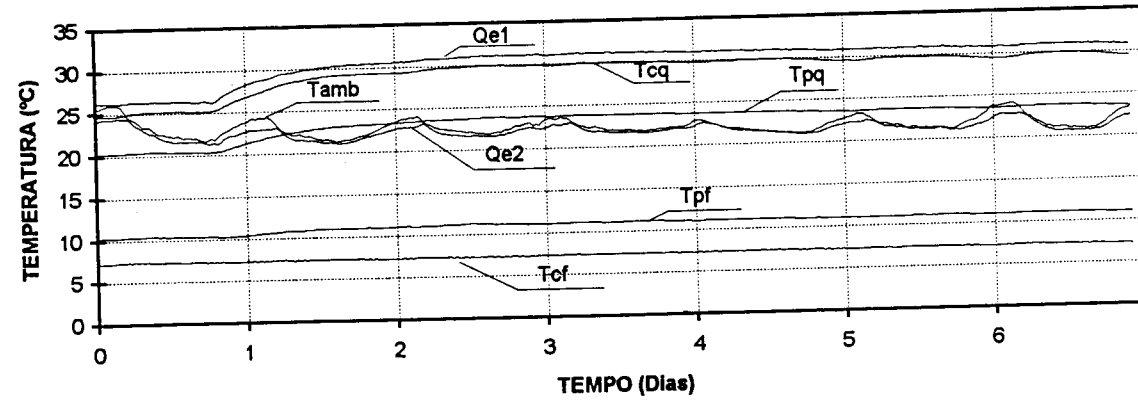
a) Registos obtidos



b) Valores médios dos registos



c) Valores médios corrigidos



d) Potência fornecida

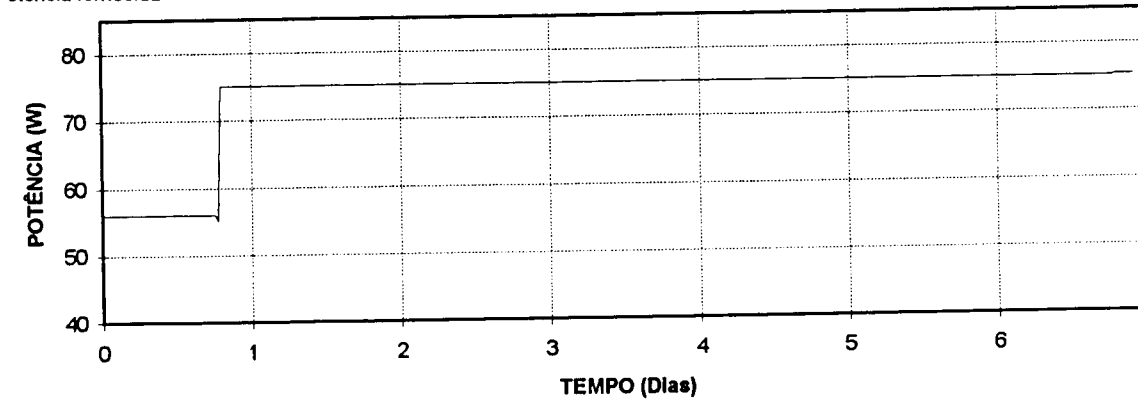
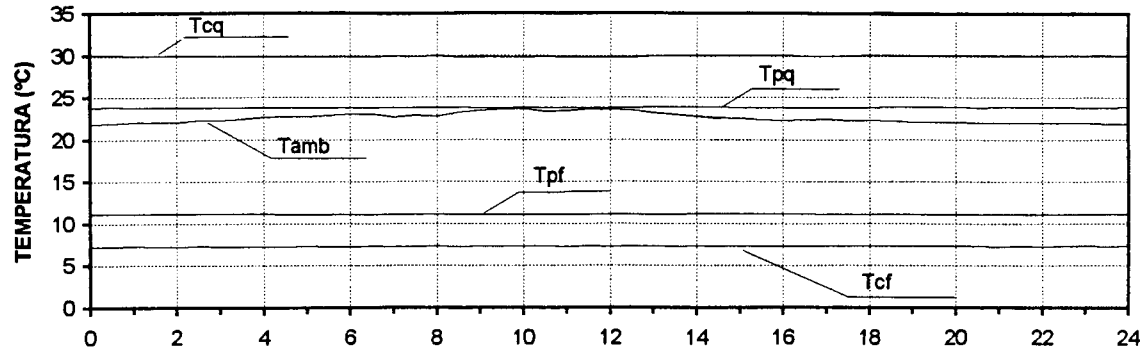
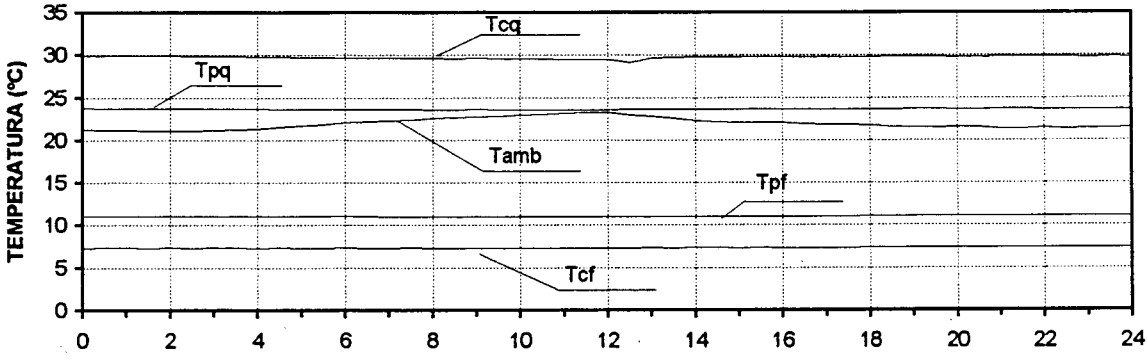


Fig. V.1 - Sequência de tratamento de dados relativa ao provete 1

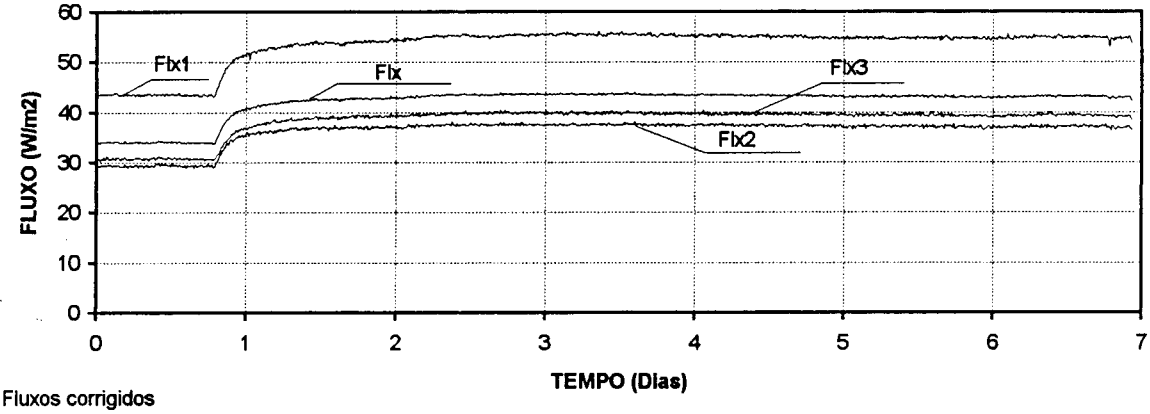
e) 1º Período estacionário



f) 2º Período estacionário



g) Fluxos



h) Fluxos corrigidos

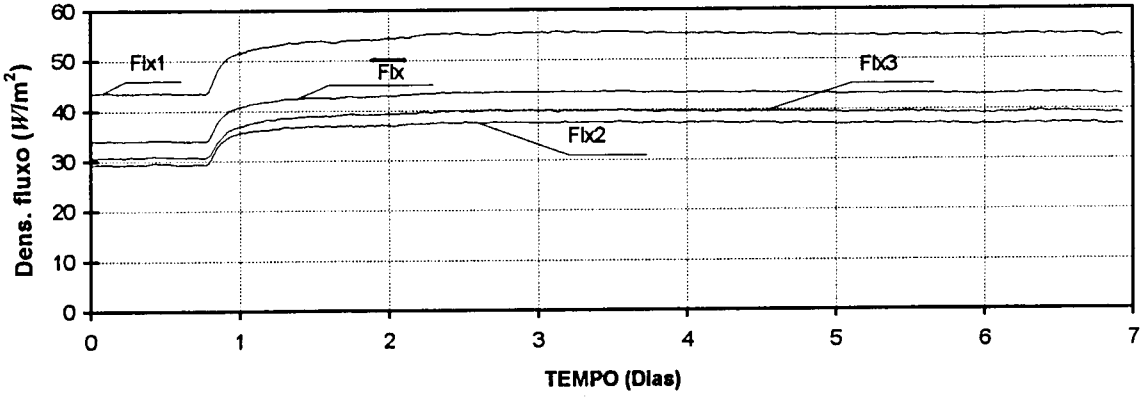
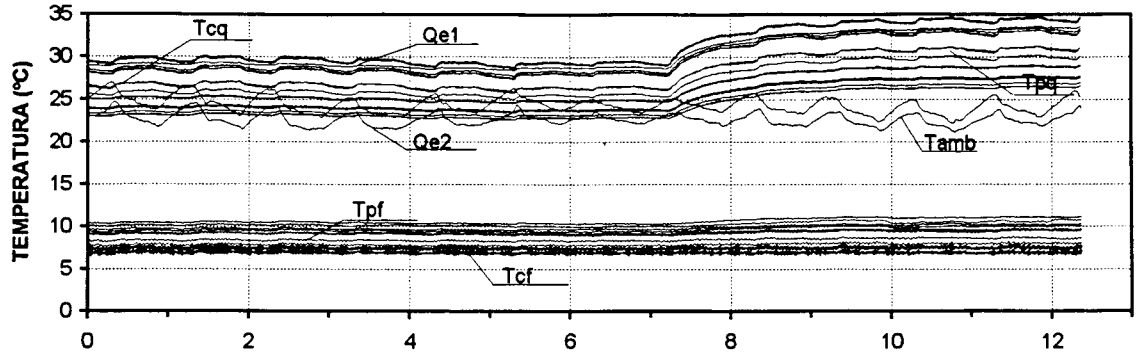
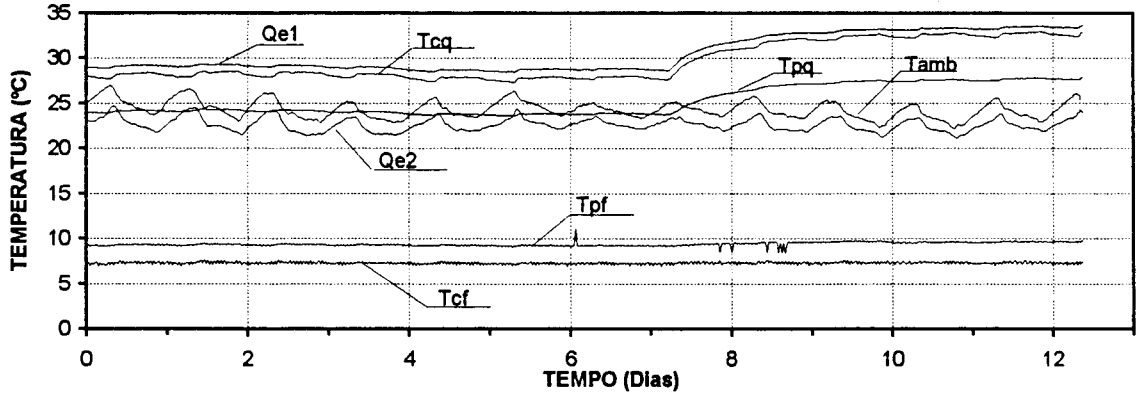


Fig. V.1 (cont.) - Sequência tratamento de dados relativa ao provete 1

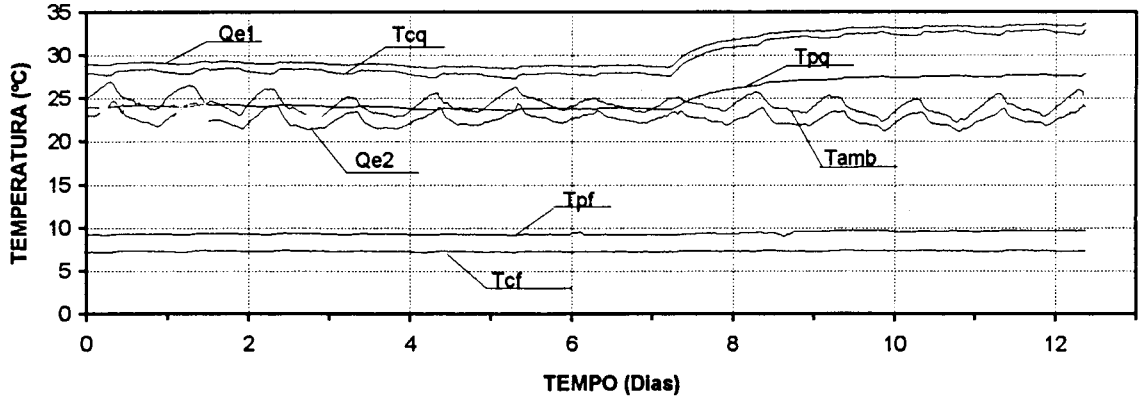
a) Registos obtidos



b) Valores médios dos registos



c) Valores médios corrigidos



d) Potência fornecida

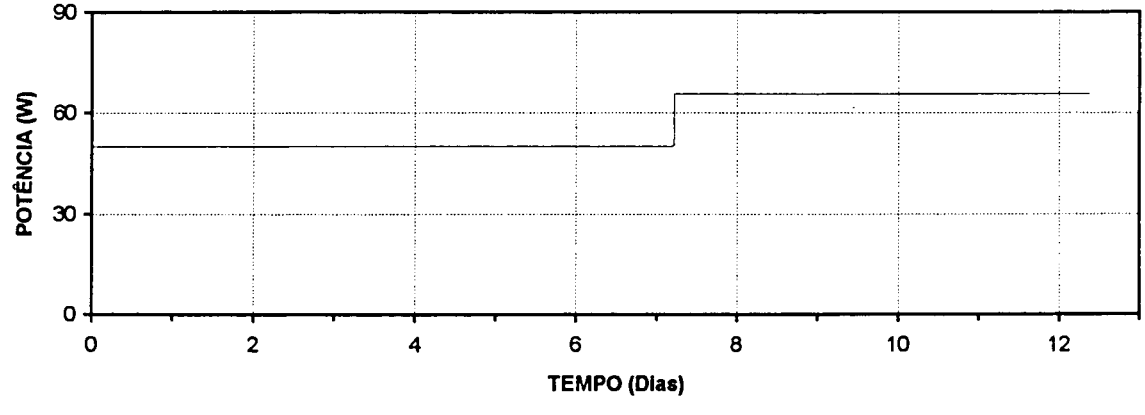
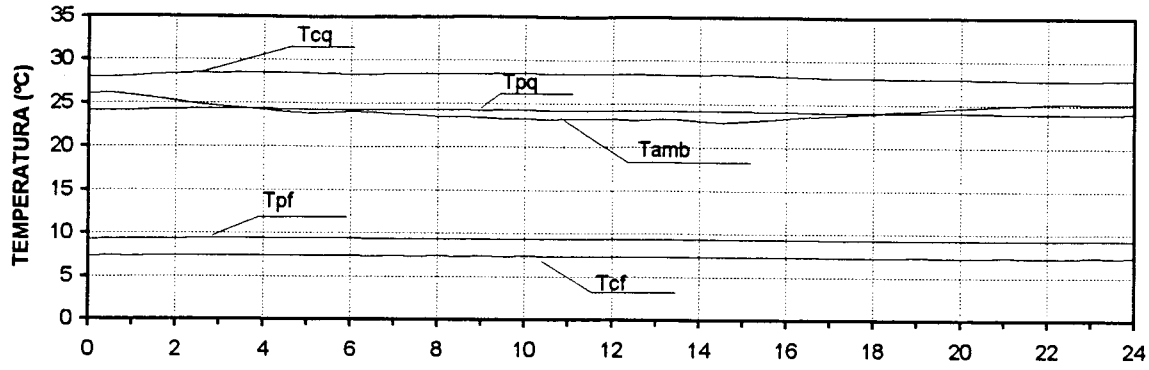
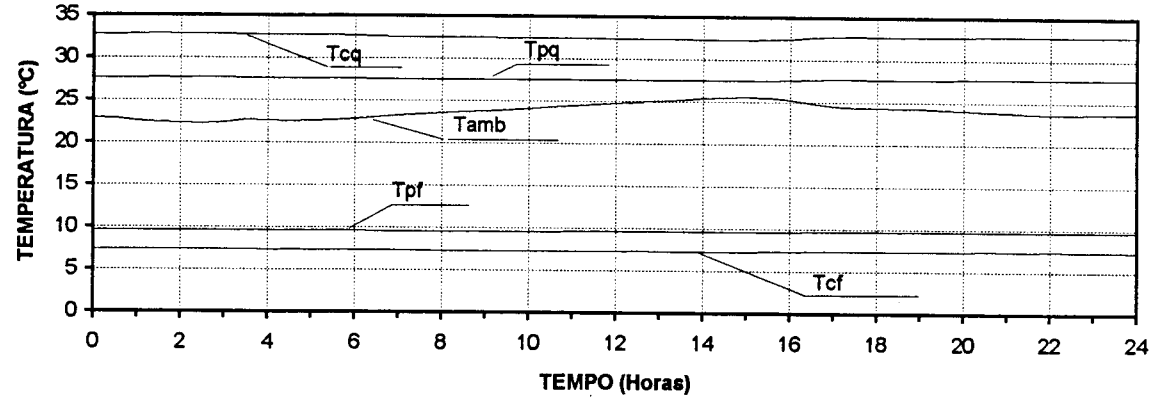


Fig. V.2 - Sequência de tratamento de dados relativa ao provete 2

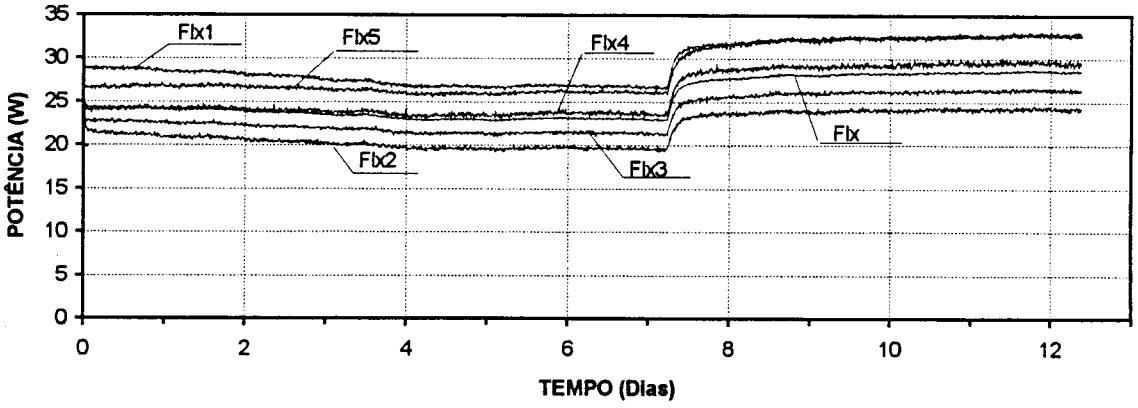
e) 1º Período estacionário



f) 2º Período estacionário



g) Fluxos



h) Fluxos corrigidos

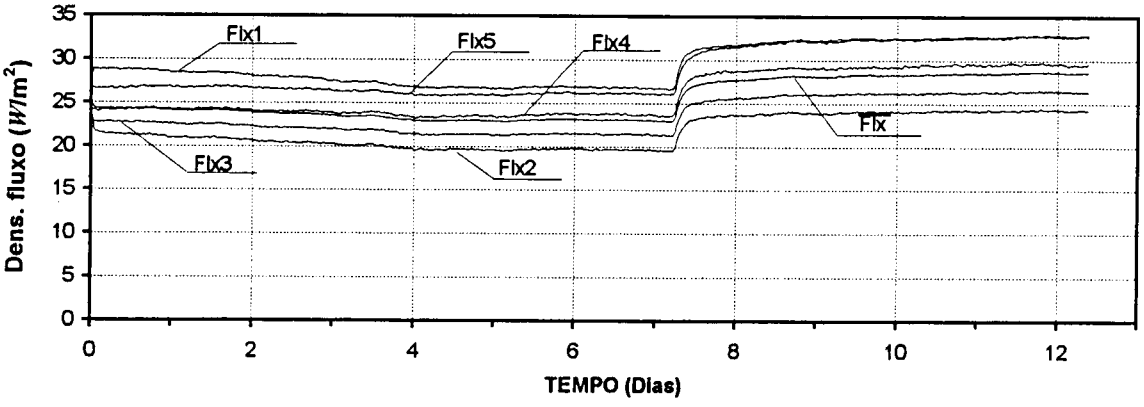
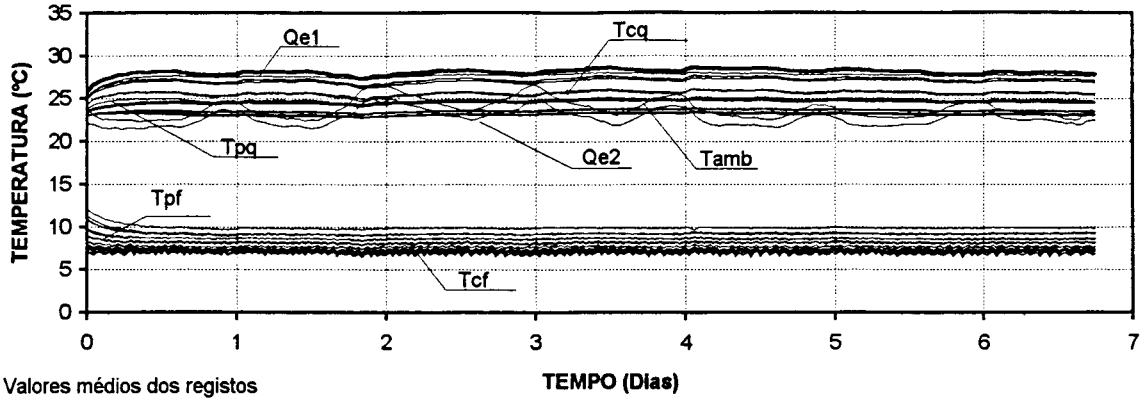
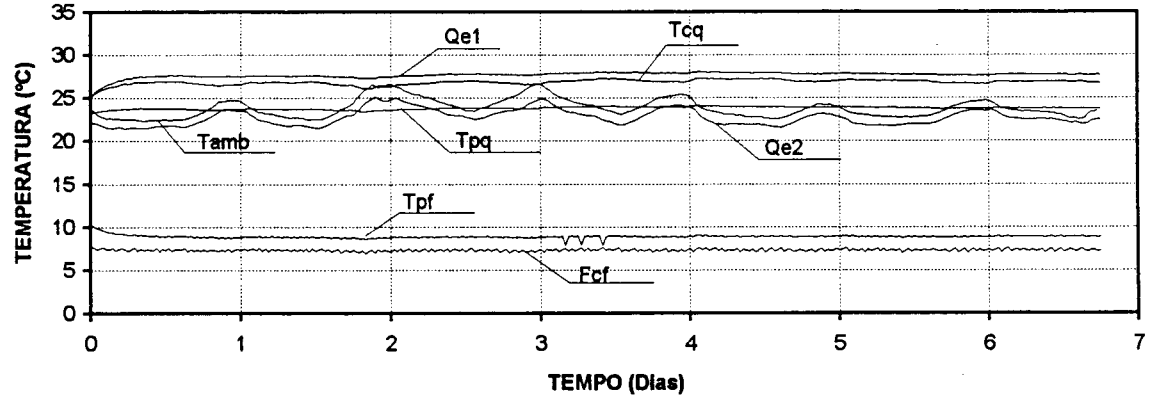


Fig. V.2 (cont) - Sequência tratamento de dados relativa ao provete 2

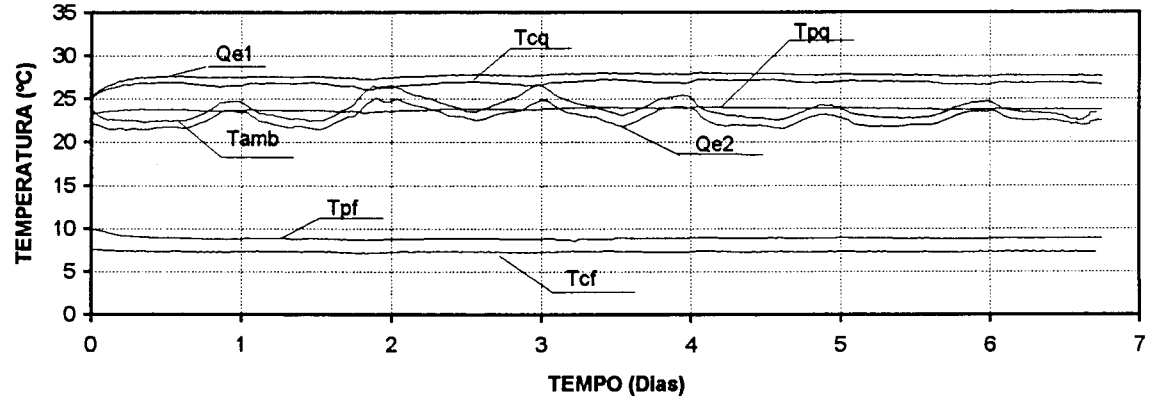
a) Registos obtidos



b) Valores médios dos registos



c) Valores médios corrigidos



d) Potência fornecida

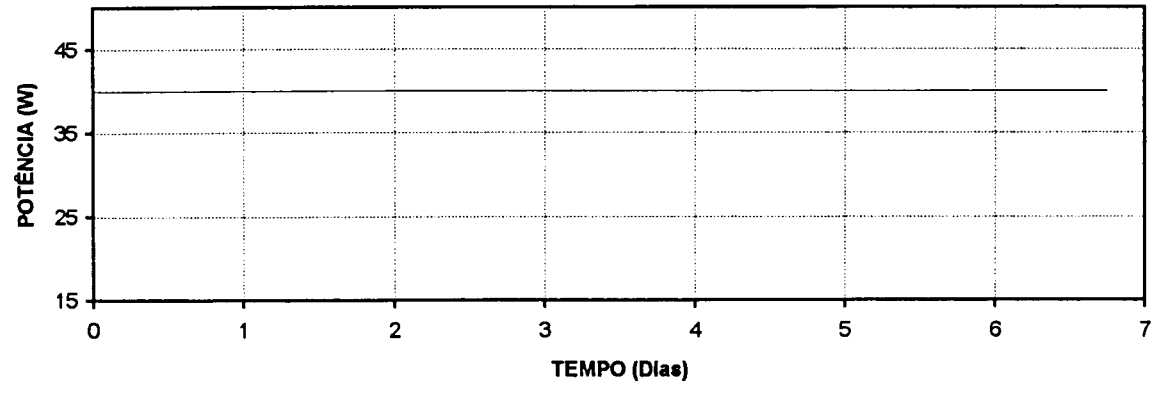
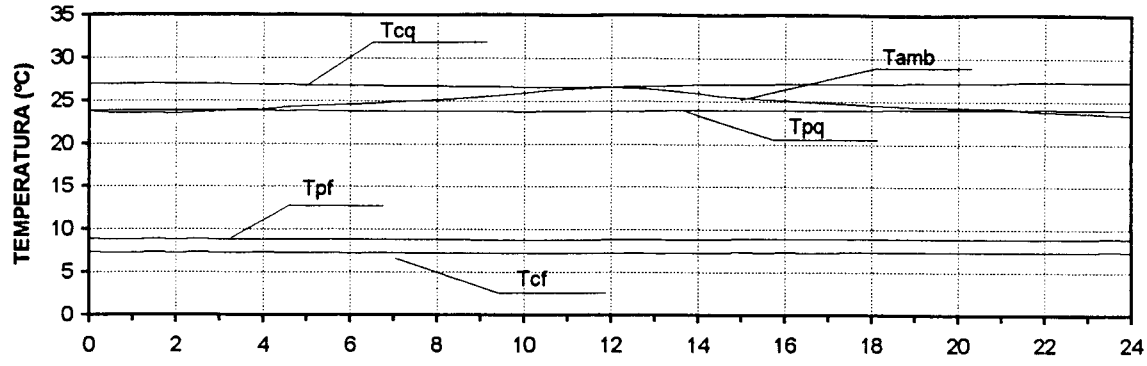
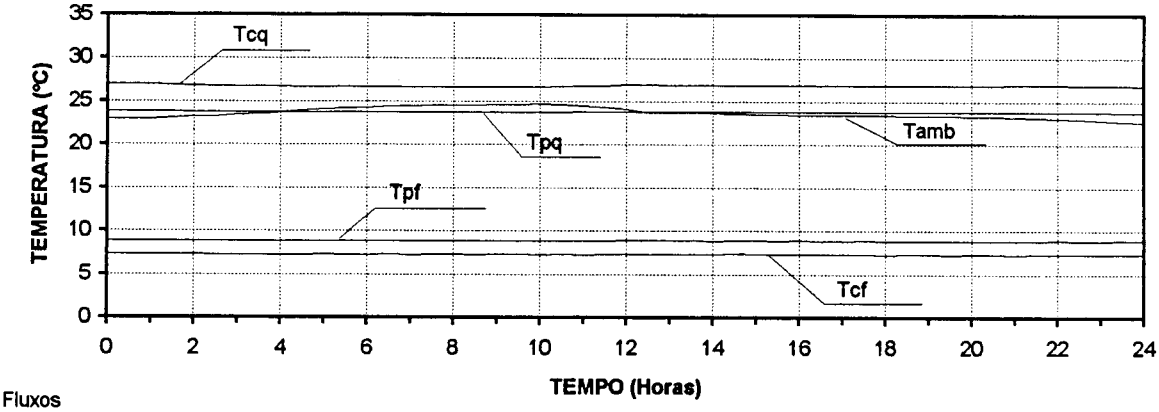


Fig. V.3 - Sequência de tratamento de dados relativa ao provete 3

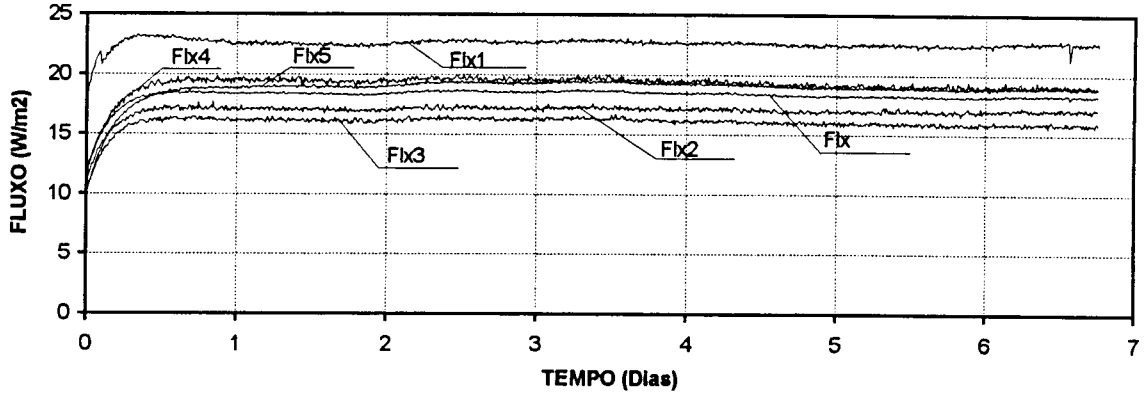
e) 1º Período estacionário



f) 2º Período estacionário



g) Fluxos



h) Fluxos corrigidos

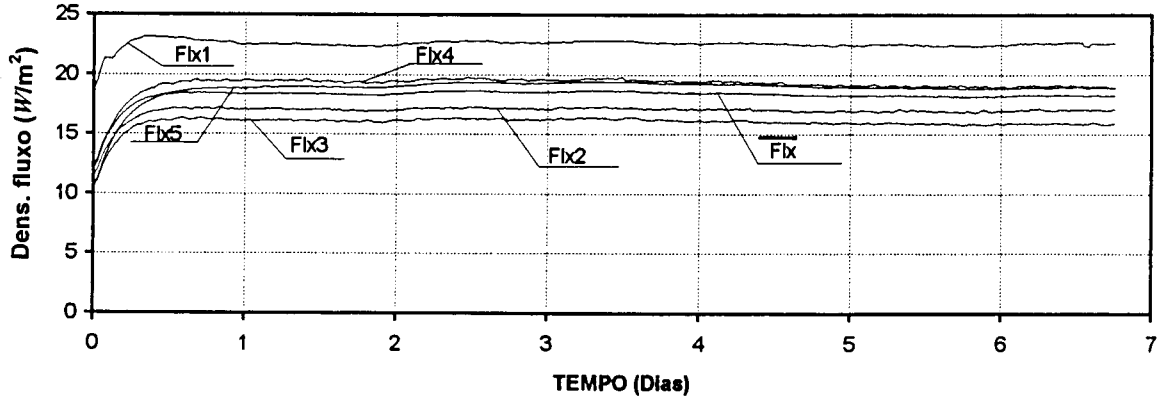
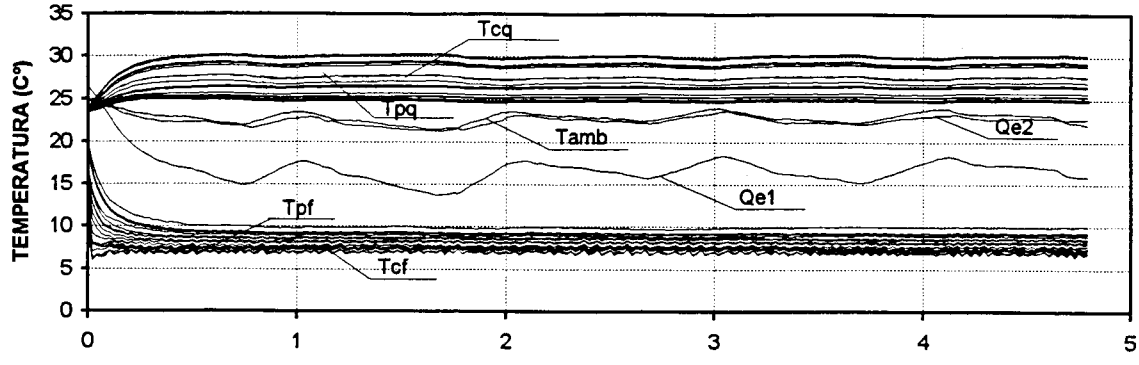
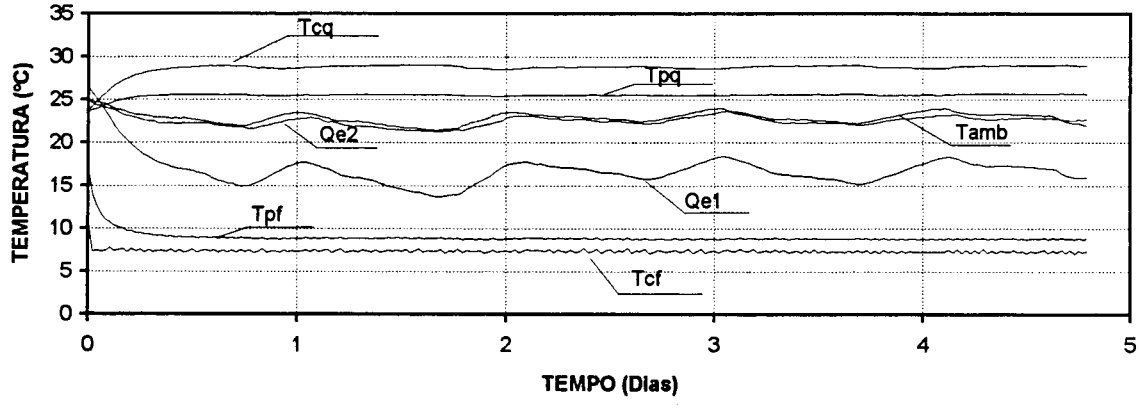


Fig. V.3 (cont.) - Sequência tratamento de dados relativa ao provete 3

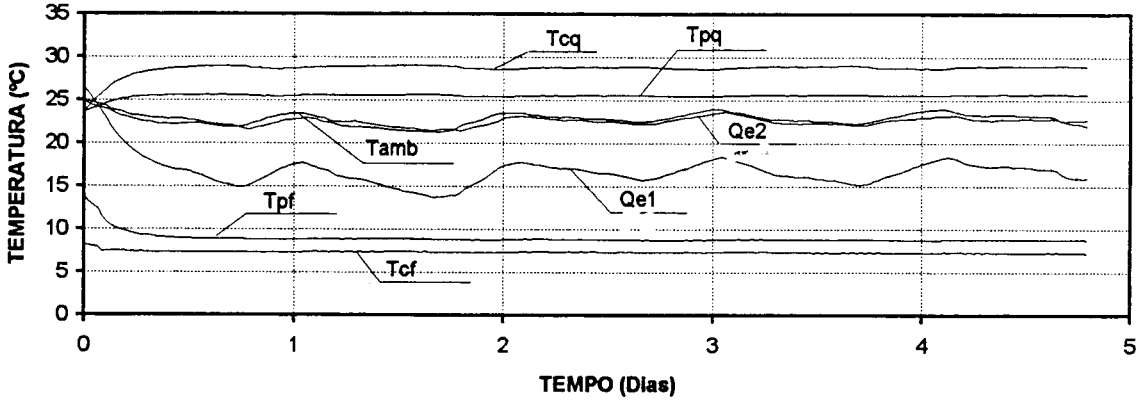
a) Registos obtidos



b) Valores médios dos registos



c) Valores médios corrigidos



d) Potência fornecida

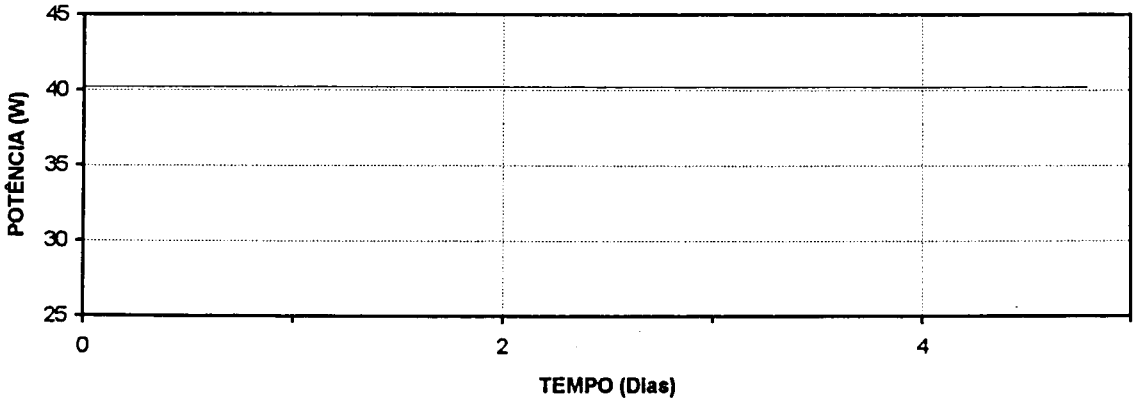
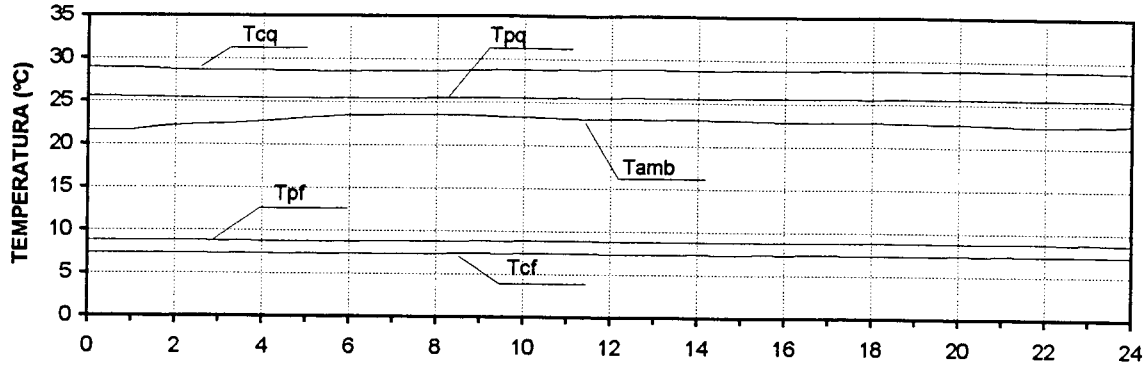
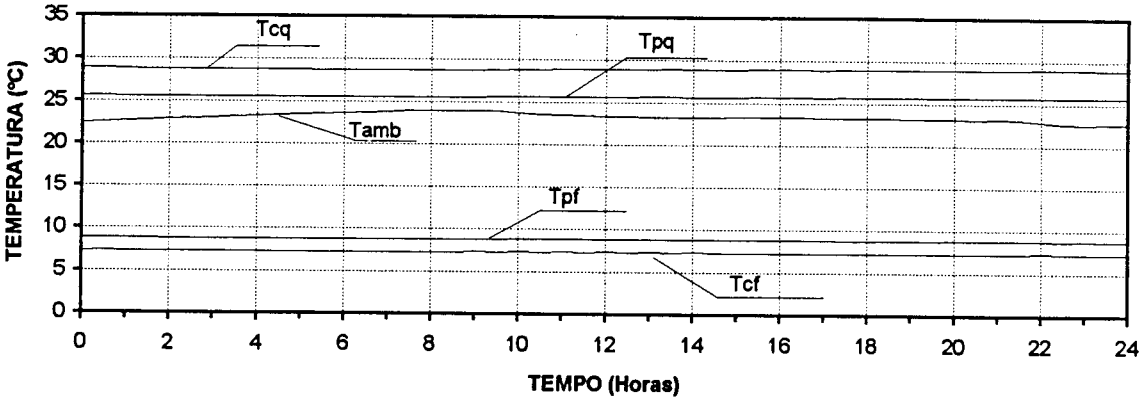


Fig. V.4 - Sequência de tratamento de dados relativa ao provete 4

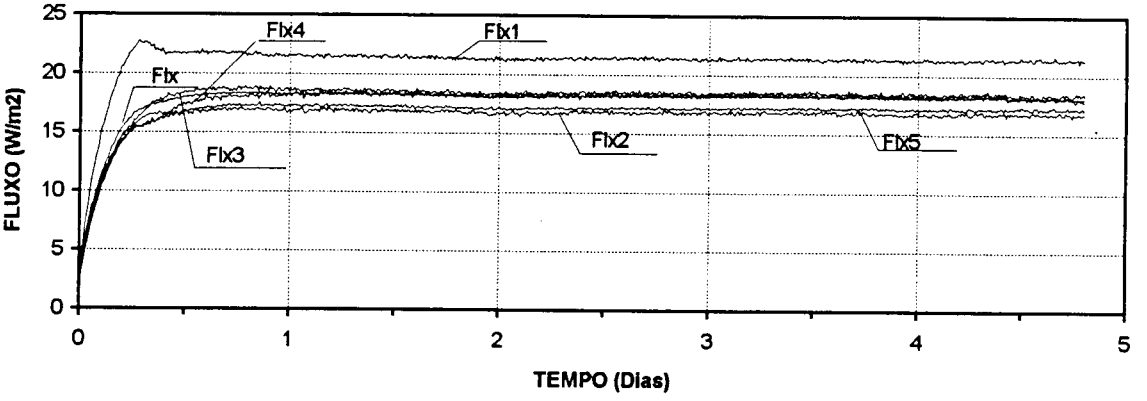
e) 1º Período estacionário



f) 2º Período estacionário



g) Fluxos



h) Fluxos corrigidos

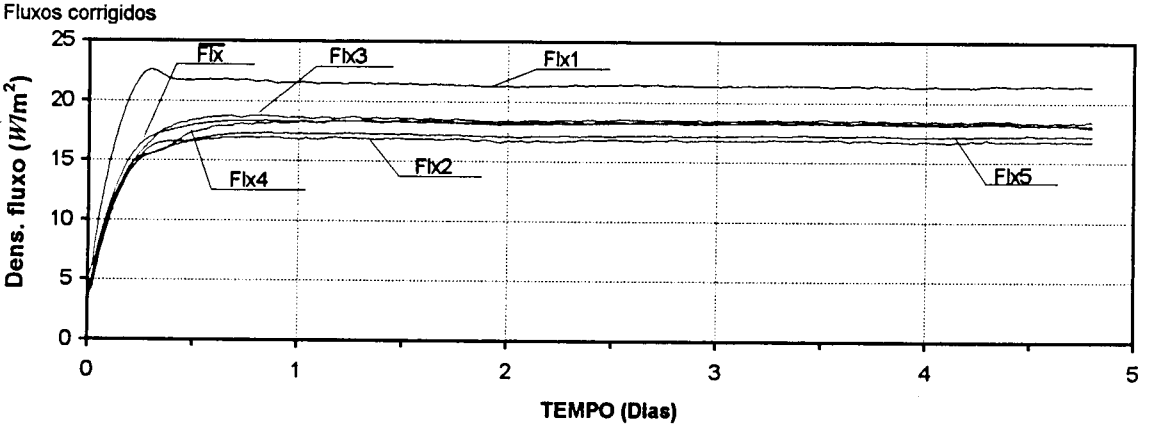


Fig. V.4 (cont.) - Sequência tratamento de dados relativa ao provete 4

Quadro V.1 - Síntese de resultados relativos aos provetes 1 e 2

Provete	Periodo	Temperatura (°C)						Potências (w)			Res.Térm. Sup. ((m².°C)/W)		Coef. Transmisão Térmica (W/(m².°C))						
													Termopares			Fluximetros			
		(1)	*Tamb.*	*Tcq*	*Tpq*	*Tpf*	*Tcf*	*ΔT*	*Pϕ*	*Qϕ*	*Gϕ*	*Rq*	*Rf*	Ensaio k_p	Padronizado K_2	Padronizado médio K_2	*Flx* (W/m²)	Ensaio K_1	Padronizado K_2	Padronizado médio K_2
	15:07-23:30	x̄	23.33	25.53	20.79	10.85	7.27													
		max	24.61	25.75	20.90	10.99	7.37	3.89	55.18	52.68	2.50	0.130	0.098	1.999	2.313		34.18	3.439	2.218	
1	16:07-11:30	min	22.36	25.18	20.63	10.70	7.20													
	17:07-11:30	x̄	23.15	25.21	20.40	10.51	7.33													
		max	25.13	25.41	20.59	10.60	7.42	4.00	55.18	52.60	2.58	0.130	0.087	2.053	2.307		34.29	3.439	2.218	
	18:07-11:30	min	21.93	24.89	20.38	10.42	7.26									**2.30**				**2.22**
(A=1.433 m²)	22:07-08:00	x̄	22.58	29.96	23.82	11.14	7.33													
		max	23.63	30.06	23.87	11.21	7.39	9.51	75.08	65.88	9.20	0.134	0.083	2.032	2.284		43.64	3.442	2.219	
	23:07-08:00	min	21.86	29.78	23.76	11.10	7.27													
	24:07-08:00	x̄	21.94	29.76	23.65	11.03	7.32													
		max	23.25	29.89	23.75	11.06	7.37	9.30	75.08	66.22	8.86	0.133	0.081	2.059	2.300		43.15	3.419	2.210	
	25:08-08:00	min	21.07	29.51	23.55	10.97	7.25													
	29:07-06:00	x̄	23.69	27.77	23.74	9.24	7.24													
		max	25.44	27.99	23.87	9.31	7.34	6.78	50.11	44.38	5.33	0.130	0.066	1.507	1.591		26.57	1.832	1.417	
2	30:07-06:00	min	22.31	27.37	23.62	9.18	7.16													
	31:07-17:00	x̄	23.85	27.93	23.90	9.28	7.26													
		max	25.15	28.15	23.98	9.34	7.34	6.51	50.11	45.10	5.01	0.129	0.065	1.508	1.590		26.60	1.819	1.409	
	01:08-17:00	min	23.02	27.59	23.27	9.22	7.20									**1.58**				**1.34**
(A=1.447m²)	05:08-20:00	x̄	24.12	28.23	24.15	9.34	7.32													
		max	26.19	28.48	24.81	9.43	7.23	6.68	50.11	44.90	5.21	0.131	0.065	1.484	1.569		23.62	1.594	1.270	
	06:08-20:00	min	23.02	27.85	23.98	9.26	7.41													
	14:06-05:00	x̄	23.85	32.65	27.62	9.64	7.33													
		max	25.56	32.87	27.76	9.71	7.41	10.97	65.70	53.97	11.73	0.135	0.062	1.473	1.557		28.53	1.586	1.265	
	15:08-5:00	min	22.22	32.30	27.50	9.56	7.25													

(1) x̄ - Valor médio das temperaturas
max - Valor máximo das temperaturas
min - Valor mínimo das temperaturas

Quadro V.2 - Síntese de resultados relativos ao provete 3 e 4

Provete	Periodo		Temperatura (°C)						Potências (w)			Res.Térm. Sup. ((m².°C)/W)		Coef. Transmisão Térmica (W/(m².°C))					
														Termopares			Fluximetros		
			Tamb.	*Tcq*	*Tpq*	*Tpf*	*Tcf*	*ΔT*	*Pϕ*	*Qϕ*	*Gϕ*	*Rq*	*Rf*	Ensaio K_1	Padronizado K_2	Padronizado médio K_2	*Flx* (W/m²)	Ensaio k_p	Padronizado K_2	Padronizado médio K_2
	27:08-08:00	x̄	24.73	26.93	23.90	8.87	7.31												
		max	26.63	27.29	24.06	8.95	7.42	4.44	40.00	37.06	2.94	0.118	0.061	1.311	1.344		18.60	1.238	1.033	
3	28:08-08:00	min	23.46	26.59	23.76	8.78	7.19													
	30:08-10:00	x̄	13.67	26.83	23.79	8.86	7.29													
		max	24.65	26.98	23.85	8.89	7.34	4.91	40.00	36.65	3.35	0.119	0.062	1.303	1.340		18.24	1.222	1.022	
	31:08-10:00	min	22.67	26.66	23.74	8.81	7.22									**1.32**				**1.02**
(A=1.440m²)	01:09-15:00	x̄	22.09	28.28	24.83	8.97	7.31													
		max	23.47	28.53	24.95	9.04	7.41	1.64	45.00	38.58	6.42	0.129	0.062	1.278	1.330		19.59	1.235	1.031	
	02:09-15:00	min	21.02	27,87	24.61	8.90	7.21													
	04:09-10:00	x̄	22.62	25.43	22.64	8.79	7.33													
		max	23.78	25.75	22.86	8,86	7.39	4.38	34.83	31.94	2.89	0.126	0.066	1.275	1.275		16.51	1.192	1.001	
	05:09-10:00	min	21.90	25.28	22.49	8.75	7.25													
	09:09-10:00	x̄	22.84	28.77	25.52	8.82	7.37													
		max	23.52	28.95	25.58	8.88	7.44	6.43	40.20	35.29	4.91	0.133	0.059	1.139	1.183		18.18	1.089	0.927	
	10:09-10:00	min	21.59	28.52	25.41	8.77	7.30													
	11:09-10:00	x̄	23.26	28.87	25.64	8.80	7.30													
		max	23.96	29.08	25.78	8.84	7.36	6.19	40.20	35.55	4.65	0.132	0.061	1.138	1.182		18.16	1.078	0.920	
	12:09-10:00	min	22.44	28.68	25.56	8.77	7.26													
4	13:09-09:00	x̄	22.07	30.23	26.69	8.63	7.04													
		max	23.00	30.39	26.72	8.92	7.33	8.50	44.16	36.53	7.63	0.143	0.063	1.088	1.145		19.05	1.058	0.905	
	14:09-09:00	min	20.99	29.98	26.51	8.45	6.83													
	15:09-09:00	x̄	20.68	29.63	26.04	8.44	6.93													
		max	21.73	30.40	26.28	8.48	7.00	9.33	44.16	35.26	8.91	0.147	0.062	1.073	1.133		18.08	1.027	0.882	
	16:09-09:00	min	19.62	29.41	25.93	8.40	6.89									**1.13**				**0.89**
(A=1.448m²)	23:09-08:00	x̄	19.49	25.60	22.65	8.08	6.73													
		max	20.15	25.87	22.78	8.13	6.91	6.49	34.80	29.80	5.00	0.143	0.056	1.091	1.152		14.63	1.004	0.865	
	24:09-08:00	min	18.44	25.33	22.54	8.01	6.75													
	26:09-08:00	x̄	19.04	25.60	22.67	8.13	6.92													
		max	20.94	25.78	22.76	8.18	7.02	6.32	34.80	30.00	4.80	0.141	0.058	1.109	1.160		14.67	1.009	0.869	
	27:09-08:00	min	18.87	25.28	22.53	8.04	6.80													
	29:09-11:00	x̄	21.27	23.66	21.91	7.95	6.83													
		max	22.53	23.82	21.29	8.02	6.91	3.00	29.06	27.18	1.88	0.131	0.060	1.115	1.154		12.98	0.979	0.846	
	30:09-11:00	min	19.95	23.44	21.13	7.90	6.77													
	05:10-09:00	x̄	20.99	33.72	29.43	8.61	6.84													
		max	21.66	33.84	29.52	8.65	6.87	12.73	55.29	40.60	15.23	0.150	0.064	1.029	0.913		20.93	1.005	0.866	
	06:10-09:00	min	19.99	33.55	29.35	8.58	6.81													

Quadro V.3 - Síntese de resultados relativos ao provete 5

Provete 5 - (De calibração)											
			Temperatura °C					Potência (W)			
Série	Período	(1)	*Tamb.*	*Tcq*	*Tpq*	*Tpf*	*Tcf*	ΔT	$P\phi$	$Q\phi$	$G\phi$
	4/6 - 3:00	$\bar{x}$	20.01	27.47	25.34	10.21	7.40				
1ª	5/6 - 3:00	max	21.97	27.80	25.64	10.54	7.48	8.17	22.80	15.41	7.39
		min	18.54	27.21	24.94	9.85	7.23				
	5/6 - 3:00	$\bar{x}$	21.08	27.65	25.63	10.35	7.31				
	6/6 - 3:00	max	23.22	27.92	25.85	10.58	7.41	7.55	22.80	15.58	7.22
		min	19.00	27.26	25.30	10.11	7.20				
	7/6 - 19:30	$\bar{x}$	22.18	28.74	26.59	9.67	7.36				
	8/6 - 19:30	max	24.11	28.99	26.79	9.80	7.43	7.51	22.80	17.23	5.57
		min	20.65	28.30	26.24	9.45	7.25				
	11/6 - 21:00	$\bar{x}$	25.10	28.29	26.45	9.71	7.36				
	12/6 - 21:00	max	27.11	28.56	26.62	9.86	7.41	4.58	19.90	17.04	2.86
		min	23.47	27.79	26.16	9.48	7.20				
	12/6 - 21:00	$\bar{x}$	24.66	28.39	26.50	9.73	7.36				
	13/6 - 21:00	max	26.38	28.78	26.74	9.84	7.45	4.83	19.90	17.07	2.83
		min	23.40	27.88	26.16	9.53	7.28				
	18/6 - 8:00	$\bar{x}$	22.40	26.33	24.61	9.06	7.29				
	19/6 - 8:00	max	23.33	26.54	24.74	9.13	7.37	4.46	17.20	15.83	1.37
		min	21.36	26.05	24.52	9.00	7.25				
	20/6 - 8:00	$\bar{x}$	22.55	26.39	24.65	9.05	7.29				
	21/6 - 8:00	max	24.07	26.62	24.82	9.13	7.39	4.56	17.20	15.88	1.32
		min	21.52	26.06	24.32	8.94	7.21				
	26/6 - 18:30	$\bar{x}$	22.40	24.73	23.23	8.85	7.19				
	27/6 - 18:30	max	24.50	25.01	23.37	8.95	7.31	3.35	15.98	14.64	1.34
		min	21.14	24.40	22.92	8.70	7.09				
	18/6 - 12:30	$\bar{x}$	23.45	25.16	23.62	8.90	7.21				
	29/6 - 12:30	max	25.50	25.54	23.85	9.01	7.33	2.98	15.99	14.99	1.00
		min	21.97	24.69	23.23	8.79	7.10				
	11/10 - 10:00	$\bar{x}$	21.99	24.84	23.20	8.38	6.90				
2ª	12/10 - 10:00	max	22.83	25.01	23.07	8.45	6.99	3.56	19.93	15.09	4.84
		min	21.31	24.62	23.29	8.29	6.80				
	14/10 - 20:00	$\bar{x}$	21.18	26.65	24.69	8.48	6.93				
	15/10 - 20:00	max	21.75	26.74	24.74	8.52	6.99	6.01	24.14	16.50	7.64
		min	20.86	26.50	24.62	8.43	6.86				
	19/10 - 11:30	$\bar{x}$	19.34	21.74	20.33	8.05	6.82				
	20/10 - 11:30	max	19.89	22.10	20.62	8.09	6.87	2.40	15.09	12.50	2.59
		min	18.85	21.47	20.11	8.01	6.77				
	23/10 - 8:00	$\bar{x}$	19.11	30.86	28.21	8.65	6.90				
	24/10 - 8:00	max	19.70	31.06	28.29	8.74	6.96	11.75	32.72	19.92	13.00
		min	18.21	30.70	28.14	8.44	6.82				
	7/11 - 10:30	$\bar{x}$	16.32	23.05	22.63	23.38	23.30				
3ª	8/11 - 10:30	max	16.69	23.19	22.76	23.58	23.73	6.74	4.29	-	4.29
		min	15.69	22.89	22.50	23.11	23.21				
	9/11 - 11:00	$\bar{x}$	17.97	23.53	23.13	23.42	23.48				
	10/11 - 11:00	max	18.43	23.82	23.35	23.56	23.64	5.56	4.29	-	4.29
		min	17.40	23.28	22.92	23.24	23.29				

(1) $\bar{x}$ - Valor médio das temperaturas
max - Valor máximo das temperaturas
min - Valor mínimo das temperaturas

ANEXO VI

RESULTADOS COMPLEMENTARES DE ENSAIOS DA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

ANEXO VI

RESULTADOS COMPLEMENTARES DE ENSAIOS DA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

ÍNDICE

VI.1 - GENERALIDADES
VI.2 - CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS PROVETES
VI.2 .1- Constituintes das argamassas de assentamento e reboco
VI.2 .2 - Poliestireno expandido extrudido do provete de calibração
VI.3 - CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS PROVETES
VI.3.1 - Blocos de betão
VI.3.2 - Constituintes e argamassa de assentamento
VI.3.3 - Módulo de elasticidade dos provetes de alvenaria ensaiados à compressão
VI.4 - BOLETINS DE ENSAIO

ANEXO VI

RESULTADOS COMPLEMENTARES DE ENSAIOS DA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

VI.1 - GENERALIDADES

Apresentam-se neste Anexo VI resultados complementares relativos à validação experimental, não referidos no Capítulo 7 .

VI.2 - CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS PROVETES

VI.2 .1- Constituintes das argamassas de assentamento e reboco

a) Areia de rio lavada e peneirada

As características da areia de rio, lavada e peneira, utilizada nas argamassas de assentamento e reboco, proveniente da zona de Alcochete, sintetizam-se de seguida:

- Massa volúmica seca NP - 955 [210] 1459 kg/ m^3
- Análise granulométrica:

Abertura da malha do peneiro (mm)	Percentagem total de inerte retido no peneiro (%)
4.8	0
2.4	2
1.2	14
0.6	63
0.3	98
0.15	100
0.075	100
resto	-

- Módulo de finura - 2.77
- Teor em partículas finas - 0 %

b) **Areia "amarela"**

As características da areia "amarela", proveniente da zona do Alfeite, utilizada na argamassa de reboco, sintetizam-se de seguida:

- Massa volúmica seca NP - 955 [210] 1337 kg/ m^3
- Equivalente de areia E - 199 [211] 55 %
- Análise granulométrica:

Abertura da malha do peneiro (mm)	**Percentagem total de inerte retido no peneiro** (%)
4.8	0
2.4	6
1.2	36
0.6	75
0.3	95
0.15	98
0.075	99
resto	1

- Módulo de finura - 3.10
- Teor em partículas finas - 1 %

c) **Leca 2 / 4**

As características da argila expandida 2/4 , utilizada na argamassa de assentamento, sintetizam-se de seguida:

- Massa volúmica seca NP - 955 [210] 356 kg/ m^3
- Análise granulométrica:

Abertura da malha do peneiro (mm)	**Percentagem total de inerte retido no peneiro** (%)
9.5	0
4.8	84
2.4	100

d) **Argamassas**

d.1) Características mecânicas

As características mecânicas das argamassas de assentamento e reboco endurecidas foram determinadas sobre prismas 40 mm x 40 mm x 160 mm, moldados logo após o fabrico da argamassa por compactação

manual com 20 pancadas em 3 camadas, sintetizando-se as condições de conservação e resultados de ensaio nos Boletins de Ensaio *LNEC* 943/94 e 1392/94.

d.2) Condutibilidade térmica

Sintetizam-se no Boletim de Ensaio *LNEC* 197/94 - *NCCt* os resultados e as condições em que foi determinada a condutibilidade térmica da argamassa leve de assentamento utilizada.

VI.2 .2 - Poliestireno expandido extrudido do provete de calibração

Sintetizam-se no Boletim de Ensaio *LNEC* 175/94 - *NCCt* os resultados e as condições em que foi determinada a condutibilidade térmica do poliestireno expandido extrudido constituinte do provete de calibração.

VI.3 - CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS PROVETES

VI.3.1 - Blocos de betão

Apresenta-se nos Quadros VI.1 e VI.2 a síntese dos resultados da caracterização dimensional e mecânica efectuada nas duas geometrias de blocos utilizadas nos provetes objecto de ensaios mecânicos, 500 mm x 200 mm x 250 mm corrente e *melhorada.*

Os ensaios foram efectuados segundo a técnica constante da NF P 14-304 [137] , salvo a percentagem de furação que foi determinada de acordo com a técnica constante da BS 6073:2 [138].

Quadro VI.1 - Características geométricas e mecânicas dos blocos 500 x200 x 250 correntes

Nº Ordem	Dimensões exteriores (mm)			Percen. de furação	Espessura dos septos (mm)		Área	Força de rotura	Tensão de rotura f'_b
	Comp.	Larg.	Alt.	(%)	Int.	Ext.	(m^2)	(kN)	(MPa)
1	496	247	189	41.7	23	23	0.1225	230.7	1.88
2	491	248	190	41.9	22	23	0.1218	190.0	1.56
3	492	248	191	41.5	23	22	0.1220	181.4	1.49
4	495	248	190	41.2	23	23	0.1223	232.0	1.90
5	496	247	190	41.3	22	23	0.1225	192.6	1.57
6	495	248	189	41.6	23	23	0.1228	242.0	1.97
Média	494	247	190	41.5	23	23	-	-	1.73
Coef. var.	-	-	-	0.6	-	-			12%

Quadro VI.2 - Características geométricas e mecânicas dos blocos 500 x 200 x 250 *melhorados*

Nº Ordem	Dimensões exteriores (mm)			Percen. de furação	Espessura dos septos (mm)		Área	Força de rotura	Tensão de rotura f'_b
	Comp.[1]	Larg.	Alt.	(%)	Int.	Ext.	(m^2)	(kN)	(MPa)
1	499/ 490	251	190	39.1	19	19	0.1242	275.0	2.21
2	497/489	251	189	39.7	19	18	0.1237	285.0	2.30
3	496/489	251	190	39.3	19	19	0.1236	212.0	1.72
4	497/488	252	190	39.6	19	19	0.1241	237.5	1.91
5	498/490	250	189	39.5	18	19	0.1235	235.7	2.23
6	499/ 490	251	191	39.3	19	19	0.1242	234.3	1.89
Média	498/ 489	251	190	39.4	19	19	-	-	2.04
Coef. var.	-	-	-	0.5	-	-			11%

1 - valores diferentes na face exterior e interior

VI.3.2 - Constituintes e argamassa de assentamento

a) **Areia fina**

As características da areia utilizada nas argamassas, proveniente da zona de Aveiro, sintetizam-se de seguida:

- Teor de humidade NP - 956 [209] 4.1 %
- Massa volúmica seca NP - 955 [210] 1565 kg/ m^3
- Análise granulométrica

Abertura da malha do peneiro (mm)	Percentagem total de inerte retido no peneiro (%)
9.5	1
4.8	2
2.4	6
1.2	11
0.6	27
0.3	58
0.15	98
0.075	99
resto	1

- Módulo de finura - 2.03
- Teor em partículas finas - 1 %

b) **Argamassa**

As características mecânicas das argamassas endurecidas foram determinadas sobre prismas 40 mm x 40 mm x 160 mm moldados logo após o fabrico da argamassa por compactação manual com 20 pancadas em 3 camadas. A conservação e cura dos provetes, após desmoldagem, foi efectuada por imersão em água até à data de ensaio. A realização dos ensaios foi efectuada segundo a técnica da NP EN 196-1 [212]. Os resultados estão sintetizados no Quadro VI.3 .

Quadro VI. 3 - Características mecânicas das argamassas utilizadas no assentamento dos provetes de alvenaria para ensaios de compressão

Traço (em volume)	Data de fabrico	Nº de prismas	Massa volúmica média (kg/m^3)	Tensão de rotura à flexão aos 28 dias (MPa)		Tensão de rotura à compressão aos 28 dias f_m	
				Individual	Média	Individual	Média
1:4 (cimento :areia)	95.05.08	3	2165	2.1	2.0	6.8	6.8
	95.05.08	3	2160	1.9		6.7	
	95.0509	3	2170	2.0		6.6	
	95.05.10	3	2167	2.2		7.5	
	95.05.11	3	2160	1.9		6.3	

VI.3.3 - Módulo de elasticidade dos provetes de alvenaria ensaiados à compressão

A determinação do módulo de elasticidade respeitou o expresso na norma pr EN 1052-1 [125] e corresponde ao módulo secante entre a origem e cerca de 1/3 da tensão de rotura, sendo calculado a partir da média das 4 determinações da deformação vertical, 2 em cada face do provete.

Nas figs. VI.1 a VI.8 apresentam-se os diagramas tensões-extensões obtidos até próximo da rotura.

VI.4 - BOLETINS DE ENSAIO

Apresentam-se em anexo os Boletins de Ensaio referidos ao longo do texto.

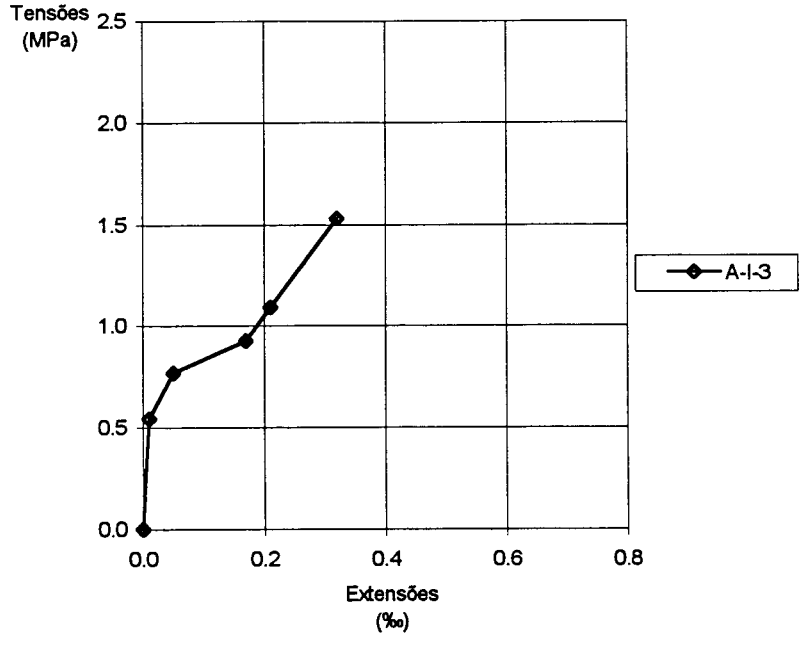


Fig. VI.1 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série A - I

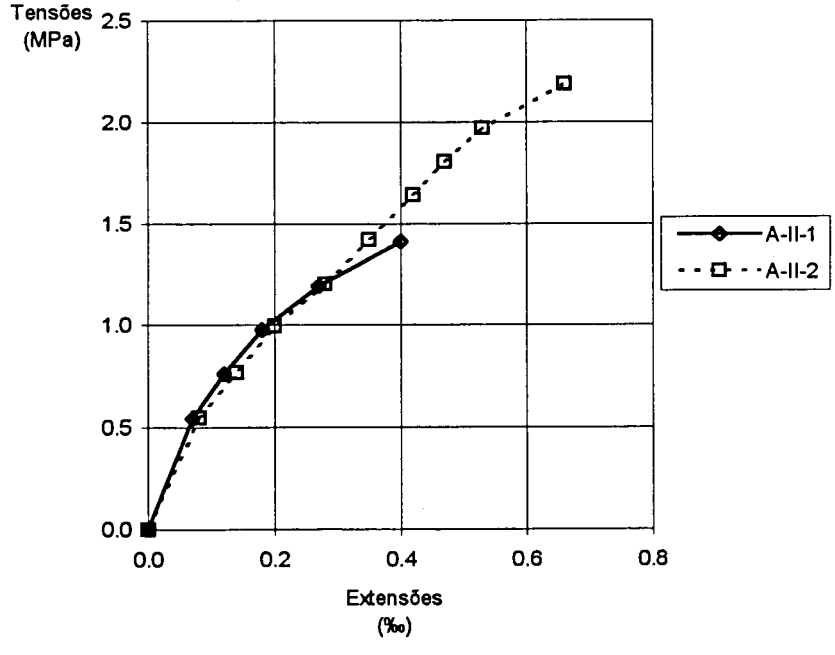


Fig. VI.2 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série A - II

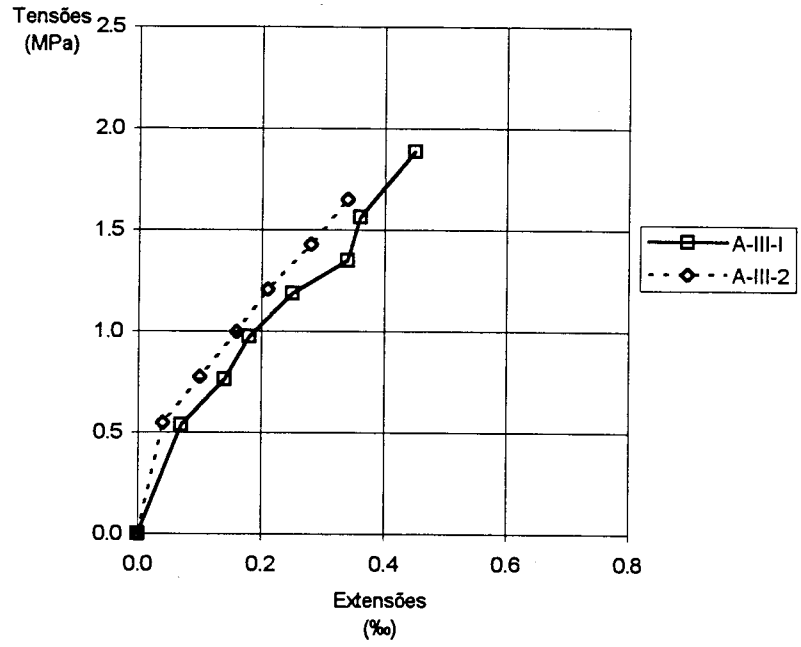


Fig. VI.3 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série A - III

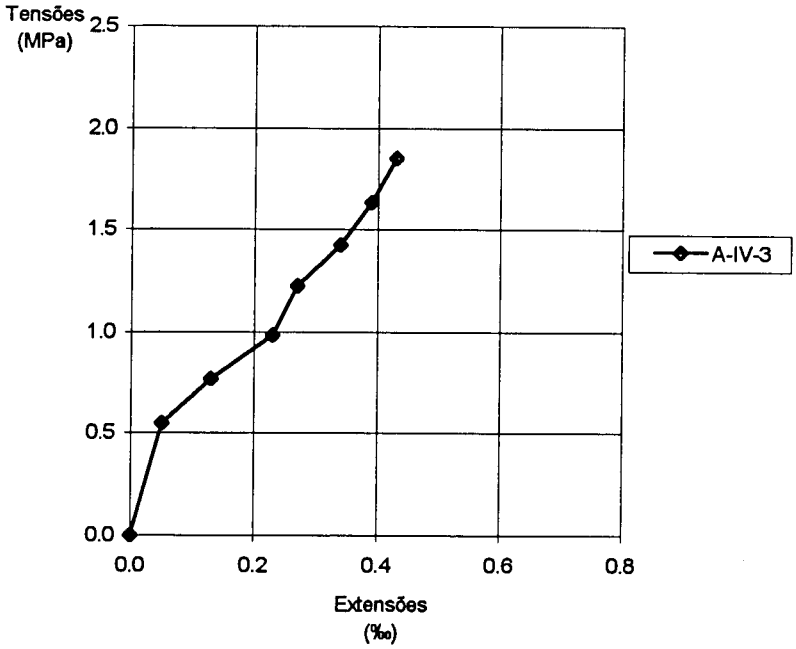


Fig. VI.4 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série A - IV

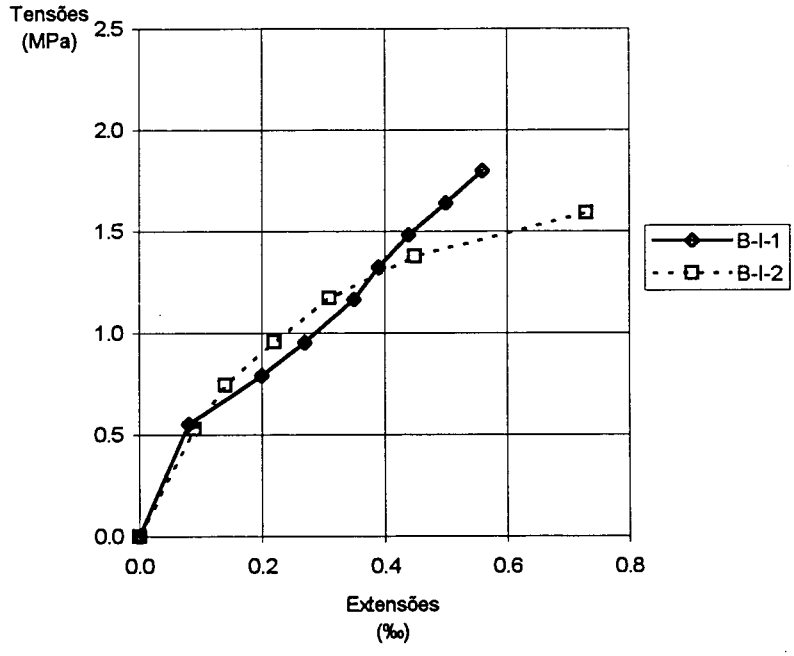


Fig. VI.5 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série B - I

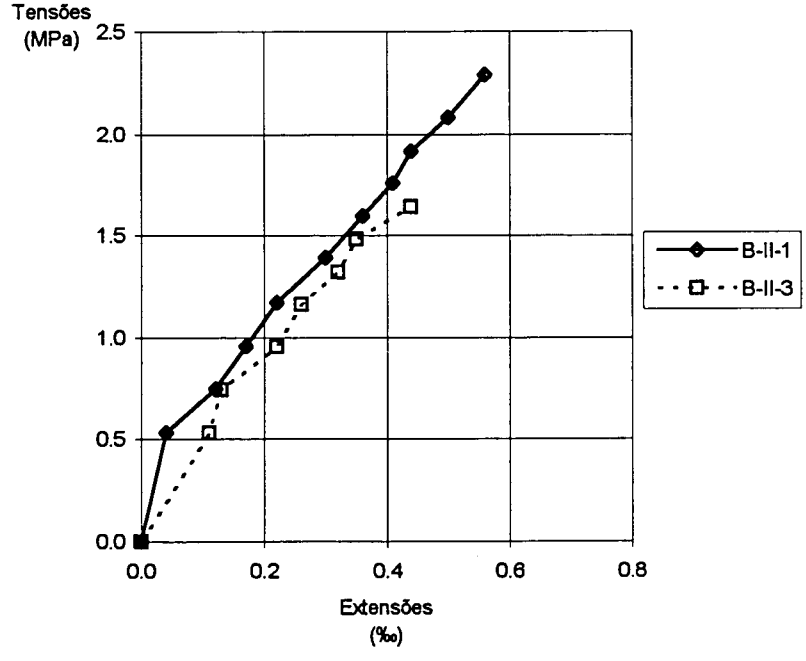


Fig. VI.6 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série B - II

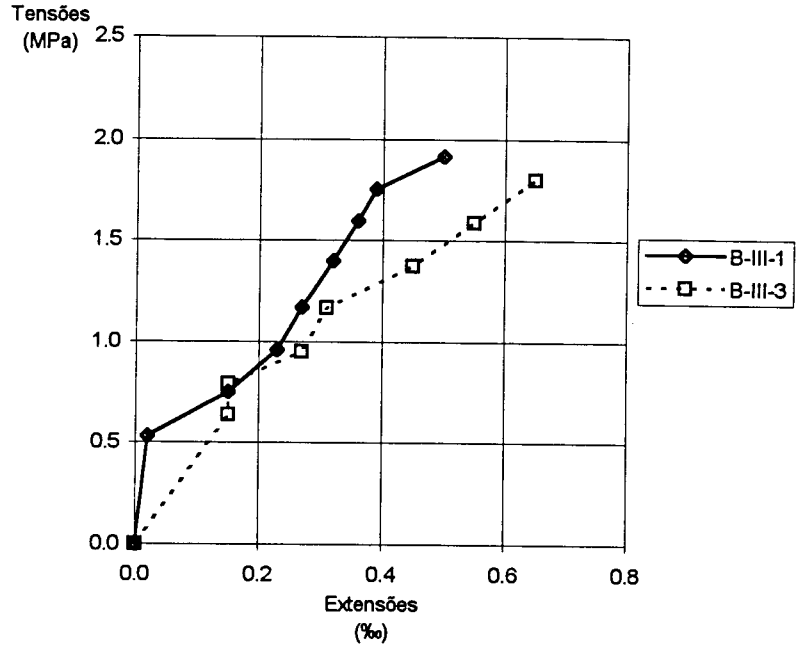


Fig. VI.7 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série B - III

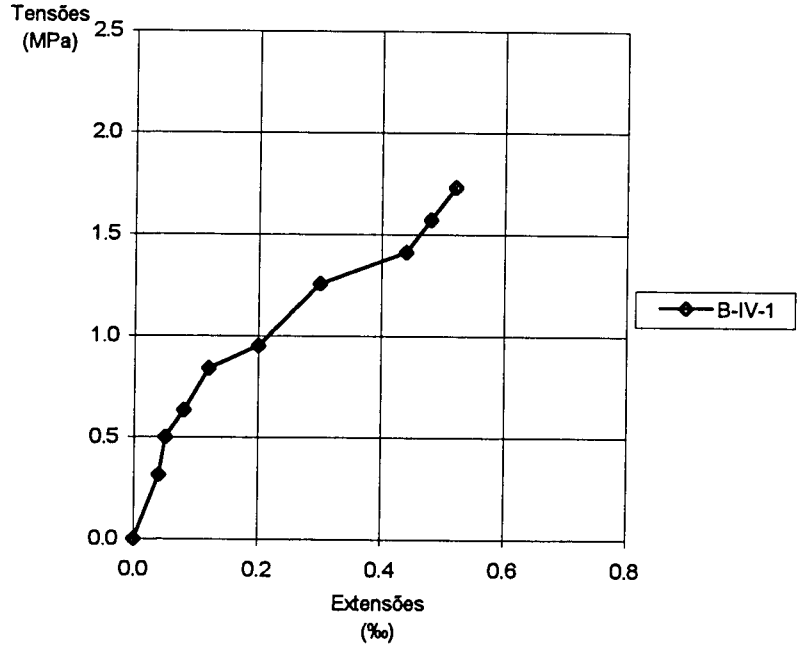


Fig. VI.8 - Diagrama tensões - extensões em compressão normal dos provetes série B - IV

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO
NÚCLEO DE AGLOMERANTES E BETÕES
Av. do Brasil, 101, 1799 LISBOA CODEX
Tel. 848 21 91 (1750) LNEC P Fax 80 76 43

O ENG.º CHEFE DO DEPARTAMENTO
AMÉLIA PEREIRA F. ROCHA

xxxxxx Obra 022/511/1 AMOSTRA N.º 22 287 BOLETIM N.º 943/94

ENTIDADE REQUISITANTE	DED - Núcleo de Processos de Construção		
ENDEREÇO	- Mod. 4 nº 13 151		
REFERÊNCIA	Procº 082/79/10983 DE 94/05/18	REQUERIMENTO DE	- / - / -
OBRA	-	MARCA	-
MATERIAL	Argamassas de assentamento e de reboco	CLASSE	-
IDENTIFICAÇÃO	-	RECIBO N.º	- DE - / - / -
ENSAIO PAGO POR	-	DATA DE ENTRADA	94/05/16

1 - INTRODUÇÃO

O Núcleo de Aglomerantes e Betões recebeu do Núcleo de Processos de Construção uma argamassa de assentamento e outra de reboco para a moldagem de provetes de 40x40x160 mm^3 e subsequente determinação das resistências mecânicas.

2 - CONDIÇÕES DE ENSAIO

Os provetes foram moldados em três camadas, tendo cada uma delas sido apiloada por vinte vezes. Após a desmoldagem, os provetes foram conservados em água doce a 20 ± 1°C, ou colocados ao ar livre, junto do local onde foi aplicada a argamassa.

A determinação das resistências mecânicas foi efectuada de acordo com a Norma Portuguesa EN 196-1 de 1990.

Continua

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO
AGLOMERANTES E BETÕES
NÚCLEO DE
Av. do Brasil 101 1799 LISBOA CODEX
Tel. 84 21 31 / 1760 LNEC Telex 19 [illegible]

O ENG. CHEFE DO DEPARTAMENTO

AGUA-PEREIRA E ROCHA

xxxxxx Obra 022/511/1 AMOSTRA N.º 22 287 BOLETIM Nº 943 /94

Continuação

3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

Nº de provete	Conservação	Tensão de rotura por flexão (MPa)	Média	Tensão de rotura por compressão (MPa)		Média
1	Água doce	2,7	2,6	10,8	10,2	11,0
2		2,6		10,9	11,8	
3		2,6		10,8	11,2	
4	Ar livre	3,1	3,0	12,4	12,3	12,0
5		2,7		11,9	11,9	
6		3,1		11,4	11,9	
7	Água doce	2,6	2,5	11,1	10,3	10,3
8		2,6		10,5	9,8	
9		2,3		10,4	9,8	
10		2,9	2,9	9,8	9,7	10,1
11		3,0		10,3	10,0	
12		2,7		10,4	10,3	
13	Ar livre	3,4	3,5	17,9	18,0	17,8
14		3,3		17,4	17,3	
15		3,9		18,2	18,2	
16		4,7	4,8	21,5	20,1	20,6
17		4,9		22,3	20,9	
18		4,7		19,3	19,5	

/JMN.

LISBOA, 1994 JUL 20 DE 19

O ENG. CHEFE DO NÚCLEO

LNEC — Mod. 156-8

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO
NÚCLEO DE AGLOMERANTES E BETÕES
Av. do Brasil 101 1799 LISBOA CODEX
Tel. 84 21 31 16 00 LNEC P Telex 43 233 20

O ENG.º CHEFE DO DEPARTAMENTO

M. J. Esteves Ferreira

xxxxxx Obra 022/551/1 AMOSTRA N.º 24 286 BOLETIM N.º 1392/94

ENTIDADE REQUISITANTE	DED - Núcleo de Processos de Construção				
ENDEREÇO	-		Mod. 4 nº 13 198		
REFERÊNCIA	Procº 082/79/10983	PEDIDO DE	94/06/24	REQUERIMENTO DE	- / - / -
OBRA	-			MARCA	-
MATERIAL	Argamassas			CLASSE	-
IDENTIFICAÇÃO	-			RECIBO N.º	.. DE - / - / -
ENSAIO PAGO POR	-			DATA DE ENTRADA	94/06/22

1 - INTRODUÇÃO

O Núcleo de Aglomerantes e Betões recebeu do Núcleo de Processos de Construção duas argamassas leves (provetes 1 a 12) e uma argamassa bastarda (provetes 13 a 18) para a moldagem de provetes de 40 x 40 x 160 mm^3 e subsequente determinação das resistências mecânicas aos 28 dias.

2 - CONDIÇÕES DE ENSAIO

Os provetes foram fabricados em três camadas distintas, tendo cada uma delas sido apiloada por vinte vezes. Após a desmoldagem, metade dos provetes foi conservada em água doce a 20 ± 1°C, enquanto os restantes foram colocados ao ar livre, junto do local onde foi aplicada a argamassa.

A determinação das resistências mecânicas foi efectuada de acordo com a Norma Portuguesa EN 196-1 de 1990.

Continua

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO
NÚCLEO DE AGLOMERANTES E BETÕES
Av. do Brasil, 101 - 1799 LISBOA CODEX
Tel.ex 08 21 51 - 1760 LNEC P - Fax 89 70 96

O ENG. CHEFE DO DEPARTAMENTO

M. J. Esteves Ferreira

xxxxxxxx Obra 022/551/1 AMOSTRA N.º 24 286 BOLETIM Nº 1392/94

Continuação

3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

Nº de provete	Conservação	Tensão de rotura por flexão (MPa)	Média	Tensão de rotura por compressão (MPa)		Média
1	Água doce	3,0	3,0	11,9	13,7	13,4
2		3,1		14,2	14,2	
3		2,9		12,4	13,8	
4	Ar livre	3,6	3,7	11,3	11,4	13,5
5		3,6		14,2	15,2	
6		3,8		14,3	14,8	
7	Água doce	2,1	2,3	8,4	9,9	10,8
8		2,3		12,4	11,8	
9		2,6		11,1	9,9	
10	Ar livre	2,9	3,0	9,9	9,9	10,8
11		2,9		12,4	11,8	
12		3,1		11,1	9,9	
13	Água doce	1,9	1,9	9,3	10,2	7,5
14		1,8		8,2	8,0	
15		1,9		7,0	7,3	
16	Ar livre	1,5	1,5	7,2	7,4	7,5
17		1,4		8,2	8,0	
18		1,5		7,0	7,3	

/JMN.

LISBOA, 1994 NOV. - 7. DE 19

O ENG. CHEFE DO NÚCLEO

LNEC — Mod. 156-B

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Telegramas: LNEC Telefones 848 21 31 71 Telex 16760 LNEC P Telefax 848 78 60
Avenida do Brasil 101 1799 LISBOA CODEX PORTUGAL

O ENG. CHEFE DO DEPARTAMENTO

J. Vasconcelos Paiva

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS
Núcleo de Comportamento das Construções

OBRA 083/551/417
PROCº 082/79/10983 **BOLETIM nº 197/94 - NCCt**

ENTIDADE REQUISITANTE: Engº Hipólito de Sousa
ENDEREÇO:
AMOSTRA:
DATA DE PEDIDO: 1994-11-21
MATERIAL: Argamassa leve de assentamento de alvenaria
MARCA:
IDENTIFICAÇÃO:

ARGAMASSA LEVE DE ASSENTAMENTO DE ALVENARIA
DETERMINAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

1 - OBJECTO

No presente Boletim de Ensaio são apresentados os resultados obtidos na determinação da condutibilidade térmica de provetes de uma argamassa leve de assentamento de alvenaria.

De acordo com a informação do requerente, os provetes ensaiados apresentavam a seguinte composição:

Cimento Portland composto tipo II (32.5)	- 10 l
Leca 2/4	- 20 l
Areia	- 20 l
Água	- 9 l

Cada provete tinha dimensões faciais de 300mm x 300 mm e espessuras indicadas no quadro 1 (vd.4). As massas volúmicas dos provetes após condicionamento até obtenção de massa constante, num ambiente caracterizado por uma temperatura de 23±1°C e uma humidade relativa de 50±3%, são igualmente apresentadas no quadro 1.

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Telegramas: LNEC Telefones: 848 21 31 / 7 Telex: 16 760 LNEC P Telefax: 849 75 60
Avenida do Brasil 101 — 1799 LISBOA CODEX PORTUGAL

O ENG. CHEFE DO DEPARTAMENTO

I Vasconcelos Paiva

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS
Núcleo de Comportamento das Construções

OBRA 083/551/417
PROCº 082/79/10983 **BOLETIM nº** 197/94 - NCCt

3 - TÉCNICA DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados segundo os princípios gerais da Norma Internacional ISO 8301 - "Thermal insulation. Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Heat flow meter apparatus", a qual será adoptada, eventualmente com adaptações, na futura normalização europeia de materiais de isolamento térmico para edifícios.

A sala de ensaio caracterizou-se por uma temperatura ambiente de 23±1°C e uma humidade relativa de 50±3%.

A temperatura e a queda de temperatura médias dos provetes durante os ensaios são apresentadas no quadro 1. Nesse quadro figuram também os teores de água dos provetes após conclusão dos ensaios.

A variação média da humidade dos provetes durante os ensaios foi insignificante.

4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os valores obtidos para a condutibilidade térmica dos quatro provetes ensaiados constam do quadro 1.

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Telegramas: LNEC Telefones: 848 21 31/7 Telex: 16700 LNEC P Telefax: 849 76 90
Avenida do Brasil, 101 — 1799 LISBOA CODEX PORTUGAL

O ENG. CHEFE DO DEPARTAMENTO

J. Vasconcelos Paiva

...NEC ... sem prévia expressa autorização ...

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS
Núcleo de Comportamento das Construções

OBRA 083/551/417
PROCº 082/79/10983 **BOLETIM nº 197/94 - NCCt** **Pág.** 3/3

Quadro 1 - Valores individuais e médios das determinações dos ensaios de condutibilidade térmica de uma argamassa leve de assentamento de alvenaria

Provete	Características dos provetes			Condições de ensaio		Condutibilidade térmica (W/m.°C) *
	espessura de ensaio (mm)	massa volúmica aparente (kg/m³)	teor de água após ensaio (% *m/m*)	difª média de temperatura (°C)	temperatura média (°C)	
1	59,6	1538,2	3,2	19,1	15,6	0,436
2	60,2	1530,8	3,4	18,8	15,3	0,470
3	60,7	1476,7	3,2	19,1	15,6	0,454
4	61,1	1490,9	3,3	18,9	15,4	0,439
média	—	**1509,2**	—	—	**15,5**	**0,45**

* — Devido às características térmicas dos provetes ensaiados a exactidão dos resultados estima-se em ±5%.

LISBOA, 14 de Dezembro de 1994

Técnico 1ª

Investigador Auxiliar

O ENGº CHEFE DO NÚCLEO

Pedro M. Pontífice de Sousa

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

O ENG. CHEFE DO DEPARTAMENTO
J. Vasconcelos Paiva

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização.
Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas nas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do Laboratório.

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS
Núcleo de Comportamento das Construções
LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE PLÁSTICOS CELULARES (LNEC/LEPC)

OBRA 083/551/417
PROC° 082/79/10983 BOLETIM n° 175/94 - LNEC/LEPC

ENTIDADE REQUISITANTE: Engº Hipólito de Sousa
ENDEREÇO:
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: 18/94
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA: 2 placas de poliestireno expandido extrudido, marca DOW, Refª AGMATE XL, cor azul
DATA DE RECEPÇÃO DA AMOSTRA: 94-12-07
DATA DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO: 94-12-12

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

1 — NORMA/ESPECIFICAÇÃO DE ENSAIO

Norma Internacional ISO 2581/1975 (Ed. 1) — "Plastics - Rigid cellular materials - Determination of apparent thermal conductivity by means of a heat-flow metter", (method AS).

O ensaio incidiu sobre um provete com as seguintes dimensões nominais: comprimento e largura iguais a 300 mm e espessura de ensaio indicada no quadro 1 (vd.3).

O provete foi previamente condicionado, durante um período de 96 h, num ambiente caracterizado por uma temperatura de 23±1°C e uma humidade relativa de 50±3%.

O ensaio decorreu num ambiente de características idênticas ao ambiente de condicionamento inicial (23±1°C; 50±3% HR).

2 — PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM

Amostragem efectuada pela entidade requisitante.

A amostra 18/94 era constituída por duas placas (A e B) com dimensões faciais de 1200 mm x 1200 mm e espessura de 40 mm.

De cada placa foi preparado um provete com dimensões faciais

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
O ENG. CHEFE DO DEPARTAMENTO
J. Vasconcelos Paiva

nominais de 300 mm x 300 mm.

3 — RESULTADOS DO ENSAIO

Os resultados do ensaio são apresentados no quadro 1.

Quadro 1 — Valores médios obtidos no ensaio de determinação da condutibilidade térmica de provetes de poliestireno expandido extrudido

Provete	Características do provete				Condições de ensaio				Resultados do ensaio
	Espessura de ensaio l (mm)	Massa inicial (g)	Massa após ensaio (g)	Massa volúmica aparente após ensaio (kg/m³)	Direcção e sentido do fluxo	Tempª da face quente T_h (°C)	Tempª da face fria T_m (°C)	Tempª média T (°C)	Condutibilidade térmica λ (W/m.°C)
A	39,7	147,7	147,8	41,1	Ascendente	25,5	5,7	15,6	0,027
B	39,5	149,9	150,0	41,9	Ascendente	25,5	5,8	15,7	0,028
Média	—	—	—	**41,5**	—	—	—	15,7	**0,028**

4 — OBSERVAÇÕES

Os resultados do ensaio dizem exclusivamente respeito aos provetes ensaiados.

O equipamento fluximétrico para determinação da condutibilidade térmica é calibrado mensalmente para a temperatura média de ensaio de 10 °C e semestralmente na gama de temperatura média de ensaio de 0°C a 30°C, por técnicos do LNEC/LEPC. Utiliza-se um padrão de referência do National Institute for Sciences and Technology (NIST, ex-NBS), identificado por "SRM 1450b. Fibrous Board Insulation Material", cuja curva de calibração se encontra em arquivo no

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Telegramas: LNEC, Telefones: 848 21 31 77, Telex: 16790 LNEC P, Telefax: 84 97 60
Avenida do Brasil, 101 — 1799 LISBOA CODEX PORTUGAL

O ENG. CHEFE DO DEPARTAMENTO

J. Vasconcelos Paiva

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS
Núcleo de Comportamento das Construções
LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE PLÁSTICOS CELULARES (LNEC/LEPC)
OBRA 083/551/417
PROC° 082/79/10983 **BOLETIM n° 175/94 - LNEC/LEPC**

LNEC/LEPC. Os procedimentos de calibração constam, igualmente, deste arquivo.

LISBOA, 14 de Dezembro de 1994

O Técnico Experimentador
Técnico de 1ª

O Chefe do LNEC/LEPC
Investigador Auxiliar

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
0000002132