

INFLUÊNCIA DAS ARGAMASSAS SOBRE O GRANITO EM CANTARIAS E ALVENARIAS

GILDA FERREIRA DA COSTA FILIPE DE SOUSA

Dissertação submetida para satisfação dos requisitos do grau de
MESTRE EM REABILITAÇÃO DO PATRIMÓNIO EDIFICADO

Orientador: Professor Doutor Arlindo Jorge Sá de Begonha

JUNHO DE 2009

MESTRADO EM REABILITAÇÃO DO PATRIMÓNIO EDIFICADO 2005/2007

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mrpe@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Reabilitação do Património Edificado - 2005/2007 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Em memória dos meus pais

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar este trabalho gostaria de expressar a minha gratidão às pessoas e entidades que de várias formas contribuíram para esta dissertação.

Ao Professor Doutor Arlindo Jorge Sá de Begonha, sob cuja orientação decorreu a realização deste trabalho, pelo seu apoio incondicional, empenho e rigor inexcedível.

Ao Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em particular ao Professor Doutor Afonso Serra Neves, pela facilidade prestada na execução dos ensaios e aos técnicos Senhor Fernando Hora e Senhor Manuel Cardoso pelo auxílio prestado na preparação e execução de alguns ensaios.

À Senhora Dra. Daniela Silva, do Centro de Materiais da Universidade do Porto, pela disponibilidade dispensada na análise por microscopia electrónica por varrimento.

Ao Dr. Luis Pinho da Silva pela prontidão e rapidez do auxílio prestado na tradução para castelhano.

Ao Professor Doutor Fernando Ferreira, pela verificação e revisão da dissertação.

À Senhora D. Maria de Lurdes Lopes do Instituto da Construção, pela ajuda constante em todos os pedidos efectuados.

À Senhora D. Maria Teresa Pinto da Secção de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, pela ajuda na disponibilização do acesso aos laboratórios.

A todos os meus colegas da Velnor II pelo espírito de camaradagem e em especial à Eng. Ana Paula Português pela revisão do trabalho e ao Eng. Luis Rocha pelo tempo cedido para a execução desta dissertação.

À minha família e amigos pelos estímulos dispensados e disponibilidade de colaboração sempre imediata.

Ao meu querido e companheiro Telmo pela dedicação, paciência, apoio incondicional, pelos levantamentos fotográficos e tradução para inglês. Obrigada.

RESUMO

Este trabalho teve como principal objectivo estudar a influência de vários tipos de argamassas sobre o granito em cantarias e alvenarias.

Foi feito o estado da arte relativo às definições, conceitos, classificações, funções, propriedades e evolução da composição das argamassas. Referem-se alguns dos constituintes das argamassas, nomeadamente a cal, cimento, cinzas volantes, areias e água. Abordam-se os processos de fabrico da cal e do cimento Portland. Apontam-se requisitos geométricos, químicos, físicos e mecânicos. Faz-se a caracterização das argamassas sob o ponto de vista dos requisitos mecânicos, físicos e químicos. Na conservação e reabilitação das argamassas, são referidas as deteriorações, influência das argamassas nas cantarias e alvenarias de pedra e os métodos de análise e caracterização das mesmas.

Executaram-se provetes de argamassas, tendo em atenção os constituintes, a preparação dos provetes e as condições de cura. Realizaram-se ensaios sobre os provetes de argamassas, designadamente as resistências mecânicas à flexão e à compressão, porosidade livre às 48 horas, absorção de água por capilaridade e evaporação de água. Executaram-se provetes constituídos por duas pedras de granito do Porto e junta de argamassa em que se efectuaram ensaios com ciclos de molhagem e secagem e análise por microscopia electrónica por varrimento.

Na parte final da dissertação, formulam-se as conclusões retiradas do trabalho e apresentam-se, em Anexo, os resultados obtidos dos ensaios efectuados.

Palavras chaves : argamassa, cantaria, alvenaria, granito, deteriorações

ABSTRACT

The main objective of this work was to study the influence of various types of mortars on granite stone and stone masonry.

A state of the art has been carried out concerning the definitions, concepts, classifications, functions, properties and evolution of the composition of the mortars. There are references to some of the constituents of mortars, including lime, cement, fly ash, sand aggregates and water. The manufacturing processes of lime and Portland cement are referred. Geometrical, chemical, physical and mechanical requirements were identified. The characterization of mortars was made in terms of mechanical, physical and chemical requirements. In the Conservation and rehabilitation of mortars are reported the deteriorations, the influence of mortar on stone and stone masonry, the methods of analysis and the characterization of the mortars.

Samples of mortars were executed, taking in account the constituents, preparation of samples and conditions of cure. There were tests on mortars, in particular the mechanical resistance to bending and compression, free porosity after 48 hours, water absorption by capillarity and water evaporation. Wetting and drying tests and analysis by scanning electron microscopy were conducted in samples composed of two stones of the Porto granite with mortar joints.

In the final part of the dissertation, the conclusions from the present work are formulated. In Annex are presented the results of the tests.

Keywords: mortar, stone, masonry, granite, deterioration

RESUMEN

Este trabajo tuvo como principal objetivo estudiar la influencia de varios tipos de morteros sobre granito en canterías y albañilerías.

Se hizo el estado del arte relativo a las definiciones, conceptos, clasificaciones, funciones, propiedades y evolución de la composición de los morteros. Se hizo referencia a algunos de los constituyentes de los morteros, en particular la cal, cemento, cenizas volantes, arenas y agua. Se abordaron los procesos de fabricación de la cal y del cemento Portland. Se apuntan requisitos geométricos, químicos, físicos y mecánicos. Se caracterizan los morteros desde el punto de vista de los requisitos mecánicos, químicos y físicos. En la conservación y rehabilitación de los morteros, se hizo referencia a los deterioros, influencia de los morteros en las canterías y albañilerías de piedra y los métodos de análisis y caracterización de los morteros.

Se ejecutaron probetas de morteros, con atención a los materiales de su constitución, la preparación de las probetas y condiciones de curado. Se realizaron ensayos sobre los morteros, en particular las resistencias mecánicas a la flexión y compresión, porosidad libre a las 48 horas, absorción de agua por capilaridad y evaporación de agua. Se ejecutaron probetas constituidas por dos piedras de granito de Oporto y juntas de mortero en las cuales se efectuaron ensayos con ciclos de mojado y secado y análisis por microscopía electrónica de barrido.

En la parte final de la disertación, se formulan las conclusiones del trabajo y se presentan en anexo, los resultados de los ensayos realizados.

Palabras clave: mortero, cantería, albañilería, granito, deterioro

ÍNDICE GERAL

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ARGAMASSAS.....	2
1.2.1 Definição e conceitos	2
1.2.2 Classificação de argamassas	2
1.2.3 Classificação segundo a EN 998-1 (2003) e EN 998-2 (2003)	3
1.2.4 Classificação segundo o Dicionário Técnico da European Mortar Industry Organization (2001)	4
1.3 FUNÇÕES E PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	7
1.3.1 Argamassas de assentamento de alvenaria em pó.....	8
1.3.2 Argamassas de assentamento de alvenaria em pasta	8
1.3.3 Argamassas de assentamento de alvenaria endurecidas.....	8
1.4 A EVOLUÇÃO DA COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS	9
 2 CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS	 17
2.1 CAL	17
2.1.1 Definição geral	17
2.1.2 Tipos de cal	17
2.1.3 Fabrico da cal viva	19
2.1.4 Hidratação da cal viva - obtenção da cal aérea.....	19
2.1.5 Carbonatação da cal aérea	20
2.1.6 Obtenção da cal hidráulica	20
2.1.7 Requisitos químicos.....	22
2.1.8 Requisitos mecânicos	23
2.1.9 Requisitos físicos das cals vivas e das cals hidratadas.....	23
2.1.10 Requisitos de durabilidade	23
2.2 CIMENTO PORTLAND	24
2.2.1 Definição geral	24
2.2.2 Tipos de cimento	24
2.2.3 Composição da matéria-prima do cimento Portland	26
2.2.4 Formação do cimento Portland.....	26
2.2.5 Hidratação do cimento Portland.....	29
2.2.6 Fabrico do cimento Portland	31
2.2.7 Requisitos químicos.....	32

2.2.8 Requisitos físicos	33
2.2.9 Requisitos mecânicos	33
2.3 CINZAS VOLANTES.....	34
2.3.1 Definição geral	34
2.3.2 Tipos de cinzas volantes	34
2.3.3 Caracterização dos componentes das cinzas volantes.....	35
2.3.4 Requisitos químicos	37
2.3.5 Requisitos físicos.....	37
2.3.6 Mecanismo da reactividade pozolânica.....	38
2.3.7 Compostos resultantes da reactividade pozolânica.....	40
2.3.8 Obtenção das cinzas volantes	40
2.4 AREIAS	41
2.4.1 Definição geral	41
2.4.2 Enquadramento histórico	41
2.4.3 Classificação dos agregados	42
2.4.4 Requisitos geométricos.....	45
2.4.5 Requisitos químicos	47
2.4.6 Requisitos físicos	47
2.4.7 A função dos agregados nas argamassas	48
2.5 ÁGUA.....	49
2.5.1 Contexto histórico	49
2.5.2 Influência das substâncias dissolvidas das argamassas	50
2.5.3 Determinação quantitativa da água de amassadura de uma argamassa	51
2.5.4 Determinação do teor de cloretos solúveis.....	52
3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS	53
3.1 REQUISITOS MECÂNICOS	53
3.1.1 Definição de rotura	53
3.1.2 Resistências à flexão e à compressão	54
3.2 Requisitos geométricos	56
3.3 REQUISITOS FÍSICOS.....	57
3.3.1 Consistência da argamassas fresca – ensaio da mesa de espalhamento	57
3.3.2 Consistência da argamassas fresca – ensaio da punção de penetração	58
3.3.3 Retenção de água	59
3.3.4 Baridade da argamassa fresca.....	60
3.3.5 Baridade da argamassa endurecida	61

3.3.6 Porosidade	62
3.3.7 Teor de ar	63
3.3.8 Capilaridade	64
3.3.9 Permeabilidade	67
3.3.10 Evaporação	69
3.4 REQUISITOS QUÍMICOS	74
3.4.1 Teor de sais em argamassas.....	74
3.4.2 Pozolanicidade	83
4 CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE ARGAMASSAS.....	85
4.1 PATOLOGIA E DETERIORAÇÕES OU ANOMALIAS	85
4.1.2 Eflorescências.....	99
4.1.3 Fendilhação.....	104
4.1.4 Biodeterioração	105
4.1.5 Erosão.....	112
4.1.6 Síntese de anomalias	113
4.2 INFLUÊNCIA DAS ARGAMASSAS EM CANTARIAS E ALVENARIAS DE PEDRA.....	114
4.3 MÉTODOS DE ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS	119
4.3.1 Microscópio óptico de luz polarizada.....	119
4.3.2 Microscópio electrónico de varrimento (MEV)	119
4.3.3 Difractometria de raios X (DRX)	120
4.3.4 Análise térmica	121
4.3.5 Análise química por via húmida.....	122
4.3.6 Outros métodos de análise	122
4.3.7 Exemplo de três casos de estudo	123
5 EXECUÇÃO DOS PROJETOS E ENSAIOS SOBRE ARGAMASSAS	125
5.1 CONSTITUINTES	125
5.1.1 Cimento Secil CEM I – 42,5 R	125
5.1.2 Cimento Secil - CEM II/B-L – 32.5 R	126
5.1.3 Cinzas volantes.....	126
5.1.4 Cal hidráulica Secil Martingança – NHL 5	129
5.1.5 Cal aérea	129
5.1.6 Agregados	130
5.2 PREPARAÇÃO DOS PROJETOS DE ARGAMASSA.....	130
5.3 CONDIÇÕES DE CURA	133

5.4 ENSAIOS SOBRE ARGAMASSAS ENDURECIDAS.....	135
5.4.1 Ensaios de determinação das resistências à flexão e à compressão.....	135
5.4.2 Ensaio de determinação da porosidade.....	138
5.4.2.1 Conceito de porosidade.....	138
5.4.2.2 Métodos de ensaio.....	139
5.4.2.3 Resultados.....	141
5.4.2.4 Discussão de Resultados.....	141
5.4.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	142
5.4.3.1 Método de ensaio.....	143
5.4.3.2 Resultados.....	144
5.4.3.3 Discussão de resultados.....	150
5.4.4 Ensaio de evaporação.....	153
5.4.4.1 Método de ensaio.....	153
5.4.4.2 Resultados.....	153
5.4.4.3 Discussão de resultados.....	161
5.4.5 Ensaios com ciclos de molhagem e secagem.....	167
5.4.5.1 Ciclos de molhagem e secagem.....	168
5.4.5.2 Observações durante os ensaios.....	169
5.4.5.3 Estudo mineralógico realizado por microscopia electrónica de varrimento.....	171
6 CONCLUSÕES.....	179
BIBLIOGRAFIA.....	183
ANEXOS.....	199
A1 OBSERVAÇÃO DE AMOSTRAS DE CINZAS VOLANTES POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE VARRIMENTO - CEMUP.....	201
A2 RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	205
A3 POROSIDADE LIVRE.....	209
A4 ENSAIO DE CAPILARIDADE.....	211
A5 ENSAIO DE EVAPORAÇÃO.....	247
A6 OBSERVAÇÃO DE AMOSTRAS DE DETERIORAÇÕES POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE VARRIMENTO - CEMUP.....	283

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Imagens de cinzas volantes obtidas por microscopia electrónica de varrimento .	38
Figura 3.1 – Molde da argamassa e mesa de espalhamento.....	58
Figura 3.2 - Dispositivo utilizado para o ensaio de punção de penetração	59
Figura 4.1 – Manchas de humidade nas paredes, no interior e exterior (alçado Norte) da Igreja do Mosteiro de Travanca – Amarante	96
Figura 4.2 – Manchas de humidade no pavimento interior da Igreja do Mosteiro de Travanca – Amarante.....	96
Figura 4.3 – Esquema básico da ventilação da base das paredes (Freitas e Gonçalves, 2003)	97
Figura 4.4 – Execução de corte hídrico através de injeção de um hidrófugo (Freitas e Gonçalves, 2003)	97
Figura 4.5 – Tubos de Knappen (Freitas e Gonçalves, 2003)	98
Figura 4.6 – Exemplo errado e correcto de ocultação de anomalias (Freitas e Gonçalves, 2003)	98
Figura 4.7 – Fendas ao longo das juntas na fachada Sul do Hospital Santo António no Porto (Begonha, 2001)	105
Figura 4.8 – Base de uma coluna coríntia da Igreja de S.Gonçalo de Amarante (Begonha, 2007)	112
Figura 4.9 – Eflorescências na parede de alvenaria (alçado Norte) – Termas de Caldelas.....	115
Figura 4.10- Desagregação granular associada a eflorescências na Fachada Este do Hospital de Santo António	115
Figura 4.11 – Desagregação granular diferencial devido à aplicação de argamassas de cimento	116
Hospital Santo António – Fachada Sul.....	116
Figura 4.12 – Placas associadas a argamassas de cimento em juntas de paredes de cantaria de granito	116
Figura 4.13 – Plaquetas “reparadas” com argamassa de cimento (Rua da Lapa, Quartel – General do Porto)	116
Figura 4.14 – Fendilhação ao longo das juntas e/ou na pedra	118
Figura 5.1 – Imagem de cinzas volantes e espectro.....	127
Figura 5.2 - Cinzas volantes com dimensões diversas (imagens obtidas por MEV).....	128

Figura 5.3 – Execução da amassadura da argamassa de cal aérea na misturadora mecânica realizada no LEMC	130
Figura 5.4 – Execução do ensaio de consistência – mesa de espalhamento realizado no LEMC	131
Figura 5.5 – Molde preenchido com argamassa de cal aérea	132
Figura 5.6 – Execução de um provete de granito do Porto e argamassa de cal aérea realizado no LEMC	133
Figura 5.7 – Ensaio à flexão dos provetes de argamassa	135
Figura 5.8 – Ensaio à compressão dos provetes de argamassa	135
Figura 5.9 – Provede de cal aérea aos 28 dias de idade	137
Figura 5.10 – Processo de secagem dos provetes com forma prismática numa estufa a 60 °C	140
Figura 5.11 – Execução do ensaio de determinação da porosidade livre às 48 horas	140
Figura 5.12 – Curva de absorção por capilaridade do provede C3	146
Figura 5.13 – Curvas de absorção por capilaridade dos provetes C	146
Figura 5.14 – Curvas de absorção de água por capilaridade do provede CC5	147
Figura 5.15 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes CC	147
Figura 5.16 – Curvas de absorção de água por capilaridade do provede CL9	148
Figura 5.17 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes CL	148
Figura 5.18 – Curvas de absorção de água por capilaridade do provede H7	149
Figura 5.19 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes H	149
Figura 5.20 – Curva de evaporação de vapor de água do provede de argamassa de cimento Portland C3	155
Figura 5.21 – Curvas de evaporação dos provetes de argamassa de cimento Portland (C)	155
Figura 5.22 – Curva de evaporação de vapor de água do provede de argamassa de cimento Portland e cinzas volantes CC5	156
Figura 5.23 – Curvas de evaporação dos provetes de argamassa de cimento Portland e cinzas volantes (CC)	156
Figura 5.24 – Curva de evaporação de vapor de água do provede de argamassa de cimento calcário CL9	157
Figura 5.25 – Curva de evaporação dos provetes de argamassa de cimento calcário (CL)	157
Figura 5.26 – Curva de evaporação de vapor de água – provede de argamassa de cal hidráulica (H7)	158
Figura 5.27 – Curva de evaporação dos provetes de argamassa de cal hidráulica (H)	158
Figura 5.28- Equipamentos utilizados nos ensaios de molhagem e secagem	169
Figura 5.29 – PAC após 15 dias de ciclos diários	170

Figura 5.30 – PACal após 15 dias de ciclos diários	170
Figura 5.31 – PACCV após 15 dias de ciclos diários.....	170
Figura 5.32 – PACalCV após 15 dias de ciclos diários	170
Figura 5.33 – Calcite - Imagens e espectro obtidos por MEV	173
Figura 5.34 – Etringite - Imagens e espectro obtidos por MEV	174
Figura 5.35 – Singenite e gesso - Imagens e espectros obtidos por MEV	175
Figura A1.1 – Imagens e espectros de cinzas volantes observadas e analisadas por MEV	201
Figura A1.2 – Imagens e espectros de cinzas volantes observadas e analisadas por MEV	202
Figura A1.3 – Imagens e espectros de cinzas volantes observadas e analisadas por MEV	203
Figura A4.1 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C1 ..	211
Figura A4.2 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C2..	212
Figura A4.3 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C3..	213
Figura A4.4 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C4..	214
Figura A4.5 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C5..	215
Figura A4.6 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C6..	216
Figura A4.7 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C7 ..	217
Figura A4.8 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C8..	218
Figura A4.9 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C9 ..	219
Figura A4.10 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC1	220
Figura A4.11 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC2	221
Figura A4.12 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC3	222
Figura A4.13 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC4	223
Figura A4.14 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC5	224
Figura A4.15 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC6	225
Figura A4.16 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC7	226
Figura A4.17 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC8	227

Figura A4.18 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC9	228
Figura A4.19 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL1	229
Figura A4.20 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL2	230
Figura A4.21 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL3	231
Figura A4.22 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL4	232
Figura A4.23 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL6	233
Figura A4.24 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL7	234
Figura A4.25 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL8	235
Figura A4.26 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL9	236
Figura A4.27 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H1	237
Figura A4.28 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H2	238
Figura A4.29 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H3	239
Figura A4.30 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H4	240
Figura A4.31 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H5	241
Figura A4.32 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H6	242
Figura A4.33 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H7	243
Figura A4.34 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H8	244
Figura A4.35 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H9	245
Figura A5.1 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C1	247
Figura A5.2 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C2	248
Figura A5.3 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C3	249
Figura A5.4 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C4	250
Figura A5.5 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C5	251
Figura A5.6 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C6	252
Figura A5.7 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C7	253
Figura A5.8 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C8	254

Figura A5.9 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C9	255
Figura A5.10 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC1	256
Figura A5.11 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC2	257
Figura A5.12 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC3	258
Figura A5.13 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC4	259
Figura A5.14 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC5	260
Figura A5.15 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC6	261
Figura A5.16 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC7	262
Figura A5.17 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC8	263
Figura A5.18 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC9	264
Figura A5.19 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL1	265
Figura A5.20 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL2	266
Figura A5.21 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL3	267
Figura A5.22 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL4	268
Figura A5.23 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL6	269
Figura A5.24 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL7	270
Figura A5.25 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL8	271
Figura A5.26 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL9	272
Figura A5.27 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H1	273
Figura A5.28 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H2	274
Figura A5.29 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H3	275
Figura A5.30 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H4	276
Figura A5.31 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H5	277
Figura A5.32 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H6	278
Figura A5.33 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H7	279
Figura A5.34 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H8	280
Figura A5.35 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H9	281
Figura A6.1 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN1 analisados por MEV	283
Figura A6.2 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN1 analisados por MEV	284
Figura A6.3 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN1 analisados por MEV	285
Figura A6.4 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN2 analisados por MEV	286
Figura A6.5 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN3 analisados por MEV	287
Figura A6.6 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN3 analisados por MEV	288
Figura A6.7 – Imagens e espectros da amostra CIM_4 analisados por MEV	289
Figura A6.8 – Imagens e espectros da amostra CIM_5 analisados por MEV	290
Figura A6.9 – Imagens e espectros da amostra CAL_1 analisados por MEV	291

Figura A6.10 – Imagens e espectros da amostra HSA 126_128 analisados por MEV 292

Figura A6.11 – Imagens e espectros da amostra CAL_CIN_1 analisados por MEV 293

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Classificação de argamassas.....	4
Quadro 1.2 – Propriedades das argamassas (Mortar Industry Association, 2002a)	7
Quadro 1.3 – Requisitos para as propriedades e respectivas normas de ensaio para argamassas de assentamento de alvenaria em pasta.....	8
Quadro 1.4 – Requisitos para as propriedades e respectivas normas de ensaio para argamassas de assentamento endurecidas.....	8
Quadro 1.5 – Requisitos para as propriedades e respectivas normas de ensaio para argamassas de assentamento endurecidas (continuação)	9
Quadro 1.6 – Classes de resistência à compressão.....	9
Quadro 1.7 – Argamassas com cais aéreas para assentamento de blocos de pedra e tijolo (Mateus, 2002)	11
Quadro 1.8 – Composição ideal das argamassas de assentamento em função da qualidade da areia (partes apresentadas em volumes) (Mateus, 2002), citando o "Traité Théorique et Pratique de L'art de Bâtir", vol.I (1867-1868))	12
Quadro 1.9 – Argamassas de assentamento com cais hidráulicas em pó	13
Quadro 2.1 – Tipos de cal de construção (NP EN 459-1, 2002).....	18
Quadro 2.2 – Classificação da cal de acordo com a matéria-prima (Durand Claye e Feret, 1887)	21
Quadro 2.3- Índices de hidraulicidade (Mateus, 2002).....	21
Quadro 2.4 – Requisitos químicos NP EN 459-1 (2002)	22
Quadro 2.5 – Resistência à compressão da cal hidráulica e da cal hidráulica natural (NP EN 459-2, 2002).....	23
Quadro 2.6 – Requisitos físicos da cal viva (NP EN 459-2, 2002)	23
Quadro 2.7 – Requisitos físicos das cais cálcicas e dolomíticas hidratadas, das pastas de cal, das cais hidráulicas e das cais hidráulicas naturais (NP EN 459-2, 2002)	24
Quadro 2.8 – Tipos de cimento (NP – EN 197-1, 2001)	25
Quadro 2.9 – Características dos componentes do clínquer portland (LNEC E 378, 1996)	28
Quadro 2.10 – Propriedades principais dos componentes do cimento (Sousa Coutinho, 1988)	29
Quadro 2.11 – Requisitos químicos das fichas técnicas da Secil	33
Quadro 2.12 – Requisitos físicos das fichas técnicas da Secil.....	33
Quadro 2.13 – Resistência à compressão aos 2, 7 e 28 dias (NP EN 196-1, 2006).....	34

Quadro 2.14 – Principais características das cinzas volantes em Portugal (Sousa Coutinho, 1988)	35
Quadro 2.15 – Requisitos químicos de acordo com a NP EN 450-1 (2006)	37
Quadro 2.16 – Requisitos químicos de acordo com ASTM C618-08a(2008)	37
Quadro 2.17 – Requisitos físicos (NP EN 450-1, 2006)	38
Quadro 2.18 – Tensões de rotura mínimas de pasta normais de cal e pozolana (kgf/cm ²) (Sousa Coutinho, 1988)	39
Quadro 2.19 – Classificação do agregado quanto à baridade (Sousa Coutinho, 1988)	45
Quadro 2.20 – Limites para teor de finos (NP EN 12620, 2004)	46
Quadro 2.21 – Limites para teor de finos (Paulo, 2006)	47
Quadro 2.22 – Requisitos químicos (NP EN 13139, 2005)	47
Quadro 2.23 – Requisitos físicos (NP EN 13139, 2005)	48
Quadro 2.24: Valor de espalhamento em função do valor da massa volúmica da argamassa (EN 1015-2, 1998)	52
Quadro 3.1 – Grupo de peneiros utilizados (EN 1015-1, 1998)	57
Quadro 3.2 - Pesos específicos, massas e volumes molares de alguns minerais de sais solúveis presentes em monumentos. (Hammecker, 1993, Begonha, 2001)	78
Quadro 3.3 – Concentração em ião hidróxido e em óxido de cálcio e resultado do ensaio de pozolaniciade – (Rodrigues, 2004)	84
Quadro 4.1 – Composição química e origem das elflorescências (Keller et al., 2005)	103
Quadro 4.2 – Síntese de anomalias em argamassas de assentamento	113
Quadro 5.1 – Características químicas (Secil, 2004b)	125
Quadro 5.2 – Características mecânicas (Secil, 2004b)	125
Quadro 5.3 – Características físicas (Secil, 2004b)	125
Quadro 5.4 – Características químicas (Secil, 2004c)	126
Quadro 5.5 – Características mecânicas (Secil, 2004c)	126
Quadro 5.6 – Características físicas (Secil, 2004c)	126
Quadro 5.7 – Características da cal hidráulica (Secil, 2006)	129
Quadro 5.8 – Composição das argamassas	132
Quadro 5.9 – Valores médios de resistência à flexão e compressão em várias idades	136
Quadro 5.10 – Decréscimos percentuais da resistência em resultado da adição de cinzas volantes em argamassas de cimento Portland	136
Quadro 5.11 – Valores médios de resistência à flexão e compressão em várias idades	138

Quadro 5.12 – Relação entre as resistências à flexão e à compressão entre os provetes CL/H e C/H.....	138
Quadro 5.13 – Valores médios da porosidade livre às 48 horas obtida dos provetes prismáticos	141
Quadro 5.14 – Valores limite da porosidade livre às quarenta e oito horas (N_{48}) obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios de Portugal.	143
Quadro 5.15 – Valores médios e desvios-padrão do coeficiente de absorção de água por capilaridade	145
Quadro 5.16 – Valores limite do coeficiente de capilaridade A obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios de Portugal.	152
Quadro 5.17 – Valores do fluxo de evaporação (q)	159
Quadro 5.18 – Valores da saturação crítica (S_c)	160
Quadro 5.19 – Valores do tempo saturação crítica (t_{sc})	161
Quadro 5.20 – Valores médios e respectivos desvios -padrão do fluxo de evaporação q obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios do Norte de Portugal.....	162
Quadro 5.21 – Valores médios e respectivos desvios-padrão da saturação crítica S_c obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios do Norte de Portugal... 164	164
Quadro 5.22 – Valores médios e respectivos desvios-padrão do tempo de saturação crítica t_{sc} obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios do Norte de Portugal.....	165
Quadro 5.23 – Valores médios dos tempos totais de secagem (t_{total}) obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios do Norte de Portugal.....	166
Quadro 5.24 – Minerais e sais solúveis presentes no provetes PAC, PACCV, PAcal, PAcalCV e HSA 126_128	172
 Quadro A2.1 – Resistência mecânica do provete AC.....	205
Quadro A2.2 – Resistência mecânica do provete ACCV	206
Quadro A2.3 – Resistência mecânica do provete CL.....	207
Quadro A2.4 – Resistência mecânica do provete H	208
 Quadro A3.1 – Porosidade livre – 1. ° ensaio	209
Quadro A3.2 – Porosidade livre – 2. ° ensaio	210
 Quadro A4.1 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C1	211

Quadro A4.2 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C2	212
Quadro A4.3 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C3	213
Quadro A4.4 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C4	214
Quadro A4.5 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C5	215
Quadro A4.6 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C6	216
Quadro A4.7 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C7	217
Quadro A4.8 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C8	218
Quadro A4.9 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C9	219
Quadro A4.10 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC1	220
Quadro A4.11 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC2	221
Quadro A4.12 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC3	222
Quadro A4.13 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC4	223
Quadro A4.14 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC5	224
Quadro A4.15 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC6	225
Quadro A4.16 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC7	226
Quadro A4.17 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC8	227
Quadro A4.18 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC9	228
Quadro A4.19 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL1	229

Quadro A4.20 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL2	230
Quadro A4.21 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL3	231
Quadro A4.22 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL4	232
Quadro A4.23 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL6	233
Quadro A4.24 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL7	234
Quadro A4.25 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL8	235
Quadro A4.26 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL9	236
Quadro A4.27 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H1	237
Quadro A4.28 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H2	238
Quadro A4.29 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H3	239
Quadro A4.30 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H4	240
Quadro A4.31 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H5	241
Quadro A4.32 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H6	242
Quadro A4.33 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H7	243
Quadro A4.34 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H8	244
Quadro A4.35 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H9	245
 Quadro A5.1 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C1	247
Quadro A5.2 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C2	248
Quadro A5.3 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C3	249

Quadro A5.4 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C4	250
Quadro A5.5 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C5	251
Quadro A5.6 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C6	252
Quadro A5.7 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C7	253
Quadro A5.8 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C8	254
Quadro A5.9 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C9	255
Quadro A5.10 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC1	256
Quadro A5.11 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC2	257
Quadro A5.12 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC3	258
Quadro A5.13 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC4	259
Quadro A5.14 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC5	260
Quadro A5.15 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC6	261
Quadro A5.16 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC7	262
Quadro A5.17 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC8	263
Quadro A5.18 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC9	264
Quadro A5.19 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL1	265
Quadro A5.20 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL2	266
Quadro A5.21 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL3	267
Quadro A5.22 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL4	268
Quadro A5.23 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL6	269
Quadro A5.24 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL7	270
Quadro A5.25 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL8	271
Quadro A5.26 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL9	272
Quadro A5.27 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H1	273
Quadro A5.28 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H2	274
Quadro A5.29 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H3	275
Quadro A5.30 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H4	276
Quadro A5.31 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H5	277
Quadro A5.32 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H6	278
Quadro A5.33 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H7	279
Quadro A5.34 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H8	280
Quadro A5.35 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H9	281

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

A – coeficiente de absorção de água por capilaridade, em $\text{g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1/2}$;

Ag – água - l/m^3 de argamassa;

Ag_r – percentagem de água retida;

A_p – área do peneiro em mm^2 (determinação da distribuição dos tamanhos das partículas);

b – lado da secção quadrada do prisma, em mm (cálculo da resistência à flexão);

C_c – dosagem de cimento - Kg/m^3 de argamassa (fórmula de Bolomey);

C_v – concentração do vapor de água no ar, em $\text{g} \times \text{mol}^{-1}$ (segunda Lei de Fick);

d – dimensão nominal da abertura do peneiro, em mm (determinação da distribuição dos tamanhos das partículas);

D – coeficiente de difusão, em $\text{cm}^2 \times \text{h}^{-1}$ (Lei de Fick);

F_c – é a carga máxima em N (cálculo da resistência à compressão);

F_f – carga aplicada ao centro do prisma na rotura, em N (cálculo da resistência à flexão);

h - altura de água, em m;

HR – humidade relativa do ar;

HE – humidade específica do ar;

i – gradiente de pressão hidráulica (Lei de Darcy);

K – coeficiente de permeabilidade;

l – é a distância entre apoios, em mm (cálculo da resistência à flexão);

L_{ar} – teor de ar num provete de argamassa, em %;

L – comprimento, em m;

m_a – massa de água utilizada numa argamassa, em g (ensaio de retenção de água);

m_f – massa do conjunto das oito folhas de papel secas, em g (ensaio de retenção de água);

m_h – massa do conjunto das oitofolhas de papel húmidas em g (ensaio de retenção de água);

M – dosagem do agregado - kg/m^3 de argamassa (fórmula de Bolomey);

M_r – massa retida em cada peneiro, em g (determinação da distribuição dos tamanhos das partículas);

M_0 – valor da massa do provete seco, em g;

M_1 – valor da massa aos 90 minutos, em g (cálculo do coeficiente de absorção de água);

M_2 – valor da massa aos 10 minutos, em g (cálculo do coeficiente de absorção de água);

N – constante que depende da forma do material agregado (rolado ou britado) e da consistência da argamassa, encontrando-se tabelada (fórmula de Bolomey);

p - % de partículas inferiores a 0,2 mm (fórmula rigorosa de Bolomey);

p_a – pressão de vapor de um líquido no interior de um poro em equilíbrio com uma superfície côncava do mesmo líquido de raio do menisco r_m (equação de Kelvin);

p_f - % de partículas da fracção fina da areia (fórmula rigorosa de Bolomey);

p_g - % de partículas da fracção grossa da areia (fórmula rigorosa de Bolomey);

p_i - % de agregado com dimensão compreendida entre d_i e d_{i+1} (fórmula rigorosa de Bolomey);

p_m - % de partículas da fracção média da areia (fórmula rigorosa de Bolomey);

P_s – pressão parcial da massa de ar saturada, em Pa (evaporação);

P_1 – pressão parcial de vapor de água , em Pa (evaporação);

P_w – pressão parcial do vapor de água;

p^* - pressão normal de vapor do líquido em equilíbrio com uma superfície líquida plana do mesmo líquido (a 25 °C e pressão de uma atmosfera) (equação de Kelvin);

P – pressão da ascensão capilar, em Pa (capilaridade);

P_p – pressão atmosférica, em atm (segunda Lei de Fick);

P_r – Pressão de referência, $1,013 \times 10^5$ Pa (segunda Lei de Fick);

q - fluxo do vapor de água, em $g \times cm^{-2} \times h^{-1}$ (evaporação);

Q – caudal, em m^3/s ;

r – raio de um capilar, em m;

r_m - raio do menisco (equação de Kelvin);

r_o - raio de curvatura do orifício de saída do poro ;

r_p - raio de curvatura do poro ;

R – constante dos gases perfeitos ($0,0820 \text{ l} \times \text{atm} \times \text{mol}^{-1} \times ^\circ\text{K}^{-1}$);

R_c – resistência à compressão, em N/mm^2 ;

R_f – resistência à flexão, em N/mm^2 ;

S – área, em m^2 ;

Sc – saturação crítica , em % (evaporação);

t – tempo, em segundos ;

t_e – temperatura exterior, em $^{\circ}C$ (cálculo da temperatura superficial interior);

t_i – temperatura interior, em $^{\circ}C$ (cálculo da temperatura superficial interior);

tsc – tempo de saturação crítica, em horas (evaporação);

T – temperatura durante o ensaio de evaporação, em $^{\circ}K$;

T_r – temperatura absoluta de referência, em $^{\circ}K$;

U – coeficiente de transmissão térmica do elemento em $W / m^2 \times ^{\circ}C$;

Wa – massa do provete saturado em kg ou g;

W0 – massa do provete seco em kg ou g;

v – velocidade em m/s ;

V – volume em m^3 ou cm^3 ;

V_m - volume molar do líquido;

V_{mf} – volume da argamassa depois da inversão do cilindro, em ml (determinação do teor de ar numa argamassa);

V_{ml} – volume da argamassa de 200 ml (determinação do teor de ar numa argamassa);

$1/h1$ – resistência térmica superficial em $m^2 \times ^{\circ}C / W$;

γ - massa volúmica em g/cm^3 ou kg/m^3 ou N/m^3 ;

δ - baridade em kg/m^3 ;

ε_a - parâmetro em função da agitação do ar, em m (evaporação);

η - viscosidade dinâmica do líquido , em $\text{Pa} \times \text{s}^{-1}$ (Lei de Hagen-Poiseuille);

Θ_i -temperatura superficial interior (adimensional);

κ - factor de evaporação, em $\text{g} \times \text{Pa}^{-1} \times \text{cm}^{-1} \times \text{h}^{-1}$;

ρ - massa volúmica da mistura de ar e vapor de água , em $\text{g} \times \text{cm}^{-3}$;

ψ -tensão superficial do líquido (Lei de Jurin);

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A interpretação da linguagem total do edifício é fundamental, para encontrar métodos pouco destrutivos e mais eficazes de restabelecer “a mensagem” do mesmo. Assim, a abordagem construtiva da intervenção implica um entendimento, mais global da cultura arquitectónica e uma concepção do projecto, como um conjunto de procedimentos enquadrados numa tradição (Tomé, 2002).

Este autor refere que, num âmbito internacional, as teorias de restauro de mais ampla difusão como as de Viollet-le-Duc e de Camili Boito, defendem a necessidade de utilizar correctamente as novas tecnologias, sendo este princípio mencionado na Carta de Atenas de 1931, que igualmente, aponta a necessidade de “dissimular” as novas tecnologias em elementos antigos.

A complexidade da intervenção num edifício antigo identifica-se pelo desenvolvimento da correcta compatibilização de novos materiais com os elementos existentes. Neste contexto, insere-se em larga escala, a ligação entre argamassas de reparação e alvenarias em pedra.

De facto, em termos técnicos, uma das principais causas da deterioração em edifícios ou monumentos históricos pode estar relacionada com a utilização de argamassas de substituição não adequadas.

É neste âmbito, que se pode verificar a importância do estudo das composições de argamassas e respectivas compatibilidades com o meio em que se integram.

A incompatibilidade das argamassas de cimento, na reabilitação de alvenarias de pedra ou a presa lenta de argamassas de cal aérea tornam-se factores de contorno, mas impõem a necessidade de estudos de novas composições.

A adição de pozolanas naturais ou artificiais pode constituir uma solução viável, como um dos componentes na composição de argamassas. Destaca-se, desta forma, a utilização das cinzas volantes, não só como um elemento representativo na família das pozolanas, mas

igualmente por outras características positivas, tais como a redução do calor de hidratação e a redução do número de vazios.

Salientado o facto da inexistência, de procedimentos regulamentares, relativamente à junção de cinzas volantes em argamassas de cimento ou de cal, procedeu-se ao desenvolvimento de um trabalho de cariz, essencialmente, experimental.

O principal objectivo da elaboração desta dissertação é o estudo dos efeitos da aplicação de argamassas de cimento ou de cal, com ou sem adição de cinzas volantes, em alvenarias de pedra.

1.2 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ARGAMASSAS

1.2.1 Definição e conceitos

De acordo com o Dicionário Técnico da European Mortar Industry Organization (2001), a argamassa é uma mistura de um ou mais ligantes orgânicos ou inorgânicos, agregados, cargas, aditivos e/ou adjuvantes.

1.2.2 Classificação de argamassas

A identificação corrente das argamassas alia-se ao principal ligante utilizado nas mesmas. Desta forma, manifestam-se vários tipos de argamassas, destacando-se, essencialmente, as constituídas por ligantes inorgânicos.

Segundo Teles (2007), os ligantes inorgânicos são constituídos por pós muito finos que, quando misturados com água formam uma pasta capaz de endurecer por simples secagem, classificando-se em dois grupos:

- Ligantes hidráulicos – Além de endurecerem ao ar, adquirem elevadas resistências debaixo de água, suportando facilmente a sua acção;
- Ligantes aéreos – Não endurecem dentro de água, nem são resistentes à sua acção.

No primeiro grupo destacam-se as argamassas de cimento Portland e de cal hidráulica, e no segundo, as argamassas de cal aérea.

1.2.3 Classificação segundo a EN 998-1 (2003) e EN 998-2 (2003)

Segundo as normas EN 998-1 (2003) e EN 998-2 (2003), as argamassas classificam-se de acordo com três conceitos diferentes:

- De acordo com o local de produção;
- De acordo com a concepção;
- De acordo com as suas propriedades e utilização.

Em seguida, serão indicadas (no âmbito dos grupos referidos anteriormente) as argamassas de assentamento, segundo a norma EN 998-2 (2003).

Conforme o local de produção, as argamassas classificam-se nos seguintes três grupos:

- Argamassas industriais – São doseadas e misturadas em fábrica. Podem-se apresentar “em pó”, requerendo apenas a adição de água ou “em pasta”, já amassada e pronta a aplicar;
- Argamassas industriais semi-acabadas – São argamassas pré-doseadas, a modificar em obra. Dentro deste grupo existem as argamassas pré-doseadas em fábrica e as argamassas pré-misturadas;
- Argamassas pré-doseadas – Os componentes são doseados em fábrica e fornecidos em obra, onde serão misturados segundo instruções e condições do fabricante;
- Argamassas pré-misturadas – Os componentes são doseados e misturados em fábrica, fornecidos em obra, onde serão adicionados outros componentes que o fabricante específica ou também fornece;
- Argamassas efectuadas em obra (ou tradicionais) – são argamassas compostas por constituintes primários, tais como os ligantes, agregados e água e que serão doseados e misturados em obra.

Conforme a concepção, definem-se dois tipos de argamassa:

- Argamassas de desempenho (ou prestação) – A composição e processo de fabrico estão definidos pelo fabricante com vista a obter propriedades específicas;
- Argamassas de formulação - Fabricam-se segundo uma composição pré-determinada, através da qual as propriedades obtidas dependem da proporção entre os componentes.

Conforme as propriedades e utilização, as argamassas classificam-se em:

- Argamassa de uso geral – Argamassa que satisfaz as necessidades gerais, sem possuir características especiais;
- Argamassa leve – Argamassa de desempenho cuja baridade após o endurecimento é inferior a 1400 kg/m³;
- Argamassa de assentamento de alvenaria – Mistura de um ou mais ligantes, cargas, aditivos e/ou adjuvantes, utilizada para o assentamento de alvenaria.

Em seguida, apresenta-se, no Quadro 1.1 o resumo da classificação das argamassas segundo a EN 998-1 (2003) e EN 998-2 (2003).

Quadro 1.1 – Classificação de argamassas

	Argamassas de reboco exteriores e interiores	Argamassas de assentamento de alvenaria
De acordo com o local de produção	-Reboco industrial -Reboco industrial semi-acabado -Reboco feito em obra	-Argamassa industrial -Argamassa industrial semi-acabada -Argamassa feita em obra
De acordo com a concepção	-Reboco de desempenho ou prestação -Reboco de formulação	-Argamassa de desempenho ou prestação -Argamassa de formulação
De acordo com as suas propriedades e utilização	-Reboco de uso geral -Reboco leve -Reboco colorido -Monomassa -Reboco de renovação -Reboco de isolamento térmico	-Argamassa de uso geral -Argamassa de alvenaria em camada fina -Argamassa leve

1.2.4 Classificação segundo o Dicionário Técnico da European Mortar Industry Organization (2001)

De acordo com o Dicionário Técnico da European Mortar Industry Organization (2001), existem outras definições de argamassas tais como:

- Argamassa colorida – Argamassa pigmentada para uma função decorativa;
- Argamassa em dispersão – Argamassa de ligante(s) orgânico(s), na forma de polímeros em dispersão aquosa com aditivos orgânicos, agregados minerais e/ou cargas finas;
- Argamassa de resina reactiva (de acordo com a EN 12004 (2007)) – Mistura de resinas sintéticas, cargas finas e/ou agregados minerais e aditivos orgânicos que endurecem por reacção química;

- Argamassa mineral de reboco – Mistura de um ou mais ligantes inorgânicos, agregados e eventualmente aditivos e/ou adjuvantes, usada para reboco interior ou exterior;
- Argamassa de aderência – Argamassa utilizada para promover uma primeira camada de aderência num sistema multi-camada;
- Argamassa base – Camada inferior de um sistema de reboco multi-camadas, que geralmente é coberta por uma camada de acabamento;
- Argamassa de revestimento orgânico - Argamassa colorida, constituída por um polímero em dispersão, para a protecção e decoração de superfícies verticais;
- Argamassa de revestimento mineral - Argamassa industrial colorida, constituída por ligantes minerais (cimento, cal, gesso, etc.), para acabamento, protecção e decoração de superfícies verticais;
- Revestimento monomassa - Argamassa concebida para revestimento, aplicada numa só camada, que cumpre todas as funções de protecção e decoração conseguidas por um sistema multi-camada;
- Argamassa de isolamento térmico - Argamassa de desempenho, com propriedades específicas de isolamento térmico;
- Argamassa de drenagem - Argamassa de desempenho concebida para utilização sobre superfícies húmidas que contenham sais solúveis;
- Argamassa resistente à Intempérie - Argamassa resistente à penetração da chuva, que protege o suporte da intempérie (por exemplo, argamassas de reboco exterior e revestimento monomassa);
- Argamassa de obturação - Argamassa concebida para eliminar as infiltrações de água. Geralmente têm um endurecimento muito rápido;
- Argamassa de impermeabilização - Argamassa de desempenho, que impede a penetração de água no suporte, sob determinadas condições de pressão;
- Argamassa de assentamento de alvenaria - Mistura de um ou mais ligantes minerais, cargas, aditivos e/ou adjuvantes, utilizada para o assentamento de elementos de alvenaria;
- Argamassa de cobertura - Argamassa para o assentamento de telhas e calafetagem de elementos de cobertura e de alvenaria;
- Argamassa de restauro - Argamassa de desempenho, concebida para a reconstituição ou reparação de pedra natural;
- Argamassa para moldagem - Argamassa fluída, para execução de peças pré-fabricadas com moldes ou cofragens. Utilizada para fabricação de estátuas, balaustres, cornijas, lajes, etc;

- Argamassa de reparação de betão - Argamassa de desempenho, concebida para a reparação ou substituição de betão defeituoso. Pode ser estrutural (contribuindo para a resistência da construção) ou não estrutural (de acordo com a EN 1504-9 (2008));
- Argamassa de regularização - Argamassa de desempenho, concebida para o acabamento de um suporte com a finalidade de obter uma superfície lisa. É utilizada em paredes e tectos;
- Argamassa autonivelante - Argamassa de desempenho, concebida para a nivelação de pavimentos ou betonilhas, com a finalidade de obter uma camada lisa e plana. Utiliza-se principalmente para pavimentação de superfícies horizontais;
- Argamassa de betonilha - Argamassa para execução de betonilhas em pavimentos;
- Argamassa de selagem - Argamassa de desempenho, concebida para a selagem e/ou fixação de elementos. De acordo com a NP EN 1504-1 (2006), pode ser constituída à base de cimento ou de resinas reactivas;
- Cimento-cola - Mistura de ligantes hidráulicos, cargas, polímeros e outros aditivos orgânicos utilizados para colar materiais de revestimento (EN 12004, 2007);
- Adesivo em dispersão - Argamassa à base de polímeros em dispersão utilizada para a colagem de materiais de revestimento (EN 12004, 2007);
- Cola reactiva - Argamassa de dois componentes reactivos para a colagem de materiais (EN 12004,2007 e EN 1504-9, 2008);
- Argamassa de juntas - Argamassa para enchimento (betumação) das juntas entre elementos de alvenaria, revestimentos cerâmicos e outros;
- Argamassa de assentamento de alvenaria em camada fina - Argamassa de desempenho, para assentamento de elementos de alvenaria e execução de juntas de 1 e 3 mm de espessura (EN 998-2, 2003);
- Argamassa de pavimentação - Argamassa para assentamento e calçetamento de pavimentos;
- Argamassa de ancoragem - Argamassa concebida para a fixação e ancoragem de materiais. Pode ser constituída à base de cimento ou resina (EN 1504-9, 2008);
- Argamassa de injeção - Argamassa de desempenho, fluída e/ou tixotrópica concebida para o preenchimento de fissuras ou cavidades. Aplica-se por injeção sob pressão. Pode ser constituída por cimento ou resinas reactivas (EN 1504-9, 2008);
- Argamassa de gunitagem - Argamassa seca ou semi-seca para aplicação por projecção por via seca.;
- Argamassa de enchimento - Argamassa fluída, utilizada para o preenchimento de cavidades e juntas entre materiais.

1.3 FUNÇÕES E PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

As classificações das argamassas, na generalidade, derivam da função para que estão previstas.

Uma argamassa poderá possuir as seguintes funções (Paulo, 2006):

- Unir com solidez elementos de alvenaria;
- Absorver algumas deformações das alvenarias e/ou das juntas;
- Impermeabilizar juntas;
- Unir camadas de revestimento;
- Proporcionar acabamentos em tectos e paredes;
- Regularizar pavimentos e outros elementos.

Existem várias propriedades que caracterizam as argamassas, sendo enumeradas no Quadro 1.2 (Mortar Industry Association, 2002a):

Quadro 1.2 – Propriedades das argamassas (Mortar Industry Association, 2002a)

Propriedade	Descrição
Teor de ar	Quantidade de ar existente na argamassa
Resistência ao cisalhamento	Adesão entre a argamassa e o bloco de alvenaria
Teor de cloretos	Teor de cloretos dissolvidos em argmassa em pasta
Consistência	Fluidez da argamassa em pasta
Massa volúmica	Massa por unidade de volume
Durabilidade	Resistência da argamassa em condições químicas, mecânicas e climatéricas adversas
Tempo de presa	Tempo necessário para o cimento iniciar presa
Condutividade térmica	Medição da transferência da quantidade de calor por unidade de área, de face para face
Absorção de água	Quantidade de água retida pela argamassa num determinado intervalo de tempo
Permeabilidade ao vapor de água	Quantidade de vapor de água que passa pela argamassa
Tralhabilidade	Identifica a argamassa em pasta e influencia a aplicação em particular, consistência e coesão.

Em seguida, são apresentadas as propriedades das argamassas de assentamento de alvenaria em pó e em pasta.

1.3.1 Argamassas de assentamento de alvenaria em pó

A norma EN 1015-1 (1998), apresenta os requisitos da distribuição da dimensão dos grãos que poderão constituir uma argamassa de assentamento de alvenaria em pó.

1.3.2 Argamassas de assentamento de alvenaria em pasta

No Quadro 1.3, são indicadas as propriedades das argamassas de assentamento em alvenaria em pasta.

Quadro 1.3 – Requisitos para as propriedades e respectivas normas de ensaio para argamassas de assentamento de alvenaria em pasta

Propriedades	Norma de ensaio	Requisito
Trabalhabilidade (minutos)	EN 1015-9 (1999)	≥ valor declarado
Teor de cloretos (%)	EN 1015-17 (2000)	≥ valor declarado
Ar contido (%)	EN 1015-7 (1999)	Sem uma escala declarada

1.3.3 Argamassas de assentamento de alvenaria endurecidas

A identificação das propriedades de argamassas, de assentamento de alvenaria endurecidas são indicadas no Quadro 1.4.

Quadro 1.4 – Requisitos para as propriedades e respectivas normas de ensaio para argamassas de assentamento endurecidas

Propriedades	Norma de ensaio	Requisito	
Resistência à compressão	EN 1015-11 (1999)	Ver tabela 2.5	
Resistência ao cisalhamento (MPa) “BOND STRENGTH”	NP EN 1052-3 (2005)	Valor declarado	Aplicável a argamassas utilizadas em elementos com requisitos estruturais
	EN 998-2 (2003)	Valor tabelado	
Absorção de água (Kg/m²*min ^{0.5})	EN 1015-18 (2002)	Valor declarado	Aplicável em argamassas utilizadas em exteriores com exposição directa
Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água	NP EN 1745 (2005)	Valores tabelados	
Massa volúmica (kg/m³)	EN 1015-10 (1999)	Escala declarada	

Quadro 1.5 – Requisitos para as propriedades e respectivas normas de ensaio para argamassas de assentamento endurecidas (continuação)

Propriedades	Norma de ensaio	Requisito	
Condutividade térmica (W/m.K)	EN 1745 (2005)	Valores tabelados	Em argamassas a serem utilizadas em elementos Sujeitos a requisitos térmicos,
		< valor declarado	Em argamassas a serem utilizadas em elementos sujeitos a requisitos térmicos, tais como argamassas leves
Reacção ao fogo (classe)	EN 13501-1 (2007)	Classe declarada: argamassas com % em massa ou em volume de matéria orgânica inferior a 1%, podem ser classificados como classe A1, sem necessidade de efectuar qualquer teste.	
		Classe declarada: argamassas, com % em massa ou em volume de matéria orgânica superior a 1% devem ser classificados de acordo com a NP EN 13501-1 e declarada a respectiva classe de reacção ao fogo.	
Durabilidade	Não existem requisitos normativos específicos		

As resistências à compressão são indicadas aos 28 dias e apresentadas na quadro seguinte:

Quadro 1.6 – Classes de resistência à compressão

Classe	M1	M2.5	M5	M10	M15	M20	Md
Resistência à compressão MPa	1	2.5	5	10	15	20	d

1.4 A EVOLUÇÃO DA COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS

A utilização mais antiga e datada de uma argamassa, foi descoberta na região da Galileia, em Israel, próximo de Yiftah, com uma idade aproximada de 10 000 anos. Outro

exemplo da Era Antiga data de 5000 a.C. na Mesopotâmia, que se conservou até aos dias de hoje, em ruínas de alvenaria. (Mortar Industry Association, 2002b).

Os romanos classificaram todos os métodos e elementos construtivos, entre os quais se destacam alguns tipos de argamassas:

- Opus Caementicium: técnica de enchimento usando uma mistura de fragmentos de tijolo, pedra e argamassa de cal;
- Opus Quasi Caementicium: argamassa constituída por uma simples terra argilosa misturada com água;
- Opus Signium: argamassa feita de cal hidráulica e tijolo moído.

Classificavam as argamassas de cal como "stucco" que provavelmente deriva da palavra lombarda "stuchhi" que significa crosta ou pele. No primeiro trabalho enciclopédico escrito por Plínio entre 23-70 a.C., composto por 37 livros, destaca-se, no livro XXXVI "de maltha", um capítulo sobre argamassas.

De acordo com Mateus (2002), devido à queda do Império Romano do Ocidente, o conhecimento da construção clássica sofreu diversas influências, tais como a Bizantina. A partir do século XI, a construção em pedra e tijolo era quase exclusivamente dedicada à realização de edifícios militares e religiosos. Desta forma, a evolução de técnicas e métodos construtivos foi quase nula.

Com o Renascimento, a cultura greco-latina "renasceu" e tratados, tais como, "De Architecture Libri Deceus", escrito por Vitruvius, tornou-se a porta de entrada para uma recriação e estudo da construção de edifícios. Nesta obra, era possível observar "as primeiras receitas" de argamassas que, posteriormente, foram referidas por vários autores.

Segundo Vitruvius, uma argamassa de assentamento deveria ser composta por 1 volume de cal em pasta, 3 volumes de areia de mina e 2 volumes de areia de rio.

De acordo com Mateus (2002), ao longo dos séculos XVIII e XIX, o número de "receitas" foi bastante mais elevado e, para efectuar uma comparação, apresenta-se o seguinte quadro:

Quadro 1.7 – Argamassas com cais aéreas para assentamento de blocos de pedra e tijolo (Mateus, 2002)

Cal aérea	Areia	Zona do edifício	Autores/obras
1 de cal em pasta	2		Plínio, "Naturalis Historia", in Rondolet, I séc d.C.
1 de cal em pasta	3		Vitrúvio "De Architectura Libri dieci", Livro II, Cap. V
1 de cal em pasta	2 (de rio)		Vitrúvio "De Architectura Libri dieci", Livro II, Cap. V
1 de cal em pasta	2 a 3	todas	Scamozzi, "L' idea dell'architettura..." Parte II, Livro II, Cap. XVII, 1615
1 de cal em pasta	1 a 2	Em elevação	Giovanni Barba "Manuale di architettura", Livro I, Cap. III, 1629
1 de cal em pasta	2		Enciclopédie de Diderot et d'Alembert, "Mortier", 1751
1 de cal em pasta	1,44		Enciclopédie de Diderot et d'Alembert, "Mortier", 1751
1 de cal em pasta	1		Enciclopédie de Diderot et d'Alembert, "Mortier", 1751
1 de cal em pasta	2		Higgins, Experiments and Observations, 1780
1 de cal em pasta	1,5 a 3	todas	Quatremère de Quincy, Enciclopédie méthodique, vol. II 1788-1832
1 de cal em pasta	1,5 a 4		Milizia, Principi di architettura civile, Parte III, CapV, 1791
1 de cal em pasta	1,5		Delaistre, Encyclopédie de l'ingenieur, termo "Mortier", 1812
1 de cal em pasta extinta por aspersão	1,5 a 2	todas	Cantalupi, Istituzioni pratiche, baseado em Vicat e Tressaurd, Vol.I Cap.IV, 1862
1 de cal em pasta extinta por fusão	1 a 2	todas	Cantalupi, Istituzioni pratiche, baseado em Vicat e Tressaurd, Vol.I Cap.IV, 1862
1 de cal em pó extinta por imersão	2	todas	Cantalupi, Istituzioni pratiche, baseado em Vicat e Tressaurd, Vol.I Cap.IV, 1862
1 de cal em pasta	2 a 3	todas	Curioni, L' arte di fabbricare, Vol. I Cap. VIII, 1864
1 de cal em pasta	2		Guerra, Guia do Operário, termo "Argamassas", 1867
1 de cal em pasta	2 a 2,5	em elevação	Prud'homme, Cours Pratique de Construction, tome II, sect. IV, 1870
1 de cal em pasta magra	3	fundações	Colombo, Manuale dell' Ingegnere civile ed industriale, 1877
1 de cal em pasta gorda	2 a 2,5	em elevação	Colombo, Manuale dell' Ingegnere civile ed industriale, 1877
1 de cal em pasta	1,5 a 4	várias	Segurado, Materiais de construção, Cap.XI, c. 1910
1 de cal em pasta	1,5 a 2	enchimento de tabiques	Segurado, Materiais de construção, Cap.XI, c. 1910
1 de cal em pasta	1	enchimento de tabiques em tectos	Segurado, Materiais de construção, Cap.XI, c. 1910

Analisando o Quadro 1.7, as argamassas à base de cal aérea em pasta e areia, possuem proporções que variam entre 1 parte de cal para 1 parte de areia e 1 de cal para 4 de areia.

Apesar dos tratados referidos anteriormente não o referirem objectivamente, estas “receitas” deviam corresponder a areias com granulometrias diversas. Basicamente, quanto maior o grão de areia, maior a percentagem necessária de cal.

A composição ideal de uma argamassa apresentar-se-ia, como a quantidade de pasta de cal necessária para preencher, com exatidão, os vazios da areia.

Mateus (2002), citando o “Traité Théorique et Pratique de L'art de Bâtir”, vol.I (1867-1868) apresenta o seguinte quadro com composições ideais de argamassas em função da qualidade da areia:

Quadro 1.8 – Composição ideal das argamassas de assentamento em função da qualidade da areia (partes apresentadas em volumes) (Mateus, 2002), citando o “Traité Théorique et Pratique de L'art de Bâtir”, vol.I (1867-1868))

Argamassa tipo	Cal parcialmente extinta	Areia fóssil	Areia fina	Areia de rio molhada	Areia de rio seca	Água
1	1	3	-	-	-	q.b.
2	1	-	2	-	-	q.b.
3	1	-	-	2	-	q.b.
4	1	-	-	-	3	q.b.

De acordo com Mateus (2002), com as primeiras produções industriais das cais hidráulicas, foram também divulgados os primeiros textos com os melhores traços. Em analogia ao Quadro 1.7, apresenta-se o seguinte resumo:

Quadro 1.9 – Argamassas de assentamento com cais hidráulicas em pó

Cal eminentemente hidráulica	Areia	Uso	Autores/obras
1	1,5	Para presa rápida	Sganzin, Programme ou Résumé des Leçons, 1806
1	2	Obras hidráulicas	Quatremère de Quincy, Encyclopédie méthodique, Vol. II, 1788-1832
1	2,5 a 3,0	Argamassas hidráulicas	San Martino Luigi Ponza, Istituzioni di architettura civile, 1836-37
1	2,5 a 3,0	Argamassas hidráulicas	Claudel J. Laroque L. Pratique de L'art de construire, 1852
1	1 a 2	Obras hidráulicas	De Cesare, La scienza dell'architettura, 1855
1 (extinção por imersão)	1,25 a 2,0	Zonas imersas	Cantalupi, Istituzioni pratiche, vol. I, Cap. IV, 1862
1 (extinção ao ar)	1,5 a 1,75	Zonas imersas	Cantalupi, Istituzioni pratiche, vol. I, Cap. IV, 1862
1	1,5 a 2,0	Argamassas hidráulicas	Guerra, Guia do Operário, 1867
1	1,25 a 1,66	Zonas imersas	Prud'homme, Cours Pratique de Construction, Tom.II, Sect.V, 1870
1	1,7	Zonas imersas e juntas	Compagnie d' Orleans, Cahier de Charges, Section III, Cap. II c. 1880
1	1,5	Zonas a seco	Compagnie d' Orleans, Cahier de Charges, Section III, Cap. II c. 1880
1	2-2,5	Argamassas hidráulicas	Colombo, Manuale dell'Ingegnere civile ed industriale, 1877
1	2,76	Assentamento de alvenarias de tijolo	Rizzi G., Manuale del Capomastro, Impiego e prove dei mat. Idraulici, 1910
1	3,16	Assentamento de alvenarias de pedra irregular	Rizzi G., Manuale del Capomastro, Impiego e prove dei mat. Idraulici, 1910
1	2,2-3,6	Argamassas hidráulicas	Segurado, Materiais de Construção, c. 1910

Paralelamente a todas estas considerações e de acordo com Rondelet (1864), a quantidade de água a juntar às argamassas era deixada à consideração do operário, em função dos materiais que chegavam à obra e que eram disponíveis ao longo do período de construção.

A consistência e a facilidade de laboração, que variam bastante com as condições climáticas, o tipo de agregado utilizado e a quantidade de cal, eram os critérios utilizados.

Segundo Mateus (2002), até meados do século XIX, a maioria das dosagens das argamassas de assentamento, encontraram a sua origem em bons resultados obtidos nas obras realizadas por diversos autores. Poucas eram aquelas que resultavam de experiências rigorosas e sistemáticas. As diferentes graduações da percentagem de cal foram por isso, durante bastante tempo, observadas pela cor e pela maneira como os grãos de areia eram mais ou menos envolvidos pela pasta de cal.

Em 1756, John Smeaton, encarregado de reconstruir o farol de Eddystone, na costa da Cornualha, estudou o endurecimento da cal hidráulica, naquela altura formada exclusivamente por cal e pozolana. Após uma longa série de experiências, em que variou a natureza da matéria-prima, concluiu que na produção de cal hidráulica, os calcários contendo uma certa quantidade de argila produziam ligantes mais resistentes à acção da água depois de endurecidos (Teles, 2007).

No início do século XIX, Louis Vicat devido a dificuldades que teve nas fundações de pontes, dedica-se ao estudo dos ligantes hidráulicos. Verdadeiro fundador da química dos ligantes hidráulicos ou cimentos, foi o primeiro a compreender as causas do endurecimento dos cimentos. Através de numerosas análises químicas, mostrou que todas as cals hidráulicas provinham de calcários argilosos e que, reciprocamente, todos os calcários que continham uma proporção conveniente de argila podiam servir para fabricar cals hidráulicas. Compreendeu que, para se obter cimentos, não era necessário que a argila estivesse já naturalmente incorporada no calcário (Teles, 2007).

Em 1824, um fabricante de tijolos de Leeds, em Inglaterra, chamado Joseph Aspin, patenteia um processo para produção de uma cal hidráulica artificial, que denominou Cimento Portland, que manteve, ciosamente, secreto e que diferia do de Vicat pela temperatura de calcinação mais elevada.

O cimento Portland só foi produzido comercialmente no século XX na década de 20, em Wakefield. (Mortar Industry Association, 2002, b)).

O desenvolvimento do “moderno” cimento Portland estabeleceu um novo conceito de resistência e rapidez de execução dos edifícios.

Hoje em dia, pesquisas recentes demonstram que a combinação com cal hidráulica e outros aditivos (tais como as pozolanas) proporcionam o equilíbrio das propriedades necessárias numa argamassa, tais como, manter a resistência mecânica necessária e diminuir a probabilidade da existência de sais.

2 CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS

2.1 CAL

2.1.1 Definição geral

De acordo com a norma NP EN 459-1 (2002), a cal é um material abrangendo quaisquer formas físicas e químicas sob as quais podem aparecer os óxidos e/ou hidróxidos de cálcio e/ou de magnésio (CaO , MgO , Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2).

2.1.2 Tipos de cal

Existem vários tipos de cal, tal como são enumeradas na NP EN 459-1 (2002):

- Cal aérea – cal constituída principalmente por óxido ou hidróxido de cálcio as quais endurecem, lentamente, ao ar devido à reacção com o dióxido de carbono da atmosfera. Não fazem presa dentro da água, visto que não possuem propriedades hidráulicas;

De acordo com Sousa Coutinho (1988), a cal aérea é o ligante que resulta da decomposição, pela acção da temperatura, duma rocha com percentagem superior a 95% de carbonato de cálcio ou de cálcio e magnésio.

Existe uma subclassificação, em relação ao teor de impurezas, dividindo-se em gordas (derivam de calcários quase puros com teores de carbonato de cálcio não inferiores a 99%) e as magras (derivam de calcários com teores de argila e de outras impurezas compreendidas entre 1 e 5%).

- Cal viva – cal aérea constituída por óxido de cálcio e por óxido de magnésio produzidas por calcinação da rocha calcária e ou de dolomite. Tem uma reacção exotérmica quando em contacto com a água, apresentando-se em vários tamanhos, desde pedaços de uma dimensão considerável até material pulverizado. Neste conceito, inclui-se igualmente as cals cálcicas e as cals dolomíticas;
- Cal hidratada (S) – cal aérea (cálcica ou dolomítica), resultante da extinção controlada da cal viva. São produzidas sob a forma de pó seco, de pasta ou de calda (leite de cal);

- Cal cálcica (CL) – cal constituída principalmente por óxido de cálcio ou por hidróxido de cálcio, sem quaisquer adições de materiais pozolânicos ou hidráulicos;
- Cais dolomíticas (DL) – cais constituídas principalmente por óxido de cálcio e por óxido de magnésio ou por hidróxido de cálcio e por hidróxido de magnésio, sem quaisquer adições de materiais hidráulicos ou pozolânicos;
- Cal hidráulica natural (NHL) – cal produzida pela calcinação de calcários mais ou menos argilosos ou siliciosos com a redução a pó por extinção, com ou sem moagem. Possuem a propriedade de efectuarem presa e endurecer debaixo de água. O dióxido de carbono atmosférico contribui para o processo de endurecimento.

As cais aéreas devem ser classificadas de acordo com o seu teor de (CaO + MgO) e as cais hidráulicas de acordo com a sua resistência à compressão. Desta forma, apresenta-se o Quadro 2.1 como um resumo dos tipos de cal de construção, segundo a NP EN 459-1 (2002).

Quadro 2.1 – Tipos de cal de construção (NP EN 459-1, 2002)

Designação	Notação
Cal cálcica 90	CL90
Cal cálcica 80	CL80
Cal cálcica 70	CL 70
Cal dolomítica 85	DL 85
Cal dolomítica 80	DL 80
Cal hidráulica 2	HL 2
Cal hidráulica 3,5	HL 3,5
Cal hidráulica 5	HL 5
Cal hidráulica natural 2	NHL 2
Cal hidráulica natural 3,5	NHL 3,5
Cal hidráulica natural 5	NHL 5

Em complemento, as cais aéreas são classificadas de acordo com as suas condições de fornecimento, em cais vivas (Q) ou cais hidratadas (S).

2.1.3 Fabrico da cal viva

De acordo com o Guía Práctica de la Cal y Estuco (1998), o fabrico da cal viva transforma, basicamente, a pedra calcária (carbonato de cálcio) em cal viva (óxido de cálcio).

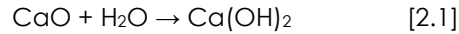
O processo de fabrico inicia-se com a escolha do material adequado, admitindo que os mesmos terão que possuir teores altos de carbonatos de cálcio e magnésio (superior a 95%). No processo industrial, os fragmentos de rocha são submetidos a um processo de trituração e crivagem, de forma a obter o tamanho adequado para o processo de calcinação. Em seguida, o material é submetido a um processo de cozedura, a uma temperatura média de 900 °C, em que verifica a pressão de dissociação do carbonato de cálcio (Sousa Coutinho, 1988).

A cal pode ser produzida em vários tipos de fornos. Segundo o Guía Práctica de la Cal y Estuco (1998), o equipamento mais utilizado é o forno contínuo vertical, sendo o combustível de chama curta. Possui duas câmaras opostas, revestidas por material refractário, sendo a superior alimentada por calcário. Na parte lateral da mesma, introduz-se o carvão na zona do estrangulamento, efectuando-se, nesse mesmo local, a combustão. Na câmara inferior, efectua-se o arrefecimento do material e, por último, a matéria calcinada é extraída pela parte inferior desta câmara.

O segundo exemplo é o forno rotativo, constituído por um cilindro metálico revestido igualmente, por material refractário. Basicamente, o funcionamento passa pela rotação do cilindro, em torno de um eixo ligeiramente inclinado. Por uma boca superior recebe-se o calcário, sendo o aquecimento efectuado por um maçarico na boca inferior. Este tipo de equipamento permite um melhor controlo da temperatura e da alimentação, mas, por outro lado, possui a desvantagem de exigir que o calcário seja previamente reduzido a uma granulometria com menor dimensão.

2.1.4 Hidratação da cal viva - obtenção da cal aérea

Antes da aplicação da cal viva, esta terá que ser extinta por imersão ou aspersão com água, provocando uma reacção fortemente exotérmica, com expansão que leva à fragmentação do óxido de cálcio. As partículas de cal viva transformam-se em cal hidratada em pó ou em forma de pasta, dependendo da quantidade de água utilizada. O processo de hidratação traduz-se na seguinte reacção química.



De acordo com Sousa Coutinho (1988), a extinção da cal efectua-se com uma ligeira diminuição do volume total ocupado pela cal viva e pela água de hidratação, mas, na verdade, observa-se um aumento do volume aparente, que passa para cerca do dobro.

Na extinção produzida por imersão, obtém-se uma pasta de cal aérea, o que permite a sua utilização em argamassas. A cal aérea, sob esta forma, poderá ser conservada por um longo período de tempo, mas o processo de carbonatação terá que ser evitado.

2.1.5 Carbonatação da cal aérea

Depois da aplicação da cal aérea, inicia-se o processo de carbonatação conforme a equação [2.2]:



De acordo com Sousa Coutinho (1988), a secagem da pasta pura traduz-se numa contracção, com fissuração, sendo, por esse motivo, necessário utilizar areia nas argamassas, de forma, a diminuir a contracção e dividindo-a por uma enorme quantidade de pequenas fracções, possibilitando "arejar" a argamassa e permitir a sua carbonatação, ao mesmo tempo que se dá a secagem. A areia a utilizar deve ser siliciosa ou calcária, bem limpa, isenta de matérias húmidas e de argila.

2.1.6 Obtenção da cal hidráulica

De acordo com Sousa Coutinho (1998), um calcário com quantidades de argila no intervalo entre 5% a 20%, quando submetido à acção da temperatura, origina a formação do óxido de cálcio e a combinação da sílica e da alumina com este, resultando desta forma, a presença de silicatos e aluminatos que, hidratando-se, dão origem a um ligante hidráulico.

Vicat reconheceu que a hidraulicidade da cal dependia da maior ou menor proporção de argila no calcário. Observou que, além de 20% de argila, o produto obtido por cozedura, já não se extinguia por adição de água, de tal forma, que denominou-o de "cal limite", pois limita a transição para os cimentos naturais. Consequentemente, tentou classificar

os calcários segundo o teor de argila. Mais tarde, de acordo com Mateus (2002), Durand Claye e Feret (1887) elaboraram o seguinte quadro:

Quadro 2.2 – Classificação da cal de acordo com a matéria-prima (Durand Claye e Feret, 1887)

Natureza da cal	Teor de argila (%)	Índice de hidráulidade (*)	Tempo de presa (dias)
Cal aérea, gorda	<1		
Cal aérea, magra	1 a 5		
Cal fracamente hidráulica	5,3 a 8,2	10 a 6,2	16 a 30
Cal medianamente hidráulica	8,2 a 14,8	6,2 a 3,1	10 a 15
Cal simplesmente hidráulica	14,8 a 19,1	3,2 a 2,4	5 a 9
Cal eminentemente hidráulica	19,1 a 21,8	2,4 a 2,0	2ª 4
Cal limite ou cimento de presa lenta	21,8 a 26,7	2,0 a 1,5	1
Cimento de presa rápida	26,7 a 40	1,5 a 0,8	

(*) O índice de hidráulidade é igual à razão $\text{CaO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$

De uma forma análoga, Mateus (2002) apresenta um quadro resumo dos índices de hidráulidade de vários ligantes.

Quadro 2.3- Índices de hidráulidade (Mateus, 2002)

Tipo de ligante	Índice de hidráulidade	% silicato de alumínio	Condições de presa	Tempo de presa
Cal aérea gorda	0,00-0,10	0,0-5,3	Ar	Variável
Cal aérea magra	0,00-0,10	0,3-5,3	Ar	Variável
Cal fracamente hidráulica	0,10-0,16	5,3-8,2	Ar / Água	15 - 30 dias
Cal medianamente hidráulica	0,16-0,31	8,2-14,8	Ar / Água	10 -15 dias
Cal propriamente hidráulica	0,31-0,42	14,8-19,1	Ar / Água	5 - 9 dias
Cal eminente hidráulica	0,42-0,52	19,1-21,8	Ar / Água	2 - 4 dias
Cal limite	0,50-0,65	21,8-26,7	Ar / Água	6 - 24 horas
Cimento romano de presa rápida	0,65-1,20	26,7-40,0	Ar / Água	5 -10 minutos
Cimento magro	1,2-3,0	40,0-55,0	Ar / Água	
Pozolana	>3,0	55,0-80,0	Ar / Água	

A preparação da cal hidráulica é similar à da cal aérea, sendo efectuada, igualmente, em fornos de alvenaria com revestimento refractário.

Em primeiro lugar, dá-se a evaporação da água de embebição da pedreira, numa temperatura entre os 105 °C e 110 °C, efectuando-se depois a desidratação das margas até

aos 500 °C e 700 °C. A partir dos 800 °C, manifesta-se a decomposição do calcário e, na fase de combustão, entre 1200 °C e 1500 °C, dá-se a combinação da sílica e da alumina com a cal. Na fase final, obtém-se um pó e outros pedaços de várias dimensões, que, depois de retirados do forno, são extintos, de forma, a eliminar a cal viva e provocar um processo de pulverização de toda a cal hidráulica. É este o fenómeno que a distingue do cimento Portland, em que a finura da cal hidráulica é obtida pela extinção da cal viva e não pela moagem. É importante, igualmente, conhecer a quantidade de água necessária para o processo de extinção. Deverá ser o volume estritamente necessário para hidratar a cal viva.

Posteriormente, ao processo de cozedura, é obrigatória a separação de incozidos e sobrecozidos. Os incozidos voltam a ser moídos e adicionados à cal para aumentar a hidráulidade e os sobrecozidos podem constituir verdadeiros clínquers de cimento, devido ao teor alto em silicato tricálcico.

O endurecimento das cais exige uma elevada finura, de forma, a obter a hidráulidade pretendida e tendo em conta as suas características de resistência mecânica. As cais hidráulicas podem ser utilizadas na alvenaria corrente, betão em massa sujeito a tensões moderadas, fundações e rebocos.

2.1.7 Requisitos químicos

Apresenta-se o Quadro 2.4, com os requisitos químicos da cal, segundo a NP EN 459-1 (2002):

Quadro 2.4 – Requisitos químicos NP EN 459-1 (2002)

Tipos de cal de construção	CaO + MgO (%)	MgO (%)	CO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Cal livre (%)
CL 90	≥90	≤5	≤4	≤2	--
CL 80	≥80	≤5	≤7	2	--
CL 70	≥70	≤5	≤12	≤2	--
DL 85	≥5	≤30	≤7	≤2	--
DL 80	≥80	≤5	≤7	≤2	--
HL 2	--	--	--	≤3	≥8
HL 3.5	--	--	--	≤3	≥6
HL 5	--	--	--	≤3	≥3
NHL 2	--	--	--	≤3	≥15
NHL 3.5	--	--	--	≤3	≥9
NHL 5	--	--	--	≤3	≥3

2.1.8 Requisitos mecânicos

O Quadro 2.5 apresenta a classificação das cals hidráulicas, com base na resistência à compressão aos 28 dias, determinada de acordo com a NP EN 459-2 (2002).

Quadro 2.5 – Resistência à compressão da cal hidráulica e da cal hidráulica natural (NP EN 459-2, 2002)

Tipo de construção de cal	Resistência à compressão - MPa	
	7 dias	28 dias
HL 2 e NHL 2	-	≥ 2 a ≤ 7
HL 3.5 e NHL 3.5	-	$\geq 3,5$ a ≤ 10
HL 5 e NHL 5	≥ 2	≥ 5 a ≤ 15

2.1.9 Requisitos físicos das cals vivas e das cals hidratadas

As propriedades físicas das cals de construção são determinadas de acordo com NP EN 459-2 (2002) e apresentadas nos Quadros 2.6 e 2.7.

Quadro 2.6 – Requisitos físicos da cal viva (NP EN 459-2, 2002)

Tipos de cal de construção	Expansibilidade após extinção de acordo com a NP EN 459-2 (2002)	Rendimento de acordo com a NP EN 459-2 (2002) dm ³ /10 kg
CL 90	Satisfaz o ensaio	≥ 26
CL 80		
CL 70		
DL 85	Satisfaz o ensaio	--
DL 80	Satisfaz o ensaio	--

2.1.10 Requisitos de durabilidade

De acordo com a NP EN 459-1 (2002), em várias aplicações, em particular em condições ambientais severas, a escolha de cals de construção tem influência na durabilidade da argamassa, tais como a resistência ao gelo e a resistência química.

Quadro 2.7 – Requisitos físicos das cais cálcicas e dolomíticas hidratadas, das pastas de cal, das cais hidráulicas e das cais hidráulicas naturais (NP EN 459-2, 2002)

Tipo de cal de construção	Finura		Teor de água livre	Expansibilidade		Ensaio de argamassa		Tempo de presa	
				Para as cais de construção excepto pasta de cal e cal dolomítica hidratada, de acordo com NP EN 459-2 (2002)		Penetração	Teor de ar	Inicial	Final
	0,09, mm	0,2 mm		Método de referência	Método de alternativo				
				%	mm	mm	mm	%	h
CL 90	≤ 7	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 20	Satisfaz o ensaio	≤ 12	-----	
CL 80									
CL 70									
CL 85				---	---				
CL 80									
HL 2	≤ 15	≤ 5	≤ 2	≤ 2	≤ 20	>10 e < 50	≤ 20	> 1	≤ 15
HL 3.5									
HL 5									
NHL 2									
NHL 3.5									
NHL 5									

2.2 CIMENTO PORTLAND

2.2.1 Definição geral

De acordo com Sousa Coutinho (1988), o cimento Portland artificial é obtido a partir de uma mistura devidamente proporcionada de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos de alumínio e ferro) e, eventualmente, outra ou outras substâncias apropriadas ricas em sílica, alumina ou ferro, sendo reduzida a pó muito fino e sujeita à acção de temperaturas da ordem de 1450 °C, obtidas em geral em grandes fornos rotativos.

2.2.2 Tipos de cimento

Os cimentos, conforme a natureza e a percentagem dos constituintes, determinadas segundo a Norma NP EN 197-1 (2001), e tendo em vista as diversas aplicações, classificam-se em cinco tipos : I, II, III, IV e V (Quadro 2.8).

Quadro 2.8 – Tipos de cimento (NP – EN 197-1, 2001)

Notação	Designação
CEM I	Cimento Portland
CEM II	Cimento Portland composto
CEM III	Cimento de alto forno
CEM IV	Cimento pozolânico
CEM V	Cimento composto

Em seguida, apresentam-se, descritivamente, os substitutos parciais do cimento, identificados no quadro anterior:

Tipo I → Adições quase agregados:

- Filer calcário - LNEC E 466 (2005). Fíleres calcários para ligantes hidráulicos. Características e requisitos de conformidade.

Tipo II → Adições hidráulicas latentes:

- Escórias de alto forno, adição presentemente regulamentada pela especificação do LNEC E 375 (1993) - Escória granulada de alto forno moída para betões. Características e verificação da conformidade. Em breve as escórias serão cobertas pelas normas: NP EN 15167-1 (2008) Escória granulada de alto forno moída para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. NP EN 15167-2 (2008) Escória granulada de alto forno moída para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Avaliação da conformidade

Tipo II → Adições com propriedades pozolânicas:

- Pozolana natural - NP 4220 (1993) Pozolanas para betão. Definições, especificações e verificação da conformidade;
- Cinza volante – NP EN 450-1(2006) – Cinzas volantes para betão. Definições, exigências e controlo da qualidade (*harmonizada*). NP EN 450-2 (2006) – Cinzas volantes para betão. Avaliação da conformidade;
- Sílica de fumo - NP EN 13263-1 (2007) Sílica de fumo para betão. Parte 1: Definições requisitos e critérios de conformidade (*harmonizada*). NP EN 13263-2 (2007) Sílica de fumo para betão. Parte 2: Avaliação da conformidade.

2.2.3 Composição da matéria-prima do cimento Portland

A matéria-prima, no fabrico do cimento Portland contém, essencialmente:

- Óxido de cálcio (cal) – CaO ;
- Óxido de silício (sílica) – SiO_2 ;
- Óxido de alumínio (alumina) – Al_2O_3 ;
- Óxido de ferro Fe_2O_3 ;
- Pequenas quantidades de outros compostos, tais como metais alcalinos, magnésio, manganésio, titânio, fósforo e, eventualmente, sulfatos.

De acordo com Sousa Coutinho (1988), com o fim de obter produtos com a necessária regularidade de composição e propriedades, é necessário, que entre os óxidos existam certas relações, denominadas de módulos:

- Módulo hidráulico: $\text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$;
- Módulo sílico: $(\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$;
- Módulo alumínio: $(\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3)$;

Desta forma, o equilíbrio químico é atingido, mas o mesmo não se mantém durante o arrefecimento, dado que a velocidade de arrefecimento afecta o grau de cristalização dos produtos e a quantidade de matéria amorfa presente no clínquer (Teles, 2007).

As propriedades da matéria amorfa diferem, principalmente, das dos componentes cristalinos com idêntica composição química. Outra dificuldade advém da interacção da parte líquida do clínquer com os componentes cristalinos já formados (Teles, 2007).

Todavia, é normal considerar-se o cimento em equilíbrio químico, isto é, considera-se que os produtos do arrefecimento reproduzem o equilíbrio existente à temperatura de clinquerização (Teles, 2007).

2.2.4 Formação do cimento Portland

Segundo Sousa Coutinho (1998), a acção da temperatura sobre os componentes da matéria-prima promove reacções químicas, que levam à formação dos componentes principais do cimento Portland, os quais cristalizam nos seguintes compostos:

- Silicato tricálcico – $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - (C_3S) - 20 a 65%;
- Silicato bicálcico - $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - (C_2S) - 10 a 55%;

- Aluminato tricálcico - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{C}_3\text{A})$ - 0 a 15%;
- Aluminoferrato tetracálcico - $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - (\text{C}_4\text{AF})$ - 5 a 15%.

Em seguida, descreve-se resumidamente o processo de transformações das matérias primas, pela acção da temperatura até à obtenção do clínquer.

Até 100 °C, evapora-se a água livre, secando a mistura de calcário e argila. Até 450 °C, sai a água adsorvida nos componentes da matéria - prima e, acima desta temperatura, no máximo de 800 °C, dá-se a desidratação da argila e o início da decomposição dos carbonatos de cálcio e de magnésio com a formação dos óxidos de cálcio e de magnésio.

Em seguida, forma-se o aluminato monocálcico, o ferrato bicálcico e inicia-se o surgimento do silicato bicálcico. No intervalo entre 800 °C e 900 °C, surge a formação do aluminato de cálcio ($12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$). Na fase seguinte, acima dos 900 °C, ocorre a cristalização dos produtos amorfos da desidratação da argila, completando-se a descarbonatação dos carbonatos de cálcio e de magnésio, promovem-se as reacções entre o óxido de cálcio e os componentes de argila, sílica, alumina e óxido de ferro. Entre os 900 °C e os 1000 °C, forma-se e decompõe-se o sílico-aluminato bicálcico, gerando-se o aluminato tricálcico e inicia-se a formação do aluminoferrato tetracálcico. Termina a decomposição de todos os carbonatos, alcançando-se o máximo de concentração em óxido de cálcio livre. Entre 1100 °C e 1200 °C, a maior parte do aluminato tricálcico e do aluminato tetracálcico está constituída e o teor de silicato bicálcico atinge o máximo. A partir de 1260 °C principia o aparecimento da fase líquida, constituída pela combinação de parte de óxido de cálcio com os óxidos de alumínio e de ferro, formando-se silicato tricálcico, a partir do silicato bicálcico já constituído.

Os quatro compostos referidos anteriormente, compõem o clínquer portland – constituinte principal do cimento Portland.

De acordo com a especificação do LNEC E 378 (1996), a composição do clínquer depende da composição e da finura da matéria-prima, da cozedura no forno e das condições de arrefecimento, condicionando as propriedades do cimento, principalmente, o seu comportamento mecânico.

Desta forma, o Quadro 2.9 apresenta as proporções médias dos principais componentes anidros do clínquer portland e as características do seu comportamento.

Quadro 2.9 – Características dos componentes do clínquer portland (LNEC E 378, 1996)

Componentes do clínquer		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Proporções médias		60%	20%	8%	12%
Velocidade de hidratação		Elevada	Moderada	Muito elevada	Elevada
Calor de hidratação	Quantidade	Elevada (120 cal/g)	Pequena (60 cal/g)	Muito elevada (200 cal/g)	Moderada (100 cal/g)
	Desenvolvimento	Rápido	Lento	Rápido	Lento
Desenvolvimento da resistência mecânica		Rápido e prolongado	Lento e muito prolongado	Muito rápido e de curta duração	Lento e pouco significativo
Resistência ao ataque químico		Pequena	Moderada	Muito pequena	Grande

Na realidade, os componentes do cimento, não aparecem puros. (Sousa Coutinho, 1988).

A sua rede cristalina contém, em pequenas quantidades, óxidos de cálcio e de magnésio livres, sulfatos alcalinos e de cálcio (LNEC E 378,1996). Basicamente, na sua estrutura, existem átomos de cálcio que são substituídos por magnésio e pelos metais alcalinos, átomos de silício e de alumínio que são substituídos por átomos de ferro, etc . Tudo isto cria influências recíprocas muito importantes na composição e estrutura dos componentes (Sousa Coutinho, 1988).

Ainda de acordo com o mesmo autor, a contribuição de cada componente para a resistência química do cimento, também não é uniforme. Há componentes, tais como, o silicato bicálcico e os que contém ferro, que possuem maior resistência química do que outros, como o silicato e o aluminato tricálcico. O silicato tricálcico contribui para a tensão de rotura e calor de hidratação, mas possui uma menor resistência química.

A presença do aluminato tricálcico quase que não contribui para a tensão de rotura, tem um desenvolvimento grande de calor ao reagir com a água e, no caso do cimento atacado pelo ião sulfato, a expansão devida à formação de sulfoaluminato de cálcio, pode levar à desintegração da peça ou do elemento estrutural. Por outro lado, este componente é necessário para se obter uma fase líquida, durante a cozedura do clínquer, o que permite a combinação da cal com a sílica. Com a inexistência desta fase líquida, no forno, a reacção levaria muito mais tempo e provavelmente, não seria completa.

O Quadro 2.10 apresenta as principais propriedades dos componentes do cimento (Sousa Coutinho, 1988).

Quadro 2.10 – Propriedades principais dos componentes do cimento (Sousa Coutinho, 1988)

Componentes	Calor desenvolvido após hidratação total	Tensão de rotura após hidratação - MPa			Resistência química
	cal/g	7 dias	28 dias	1 ano	
Silicato tricálcico	120	42,5	50	72,5	Pequena, por necessitar do contacto com soluções sobressaturadas de Ca(OH)_2
Silicato bicálcico	62	2,0	6,7	70,0	Média, por necessitar do contacto com soluções de pH inferior a 12
Aluminato tricálcico	207	2,0	3,4	6,7	Fraca, por dar origem à formação do sulfoaluminato tricálcico
Aluminoferato tetracálcico	100	2,0	3,6	3,8	Boa

2.2.5 Hidratação do cimento Portland

Para se obter, a partir do cimento, um sólido com resistência necessária, é preciso misturá-lo com água. Descrevendo resumidamente o processo, os componentes do cimento reagem com a água, dando origem a um novo sistema de compostos hidratados estáveis, que cristalizam com hábito acicular, envolvendo-se e colando-se uns aos outros, desta forma, conferindo ao conjunto uma resistência notável.

De acordo com Teles (2007), os compostos do cimento podem reagir com a água de duas maneiras:

- Primeiro, pela adição directa de algumas moléculas de água;
- Segundo, pela combinação dos iões da água com os compostos constituintes do cimento, formando novas substâncias, através da reacção de hidratação.

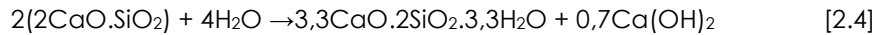
Em seguida, referem-se as reacções dos quatros principais constituintes do cimento com a água.

Segundo a equação [2.3], o silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ao reagir com água liberta hidróxido de cálcio, uma parte da qual fica em solução e outra parte cristaliza (portlandite),

e o silicato, perdendo o cálcio, dá origem ao bissilicato tricálcico hidratado ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

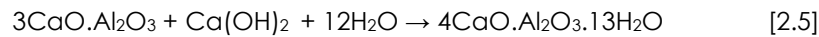


O silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ao reagir com a água liberta, igualmente, hidróxido de cálcio, mas em menor quantidade. Transforma-se noutro silicato de cálcio hidratado ($\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3,3\text{H}_2\text{O}$).

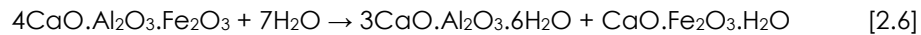


De acordo com Teles (2007), a constituição da pasta de cimento hidratada é muito influenciada pelas reacções dos silicatos de cálcio com a água. Os silicatos de cálcio hidratados, responsáveis pelas propriedades ligantes do cimento Portland, apresentam composições químicas não muito rígidas, sendo praticamente amorfos.

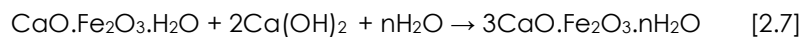
De acordo com Sousa Coutinho (1988), o aluminato tricálcico encontrando-se numa solução saturada de hidróxido de cálcio, fixa este composto e transforma-se num aluminato tetracálcico hidratado ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$), segundo a equação [2.5]



O aluminoferrato tetracálcico, reagindo com a água, liberta aluminato tricálcico hidratado ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e ferrato monocálcico ($\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), conforme a equação [2.6].

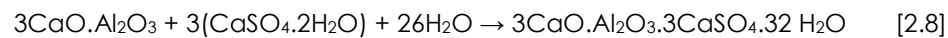


Este último, reagindo com o hidróxido de cálcio libertado nas reacções anteriores, transforma-se em ferrato tricálcico hidratado ($\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), que forma soluções sólidas com aluminato tricálcico hidratado, segundo a equação [2.7].



Desta forma, este composto fica protegido da acção do ião sulfato, e por esta razão, os cimentos resistentes à acção dos sulfatos devem conter uma proporção razoável de aluminato tetracálcico.

Devido à rápida reacção dos aluminatos com a água, que conduz a uma presa instantânea, torna-se necessário juntar ao cimento um sulfato, tal como o gesso natural. Este elemento, durante a hidratação, combina-se rapidamente com os aluminatos, dando origem ao sulfoaluminato de cálcio – etringite – ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$), protegendo-os, consequentemente, da acção directa da água.



2.2.6 Fabrico do cimento Portland

De acordo com Sousa Coutinho (1988), uma fábrica de produção de cimento Portland deve situar-se próxima de uma formação calcária. A pedreira é explorada em grandes massas, sendo as mesmas transportadas e trituradas por um britador. Ao mesmo tempo que este material é transportado para uma pilha de armazenamento, recebe ao mesmo tempo uma adição de argila.

Existem dois processos de fabrico de cimento:

Via húmida – o calcário é britado e posteriormente moído. Em seguida é misturada a argila em forma de lama. Por fim, a mistura é colocada em silos de homogeneização e armazenamento. Este processo é mais dispendioso, mas possui um melhor controlo de poluição e qualidade;

Via seca - o calcário e a argila são britados e secos. Posteriormente, a mistura é moída e segue para silos de homogeneização para armazenamento, onde poderá haver correcções na sua composição.

A cozedura é efectuada num forno rotativo. A sua constituição define-se num cilindro de chapa de aço, com um diâmetro que pode atingir 7,6 m e um comprimento de 232 m.

Para a obtenção da temperatura de clinquerização, que se situa entre 1400 °C e 1450 °C, é necessário recorrer à combustão do carvão ou de fuel-oil.

A alimentação do forno pode ser realizada de quatro formas: pela entrada directa da farinha (via seca), da pasta de cru (via húmida), da farinha humedecida com água, aglomerada em grânulos (via semi-seca) e em pasta dissecada por meio de uma compressão e filtragem (via semi-húmida).

O forno rotativo é sempre adaptado a estes estados da matéria-prima e a sua construção é em função do aproveitamento do calor transportado nos fumos provenientes da cozedura ou clinquerização, de forma a secar e aquecer a matéria-prima a caminho da cozedura.

Na saída do forno, o clínquer deve ser arrefecido rapidamente a temperaturas inferiores a 1250 °C, devido à instabilidade do silicato tricálcico. O arrefecimento rápido proporciona a conservação da sua estrutura. Por outro lado, existe, igualmente, a vantagem de evitar que a fase líquida cristalize, pois a reactividade do aluminato de cálcio diminui e o óxido de cálcio pode transformar-se em cristais de dimensões significativas, que poderão provocar fenómenos de expansão e instabilidade.

Após a saída do arrefecedor, num intervalo de temperaturas entre 125 °C e 180 °C o clínquer é armazenado. Terminado o seu arrefecimento, entra nos moinhos de bolas, e depois para grandes silos onde é homogeneizado. É então distribuído a granel ou em sacos, adicionando-se adjuvantes para facilitar a moagem, aditivos, tais como o gesso, para regular o tempo de presa e outros materiais tais como as escórias de alto forno ou pozolanas para alteração de determinadas propriedades.

2.2.7 Requisitos químicos

Os métodos de ensaio da análise química dos cimentos são efectuados de acordo com a NP EN 196-2 (2006). Apresenta-se o Quadro 2.11 com os requisitos químicos de alguns tipos de cimento, de acordo com Secil (2004a), (2004b), (2004c) e (2004d).

Quadro 2.11 – Requisitos químicos das fichas técnicas da Secil

Tipos de cimento	Propriedades							
	Perda de fogo		Resíduo insolúvel		Teor de sulfatos		Teor de cloretos	
	Método de ensaio	Valor especificado	Método de ensaio	Valor especificado	Método de ensaio	Valor especificado	Método de ensaio	Valor especificado
CEM I 52,5R	NP EN 196-2 (2006)	≤ 5,0%	NP EN 196-2 (2006)	≤ 5,0%	NP EN 196-2 (2006)	≤ 4,0%	NP EN 196-21 (2006)	≤ 0,10%
CEM I 42,5R						≤ 3,5%		
CEM II/B-L 32,5N	--	--	--	--		≤ 3,5%		
CEM II/A-L 42,5R	--	--	--	--		≤ 4,0%		

2.2.8 Requisitos físicos

Apresentam-se, no quadro seguinte, as características físicas de alguns cimentos:

Quadro 2.12 – Requisitos físicos das fichas técnicas da Secil

Tipos de cimento	Propriedades			
	Princípio de presa		Expansibilidade	
	Método de ensaio	Valor especificado	Método de ensaio	Valor especificado
CEM I 52,5R	NP EN 196-3 (2006)	≥ 45 minutos	NP EN 196-3 (2006)	≤ 10 min
CEM I 42,5R		≥ 60 minutos		
CEM II/B-L 32,5N		≥ 75 minutos		
CEM II/A-L 42,5R		≥ 80 minutos		

2.2.9 Requisitos mecânicos

De acordo com Sousa Coutinho (1988), a determinação da resistência mecânica desempenha um papel bastante importante na medição da qualidade do cimento. Esta característica depende de vários factores, tais como, as condições de amassadura, a temperatura, a preparação dos espécimes, etc.

O ensaio para a determinação da resistência mecânica é efectuado de acordo com a NP EN 196-1 (2006).

Apresenta-se o Quadro 2.13, com os valores característicos da resistência à compressão aos 2, 7 e 28 dias.

Quadro 2.13 – Resistência à compressão aos 2, 7 e 28 dias (NP EN 196-1, 2006)

Tipos de cimento	Resistência à compressão (MPa)		
	2 dias	7 dias	28 dias
CEM I 52,5R	≥ 30	---	≥ 52,5
CEM I 42,5R	≥ 20	---	≥ 32,5 e ≤ 62,5
CEM II/B-L 32,5N	---	≥ 16	≥ 32,5 e ≤ 52,5
CEM II/A-L 42,5R	≥ 20	---	≥ 42,5 e ≤ 62,5

2.3 CINZAS VOLANTES

2.3.1 Definição geral

Segundo a NP EN 450-1 (2006), cinzas volantes são um pó fino constituído principalmente por partículas esféricas e vítreas resultantes da queima do carvão pulverizado, com propriedades pozolânicas e essencialmente constituídas por sílica, alumina e óxido de ferro.

2.3.2 Tipos de cinzas volantes

De acordo com a norma americana ASTM C618-08a (2008), existem duas classes de cinzas volantes:

- Classe F – disponível em maiores quantidades, é baixa no teor de cal (normalmente menos de 15%) e deverá apresentar um somatório de óxidos de silício, alumínio e ferro não inferior a 70%. A sua produção é efectuada a partir de antracites ou de carvão betuminoso. Controla mais eficazmente o calor de hidratação durante a cura do betão e a sua aplicação é ideal em grandes volumes de construção em betão. Contribui para uma elevada resistência aos sulfatos e possui unicamente propriedades pozolânicas;

- Classe C - obtida a partir da queima de carvão sub-betuminoso e da lignite, possui teor elevado em óxido de cálcio, que contribui para o melhoramento das características únicas de auto-endurecedor. Possui propriedades pozolânicas e cimentícias.

2.3.3 Caracterização dos componentes das cinzas volantes

De acordo com Sousa Coutinho (1988) e Teles (2007), a composição química das cinzas volantes depende, fundamentalmente, do tipo de carvão utilizado, embora as condições de combustão também sejam importantes. Os componentes principais são a sílica, a alumina e o óxido de ferro. Outro elemento que aparece em quantidade apreciável é o cálcio, pelo que na tecnologia do betão é usual considerar, separadamente, as cinzas com baixo teor de óxido de cálcio (<10%) e as de elevado teor (>10%).

Sousa Coutinho (1988), apresenta as principais características das cinzas volantes em Portugal e no estrangeiro (Quadro 2.14).

Quadro 2.14 – Principais características das cinzas volantes em Portugal (Sousa Coutinho, 1988)

Características principais	Cinzas volantes do carvão estrangeiro	Cinzas volantes do carvão em Portugal
Análise química (%)		
Perda de peso a 950 °C	3,9	14,4
Sílica	51,8	50,3
Alumina	27,8	19,7
Óxido de ferro	7,3	7,1
Óxido de cálcio	2,5	0,4
Óxido de magnésio	1,1	1,2
Trióxido de enxofre	0,8	0,2
Óxido de potássio	2,0	2,9
Óxido de de sódio	0,6	0,2
Massa volúmica (g/cm ³)	2,28	2,11
Superfície específica cm ² /g	2920	2630
Percentagem de retidos nos peneiros		
Malha 44 um	25,3	42,0
Malha 88 um	7,4	13,5

A composição das cinzas volantes é idêntica à das argilas (essencialmente constituídas por silício e alumínio) resultando da fusão das mesmas aquando da queima do

carvão. A sua forma esférica traduz o seu estado amorfo, resultado das condições em que solidificaram as partículas em fusão de argila, isto é, rapidamente e no ar e sem qualquer constrangimento da natureza física.

De acordo com Camões Azevedo (2002), a pozolanicidade das cinzas volantes está relacionada com o teor de SiO_2 . De facto, é a sílica amorfa que se combina com a cal livre e a água, resultando na formação de quantidades suplementares de C-S-H.

Sousa Coutinho (1998) refere que a reactividade pozolânica é a capacidade de uma pozolana se combinar com o hidróxido de cálcio, sendo necessário que a sílica e a alumina não estejam em elevado grau de cristalinidade.

Segundo Alonso e Wescher (1991), cinzas volantes com uma percentagem de SiO_2 menor que 35% classificam-se como pozolanas inactivas.

Camões Azevedo (2002) considera que os sulfatos, SO_3 , podem afectar a quantidade óptima de cinzas volantes em relação ao desenvolvimento das características mecânicas e do tempo de presa.

O carbono presente nas cinzas volantes é resultado da combustão incompleta do carvão e dos aditivos orgânicos utilizados no processo da sua recolha. Em geral, o teor de carbono não é quantificado directamente, mas sim recorrendo à determinação da perda ao fogo, a qual inclui, além do carbono livre, perdas de água combinada e de dióxido de carbono provenientes dos hidratos e dos carbonatos presentes nas cinzas volantes, sendo assumido, sem cometer um grande erro, como aproximadamente igual ao conteúdo de carbono.

Cinzas volantes de elevado teor de cálcio (classe C) apresentam perda ao fogo, em geral, inferior a 1%, enquanto que as da classe F podem atingir valores até cerca de 20%.

A contribuição da quantidade de carbono presente nas cinzas é decisiva na exigência de água de pastas de cimento, argamassas e betões. O total de água necessário à obtenção de uma pasta de consistência normal é tanto maior, quanto maior for o teor em carbono. O carbono contido nas cinzas volantes apresenta porosidade elevada e grande superfície específica, sendo capaz de absorver quantidades significativas não só de água,

como de adjuvantes incluídos na amassadura do betão, nomeadamente superplastificantes, agentes introdutórios de ar ou retardadores de presa.

2.3.4 Requisitos químicos

De acordo com a NP EN 450 -1 (2006), a composição química deve ser expressa em percentagem da massa das cinzas secas. A composição química típica das cinzas volantes secas compreende as características químicas e respectivos requisitos mostrados no Quadro 2.15.

Quadro 2.15 – Requisitos químicos de acordo com a NP EN 450-1 (2006)

Características químicas	Valores limites
Cloretos	$\leq 0,10\%$ em massa (NP EN 196-21,1990)
Trióxido de enxofre	$\leq 3,0\%$ em massa (NP EN 196-2,2006)
Óxido de cálcio livre	$\leq 1,0\%$ em massa (NP EN 451-1,2006)
Perda ao fogo	$\leq 5,0\%$ em massa (NP EN 196-2,2006)

O Quadro 2.16 apresenta os requisitos químicos das cinzas volantes, de acordo com a norma americana ASTM C618-08a (2008).

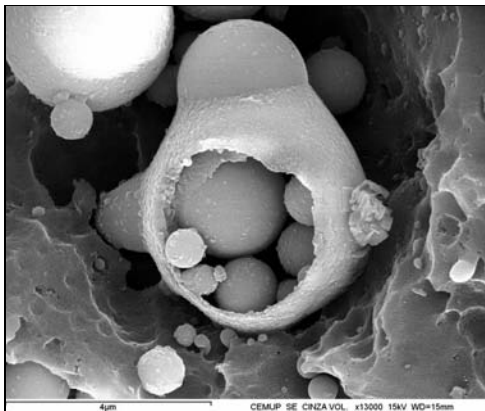
Quadro 2.16 – Requisitos químicos de acordo com ASTM C618-08a(2008)

Propriedades	Classes de cinzas volantes	
	Classe F	Classe C
Sílica + alumina + óxido de ferro (% mínima)	70,0	50,0
Trióxido de enxofre (% máxima)	5,0	5,0
Teor de água (% máxima)	3,0	3,0
Perda ao fogo (% máxima)	6,0	6,0

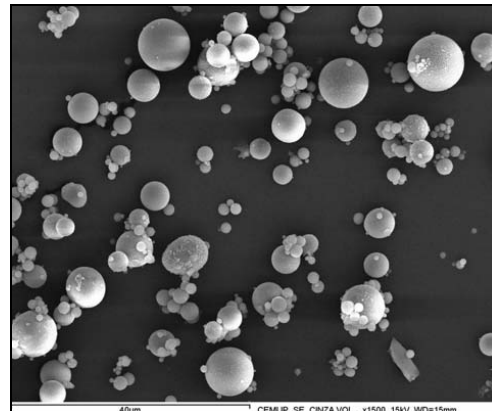
2.3.5 Requisitos físicos

As partículas das cinzas volantes apresentam uma forma esférica de dois tipos, sólidas e ocas (cenosferas ou plerosferas), essencialmente vítreas (cerca de 80%) com uma finura elevada. Algumas cinzas apresentam, igualmente, partículas irregulares ou angulares. A maioria das partículas têm um diâmetro compreendido entre menos de $1\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$, podendo ser mais finas ou mais grossas, do que as de cimento. O diâmetro médio das

partículas das cinzas volantes é de cerca de 7 μm a 12 μm , valor semelhante às do cimento. A superfície específica, aferida pelo método de Blaine, varia, em geral, de 250 m^2/kg a 550 m^2/kg (Camões Azevedo, 2002).



a) Plerosferas contendo cenosferas



b) Cenosferas

Figura 2.1 – Imagens de cinzas volantes obtidas por microscopia eletrônica de varrimento

De acordo com o mesmo autor, a finura das cinzas é avaliada, em geral, recorrendo à determinação da quantidade de partículas retidas no peneiro nº 325, com 45 μm de abertura de malha. Os documentos normativos apresentam valores limite para tal quantidade. Segundo NP EN 450 -1 (2006) a percentagem de material retido não deve exceder 40% e a variação admitida é de 10% em relação ao seu valor médio. A norma americana (ASTM C 618-08a(2008)) indica o valor limite de 34%.

Apresenta-se o Quadro 2.17 apresenta os requisitos físicos estipulados na NP EN 450-1 (2006).

Quadro 2.17 – Requisitos físicos (NP EN 450-1, 2006)

Características físicos	Valores limite
Finura	$\leq 0.40\%$ (NP EN 451-2,1995)
Índice de actividade	Entre os 28 e os 90 dias deve ser pelo menos 75% e 85%
Expansibilidade	$\leq 10\%$ (NP EN 196-3, 2006)
Massa volúmica	$\leq 150 \text{ kg/m}^3$ (NP EN 196-6,1996)

2.3.6 Mecanismo da reactividade pozolânica

A reactividade pozolânica define-se como a capacidade de uma pozolana (tal como as cinzas volantes) se combinar com hidróxido de cálcio, sendo necessário que a sílica

e a alumina não estejam em elevado grau de cristalinidade. A reactividade está relacionada com a sua estrutura interna, estando o aumento da reactividade relacionado com o afastamento do produto do estado cristalino.

Existem vários estudos que caracterizam a reactividade pozolânica das cinzas volantes (Kokubu , 1968, Shyaun e Jiping, 1986, Pietersen, 1993, Bijen e Pietersen, 1994).

Kokubu (1968) considera que a reactividade pozolânica está, principalmente, relacionada com a área da superfície, da fase vítrea.

De acordo com Shyaun e Jiping (1986), o grau de reacção das cinzas volantes está ligado à resistência mecânica da pasta com o material referido e com o valor do pH da água que contém as cinzas volantes em suspensão. A determinação deste parâmetro é efectuada a partir de um método baseado na determinação da quantidade de substâncias dissolvidas numa solução de hidróxido de cálcio e cinzas volantes.

Pietersen (1993) afirma que a fase vítrea é a mais reactiva no caso das cinzas volantes. O rácio de dissolução aumenta, igualmente, com o aumento do pH.

Bijen e Pietersen (1994) indicam outros factores que influenciam a reactividade das cinzas volantes, tais como a alcalinidade da solução intersticial nos poros numa pasta de cinzas ou cimento, devido aos iões cálcio e potássio.

Segundo Sousa Coutinho (1988), a determinação da resistência mecânica da pasta de cinzas volantes envolve a identificação da tensão de rotura da mesma, obtida de acordo com o ensaio preconizado no Caderno de Encargos "Fornecimento e recepção de pozolanas"- Decreto 42 999 de 1 de Junho de 1960. Consequentemente, apresentam-se no Quadro 2.18 as tensões de rotura mínimas de pastas normais de cal e pozolana.

Quadro 2.18 – Tensões de rotura mínimas de pasta normais de cal e pozolana (kgf/cm²) (Sousa Coutinho, 1988)

Idade	Ensaio	Tipo I	Tipo II
7 dias	Flexão	10	--
	Compressão	20	--
28 dias	Flexão	20	10
	Compressão	60	30

A determinação do valor do pH da solução com cinzas volantes em suspensão constitui uma forma simples de avaliação da reactividade pozolânica das cinzas volantes. O valor do pH das cinzas volantes traduz o teor de sílica e alumina. Verifica-se que quanto menor é o valor de pH, maior a reactividade das cinzas volantes. Com a diminuição do pH, maior é o número de iões Ca^{2+} que é absorvido na solução de hidróxido de cálcio e cinzas volantes.

2.3.7 Compostos resultantes da reactividade pozolânica

Os compostos siliciosos e aluminosos reactivos de uma pozolana reagem com o hidróxido de cálcio oriundo do cimento ou da cal, formando silicatos e aluminatos de cálcio.

Os principais compostos observados são o silicoaluminato bicálcico hidratado ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), os silicatos de cálcio hidratados do grupo da tobermorite ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) do tipo I e aluminatos de cálcio hidratados.

A relação entre o óxido de cálcio e a sílica na tobermorite varia entre 0,8 e 1,5, mas apesar desta variação tão elevada, as características tais como a densidade, índice de refração e difractograma de raios X são praticamente constantes.

Os compostos derivados da alumina são bastante mais complexos que os referidos anteriormente.

Assim, Tavasci (1947) observou aluminatos mono, bi e tricálcicos e, no caso de argamassas de cal, registou igualmente a presença do aluminato tetracálcico.

De acordo Sousa Coutinho citando Ferrari, as pozolanas, na generalidade, não reagem só com o hidróxido de cálcio, observando-se também a sua acção sobre os silicatos bicálcicos do cimento.

2.3.8 Obtenção das cinzas volantes

De acordo com Sousa Coutinho (1988), as cinzas volantes resultam da queima do carvão pulverizado ou moído arrastado nos gases da combustão.

Antes da queima, o carvão é previamente moído até passar no peneiro de abertura igual a 75 μm . A parte combustível arde instantaneamente, enquanto que a parte não combustível, constituída essencialmente por xistos e argilas, entra total ou parcialmente em fusão.

Dependendo do tipo de forno e da finura do carvão, algumas destas partículas aglomeram-se numa espécie de clínquer, que cai no fundo do forno, originando a jorra. Outra parte, devido às suas pequenas dimensões, é transportada nos gases de combustão, podendo ser captadas antes do seu lançamento para a atmosfera. Desta forma, obtêm-se as cinzas volantes, caracterizadas por partículas de forma arredondada, com diâmetro médio de cerca de 10 μm . A captação pode ser efectuada por colectores mecânicos que recolhem as partículas com maiores dimensões e por colectores electrostáticos que captam as partículas de menores dimensões.

2.4 AREIAS

2.4.1 Definição geral

A norma NP EN 13139 (2005) define agregado como um material granular utilizado na construção, podendo ser natural, artificial ou reciclado.

Os agregados naturais são de origem mineral, tendo sido sujeitos apenas a processamento mecânico.

Os agregados artificiais são de origem mineral, resultantes de um processo industrial envolvendo modificações térmicas ou outras.

Os agregados reciclados resultam do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção.

2.4.2 Enquadramento histórico

De acordo com Sousa Coutinho (1988), numa fase inicial, utilizavam-se em betões e argamassas, unicamente, agregados com propriedades e duração conhecidas. O autor, referindo Feret (1896) afirma que a natureza do agregado não influi na tensão de rotura do betão, mas apenas no volume dos vazios inerentes à sua granulometria e na quantidade de

água. Refere que Wig et al (1915) efectuaram vários ensaios sobre 240 areias e 60 tipos de agregados grossos. Concluíram que nenhum tipo de areia ou de agregado grosso modificava significativamente as características do betão, embora a diferença entre a qualidade dos tipos dos agregados ensaiados fosse muito grande.

Com o aumento da construção começaram a escassear os jazigos com bons materiais tradicionais, iniciando-se a utilização de subprodutos materiais e de agregados fabricados para o efeito pretendido. Consequentemente, surgiu a necessidade de verificar vários requisitos (geométricos, químicos e físicos), que até à data não eram relevantes.

Stanton (1940) refere a necessidade de ter em atenção as naturezas químicas e estruturais dos agregados. Descobriu a possibilidade de reacções químicas álcalis-sílica, entre o agregado e o cimento, que poderia envolver toda a massa do betão, originando reacções expansivas ou na superfície de que poderiam resultar problemas de aderência.

Sousa Coutinho (1988) refere que a Comissão 26-GM da Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais de Matériaux et des Constructions publicou em 1981 (RILEM, 1981) uma lista de ensaios a realizar sobre agregados e métodos de execução.

Hoje em dia, as propriedades essenciais que se exigem ao agregado são de natureza geométrica, física e química:

- Um agregado deve ter forma adequada e dimensões proporcionadas, segundo determinadas regras;
- Resistência adequada às forças;
- Resistências térmicas adequadas;
- Propriedades químicas apropriadas relativamente ao ligante e às acções exteriores;
- Isenção de substâncias prejudiciais.

2.4.3 Classificação dos agregados

Os agregados podem ser classificados conforme a sua origem, petrografia, massa volúmica, baridade e dimensão das partículas.

- Classificação com base na origem – classificam-se em naturais (rolados ou birtados), artificiais e reciclados.

- Classificação petrográfica – a classificação petrográfica dos agregados naturais está de acordo com a classificação das rochas que lhes deram origem. Assim, os agregados naturais classificam-se em ígneos, sedimentares e metamórficos.

As rochas ígneas formam-se a partir da consolidação de grandes massas em fusão existentes no interior da terra designadas por magmas. A classificação das rochas ígneas tem em atenção a profundidade de consolidação do magma, a textura e a composição mineralógica (Begonha, 2009a). Os agregados oriundos de rochas ígneas possuem como componente principal a sílica e são constituídas por matéria cristalina e/ou amorfa, sendo as mesmas em função da velocidade de arrefecimento.

De entre as rochas ígneas, mais utilizadas como agregados incluem-se o granito, gabro, diorito, basalto e os piroclastos.

As rochas sedimentares formam-se à superfície ou muito perto da superfície da Terra, a pressões e temperaturas baixas ou relativamente baixas. Distinguem-se por: estratificação produzida durante e depois da deposição; presença de fósseis; textura e estrutura que dão indicações sobre as condições do transporte e da sedimentação, a natureza da rocha-mãe do material e do cimento, etc (Begonha, 2009a).

Como exemplos destacam-se a areia, silte, calcário e xisto argiloso.

As rochas metamórficas resultam da transformação por reajustamento mineralógico ou textural de rochas pré-existentes (ígneas, sedimentares ou mesmo metamórficas) no estado sólido sob a influência da temperatura, pressão (confinante e de cisalhamento) e acção química de fluidos e gases. Há três tipos de metamorfismo: de contacto; regional; dinamometamorfismo.

O mármore, gneisse e o xisto metamórfico são exemplos de rochas metamórficas utilizadas como agregados.

De acordo com a NP EN 932-3 (2000), a amostra de rocha deve, em primeiro lugar, ser sujeita a uma análise visual para determinar a rocha constituinte ou os tipos de minerais. Recorre-se a uma lupa binocular ou a um microscópio óptico de luz polarizada. A descrição deve incluir comentários sobre: a granulometria dos principais constituintes, textura, anisotropia, porosidade, vesicularidade nas rochas vulcânicas e cor; composição mineralógica e determinação aproximada das suas proporções relativas; estado de alteração e de meteorização. A nomenclatura da rocha é dada no anexo A da norma.

Os agregados derivados de depósitos naturais consistem principalmente em partículas minerais e fragmentos de rochas. A composição dos agregados varia conforme o tamanho das fracções, sendo por isso necessário proceder ao seu fraccionamento por peneiração antes de as analisar separadamente. As partículas mais pequenas são normalmente constituídas por um mineral e as partículas maiores por fragmentos de rocha.

A NP EN 932-3 (2000) é omissa em relação ao número mínimo de partículas a analisar em cada fracção, pelo que se poderá utilizar o cálculo referido na norma ASTM C 295-90 (1990) com uma contagem, no mínimo, de 150 partículas por cada fracção. As partículas superiores a 4 mm podem ser observadas e classificadas a olho nu ou na lupa binocular.

As partículas menores que 4 mm e superiores a 0,063 mm devem ser analisadas por microscopia óptica de luz polarizada, após produção de lâminas delgadas polidas do material representativo de cada fracção. O número de lâminas a observar para cada fracção deve ter em atenção a granulometria respectiva, de forma a assegurar a contagem mínima de partículas para que a amostra possa ser considerada como representativa.

A NP EN 932-3 (2000) é omissa no que respeita às partículas inferiores a 0,063 mm. Estas partículas são demasiado pequenas para poderem ser identificadas por microscopia óptica de luz polarizada, pelo que podem ser submetidas à difracção dos raios x, com vista a determinar as fases cristalinas presentes;

- Classificação com base na massa volúmica – os agregados dividem-se em agregados de massa volúmica normal (entre 2000 kg/m³ e 3000 kg/m³), agregados pesados (massa volúmica superior a 3000 kg/m³) e leves (massa volúmica inferior a 2000 kg/m³);
- Classificação com base na baridade – apresenta-se no Quadro 2.19 a classificação do agregado quanto à baridade (Sousa Coutinho, 1988);
- Classificação com base na dimensão de partículas – de acordo com a NP EN 13139 (2005), identificam-se como agregado grosso em que o material de maior dimensão (D) é maior ou igual a 4 mm e a mínima (d) é maior ou igual a 2 mm. Agregado fino, em que as partículas se caracterizam pelas menores dimensões e o D é menor ou igual a 4 mm. Os finos identificam-se como a fracção do agregado que passa no peneiro de 0.063 mm. O fíler é o agregado

cuja maior parte passa pelo peneiro de 0.063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção.

Quadro 2.19 – Classificação do agregado quanto à baridade (Sousa Coutinho, 1988)

Classificação do agregado	Baridade kg/m ³	Exemplos de agregados
Ultraleve	< 300	Poliestireno expandido Vermiculite Perlite expandida Vidro expandido
Leve	300 a 1200 – areia 300 a 950 agregado grosso	Argila expandida Xisto expandido Escória de alto-forno expandida Cinzas volantes Pedra – pomes
Denso	1200 ou 950 a 1700	Areia Godo Rocha britada
Extradenso	>1700	Limonite Magnetite Barite

2.4.4 Requisitos geométricos

De acordo com NP EN 13139 (2005), os requisitos geométricos identificam-se pelas seguintes propriedades:

- Dimensões do agregado – são especificadas, utilizando as aberturas dos peneiros em milímetros, a abertura do peneiro inferior “d”, e a abertura do peneiro superior “D”. A norma refere que são preferíveis as seguintes dimensões do agregado: 0/1 mm, 0/2 mm, 0/4 mm, 0/8 mm, 2/4 mm, 2/8 mm;
- Granulometria – é especificada na NP EN 933-1 (2000) e deve respeitar os limites de sobretamanhos e subtamanhos;
- Forma das partículas – é definida através do índice de achatamento (NP EN 933-3, 2002) e pelo índice de forma (NP EN 933-4, 2002). A forma dos agregados finos inferiores a 4 mm não influi, normalmente, no comportamento das argamassas;

- Teor de conchas – quando requerido, é determinado segundo a NP EN 933-7 (2002) nas fracções granulométricas compreendidas entre os 4 mm e os 63 mm;
- Teor de finos – é calculado de acordo com a NP EN 933-1 (2000), sendo o teor máximo função do tipo de argamassa. Segundo a NP EN 12620 (2004), o teor de finos deve ser declarado pela categoria correspondente especificada no Quadro 2.20.

Quadro 2.20 – Limites para teor de finos (NP EN 12620, 2004)

Agregado	Peneiro de 0,063 mm (percentagem de passados, em massa)	Categoria f
Agregado grosso	$\leq 1,5$	$f_{1,5}$
	≤ 4	f_4
	> 4	$f_{\text{DECLARADO}}$
	Não requerido	f_{NR}
Agregado natural 0 / 8 mm	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	> 16	$f_{\text{DECLARADO}}$
	Não requerido	f_{NR}
Agregado de granulometria extensa	≤ 3	f_3
	≤ 11	f_{11}
	> 11	$f_{\text{DECLARADO}}$
	Não requerido	f_{NR}
Agregado fino	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	≤ 22	f_{22}
	> 22	$f_{\text{DECLARADO}}$
	Não requerido	f_{NR}

O Quadro 2.21 apresenta as percentagens máximas referidas por Paulo (2006), conforme os tipos de argamassas.

Quadro 2.21 – Limites para teor de finos (Paulo, 2006)

Dimensão do agregado - mm	Percentagem máxima de passados no peneiro de 0,063 mm, em massa				
	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5
0/1	3	5	8	30	>30
0/2	3	5	8	30	--
0/4; 2/4	3	5	8	30	--
0/8; 2/8	3	5	8	30	--

Categoria 1 – argamassas para pavimentos, argamassas projectadas, argamassa para reparação, injeções;

Categoria 2 – argamassas para reboco e estuque;

Categoria 3 – argamassas para alvenaria (todos os agregados, exceptuando os britados);

Categoria 4 – argamassas para alvenaria (agregados britados).

2.4.5 Requisitos químicos

O Quadro 2.22 apresenta os requisitos químicos e respectivas normas de ensaio.

Quadro 2.22 – Requisitos químicos (NP EN 13139, 2005)

Propriedade química		Norma de ensaio	Observações
Cloreto		NP EN 1744-1 (2000)	Determinação do teor de cloretos solúveis em água dos agregados
Compostos com enxofre	Sulfatos solúveis em ácido		
	Enxofre total		
Constituintes que alteram o tempo de presa e a resistência da argamassa			
Requisitos adicionais para agregados artificiais	Matérias solúveis em água		
	Perda de fogo		
Reactividade álcalis-silica		NP EN 12620 (2004), LNEC E 461 (2007), LNEC E 467 (2005), ASTM C 1260-07 (2007)	A reacção álcalis-silica dos agregados e dos fileres deve ser avaliada de acordo com as disposições em vigor.

2.4.6 Requisitos físicos

O Quadro 2.23 mostra as propriedades físicas dos agregados que, de acordo com a NP EN 13139 (2005), variam consoante a aplicação específica ou a origem dos agregados.

Quadro 2.23 – Requisitos físicos (NP EN 13139, 2005)

Propriedade física	Norma de ensaio	Observações
Massa volúmica das partículas	NP EN 1097-6 (2003)	Os resultados devem ser declarados, indicando o método do ensaio e as equações utilizadas
Absorção de água	NP EN 1097-6 (2003)	Os resultados devem ser declarados, indicando o método do ensaio e as equações utilizadas
Resistência ao gelo e degelo	EN 1367-1 (2007)	A resistência ao gelo e ao degelo é determinada em agregados superiores a 4 mm e menores que 10 mm
	NP EN 1367-2 (2002)	A partir de fracções de agregados entre 10 mm e 14 mm
	Determinação com a argamassa, de acordo com as disposições em vigor no local de utilização	Em agregados de 4 mm ou inferiores

2.4.7 A função dos agregados nas argamassas

Margalha et al. (2007) consideram que a areia funciona como um esqueleto da argamassa que ganha coesão pela ligação dos seus grãos ao ligante, pelo que a qualidade do agregado é essencial, no comportamento global da mistura. No caso das argamassas de cal aérea, a mistura da areia separa as partículas de cal, o que facilita a reacção química da carbonatação e permite distribuir as retracções que eventualmente ocorram por toda a argamassa.

A areia com maior volume de vazios afecta a estrutura porosa e exige argamassa ricas com elevado teor de ligante que, por sua vez, pode ter consequências negativas ao nível da retracção. Uma das formas de diminuição do número de vazios de uma argamassa passa pela mistura de areias mais finas com mais grossas. Desta forma, consegue-se um melhoramento de algumas características, tais como a resistência à flexão, compressão e diminuição da capilaridade (Margalha, et al. 2007). Os finos podem transmitir uma melhor coesão e trabalhabilidade às argamassas.

A presença de argila nos finos, que acompanha as areias oriundas de areeiros não é aconselhável. Dificulta o contacto dos grãos de areia com o ligante, resultando numa diminuição da resistência.

Margalha et al. (2007), afirma que nem todos os finos são argilosos e que os de origem siliciosa e calcária dão resultados mais favoráveis.

De acordo com Margalha et al. (2007), uma boa selecção de agregados para as argamassas é sinónimo do conhecimento de características como a granulometria, teor de vazios e a natureza dos finos.

Os agregados são geralmente o componente maioritário das argamassas. Assim, qualquer variação na sua qualidade tem um efeito elevado nas propriedades finais do material. A reactividade química, o coeficiente de expansão térmica, a forma e a dimensão das partículas e a durabilidade são características dos agregados determinantes no comportamento das argamassas.

Em termos de utilização, vários estudos, como o realizado por Moropolou e al. (2000) demonstram que os agregados utilizados nas argamassas de construção civil apresentam uma taxa elevada de partículas entre 0,150 e 1,250 mm.

Sousa Coutinho (1988) considera que para se obter uma boa argamassa, é indispensável que todos os grãos do agregado estejam envolvidos pela pasta de cimento, proporcionando uma boa interface entre cimento e agregados. Em seguida descrevem-se algumas das condições indispensáveis:

- Os grãos devem ser hidrófilos;
- A pasta de cimento deve aderir aos grãos de areia;
- Os grãos devem ser molhados com água e estar em contacto com a pasta de cimento, permitindo relações de aderência entre as partículas de cimento e os grãos de agregado.

2.5 ÁGUA

Segundo com Sousa Coutinho (1988), toda a água potável, inodora pode ser utilizada na amassadura do betão. Esta afirmação pode ser transposta para a água utilizada na composição das argamassas.

Em complemento, Paulo (2006) afirma que se devem utilizar águas potáveis que não alterem as propriedades das argamassas.

2.5.1 Contexto histórico

Mateus (2002) refere que os primeiros tratados de construção indicam as regras tradicionais destinadas à escolha de uma boa água de amassadura, tais como as indicadas

por Giovanni Branca, no "Manuale di Architettura", editado no ano de 1629, citando o mesmo: " A água conhece-se pelo seu odor, sabor e cor. (...) Por onde corre a água não deixa tártaro, lodo ou cor verde, que não suja as mãos, que não deixa depósito quando armazenada (...) como a do Tibre de Roma."

Estas regras muito simplistas foram traduzidas para uma linguagem mais científica a partir do século XVIII em que se estabeleceram vários procedimentos como o estudo da influência dos sais na água da amassadura.

Mateus (2002) refere ainda que Higgins foi um dos primeiros a referir os efeitos negativos da utilização de águas de amassadura possuidoras de altas concentrações de gesso, de cloretos e de sulfatos. Desta forma, propôs a análise do resíduo seco após a ebulição da água.

No século XIX, desenvolveu-se o aperfeiçoamento das análises químicas da água, dada a preocupação da utilização de águas isentas de sais expansivos.

2.5.2 Influência das substâncias dissolvidas das argamassas

A água de amassadura influencia as propriedades do betão, através de substâncias dissolvidas e em suspensão.

As substâncias que usualmente se encontram em suspensão na água são das fracções silte e argila. Em pequenas quantidades, a sua influência é desprezável. O silte, devido às suas maiores dimensões, sedimenta na água em repouso. A argila, em partículas com dimensões coloidais, poderá obturar os poros capilares de cimento.

Conforme a sua acção, as substâncias em solução podem ser classificadas em três categorias:

- lões que alteram as reacções de hidratação do cimento;
- lões que podem introduzir expansões a longo prazo (exemplo: sulfatos e álcalis);
- lões capazes de promover a corrosão das armaduras (cloretos, no caso de betão armado e argamassas com armaduras).

2.5.3 Determinação quantitativa da água de amassadura de uma argamassa

A quantidade de água que deve ser empregue numa argamassa é a necessária para hidratar o cimento e para lhe conferir trabalhabilidade à argamassa. Por outro lado, quanto maior a quantidade de água utilizada, menor a resistência à compressão.

No cálculo da água, é normal recorrer-se à chamada fórmula rigorosa de Bolomey, válida para argamassas e betões. A expressão é constituída por três parcelas. A primeira, refere-se à água necessária para hidratar o cimento. A segunda, determina a água necessária para molhar os agregados com dimensões superiores a 0,2 mm. A terceira parcela calcula a água necessária para molhar as partículas inferiores a 0,2 mm.

As equações (2.9) e (2.10) traduzem a fórmula de Bolomey expressa, respectivamente, para argamassas com areias naturais e para argamassas com areias britadas.

$$Ag = 0,23 \times C + N + M \times \sum \frac{P_i}{\sqrt[3]{(d_i \times d_{i+1})}} + 0,23 \times M \times p \quad [2.9]$$

$$Ag = 0,23 \times C + N + M \times \sum \frac{P_i}{\sqrt[3]{(d_i \times d_{i+1})}} + 0,35 \times M \times p \quad [2.10]$$

Ag – água - l/m³ de argamassa;

C – dosagem de cimento - kg/m³ de argamassa;

N – constante que depende da forma do material agregado (rolado ou britado) e da consistência da argamassa, encontrando-se tabelada;

M – dosagem do agregado - kg/m³ de argamassa;

p_i - % de agregado com dimensão superior a 0,2 mm e compreendida entre d_i e d_{i+1};

p - % de partículas inferiores a 0,2 mm.

Quando a composição granulométrica da areia é expressa em termos de percentagem das fracções fina (partículas inferiores a 0,5 mm), média (partículas com dimensão compreendida entre 0,5 mm e 2 mm) e grossa (partículas com dimensão compreendida entre 2 mm e 4 mm), as fórmulas anteriores transformam-se nas equações 2.11 e 2.12.

$$Ag = 0,23 \times C + N + M \times \left(\frac{P_m}{\sqrt[3]{0,5 \times 2}} + \frac{P_g}{\sqrt[3]{2 \times 4}} \right) + 0,23 \times M \times p_f \quad [2.11]$$

$$Ag = 0,23 \times C + N + M \times \left(\frac{P_m}{\sqrt[3]{0,5 \times 2}} + \frac{P_g}{\sqrt[3]{2 \times 4}} \right) + 0,35 \times M \times p_f \quad [2.12]$$

Em que:

p_g - % de partículas da fracção grossa da areia;

p_m - % de partículas da fracção média da areia;

p_f - % de partículas da fracção fina da areia.

A norma EN 1015-2 (1998) estabelece que a quantidade de água de amassadura é determinada através da relação entre a massa volúmica e o índice de consistência determinado pelo método da mesa de espalhamento.

Apresenta-se o Quadro 2.24 mostra os valores de espalhamento em função da massa volúmica da argamassa.

Quadro 2.24: Valor de espalhamento em função do valor da massa volúmica da argamassa (EN 1015-2 , 1998)

Massa volúmica da argamassa em estado fresco (kg/m³)	Valor de espalhamento (mm)
$\gamma > 1200$	175 ± 10
$600 < \gamma \leq 1200$	160 ± 10
$300 < \gamma \leq 600$	140 ± 10
$300 \leq \gamma$	120 ± 10

2.5.4 Determinação do teor de cloretos solúveis

O teor de cloretos de uma argamassa é determinado de acordo com a EN 1015-17 (2000).

O princípio da execução do ensaio passa em primeiro lugar, pela recolha de uma amostra da água que será utilizada na amassadura. A identificação dos cloretos dissolvidos é efectuada pela sua precipitação numa solução de nitrato de prata.

3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

3.1 REQUISITOS MECÂNICOS

De acordo com Veiga et al. (2002), a resistência à fendilhação de uma argamassa é função, na maioria dos casos, das tensões induzidas no seio da argamassa pelo efeito da restrição da retracção e pela capacidade de a argamassa resistir a essas tensões.

Segundo Rodrigues (2004), a tendência à fendilhação será menor com a redução da retracção e do quociente entre o módulo de elasticidade e a resistência à tracção. Por outro lado, um quociente elevado entre as resistências à tracção e à compressão traduzem um comportamento mais dúctil da argamassa, permitindo melhorar o seu comportamento às tensões existentes sobre a mesma.

Esta introdução permite a contextualização da importância do estudo das características mecânicas das argamassas e entender o comportamento do elemento "alvenaria-argamassa", atingindo a justificação do surgimento de algumas patologias, tais como a fendilhação.

Em primeiro lugar, torna-se importante introduzir e caracterizar o conceito de rotura, de forma, a possibilitar a descodificação total dos fenómenos mecânicos nas argamassas.

3.1.1 Definição de rotura

Sousa Coutinho (1988) considera que a rotura de um material pode ser interpretada sob três aspectos principais:

- Separação de um sólido contínuo em dois ou mais pedaços distintos;
- Carga máxima suportada por uma peça solicitada de maneira geometricamente fixa;
- Estado de deformação ou fissuração de tal modo excessivo que o material não é já utilizável.

Sob ponto de vista físico, existe uma maior diversidade de conceitos, pois depende do comportamento do material sob tensão e da natureza do mecanismo que conduz ao resultado final.

As roturas dúctil e frágil referem-se ao comportamento, sob o ponto de vista de deformação, do material sob tensão.

As roturas fibrosa e granular verificam-se conforme a aparência da superfície de rotura do material após a separação. As roturas por corte e clivagem fazem-se de acordo com a natureza cristológica. As roturas por fadiga e fluência são devidas a diferentes velocidades de deformação.

Como a rotura é um estado limite que depende da maneira como se atinge, o seu valor é sempre condicional.

No caso de determinação das resistências mecânicas de um provete de uma argamassa, existe um conjunto de circunstâncias, tais como, a forma de provete, idade, tipo de conservação dos materiais, dimensão do provete, velocidade de aplicação das cargas e das deformações, que tornam quase impossível conhecer o seu valor exacto.

No caso dos betões e argamassas, as tensões de rotura que normalmente se determinam são as de compressão e de flexão.

3.1.2 Resistências à flexão e à compressão

De acordo com NP EN 196-1 (2006), determinam-se as resistências à compressão e, facultativamente, à flexão de provetes de forma prismática, com dimensões 40 mm*40 mm*160 mm.

A argamassa é preparada por amassadura mecânica e compactada num molde utilizando um compactador normalizado.

O molde contendo os provetes é conservado em atmosfera húmida durante 24 horas, após as quais, os provetes são desmoldados, imediatamente, colocados dentro de água até ao momento dos ensaios de resistência.

Após a desmoldagem, 24 h após a sua confecção, os provetes são mantidos imersos em água, até à realização dos ensaios mecânicos.

Os procedimentos anteriores referem-se a provetes, com ligantes hidráulicos.

De acordo com NP EN 196-1 (2006), a resistência à flexão é determinada através do método de carga concentrada a meio vão, utilizando uma máquina de ensaio que permita a aplicação de cargas até 10 kN, com uma precisão de $\pm 1.0\%$ da carga registada nos 4/5 superiores da escala de medida e com um aumento de carga uniformemente crescente de 50 ± 10 N/s.

A resistência à flexão "Rf", em N/mm², é calculada através da seguinte fórmula:

$$R_f = (1.5 \times F_f \times l) / b^3 \quad [3.1]$$

em que:

Rf – resistência à flexão, em N/mm²;

b – lado da secção quadrada do prisma, em mm;

Ff – carga aplicada ao centro do prisma na rotura, em N;

l – é a distância entre apoios, em mm.

Os meios prismas obtidos no ensaio à flexão são depois ensaiados à compressão, sobre as faces laterais da moldagem numa secção de 40 mm × 40 mm.

Ainda segundo a NP EN 196-1 (2006), o ensaio da resistência à compressão consiste no ensaio dos meios-prismas, referidos anteriormente, à compressão sobre as faces laterais de moldagem, com a ajuda de equipamento específico.

A máquina de ensaio para determinação da resistência à compressão deve ter uma capacidade conveniente para o ensaio. Deve ter nos 4/5 superiores da escala de medida utilizada uma precisão de $\pm 1.0\%$ da carga registada e aplicando-se cargas uniformemente crescentes de 2400 ± 200 N/s. O dispositivo indicador deverá regressar ao valor zero, logo em seguida ao registo da rotura do provete.

A resistência à compressão "Rc", em N/mm², é calculada através da seguinte expressão:

$$R_c = F_c / 1600 \quad [3.2]$$

em que:

Rc – resistência à compressão, em N/mm²;

Fc – é a carga máxima em N;

1600 – 40 mm × 40 mm é a área dos pratos ou das placas auxiliares em mm².

Sousa Coutinho (1988) refere que os materiais cimentícios estão sujeitos a uma série de combinação de esforços de compressão, corte, tracção, em uma ou mais direcções. Em termos de ensaios laboratoriais, o de compressão uniaxial continua a ser o ensaio de mais fácil execução. A resistência à compressão aos 28 dias, mantêm-se como o valor de referência.

As diferenças entre os valores potenciais e reais desta propriedade encontram-se razoavelmente, estabelecidas.

A tensão de rotura de um provete de ensaio, provocada pelo estado de tensão simples de compressão, depende de diversos factores como, por exemplo, a razão água/ligante, humidade, resistência dos agregados, tipo de ligante, adições, condições de cura, conservação e idade, dimensão e forma do provete e equipamento de ensaio utilizado.

Como foi já referido, a forma do provete e equipamento condicionam o tipo de rotura e a formação das superfícies de rotura. Quanto maior a dimensão do provete, menor a resistência à compressão obtida, pela maior probabilidade de esse volume conter defeitos, ou seja elementos com baixa resistência.

No ensaio de compressão, a rotura mais vulgar resulta do impedimento à deformação transversal da secção de aplicação das forças de compressão, devido ao atrito entre a placa, através da qual se aplica a compressão e o topo do provete. As formas de rotura são normalmente cones ou pirâmides invertidas com bases nos topos do provete.

3.2 Requisitos geométricos

No grupo de normas EN 1015, descrevem-se vários métodos de caracterização das argamassas de assentamento de alvenaria. A norma EN 1015-1 (1998) indica procedimentos do ensaio de caracterização da distribuição dos tamanhos das partículas.

Segundo a mesma, a caracterização da distribuição, dos tamanhos das partículas, constituintes de uma argamassa de mistura seca ou de uma argamassa fresca, é efectuada através da crivagem do material constituinte da mesma. O ensaio é efectuado com um intervalo de peneiros indicados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Grupo de peneiros utilizados (EN 1015-1,1998)

Abertura dos peneiros (mm)
8,00
4,00
2,00
1,00
0,500
0,250
0,125
0,063

A norma refere dois métodos de peneiração, em função do tipo de amostra.

3.3 REQUISITOS FÍSICOS

São referidos, em seguida, de uma forma sintética, os requisitos físicos e métodos de avaliação, das argamassas frescas e endurecidas.

3.3.1 Consistência da argamassas fresca – ensaio da mesa de espalhamento

De acordo com Paulo (2006), a consistência e a plasticidade são factores condicionantes da trabalhabilidade das argamassas e que permitem conferir a aderência da mesma ao respectivo suporte. A consistência e a plasticidade podem alterar-se em função do teor de água numa argamassa que, por sua vez, é igualmente um factor determinante na resistência mecânica. O teor excessivo de água, compromete o desempenho da argamassa.

Segundo a EN 1015-3 (1999), um determinado nível de consistência de uma argamassa fresca pode ser avaliado através da fluidez da argamassa fresca numa mesa de espalhamento. O objectivo do ensaio é a medição do diâmetro da amostra da argamassa fresca colocada numa plataforma e depois submetida a 15 pancadas espaçadas cada uma de 1 segundo.

A Figura 3.1 apresenta o equipamento utilizado neste ensaio.



Figura 3.1 – Molde da argamassa e mesa de espalhamento

O teste é efectuado em duas amostras. Cada amostra tem um volume mínimo de 1.5 l. No caso da determinação da consistência de argamassas secas, estas são misturadas com água, de acordo com a EN 1015-2 (1998).

O diâmetro da argamassa “espalhada” é o valor médio de duas medições em cada amostra considerada. O desvio de cada valor deverá ser inferior a 10 % do valor médio.

3.3.2 Consistência da argamassas fresca – ensaio da punção de penetração

O ensaio da punção de penetração em argamassas frescas é regulamentado pela EN 1015-4 (1998). O princípio da consistência de uma argamassa é avaliado pela queda de um objecto de 90 g sobre a argamassa a uma altura de 250 mm da mesma.

A profundidade de penetração é medida por uma escala existente no objecto de queda. A Figura 3.2 mostra o dispositivo utilizado no ensaio.



Figura 3.2 - Dispositivo utilizado para o ensaio de punção de penetração

3.3.3 Retenção de água

De acordo com Rodrigues (2004), a retenção de água por parte de uma argamassa é uma característica fundamental. A sua influência é relevante no desempenho efectivo dos constituintes que compõem uma argamassa e as respectivas condições de aplicação.

Na aplicação de uma argamassa, a água que a constitui, tem tendência a evaporar ou a ser absorvida pelo suporte. Caso possua um ligante hidráulico, como o cimento, a sua aplicação em suportes porosos pode conduzir a uma hidratação deficiente do ligante, devido à falta de retenção da água pela argamassa.

Uma fraca hidratação, implica que o ligante hidráulico não atinja as características a que estava proposto, nomeadamente, em termos de resistência, uma vez que parte do cimento pode não ser hidratada.

Consequentemente, Rodrigues (2004) refere um ensaio para a determinação de retenção de água, de acordo com a ficha de ensaio Fe 32 (1999), do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Nova de Lisboa.

O procedimento passa inicialmente pela determinação da massa de um molde metálico. Em seguida, preenche-se o mesmo com a argamassa. Usando-se uma espátula,

rasa-se a superfície e determina-se a massa do conjunto. Estas medições são efectuadas com uma balança com uma precisão de 0.001 g.

A superfície da argamassa é coberta com duas gases de algodão e oito folhas de papel de filtro (cujas massas foram previamente determinadas). Sobre este conjunto, é colocada uma placa de vidro e inverte-se sobre uma superfície plana, colocando por cima um peso de 2 kg, controlando o tempo decorrido com um cronómetro.

Ao fim de 5 minutos, retira-se o peso, coloca-se o conjunto na sua posição inicial, retira-se o vidro e determina-se a massa dos oito papéis de filtro.

A percentagem da água retida (A_{gr}) é dada pela expressão:

$$A_{gr} = ((m_a - (m_h - m_f)) / m_a) \times 100 \quad [3.3]$$

m_a – massa de água (g)

m_h – massa do conjunto das oitos folhas de papel húmidas (g)

m_f – massa do conjunto das oito folhas de papel secas (g)

3.3.4 Baridade da argamassa fresca

A baridade de uma argamassa fresca é o quociente entre a sua massa e o volume que ocupa.

A determinação deste parâmetro, é efectuada de acordo com a EN 1015-6 (1998). Inicialmente prepara-se a amostra, que com um volume mínimo de 3 l ou 1,5 vezes do volume necessário para a execução deste ensaio.

Existem três métodos de enchimento e compactação da argamassa, através de um contentor calibrado, com um volume aproximado de 1 l.

O método utilizado depende da consistência da argamassa, sendo função do resultado do ensaio da mesa de espalhamento.

Se o diâmetro for menor que 140 mm (argamassa dura), efectua-se o método de vibração. O contentor calibrado é preenchido com a argamassa e é colocado sobre uma mesa de vibração. Inicia-se uma movimentação, ao longo de um determinado tempo.

Durante este processo, caso necessário, coloca-se mais material. Em seguida, o conjunto é pesado por uma balança com uma precisão de 1 g.

Se o diâmetro estiver entre 140 mm e 200 mm (argamassa plástica), executa-se o método do choque. O contentor calibrado é preenchido aproximadamente até metade do seu volume com argamassa. Em seguida, é inclinado em várias direcções, na ordem de 30 mm, permitindo a queda por dez vezes numa base sólida. Quando a argamassa contém uma mistura de entrada de ar, o número de choques é reduzido para cinco. Em seguida, o contentor é totalmente preenchido e realiza-se, novamente, a compactação. No final, o contentor é pesado com uma balança de precisão de 1 g.

Se o diâmetro for superior a 200 mm (argamassa mole), o contentor é preenchido totalmente com a argamassa. O excesso de argamassa é retirado com um pano húmido e o contentor é pesado com uma balança de precisão de 1 g.

3.3.5 Baridade da argamassa endurecida

A determinação da baridade de uma argamassa endurecida é efectuada de acordo com a EN 1015-10 (1999). O ensaio inicia-se pela escolha de três provetes, de forma regular, sendo curadas e testadas de acordo com EN 1015-11 (1999).

Os provetes são secos numa câmara a 70 °C, até atingirem massa constante. São então imersos em água a uma temperatura de 20 °C ± 2 °C. Passado um determinado período de tempo, os valores das massas são registados, sendo este processo repetido, até o valor de massa saturada de água em duas pesagens consecutivas não se alterar em mais do que 0.2%.

O volume dos provetes é determinado pesando os mesmos submersos na água. O valor das massas dos provetes submersos é registado.

O volume é calculado pela fórmula (3.4).

$$V = (W_a - W_0) / \gamma \quad (\text{m}^3) \quad [3.4]$$

W_a – massa do provete saturada de água em kg;

W_0 – massa do provete submersa em kg;

γ – massa volúmica da água em kg/m³.

A baridade (δ) de cada provete é calculada em função do volume, V , e da massa do provete seco (W_0), conforme a expressão 3.5.

$$\delta = W_0 / V \quad (\text{kg/m}^3) \quad [3.5]$$

Em que δ vem expressa em kg/m^3 , W_0 em kg e V em m^3 .

A média da baridade dos três provetes secos deverá ser um valor aproximado a 10 kg/m^3 .

3.3.6 Porosidade

A porosidade é a relação entre o volume de vazios e o volume total, aparente, do material.

Definem-se três tipos de porosidade:

- Porosidade absoluta, que em geral não se pode medir, sem destruir o material, porque nem todos os vazios são acessíveis. É a soma dos valores dos conceitos referidos seguidamente;
- Porosidade fechada, quando os poros não comunicam entre si;
- Porosidade aberta, quando os poros comunicam entre si, por canais capilares de diâmetro menor ou maior.

Normalmente, mede-se a porosidade aberta. Para a sua determinação, os provetes de argamassa são mergulhados em água, lentamente, até ficarem totalmente submersos nas primeiras 24 horas. No segundo dia, ficam submersos. Depois de 48 horas de ensaio, efectua-se a pesagem dos provetes. A diferença das massas dos provetes húmidos e secos, transmite-nos o valor de porosidade simples ou porosidade a 48 horas (N_{48}).

Sousa Coutinho (1988) afirma que o meio mais preciso para saturar o material, consiste em sujeitar a amostra de estudo a um vazio inferior a 20 mm de mercúrio durante um determinado tempo. Em seguida, efectua-se a penetração da água, gota a gota, de forma, a que o recipiente que contem a amostra de estudo fique completamente preenchido com água.

3.3.7 Teor de ar

Sousa Coutinho (1988) refere que os materiais cimentícios contêm vazios provenientes do ar que não foi possível expelir no estado fresco durante a vibração ou compactação, tendo sido introduzido no seu interior durante a mistura ou em resultado da evaporação de parte da água da amassadura.

Estes vazios caracterizam-se por possuírem uma forma mais ou menos irregular, podendo resultar em canais capilares ou cavidades de alguns milímetros. Ribeiro (2004) afirma que varia, no caso das argamassas entre 3 a 5% do volume total.

De acordo com a EN 1015-7 (1999), existem dois métodos, para a medição do teor de ar numa argamassa fresca.

No método de pressão, utiliza-se um recipiente com a capacidade de 1 l que será totalmente preenchido com argamassa. Em seguida, fecha-se o recipiente e introduz-se água por uma primeira válvula de modo a que todo o ar seja expulso por uma segunda válvula, sendo bombeado para uma câmara de ar, antes da estabilização. As válvulas referidas anteriormente, são fechadas e uma terceira válvula é aberta. Quando o equilíbrio é atingido, o teor de ar é medido num mostrador.

No método do álcool, inicialmente preenche-se um cilindro graduado com a capacidade de 500 ml, com 200 ml de argamassa fresca (V_{ml}). Em seguida, uma mistura de 60% de álcool etílico e 40% de água é adicionada antes de alcançar a marca de 500 ml. Coloca-se um vedante de borracha no topo do cilindro e inverte-se o mesmo, permanecendo nessa posição durante 20 minutos. Por último, a mistura repousa durante 5 minutos e regista-se o nível da superfície (V_{mf}), em ml.

O teor de ar (L_{ar}) é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$L_{ar} = (500 - V_{mf}) / V_{ml} \quad (\%) \quad [3.6]$$

Os dois métodos de determinação de teor de ar requerem a realização de dois testes individuais. Os resultados individuais deverão não diferir mais de 10% do valor médio calculado, caso contrário, o ensaio é repetido.

3.3.8 Capilaridade

A capilaridade ocorre quando um material poroso é posto em contacto com a água em fase líquida.

Quando um líquido está em contacto com um capilar de raio r , estabelece-se uma diferença de pressão P , entre a superfície livre do líquido e a superfície do mesmo líquido no capilar, traduzida pela Lei de Jurin (expressão 3.7).

$$P=2\psi / r \quad [3.7]$$

Em que:

ψ -tensão superficial do líquido;

P - pressão da ascensão capilar.

No caso de o raio do capilar ser suficientemente grande em relação à trajectória média das moléculas do fluído, a velocidade v do movimento do fluído no capilar é dada pela lei de Hagen-Poiseuille, supondo um regime estacionário, em que o movimento se faz sem aceleração:

$$v= (r^2 / 8\eta)*(P / L) \quad [3.8]$$

Em que:

r – raio de capilar;

η - viscosidade dinâmica do líquido;

P – pressão que faz mover o líquido;

L – comprimento do capilar que contém líquido.

Em caso de regime estacionário verifica-se a seguinte equação:

$$v = L / t \quad [3.9]$$

Em que t , é o tempo que correspondente à ascensão capilar.

Igualando a pressão P nas equações [3.7] e [3.8], calcula-se o valor L através da equação de Washburn (equação 3.10):

$$L = ((r \times \psi / 2\eta) \times t)^{1/2} \quad [3.10]$$

Esta expressão, permite calcular a posição do nível da água no tubo durante a embebição no instante t. Apresenta um termo constante, habitualmente designado por B, característico do fluido e da geometria do tubo e, um termo que varia em função da raiz quadrada do tempo, conforme a equação (3.11):

$$L = B t^{1/2} \quad (3.11)$$

em que B é dado pela expressão:

$$B = r^{1/2} \times (\psi / 2 \eta)^{1/2} \quad (3.12)$$

Por outro lado, o volume que penetra em qualquer instante t no capilar é igual a:

$$V = \pi r^2 \times L = A t^{1/2} \quad (3.13)$$

em que o valor de A é dado pela equação seguinte:

$$A = \pi r^{5/2} \times (\psi / 2 \eta)^{1/2} \quad (3.14)$$

As expressões (3.11) e (3.13) mostram que existe uma proporcionalidade entre a altura atingida pela franja capilar e a raiz quadrada do tempo, bem como, entre o peso da água absorvida por capilaridade e a raiz quadrada do tempo.

Existem outros parâmetros de capilaridade definidos por vários autores, tais como Peruzzi et al. (2003), que propõem dois novos conceitos relativos ao ensaio da capilaridade, o índice de capilaridade absoluto e o índice de capilaridade relativo. O primeiro expressa a capacidade de absorção de água do material da amostra com o tempo, comparando a quantidade de água absorvida durante o ensaio com o limite teórico de absorção do material, variando entre 0 e 1. O segundo refere a capacidade de absorção de água de uma amostra relativamente à água absorvida por uma amostra considerada como padrão. Este índice poderá ser menor ou maior do que 1 e indica uma diminuição ou aumento relativo à absorção de água.

Rodrigues (2004), reportando-se à ficha de ensaio Fe 06 (1999) da Faculdade de Ciência e Tecnologia, da Universidade Nova de Lisboa, para além do coeficiente de capilaridade, define outro parâmetro: o valor assintótico da curva de capilaridade que transmite a quantidade de água absorvida pelo provete.

A norma EN 1015-18 (2002) descreve o método de determinação do coeficiente de absorção de água devido à acção da capilaridade. O ensaio inicia-se pela preparação dos provetes de acordo com a EN 1015-11 (1999). O processo de cura é função do tipo de argamassa, da humidade relativa e se de cura do provete se realiza no interior ou exterior do molde.

O ensaio inicia-se pela secagem dos provetes numa estufa, até os mesmos atingirem massa constante. As amostras são previamente seladas nas suas faces de maior dimensão, com cera de parafina e em seguida quebrados em metade da sua dimensão.

Depois do processo de secagem, uma das faces dos prismas fica em contacto com uma altura de água entre 5 mm e 10 mm numa caixa que será hermeticamente fechada, de forma a minimizar o efeito de evaporação.

A primeira pesagem é efectuada passados 10 minutos, depois do provete colocado em água. A superfície molhada é limpa com um pano húmido e, em seguida, efectua-se a pesagem. Volta-se a colocar a amostra na água e o mesmo procedimento é efectuado passados 90 minutos.

O coeficiente de absorção de água A é representado pela seguinte equação:

$$A = 0,1 (M_2 - M_1) / (S \times \sqrt{t}) \quad [3.15]$$

Em que:

M_2 – valor da massa aos 90 minutos;

M_1 – valor da massa aos 10 minutos;

S – área da superfície de contacto com a água;

t – tempo do provete submerso.

No caso de argamassas de reparação, alguns parâmetros são alterados. As amostras são submersas durante 24 horas e o cálculo do coeficiente de absorção A é efectuado da seguinte forma:

$$A = 0,625 (M_2 - M_0) / S \quad [3.16]$$

M_2 – valor da massa às 24 horas;

M_0 – valor da massa do provete seco;

S – área da superfície de contacto com a água.

3.3.9 Permeabilidade

Neste subcapítulo, define-se dois tipos de permeabilidade. A primeira, relativa ao escoamento de água sob pressão e a segunda refere-se ao vapor de água, de acordo com a EN 1015-19 (1999).

O escoamento de água sob pressão em regime laminar e permanente em maciços porosos rege-se segundo a Lei de Darcy:

$$V = K \times i \quad [3.17]$$

Em que:

v - velocidade de circulação de água

i – gradiente de pressão hidráulica

K - Coeficiente de permeabilidade

A velocidade de circulação da água é função do caudal e da superfície normal à direcção do escoamento.

O gradiente da pressão hidráulica é a perda de carga por unidade de comprimento percorrido pela água.

O coeficiente de permeabilidade, K, depende dos escoamentos nos capilares, sendo dado pela Lei de Poiseuille, na qual intervêm o raio do capilar, o peso específico do fluído, a viscosidade e portanto a temperatura. Colocando de lado os três últimos parâmetros, K é em função da estrutura da argamassa, isto é das características do meio poroso.

Como “i”, não tem adimensional, as dimensões de K são as de v. O coeficiente de permeabilidade tem portanto as dimensões de uma velocidade, que por sua vez, é o quociente entre o caudal e uma determinada área.

$$v = Q / S \quad [3.18]$$

O gradiente hidráulico é o quociente entre a pressão de água aplicada à superfície da amostra em questão, expressa em altura de água h, e o caminho percorrido num determinado comprimento L.

$$Q/S = K \times (h / L) \quad [3.19]$$

De acordo com Sousa Coutinho (1988), existem vários factores que influenciam a permeabilidade, no betão. De modo análogo, o mesmo deverá ocorrer no caso das argamassas. Em seguida, serão enumerados vários factores que influenciam esta propriedade.

As dosagens de água e ligante têm uma influência elevada na permeabilidade. A água em excesso aumenta a porosidade e tende a produzir depósitos debaixo das partículas do agregado, aumentando a permeabilidade.

Para uma dada relação água / cimento, a granulometria do agregado influencia a permeabilidade. Assim, à medida que aumenta a máxima dimensão do agregado, o coeficiente de permeabilidade vai-se tornando maior, contrariamente à tensão de rotura. Em estudos efectuados em argamassas por Sousa Coutinho (1988), os mais baixos coeficientes são obtidos em areias mais grossas em que faltam elementos com dimensão inferior a 0,3 a 0,6 mm. Contudo, quando existe deficiência de cimento, o aumento do coeficiente é maior do que no caso em que empregaram areias finas. A obtenção de coeficientes baixos é também possível através de areias finas, sendo necessário empregar uma dosagem mais elevada de cimento.

As condições de cura têm, igualmente, elevada importância na permeabilidade. No caso de argamassas à base de ligantes hidráulicos, a redução da permeabilidade será possível com uma cura em ambiente húmido.

Em argamassas de assentamento, o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água é determinado de acordo com a EN 1015-19 (1999).

O procedimento dos métodos deste ensaio, envolve a produção de amostras, em forma de disco, que são expostas à pressão do vapor de água. O rácio da transferência da humidade, é determinado pela modificação da massa.

Os provetes de argamassa têm 10 a 30 mm, de espessura, sendo fabricados num molde que possui uma base em betão celular de densidade igual a $550 \text{ kg/m}^3 \pm 50 \text{ kg/m}^3$. Antes da aplicação da argamassa, colocam-se duas camadas de um tecido de algodão sobre a base em betão celular. São preparadas cinco amostras, para cada ensaio.

As amostras são curadas durante um período total de 28 dias, sendo o mesmo função do tipo de ligante utilizado.

Os provetes são cortados em função das taças de ensaio, sendo em seguida colocados nas mesmas. Em seguida, serão colocadas numa câmara de cura, a uma temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e HR, na ordem de $50\% \pm 5\%$, cerca de 10 mm acima de uma solução química.

Os provetes são pesados, em determinados intervalos de tempo. Efectua-se um gráfico, em que o valor da massa é função do tempo. Caso existam três pontos, em que seja possível traçar uma recta, a quantidade de vapor de água que passa na amostra é constante.

São efectuados dois ensaios. As amostras são preparadas da mesma forma, mas colocadas em duas câmaras de cura com diferentes soluções químicas: uma solução saturada de nitrato de potássio que permite uma humidade relativa de 93,2% e uma solução saturada de cloreto de lítio que proporciona uma humidade relativa de 12,4%, a uma temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3.10 Evaporação

Na evaporação de provetes saturados, analisa-se a difusão do vapor de água no ar, fenómeno que é preconizado pelas leis de difusão de Fick. Nos ensaios de evaporação, o fluxo é unidireccional pelo que as duas leis de Fick podem ser expressas pelas equações (3.20) e (3.21) em que q é o fluxo do vapor de água, expresso em $\text{g}\times\text{cm}^{-2}\times\text{h}^{-1}$, D é o coeficiente de difusão, expresso em $\text{cm}^2\times\text{h}^{-1}$ e dC/dx é o gradiente da concentração de vapor de água na direcção x , exprimindo-se em $\text{g}\times\text{cm}^{-3}\times\text{cm}^{-1}$.

$$q = -D \times (dC/dx) \quad [3.20]$$

A primeira lei de Fick determina o fluxo de evaporação, quando as moléculas de vapor de água estão submetidas a um gradiente de pressão parcial, não podendo, senão ser aplicada, quando a repartição das moléculas de vapor de água ou o perfil das concentrações são conhecidos em determinado instante.

Como o fluxo de evaporação q é sempre negativo, considerar-se-á, em seguida, apenas o seu valor absoluto, não se tendo em conta o seu sinal.

A segunda lei de Fick permite a determinação da repartição das moléculas de vapor de água ao longo do tempo e no espaço, durante o processo de difusão, correspondendo a uma equação de conservação da massa, exprimindo-se, no caso de um fluxo unidireccional, pela equação 3.21.

$$dC/dt = D \times (d^2Cv/dx^2) \quad [3.21]$$

C_v é a concentração do vapor de água no ar, t o tempo, x o comprimento e D o coeficiente de difusão do vapor de água no ar, calculado pela equação empírica de De Vries e Kruger (3.22):

$$D \text{ (cm}^2\text{s}^{-1}\text{)} = 0,217 \times (P_r / P_p) \times (T / T_r)^{1,88} \quad [3.22]$$

em que P_r é a pressão de referência ($1,013 \times 10^5$ Pa), P_p a pressão atmosférica (Pa), T_r a temperatura absoluta de referência (273,15 °K) e T a temperatura durante o ensaio (°K).

A segunda lei de Fick analisa, a evolução do declive do perfil da concentração em função da distância para um determinado tempo.

A descrição da cinética de evaporação da água contida numa rede porosa complexa, como a das argamassas, pode ser analisada, em primeira lugar, pelo estudo de modelos simples, de modo a quantificar determinadas grandezas responsáveis pela evaporação das argamassas. Partindo deste pressuposto, considera-se a rede porosa de uma rocha como um conjunto de tubos capilares cilíndricos, para os quais a formulação matemática dos movimentos da água e do vapor de água são relativamente simples.

Se se considerar um tubo capilar cheio de água, em que um orifício está em contacto com uma massa de ar com uma pressão parcial de vapor de água p_1 , inferior à pressão parcial da massa de ar saturada p_s , o fluxo de evaporação exprime-se pela seguinte equação:

$$q = \kappa \times (p_s - p_1) / h \quad [3.23]$$

em que o factor de evaporação κ , expresso em $\text{g} \times \text{Pa}^{-1} \times \text{cm}^{-1} \times \text{h}^{-1}$ é dado pela equação (3.24):

$$\kappa = D / RT \quad [3.24]$$

Em que R é constante dos gases perfeitos, sendo igual a $0,0820 \text{ l} \times \text{atm} \times \text{mol}^{-1} \times \text{K}^{-1}$.

Em condições isotérmicas, apenas dois parâmetros influenciam o fluxo de evaporação: a humidade relativa (p_w / p_s) e a distância h que separa o nível da água da massa de ar com a humidade relativa considerada.

Nestas condições podem existir duas situações:

- 1- o nível da água mantém-se constante a uma distância h do orifício superior do tubo, através do qual ocorre a evaporação;
- 2- o nível da água baixa no tubo durante o ensaio, variando em função do tempo, ou seja, a distância $h = f(t)$.

Na primeira situação, considera-se o nível da água fixo a uma distância h do orifício do tubo. Um regime estacionário é atingido, quando a pressão parcial do vapor de água na massa de ar exterior ao tubo é mantida constante, estabelecendo-se um gradiente linear da pressão parcial do vapor de água (p_w) entre a superfície da água e o orifício do tubo. Dado que para $x = 0$, se tem $p_w = p_1$ e, que para $x = h$ se tem $p_w = p_s$, a variação de p_w é linear do tipo:

$$p_w = (p_s - p_1) \times (x / h) + p_1 \quad [3.25]$$

Nesta primeira situação, o fluxo de evaporação q permanece constante ao longo do tempo.

$$q = \kappa \times (p_s - p_1) / h \quad [3.26]$$

Calculando-se o fluxo de evaporação para distâncias crescentes de h e para determinadas humidades relativas (p_1 / p_s), verifica-se que o valor do fluxo é mais influenciado pelo valor de h do que pela pressão parcial do vapor de água na massa de ar (p_1). Qualquer que seja a distância h considerada e, para diferentes humidades relativas, existe sempre uma razão constante entre os valores do fluxo q . Pelo contrário, para um mesmo valor de humidade relativa, observam-se fortes variações do fluxo de evaporação em função de h , principalmente na proximidade da superfície superior do tubo. O valor de q , calculado pela equação 3.26, é infinito ao nível do orifício do tubo, dado h ser igual a zero. Tal valor não é realista, uma vez que, o fluxo de evaporação é também sempre controlado por outros factores como a agitação do meio (vento), que não obedece às leis de difusão. Quando $h = 0$, a evaporação dá-se a partir de uma superfície de água livre. Para levantar esta indeterminação, considerando ainda que a pressão parcial do vapor de água em contacto com o orifício do tubo permanece constante, Jouany introduziu, no cálculo de q , um parâmetro suplementar ϵ_a que depende da agitação do ar:

$$q = \kappa \times (p_s - p_1) / (h + \epsilon_a) \quad [3.27]$$

Assim, quando $h = 0$, a equação (3.32) vem igual a:

$$q = \kappa \times (p_s - p_1) \times \alpha \quad [3.28]$$

com α igual a $1/\epsilon_a$. O parâmetro α depende da agitação do meio, sendo determinado experimentalmente por medição do fluxo de evaporação q , de uma superfície livre sujeita às mesmas condições de evaporação da água contida no tubo:

$$\alpha = q / (\kappa \times (p_s - p_1)) \quad [3.29]$$

O parâmetro ϵ_a expressa-se por um comprimento, correspondendo à altura limite acima da qual o valor de p_1 se mantém constante.

Na segunda situação, a altura h é função do tempo. O fluxo de evaporação q pode também ser exprimido como uma variação da massa m por unidade de superfície S em função do tempo:

$$q = dm/dt \times (1/S) \quad [3.30]$$

Supondo que a variação da altura h da água num tubo cilíndrico durante a evaporação corresponde a uma sequência de regimes estacionários, isto é, para cada altura, o gradiente de pressão parcial do vapor de água é constante e, supondo ainda que no instante t_0 o tubo está cheio de água e o valor de x_0 é igual a zero, o valor de h é dado pela expressão:

$$h = -\epsilon_a + (\epsilon_a^2 + 2 \times (\kappa / \rho) \times (p_s - p_1) \times (t - t_0))^{1/2} \quad [3.31]$$

em que ρ é a massa volúmica da mistura de ar e vapor de água ($\text{g} \times \text{cm}^{-3}$).

Sob o ponto de vista puramente teórico, ou seja, não atendendo ao parâmetro ϵ_a , a cinética de retracção do menisco, desde o orifício do tubo em direcção ao interior, é função da raiz quadrada do tempo, desde que não haja novo fornecimento de água ao tubo:

$$h = (2 \times (\kappa / \rho) \times (p_s - p_1))^{1/2} \times t^{1/2} \quad [3.32]$$

A equação (3.35) traduz uma lei parabólica comum aos fenómenos de difusão. Sob condições reais, existe obrigatoriamente um parâmetro ϵ_a dependente da velocidade de homogeneização do ar acima do tubo. A variação de h em função do tempo depende portanto fortemente da razão entre os valores de ϵ_a e de $2 \times (\kappa / \rho) \times (p_s - p_1) \times t$. Expressando-se ϵ_a como uma altura, a razão h/ϵ_a é que determina a evolução desta função.

Quanto mais homogeneizado for o ar acima do tubo, menor é o valor de ϵ_a e, mais próxima das condições teóricas se realiza a evaporação, variando h em função da raiz quadrada do tempo. As condições sob as quais se efectuam os ensaios de evaporação apresentam, normalmente, valores de ϵ_a suficientemente pequenos, de modo a que a cinética da evaporação obedeça a uma relação do tipo $h = \text{const}^{1/2}$. Derivando a variação de h em relação ao tempo, considerando que no instante $t = t_0$, $x_0 = 0$ e, que o ar acima

do tubo está bem homogeneizado ($h \gg \epsilon_G$), obtém-se a seguinte expressão do fluxo de evaporação:

$$q = dh/dt = (\kappa \times (p_s - p_l) / (2 \rho t))^{1/2} \quad [3.33]$$

O fluxo de evaporação é inversamente proporcional à raiz quadrada do tempo, sendo forte no início do ensaio, baixa rapidamente, tendendo para zero quando o tempo tende para infinito. Em tubos de comprimento finito l , q anula-se quando $h = l$.

A quantificação do fluxo de evaporação q permite a previsão das condições e velocidade de secagem de um tubo sob determinadas condições externas de humidade relativa, de temperatura e do parâmetro ϵ_G . De realçar, que as dimensões do tubo (diâmetro ou altura) não intervêm nas equações, uma vez que na lei de Fick, tal como é apresentada na equação (3.35), estes parâmetros são considerados como desprezáveis. No entanto, em tubos com diâmetros na ordem do centímetro ou decímetro, os resultados experimentais afastam-se significativamente dos previstos nos cálculos. A explicação para esta discrepância de resultados deve-se à crescente facilidade de penetração do vento com o aumento do diâmetro dos tubos, perturbando o gradiente de pressão parcial do vapor de água.

3.4 REQUISITOS QUÍMICOS

3.4.1 Teor de sais em argamassas

De acordo com Rodrigues (2004), entre os agentes ambientais, que mais afectam a durabilidade das argamassas, destacam-se os sais solúveis.

Os minerais de sais solúveis mais frequentes são os sulfatos, cloretos, nitratos e carbonatos simples ou duplos de sódio, potássio, cálcio e magnésio, os nitratos de amónia e os oxalatos de cálcio.

De acordo com Gonçalves (2002), os sais solúveis existentes nas construções, podem ter origens diversas. Podem ser provenientes do terreno, sendo arrastados pela água que ascende por capilaridade a partir do solo ou ter origem na poluição atmosférica, tal como o caso estudado por Begonha (2001), relativo ao Hospital de Santo António, no Porto e nos próprios materiais de construção. Estes sais, tais como, os cloretos, sulfatos, nitratos e

carbonatos são dissolvidos e transportados pela água que circula no interior, dos elementos construtivos.

Begonha (2001) refere que a origem dos sais solúveis é diversa, podendo ser endógena ou exógena relativamente às edificações. Os sais solúveis endógenos encontram-se sobretudo nas argamassas. Os sais solúveis exógenos podem advir de fontes distintas, nomeadamente:

- De materiais de restauro ou de reacções entre estes e os materiais originais das construções, em consequência do emprego de produtos de limpeza, conservação e consolidação inadequados;
- Do ar, em resultado da presença de partículas de dimensão muito reduzida, formando aerossóis, provenientes quer do mar (principalmente cloreto de sódio e sulfatos), quer da poluição antropogénica (sulfatos, nitratos e carbonatos), quer do solo de regiões desérticas fustigadas por ventos fortes (carbonatos e sulfatos);
- Da chuva, devido à dissolução ou incorporação não só de gases resultantes da poluição atmosférica, mas também de partículas existentes no ar;
- Do solo, como consequência da transformação de resíduos orgânicos, de adubos, da água freática ou de produtos industriais;
- Da actividade de seres vivos como os pombos, as gaivotas e os morcegos (os dejectos são ricos em fosfatos, nitratos e sulfatos) e da actividade de líquenes e de algas (formação de oxalatos de cálcio);
- Da actividade do Homem (poluição do ar, dos solos e das águas freáticas, decomposição de corpos em cemitérios ou localizados no interior e/ou próximo de igrejas e conventos, urina).

Rodrigues (2004) afirma, que no caso de edifícios antigos, a acção dos sais é muito importante. Trata-se de edifícios, geralmente, constituídos por paredes maciças, de elevada espessura, construídas com materiais porosos e hidrófilos, que facilitam a ascensão por capilaridade a partir do solo, contribuindo para a acumulação de sais de origens diversas.

A deterioração, devido a um processo de cristalização de sais, resulta de vários mecanismos. Uma das teorias referida pela mesma autora é a produção de tensões internas que ultrapassam a resistência à tracção do material. O processo de cristalização é activo, até que as tensões atinjam uma determinada magnitude, directamente proporcional ao

grau de saturação e inversamente proporcional à solubilidade do sal. O processo é cíclico, originando vários processos de cristalização e dissolução.

A presença dos sais solúveis pode ser estável e não nociva para uma argamassa, tanto na forma sólida, como na forma líquida. As questões problemáticas, estão associadas às passagens sucessivas do estado líquido para o estado sólido, que segundo Rodrigues (2004), implicam aumento de volume ou mudanças de forma, resultando na introdução de tensões nos poros e consequente deterioração. A mesma autora refere igualmente que as situações que condicionam a cristalização e a deposição de sais dependem da sua natureza e concentração, da microestrutura do material e das condições ambientes, tais como a temperatura e humidade relativa. A acção destrutiva dos sais manifesta-se, especialmente, quando a cristalização ocorre na forma anidra ou no seu estado de hidratação mais fraco.

Binda e Baronio (1996) afirmam que a deterioração das amostras dos materiais, como consequência da cristalização de sais, depende do tempo de secagem entre ciclos sucessivos e varia com o tipo de sais em presença e com as condições para o seu desenvolvimento.

Magalhães (2002) refere que o depósito de sais sobre uma superfície depende do grau de solubilidade de cada composto e também da maior ou menor quantidade de água existente para o dissolver. Destaca-se, igualmente, a contribuição da porosidade do material, para o desencadeamento do processo patológico, facilitando ou não o transporte de água que atravessa o elemento, implicando a aceleração ou o atraso do aparecimento da anomalia.

Segundo Larsen (1999), o controlo do desenvolvimento de sais, em situações limite, caracteriza-se pela necessidade de manutenção de valores estáveis de humidade relativa.

Begonha (2001) refere que a localização da precipitação de um sal no meio poroso depende do fornecimento da solução e da evaporação. O ritmo de evaporação depende, por sua vez, da humidade relativa do ar (HR), igual à razão entre a humidade específica do ar (HE) e a humidade específica do ar quando da saturação. A humidade específica define-se como a razão entre a massa de vapor de água e a massa total do sistema. Não depende da temperatura e pressão, mas é sensível à condensação e evaporação ou a misturas de massas de ar diferentes. A humidade relativa depende da HE e da temperatura, estando directamente relacionada com a absorção de água nos meios porosos. Designa-se por

ponto de orvalho, a temperatura para a qual o volume de ar deve ser arrefecido, a pressão e HE constantes, de modo a ocorrer condensação, dependendo unicamente da HE da massa de ar.

A humidade relativa do ar interfere na quantidade de minerais de sais solúveis que cristaliza na superfície e/ou no interior das argamassas. Arnold e Zehnder (1987, 1989) referem que soluções salinas iguais sob humidades relativas diferentes produzem quantidades diferentes de eflorescências. A solução submetida a maior humidade relativa do ar produz maior quantidade de eflorescências, sendo menor a quantidade de sal que cristaliza no interior do meio poroso. A solução submetida a menor humidade relativa produz menor quantidade de eflorescências e consequentemente maior quantidade de sal cristaliza no seio do meio poroso, provocando maior deterioração.

Um dos agentes que condiciona a humidade relativa do ar é o vento. De facto, o vento não só exerce uma acção erosiva directa sobre as estruturas, estudada por Delgado Rodrigues e Gil Saraiva (1985), em que se desenvolvem coeficientes de pressão que variam desde valores positivos próximos da unidade a valores negativos (sucções) de -1,3 nos cantos entre as faces cuja orientação faz um pequeno ângulo com a direcção do vento, como também diminui a humidade relativa do ar em contacto com a superfície das argamassas, incrementando o fluxo de evaporação das soluções e a quantidade de sais que cristaliza no interior da rede porosa, aumentando a deterioração de argamassas e pedras (Sampaio, 1990; Delgado Rodrigues, 1991).

O crescimento de cristais de sais solúveis em poros origina pressões que conduzem ao decaimento da argamassa. De acordo com os mesmos autores as pressões podem ser de três tipos: pressão de crescimento dos cristais (sobretudo a pressão linear de crescimento), pressão de hidratação e pressão por expansão térmica. A pressão linear de crescimento dos cristais é o tipo de solicitação que introduz maiores tensões e portanto maiores deteriorações. A pressão de cristalização pode ser calculada pela equação seguinte proposta por Correns:

$$P = R \times T \times \ln (C / C_s) / V_m \quad [3.38]$$

Em que a pressão de cristalização (P) é directamente proporcional à constante dos gases perfeitos (R), à temperatura absoluta (T) e ao grau de sobressaturação (C / C_s) em que C é a concentração da solução e C_s é a concentração da solução saturada, sendo inversamente proporcional ao volume molar do mineral de sal solúvel (V_m).

Para uma dada temperatura e um determinado grau de sobressaturação, os sais com menores volumes molares são os que registam maiores pressões de cristalização. No Quadro 3.2 são apresentados os pesos específicos, as massas e volumes molares de alguns dos minerais de sais solúveis presentes em monumentos.

Quadro 3.2 - Pesos específicos, massas e volumes molares de alguns minerais de sais solúveis presentes em monumentos. (Hammecker, 1993, Begonha, 2001)

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	MASSA MOLAR (g/mol)	PESO ESPECÍFICO (g/cm ³)	VOLUME MOLAR V _m (cm ³ /mol)
HALITE	NaCl	58,44	2,16	27,06
CALCITE	CaCO ₃	100,09	2,72	36,80
SODA NITER	NaNO ₃	84,99	2,29	37,11
ANIDRITE	CaSO ₄	136,14	2,94	46,31
NITER	KNO ₃	101,11	2,12	47,69
THENARDITE	Na ₂ SO ₄	142,04	2,68	53,00
GESSO	CaSO ₄ · 2H ₂ O	172,17	2,32	74,21
GLAUBERITE	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	278,18	2,78	100,06
APTITALITE	NaK ₃ (SO ₄) ₂	332,42	2,65	125,44
SINGENITE	K ₂ Ca(SO ₄) ₂ · H ₂ O	328,42	2,60	126,32
EPSOMITE	MgSO ₄ · 7H ₂ O	246,44	1,75	140,82
MIRABILITE	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	322,19	1,48	217,70
ETRINGITE	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ · 26H ₂ O	1255,12	1,78	705,12

Hammecker (1993) e Fassina et al. (1996a), atendendo unicamente à expressão (3.38) e aos valores dos volumes molares apresentados no Quadro 3.2, concluem que a halite é o sal que possui a pressão de cristalização mais forte, sendo potencialmente o sal que provoca os efeitos mais devastadores nas argamassas e rochas onde precipita. Hammecker (1993) conclui ainda que:

- os minerais anidros têm pressões de cristalização nitidamente superiores aos minerais hidratados correspondentes, facto bem evidente na thenardite e mirabilite;
- se bem que as cristalizações do niter e da calcite não sejam normalmente responsáveis por qualquer fenómeno de degradação, as pressões de cristalização desenvolvidas são elevadas e mesmo superiores às da thenardite e mirabilite que originam, no entanto, fortes degradações;
- de entre os minerais sulfatados hidratados e, portanto, de entre os que têm maior probabilidade de se formarem, o gesso é o que apresenta pressões de cristalização

mais fortes. Apesar de a sua pressão de cristalização ser nitidamente inferior à da halite, o gesso, em consequência de se formar em muito maior quantidade que a halite, é o mineral de sais solúveis que maiores prejuízos causa nos monumentos.

Além disso, Webber et al. (1996) e Camuffo (1996) referem que a solubilidade do gesso aumenta fortemente com a presença de cloretos e/ou nitratos de sódio, potássio ou magnésio. Para humidades relativas superiores a 75%, a halite dissolve-se. A solubilidade do gesso na solução aquosa de cloreto de sódio inicia-se para humidade relativa de 75%, aumentando até aos 90%. Como a solubilidade do gesso é máxima para a humidade relativa de 90%, cada aumento ou diminuição da humidade relativa conduz à precipitação de alguns cristais de gesso.

Hammecker (1993) refere que, como se pode constatar nas argamassas ou alvenarias de pedra existentes dos monumentos, não é possível explicar, exclusivamente com as pressões de cristalização, o efeito francamente destrutivo ligado à cristalização da mirabilite e thenardite.

Begonha (2001) refere que a deterioração provocada pelos sais solúveis depende das pressões exercidas no interior da rede porosa e da sua maior ou menor facilidade de dissolução e cristalização. Os minerais que introduzem maiores forças de cristalização no Hospital de Santo António no Porto são, por ordem decrescente, a halite, a soda niter, a thenardite e o gesso. A maior parte das transformações dos sais e dos seus agregados, incluindo o envelhecimento e a hidratação - desidratação, resultam, segundo Arnold e Zehnder (1985), da dissolução e recristalização parcial ou total dos cristais de sais solúveis. A dissolução ocorre se uma solução subsaturada de determinada origem é fornecida aos cristais de sais ou se a solubilidade, dependente da temperatura, aumenta por variação de temperatura. A humidade pode ser fornecida pela chuva, pelo solo e por condensação.

Se estão presentes sais higroscópicos, o que normalmente é o caso, a água condensa-se nas superfícies dos cristais para concentrações de vapor de água bem abaixo do ponto de orvalho do ar ambiente. Em salas, a água do ar e das paredes produz a dissolução - recristalização periódica ou sazonal dos sais solúveis. Nestes casos, as variações de humidade são, em grande parte, devidas ao aquecimento das salas. Os ciclos de dissolução - recristalização originam deteriorações periódicas que podem ter efeitos desastrosos nas pedras. Todavia, os ciclos de dissolução e cristalização são muito mais frequentes no caso da soda niter, halite e thenardite do que no gesso, mineral muito menos solúvel.

Para iguais variações de temperatura, de humidade relativa do ar ou do grau de humidade da pedra, o gesso, após cristalização no interior da rede porosa da pedra, só dificilmente volta a dissolver-se e recrystalizar, contrariamente ao que sucede com a soda niter, a halite e a thenardite. A presença destes três últimos minerais, mesmo que em quantidades diminutas como é usual nas amostras que exibem desagregação granular, é particularmente nefasta como referem Hammecker (1993) e Warke e Smith (1994). Os dois últimos autores verificaram, em ensaios de imersão de provetes de granito de Mourne em soluções de sulfato de sódio e de cloreto de sódio, que as deteriorações provocadas pelas soluções de cloreto de sódio eram muito superiores às provocadas pelas soluções de sulfato de sódio, cristalizando a halite em microfracturas no quartzo e feldspatos e nos planos de clivagem da biotite. Estudos de caracterização microclimática no interior de diversos monumentos com vista à determinação da frequência e importância dos ciclos de deliquescência e cristalização da halite, thenardite e nitrocalcite ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) foram realizados por Aires-Barros e Maurício (1995b, 1996) e Aires-Barros (1996).

Arnold e Zehnder (1987,1989) e Zehnder e Arnold (1988) verificaram que os cristais, que se desenvolvem em poros, mostram hábitos cristalinos muito compactos, exibindo morfologia idêntica à dos cristais que constituem as crostas formadas sobre a superfície dos substratos, concluindo que o crescimento dos cristais no interior dos poros deverá processar-se dentro do filme de solução que recobre os poros. Baseando-se em observações efectuadas a partir da cristalização da soda niter e de outros sais em produtos cerâmicos de alta porosidade (30%) e em rebocos de cal pintados com frescos, propuseram um modelo de evolução do crescimento dos cristais de sais solúveis no interior dos poros, considerando-o aplicável a todos os materiais moderadamente porosos e à maior parte dos sais solúveis. O modelo é formado pelas seguintes quatro fases:

1ª fase - os cristais de sais formam-se sobretudo em poros com tamanhos entre 1 e 10 μm . Poros mais pequenos e cavidades maiores permanecem preferencialmente vazios. Arnold e Zehnder (1987,1989) e Zehnder e Arnold (1988) supõem que este facto resulta da distribuição da solução tal como é concebida a partir do processo de secagem de um material poroso, isto é, a água evapora-se em primeiro lugar nas cavidades grandes, a partir das quais retrocede sucessivamente para as mais pequenas. Assim, os cristais crescem favoravelmente nos poros maiores que contactam com os canais vazios de evaporação, sendo fornecidos pela solução existente nos poros vizinhos mais pequenos. Estes cristais com hábitos idiomórficos e com formas de equilíbrio correspondem aos cristais que crescem imersos num filme de solução de onde se formam as crostas granulares. Os autores assumem portanto que

os poros, nesta fase e neste lugar em particular, estão em grande parte preenchidos por uma solução saturada ou sobressaturada.

2ª fase - os cristais ultrapassam em tamanho as dimensões dos poros e prolongam-se para outros poros. Formam agregados com aspecto vidrado, recobrimo parcialmente a superfície das cavidades maiores. Dado o tamanho dos poros ter sido excedido pelos cristais, pressupõem o desenvolvimento de importantes pressões nas paredes das cavidades, resultando em tensões de tracção normais à superfície exterior do material. Como resultado, estas forças conduzem à rotura das estruturas, principalmente sob a forma de fissuras paralelas à superfície exterior ao longo de uma zona onde os poros que foram preenchidos por cristais de sais estão muito próximos e, preferencialmente, nos pontos onde a coesão do material é reduzida, isto é, descontinuidades, interfaces com leitos de pinturas, micas e fissuras pré-existentes.

3ª fase - a cristalização concentra-se em fissuras porque a evaporação é acelerada ao longo da estrutura que se vai abrindo e alargando. Desde que os cristais estejam totalmente cobertos e haja fornecimento da solução, continuam a crescer isometricamente. No entanto, à medida que a fissura se expande e que a evaporação excede o fornecimento de solução, a solução retira-se para as superfícies das fissuras. Neste momento a solução só é fornecida por um ou dois lados da fissura, pelo que os cristais crescem com hábito colunar. Esta estrutura é comparável, nas rochas, aos veios com fibras normais às superfícies. Os cristais ao crescerem a partir da base, exercem forças nas paredes das fissuras suficientemente grandes para as alargarem. Esta fase refere-se à fase 3 da sequência de cristalização na superfície do substrato, quando se formam as crostas fibrosas.

4ª fase - à medida que as fissuras se alargam e a solução se retira, as áreas de contacto dos cristais com a solução vão-se reduzindo e, como consequência, o crescimento colunar transforma-se em crescimento de cristais com forma de pêlo, enquanto o fornecimento de solução se reduz e o substrato seca. Cristais com a forma de pêlo continuam a crescer enquanto a sua extremidade de crescimento se mantiver em contacto com a solução. Os pêlos são capazes de levantar lascas, leitos de finta e crostas que tenham sido destacados previamente.

O fenómeno de hidratação - desidratação do sulfato de sódio e da desagregação granular a ele associada, foi estudado por Arnold e Zehnder (1985), Charola e Weber (1992), McMahon et al. (1992) e Dohene (1994), entre outros. Verificaram que a hidratação da thenardite é muito mais lenta que a desidratação da mirabilite para velocidades iguais de variação de humidade. A mirabilite divide-se sob a forma de agregados submicrónicos

durante a secagem. Ciclos subsequentes de hidratação - desidratação tornam a estrutura salina altamente porosa e com elevada superfície específica, sendo constituída por partículas submicrónicas, desde que a dissolução da mirabilite em água líquida seja impedida. A formação das partículas submicrónicas durante a desidratação da mirabilite, não resulta de velocidades de desidratação rápidas, já que o mesmo fenómeno foi observado independentemente da velocidade de desidratação. Este comportamento pode, segundo os autores, explicar a razão pela qual o sulfato de sódio parece ser muito mais prejudicial após vários ciclos de secagem - molhagem. A separação em pequenas partículas permite a penetração mais profunda do vapor de água e da água líquida no sulfato de sódio, aumentando substancialmente a velocidade de adsorção de água no sal após vários ciclos. A separação em pequenas partículas poderá ainda desempenhar um papel na penetração do sulfato de sódio nos microporos, dando-se o transporte por flutuação de partículas sólidas nos filmes de solução ou por precipitação directa a partir das soluções. A estrutura altamente porosa e de grande superfície específica que se desenvolve após ciclos de humidade que atravessam a linha fronteira dos campos de estabilidade da thenardite - mirabilite parece resultar numa estrutura que ocupa volumes idênticos em ambas as fases cristalinas. Um aumento de volume registado num cristal individual devido à sua hidratação é, em grande parte, acomodado pelos espaços vazios disponíveis entre os pequenos cristais. A natureza granular fina e o aspecto frágil da estrutura sugere que os ciclos de humidade da thenardite - mirabilite não deverão desempenhar um papel tão importante na desagregação granular como o resultante da cristalização rápida da mirabilite a partir de uma solução sobressaturada, ao que era pressuposto nas normas NP 1378 (1976) e ASTM C88-05 (2005).

Steiger (1996) e Steiger e Zeunert (1996) referem que os sistemas salinos com interesse (constituídos por misturas de sais solúveis) diferem muito em termos das suas características físicas e químicas dos sistemas constituídos por um único sal solúvel. O conceito de humidades de saturação de um sal individual não se aplica às misturas de sais. As humidades relativas de deliquescência dos sais num sistema salino são inferiores às obtidas de soluções com um único sal.

As anomalias relacionadas com a presença de sais identificam-se como: eflorescências - sais que cristalizam na superfície da argamassa; criptoflorescências - cristalização de sais no interior da rede porosa.

Como exemplo refira-se que em zonas costeiras é muito usual a ocorrência de eflorescências devido à presença de cloreto de sódio (halite), mineral caracterizado por elevada solubilidade e higroscopicidade. Além disso, este sal, enquanto no estado de solução, apresenta grande mobilidade, penetrando profundamente nos materiais. Torna-se bastante nocivo, quando os ciclos de humedecimento e secagem permitem a sua dissolução e recristalização sucessivas.

Existem diversos procedimentos de análise de sais, tais como a difracção de raios-X e a microscopia electrónica de varrimento. Rodrigues (2004) refere a técnica da ressonância magnética nuclear, que permite o estudo da evolução do teor de humidade e do transporte de sais em materiais porosos, tendo sido utilizado por vários autores tal como Groot et al (2003).

As normas europeias apenas prevêem a determinação de teor de cloretos em argamassas frescas. O teste referido na EN 1015-17 (1999), baseia-se na formação de um componente solúvel. Esta técnica analítica é referida, como o método Volhard, nome do químico que desenvolveu o mesmo em 1878.

O princípio desta técnica analítica baseia-se no tratamento da solução de cloretos com nitrato de prata, sendo o seu resíduo determinado com a precipitação com tiocianato de amónio (NH_4SCN). O ião de cloro reage com o nitrato de prata, formando cloreto de prata. A precipitação com tiocianato de amónio permite identificar a quantidade de nitrato de prata que reagiu.

3.4.2 Pozolanicidade

Rodrigues (2004) afirma existirem vários estudos sobre a pozzolanicidade. Refere, que a reactividade pozzolânica poderá ser determinada através da diferença entre a condutividade eléctrica de soluções saturadas em Ca(OH)_2 , com ou sem componente pozzolânico. Através da diferença entre as condutividades medidas das duas soluções, classifica o material em termos de pozzolanicidade.

Rodrigues (2004) descreve ainda um ensaio efectuado nas instalações laboratoriais da Secil, em Outão, tendo como referência a norma portuguesa NP 4220 (1993) – Pozolanas para o Betão. Foram utilizadas amostras constituídas por 75% de cimento tipo I 42.5 R e 25% de componente pozzolânico. Considera concentrações médias da solução em ião hidróxido e

em óxido de cálcio, de modo a determinar a posição de um ponto num gráfico, ponto que apresenta, nas abcissas, a concentração de ião hidróxido (mmol/l) e em ordenadas, a concentração de óxido de cálcio (mmol/l), fornecendo a concentração de saturação em óxido de cálcio da solução em função da concentração de ião hidróxido, para uma temperatura de 40 °C. O ligante ou componente revela-se pozolânico (ensaio de pozolanicidade positivo), se o ponto se situar abaixo da curva de concentração de saturação em óxido de cálcio. Desta forma, a autora apresenta um quadro com os resultados da pozolanicidade de vários componentes pozolânicos (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 – Concentração em ião hidróxido e em óxido de cálcio e resultado do ensaio de pozolanicidade –
(Rodrigues ,2004)

Material	OH⁻ (mmol/l)	CaO (mmol/l)	Pozolanicidade
Pozolana natural	82.3	3.1	Positivo a 8 dias
Cinzas volantes	60.6	7.0	Positivo a 8 dias
Barro vermelho cozido a 600 °C durante a 3,5 h	61.2	6.4	Positivo a 8 dias
Barro vermelho cozido a 700 °C durante a 30 min	43.0	5.9	Positivo a 8 dias
Barro vermelho cozido a 800 °C durante a 3,5 h	53.8	7.7	Positivo a 8 dias
Caulino cozido a 600 °C durante 3,5h	53.8	7.7	Positivo a 8 dias
Caulino cozido a 800 °C durante 3,5h	42.7	5.3	Positivo a 8 dias
Caulino cozido a 600 °C durante 30 min	52.5	7.3	Positivo a 8 dias
Caulino cozido a 800 °C durante 30 min	43.3	5.1	Positivo a 8 dias

Rodrigues (2004), afirma que as pozolanas artificiais resultantes de tratamento térmico durante mais tempo e com temperaturas mais elevadas, apresentam, de um modo geral, maior reactividade pozolânica. A pozolana natural apresenta uma reactividade pozolânica inferior.

4 CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE ARGAMASSAS

4.1 PATOLOGIA E DETERIORAÇÕES OU ANOMALIAS

A palavra “patologia” deriva do grego “phatos” (doença) e “logos” (estudo) e refere-se à parte da Medicina que estuda as doenças, seus sintomas e a natureza das modificações que elas provocam no organismo. Este conceito, de uma forma análoga, transporta-se para a construção. O termo Patologia, pode ser utilizado para o estudo sistemático das deteriorações, degradações ou anomalias dos seus sintomas e da natureza das modificações que estas provocam nos edifícios.

As argamassas desempenham um papel relevante, na durabilidade das alvenarias dos edifícios. De acordo com Magalhães (2002), o desconhecimento das principais anomalias, das suas formas de manifestação e das possíveis causas transformam-se em diagnósticos incorrectos e, portanto, à adopção de medidas inadequadas de intervenção e reparação.

A maioria dos materiais de construção constitui uma estrutura de porosidade aberta, que permite a introdução de substâncias de natureza diversa. Esta porosidade, associada à propriedade da higroscopicidade, faz com que a argamassa de revestimento ou assentamento, seja mais ou menos susceptível à acção de diversos agentes de degradação, tais como o ambiente, o clima e agentes químicos, físicos ou biológicos.

Consequentemente, é necessária a realização de estudos para o conhecimento das causas e das formas de manifestação das anomalias, que constituem dados imprescindíveis à elaboração de um correcto diagnóstico.

Henriques (2001) refere que, a cada tipo de causas, correspondem a conjuntos bem definidos de sintomas que podem ser detectados quer por simples observação visual, quer através de ensaios ou análises “in situ”.

Para Paulo (2006), as deteriorações das argamassas podem ser classificadas, de acordo com a sua origem:

- Congénitas – as originárias da fase de projecto, derivadas da não conformidade com as normas técnicas, ou de erros e omissões dos profissionais, resultando em falhas de projecto e concepção

inadequada. São responsáveis por grande parte das anomalias observadas nas construções;

- Construtivas – as relacionadas com a fase de execução da obra. Resultam da utilização de mão de obra não especializada, do uso de produtos não controlados e da ausência de conhecimentos na área da construção;
- Adquiridas – as que ocorrem durante a vida útil das argamassas, resultando da exposição ao meio em que se inserem. Podem ser naturais, decorrentes da agressividade do meio, ou da acção humana, em função de manutenção inadequada ou de realização incorrecta da mesma;
- Acidentais – as caracterizadas pela ocorrência de algum fenómeno atípico, resultado de uma solicitação anormal, como a acção da chuva com ventos de intensidade superior ao normal, abatimentos e incêndios.

Paulo (2006) refere ainda outra classificação, função das causas das deteriorações do ponto de vista do material. Segundo esta classificação, as degradações identificam-se como exógenas, quando as causas são externas aos materiais utilizados e em endógenas quando a origem provém dos materiais.

Em seguida, efectuar-se-á uma breve descrição das anomalias mais frequentes em argamassas de assentamento.

4.1.1 Humidade

Conforme Magalhães (2002), a água constitui o agente de deterioração que mais afecta os materiais constituintes de uma alvenaria. A sua presença no interior do poro da estrutura da argamassa de assentamento, pode resultar em destruição, se o material estiver submetido a ciclos de molhagem e secagem ou gelo e degelo.

De acordo com Henriques (2001), o conhecimento das formas de manifestação das anomalias devido à humidade é um dado fundamental para a elaboração de um diagnóstico correcto, que permita identificar as respectivas causas e propor as soluções de reparação adequadas. As anomalias, devido à presença da humidade, são observadas em várias formas.

Segundo o mesmo autor, o grupo da humidade subdivide-se em:

- Humidade de construção;
- Humidade de terreno;
- Humidade de precipitação;
- Humidade de condensação.

A humidade de construção define-se, basicamente, como a quantidade excessiva de água “colocada” na construção. A água da amassadura nas argamassas e/ou mesmo nas alvenarias, em conjunto com a chuva, implica um teor excessivo. Parte desta água evapora-se rapidamente, mas outra parte permanece nos materiais.

Henriques (2001) considera que a humidade de construção pode originar a ocorrência de anomalias generalizadas ou localizadas, devido à evaporação da água existente ou ao facto de o material possuir um teor de água muito elevado. No primeiro caso, a água ao evaporar-se pode provocar expansões, condensações e/ou destaque de material. De uma forma geral, as anomalias, devido a este tipo de humidades, cessam ao fim dum período mais ou menos curto, o qual é função das características e do tipo de utilização do edifício em causa e da região climática em que insere.

Magalhães (2002) afirma que este tipo de humidade, normalmente, surge no final da construção de um edifício. Destaca-se o caso da aplicação de um revestimento sobre um suporte que ainda não se encontra adequado em termos de secagem.

A ocorrência de manchas de humidade nas paredes de pavimentos térreos ou enterrados é muito vulgar. O principal motivo é a água proveniente dos solos - humidade de terreno.

Conforme Henriques (2001) e Magalhães (2002), a humidade em excesso pode surgir nas alvenarias e revestimentos, em consequência da ascensão da água por capilaridade, através da estrutura porosa do material, devido à existência de zonas em contacto com a água do solo e à inexistência de barreiras estanques.

Henriques (2001) afirma que, essencialmente em edifícios antigos, os materiais utilizados possuem uma capilaridade elevada e não existem barreiras pára-vapor. Desta forma, proporcionam-se as condições necessárias, para a ocorrência da uma migração da água, que poderá ser tanto na vertical, como na horizontal. O nível a que a água atinge

numa determinada parede, é função da espessura, época de construção e orientação das paredes.

De acordo com o mesmo autor, os sais existentes no terreno e nos próprios materiais de construção, numa fase posterior à sua dissolução na água, ascendem pela parede. Em seguida quando água atinge a superfície da parede, evapora-se e os sais cristalizam, originando as eflorescências/criptoflorescências.

Gonçalves (2002) refere que a deterioração causada pelos sais solúveis nas construções, tem inúmeras consequências negativas, tais como a degradação das condições de habitabilidade e a diminuição progressiva, da segurança estrutural das construções. A acção dos sais solúveis afecta a generalidade dos edifícios antigos, constituindo uma das principais causas da sua degradação.

Por outro lado, Henriques (2001) refere outro processo nefasto. A ascensão capilar vai tornar as paredes impermeáveis. Os sais começam a preencher os poros dos materiais e a água ascende cada vez mais a maiores cotas. A evaporação da água numa parede húmida torna-se prejudicial, no caso, em que a saída do vapor de água não seja permanente. Neste caso, existe normalmente uma erosão nas argamassas, derivada da cristalização dos sais.

De acordo com Magalhães (2002), a chuva associada à acção do vento pode dar origem à penetração de água do exterior para o interior das paredes, originando anomalias devido à humidade de precipitação.

Com efeito, o acréscimo do teor de água dos materiais implica um aumento da respectiva condutibilidade térmica, podendo proporcionar a ocorrência de condensações.

Henriques (2001) afirma que a penetração da água da chuva nas paredes é um fenómeno natural que, normalmente, não apresenta problemas, com a existência de uma correcta concepção dos elementos. No entanto, a ocorrência de anomalias devido a este tipo de fenómenos é mais frequente, devido a factores como deficiências de concepção e existência de fissuras. O humedecimento das paredes por acção da chuva pode, igualmente, originar outros problemas, indirectamente imputáveis a estas acções.

De acordo com Begonha (2001), as águas das chuvas, podem ser consideradas, após a sua evaporação, uma fonte importante de sais solúveis responsáveis pela deterioração de

monumentos graníticos. Refere que as águas da chuva recolhidas ao longo de dois anos no Hospital Santo António, no Porto, contém iões cálcio e sulfato na proporção de 1:1, formando gesso, mineral com distribuição notável nos monumentos da cidade, independentemente da proximidade ou inexistência de juntas em argamassa de cal ou de cimento.

De acordo com Henriques (2001), as anomalias devido à acção da água da chuva, manifestam-se através do aparecimento de manchas de humidade nos paramentos interiores das paredes exteriores. Normalmente, estas manchas tendem a desaparecer quando cessam os períodos de chuva, não sendo visíveis quando o tempo se apresenta seco. Nas zonas que sofreram humedecimento, é frequente a ocorrência de bolores, eflorescências e criptoflorescências (tal como o exemplo já referido, em relação ao Hospital de Santo António).

O mesmo autor, refere que a solução de paredes duplas poderá ser uma solução eficaz, para evitar este tipo de anomalia. Por outro lado, este tipo de parede poderá apresentar alguns problemas, na maioria dos casos ligados a situações, tais como: caixas de ar parcialmente obstruídas com desperdícios de argamassas, estribos de ligações entre dois panos e dispositivos de recolha de água obstruídos.

Magalhães (2002) afirma que, a humidade de condensação define-se como uma anomalia resultante de condensações que surgem devido ao vapor de água gerado no interior dos edifícios. A existência na atmosfera de uma quantidade de vapor de água próxima da máxima que o ar pode conter à temperatura existente, conduz a condensações nas zonas mais frias dos paramentos.

O ar é constituído por uma mistura de gases e vapor de água. O limite de saturação do ar significa a quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter, variando com a temperatura. Henriques (2001), refere que, por exemplo, o limite de saturação do ar a 20°C é de 17,3 g/m³, enquanto que a 5°C é apenas de 6,8g/m³. Quando a massa de ar é arrefecida de 20°C para 5°C, o excesso de 10,5 g/m³ condensa.

Henriques (2001) define dois tipos de condensações: superficiais e internas. As condensações superficiais caracterizam-se por o arrefecimento duma massa de ar provocar condensações de vapor de água, sempre que o limite de saturação correspondente a uma determinada temperatura é ultrapassado. No interior dos edifícios, o arrefecimento efectua-se de uma forma localizada, principalmente, nas zonas de pontes térmicas (as faces interiores

dos elementos exteriores encontram-se, na generalidade, a uma temperatura inferior à do ar ambiente). Essa temperatura superficial interior é calculada em regime permanente através da expressão:

$$\Theta_i = t_i - 1/h_i \times U(t_i - t_e) \quad [4.1]$$

Em que:

Θ_i - temperatura superficial interior;

t_i - temperatura interior;

t_e - temperatura exterior;

$1/h_i$ - resistência térmica superficial;

U - coeficiente de transmissão térmica do elemento.

O facto de a temperatura superficial das paredes ser menor que a temperatura interior, origina o aumento da humidade relativa da camada de ar que contacta com a superfície do paramento interior de uma parede. Este facto, provoca condensações. Estes fenómenos proporcionam o desenvolvimento de bolores. Consequentemente, para diminuir este tipo de anomalia torna-se necessário:

- Aumentar a temperatura ambiente do interior do edifício;
- Melhorar o isolamento térmico;
- Melhorar a ventilação.

Henriques (2001) caracteriza um exemplo particular deste grupo de anomalias, caso das condensações superficiais em edifícios com inércia térmica muito forte, em que se incluem construções históricas em alvenaria de pedra de grande espessura e com um desfazamento importante entre a temperatura do ar exterior e no interior. É por essa razão que, mesmo sem qualquer correcção, a temperatura interior destas edificações no Inverno é consideravelmente maior, do que a exterior e significativamente menor no Verão. Quando a temperatura exterior começa a aumentar na Primavera, é frequente a ocorrência de condensações superficiais neste tipo de edificação, independentemente da produção de vapor no seu interior. O aumento da temperatura do ar exterior não é acompanhado no interior, onde quer o ar interior quer as superfícies das paredes mantêm as temperaturas que possuíam anteriormente, aumentando cada vez mais os respectivas diferenças de temperatura, em relação ao exterior. Este aumento de temperatura exterior é igualmente acompanhado por um aumento da humidade absoluta. O ar quente e húmido é conduzido para o interior, onde vai arrefecendo progressivamente, atingindo valores mais baixos junto à superfície das paredes, que se encontram a uma temperatura mais baixa do que a do ar.

Assim, com a diminuição da temperatura e aumento da humidade relativa, podem ocorrer condensações.

De acordo com Henriques (2001), as condensações internas ocorrem no caso em que a pressão parcial do vapor de água que atravessa uma parede por difusão se iguale à pressão de saturação correspondente à temperatura nesse ponto. Existem vários factores que influenciam este tipo de condensação, designadamente:

- As características de isolamento térmico dos vários materiais que constituem as paredes e condicionam as respectivas temperaturas no interior e vão determinar os valores da pressão de saturação em cada ponto;
- As características de permeabilidade ao vapor de água dos materiais, que determinam as variações de pressão parcial ao longo da parede;
- A localização das diferentes camadas de uma parede heterogénea.

Camuffo e Bernardi (1995) referem que os ciclos de condensação-evaporação no interior dos microporos podem ser relacionados com os ciclos diários de HR. Qualquer que seja a variação de HR, um mínimo localizado de HE em frente a uma parede é um indício de absorção de água por parte da parede e de condensação de água nos microporos, enquanto que um máximo de HE é um sintoma de emissão de água a partir da parede e de evaporação nos microporos. As variações associadas de HR podem ajudar a reconhecer que processo físico está relacionado com a evaporação ou a condensação. Referem que as paredes de reboco pintadas com frescos na Capela Sistina não se comportam de uma maneira estática, como se fossem apenas um simples suporte de condensação, comportando-se como se se tratassem de um organismo vivo que interactiva com o ambiente que o envolve, captando ou emitindo calor e humidade com ciclos característicos. Estes ciclos verificam-se em qualquer meio poroso, nomeadamente em rebocos e paredes de alvenaria.

O papel da humidade nas superfícies é um domínio de importância vital para a conservação de trabalhos de arte, constituindo um problema muito complexo dependente das características físico-químicas quer do meio poroso e da atmosfera quer do trabalho de arte. A pressão de vapor, p , de um líquido no interior de um poro em equilíbrio com uma superfície côncava do mesmo líquido de raio, r_m , (raio do menisco) pode ser determinada pela equação de Kelvin que se traduz pela fórmula seguinte:

$$p = p^* \times e^{(-2 \psi V_m / r_m R T)} \quad [4.2]$$

em que p^* é a pressão normal de vapor do líquido em equilíbrio com uma superfície líquida plana do mesmo líquido (a 25 °C e pressão de 1 atm), ψ é a tensão superficial do líquido, V_m é o volume molar do líquido, R é a constante dos gases perfeitos e T é a temperatura absoluta. A afirmação de que o vapor de água atinge a saturação quando a HR é igual a 100% só é válida para o ar em equilíbrio térmico com uma superfície plana de água destilada, quando a temperatura do sistema atinge o ponto de orvalho, o qual é independente do grau de saturação do vapor de água e da temperatura do ar das zonas afastadas da superfície plana de água destilada. No caso de água pura, Camuffo (1988) considera que, na prática, o logaritmo da HR em equilíbrio com o menisco é inversamente proporcional ao raio de curvatura. No caso de processos atmosféricos, tais como a formação de pequenas gotas nas nuvens e nevoeiros, o raio das partículas é positivo (superfície da água é convexa), sendo necessários, para atingir o equilíbrio, valores de HR superiores a 100% e temperatura inferior ao ponto de orvalho. Num material poroso, o raio de curvatura é negativo (a superfície do menisco é côncava), pelo que a HR necessária para atingir o equilíbrio com a superfície curva é inferior a 100% e a temperatura superior ao ponto de orvalho. Este facto facilita a condensação. Camuffo (1988) analisou o comportamento complexo de um corpo poroso, considerando inicialmente o caso mais simples de poros abertos e depois o de poros internos.

Poros abertos encontram-se tipicamente à superfície. Em cada poro aberto, a condensação inicia-se para uma HR crítica baixa, determinada pelo raio de curvatura do poro (r_p). De acordo com a equação de Kelvin, a condensação continua quando a HR aumenta, mantendo-se o raio de curvatura do menisco (r_m) em equilíbrio com as variações da HR. Um aumento de HR corresponde a um aumento da água condensada e do r_m e vice-versa. Segundo o autor, o poro-cavidade fica completamente preenchido quando HR = 100%. Todas as fases deste processo decorrem em equilíbrio com a HR, sendo o processo reversível.

Os poros internos com pequenos orifícios de saída encontram-se no interior dos corpos, estando ligados ao exterior através de outros poros ou capilares, comportando-se de maneira diferente da dos poros abertos. Quando a condensação se inicia a HR críticas baixas, a água depositada no pequeno volume do poro reduz o r_m . Quanto menor for o r_m , menor é a HR de equilíbrio, pelo que a HR existente de facto no interior da cavidade corresponde a uma sobressaturação, acelerando-se, conseqüentemente, o processo de condensação. Assim, a HR calculada por meio de r_p na fórmula de Kelvin, isto é $HR(r_p)$, já não é um valor de equilíbrio

neutro, mas um valor crítico de equilíbrio instável que dispara a condensação até ao preenchimento completo do poro. O processo é agora irreversível.

De modo idêntico, a evaporação inicia-se com o aumento de r_m no orifício de saída do poro e prossegue até que toda a água livre se tenha evaporado, à excepção da primeira e segunda camadas moleculares em contacto com a superfície do poro que apresentam uma ligação mais forte do tipo gelo. A evaporação dispara quando a HR excede o valor crítico calculado a partir do raio de curvatura do orifício de saída do poro (r_o). Como esta humidade crítica $HR(r_o)$ é mais baixa do que todos os valores em equilíbrio com as fases intermédias, no decorrer das quais o menisco aumenta o seu raio durante a evaporação, este processo é também acelerado e irreversível.

Estes processos irreversíveis dão origem a ciclos de condensação-evaporação com histerese nítida, dado que a condensação dispara com $HR(r_p)$ e a evaporação com $HR(r_o)$. É claro que $HR(r_p)$ e $HR(r_o)$ não são unicamente dois graus de HR, mas dois intervalos, determinados pelas distribuições de r_p e r_o no material poroso. Este problema é revelado pelas chamadas isotérmicas de adsorção, nas quais a quantidade de água adsorvida é projectada contra a HR. O tipo mais comum caracteriza-se por um intervalo de histerese para HR intermédias, pelo que as zonas extremas da isotérmica de adsorção que correspondem às HR mais baixas e mais altas não são muito dependentes da HR. A zona central, caracterizada pelo intervalo de histerese e pelas maiores variações de quantidade de água adsorvida para pequenas variações de HR, deve ser cuidadosamente evitada para melhor se conservarem os materiais e os objectos de arte. É por este motivo que alguns objectos que permaneceram séculos em ambientes muito secos ou, em alguns casos, muito húmidos, se apresentam muito bem conservados.

Camuffo (1988) analisou ainda o problema da condensação interna que pode ocorrer em meios porosos complexos constituídos por poros com passagens estreitas com diferentes raios. De acordo ainda com a equação de Kelvin, a condensação ocorre primeiro nas cavidades com os raios de curvatura mais pequenos. Quando os orifícios ficam preenchidos com água, permanecem bolsas de ar retidas nos poros, que impossibilitam condensações posteriores. Após o exame dos processos microfísicos intervenientes no interior de cada poro é igualmente importante ver como um material se torna encharcado como resultado de interacções com o ambiente exterior. Condensações internas podem continuar, quando variações ou flutuações de temperatura e/ou pressão atmosférica originam o deslocamento da água no interior das aberturas estreitas dos poros. O excesso de pressão

necessário deve ser inversamente proporcional ao raio das aberturas estreitas dos poros. Quando o excesso de pressão é suficiente, "rolhas" de água condensada podem ser empurradas para os poros, ficando retidas no seu interior, ou podem ser forçadas a migrar no meio poroso. A condensação pode prosseguir através destes mecanismos, pelo que a quantidade de água adsorvida é também função da eficiência da bombagem destas variações. Flutuações alternadas de pressão associadas a ventos tempestuosos são também responsáveis pela penetração em profundidade de água de escorrência da chuva ao longo da superfície de argamassas ou de paredes de alvenaria.

De acordo ainda com Camuffo (1988), a deterioração severa das argamassas está relacionada principalmente com a presença de água, mas a quantidade necessária é geralmente maior do que a adsorvida localmente através da condensação. Todavia, uma acção indirecta é possível: a condensação na superfície exterior pode decorrer durante horas e formar gotas que eventualmente originam fios de água que descem pelas paredes. A água recolhida na base da superfície vertical é fornecida por uma área relativamente grande, podendo ser então absorvida por sucção capilar, a qual é muito mais eficaz. Segundo o autor, a sucção capilar ocorre com o deslocamento progressivo da água, o qual não é travado por bolsas de ar retidas nos poros e sistema capilar, excepto em condutas sem orifícios de saída nos quais a pressão capilar é sujeita a uma reacção originada pelo ar retido. A sucção capilar (sobretudo das águas subterrâneas ou das águas das chuvas acumuladas na base das paredes) é, portanto, muito mais eficiente que a condensação na origem de humidade nas paredes.

Magalhães (2002), afirma que a humidade devida a fenómenos de higroscopicidade se caracteriza pela capacidade ou não dos materiais possibilitarem a entrada da água líquida ou vapor de água. A anomalia identifica-se pela conjugação da existência elevada de água e da presença de sais solúveis. Desta forma criam-se fenómenos em ciclo de secagem e molhagem e consequentemente, surgem eflorescências (na superfície) e criptoflorescências (no interior do elemento), que serão analisadas no capítulo seguinte.

A humidade devido a causas fortuitas tem origem em acidentes, tais como, rotura de canalizações, manifestando-se pela presença de manchas de humidade muito pontuais e próximas da origem.

De acordo com Freitas et al. (2008), a água proveniente do solo pode provocar degradação nas paredes, caracterizando-se este sintoma como humidade ascensional.

De facto, a maioria dos materiais de construção tradicionais, como os aplicados em alvenarias em pedra, possui uma estrutura porosa que conduz a uma absorção por capilaridade elevada, traduzida por uma ascensão capilar da água.

A franja capilar atinge cotas elevadas em diversos monumentos construídos com cantarias e/ou alvenarias de granito, designadamente no Hospital de Santo António do Porto (Begonha, 2001 – 4 m), Igreja de São Pedro de Rates (Begonha, 2002a, 2002b – 6m), Igreja Matriz de Vila de Conde (Begonha, 2003a – 4m), Igreja da Lapa, no Porto (Begonha, 2005 – 3 a 5 m, Igreja de Santa Clara de Vila de Conde (Costa Leite, 2008 – 4 m) e Mosteiro de Paço de Sousa (Cardoso, 2008 – 4.70 m).

Cabaça (2002), afirma que a presença de uma ascensão capilar activa é indicada por quantidades excessivas de humidade na base das paredes, que vão diminuindo na razão inversa da sua altura.

Segundo Freitas et al. (2008), existem duas fontes de alimentação de águas: as águas freáticas e as águas superficiais. Nas águas freáticas, as anomalias apresentam-se mais estáveis, mas sempre em função do tipo da fonte de alimentação. No caso de águas superficiais, as manchas de humidade apresentam-se mais variáveis durante o ano.

Cabaça (2002), apresenta um conjunto de etapas para a resolução de problemas relacionados com a humidade ascensional. Estas etapas esquematizam-se da seguinte forma:

- Determinação das causas – diagnóstico;
- Eliminação da fonte;
- Intercepção da água;
- Criação de uma barreira contra a subida da humidade;
- Desumidificação da parede;
- Eliminação dos defeitos;
- Protecção e prevenção.

Por sua vez, divide a fase de diagnóstico em duas distintas:

- A identificação do problema que inclui a sua natureza e extensão;
- A previsão de uma possível causa do problema.

O diagnóstico identifica a causa e o efeito do problema, começando pela identificação do último.

A dimensão das manchas de humidade são função de vários factores, tais como a orientação solar, a espessura da parede, existência de sais, quantidade de água em contacto com o elemento construtivo, variação da humidade relativa, temperatura, porosidade e porometria dos materiais.

As figuras seguintes apresentam manchas de humidade devido a humidade ascensional no interior da Igreja do Mosteiro de Travanca, em Amarante.



Figura 4.1 – Manchas de humidade nas paredes, no interior e exterior (alçado Norte) da Igreja do Mosteiro de Travanca – Amarante



Figura 4.2 – Manchas de humidade no pavimento interior da Igreja do Mosteiro de Travanca – Amarante

Freitas e Gonçalves (2003) apresentam algumas técnicas de tratamento de humidades ascensionais:

- Ventilação da base de paredes;
- Execução de corte hídrico;
- Criação de um potencial oposto ao potencial capilar;
- Criação de drenos atmosféricos e tubos de arejamento;
- Ocultação das anomalias.

A ventilação da base de paredes, é possível pela colocação de canais ou caixas de ventilação anexas às paredes (Figura 4.3).

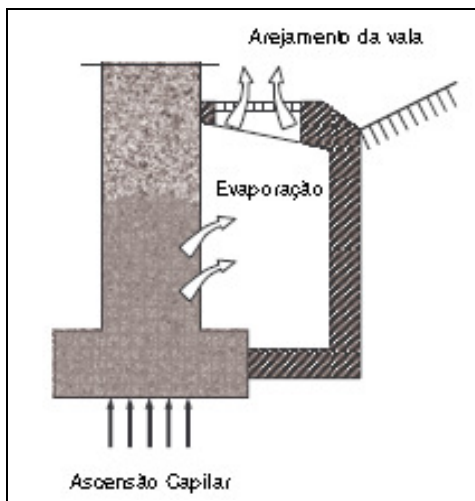


Figura 4.3 – Esquema básico da ventilação da base das paredes (Freitas e Gonçalves, 2003)

Na execução do corte hídrico, executa-se uma barreira contínua na base da parede. As barreiras podem ser de origem física, tais como materiais betuminosos, metálicos ou químicos.



Figura 4.4 – Execução de corte hídrico através de injeção de um hidrófugo (Freitas e Gonçalves, 2003)

A criação de um potencial oposto ao potencial capilar pode-se traduzir no processo de electro-osmose. Esta metodologia passa por introduzir na parede um conjunto de sondas condutoras que funcionam como ânodo ligadas a uma tomada de terra que actua como cátodo.

Os drenos atmosféricos e tubos de arejamento baseiam-se no método de Knappen, em que se supõe que um tubo de ensaio cheio de água numa tina com óleo, em que a água vai sendo substituída pelo óleo, dado ser mais pesada. No caso das paredes, são

introduzidos drenos obliquamente, ficando preenchidos com ar húmido, mais pesado que o ar seco. Desta forma, possibilita-se uma condução contínua para o exterior do ar húmido.



Figura 4.5 – Tubos de Knappen (Freitas e Gonçalves, 2003)

A ocultação das anomalias pode ser aplicada em casos em que não há a possibilidade de actuar directamente sobre as causas que originam a humidade ascensional. Basicamente, o processo consiste na colocação de camadas de materiais porosos, na parte exterior da parede, de forma a facilitar a evaporação.

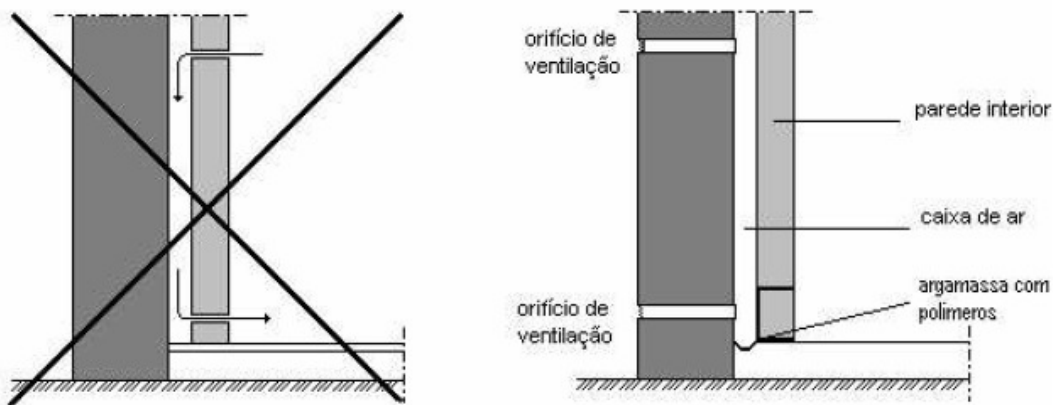


Figura 4.6 – Exemplo errado e correcto de ocultação de anomalias (Freitas e Gonçalves, 2003)

Em relação ao caso específico de paredes em alvenaria de pedra, Freitas e Gonçalves (2003), referem o caso da Igreja matriz de Caminha. Sendo um edifício histórico, constituído por paredes de grande espessura, optou-se um por um sistema de ventilação interior da base de paredes. Propuseram e executou-se um sistema constituído por caixas de

ventilação, ligadas a um canal de drenagem, que por sua vez, possui um sistema de motores de velocidade higrorregulável, possibilitando a extracção da água existente para o exterior.

De facto, este sistema apresenta-se como o melhor método de tratamento de humidades ascensionais, no caso de paredes em alvenaria de pedra, com espessuras elevadas. De entre as limitações desta técnica, incluem-se a instabilidade estrutural e o facto de ser apenas executável acima do nível freático.

Freitas et al. (2008) referem algumas desvantagens e vantagens dos restantes métodos. Analisando o conjunto de técnicas referidas anteriormente, destacam-se os factores negativos, no caso da sua aplicação na recuperação de paredes em alvenaria de pedra. O corte hídrico pode provocar problemas de instabilidade, a introdução de produtos hidrófugos não é eficaz em paredes de espessura elevada, a electro-osmose e os tubos de Knappen demonstraram ser métodos pouco eficazes e a ocultação de anomalias não trata a fonte da anomalia e não se aplica em paredes com a alvenaria à vista.

O Centro de Estudos de Patologia da Construção - Patorreb, apresenta uma ficha de patologia relacionada com a humidade ascensional, em paredes de alvenaria de granito. A ficha divide-se em quatro partes, efectuando a descrição da patologia, sondagens e medidas, causas da patologia e soluções possíveis de reparação.

4.1.2 Eflorescências

A degradação devida aos sais solúveis resulta, na maior das vezes, da secagem dos elementos construtivos. A evaporação da água provoca a cristalização dos sais, que se encontravam dissolvidos, resultando, desta forma, em eflorescências e criptoflorescências.

De acordo com Keller et al. (2005), o mecanismo típico de formação, descreve-se da seguinte forma: as eflorescências surgem quando os sais dissolvidos num poro com água, imigra para a superfície e aí precipita. Por outro lado, os poros não deverão estar completamente preenchidos com água, mas deverá existir um filme de água nas paredes dos poros de modo a permitir a ocorrência destas reacções.

Assim, os mesmos autores apresentam, o exemplo da formação de carbonato de cálcio, em sistemas cimentícios: o hidróxido de cálcio (produto da hidratação do cimento Portland), dissolve-se na água que recobre as paredes dos poros, formando Ca^{2+} e OH^- . Por outro lado, o dióxido de carbono existente na atmosfera difunde-se no interior dos poros e

dissolve-se na água existente nos poros, formando uma solução aquosa de ácido carbónico (H_2CO_3). Em seguida, o ácido carbónico reage com os iões Ca^{2+} e OH^- formando carbonato de cálcio, sal pouco solúvel.

Magalhães (2002) apresenta três factores principais, em que as suas acções simultâneas contribuem para a produção desta deterioração: a presença de humidade, a existência de sais solúveis no elemento construtivo e a pressão hidroestática necessária para provocar a migração da solução.

Por outro lado, a mesma autora descreve outras condições necessárias para o surgimento de eflorescências e/ou criptoflorescências. O depósito de sais sobre uma superfície depende do grau de solubilidade de cada composto e também da maior ou menor quantidade de água existente para a dissolução do mesmo. A variação da temperatura, a evaporação de água e a diminuição da humidade relativa do ambiente contribuem para o aumento na concentração da solução e, conseqüentemente, favorecer a cristalização dos sais.

Gonçalves (2002) afirma que, de facto, quer a hidratação, quer a cristalização dos sais provocam um aumento do volume sólido ou alterações na forma dos cristais, introduzindo tensões internas nos materiais, quando ocorrem no interior dos poros. Os ciclos repetidos de cristalização, hidratação e dissolução levam, na maioria das vezes, à degradação dos materiais. A deterioração inicia-se em geral, à superfície dos elementos construtivos e vai progredindo para o interior com o desaparecimento das camadas superficiais. As paredes são dos elementos construtivos, as mais afectadas com a acção dos sais.

De acordo com Magalhães (2002), este tipo de deterioração modifica a estética e o aspecto geral de uma parede. Mesmo assim, as eflorescências não são consideradas o verdadeiro problema, apresentando-se, unicamente, como um fenómeno superficial. Os danos consideráveis são causados pelos cristais formados nos poros e nas fissuras dos materiais – as criptoflorescências. Estas, têm um poder de destruição elevado e podem afectar a vida útil do material. A cristalização implica o crescimento de cristais, traduzindo-se num impulso sobre a camada de material que cobre a cavidade, que tende, desta forma, a desagregar-se.

De acordo com Oliveira et al. (2005), existe um conjunto de sais capazes de serem transportados para o interior dos materiais, cristalizando nesse meio e provocando perdas de

coesão por expansão. De facto, muitos sais apresentam pontos higroscópicos a humidades relativas consideravelmente abaixo dos 100%, o que significa que se podem tornar deliquescentes quando a sua humidade é excedida e recrystalizar quando a sua humidade relativa baixar aquém do ponto crítico. Num clima temperado como o existente em Portugal, em que a humidade relativa varia entre 55 e 85%, os sais destrutivos são os que apresentam higroscopicidade média, como a halite (NaCl), silvite (KCl) epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), hexahidrite ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e nitratos de sódio (NaNO_3) e de potássio (KNO_3).

Magalhães (2002), função do tipo de sal que cristaliza, tipifica as eflorescências pelos seguintes tipos de compostos: carbonatos (cálcio e magnésio), sulfatos (cálcio, magnésio, potássio e sódio), cloretos (cálcio, magnésio e potássio) nitratos (potássio, sódio e amónio).

Rodrigues (2004), apresenta o exemplo do surgimento de eflorescências em zonas costeiras, devido à presença de cloreto de sódio. Sendo um sal muito solúvel, higroscópico e de grande mobilidade, penetra, sob a forma de solução, profundamente nos materiais. É muito perigoso, quando os ciclos de humedecimento e secagem permitem a sua dissolução e recrystalização sucessivas.

A mesma autora destaca a acção dos sulfatos, caracterizando alguns destes sais. Refere-se à acção específica do sulfato de sódio, sal comum em muitos edifícios, e com uma acção bastante destrutiva. Afirma que vários autores qualificam o sulfato de sódio, como o sal mais destrutivo em termos de processo de cristalização. A sua capacidade destrutiva deve-se, na generalidade, ao facto de ser menos solúvel e móvel que os outros sais e, paralelamente, produzir uma elevada expansão quando hidratado. Precipita na forma hidratada e transformar-se depois na sua fase anidra. Uma vez sob a forma de composto anidro, mesmo que a humidade relativa não seja muito elevada, os sais não se dissolvem, mas hidratam. Desta forma, a destruição causada é sempre elevada.

De acordo com Rodrigues (2004), o sulfato de sódio pode cristalizar na forma deca-hidratada, em mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) e na forma anidra, em thenardite (Na_2SO_4), podendo, nesta segunda forma, provocar maior deterioração e a uma taxa mais elevada que um sal não hidratado, tal como o cloreto de sódio.

Contrariamente a Rodrigues (2004), Charola et al. (1992) referem que a desidratação da mirabilite ocorre muito mais rapidamente que a hidratação da thenardite. Observaram, através da microscopia, que a desidratação de grandes cristais de mirabilite, a uma

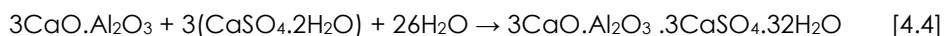
temperatura abaixo do ponto de transição e com uma humidade relativa inferior a 80%, se desenvolvia pela libertação de água de cristalização, dissolução parcial do sólido, evaporação da água e reprecipitação de uma mistura de thenardite e mirabilite que, por sua vez, continuava a desidratar.

Rodrigues (2004) refere, igualmente, a taumasite e a etringite como produtos de deterioração de materiais cimentícios expostos a ataque por sulfatos. São referidos como uma das causas de deterioração do betão, mas, recentemente, observou-se a sua presença mais acentuada na deterioração de argamassas com ligantes hidráulicos aplicadas em alvenarias e/ou em rebocos. As paredes de alvenaria de edifícios históricos podem conter gesso ou outros tipos de sulfatos. Caso estes elementos sejam reparadas e executadas com argamassas à base de ligantes hidráulicos, cuja hidratação pode conduzir à formação de CSH e CAH, estas fases podem reagir com a água e com o ião sulfato, produzindo taumasite e /ou etringite, originando degradações, como expansão, fendilhação e perdas de resistência.

Assim, Rodrigues (2004) descreve, resumidamente, o processo de formação da etringite, em que para a formação da mesma, é necessário a reacção entre sulfato de cálcio, água e aluminatos de cálcio hidratados, presentes em argamassas de cimento Portland, ou de cal hidráulica, ou ainda de cal aérea. No caso de edifícios antigos, estes sulfatos estão presentes nos solos, ou mesmo nos materiais que estão em contacto com a poluição atmosférica. O processo inicia-se pela reacção do sulfato de sódio hidratado com a portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), libertando gesso (equação 4.3).



No caso de argamassas com ligantes hidráulicos ou componentes pozolânicos, o gesso reage com aluminato tricálcico, formando etringite (equação 4.4).



É importante referir, que mesmo em construções onde não tenha sido utilizado gesso como ligante em argamassas, mas exista uma fonte de sulfatos (por poluição atmosférica), forma-se gesso pela reacção entre o sulfato e a cal aérea das argamassas antigas.

De acordo com Rodrigues (2004), a formação de etringite não é perigosa em si mesma. Na presença da cal, o composto cristaliza em forma de fibras muito curtas e pouco desenvolvidas.

Oliveira et al. (2005) descreve igualmente, o cimento Portland como um ligante de elevado potencial, em que, a sua adição a argamassas, resulta na possibilidade de obter presa ao ar ou na água, permitindo a obtenção de elevadas resistências mecânicas. A experiência mostra, porém, que a sua utilização na reabilitação de edifícios antigos, com alvenaria em pedra ou adobe, pode conduzir a resultados negativos, classificados por alguns autores como catastróficos. Segundo os autores, a aplicação de argamassas com elevadas resistências mecânicas torna-se incompatível com suportes mais fracos e, por outro lado, as argamassas de cimento constituem uma fonte disponível de iões como SO_4^{2+} , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , entre outros, capazes de originarem sais como $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (mirabilite), Na_2SO_4 (thenardite) e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (gesso).

Keller et al. (2005) apresentam as eflorescências mais comuns nos materiais de construção, incluindo as respectivas composições químicas e fontes.

Quadro 4.1 – Composição química e origem das eflorescências (Keller et al., 2005)

Composição	Origem
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Lixiviados do betão e das argamassas
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sulfatos alcalinos reactivos com a cal; SO_2 reagindo com o ar origina H_2SO_3
$\text{CaCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Introdução de um agente anti.congelamento, no betão ou argamassas
$\text{MgSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Utilização de água do mar, como componente
$\text{MgCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Utilização de água do mar, como componente
CaCO_3	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ reage com o CO_2 que existe na atmosfera
KCl; NaCl	Sais do gelo
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Substâncias orgânicas que decompostas reagem com Ca^{2+}

Em termos de morfologia, Arnold e Kueng (1985) classificam as eflorescências em três tipos:

- Eflorescências de cristais eriçados, são constituídas por cristais individuais erectos prismáticos ou aciculares e, também, por menor número de cristais isométricos. Os

cristais aciculares são direitos com espessura de alguns micra e comprimento entre menos de 1000 a mais de 10 000 μm . Os cristais colunares apresentam espessura próxima dos 10 μm e um comprimento até aos 10 00 μm , sendo constituídos quer por cristais singulares, quer por feixes de cristais paralelos. Estas eflorescências normalmente brilham quando se desenvolvem faces nos cristais. As condições de cristalização destas eflorescências, correspondem ao crescimento de cristais em forma de pêlo, desenvolvendo-se sobre materiais porosos, mesmo quando estão sobresaturados relativamente à água;

- Eflorescências de agregados "focos", são constituídos por agregados coerentes de pêlos e fibras aciculares, semelhantes a cabelos compridos, podendo ser removidos por um pequeno sopro;
- Eflorescências pulverulentas, são constituídas por grãos muito finos, essencialmente, submicrónicos, formando agregados pouco coesos. São características de sais ou de agregados de sais desidratados. Geneticamente, constituem formações secundárias, resultando da desidratação de anteriores cristais hidratados.

Numa análise efectuada por Begonha (2001), no Hospital Santo António no Porto, verificou-se a existência de eflorescências pulverulentas, mas apresentando minerais, como a halite, glauberite e soda niter, que apresentavam cristais aciculares, prismáticos ou mesmo em forma de pêlo.

4.1.3 Fendilhação

Os conceitos de fissura e fenda variam de autor para autor. Alguns consideram os dois termos como sinónimos. Outros consideram fendas como aberturas que intersectam na sua totalidade um determinado elemento construtivo e fissuras como aberturas que apenas separam uma parte da secção de um elemento construtivo. Para outros, ainda, fendas são aberturas muito espaçadas e fissuras aberturas de pequena espessura.

Magalhães (2002) entende fendilhação como qualquer abertura longitudinal que pode atravessar o elemento na sua totalidade e até romper o mesmo.

Fissuras e fendas aparecem nos materiais, quando a sua capacidade resistente é excedida, sendo fundamentalmente provocadas por assentamentos diferenciais da fundação (Figura 4.7).



Figura 4.7 – Fendas ao longo das juntas na fachada Sul do Hospital Santo António no Porto (Begonha, 2001)

Erros de projecto ou de execução, bem como modificações do tipo da utilização para que o edifício foi concebido também podem estar na origem destes danos.

As solicitações térmicas e sísmicas originam igualmente fissuras e fendas.

Esta anomalia, é normalmente, mais estudada em argamassas de revestimento. Por outro lado, podem-se igualmente observar fissuras em argamassas de assentamento devido a vários factores, tais como, a utilização de argamassas ricas em cimento em alvenaria de pedra, espessuras inadequadas de argamassa e gradientes térmicos elevados.

4.1.4 Biodeterioração

Magalhães (2002) afirma, que neste tipo de anomalia estão reunidos os organismos ou microorganismos vivos, animais ou vegetais, tais como, algas, musgos, líquenes, fungos, plantas diversas ou animais, que de alguma forma, deterioram os elementos construtivos.

Na generalidade, todos os organismos e microorganismos possuem uma acção negativa sobre os materiais de construção, sendo provenientes do solo, do ar ou da chuva. Os microorganismos depositam-se na superfície e nas fendas existentes, multiplicando-se conforme o seu metabolismo e disponibilidade de nutrientes.

Magalhães (2002) refere que determinados poluentes, na presença de humidade podem favorecer o crescimento de diversos microrganismos sobre os elementos construtivos. Desta forma, apresenta algumas causas que favorecem a ocorrência deste tipo de anomalia, tais como a presença prolongada da humidade, falta de ventilação, iluminação, acumulação de pó, terra, sujidade e poluentes e porosidade elevada do elemento.

O Departamento de Conservação e Restauro da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, tem vindo a desenvolver alguns estudos referentes ao desenvolvimento e colonização de materiais pétreos por microalgas, cianobactérias e fungos. Destaca-se um estudo comparativo da bioreceptividade de diferentes litótipos portugueses a microrganismos fotossintéticos. Afirmam que estes tipos de microrganismos, como as microalgas, cianobactérias e líquenes são particularmente lesivos nas superfícies pétreas, devido à sua capacidade de sobreviver em ambientes inóspitos. Consequentemente, desenvolveram um trabalho em laboratório, que consistia na inoculação, em laboratório, de uma alga e uma cianobactéria sobre amostras pétreas, permitindo o desenvolvimento de biofilmes sobre amostras de calcário Lioz, calcário de Ançã, granito de Portalegre e mármore branco de Vila Viçosa.

Sousa et al. (2005) descrevem vários agentes biológicos na deterioração de argamassas. Afirmam que as argamassas constituem um meio propício ao desenvolvimento de diversas comunidades de seres vivos com graus de desenvolvimento variado. Os seres vivos mais simples são responsáveis por deteriorações químicas e/ou mecânicas, como sejam as algas, as bactérias, os líquenes, os fungos, as briófitas, etc. No entanto, há ainda que ter em conta as degradações causadas por algumas plantas superiores, principalmente através do desenvolvimento das suas raízes, e animais, nomeadamente os pombos, principalmente através da acumulação dos seus dejectos. Estes, para além de serem uma importante fonte de sais e de matéria orgânica para as comunidades que povoam os revestimentos, atacam quimicamente os rebocos e provocam anomalias estéticas importantes.

Os mesmos autores afirmam que actividade biológica nas superfícies de argamassas de assentamento ou rebocos resulta na formação de biofilmes, que se traduzem em manchas coloridas, incrustações e na presença de órgãos vegetativos e reprodutivos. Neste processo, a estrutura das argamassas é sujeita a erosão, transferência de iões e lixiviação traduzindo-se no enfraquecimento e deterioração do elemento construtivo.

Desta forma, Sousa et al. (2005), caracterizam alguns microorganismos, agentes de deterioração de elementos construtivos, nomeadamente das argamassas:

- Bactérias – são organismos mais simples encontrados na maioria dos ambientes naturais e identificam-se como células esféricas ou em forma de bastonetes curtos com tamanhos variados, alcançando por vezes micrones de comprimento. Na maioria das espécies, a protecção da célula é feita por uma camada extremamente resistente, a parede celular, havendo imediatamente abaixo uma membrana citoplasmática que delimita um único compartimento contendo DNA, RNA, proteínas e pequenas moléculas. Os rebocos ou argamassas de assentamento constituem um meio propício para o seu desenvolvimento, principalmente depois de ocorrer uma certa carbonatação da cal acompanhada pela diminuição do pH. As bactérias que povoam as argamassas são responsáveis pela produção de substâncias que vão atacar quimicamente os compostos destes elementos, podendo ser divididas em dois grupos distintos. As bactérias autotróficas, que obtêm o carbono a partir do dióxido de carbono presente na atmosfera e podem obter a sua energia directamente da luz solar (fotolitotróficas) ou a partir de reacções químicas de oxidação/redução (quimilitotróficas) e as bactérias heterotróficas, que utilizam compostos orgânicos acumulados nas argamassas para obter carbono e, tal como as anteriores, poderem obter a sua energia tanto através da luz solar (fotoorganotróficas), como de reacções químicas (quimioorganotróficas).

As thiobactérias actuam sobretudo em calcários arenitos e argamassas, promovendo reacções de oxidação/redução em que transformam os sulfuretos em sulfatos. Actuam também como mineralizadores do enxofre orgânico, gerando ácido sulfúrico.

- Algas e cianobactérias – designadas por algas azuis, são organismos fotoautotróficos capazes de desenvolver na superfície das argamassas sempre que ocorra uma combinação adequada de humidade, temperatura e luz. Estes organismos crescem e reproduzem-se em filmes de água que se formam nos revestimentos pelo que a humidade é, em geral, a condição limitadora do desenvolvimento destes organismos. Logo, sempre que a humidade no substrato é suficiente, as algas e as cianobactérias incluem-se entre os colonizadores pioneiros dos revestimentos. Sousa et al. (2005) citando Feilden (1982) afirma que as cianobactérias conseguem desenvolver-se apenas com dióxido de carbono (CO_2), azoto (N_2) e pequenas quantidades de sais minerais, sendo mesmo, juntamente com algumas bactérias muito especializadas, os únicos organismos com capacidade para fixar o azoto directamente. O desenvolvimento das algas e das cianobactérias é mais intenso na Primavera e no

Outono, quando a humidade é abundante e as temperaturas amenas. Durante os meses de Inverno e Verão, as baixas temperaturas e a carência de humidade, respectivamente, matam estes organismos, criando depósitos de células mortas e corpos reprodutores que irão permitir um rápido desenvolvimento de uma nova geração, logo que as condições ambientais sejam favoráveis. Estes depósitos de matéria orgânica vão criar condições para o desenvolvimento de fungos como os *Cladosporium*, *Phoma*, *Alternaria* e *Aureobasidium spp.* e seres mais evoluídos, como briófitas ou mesmo plantas superiores. Em climas temperados e húmidos como o da Serra de Sintra, as algas e cianobactérias encontram um ambiente particularmente propício para o seu desenvolvimento, perdendo apenas vigor durante os meses mais secos de Verão. As algas e as cianobactérias têm sido investigadas pela sua capacidade de atacar quimicamente alguns dos minerais que compõem, por exemplo, os revestimentos e de originar patinas coloridas que, em algumas situações, podem ser encaradas como inestéticas e noutras como parte da imagem colectiva do próprio edifício;

- Líquenes – Constituem dois organismos distintos, tendo associações estáveis e auto-suficientes entre um fungo e um ou mais organismos fotossintéticos, que podem ser tanto uma alga unicelular como uma cianobactéria. Cada um dos organismos do líquen desempenha funções específicas. Assim, o fotobionte, graças à sua clorofila, é capaz de absorver a energia da luz solar e sintetizar compostos orgânicos (nomeadamente açúcares), enquanto que o fungo absorve do substrato a água com as substâncias nela dissolvidas e, além disso, protege a fotobionte do meio ambiente. Sousa et al. (2005), citando Figueiras (2002) classifica a forma do talo líquénico em três categorias. Em crustáceo, que apresenta uma estrutura bastante variada, desde crostas com forma pulverulenta até talos elaborados, com córtex superior e medula, em fruticuloso – que possui a forma de pequenos arbustos ou cachos, em que o talo é cilíndrico, podendo ter um espaço oco no interior e foliáceo que apresenta uma forma semelhante a uma folha, com as superfícies superior e inferior distintas e expostas ao ar.

A acção dos líquenes pode ser decomposta numa componente física, resultante da acção mecânica dos dispositivos de fixação do talo e quando este sofre variações de volume em função das condições de humidade e numa componente química, resultante da produção de compostos químicos que atacam os minerais das argamassas. Inicialmente, a degradação mecânica provocada por líquenes resulta da penetração dos dispositivos de fixação e do próprio talo em poros, fendas e

fissuras existentes. O crescimento do líquen, nomeadamente o aumento de massa do talo, irá provocar o aumento dessas mesmas fendas e fissuras. A libertação periódica do talo devida a flutuações do seu teor de humidade poderá provocar a queda de fragmentos que entretanto perderam aderência. A degradação química resulta da actividade metabólica dos líquenes que se traduz na secreção de diversos ácidos que reagem com os compostos das argamassas e da alvenaria em pedra. Pela sua importância, pode-se destacar dois desses ácidos: o oxálico e o carbónico que Sousa et al. (2005) referem, citando Kumar e Kumar (1999). Os líquenes mais frequentemente identificados em paramentos de monumentos pertencem às espécies *Protoblastenia*, *Verrucaria*, *Caloplaca*, *Aspicilia*, *Lecanora* ou *Xanthoria*. Como referido anteriormente, os líquenes são muito sensíveis a ambientes poluídos, mas algumas espécies mais resistentes (*Lecanora* e *Candelariella spp*) são capazes de se desenvolverem nesses ambientes;

- Actinomicetos e fungos – são organismos heterotróficos que para se desenvolverem necessitam de matéria orgânica. Os bolores ou fungos filamentosos podem provocar nas argamassas uma degradação mecânica e química, realçando a última como a mais significativa como acção nociva. Vários estudos efectuados têm permitido identificar diversas espécies, pertencentes principalmente aos géneros *Nocardia* e *Streptomyces*, que se desenvolvem preferencialmente em locais subterrâneos com teores em humidade constantemente elevados. Sousa et al. (2005) citando Richardson (1980) destaca que a acção destes organismos sobre as argamassas exerce-se através da sua actividade metabólica, que contribui para o desgaste da estrutura da argamassa e, principalmente, para a acumulação de matéria orgânica na superfície da mesma.

Begonha e Pereira (2007) e Begonha (2009) observaram, num estudo efectuado nas Igrejas de São Pedro de Rates e São Gonçalo de Amarante que, na parte inferior das fachadas submetidas à humidade ascensorial, existiam diversas formas de algas de diatomáceas, em cada um dos monumentos. Observaram e identificaram por microscopia electrónica de varrimento: *Navicula atomus* (Kützinger) Grunow, *Navicula cincta* Ehrenberg, *Navicula mínima* Grunow, e *Nitzschia hantzschiana* Rabenhorst em S. Pedro de Rates e *Cyclotella meneghiniana* Kützinger, *Cyclotella cf. radiosa* (Grunow) Lemmermann e *Cocconeis placentula* Ehrenberg em S. Gonçalo de Amarante.

Krammer e Lange-Bertalot (1991), referem que as sete formas são sub-aéreas, preferindo meios com pH alcalino, águas medianamente salobras, baixas em oxigénio e com

carga orgânica mediana. A forma *Cocconeis placentula* Ehrenberg ocorre em meios com as seguintes características em iões (meq/l): carbonato e bicarbonato (2,00 – 0,91-4,36); cloretos (0,30 – 0,08-1,15); sulfatos (0,34 – 0,08-1,40); cálcio (1,57 – 0,65-3,81); magnésio (0,71 – 0,26-1,91); sódio (0,47 – 0,15-1,52); potássio (0,06 – 0,03-0,12). O primeiro valor de cada ião é o óptimo, os segundo e terceiro valores correspondem ao mínimo e máximo em que a forma *Cocconeis placentula* Ehrenberg var. *euglypta* (Ehrenberg) Grunow foi encontrada.

Segundo os mesmos autores, estes dados estão em conformidade com os minerais de sais solúveis, especialmente a halite, associadas às deteriorações do granito em áreas sujeitas à ascensão capilar em S. Pedro de Rates e estão também de acordo com os minerais de sais solúveis ligados às deteriorações do granito nas áreas submetidas à ascensão capilar em S. Gonçalo de Amarante, nomeadamente gesso, halite (NaCl), nitratite (NaNO₃), calcite (CaCO₃) e brushite (CaHPO₄.2H₂O).

A vegetação existente nos monumentos trata-se, igualmente, de uma causa de uma biodeterioração dos monumentos. Sousa et al (2005) destacam que plantas mais desenvolvidas, como a família das traqueófitas, apresentam verdadeiros sistemas de raízes e aparato aéreo, apresentando-se como os agentes de degradação mais importantes na vegetação, principalmente através da pressão exercida pelo crescimento das raízes e a exsudação de ácidos, como o oxálico e cítrico. Os autores referem as principais plantas existentes em monumentos, destacando a *Parietaria diffusa*, *Capparis spinosa*, *Cymbalaria muralis* e *Sonchus tenerimus*.

Mouga (1997), estabelece uma relação entre a existência de plantas superiores nos problemas de biodeterioração, com soluções de conservação de monumentos. O principal caso de estudo foi o antigo "oppidum" de Conímbriga. Numa primeira análise, estabeleceram as características da comunidade vegetal dos muros dos monumentos e muros antigos em calcários, de Coimbra e Conímbriga, pertencentes à Aliança Parietario-Galion murale Rivas-Martínez ex Rivas-Goday 1964. Esta comunidade apresenta, em Conímbriga, duas fases evolutivas distintas em função do estado de deterioração do substrato. Uma vegetação mais primitiva surge nas ruínas dos edifícios, sendo dominada pelas terófitas e exibindo uma cobertura e desenvolvimento baixos. A vegetação mais evoluída instala-se na muralha e apresenta fundamentalmente espécies lenhosas, mostrando maior cobertura e desenvolvimento.

Mouga (1997) refere que a erradicação das plantas vasculares, mediante o controlo químico, da vegetação perene, tem sido mencionado como um instrumento adequado em

intervenções de conservação de monumentos. Contudo, não sendo realizado da forma mais adequada, põe em perigo a própria estrutura pétrea. Este problema é particularmente grave nas estruturas de calcário, uma vez que os herbicidas ácidos podem causar a dissolução do substrato. Deste modo, foi ensaiada uma nova metodologia de neutralização destes herbicidas, com hidróxido de potássio, até atingir um pH próximo da neutralidade. A autora verificou em laboratório que a neutralização reduziu a dissolução do carbonato de cálcio e, consequentemente, a interferência do herbicida com o substrato é menor. Por outro lado, a eficiência dos herbicidas não foi afectada, mantendo-se a sua capacidade para eliminar a vegetação mural.

Foram ainda desenvolvidas algumas experiências práticas, pela mesma autora, em Conímbriga e na Igreja de Santa Cruz em Coimbra de modo a determinar no local, a eficiência das metodologias seguidas, constatando-se a necessidade de intervenções periódicas de controlo da vegetação, associadas a intervenções de consolidação e restauro das estruturas pétreas, de modo a aumentar a eficiência dos tratamentos.

Sousa et al (2005) referem que a avifauna, nomeadamente os pombos, são responsáveis por degradações significativas em muitos dos monumentos portugueses localizados essencialmente em meios urbanos. Em muitos casos, as populações de pombos são consideradas pragas pois encontram um meio muito propício para a procriação devido à existência de abrigo, abundância de alimentos e ausência de predadores. A acumulação dos dejectos deste seres (guano) é um dos principais problemas estéticos em vários monumentos portugueses. Além disso, por serem fortemente ácidos, os dejectos atacam quimicamente diversos materiais, entre os quais as argamassas e as rochas, constituindo ainda uma das principais fontes de compostos de azoto (amónia) e fósforo que, por sua vez servem de substrato para o desenvolvimento de microflora heterotrófica. Consequentemente, o desenvolvimento e morte de sucessivas gerações de microorganismos litófilos, fotoautototróficos, quimiotróficos e líquenes, juntamente com a desposição de compostos de amónio e fósforo transportados pelo vento ou pela acumulação de dejectos de animais, permitem as condições favoráveis de humidade, temperatura e luz, para o desenvolvimento de organismos superiores, como as bactérias oligotróficas e hetetróficas, actinomicetos e fungos.

Begonha 2007, demonstra que a acção dos pombos, no caso da Igreja de S. Gonçalo de Amarante, é a principal causa de deterioração neste monumento. De facto, o autor constatou que a grande concentração de dejectos, restos de animais mortos e alimentos deteriorados na parte superior das cornijas do portal Sul da Igreja são responsáveis pelo

avanzado estado de deterioração do granito nas superfícies inferiores das cornijas e zonas imediatamente abaixo destas. Verifica-se aí a existência de pedras afectadas por desagregação granular de intensidade forte, eflorescências de agregados fofos, placas e plaquetas.

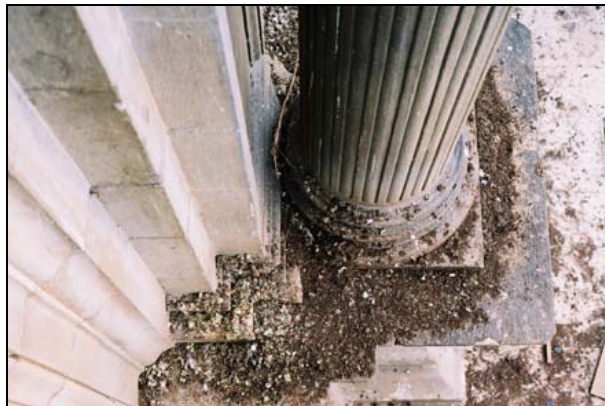


Figura 4.8 – Base de uma coluna coríntia da Igreja de S.Gonçalo de Amarante (Begonha, 2007)

Begonha (2007) estabelece uma relação entre as deteriorações referidas anteriormente e os minerais de sais solúveis identificados através da microscopia electrónica por varrimento e difracção de raios X. A desagregação granular relaciona-se com a presença de gesso, singenite ($K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$), calcite, brushite, niter e nitratite, as plaquetas com gesso, calcite e calcite, placas com brushite, gesso e calcite e as eflorescências de agregados fofos com niter, gesso e calcite.

4.1.5 Erosão

De acordo com Magalhães (2002), a erosão implica a perda, ou unicamente, a alteração da superfície do material. Estes fenómenos resultam da acção erosiva de agentes mecânicos, físicos, químicos e biológicos.

As causas mais prováveis para este tipo de deterioração são:

- Humidade – a água, quando infiltrada no interior dos poros da argamassa, pode provocar a dissolução de algumas das suas partículas, em função da composição do elemento, originando posteriormente a sua erosão;
- Esforços mecânicos – a erosão mecânica dá-se pelo atrito ou através de golpes de pessoas, animais ou máquinas;
- Acções físicas dos agentes atmosféricos – acção isolada ou em conjunto de agentes, tais como a chuva, vento e variações de temperatura;
- Perda da coesão dos materiais.

4.1.6 Síntese de anomalias

O Quadro 4.2 representa uma síntese das anomalias predominantes em argamassas de assentamento referidas em Magalhães (2002).

Quadro 4.2 – Síntese de anomalias em argamassas de assentamento

	TIPO	CAUSAS MAIS PROVÁVEIS
Humidade	- De obra ou construção - De terreno - De precipitação - De condensação - Devida a fenómenos de higroscopicidade - Devido a causas fortuitas	- Aplicação da argamassa antes da secagem adequada do suporte; - Existência de zonas de paredes em contacto com a água do solo; existência ou deficiente posicionamento de barreiras estanques nas paredes; - Chuva - Condensação do vapor de água que está em contacto com a argamassa - Existência de sais higroscópicos no interior das argamassas que fixam água em grandes quantidades, - Roturas de canalizações.
Fendilhação e fissuração		Causas devido à constituição da argamassa: - Retracção; - Dilatações e contracções higrotérmicas; - Gelo; - Deficiente dosagem na execução; - Espessura inequada do revestimento; Causas atribuíveis ao suporte - Deslocamentos da alvenaria; - Reacções com sais existentes no suporte; - Absorção excessiva do suporte.
Eflorescências e Criptoflorescências		- Presença prolongada de humidades; - Sais solúveis presentes na argamassa de assentamento e/ou na alvenaria; - Cal não carbonatada.
Biodeterioração	Algas, musgos, líquenes, fungos, animais	- Presença prolongada de humidade; - Falta de ventilação; - Iluminação; - Acumulação de pó, terra e sujidade nas juntas; - Porosidade elevada da argamassa.

4.2 INFLUÊNCIA DAS ARGAMASSAS EM CANTARIAS E ALVENARIAS DE PEDRA

Algumas das deteriorações existentes na alvenaria de pedra são transmitidas pelas argamassas de assentamento e juntas, em que se destacam, as que possuem na sua constituição cimento Portland.

De acordo com Begonha (2001), as argamassas estão sujeitas ao ataque de determinados compostos, reagindo quimicamente a partir da superfície. O cimento Portland é o elemento mais vulnerável, podendo perder as suas propriedades ligantes,

Vários autores, tais como, Sousa Coutinho (1974), Sampaio (1990), Knöfel (1991) e Lito et al. (2005) consideram os seguintes dois processos principais de deterioração: o ataque de dissolução ou descalcificação por intermédio de água, ácidos, ião amónio, ião cloreto, ião magnésio e iões menos alcalinos que o cálcio; o ataque pelos sulfatos com formação de sais expansivos.

As acções prejudiciais das argamassas de cimento nas alvenarias e cantarias de pedra resultam das características diferentes entre o meio poroso das argamassas de cimento e o meio poroso das pedras e, ainda, das distintas características de resistência mecânica das argamassas de cimento e das pedras.

As características do meio poroso das argamassas de cimento têm como consequência fluxos de evaporação menores e tempos de evaporação maiores na argamassa do que nas pedras. Assim, durante a evaporação, as pedras secam mais rapidamente que as argamassas, pelo que, a determinado instante, verifica-se um fluxo de água da argamassa de cimento das juntas para as pedras adjacentes.

Há conseqüentemente uma transferência por capilaridade de determinados iões da argamassa para a pedra, com formação de eflorescências na superfície da argamassa e/ou na superfície da zona da pedra em contacto com a argamassa e/ou a formação de desagregação granular diferencial intensa, placas ou plaquetas na zona limítrofe da pedra em contacto com a argamassa devido à cristalização de sais solúveis no interior da rede porosa da pedra.

As Figuras 4.9 e 4.10 exemplificam, respectivamente, no alçado Norte do edifício das Termas de Caldelas, no concelho de Amares e na fachada Este do Hospital Santo António no

Porto, a formação de eflorescências nas zonas da pedra em contacto com juntas de argamassa de cimento.



Figura 4.9 – Eflorescências na parede de alvenaria (alçado Norte) – Termas de Caldelas



Figura 4.10- Desagregação granular associada a eflorescências na Fachada Este do Hospital de Santo António

A perda de maior quantidade de material pétreo, perto das juntas com argamassa de cimento, identifica-se como desagregação granular diferencial, conduzindo ao recuo das zonas limites da pedra e saliência das juntas, tal como se observa na Figura 4.11



Figura 4.11 – Desagregação granular diferencial devido à aplicação de argamassas de cimento
Hospital Santo António – Fachada Sul

A Figura 4.12 mostra placas, associadas à presença de argamassas de cimento. Na Figura 4.13, observa-se o preenchimento de placas com argamassa de cimento com o propósito de repor a volumetria inicial.



Quartel-General do Porto



Torre Pedro Sem no Porto

Figura 4.12 – Placas associadas a argamassas de cimento em juntas de paredes de cantaria de granito



Figura 4.13 – Plaquetas “reparadas” com argamassa de cimento (Rua da Lapa, Quartel – General do Porto)

Arnold e Zehnder (1987), consideram a utilização de argamassas de cimento Portland incompatível com trabalhos de restauro e preservação de monumentos, constituindo a sua aplicação um problema tão grave quanto a poluição atmosférica. Referem que o cimento Portland endurecido pode conter até 1% de alcalis solúveis, formando iões lixiviados, eflorescências de carbonatos alcalinos. A utilização de cada 100 kg de cimento com o quantitativo de alcalis de 0.1% pode formar 460 g de natrite ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ou 520 g de mirabilite, no caso dos carbonatos alcalinos reagirem com a atmosfera ácida.

Os mesmos autores, afirmam que as argamassas de cimento não só fornecem maior quantidade de sais solúveis, mas também transformam sais menos prejudiciais noutros mais perigosos.

Segundo Begonha (2001), no caso de estudo do Hospital de Santo António, observou nas argamassas de cimento Portland ou na superfície de contacto das mesmas com a pedra, sulfatos alcalinos (thernadite) e sulfatos duplos (singenite e glauberite). Begonha et al. (1996) e Begonha (2001) mostraram que as águas da chuva recolhidas no Porto, apresentam um pH ácido devido aos elevados níveis de poluição antropogénica do ar. Os teores de Na^+ e de Cl^- são elevados devido à proximidade do Atlântico. Os teores de Ca^{2+} e de SO_4^{2-} são também elevados, mas devido à forte poluição atmosférica. As relações estequiométricas entre os iões Na^+ e Cl^- , por um lado, e entre os iões Ca^{2+} e SO_4^{2-} , são respectivamente iguais às da halite e do gesso. Quando as águas da chuva recolhidas no Porto evaporam, cristalizam a halite e o gesso. De acordo com Begonha (2001) e Lito et al. (2005), a aplicação de argamassas de cimento, nas juntas, pode resultar num efeito esponja, fornecendo Na^+ e K^+ às pedras contíguas que, reagindo com o SO_4^{2-} da chuva, originam a thenadite, glauberite e singenite presentes nas eflorescências e desagregação granular diferencial.

Situações idênticas foram referidas por Hammecker (1993), Delgado Rodrigues (1996), Alves (1997), Moutinho (2005) e Madureira (2008).

Em locais com índices de poluição pouco significativos, a aplicação de argamassas de cimento em alvenarias e cantarias de pedra conduziram à cristalização de trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e de thenonatrinite ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) na superfície das argamassas e da pedra como referido por Costa Leite (2008) na Igreja de Santa Clara em Vila do Conde e por Bré (2008) na Capela do Senhor da Pedra em Miramar.

Por outro lado, Hammecker (1993) refere que a ausência de calcite e kaliginite (KHCO_3) nas paredes de alvenaria e/ou cantaria pode ser explicada pela diluição das soluções de contacto com as argamassas de cimento Portland, através de chuvas mais ácidas, resultantes de precipitações directas ou água acumulada na estrutura porosa, formando essencialmente sulfatos. Apesar da basicidade predominante nas argamassas, os sais observados nos edifícios e monumentos são, essencialmente, característicos num ambiente ácido.

As argamassas ricas em cimento introduzem tensões muito elevadas, traduzindo-se no surgimento de fendas nas juntas ou na própria pedra. A figura seguinte apresenta exemplos de fissuração, em edifícios com alvenaria de pedra, tal como o edifício das Termas de Caldela, Igreja das Carmelitas no Porto e Quartel – General do Porto.



Termas de Caldela em Amaral



Igreja das Carmelitas no Porto



Quartel – General do Porto

Figura 4.14 – Fendilhação ao longo das juntas e/ou na pedra

4.3 MÉTODOS DE ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Apresenta-se, em seguida, uma breve descrição de alguns métodos de análise e caracterização das argamassas.

4.3.1 Microscópio óptico de luz polarizada

A microscopia óptica de luz polarizada permite a identificação e quantificação, das diferentes fases mineralógicas presentes, a relação e a ordem por que se formaram nos agregados, bem como as relações entre o ligante e os agregados.

Não só a identificação dos minerais presentes é importante (primários e secundários nos agregados) assim como a determinação das suas percentagens. Interessa, ainda, investigar a relação entre os diversos minerais, a ordem por que se formaram e verificar o tipo de ligação e/ou reacção química existente entre os agregados e o ligante.

4.3.2 Microscópio electrónico de varrimento (MEV)

O microscópio electrónico de varrimento é um poderoso instrumento que permite a observação e a caracterização de materiais heterogéneos orgânicos e inorgânicos. O princípio do funcionamento do MEV baseia-se no varrimento da superfície duma amostra por um feixe electrónico finamente focado, em sincronismo, com o varrimento de um monitor de visualização, modulando o brilho em cada ponto, pela intensidade de um sinal emitido pela amostra. Consequentemente, existe uma correspondência ponto por ponto, entre a imagem e a região observada da amostra, dependendo da natureza da informação contida na imagem do tipo de sinal registado e do detector utilizado. A qualidade e a quantidade das informações obtidas a partir de detectores adequados, permitem realizar imagens de morfologia, da composição, da estrutura cristalina e da variação da composição elementar, estando o MEV associado a um espectrómetro de raios X.

A análise por microscópio electrónico de varrimento permite comparar os diferentes componentes de uma argamassa, avaliar modificações químicas e texturais, na superfície dos minerais que constituem a argamassa, ao longo da sua cura, da sua degradação natural. Deste modo, pode ajudar a compreender os processos envolvidos na alteração dos minerais, que constituem as argamassas e a identificar as fases minerais que, eventualmente,

se podem formar durante estes processos. Este tipo de análise dispõe de uma capacidade analítica e torna possível observar e fotografar detalhes com uma grande ampliação.

Estudos relativos aos materiais constituintes de alvenarias e cantarias recorrem frequentemente à microscopia electrónica de varrimento, obtendo-se imagens sobretudo a partir de electrões rectrodifundidos ou a partir de electrões secundários.

Os electrões rectrodifundidos são os electrões emergentes da superfície da amostra com energia próxima da do feixe incidente, resultando de interacções elásticas ou com perdas reduzidas de energia, mas forte desvio angular. As imagens obtidas em MEV, utilizando esta radiação contêm informação essencialmente química (número atómico médio local) e topográfica (relevo da superfície da amostra).

Os electrões secundários têm baixa energia (< 50 eV), resultando fundamentalmente dos processos de interacção de electrões periféricos, quer com electrões primários (incidentes) quer com electrões rectrodifundidos. Devido à sua baixa energia, provêm de uma vizinhança próxima do ponto de impacto do feixe primário e de uma profundidade máxima de algumas dezenas de Å. O seu número depende fortemente do ângulo de incidência do feixe primário. Devido a estas características, as imagens realizadas com electrões secundários apresentam forte contraste topográfico, cumulativamente com a informação relativa às propriedades que afectam a emissão de electrões rectrodifundidos.

Os microscópios electrónicos de varrimento incluem espectrómetros de raios X para detecção e análise da radiação emitida pela amostra, permitindo a análise química elementar qualitativa e/ou quantitativa de um microvolume, considerando todos os elementos do boro ao urânio.

4.3.3 Difractometria de raios X (DRX)

A difractometria de raios X permite efectuar uma análise mineralógica, de uma determinada argamassa. Esta técnica baseia-se, na difracção por raios X, pela matéria cristalina, permitindo, a partir da análise do diagrama obtido após essa interferência, determinar as características estruturais e geométricas das estruturas cristalinas e, desta forma, identificar as fases minerais, ou mesmo, a sua semi-quantificação nas argamassas em análise. Este método é muito utilizado na análise de argamassas antigas, permitindo obter

informações sobre o tipo de ligante e areias utilizados e detectar outros materiais constituintes.

Os raios X são uma radiação electromagnética da mesma natureza que a luz, mas fortemente energética, devido ao seu pequeno comprimento de onda.

A amostra a ser analisada por difractometria de raios X é pulverizada previamente num almofariz, sendo assim constituída por milhares de grãos minerais com todas as orientações possíveis. No difractómetro de raios X, a informação é registada sob a forma de um gráfico de picos. Cada pico apresenta uma determinada altura proporcional à sua intensidade, sendo a abcissa igual a um ângulo 2θ , em que θ é o complemento do ângulo de incidência do feixe de raios X. Um dado pico corresponde a uma reflexão dos raios X, segundo uma determinada família de planos cristalográficos paralelos afastados de d . A relação entre os valores de θ e de d é traduzida pela equação de Bragg (equação 4.5).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad [4.5]$$

em que n é um número de ordem inteiro, e, λ , o comprimento de onda conhecido da radiação X utilizada no difractómetro.

Utilizando fichas-padrão relativas a enorme número de minerais e compostos químicos, é possível, por comparação com os valores de d correspondentes às diversas reflexões e às intensidades dos respectivos picos, identificar a maior parte ou mesmo a totalidade das fases minerais presentes nas rochas, desde que constituídas por matéria cristalina.

4.3.4 Análise térmica

Veiga et al (2002) descrevem que as técnicas mais largamente utilizadas na caracterização de materiais inorgânicos são a análise termogravítica (TG) e a análise térmica diferencial (ATD), que aparecendo as duas frequentemente associadas (TG-ATD). A análise termogravimétrica é uma técnica térmica que permite medir as variações de massa de uma forma contínua em função da temperatura ou do tempo durante o qual uma amostra é aquecida.

Ainda segundo Veiga et al (2002), são registadas as diferenças de temperatura entre uma substância e um material de referência, em função do tempo ou da temperatura, quando as duas substâncias são submetidas a um mesmo ciclo de aquecimento. As diferenças de temperatura são causadas pela emissão ou absorção de calor da substância em análise. Desta forma esta técnica não só pode detectar variações de massa, como também transformações estruturais e recristalizações.

Silva (2002) afirma que qualquer reacção que implique uma perda de massa, tal como, uma desidratação, ou ganho de massa, como por exemplo, uma oxidação ou uma carbonatação, é registada de uma forma quantitativa.

As técnicas de análise térmica são muito utilizadas para a identificação e determinação do teor de vários constituintes que estão, usualmente, presentes em argamassas antigas.

4.3.5 Análise química por via húmida

Análise química por via húmida é uma técnica correntemente utilizada para se estimar a relação aproximada entre o ligante e os agregados de natureza não calcária. Existem vários métodos de análise, que se baseiam num ataque ácido da amostra moída com ácido clorídrico ou com ácido nítrico. O ligante é definido a partir do material solúvel no ácido e os agregados são obtidos a partir do material insolúvel ao ácido (Silva, 2003).

4.3.6 Outros métodos de análise

Silva (2002) refere outros métodos de análise, tais como a espectrofotometria de absorção atómica (EAA), a espectrofotometria de emissão de plasma (ICP) e a cromatografia iónica, que podem ser utilizadas, por, exemplo, para determinação da hidraulicidade das argamassas e teores de sais solúveis. Veiga et al (2002) consideram que esta última técnica permite quantificar as espécies iónicas presentes (sais solúveis) em determinados compostos químicos.

4.3.7 Exemplo de três casos de estudo

Silva (2002) refere os métodos de análise das argamassas de enchimento, utilizados num aqueduto do século XVIII, em alvenaria de pedra calcária bem aparelhada com arcos suportados por pilares. A pedra aparelhada foi colocada sobre camadas de argamassa de cal e nivelados com a interposição de pequenos fragmentos de calcário. Efectou uma análise da argamassa por DRX, que confirmou tratar-se de uma mistura de cal com agregados quartzoso e basáltico. Através da análise termogravimétrica, foi possível detectar o baixo valor de carbonatação da cal. Por microscopia electrónica por varrimento, observou o tipo de microestrutura, com uma predominância de geles de silicatos de cálcio hidratados, traduzindo o desenvolvimento de reacções pozolânicas entre a cal e os constituintes activos dos agregados basálticos e quartzosos.

Begonha (2001) caracterizou mineralógica e químicamente argamassas do Hospital Santo António. Recolheu dois grupos de amostras: uma relativo a argamassas antigas de cor branca e um segundo de argamassas recentes, de cimento de cor cinzenta clara. As amostras foram submetidas a ensaios de caracterização mineralógica, designadamente por DRX, por MEV-EDS e por espectrometria de infra-vermelhos (EIV). A DRX mostrou que as argamassas antigas de cal são constituídas por ligante de calcite e agregados de saibros graníticos. Através do MEV-EDS, identificou etringite, em forma de cristais colunares ou de hábito acicular em argamassas de cimento. A microscopia electrónica de varrimento permitiu verificar o carácter mais poroso e pulverulento das argamassas antigas de cal relativamente às argamassas de cimento, menos porosas e mais compactas do que as anteriores.

Teles e Begonha (2001) estudaram a composição actual de três argamassas antigas (razão ligante/agregado) utilizadas no Palácio do Freixo no Porto através da determinação do teor em matéria insolúvel em soluções de ácido clorídrico e de hidróxido de potássio. Para confirmar a natureza dos agregados, as amostras foram analisadas por DRX e estudadas por MEV. Os resultados da DRX indicaram a presença de calcite, de agregados silicatados e a provável existência de halite. Com o objectivo de investigar a origem da calcite (ligante ou agregado), as mesmas amostras foram observadas por MEV, tendo-se verificado que todos os cristais de calcite eram do ligante. Quantidades significativas de halite foram observadas em todas as amostras. As mesmas foram então pré-lavadas de modo a eliminar os sais solúveis antes de utilizar o método da determinação do teor em matéria insolúvel. Resultados diferentes foram obtidos para a razão ligante/agregado. Este exemplo mostra que a

composição actual de argamassas antigas, obtida pelo método de determinação do teor em matéria insolúvel, deve ser sempre estimada em amostras pré-lavadas.

5 EXECUÇÃO DOS PROJETOS E ENSAIOS SOBRE ARGAMASSAS

Foram efectuados unicamente ensaios sobre argamassas endurecidas. Neste capítulo referem-se os constituintes utilizados na produção das argamassas, a execução dos projetos, as condições de cura e os métodos e resultados dos ensaios.

5.1 CONSTITUINTES

5.1.1 Cimento Secil CEM I – 42,5 R

De acordo, com as especificações da ficha técnica da Secil (Secil, 2004b), o cimento CEM I-42,5R é constituído por 95% a 100% de clínquer Portland e 0% a 5% de outros constituintes. Como principais características, destacam-se a cor cinzenta, elevado calor de hidratação e desenvolvimento rápido de resistências.

Os quadros seguintes indicam as principais características, parâmetros e métodos de ensaio.

Quadro 5.1 – Características químicas (Secil, 2004b)

Propriedades	Método de ensaio	Valor especificado
Perda ao fogo	NP EN 196-2 (2006)	≤ 5,0%
Resíduo insolúvel	NP EN 196-2 (2006)	≤ 5,0%
Teor de sulfatos	NP EN 196-2 (2006)	≤ 4,0%
Teor de cloretos	NP EN 196-21 (1990)	≤ 0,10%

Quadro 5.2 – Características mecânicas (Secil, 2004b)

Resistência à compressão			
Resistência aos primeiros dias (MPa)		Resistência de referência (MPa)	NP EN 196-1 (2006)
2 dias	7 dias	28 dias	
≥ 20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

Quadro 5.3 – Características físicas (Secil, 2004b)

Propriedades	Método de ensaio	Valor especificado
Princípio de presa	NP EN 196-3 (2006)	≥ 60 minutos
Expansibilidade	NP EN 196-3 (2006)	≤ 10 mm

5.1.2 Cimento Secil - CEM II/B-L – 32.5 R

O cimento Secil CEM II B/L – 32,5 R possui na sua composição 65% a 79% de clínquer Portland, 21% a 35% de calcário e 0 a 5% de outros constituintes. É um cimento de cor cinzenta, com menor calor de hidratação, menor trabalhabilidade que um cimento CEM I, com a mesma classe de resistência e desenvolvimento mais lento de resistências. A sua utilização não é recomendada em tempo muito frio.

As principais características deste cimento são identificadas nos seguintes quadros.

Quadro 5.4 – Características químicas (Secil, 2004c)

Propriedades	Método de ensaio	Valor especificado
Teor de sulfatos	NP EN 196-2 (2006)	$\leq 3,5\%$
Teor de cloretos	NP EN 196-21 (1990)	$\leq 0,10\%$

Quadro 5.5 – Características mecânicas (Secil, 2004c)

Resistência à compressão			
Resistência aos primeiros dias (MPa)		Resistência de referência (MPa)	NP EN 196-1 (2006)
2 dias	7 dias	28 dias	
	≥ 16	$\geq 32,5$ e $\leq 52,5$	

Quadro 5.6 – Características físicas (Secil, 2004c)

Propriedades	Método de ensaio	Valor especificado
Princípio de presa	NP EN 196-3 (2006)	≥ 75 minutos
Expansibilidade	NP EN 196-3 (2006)	≤ 10 mm

5.1.3 Cinzas volantes

As cinzas volantes utilizadas para a execução dos provetes, são provenientes da Unibetão.

A caracterização deste material foi efectuada, através da análise no microscópio electrónico de varrimento. Verificou-se, na amostra observada, que as partículas eram essencialmente ricas em silício e alumínio, contendo cálcio, ferro, magnésio, potássio, sódio e algum titânio (Figura 5.1). Nas Figuras A1.1, A1.2, A1.3 do Anexo A1, apresentam-se todas as imagens e espectros de cinzas volantes obtidos por MEV.

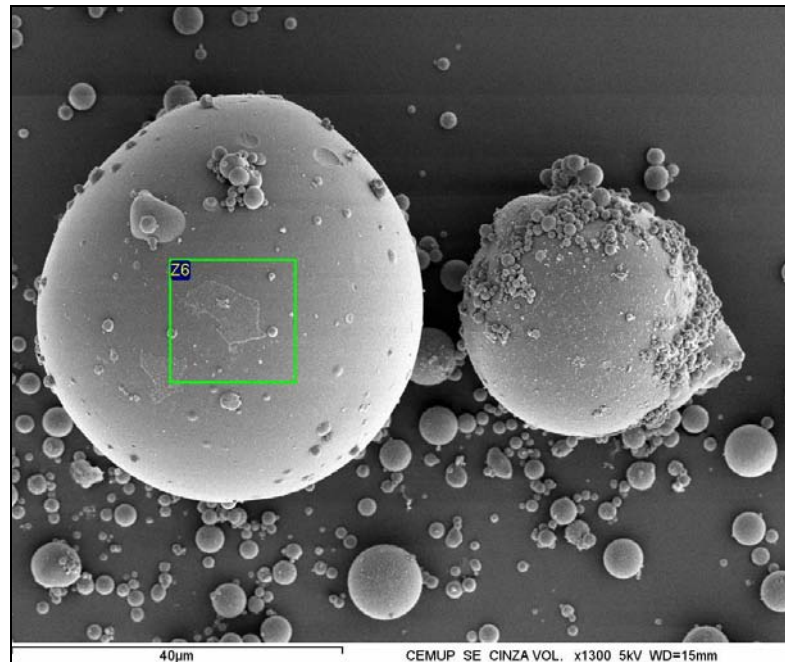
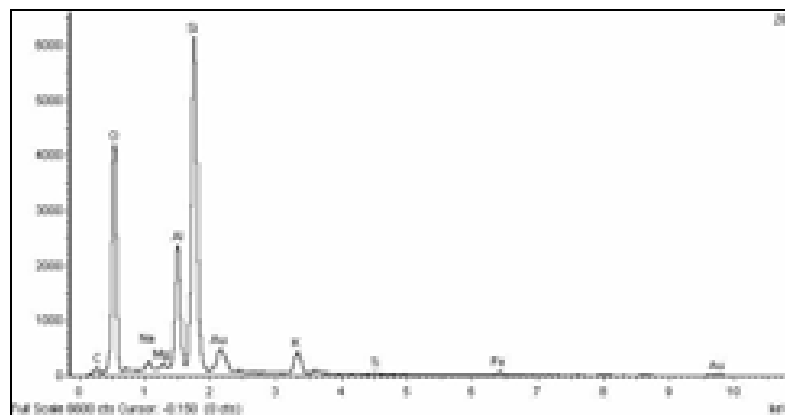


Imagem de cinzas volantes



Espectro Z6 da cinza volante de maior dimensão

Figura 5.1 – Imagem de cinzas volantes e espectro

A observação por MEV mostra que as cinzas volantes empregues no fabrico de argamassas apresentam dimensões muito variadas compreendidas entre aproximadamente 0,7 µm e 47 µm. A Figura 5.2 apresenta imagens obtidas por MEV de cinzas volantes com diversas dimensões.

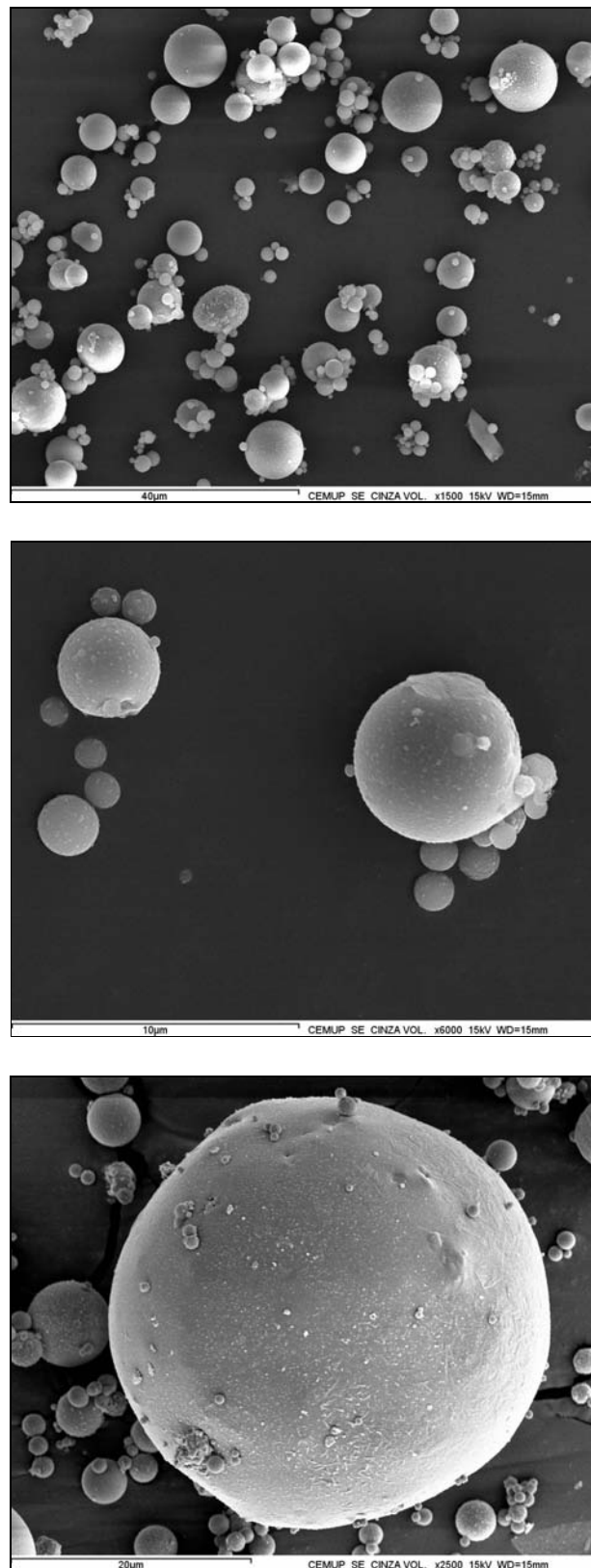


Figura 5.2 - Cinzas volantes com dimensões diversas (imagens obtidas por MEV)

5.1.4 Cal hidráulica Secil Martingança – NHL 5

A cal hidráulica Secil Martingança NHL 5 é um ligante hidráulico constituído, maioritariamente, por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio. É obtida pela cozedura de calcário argiloso. O sulfato de cálcio é adicionado à sua composição, de forma a regularizar o tempo de presa. A sua utilização está sujeita a um conjunto de condicionantes. Não pode ser empregue em argamassas, quando a temperaturas é inferior a 5 °C ou superior a 30 °C ou em situação de radiação solar elevada e ventos fortes.

O Quadro 5.7 apresenta as características da cal hidráulica, de acordo com a respectiva ficha técnica da Secil (2006).

Quadro 5.7 – Características da cal hidráulica (Secil, 2006)

Propriedades		Valor médio
Água livre		0,8%
Presa	Início	1 hora
	Fim	6 horas
Sulfatos		2,3%
Cal livre		3,9%
Finura	90 µm	11%
	200 µm	1,5%
Resistência à compressão	7 dias	5 MPa
	28 dias	20 MPa

5.1.5 Cal aérea

A cal aérea utilizada neste trabalho foi fornecida pela firma Augusto Oliveira Ferreira, Lda, tendo sido apagada e mantida submersa em água há mais de um ano.

Rodrigues (2004) refere que o envelhecimento da cal em pasta, mantida sob uma camada de água, foi durante séculos reconhecido como processo de melhorar a qualidade da cal aérea hidratada como ligante para argamassas.

A autora, citando outros trabalhos, afirma que, no mínimo, a cal em pasta deve maturar durante um mês, mas preferivelmente durante alguns anos. Na antiguidade, os Romanos exigiam um período de três anos.

5.1.6 Agregados

A areia utilizada é normalizada, granulométrica e mineralogicamente, de acordo com NP EN 196 -1 (2006) e ISO 679 (1989), sendo proveniente da Societé Nouvelle du Litoral. É comercializada em saquetas de plástico com uma massa de $1350 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$.

5.2 PREPARAÇÃO DOS PROVETES DE ARGAMASSA

A preparação das argamassas foi efectuada de acordo com as normas NP EN 196-1 (2006) e ASTM C109/C109M-08 (2008).

Foi considerada uma relação 1:3 entre os pesos do ligante e dos agregados (traço em peso de 1:3). A massa de água utilizada foi determinada em função do resultado do ensaio de espalhamento, de acordo com a norma ASTM C109/C109M-08 (2008).

A pesagem dos materiais foi efectuada com uma balança com uma precisão de 0.01 g.

A homogeneização dos materiais foi efectuada através de uma misturadora mecânica com dimensões normalizadas.

A figura 5.3 demonstra a execução da amassadura de uma argamassa de cal aérea na misturadora mecânica realizada Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LEMC).



Figura 5.3 – Execução da amassadura da argamassa de cal aérea na misturadora mecânica realizada no LEMC

A técnica de ensaio de espalhamento consiste na colocação de duas camadas de argamassa, de espessura idêntica, imediatamente após a amassadura, num molde tronco-cônico, colocado sobre uma mesa de espalhamento. Cada uma das camadas é compactada, por intermédio de um varão, com 25 pancadas distribuídas uniformemente. Depois de retirado o molde, a mesa de espalhamento é deixada cair da mesma altura normalizada 25 vezes durante 15 segundos. A argamassa espalha-se e faz-se a leitura dos diâmetros em quatro diagonais, recorrendo a uma régua. A cada um dos diâmetros das diagonais subtrai-se o diâmetro da base do molde tronco-cônico, sendo o espalhamento a média das quatro diferenças obtidas. O valor da consistência deve ser igual a $110 \pm 2\%$. A Figura 5.4 mostra o equipamento utilizado no LEMC.

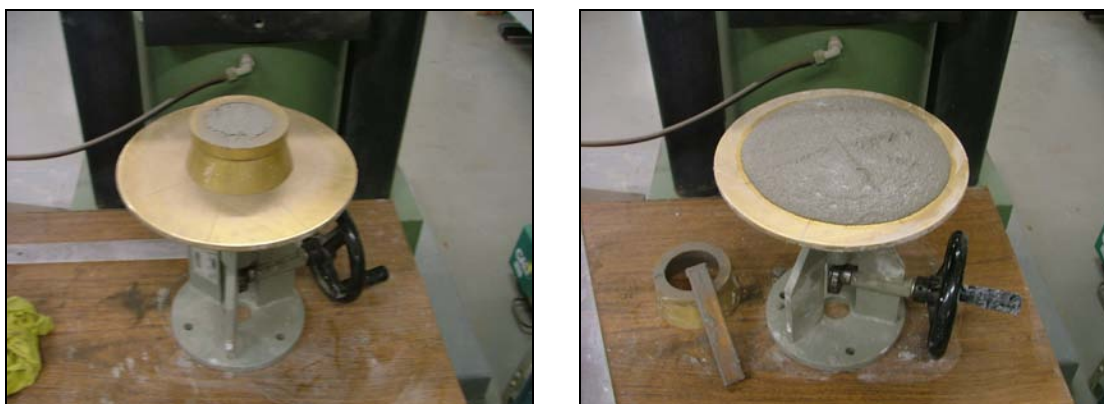


Figura 5.4 – Execução do ensaio de consistência – mesa de espalhamento realizado no LEMC

A massa de água adequada é obtida por tentativas, função do resultado do valor da consistência da argamassa.

No Quadro 5.8, apresentam-se as constituições de cada uma das argamassas. Inclui-se igualmente as massas de água adicionadas a 450 g de ligante e 1350 g de areia em cada tipo de argamassa estudado, de modo a obter-se um valor de espalhamento igual a $110 \pm 2\%$.

Verificou-se que a quantidade de água diminuía com a utilização de cinzas volantes, tendo-se registado reduções de 13% na argamassa de cimento 42,5 R reduziu 13% e de 16% na argamassa de cal aérea.

Depois da execução do ensaio de espalhamento e consequente determinação da massa de água, procedeu-se novamente à execução de amassaduras de cada tipo de

argamassa em estudo, para a execução de provetes prismáticos com 40 mm×40 mm ×160 mm, conforme a NP EN 169-1 (2006).

As argamassas e os provetes constituídos por cal aérea, cal aérea com cinzas volantes, cimento Portland 42,5 R, cimento Portland 42,5 R com cinzas volantes, cimento de calcário 32,5 R e cal hidráulica designaram-se respectivamente por CAL, CALCV, C, CCV, CL e H.

Quadro 5.8 – Composição das argamassas

Argamassa	Ligante (g)	Cinzas volantes (g)	Areia (g)	Água (g)
Cal aérea (CAL)	450	---	1350	202
Cal aérea + cinzas volantes (CALCV)	225	225		170
Cimento 42,5 R (C)	450	---		225
Cimento 42,5 R +cinzas volantes (ACCV)	225	225		195
Cimento 32,5 R (CL)	450	---		225
Cal hidráulica (H)	450	---		280

O preenchimento dos moldes prismáticos foi realizado em duas camadas, cada uma sujeita a sessenta pancadas, num compactador mecânico. O excesso de argamassa na superfície dos moldes foi retirado com uma espátula metálica, executando movimentos em serra ao longo da maior dimensão do molde (Figura 5.5).



Figura 5.5 – Molde preenchido com argamassa de cal aérea

Para além da execução dos provetes prismáticos de argamassa, foram executados quatro provetes, que pretendiam simular argamassas de juntas, tendo-se utilizado para o efeito em cada provete dois blocos de granito do Porto, aproximadamente com 200 mm × 100 mm × 50 mm. As juntas de argamassa tinham cerca de 6 mm de espessura.

A Figura 5.6 apresenta diversas fases de execução de um dos quatro provetes referidos em que se utilizou uma argamassa de cal aérea.



Figura 5.6 – Execução de um provete de granito do Porto e argamassa de cal aérea realizado no LEMC

Os quatro provetes executados foram constituídos pelos seguintes materiais:

- Provede designado por PAC de granito do Porto e argamassa de cimento Portland 42.5 R;
- Provede designado por PACCV de granito do Porto e argamassa de cimento Portland 42.5 R e cinzas volantes;
- Provede designado por PACal de granito do Porto e argamassa de cal aérea;
- Provede designado por PACalCV de granito do Porto e argamassa de cal aérea e cinzas volantes.

5.3 CONDIÇÕES DE CURA

A duração da cura será em função do desenvolvimento da resistência do material, o que está relacionado com o tipo de ligante. (Sousa Ribeiro, 2004).

Os provetes de argamassa foram sujeitos a dois tipos de cura. Os provetes cal aérea (CAL) e cal aérea com cinzas volantes (CALCV exterior) permaneceram no ambiente interior do laboratório e desta forma submetidos às condições naturais do mesmo, acarretando variações de temperatura e humidade relativa. Verificou-se que a resistência destes provetes, "ao toque de mão", com uma idade de 28 dias era nula. Uma das justificações, para a inexistência de resistência mecânica destes provetes, será as condições de cura. A variação

constante da temperatura e humidade relativa, influenciam as características das argamassas, inclusive a resistência mecânica.

Um segundo grupo de provetes de cal aérea com cinzas volantes (CALCV estufa) e os provetes à base de ligantes hidráulicos (C, CCV, CL e H), foram submetidos a um processo de cura, de acordo com a EN NP 196-1 (2006).

De acordo com Sousa Ribeiro (2004), para a obtenção de um material cimentício com qualidade, o seu fabrico deve ser seguido de uma cura em meio adequado durante as idades iniciais de endurecimento. O termo cura inclui todos os procedimentos adoptados para prevenir a secagem prematura da superfície do material devido sobretudo à radiação solar e ao vento e, consiste no controlo de temperatura e das condições de humidade do exterior. Teoricamente, o objectivo da cura é manter o material, mais próximo da condição de saturado, promovendo desta forma a hidratação do cimento, até que o espaço inicialmente ocupado pela água, na pasta de cimento fresca, seja ocupado pelos produtos de hidratação do cimento.

Segundo Mehta e Monteiro (1993), a hidratação do cimento só se efectua nos capilares cheios de água e praticamente deixa de se realizar quando a pressão de vapor nos capilares desce para, cerca de, 80% da pressão de saturação.

Sousa Ribeiro (2004) afirma que a secagem prematura do material cimentício pode dar origem à paragem da hidratação do cimento, antes dos poros capilares estarem bloqueados com os produtos da hidratação, resultando na formação de uma estrutura porosa contínua. Quanto maior for o período de cura húmida, mais completa será a hidratação do cimento e, conseqüentemente, menor será a porosidade do material, e portanto, maior será a sua tensão de rotura.

Os provetes de ligantes hidráulicos, foram desmoldados 24 horas depois da amassadura. Em seguida, efectuou-se a imersão dos provetes em água a uma temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ em recipientes adequados, sobre umas grelhas, de forma a garantir o livre acesso da água às faces dos provetes. Procedeu-se à cura numa câmara húmida com temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a uma humidade relativa de pelo menos 96%.

5.4 ENSAIOS SOBRE ARGAMASSAS ENDURECIDAS

Foram efectuados unicamente ensaios sobre argamassas endurecidas, nomeadamente:

- Resistências à flexão e compressão;
- Porosidade livre às 48 horas;
- Absorção de água por capilaridade;
- Evaporação;
- Ensaio de envelhecimento com ciclos de molhagem e secagem;
- Observação e análise ao microscópio electrónico de varrimento.

5.4.1 Ensaios de determinação das resistências à flexão e à compressão

Os ensaios de determinação de resistência à flexão e à compressão foram efectuados conforme os procedimentos e cálculo referidos no subcapítulo 3.1.2. As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam os dispositivos utilizados nos ensaios de flexão e compressão.



Figura 5.7 – Ensaio à flexão dos provetes de argamassa

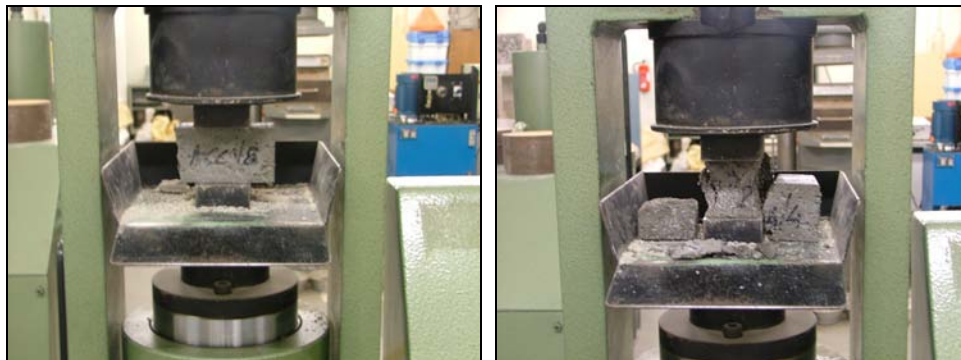


Figura 5.8 – Ensaio à compressão dos provetes de argamassa

Numa primeira fase, foram executados ensaios mecânicos aos provetes CAL e CALCV, aos 28 e 90 dias de idade, C e CCV, aos 2, 7, 28 e 90 dias de idade, que apresentaram um crescimento de resistência mecânica com aumento da idade, tal como é possível verificar no Quadro 5.9 e nos Quadros A2.1 e A2.2 do Anexo A2.

Quadro 5.9 – Valores médios de resistência à flexão e compressão em várias idades

Provetes	Resistência à flexão (MPa)				Resistência à compressão (MPa)			
	2 dias	7 dias	28 dias	90 dias	2 dias	7 dias	28 dias	90 dias
CAL	---	---	nd	nd	---	---	nd	nd
CALCV	---	---	nd	nd	---	---	nd	nd
C	6,4	7,2	8,6	9,1	31,2	43,0	51,2	58,7
CCV	4,1	5,2	6,5	7,5	15,5	22,5	32,7	41,4

nd – valor inferior ao limite de sensibilidade da prensa

Verifica-se que a introdução de cinzas volantes numa argamassa de cimento Portland (com 50% de cimento e 50% de cinzas volantes) reduz quer a resistência à flexão quer a resistência à compressão. No Quadro 5.10 apresentam-se os decréscimos percentuais das resistências resultantes da introdução de cinzas volantes na argamassa de cimento Portland.

Quadro 5.10 – Decréscimos percentuais da resistência em resultado da adição de cinzas volantes em argamassas de cimento Portland

Decréscimos da resistência em resultado da adição de cinzas volantes em argamassas de cimento Portland (%)							
Resistência à flexão				Resistência à compressão			
2 dias	7 dias	28 dias	90 dias	2 dias	7 dias	28 dias	90 dias
35,9	27,8	24,4	17,6	50,3	47,7	36,1	29,5

Constata-se, através da análise do quadro anterior, que os decréscimos percentuais das resistências à flexão e à compressão, diminuem com a idade dos provetes, em resultado da adição de cinzas volantes em argamassas de cimento Portland, decrescendo de 35,9%

para 17,6% e de 50,3% para 29,5%, entre os 2 e os 90 dias de idade, respectivamente nas resistências à flexão e à compressão.

Os provetes que possuíam na sua composição cal aérea, CAL e CALCV, ofereceram resistências à flexão e à compressão inferiores aos limites de sensibilidade da prensa para cada um dos ensaios, mesmo aos 90 dias de idade. Não foi assim possível obter qualquer tipo de resultado, em termos de resistências mecânicas.

Na Figura 5.9, observa-se o estado de um provete de cal aérea, no seguimento da tentativa da execução de um ensaio de resistência à flexão aos 28 dias de idade.



Figura 5.9 – Provede de cal aérea aos 28 dias de idade

Em consequência do “insucesso” obtido com os provetes de cal aérea, foram executados novos provetes de cimento de calcário 32,5 R e de cal hidráulica NHL 5, designados respectivamente por CL e H com as composições referidas no Quadro 5.8.

Desta forma, executou-se o estudo da resistência mecânica nos provetes CL e H. Em seguida apresenta-se o Quadro 5.11, com os valores médios de rotura à flexão e à compressão obtidos aos 7 e 28 dias de idade.

Nos quadros A2.3 e A2.4 do Anexo A2 apresentam-se todos os resultados obtidos com os provetes CL e H.

Quadro 5.11 – Valores médios de resistência à flexão e compressão em várias idades

Provetes	Resistência à flexão (MPa)		Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
CL	5,7	6,4	30,4	36,4
H	0,9	2,2	3,6	5,6

Verifica-se que os provetes de argamassa de cal hidráulica apresentam os menores valores de resistência mecânica, enquanto que os provetes de cimento Portland 42,5 R têm as maiores resistências.

O Quadro 5.12 mostra a relação entre as resistências à flexão e à compressão entre os provetes C/H e CL/H.

Quadro 5.12 – Relação entre as resistências à flexão e à compressão entre os provetes CL/H e C/H

Provetes	Resistência à flexão		Resistência à compressão	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
C/H	8,0	3,9	11,9	9,1
CL/H	6,3	2,9	8,4	6,6

Verifica-se um decréscimo, com o aumento da idade dos provetes, das razões entre as resistências médias à flexão e à compressão dos provetes de cimento Portland e cimento de calcário com os valores correspondentes obtidos com os provetes de cal hidráulica.

5.4.2 Ensaio de determinação da porosidade

5.4.2.1 Conceito de porosidade

A porosidade é a relação entre o volume de vazios e o volume total, aparente, do material. A porosidade absoluta, na generalidade dos casos, não se pode medir sem destruir o provete, porque nem todos os vazios se encontram acessíveis.

De acordo com Rato (2006), a nível laboratorial, a estrutura porosa de argamassas é o resultado de um conjunto de opções tomadas durante o seu fabrico e cura. Os materiais, o

traço, a quantidade de água, o processo de amassadura e o tipo de cura determinam em conjunto as características do meio poroso.

Segundo Dullien (1979), um material poroso pode ser definido como aquele que cumpre pelo menos uma das seguintes condições:

- Se contém espaços intersticiais não preenchidos por matéria sólida (poros), distribuídos na matriz sólida ou semi-sólida, sendo estes espaços normalmente ocupados por um fluido, ar, água ou vapor de água;
- Se é permeável ao fluxo de diversos fluidos, assumindo neste caso a designação de material poroso permeável.

O estudo da porometria de meios porosos implica a utilização de várias técnicas, cada uma com o seu campo de aplicação, sendo a do porosímetro de mercúrio a mais utilizada.

Miranda (2006) refere que a definição da porometria das argamassas com cinzas volantes não pode ser efectuada pelo método de porosímetro de mercúrio devido à elevada quantidade de poros de dimensões reduzidas. É habitual considerarem-se a porosidade livre às 48 horas e porosidade total.

A determinação da porosidade total realiza-se sob a condição de vazio da amostra e posterior entrada da água sob pressão, permitindo desta forma o preenchimento integral de todos os vazios.

A porosidade livre às 48 horas (N_{48}) é obtida por ensaios à pressão atmosférica, que demoram 48 horas, permitindo apenas o preenchimento dos poros livremente acessíveis à água, em condições normais de embebição ou imersão.

5.4.2.2 Métodos de ensaio

O ensaio de determinação da porosidade livre às 48 horas foi efectuado de acordo como método preconizado pelo Laboratoire de Péetrophysique do Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg e descrito por Mertz (1991), Hammecker (1993) e Begonha (2001).

Considerou-se numa primeira fase deste estudo, provetes de forma prismática, com as dimensões de 40 mm×40 mm×160 mm e em que foram ensaiados os provetes CAL, CALCV

(estufa). CALCV (exterior), C e CCV. Numa segunda fase, executou-se novamente este ensaio, com os provetes C, CCH, CL e H, com as dimensões 40 mm×40 mm×40 mm.

O ensaio iniciou-se pela secagem em estufa a 60 °C, dos provetes, até à obtenção de um peso seco constante em gramas designado por W_0 .



Figura 5.10 – Processo de secagem dos provetes com forma prismática numa estufa a 60 °C

Em seguida, os provetes foram introduzidos durante uma hora, em água destilada, numa altura igual a um quarto da sua altura.

Após uma hora do início do ensaio, acrescentou-se água destilada até metade da altura do provete, o qual permaneceu, desta forma, durante vinte e três horas. Passado exactamente um dia do início do ensaio, acrescentou-se novamente água destilada até atingir 20 mm acima do topo do provete.

A Figura 5.11 mostra a execução do ensaio de porosidade livre às 48 horas, dos provetes prismáticos CAL, CALCV (estufa). CALCV (exterior), C e CCV.

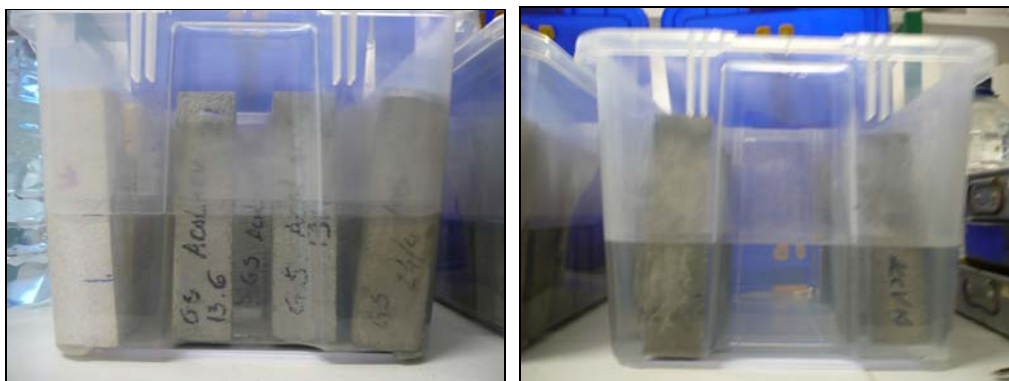


Figura 5.11 – Execução do ensaio de determinação da porosidade livre às 48 horas

No final de quarenta e oito horas de ensaio, o provete foi novamente pesado, obtendo-se o peso W_{48} em gramas.

A porosidade livre às 48 horas (N_{48}) é obtida pela expressão (5.1).

$$N_{48} = \frac{W_{48} - W_0}{V} \quad [5.1]$$

Em que V é o volume aparente do provete em cm^3 .

5.4.2.3 Resultados

O Quadro 5.13 apresenta os valores médios de porosidade livre calculados a partir dos resultados dos provetes prismáticos e cúbicos CAL, CALCV (exterior), CALCV (estufa), C, CCV, CL e H apresentados nos Quadros A3.1 e A3.2 do Anexo A3.

Quadro 5.13 – Valores médios da porosidade livre às 48 horas obtida dos provetes prismáticos

	Referência	N_{48} (%)	Desvio Padrão
Provetes prismáticos (40 mm × 40 mm × 160 mm)	CAL	23,50	0,40
	CALCV (exterior)	20,23	0,24
	CALCV (estufa)	20,25	0,33
	C	13,08	1,57
	CCV	15,85	0,39
Provetes cúbicos (40 mm × 40 mm × 40 mm)	C	14,10	0,57
	CCV	14,01	0,77
	CL	16,58	0,30
	H	23,32	0,43

5.4.2.4 Discussão de Resultados

As argamassas de cal aérea (CAL) e de cal hidráulica (H) apresentam valores de porosidade livre às 48 horas muito semelhantes e, em média, cerca de 1,7 vezes superiores ao valor da argamassa de cimento Portland (C).

No conjunto dos provetes de cal aérea, verifica-se que as cinzas volantes proporcionaram uma diminuição da porosidade livre, de cerca de 13,9%. Esta diminuição pode estar relacionada com o menor volume de água utilizado na amassadura.

Um menor volume de água contribui para uma estrutura menos porosa e a utilização de cinzas volantes em argamassas de cal aérea conduz habitualmente à diminuição do tamanho dos poros.

De entre as argamassas de cimento, a de cimento calcário (CL) apresenta maior porosidade às 48 horas.

A colocação de cinzas volantes na argamassa de cimento Portland, quase que não teve influência no valor de porosidade livre, uma vez que a sua introdução traduziu-se apenas por uma diminuição de 14,10% para 14,01%.

Com o objectivo de estabelecer uma relação entre os valores de porosidade livre determinados em argamassas e granito em alvenarias de pedra, apresenta-se o Quadro 5.12 com valores de porosidade livre determinados em provetes de pedra de granito provenientes de alguns monumentos e edifícios em Portugal.

Analisando os Quadros 5.13 e 5.14, verifica-se que nas argamassas obtêm-se valores de porosidade livre superiores aos determinados no granito. De facto, estes casos de estudo dos provetes de pedra referidos no Quadro 5.14, possuem uma porosidade menor, do que a das argamassas.

Comparando os Quadros 5.13 e 5.14, verifica-se que os dois provetes de granito com maior porosidade (8,58% no Mosteiro de São João de Tarouca e 8,59% na Igreja de São Pedro de Rates) representam 63% da porosidade média das argamassas com cimento Portland (C) e 37% da porosidade livre do conjunto das argamassas de cal aérea (CAL) e de cal hidráulica (H).

5.4.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade

O fenómeno da capilaridade tem merecido um realce crescente em vários trabalhos publicados. No âmbito deste trabalho, o ensaio de absorção de água por capilaridade permitiu avaliar a “velocidade” de ascensão capilar da água e retirar algumas implicações a nível das características dos materiais.

Quadro 5.14 – Valores limite da porosidade livre às quarenta e oito horas (N_{48}) obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios de Portugal.

Monumento ou edifício estudado	N_{48} (%)
Convento de São Gonçalo de Amarante – granito de grão fino (Castro et al, 1991)	5,13 – 9,63
Anta Grande do Zambujeiro – granito de grão grosseiro (Pinto 1993)	2,90
Mosteiro de São Miguel de Refojos – granito de grão médio a grosseiro (Begonha, 2000)	4,61 – 8,53
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por placas (Begonha, 2001)	3,38 – 7,46
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por desagregação granular (Begonha, 2001)	3,96 – 4,29
Mosteiro de São João de Tarouca – granito de Vila Chã (Begonha, 2002c)	6,83 – 8,58
Igreja de São Pedro de Rates – granito de grão médio a grosseiro (Begonha, 2003b)	4,16 – 8,32
Igreja de São Pedro de Rates – granito de grão fino a médio (Begonha, 2003b)	4,77 – 8,59
Igreja Matriz de Espinho – granito de grão grosseiro (Begonha, 2003c)	2,12 – 4,00
Igreja Matriz de Espinho – granito de grão médio (Begonha, 2003c)	2,75 – 3,58
Convento de São Gonçalo de Amarante – granito de grão fino (Begonha, 2004)	3,02 – 4,19
Antiga Alfândega de Vila do Conde – granito de grão médio (Ferreira, 2004)	2,88 – 8,48
Igreja de Santa Maria de Leça – granito do Porto (Moutinho, 2005)	3,00 – 3,66
Igreja Matriz de Caminha – granito de grão médio (Fojo, 2006)	4,85 – 10,30
Igreja Matriz de Caminha – aplito (Fojo, 2006)	4,04 – 4,48
Sé Catedral de Évora (Costa, 2007)	5,8±0,2 – 6,9±0,3
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfiróide, meteorizado (Costa Leite, 2008)	2,26 – 2,49
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfiróide, muito meteorizado (Costa Leite, 2008)	5,87 – 6,81
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – aplito moscovítico, meteorizado de cor cinzenta muito clara (Costa Leite, 2008)	2,58 – 2,82
Capela do Senhor da Pedra em Miramar – granito de Lavadores (Bré, 2008)	4,42 – 5,35

5.4.3.1 Método de ensaio

No presente trabalho, foi estudada a absorção de água por capilaridade segundo a metodologia proposta pelo Laboratoire de Pétrophysique do Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg e descrito por Mertz (1991), Hammecker (1993) e Begonha (2001).

Ensaíram-se quatro tipos de provetes de argamassas, cada um com nove exemplares, todos com um volume de $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ e uma idade superior aos 90 dias, designando-se por:

- C – cimento Portland 42,5 R;
- CC – cimento Portland 42.5 R e cinzas volantes;
- CL – cimento calcário 32,5;
- H - Cal hidráulica.

Antes da execução do ensaio, todos os provetes foram submetidos a uma secagem em estufa a uma temperatura média de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, até se obter uma massa constante com uma variação máxima de 0.1% da massa entre pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos de 24 horas.

Utilizaram-se quatro caixas de plástico, com fecho hermético para os diversos grupos de provetes, em que na base das mesmas, foram colocadas grelhas de plástico, de modo a permitir a o contacto máximo da superfície do provete com a água. Antes da introdução dos provetes no interior das caixas, foi colocada água destilada até atingir uma altura média de 1 cm acima da grelha. Por fim, colocaram-se os provetes nas caixas e as mesmas foram hermeticamente fechadas.

A absorção de água por capilaridade foi caracterizada pelo aumento da massa dos provetes, em função de intervalos de tempo crescentes, até à estabilização dos valores das massas. A absorção capilar inicial é muito rápida, adquirindo de seguida um ritmo consideravelmente mais lento até à fase de estabilização.

Neste ensaio, não foi possível medir a evolução da altura da franja capilar devido à irregularidade da mesma. A franja capilar atingiu, no entanto, o topo de todos os provetes.

Determinou-se o coeficiente de capilaridade A, que traduz o aumento de peso por unidade de superfície e por unidade de raiz quadrado do tempo.

5.4.3.2 Resultados

O Quadro 5.15 mostra os valores obtidos em cada provete e os respectivos valores médios e desvios-padrão, do coeficiente de absorção de água por capilaridade em cada grupo de argamassas.

Quadro 5.15 – Valores médios e desvios-padrão do coeficiente de absorção de água por capilaridade

PROVETE	A (g×cm ⁻² ×h ^{-1/2})		
	A	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
C1	0,156	0,160	0,004
C2	0,156		
C3	0,160		
C4	0,165		
C5	0,159		
C6	0,162		
C7	0,156		
C8	0,167		
C9	0,157		

PROVETE	A (g×cm ⁻² ×h ^{-1/2})		
	A	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CC1	0,155	0,136	0,017
CC2	0,146		
CC3	0,140		
CC4	0,140		
CC5	0,132		
CC6	0,095		
CC7	0,134		
CC8	0,147		
CC9	0,130		

PROVETE	A (g×cm ⁻² ×h ^{-1/2})		
	A	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CL1	0,156	0,153	0,011
CL2	0,151		
CL3	0,156		
CL4	0,168		
CL5	----		
CL6	0,145		
CL7	0,130		
CL8	0,162		
CL9	0,155		

PROVETE	A (g×cm ⁻² ×h ^{-1/2})		
	A	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
H1	0,320	0,410	0,066
H2	0,447		
H3	0,502		
H4	0,386		
H5	0,432		
H6	0,378		
H7	0,355		
H8	0,364		
H9	0,510		

Nos provetes C, CC, CL e H de argamassas de cimento Portland, cimento Portland com cinzas volantes, cimento de calcário e cal hidráulica, o coeficiente de absorção de água por capilaridade A varia, respectivamente, entre 0,156 $\text{g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1/2}$ e 0,167, entre 0,095 e 0,155, 0,130 e 0,168 e entre 0,320 e 0,510 $\text{g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1/2}$.

As Figuras 5.12 a 5.19 representam o aumento de massa por unidade de superfície, em função da raiz quadrada do tempo.

Nas Figuras 5.12, 5.14, 5.16 e 5.18, apresentam-se os diagramas correspondentes a um dos provetes de cada uma das quatro argamassas. Nas Figuras 5.13, 5.15, 5.17 e 5.19 mostram-se os diagramas do conjunto de nove provetes de cada um dos tipos de argamassas.

Os gráficos são constituídos por dois segmentos de recta, em que a intersecção dos mesmos, mais ou menos coincide com o instante em que a franja capilar atinge o topo do provete. O declive do primeiro segmento representa o coeficiente de capilaridade A.

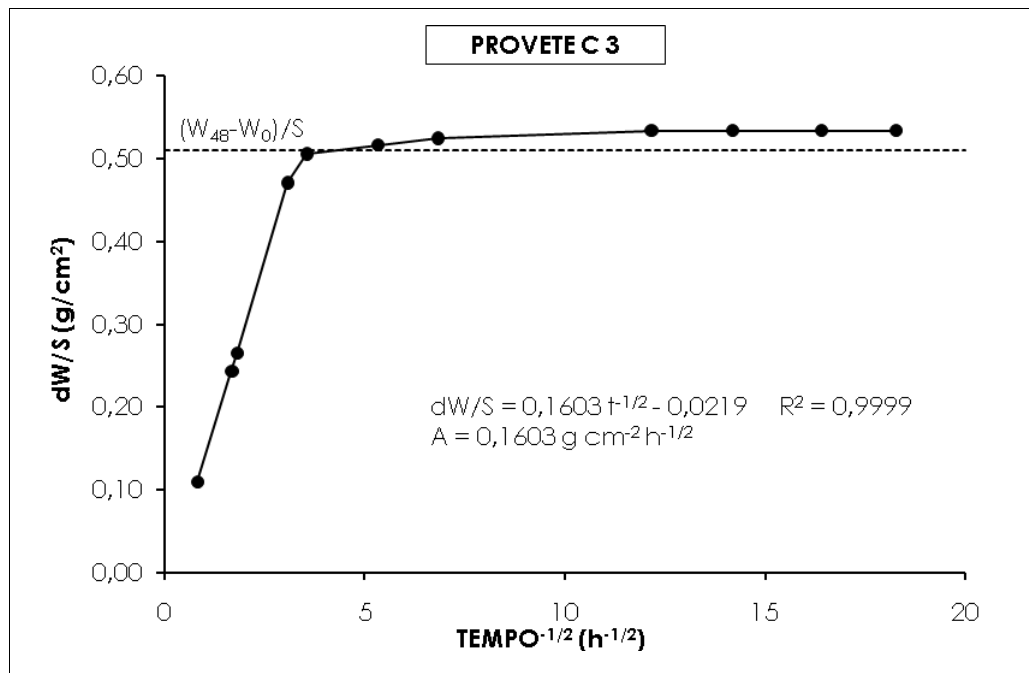


Figura 5.12- Curva de absorção por capilaridade do provete C3

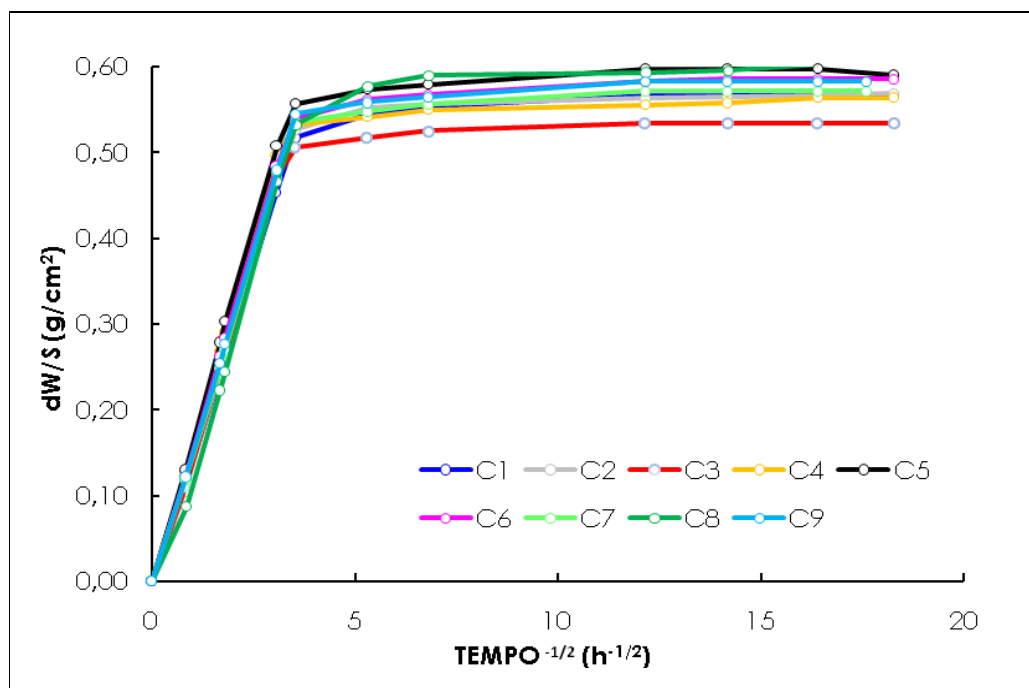


Figura 5.13 – Curvas de absorção por capilaridade dos provetes C

As linhas a tracejado paralelas ao eixo das abcissas de ordenadas iguais a $(W_{48}-W_0)/S$ representam o aumento de peso por unidade de superfície obtido no ensaio de determinação da porosidade livre às 48 horas.

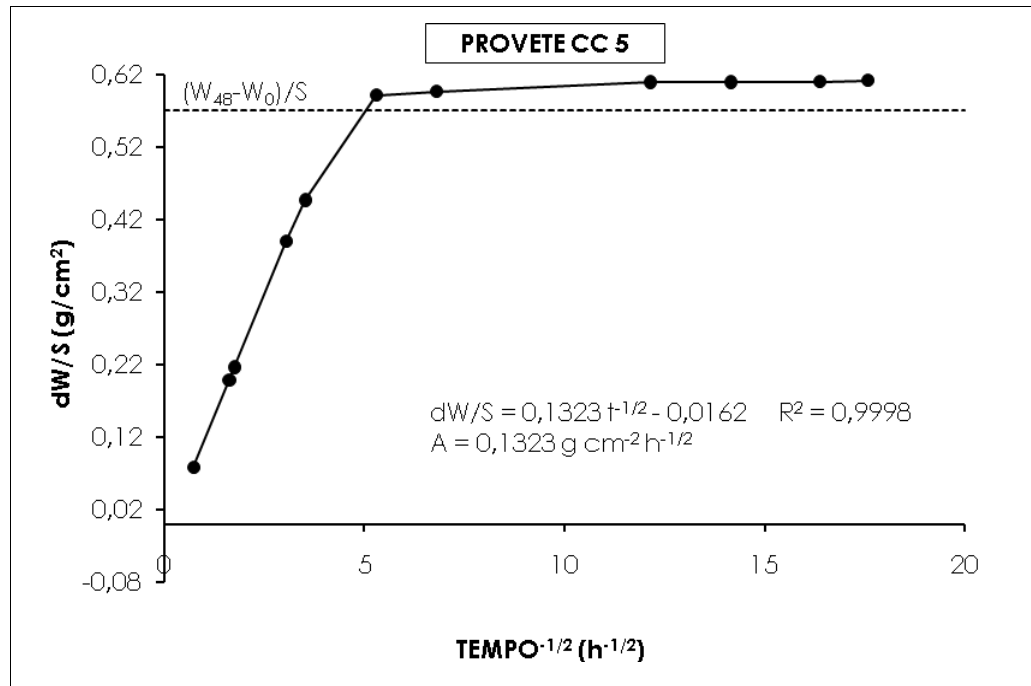


Figura 5.14 – Curvas de absorção de água por capilaridade do provete CC5

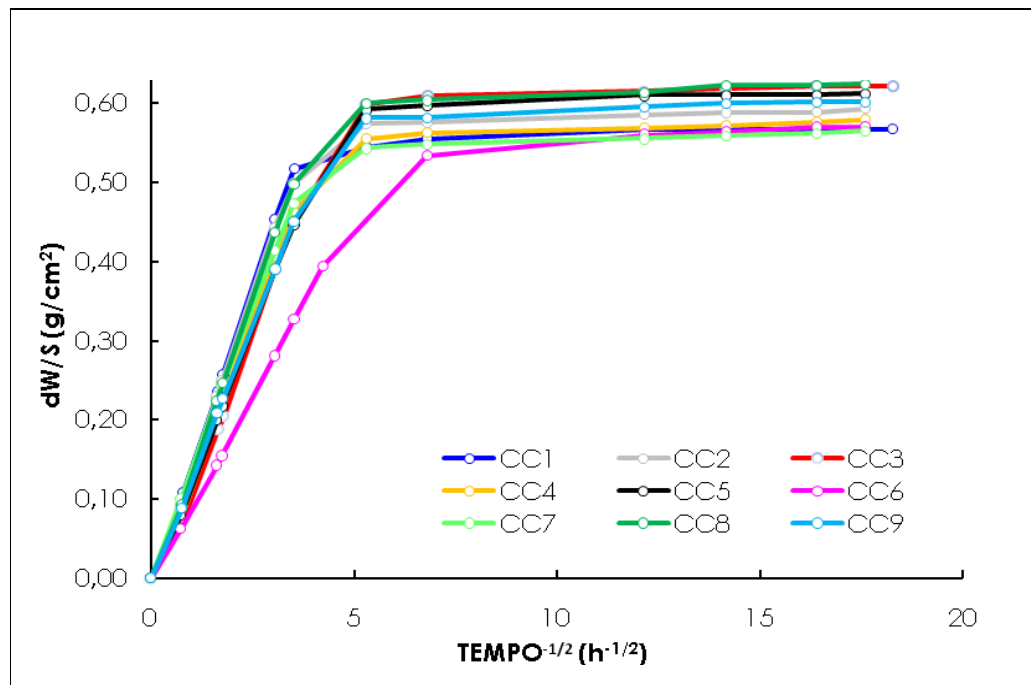


Figura 5.15 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes CC

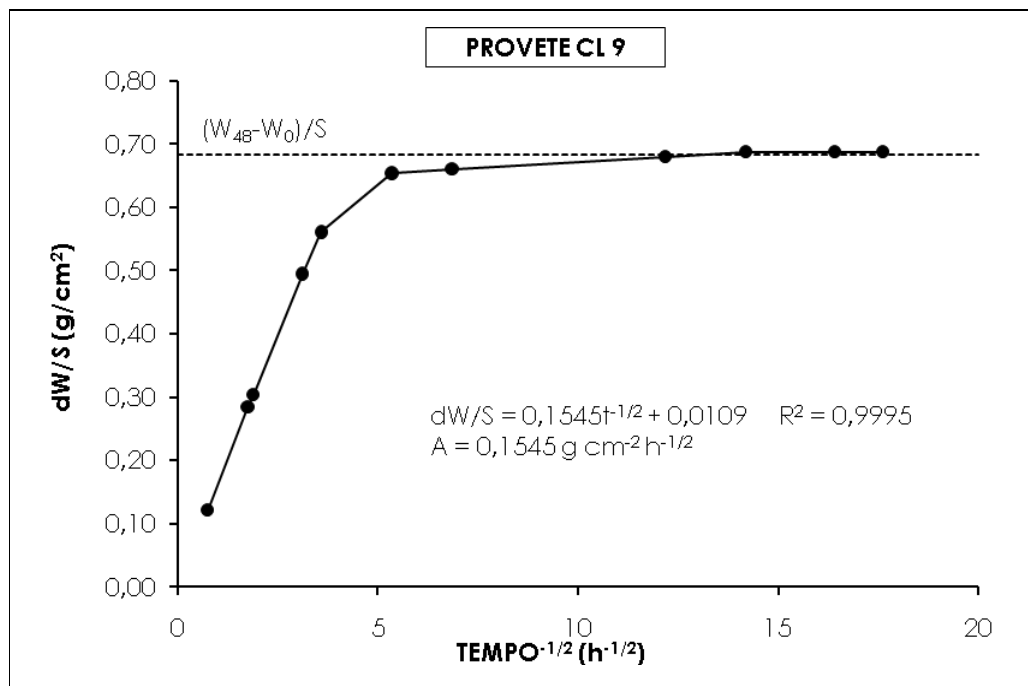


Figura 5.16 – Curvas de absorção de água por capilaridade do provete CL9

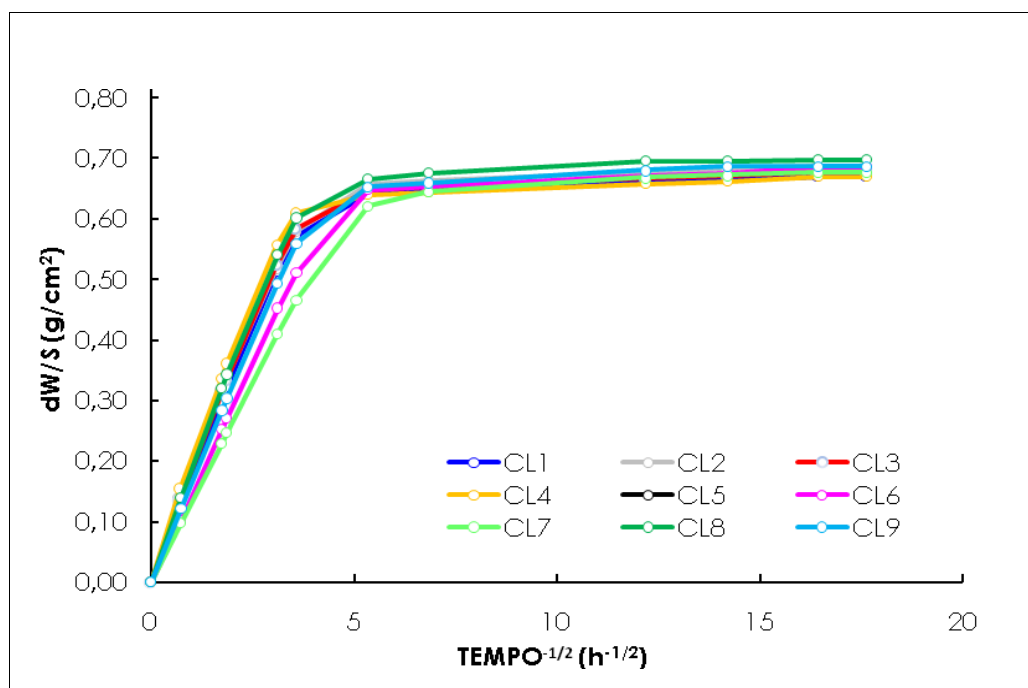


Figura 5.17 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes CL

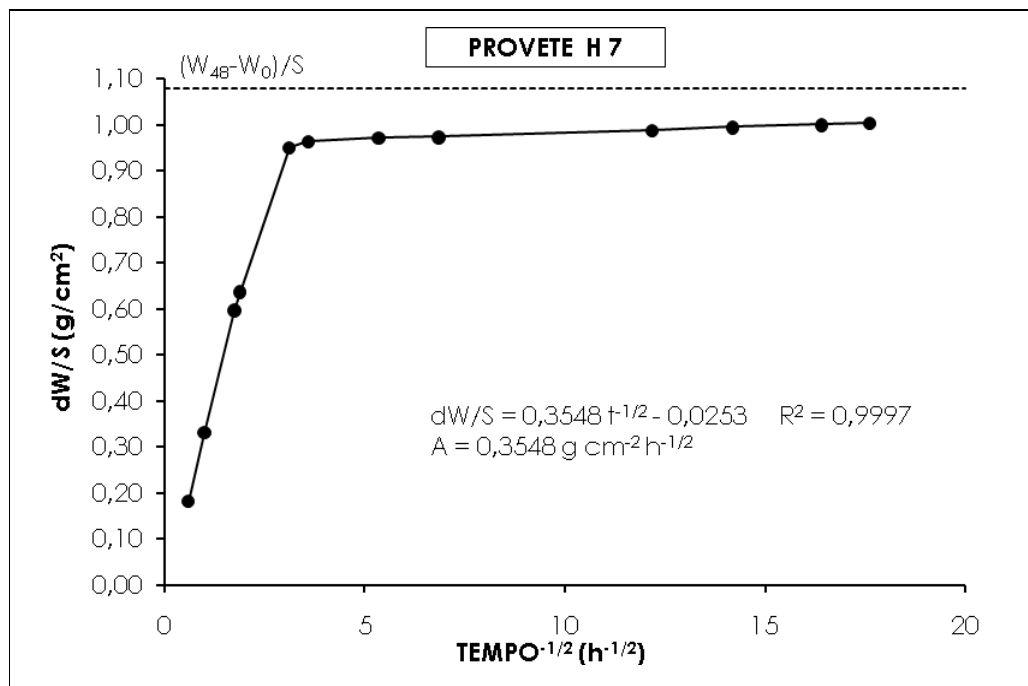


Figura 5.18 – Curvas de absorção de água por capilaridade do provete H7

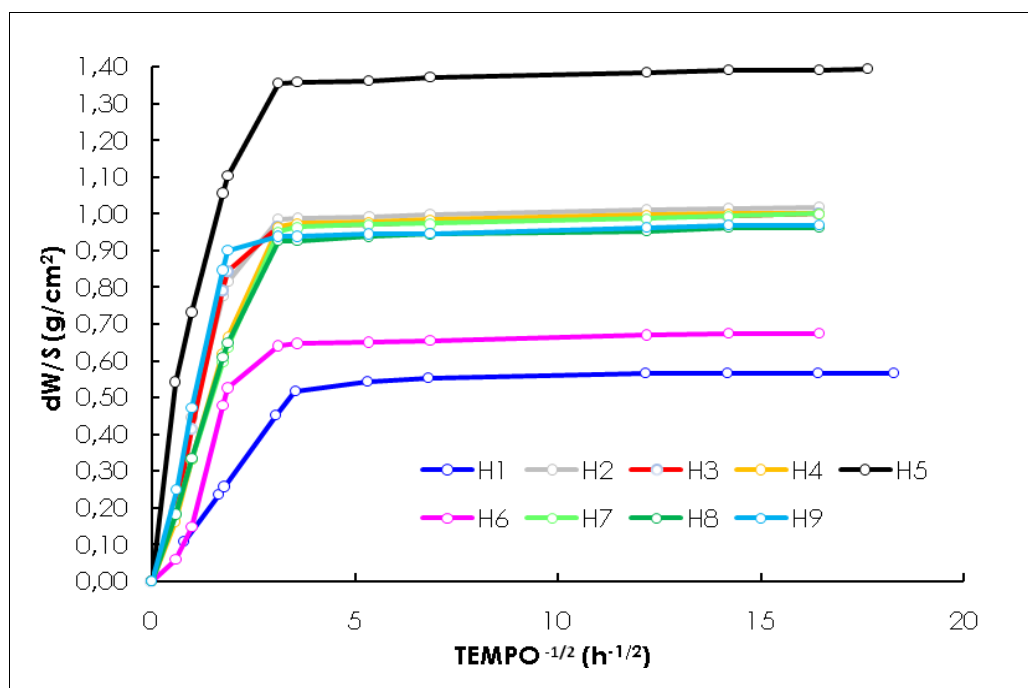


Figura 5.19 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes H

Em termos práticos, o comportamento das argamassas à absorção capilar é normalmente, avaliado através da determinação do coeficiente de capilaridade A, igual ao

declive do primeiro troço do diagrama, traduzindo a "velocidade" com que a água é inicialmente absorvida pelo material. O segundo segmento de recta de muito pequeno declive está associado, segundo Rato (2006), à quantidade de água que será absorvida em períodos de exposição longa à fonte de humedecimento.

5.4.3.3 Discussão de resultados

Os provetes de argamassa de cimento Portland C e os de cimento de calcário CL apresentam valores de coeficiente de capilaridade A muito próximos, com valores médios respectivamente iguais a $0,160 \pm 0,004 \text{ g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1/2}$ e $0,153 \pm 0,11 \text{ g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1/2}$ e cerca de 2,6 vezes inferiores ao valor médio do coeficiente de capilaridade A dos provetes de cal hidráulica H ($0,410 \pm 0,066 \text{ g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1/2}$).

A substituição de 50% de cimento Portland por cinzas volantes diminui um pouco o valor médio do coeficiente de capilaridade A ($0,136 \pm 0,017 \text{ g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1/2}$).

Rodrigues (2004), havia verificado igualmente que as argamassas de cal (aérea ou hidráulica) que continham cinzas volantes, apresentavam um comportamento face à capilaridade mais eficiente, com coeficientes de capilaridade A, menores e menor quantidade de água absorvida por capilaridade.

Rato (2006) afirma que o comportamento de uma argamassa à acção da capilaridade depende essencialmente da sua estrutura porosa, da quantidade, dimensão e conectividade dos poros.

O mesmo autor refere que as argamassas com cimento na sua constituição possuem valores de porosidade livre e absorção de água por capilaridade muito mais reduzidos, do que a argamassa de cal hidráulica ou de cal aérea, exceptuando nos casos em que adicionados outros materiais, tais como o caulino como é de mostrado por Rodrigues (2004).

De facto, comprova-se neste trabalho as afirmações anteriores, nos resultados obtidos tanto no ensaio de capilaridade, como na determinação da porosidade livre.

Os resultados obtidos no ensaio de capilaridade comprovam os valores de porosidade livre, respectivamente de cada tipo de provete. Rato (2006) citando Magalhães constata que não é possível estabelecer relações lineares entre a porosidade e o raio dos

poros por um lado, e a capilaridade por outro. No entanto, observou uma tendência genérica no sentido de o coeficiente de capilaridade aumentar com o aumento da porosidade aberta e com a dimensão dos poros.

O Quadro 5.16 mostra os coeficientes de absorção de água por capilaridade de provetes de pedra obtidos em cantarias de granito em diversos monumentos e edifícios de Portugal com o propósito de os comparar com os valores obtidos nas argamassas estudadas neste trabalho.

O Quadro 5.16 comprova que o coeficiente de capilaridade A (compreendido entre $0,048 \text{ g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1/2}$ e $0,859 \text{ g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1/2}$) de pedras graníticas quase sempre deterioradas varia consideravelmente de granito para granito e com o valor da porosidade livre (compreendida entre 2,12 % e 10,30%).

De um modo geral, pedras graníticas deterioradas com quatro ou mais de quatro por cento de porosidade livre apresentam coeficientes de capilaridade A iguais ou superiores aos da argamassa de cimento Portland, apesar de a porosidade livre das mesmas ser significativamente inferior à da argamassa de cimento. Este facto resulta de a rede porosa do granito ser completamente diferente da rede porosa da argamassa. Efectivamente, a rede porosa dos granitos é essencialmente fissural, muito bem interligada, proporcionando transferências capilares muito rápidas (Begonha et al, 1994, Alves, 1997, Begonha, 2001, Moutinho, 2005, Fojo, 2006, Costa Leite, 2008 e Bré, 2008).

Num estudo realizado por Lito et al. (2005), em provetes cada um constituído por duas carotes, de Granito do Porto unidas por argamassa de cimento Portland, verificaram que no ensaio de capilaridade, a água não atingia a carote situada acima da argamassa, uma vez que a mesma actuava como uma barreira impermeável à ascensão da água. Neste caso, interpretaram que existia uma grande diferença de absorção de água por capilaridade entre o granito e a argamassa de cimento Portland.

Este efeito de barreira impermeável das argamassas de cimento em cantarias é, na maior parte dos casos, diminuto uma vez que a espessura das argamassas de cimento aplicadas nas juntas de cantarias de granito se resume apenas a poucos centímetros a partir da superfície. A ascensão de água por capilaridade transfere-se assim facilmente através das argamassas de cal antigas existentes sob a camada superficial das argamassas de cimento recentes, não ocorrendo, conseqüentemente, o efeito de barreira nas juntas.

Quadro 5.16 – Valores limite do coeficiente de capilaridade A obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios de Portugal.

Monumento ou edifício estudado	A (g×cm ⁻² ×h ^{-1/2})
Mosteiro de São Miguel de Refojos – granito de grão médio a grosseiro (7,36%≤N ₄₈ ≤8,53%) (Begonha, 2000)	0,3504 – 0,5248
Mosteiro de São Miguel de Refojos – granito de grão médio a grosseiro (4,61%≤N ₄₈ ≤4,88%) (Begonha, 2000)	0,1582 – 0,1810
Granito do Porto (6,26%≤N ₄₈ ≤8,31%) (Begonha, 2001)	0,1830 – 0,4640
Granito do Porto (4,04%≤N ₄₈ ≤4,94%) (Begonha, 2001)	0,1110 – 0,1940
Granito do Porto (2,26%≤N ₄₈ ≤3,18%) (Begonha, 2001)	0,0565 – 0,0983
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por placas (6,29%≤N ₄₈ ≤7,46%) (Begonha, 2001)	0,1830 – 0,2520
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por placas (3,38%≤N ₄₈ ≤5,27%) (Begonha, 2001)	0,0920 – 0,1480
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por desagregação granular (3,96%≤N ₄₈ ≤4,29%) (Begonha, 2001)	0,0930 – 0,1210
Mosteiro de São João de Tarouca – granito de Vila Chã (6,83%≤N ₄₈ ≤8,58%) (Begonha, 2002c)	0,0891 – 0,2500
Igreja de São Pedro de Rates – granito de grão médio a grosseiro (6,09%≤N ₄₈ ≤7,68%) (Begonha, 2003b)	0,2241 – 0,3933
Igreja de São Pedro de Rates – granito de grão médio a grosseiro (4,16%≤N ₄₈ ≤5,87%) (Begonha, 2003b)	0,0793 – 0,3023
Igreja de São Pedro de Rates – granito de grão fino a médio (6,08%≤N ₄₈ ≤7,26%) (Begonha, 2003b)	0,2376 – 0,3622
Igreja de São Pedro de Rates – granito de grão fino a médio (4,77%≤N ₄₈ ≤5,88%) (Begonha, 2003b)	0,1745 – 0,2914
Igreja Matriz de Espinho – granito de grão grosseiro (2,12%≤N ₄₈ ≤4,00%) (Begonha, 2003c)	0,0475 – 0,1231
Igreja Matriz de Espinho – granito de grão médio (2,75%≤N ₄₈ ≤3,58%) (Begonha, 2003c)	0,0992 – 0,1503
Convento de São Gonçalo de Amarante – granito de grão fino (3,02%≤N ₄₈ ≤4,19%) (Begonha, 2004)	0,0837 – 0,2029
Igreja de Santa Maria de Leça – granito do Porto (3,00%≤N ₄₈ ≤3,66%) (Moutinho, 2005)	0,0988 – 0,1527
Igreja Matriz de Caminha – granito de grão médio (7,08%≤N ₄₈ ≤10,30%) (Fojo, 2006)	0,4949 – 0,8590
Igreja Matriz de Caminha – granito de grão médio (4,85%≤N ₄₈ ≤6,19%) (Fojo, 2006)	0,2451 – 0,3949
Igreja Matriz de Caminha – aplito (4,04%≤N ₄₈ ≤4,48%) (Fojo, 2006)	0,1783 – 0,2390
Sé Catedral de Évora (Costa, 2007)	0,4497 ± 0,0392
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfíroide, meteorizado (2,26%≤N ₄₈ ≤2,49%) (Costa Leite, 2008)	0,0481 – 0,0584
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfíroide, muito meteorizado (5,87%≤N ₄₈ ≤6,81%) (Costa Leite, 2008)	0,2053 – 0,3250
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – aplito moscovítico, meteorizado de cor cinzenta muito clara (2,58%≤N ₄₈ ≤2,82%) (Costa Leite, 2008)	0,0684 – 0,0807
Capela do Senhor da Pedra em Miramar – granito de Lavadores (4,42%≤N ₄₈ ≤5,26%) (Bré, 2008)	0,2165 – 0,2519

5.4.4 Ensaio de evaporação

O fenómeno de evaporação, da mesma forma que a absorção de água por capilaridade, está relacionado com as características do meio poroso.

Begonha (2001) refere que a secagem dos materiais porosos é um processo complexo, no qual intervêm, além das características do material, múltiplos factores que é necessário controlar, destacando-se a temperatura e a humidade relativa.

5.4.4.1 Método de ensaio

Os ensaios de evaporação decorreram segundo a metodologia proposta pelo Laboratoire de Péetrophysique do Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg e descritos por Hammecker (1993) e Begonha (2001).

Os provetes foram previamente secos em estufa a 50 °C e depois de submetidos ao ensaio de determinação da porosidade livre às 48 horas, conforme o método descrito no ponto 5.4.2.2. Imediatamente após estes procedimentos, os provetes saturados foram envolvidos por uma película de polietileno, deixando unicamente exposta a superfície que havia estado em contacto com a água no ensaio de absorção de água por capilaridade. Em seguida, os provetes foram colocados nas caixas de plástico hermeticamente fechadas, anteriormente utilizadas no ensaio de absorção por capilaridade. No interior das caixas haviam sido colocadas finas com uma solução sobressaturada de cloreto de sódio que à temperatura de 20 °C mantém a humidade relativa constante de cerca de 75%.

Ao longo do tempo, os provetes foram sucessivamente pesados até à estabilização da massa dos mesmos. O ensaio foi considerado terminado com uma variação das massas inferior a 0.02 g em duas pesagens sucessivas intervaladas de pelo menos 24 horas, correspondendo a cerca de 0,01% da massa dos provetes.

5.4.4.2 Resultados

O ensaio traduz-se pela perda de peso, por unidade de superfície, em função do tempo.

Os gráficos apresentam uma curva constituída por três segmentos. O primeiro segmento é rectilíneo com forte declive, que traduz o período no qual o fluxo de evaporação do vapor de água é constante (q).

O segundo segmento é curvo com declive cada vez menor, correspondendo a uma perda de peso cada vez menor por unidade de tempo. O ponto do gráfico onde a evaporação deixa de ser constante e igual ao fluxo q e que marca o fim do troço inicial rectilíneo e o início do troço intermédio curvo corresponde à saturação crítica.

A partir do instante em que ocorre a saturação crítica (t_{sc}), a evaporação deixa de se realizar na superfície do provete, passando a efectuar-se no seu interior.

O terceiro segmento é mais ou menos rectilíneo, mas de declive muito inferior ao do segmento inicial.

As Figuras 5.20 a 5.27 apresentam os resultados do ensaio de evaporação em provetes dos quatro tipos de argamassas.

As Figuras 5.20, 5.22, 5.24 e 5.26 dizem respeito a um dos provetes de cada tipo de argamassas.

As Figuras 5.21, 5.23, 5.25 e 5.27 apresentam os gráficos relativos a todos os provetes de cada um dos quatro tipos de argamassas ensaiados.

Os Quadros 5.17, 5.18 e 5.19 apresentam os valores do fluxo de evaporação (q) no segmento inicial, a saturação crítica (S_c), o tempo de saturação crítica (t_{sc}), assim como os valores médios e desvios-padrão obtidos em cada tipo de tipo de argamassa.

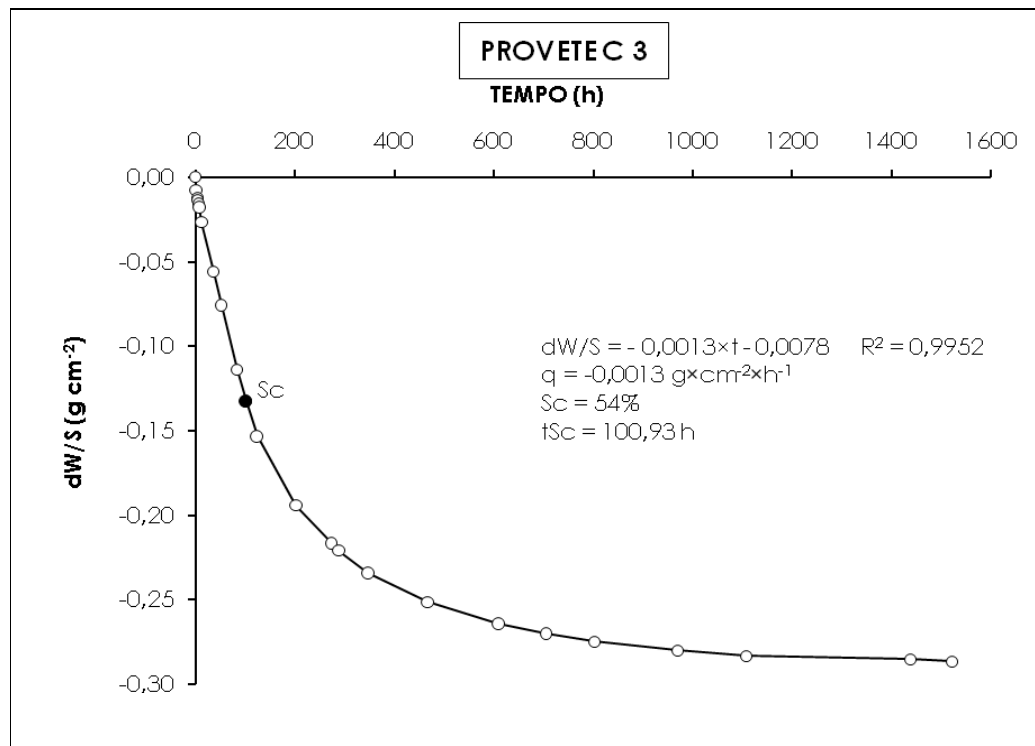


Figura 5.20 – Curva de evaporação de vapor de água do provete de argamassa de cimento Portland C3

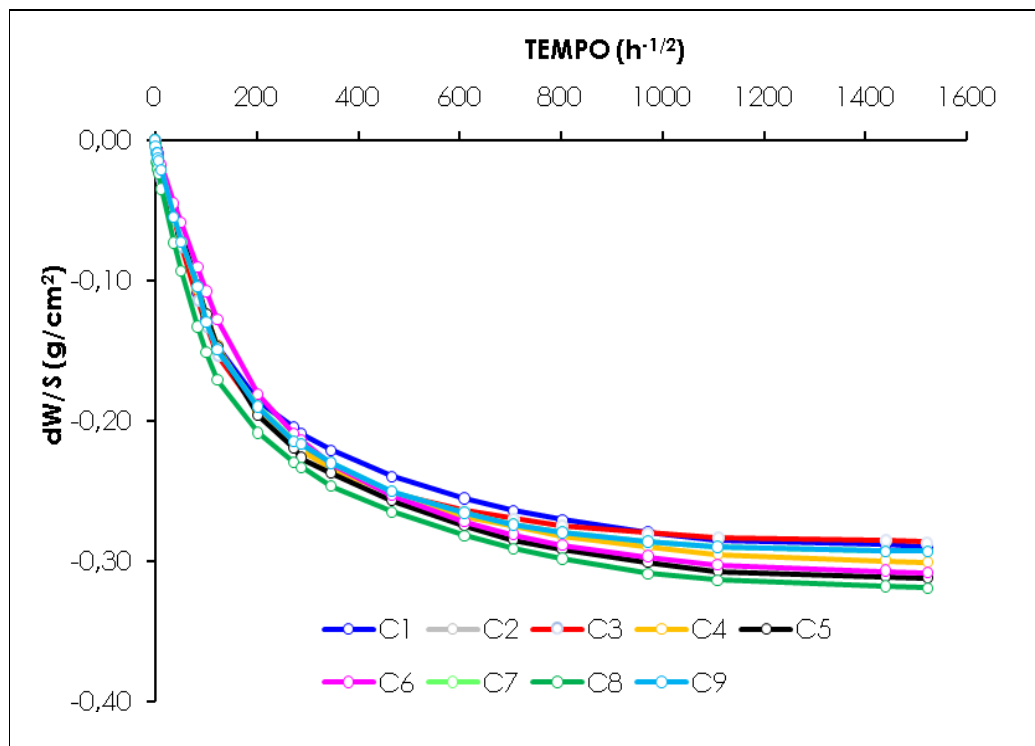


Figura 5.21 – Curvas de evaporação dos provetes de argamassa de cimento Portland (C)

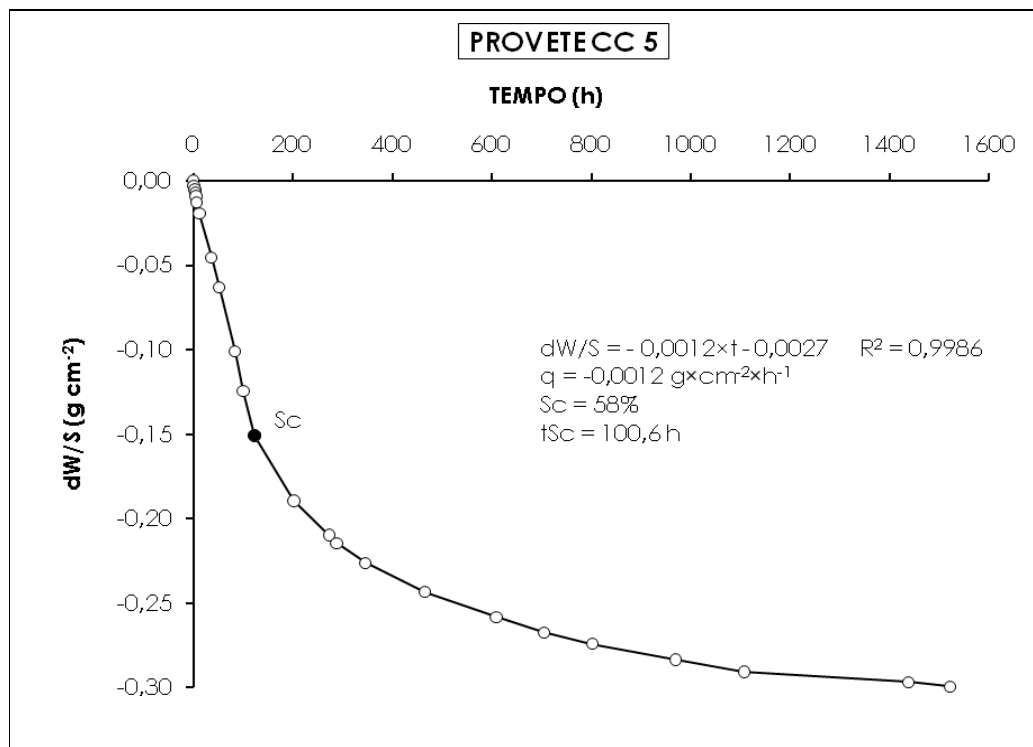


Figura 5.22 – Curva de evaporação de vapor de água do provete de argamassa de cimento Portland e cinzas volantes CC5

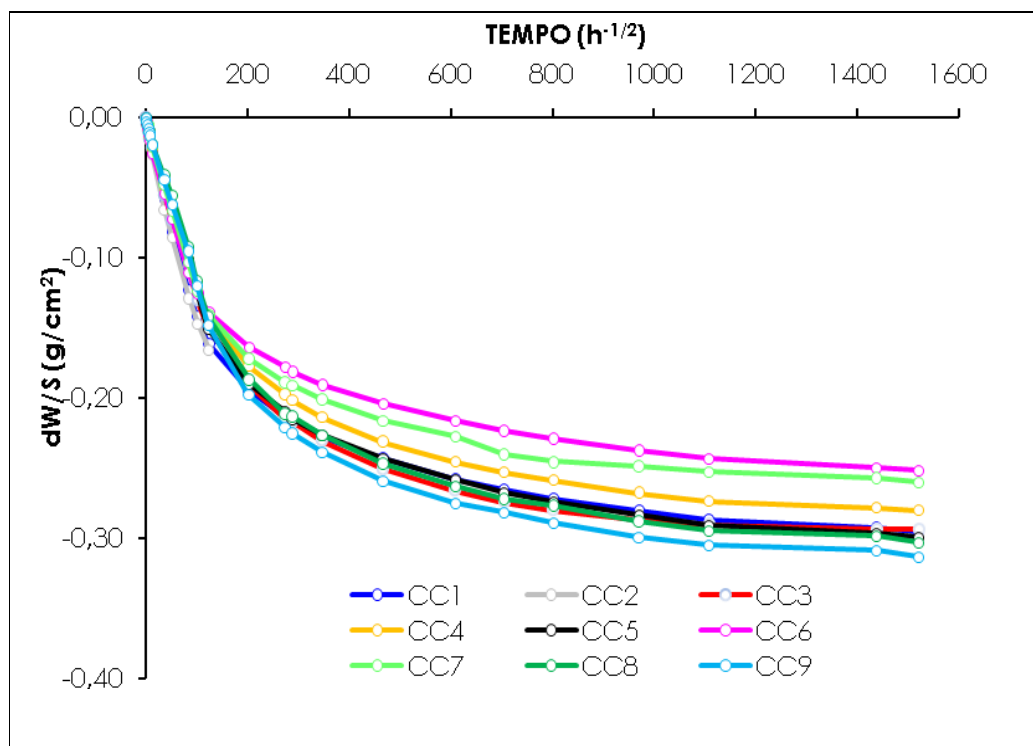


Figura 5.23 – Curvas de evaporação dos provetes de argamassa de cimento Portland e cinzas volantes (CC)

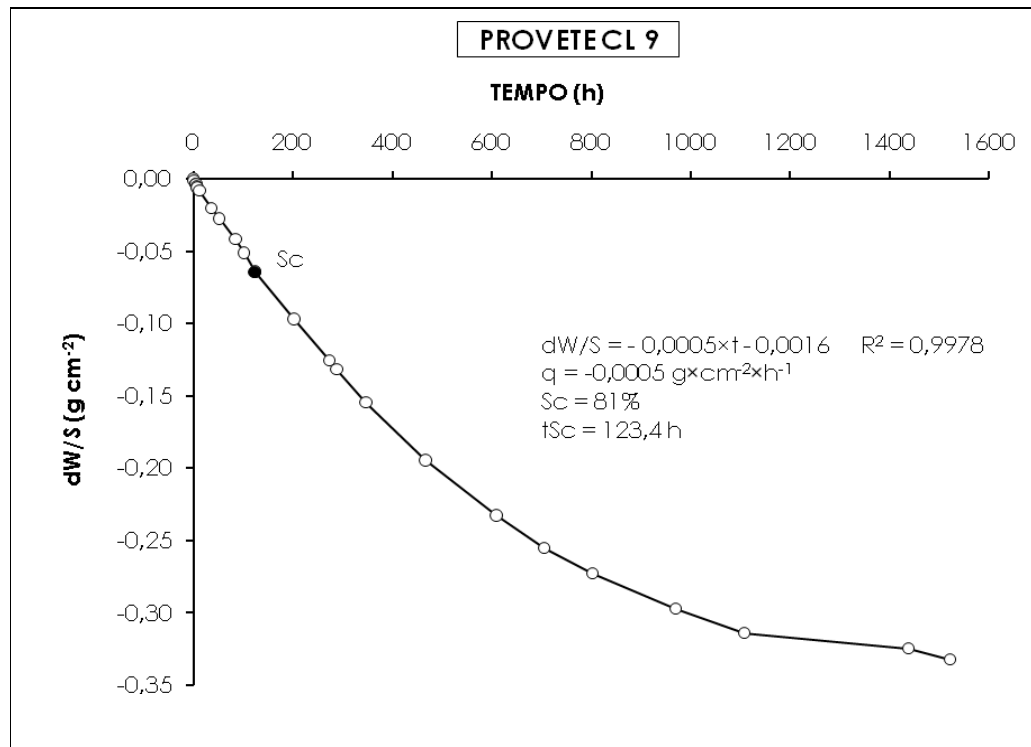


Figura 5.24 – Curva de evaporação de vapor de água do provete de argamassa de cimento calcário CL9

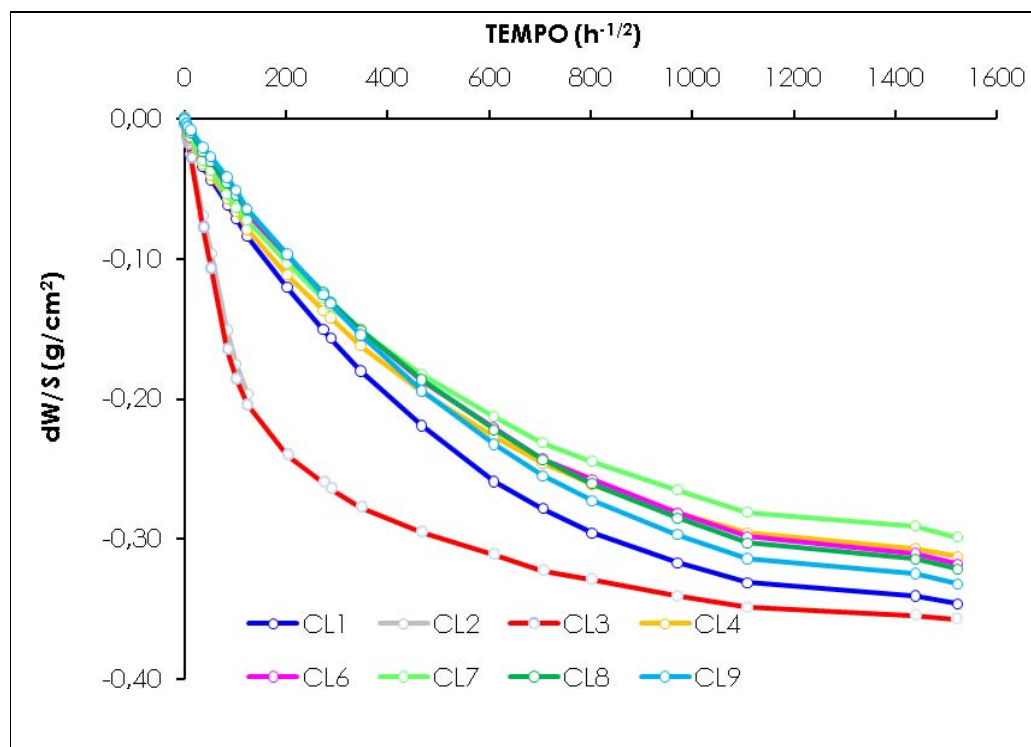


Figura 5.25 – Curva de evaporação dos provetes de argamassa de cimento calcário (CL)

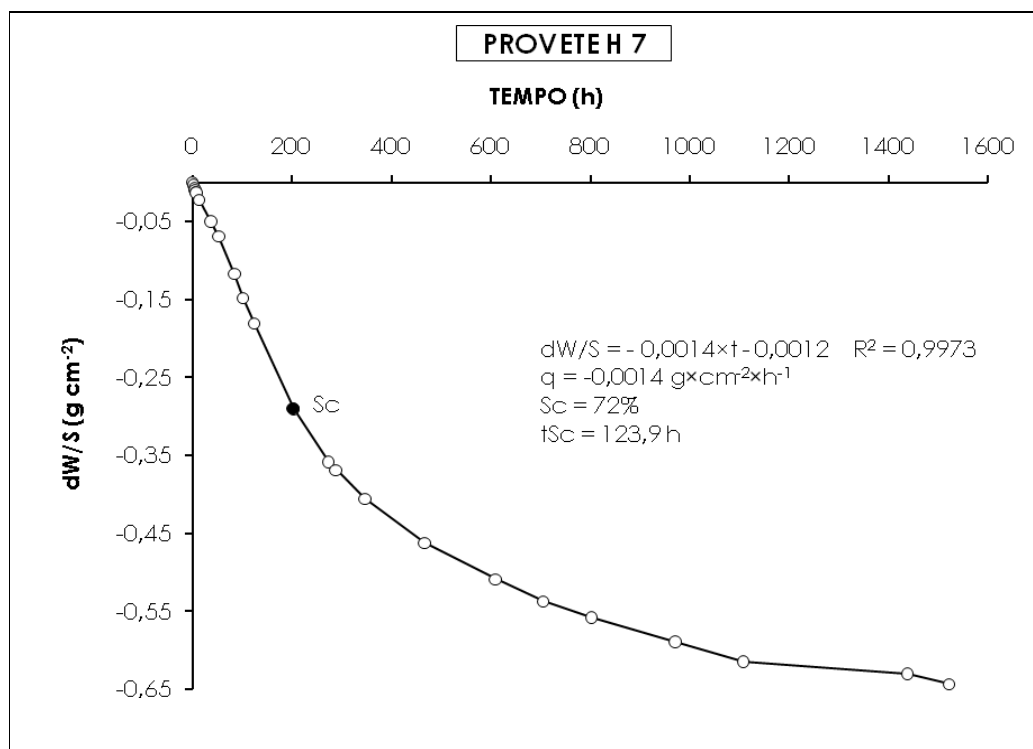


Figura 5.26 – Curva de evaporação de vapor de água – provete de argamassa de cal hidráulica (H7)

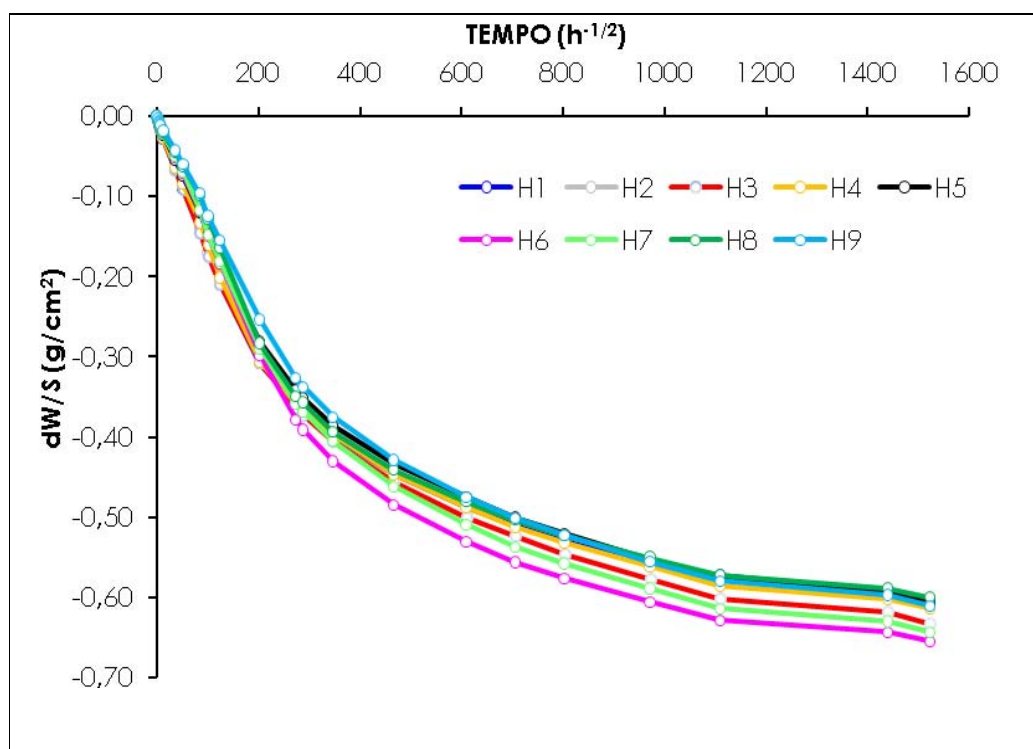


Figura 5.27 – Curva de evaporação dos provetes de argamassa de cal hidráulica (H)

Quadro 5.17 – Valores do fluxo de evaporação (q)

PROVETE	q (g×cm ⁻² × h ⁻¹)		
	q	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
C1	-0,0012	-0,0012	0,0001
C2	-0,0012		
C3	-0,0013		
C4	-0,0012		
C5	-0,0012		
C6	-0,0010		
C7	-0,0012		
C8	-0,0015		
C9	-0,0012		

PROVETE	q (g×cm ⁻² × h ⁻¹)		
	q	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CC1	-0,0014	-0,0012	0,0001
CC2	-0,0015		
CC3	-0,0012		
CC4	-0,0012		
CC5	-0,0012		
CC6	-0,0012		
CC7	-0,0012		
CC8	-0,0011		
CC9	-0,0011		

PROVETE	q (g×cm ⁻² × h ⁻¹)		
	q	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CL1	-0,0006	-0,0009	0,0006
CL2	-0,0017		
CL3	-0,0019		
CL4	-0,0006		
CL5	----		
CL6	-0,0005		
CL7	-0,0006		
CL8	-0,0005		
CL9	-0,0005		

PROVETE	q (g×cm ⁻² × h ⁻¹)		
	q	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
H1	-0,0017	-0,0015	0,0002
H2	-0,0016		
H3	-0,0017		
H4	-0,0016		
H5	-0,0014		
H6	-0,0014		
H7	-0,0014		
H8	-0,0013		
H9	-0,0012		

Quadro 5.18 – Valores da saturação crítica (Sc)

PROVETE	Sc (%)		
	Sc	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
C1	56	54	4
C2	56		
C3	54		
C4	51		
C5	60		
C6	58		
C7	49		
C8	52		
C9	49		

PROVETE	Sc (%)		
	Sc	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CC1	52	55	5
CC2	50		
CC3	56		
CC4	56		
CC5	58		
CC6	50		
CC7	53		
CC8	62		
CC9	62		

PROVETE	Sc (%)		
	Sc	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CL1	76	71	13
CL2	52		
CL3	48		
CL4	75		
CL5	---		
CL6	81		
CL7	76		
CL8	80		
CL9	81		

PROVETE	Sc (%)		
	Sc	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
H1	65	70	3
H2	68		
H3	67		
H4	67		
H5	70		
H6	72		
H7	72		
H8	72		
H9	74		

Quadro 5.19 – Valores do tempo saturação crítica (tsc)

PROVETE	tsc (h)			PROVETE	tsc (h)		
	tsc	MÉDIA	DESVIO PADRÃO		tsc	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
C1	101,0	110,8	11,7	CC1	100,7	100,6	0,2
C2	101,0			CC2	100,6		
C3	100,9			CC3	101,0		
C4	123,2			CC4	100,6		
C5	100,9			CC5	100,6		
C6	123,2			CC6	101,0		
C7	123,3			CC7	100,5		
C8	100,8			CC8	100,5		
C9	123,0			CC9	100,4		

PROVETE	tsc (h)			PROVETE	tsc (h)		
	tsc	MÉDIA	DESVIO PADRÃO		tsc	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
CL1	123,8	115,2	11,5	H1	124,0	123,9	0,2
CL2	101,3			H2	124,0		
CL3	101,3			H3	124,0		
CL4	123,6			H4	124,0		
CL5	----			H5	124,0		
CL6	101,2			H6	123,4		
CL7	123,5			H7	123,9		
CL8	123,5			H8	123,8		
CL9	123,4			H9	123,8		

5.4.4.3 Discussão de resultados

O Quadro 5.17 mostra que o fluxo de evaporação médio q é igual nos provetes de argamassa de cimento Portland (C) e nos de cimento Portland com cinzas volantes (CC), sendo igual a $-0,0012 \pm 0,0001 \text{ (g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1})$. Os provetes de argamassa de cimento calcário apresentam fluxo de evaporação médio um pouco inferior ($-0,0009 \pm 0,0006 \text{ g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1}$) e os de argamassa de cal hidráulica um valor médio um pouco superior ($-0,0015 \pm 0,0002 \text{ g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1}$).

Constata-se assim, que a substituição de 50% de cimento Portland por cinzas volantes não teve qualquer influência no valor do fluxo de evaporação.

Com o intuito de comparar os fluxos de evaporação das argamassas com os de pedras de granito em cantarias, apresentam-se no Quadro 5.20 os valores de fluxo de evaporação obtidos por diversos autores em granitos de duas micas utilizados em cantarias em diferentes monumentos do Norte de Portugal.

Quadro 5.20 – Valores médios e respectivos desvios -padrão do fluxo de evaporação q obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios do Norte de Portugal.

Monumento ou edifício estudado	q ($\text{g}\times\text{cm}^{-2}\times\text{h}^{-1}$)
Hospital de Santo António – pedras de paredes interiores de granito do Porto meteorizado mas não deteriorado ($1,70\%\leq N_{48}\leq 2,84\%$) (Begonha, 2001)	$-0,0045 \pm 0,0006$
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por placas ($6,29\%\leq N_{48}\leq 7,46\%$) (Begonha, 2001)	$-0,0042 \pm 0,0000$
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por desagregação granular ($3,96\%\leq N_{48}\leq 4,29\%$) (Begonha, 2001)	$-0,0035 \pm 0,0007$
Igreja Matriz de Caminha – granito de grão médio ($7,08\%\leq N_{48}\leq 10,30\%$) (Fojo, 2006)	$-0,0022 \pm 0,0004$
Igreja Matriz de Caminha – granito de grão médio ($4,85\%\leq N_{48}\leq 6,19\%$) (Fojo, 2006)	$-0,0018 \pm 0,0002$
Igreja Matriz de Caminha – aplito ($4,04\%\leq N_{48}\leq 4,48\%$) (Fojo, 2006)	$-0,0026 \pm 0,0004$
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfíroide, meteorizado ($2,26\%\leq N_{48}\leq 2,49\%$) (Costa Leite, 2008)	$-0,0032 \pm 0,0003$
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfíroide, muito meteorizado ($5,87\%\leq N_{48}\leq 6,81\%$) (Costa Leite, 2008)	$-0,0027 \pm 0,0003$
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – aplito moscovítico, meteorizado de cor cinzenta muito clara ($2,58\%\leq N_{48}\leq 2,82\%$) (Costa Leite, 2008)	$-0,0042 \pm 0,0004$
Capela do Senhor da Pedra em Miramar – granito de Lavadores ($4,42\%\leq N_{48}\leq 5,26\%$) (Bré, 2008)	$-0,0033 \pm 0,0004$

Verifica-se que os fluxos de evaporação das argamassas de cimento Portland e cimento Portland e cinzas volantes são bastante menores que os de granito, sendo 1,5 a 3,75 vezes menores que os valores mínimo ($-0,0018 \text{ g}\times\text{cm}^{-2}\times \text{h}^{-1}$) e máximo ($-0,0045 \text{ g}\times\text{cm}^{-2}\times \text{h}^{-1}$) apresentados no Quadro 5.20, apesar de a porosidade livre às 48 horas, dos provetes

graníticos ser muito inferior ($1,70\% \leq N_{48} \leq 10,30\%$) relativamente à porosidade dos provetes de argamassa ($14,01\% \leq N_{48} \leq 14,10\%$).

Os provetes de argamassa de cimento de calcário são 2 a 5 vezes menores que os de granito e os de cal hidráulica 1,2 vezes a 3 vezes inferior.

Os fluxos de evaporação mais elevados registados nos granitos, comparativamente aos das argamassas, podem ser justificados pela diferente estrutura do meio poroso da pedra, basicamente constituída por fissuras finas e muito bem interligadas.

O Quadro 5.18 mostra que a saturação crítica média S_c é praticamente igual nos provetes de argamassa de cimento Portland (C) e nos de cimento Portland com cinzas volantes (CC), sendo respectivamente iguais a $54 \pm 4\%$ e $55 \pm 5\%$. Os provetes de argamassa de cimento calcário e os de cal hidráulica apresentam saturações críticas médias significativamente superiores e respectivamente iguais a $71 \pm 13\%$ e $70 \pm 3\%$.

Constata-se assim, que a substituição de 50% de cimento Portland por cinzas volantes não teve qualquer influência no valor da saturação crítica.

Atendendo unicamente aos valores médios da saturação crítica, os provetes de argamassas de cimento calcário e os de cal hidráulica são os que potencialmente exibem maior risco, face aos efeitos associados à cristalização dos minerais de sais solúveis, uma vez que maior quantidade de água evapora no interior das suas redes porosas.

No entanto, os riscos resultantes da cristalização dos minerais de sais solúveis, dependem, em grande parte, da estrutura porosa do material, nomeadamente a dimensão dos poros e o seu grau de interligação.

Com o objectivo de comparar os resultados de saturação crítica das argamassas com as de pedras de granito em cantarias, apresentam-se no Quadro 5.21 os valores de saturação crítica obtidos por diferentes autores em granitos de duas micas utilizados em cantarias em vários monumentos do Norte de Portugal.

Comparando os valores dos Quadros 5.18 e 5.21, verifica-se que a saturação crítica média dos provetes de granito varia entre 33% e 77%, isto é, entre valores muito menores, semelhantes ou muito superiores aos registados nas argamassas de cimento Portland ou de

cimento Portland e cinzas volantes (54% a 55%). São muito menores ou semelhantes aos valores das argamassas de cimento de calcário e de cal hidráulica (70 a 71%).

Quadro 5.21 – Valores médios e respectivos desvios-padrão da saturação crítica S_c obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios do Norte de Portugal.

Monumento ou edifício estudado	S_c (%)
Hospital de Santo António – pedras de paredes interiores de granito do Porto meteorizado mas não deteriorado ($1,70\% \leq N_{48} \leq 2,84\%$) (Begonha, 2001)	$59,2 \pm 1,1$
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por placas ($6,29\% \leq N_{48} \leq 7,46\%$) (Begonha, 2001)	$46,0 \pm 1,0$
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por desagregação granular ($3,96\% \leq N_{48} \leq 4,48\%$) (Begonha, 2001)	$66,2 \pm 3,3$
Igreja Matriz de Caminha – granito de grão médio ($7,08\% \leq N_{48} \leq 10,30\%$) (Fojo, 2006)	$33,1 \pm 4,2$
Igreja Matriz de Caminha – granito de grão médio ($4,85\% \leq N_{48} \leq 6,19\%$) (Fojo, 2006)	$40,2 \pm 3,2$
Igreja Matriz de Caminha – aplito ($4,04\% \leq N_{48} \leq 4,48\%$) (Fojo, 2006)	$46,4 \pm 6,2$
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfíroide, meteorizado ($2,26\% \leq N_{48} \leq 2,49\%$) (Costa Leite, 2008)	$55,5 \pm 3,3$
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfíroide, muito meteorizado ($5,87\% \leq N_{48} \leq 6,81\%$) (Costa Leite, 2008)	$37,4 \pm 5,9$
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – aplito moscovítico, meteorizado de cor cinzenta muito clara ($2,58\% \leq N_{48} \leq 2,82\%$) (Costa Leite, 2008)	$70,7 \pm 2,8$
Capela do Senhor da Pedra em Miramar – granito de Lavadores ($4,42\% \leq N_{48} \leq 5,26\%$) (Bré, 2008)	$76,8 \pm 6,2$

O Quadro 5.22 mostra que o tempo médio de saturação crítica t_{sc} é idêntico nos provetes de argamassa de cimento Portland (C) e nos de cimento de calcário (CL), sendo respectivamente iguais a 110,8 h e 115,2 h. Os provetes de argamassa de cimento Portland e cinzas volantes apresentam tempo médio de saturação crítica um pouco inferior (100,6 h) e os de cal hidráulica exibem tempo médio de saturação crítica um pouco maior (123,9 h).

Constata-se assim, que a substituição de 50% de cimento Portland por cinzas volantes diminui em 9,2% o tempo médio de saturação crítica relativamente ao tempo médio registado nos provetes de argamassa de cimento.

Com o propósito de comparar os tempos médios de saturação crítica das argamassas com as de pedras de granito em cantarias, apresentam-se no Quadro 5.21 os valores do tempo de saturação crítica de diversos granitos de duas micas aplicados em cantarias em vários monumentos do Norte de Portugal.

Quadro 5.22 – Valores médios e respectivos desvios-padrão do tempo de saturação crítica t_{sc} obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios do Norte de Portugal.

Monumento ou edifício estudado	t_{sc} (h)
Hospital de Santo António – pedras de paredes interiores de granito do Porto meteorizado mas não deteriorado ($1,70\% \leq N_{48} \leq 2,84\%$) (Begonha, 2001)	$9,4 \pm 1,8$
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por placas ($6,29\% \leq N_{48} \leq 7,46\%$) (Begonha, 2001)	$45,6 \pm 6,0$
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por desagregação granular ($3,96\% \leq N_{48} \leq 4,48\%$) (Begonha, 2001)	$23,7 \pm 8,6$
Igreja Matriz de Caminha – granito de grão médio ($7,08\% \leq N_{48} \leq 10,30\%$) (Fojo, 2006)	$141,4 \pm 31,1$
Igreja Matriz de Caminha – granito de grão médio ($4,85\% \leq N_{48} \leq 6,19\%$) (Fojo, 2006)	$90,8 \pm 17,2$
Igreja Matriz de Caminha – aplito ($4,04\% \leq N_{48} \leq 4,48\%$) (Fojo, 2006)	$44,5 \pm 8,5$
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfíroide, meteorizado ($2,26\% \leq N_{48} \leq 2,49\%$) (Costa Leite, 2008)	$15,3 \pm 0,1$
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfíroide, muito meteorizado ($5,87\% \leq N_{48} \leq 6,81\%$) (Costa Leite, 2008)	$78,4 \pm 14,3$
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – aplito moscovítico, meteorizado de cor cinzenta muito clara ($2,58\% \leq N_{48} \leq 2,82\%$) (Costa Leite, 2008)	$9,0 \pm 0,1$
Capela do Senhor da Pedra em Miramar – granito de Lavadores ($4,42\% \leq N_{48} \leq 5,26\%$) (Bré, 2008)	$12,4 \pm 1,8$

Analisando os tempos de saturação crítica indicados no Quadro 5.22, observa-se uma grande diferença de tempo de saturação crítica entre as argamassas e o granito. De facto, na maioria dos casos apresentados, o tempo durante o qual a água evapora pela superfície do granito é nitidamente inferior ao do das argamassas, à excepção do granito de grão médio mais deteriorado da Igreja Matriz de Caminha, com valores de porosidade livre compreendidos entre 7,08% e 10,30%.

No processo de evaporação de uma cantaria de granito é igualmente importante a determinação do tempo necessário para se efectuar a secagem total dos materiais (t_{total}). Os

resultados obtidos neste trabalho referem-se a provetes de argamassas com 40 mm × 40 mm × 40 mm, ou seja, com uma relação volume/superfície de evaporação igual a 4. Nos provetes de granito apresentados nos Quadros 5.20, 5.21 e 5.22, a relação volume/superfície de evaporação é igual a 6, pelo que, o tempo total para secagem deveria ser superior.

No Quadro 5.23, apresentam-se os resultados dos tempos totais de secagem (t_{total}) dos provetes de argamassa do presente trabalho (Anexo 5) e os tempos totais de secagem dos provetes de granito indicados nos quadros anteriores.

Quadro 5.23 – Valores médios dos tempos totais de secagem (t_{total}) obtidos em granitos de duas micas empregues em monumentos e edifícios do Norte de Portugal.

Argamassas e granitos de monumentos ou edifícios estudados	(t_{total}) (h)
Provetes de argamassa de cimento Portland (C), argamassa de cimento Portland e cinzas volantes (CC), argamassa de cimento de calcário (CL) e argamassa de cal hidráulica (H)	1521 - 1522
Hospital de Santo António – pedras de paredes interiores de granito do Porto meteorizado mas não deteriorado ($1,70\% \leq N_{48} \leq 2,84\%$) (Begonha, 2001)	142 - 224
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por placas ($6,29\% \leq N_{48} \leq 7,46\%$) (Begonha, 2001)	343 - 365
Hospital de Santo António – pedras de granito do Porto afectadas por desagregação granular ($3,96\% \leq N_{48} \leq 4,48\%$) (Begonha, 2001)	321 - 365
Igreja Matriz de Caminha – granito de grão médio ($7,08\% \leq N_{48} \leq 10,30\%$) (Fojo, 2006)	602 - 648
Igreja Matriz de Caminha – granito de grão médio ($4,85\% \leq N_{48} \leq 6,19\%$) (Fojo, 2006)	527 - 648
Igreja Matriz de Caminha – aplito ($4,04\% \leq N_{48} \leq 4,48\%$) (Fojo, 2006)	441 - 577
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfiróide, meteorizado ($2,26\% \leq N_{48} \leq 2,49\%$) (Costa Leite, 2008)	487
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – granito de duas micas de grão médio a grosseiro com tendência a porfiróide, muito meteorizado ($5,87\% \leq N_{48} \leq 6,81\%$) (Costa Leite, 2008)	602
Igreja de Santa Clara de Vila do Conde – aplito moscovítico, meteorizado de cor cinzenta muito clara ($2,58\% \leq N_{48} \leq 2,82\%$) (Costa Leite, 2008)	487
Capela do Senhor da Pedra em Miramar – granito de Lavadores ($4,42\% \leq N_{48} \leq 5,26\%$) (Bré, 2008)	562 - 656

O tempo total de secagem dos granitos varia muito e dentro de cada tipo de granito é muito influenciado pelo valor da porosidade livre, isto é, pelo grau de meteorização e/ou deterioração variando entre 142 horas e 656 horas.

Se os provetes de argamassas tivessem uma relação volume/superfície de evaporação igual à dos provetes de granito, o valor do tempo total de secagem seria superior aos registados neste trabalho (média de 1521,5 horas).

Considerando, ainda assim, os valores apresentados no Quadro 5.23, o tempo total de secagem dos provetes de argamassas é 2,3 a 10,7 vezes superior aos tempos máximo e mínimo de secagem referenciados nos provetes de granito.

Em cantarias ou alvenarias de granito em que foram aplicadas argamassas de cimento ou de cal hidráulica nas juntas, conclui-se que, após a secagem das pedras de granito, as argamassas mantêm-se molhadas por longos períodos de tempo, permitindo o fluxo de água por capilaridade das argamassas para as zonas das pedras em contacto com as mesmas.

5.4.5 Ensaios com ciclos de molhagem e secagem

Diversos autores como Papayianni e Theocharidou (1993), Fassina et al. (1996a), Fassina et al. (1996b) Begonha (2001), Moutinho (2005), Costa Leite (2008), Bré (2008) têm observado a existência de anomalias em alvenarias antigas de pedra associadas à ocorrência de eflorescências alguns anos após a execução de trabalhos de reparação, tanto à superfície da argamassa como à superfície das pedras em contacto com as mesmas. Atribuem as causas para o aparecimento das eflorescências à existência de cal livre, aos álcalis que são transportados pela água no interior das argamassas e ao contacto com um meio aquoso rico em sulfatos ou em cloretos.

Basicamente este tipo de deterioração surge em resultado de ciclos alternados de secagem e molhagem, implicando na maioria das vezes a degradação dos materiais pétreos.

Com o objectivo de simular os fenómenos que conduzem à formação de eflorescências, efectou-se em laboratório uma reprodução de ciclos de molhagem e secagem utilizando água da chuva recolhida na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

5.4.5.1 Ciclos de molhagem e secagem

Os ciclos de secagem e molhagem decorreram em duas fases distintas.

Na primeira fase, os provetes de pedra e argamassas (PAC, PACal, PACCV e PACalCV) foram submetidos aos seguintes ciclos:

- Molhagem por absorção de água, por capilaridade durante 12 horas;
- Secagem a uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa de 75 % durante 12 horas.

Na segunda fase, os mesmos provetes de pedra e argamassas foram sujeitos aos seguintes ciclos:

- Molhagem por absorção de água, por capilaridade durante 12 horas;
- Secagem em estufa a uma temperatura de 55 °C durante 12 horas.

As primeira e segunda fases decorreram cada uma durante 20 dias, correspondendo portanto cada uma a 20 ciclos de secagem e molhagem.

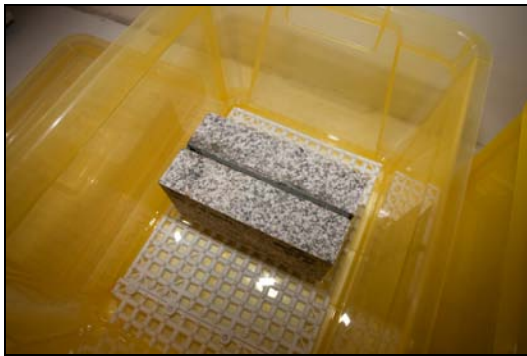
Foram utilizadas quatro caixas, de material plástico, com fecho hermético (Figura 5.28a) Em duas destas, introduziu-se directamente no seu interior 1,50 l de água da chuva recolhida na FEUP ficando com uma altura média de 2 cm (Figura 5.28b). Nas restantes duas caixas, foi colocado um recipiente com uma solução sobressaturada de cloreto de sódio que mantém a humidade relativa constante e igual a 75 % no interior da caixa (Figura 5.28c)

A colocação dos provetes foi efectuada de forma, a que a maior superfície das duas bases da pedra e argamassa ficasse em contacto com a superfície das caixas (Figura 5.28c).

Utilizaram-se duas caixas onde decorreram os ensaios com os provetes de cal aérea e de cal aérea com cinzas volantes e outras duas para os provetes de cimento Portland e de cimento com cinzas volantes



a) Provetes no interior das caixas



b) Caixa onde se realizou o ciclo de molhagem



c) Caixa onde se realizou o ciclo de secagem na primeira fase dos ensaios

Figura 5.28- Equipamentos utilizados nos ensaios de molhagem e secagem

5.4.5.2 Observações durante os ensaios

No final do primeiro ciclo de molhagem, após 12 horas de absorção por capilaridade da água da chuva verificou-se que franja capilar havia atingido o topo de todos os provetes (cerca de 10 de altura)

Passados os primeiros 15 dias de 2 ciclos diários da primeira fase de ensaios, o provete de alvenaria com argamassa de cimento Portland (PAC) possuía uma menor quantidade de argamassa. Apesar de todos os provetes apresentarem uma degradação progressiva na argamassa, o PAC sobressaía no conjunto.

Em seguida apresentam-se as Figuras 5.29, 5.30, 5.31 e 5.32 que mostram o aspecto geral de todos os provetes após 15 dias de ciclos de molhagem e secagem.



Figura 5.29 – PAC após 15 dias de ciclos diários



Figura 5.30 – PACal após 15 dias de ciclos diários



Figura 5.31 – PACCV após 15 dias de ciclos diários



Figura 5.32 – PACalCV após 15 dias de ciclos diários

Após o primeiro ciclo de molhagem, em que água atingiu o topo de todos os provetes, verificou-se que os provetes não secaram após as 12 horas em que estiverem sujeitos a evaporação ao longo do primeiro ciclo de secagem em ambiente com 75 % de humidade relativa e 20 °C de temperatura. O mesmo sucedeu nos restantes 19 ciclos de secagem que se seguiram durante a primeira fase de campanha de ensaios.

A justificação provável é a dimensão considerável dos provetes. De facto a elevada espessura da pedra (cerca de 5 cm) obriga a ciclos de evaporação consideravelmente maiores do que 12 horas.

No final da primeira fase de ciclos, observou-se alguma desagregação das argamassas de cimento e cimento/cinzas volantes relativamente às de cal. Denotou-se algum afastamento das argamassas de cimento relativamente às pedras de granito do Porto.

Na tentativa de corrigir a ausência de uma secagem eficaz dos provetes ocorrida na primeira fase, optou-se por efectuar os ciclos de secagem em estufa a 55 °C de temperatura.

Na segunda fase de ciclo, verificou-se por observação visual, no provete com cimento e cinzas volantes (PCCV), a existência de pequenas eflorescências de cor branca sobre a superfície da argamassa no topo do provete. Os restantes provetes não apresentam grandes alterações, em termos de observação visual.

Devido à temperatura mais elevada de secagem na segunda fase, verificou-se a secagem completa dos provetes e a absorção de água no ciclo de molhagem subsequente, pelo que houve a necessidade de recolocar água da chuva no interior dos caixas para manter a altura de água de 2 cm.

5.4.5.3 Estudo mineralógico realizado por microscopia electrónica de varrimento

As observações por microscopia electrónica de varrimento realizaram-se no Centro de Materiais da Universidade o Porto (CEMUP), recorrendo ao modelo Jeol JSM – 6301F. As amostras foram revestidas a ouro, observadas e analisadas por electrões secundários a 15 keV e 10 keV e por períodos de tempo útil ("livetime") iguais a 60 segundos.

Esta técnica permitiu a caracterização mineralógica das amostras retiradas dos quatros provetes (PAC, PACCV, PACal e PACalCV). Como termo de comparação, foi igualmente analisada uma amostra da argamassa de cimento Portland do provete número 1 envelhecido por Lito et al (2005) com ciclos de molhagem e secagem, mas não analisado por estes autores no MEV. Este provete é constituído pelas carotes HSA 126 e HSA 238 de granito do Porto provenientes do Hospital de Santo António e argamassa de cimento.

Dos provetes ensaiados em laboratório, foram retiradas sete amostras para estudo por MEV:

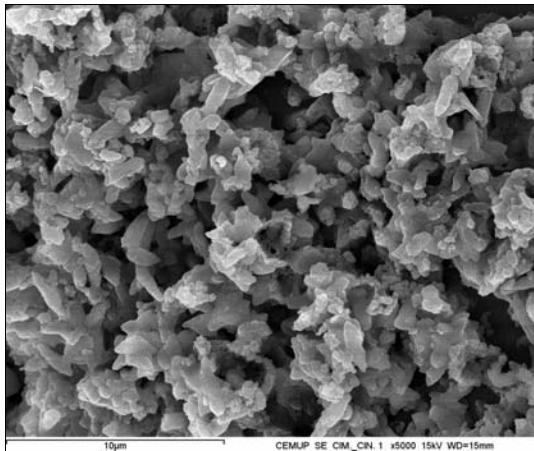
- CIM4 - Argamassa de cimento do provete (PAC): contacto granito/ argamassa (interior) sobre a argamassa;
- CIM5 - Argamassa de cimento do provete (PAC): contacto granito/ argamassa (interior) sobre o granito;
- CIM_CIN1 - Argamassa de cimento e cinzas volantes do provete (PACCV): superfície exterior da junta;
- CIM_CIN2 - Argamassa cimento e cinzas volantes do provete (PACCV): contacto granito/argamassa (interior) – sobre o granito;
- CIM_CIN3 - Argamassa cimento+cinzas volantes do provete (PACCV): contacto (interior) – sobre a argamassa;
- CAL1 – Argamassa de cal aérea (PAcal): contacto granito/argamassa de cal aérea (interior) – sobre o granito;
- CAL_CIN1 - Argamassa de cal aérea e cinzas volantes (PAcalCV): contacto granito/argamassa de cal aérea e cinzas volantes (interior) – sobre o granito;
- HSA 126_128 – Superfície de contacto da argamassa de cimento com a carote HSA 128 – análise da superfície da pedra (HSA 128).

O Quadro 5.24 apresenta os minerais de sais solúveis identificados por MEV.

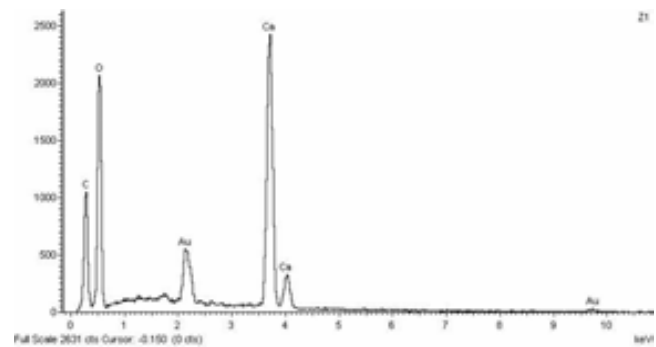
Quadro 5.24 – Minerais e sais solúveis presentes no provetes PAC, PACCV, PAcal, PAcalCV e HSA 126_128

Proвете	Amostras	Minerais e sais solúveis observados e analisados no MEV
PAC	CIM4	Calcite e etringite
	CIM5	Calcite e etringite
PACCV	CIM_CIN1	Singenite, calcite e gesso
	CIM_CIN2	Calcite
	CIM_CIN3	Calcite e etringite
PAcal	CAL1	Calcite
PAcalCV	CAL_CIN1	Calcite
HSA 126_128	HSA 126_128	Calcite

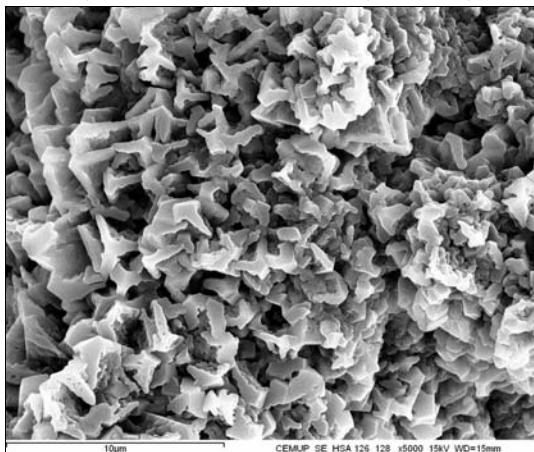
Nas Figuras 5.33 a 5.35, bem como no Anexo A6, apresentam-se imagens e espectros dos minerais e sais solúveis identificados por MEV.



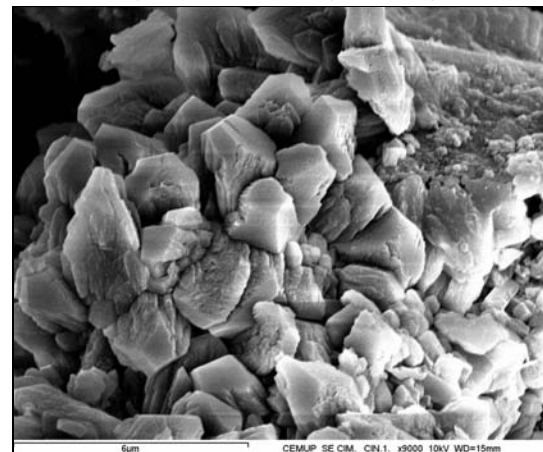
a) Calcite - cristais anédricos (CIM_CIN1)



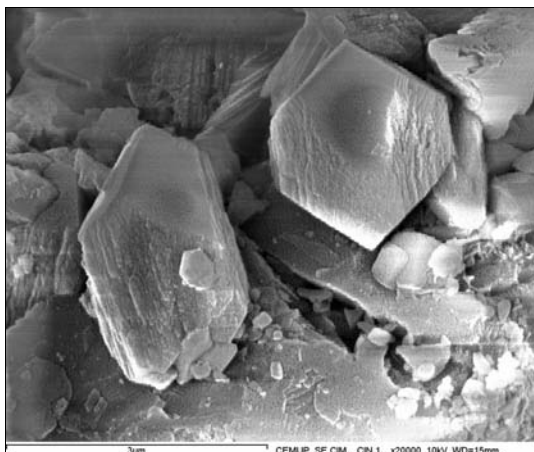
b) Calcite – espectro (CIM_CIN1)



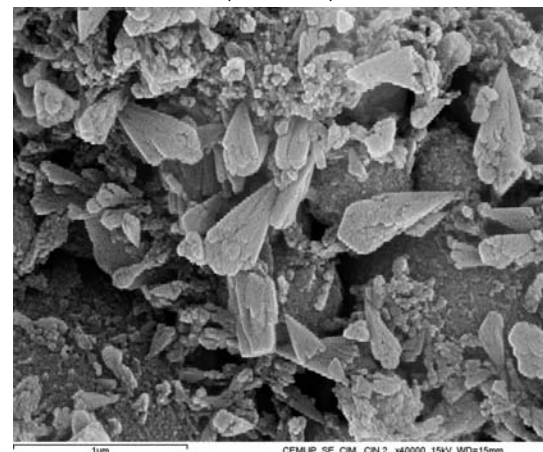
c) Calcite - cristais anédricos (HSA_126_128)



d) Calcite - cristais subédricos alguns parcialmente dissolvidos (CIM_CIN1)

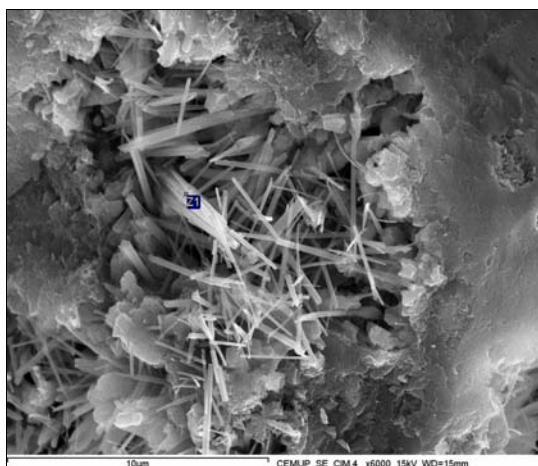


e) Calcite - cristais subédricos e euédricos (CIM_CIN1)

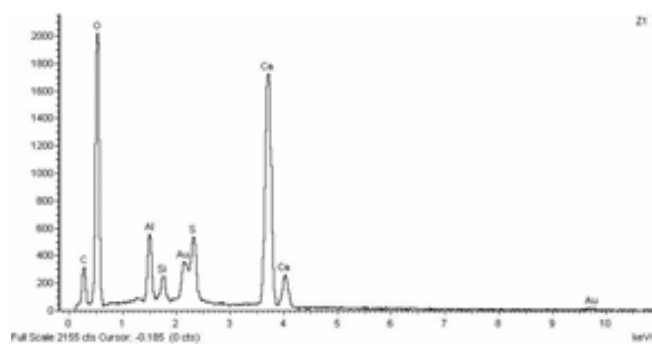


f) Calcite - cristais subédricos e euédricos escalenoédricos (CIM_CIN2)

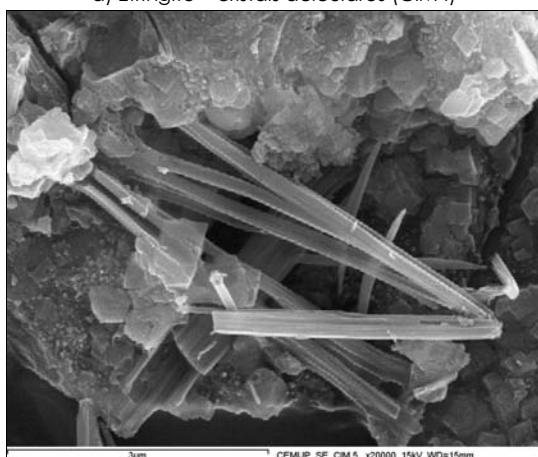
Figura 5.33 – Calcite - Imagens e espectro obtidos por MEV



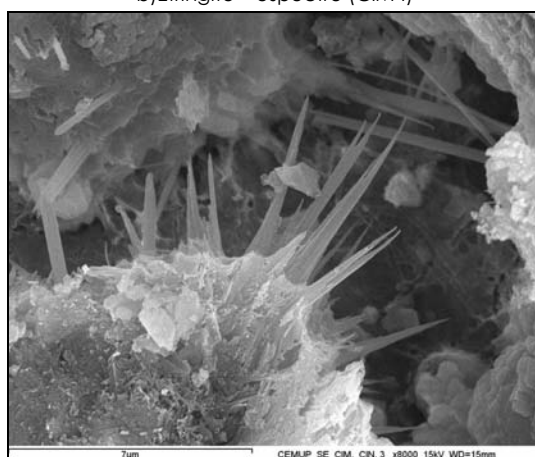
a) Etringite – cristais aciculares (CIM4)



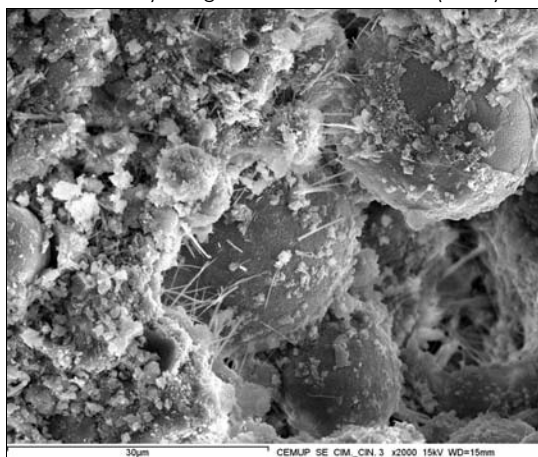
b) Etringite – espectro (CIM4)



c) Etringite – cristais aciculares (CIM5)



d) Etringite - cristais aciculares (CIM_CIN3)

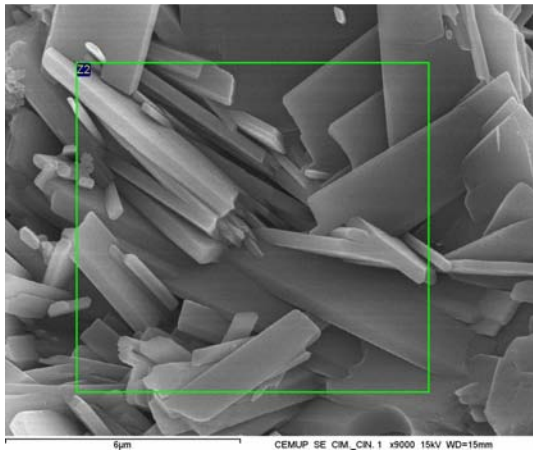


e) Etringite e cinzas volantes (CIM_CIN3)

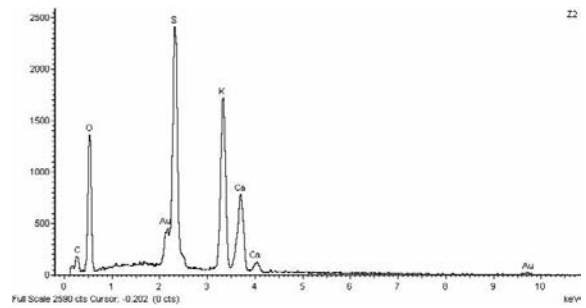


f) Etringite e cinzas volantes (CIM_CIN3)

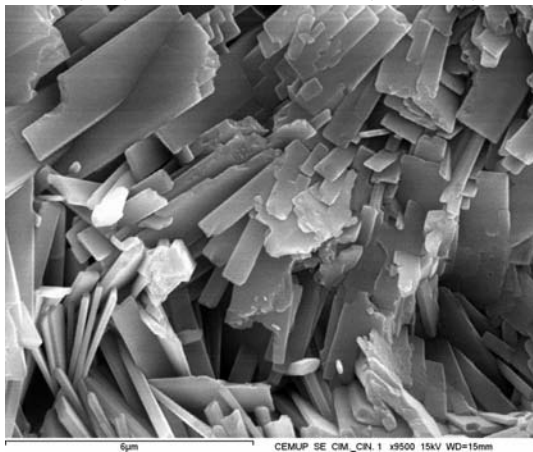
Figura 5.34 – Etringite - Imagens e espectro obtidos por MEV



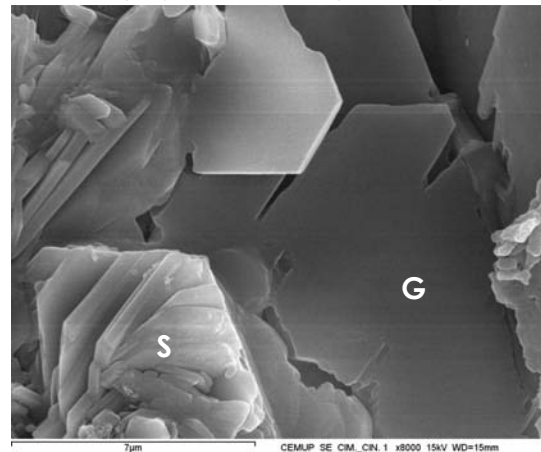
a) Singenite – cristais tabulares (CIM_CIN1)



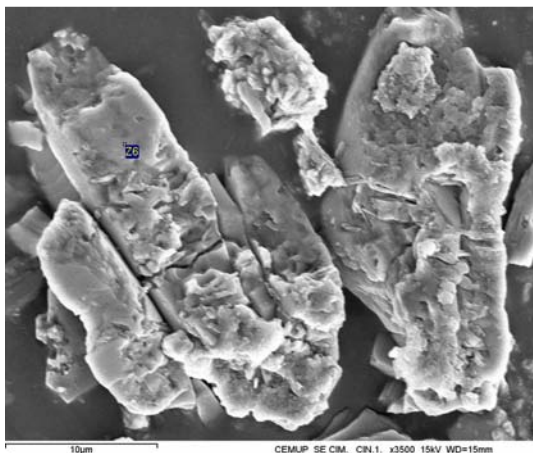
b) Singenite – espectro (CIM_CIN1)



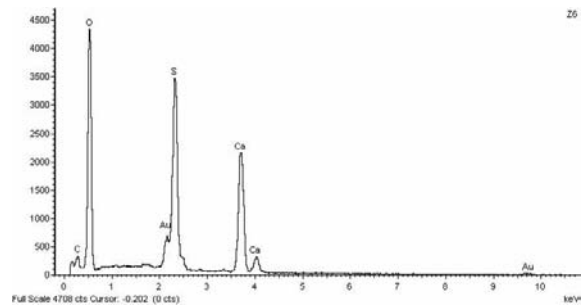
c) Singenite – cristais tabulares (CIM_CIN1)



d) Cristais tabulares de singenite (S) e cristais lamelares com hábito pseudo-hexagonal de gesso (G) (CIM_CIN1)



e) Gesso – cristais subédricos com formas de dissolução (CIM_CIN1)



f) Gesso – espectro (CIM_CIN1)

Figura 5.35 – Singenite e gesso - Imagens e espectros obtidos por MEV

Em termos de minerais de sais solúveis identificados por MEV e analisando o Quadro 5.24, constata-se que a principal diferença entre as argamassas de cimento (C – provete PAC) e as de cal aérea (CAL – provete PAcál) resulta da presença de etringite nas primeiras e da sua ausência nas argamassas de cal aérea.

A calcite está presente em todas as amostras (Figura 5.33). Aparece sob a forma de agregados de cristais anédricos (Figuras 5.33a, 5.33c), de cristais subédricos ou euédricos (Figuras 5.33d, 5.33e, 5.33f), por vezes parcialmente dissolvidos (Figura 5.33d) e de cristais subédricos ou euédricos escalenoédricos (Figura 5.33f).

A calcite pode ter resultado de fases cíclicas de carbonatação do hidróxido de cálcio da argamassa e lixiviação da calcite precipitada, explicando a presença de grande número de cristais deste mineral com figuras de solução (Figura 5.33d), apesar de o mesmo ser muito pouco solúvel. Para além disso, Sousa Coutinho (1974) refere que a presença de cloretos nas soluções (caso da água da chuva do Porto utilizada nos ensaios com ciclos de molhagem e secagem) facilita a lixiviação do cálcio da argamassa, devido à maior solubilidade do hidróxido de cálcio.

Cristais aciculares de etringite foram observados nos provetes com argamassa de cimento (PAC) e com argamassa de cimento e cinzas volantes (PACCV) no contacto pedra/argamassa.

A presença de etringite será devida à reacção no estado sólido entre o ião SO_4^{2-} proveniente da água da chuva do Porto utilizada nos ciclos de molhagem tal como referem Begonha et al. (1996) e Begonha (2001) e o aluminato tetracálcico hidratado em presença de uma solução sobressaturada em hidróxido de cálcio com pH da ordem de doze.

A formação de etringite em argamassas de cimento aplicadas em alvenarias ou cantarias de pedra de granito do Porto, já havia sido referida por Begonha (2001), Lito et al. (2005).

Nas argamassas de cal, a etringite não se forma porque nem o ligante, nem os agregados contêm aluminatos. Os agregados utilizados eram constituídos apenas por grãos de quartzo.

A etringite exhibe-se sob a forma de cristais aciculares, a maior parte das vezes em poros da argamassa (Figuras 5.34a, 5.34c, 5.34d).

A presença de cinzas volantes na argamassa de cimento Portland (CCV – provete PACCV), não evitou a formação de etringite na argamassa do provete PACCV (Figuras 5.34e, 5.34f).

No provete PACCV, observaram-se igualmente a singenite e algum gesso dissolvido, sobre a superfície de argamassa.

A singenite deverá ter resultado da reacção química entre os álcalis do cimento (neste caso o ião K^+) e o ião sulfato da água da chuva. Os sucessivos ciclos alternados de secagem e de molhagem tiveram efeito cumulativo na concentração dos iões K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} .

De facto, Begonha (2001) refere, a presença de singenite, thenardite e glauberite na fachada Este exterior do Hospital de Santo António, aparecendo estes minerais de sais solúveis unicamente associados às eflorescências do exterior do edifício formadas sobre ou no contacto com argamassas de cimento.

Nos provetes de pedra de granito com cal aérea (PAcal), cal aérea e cinzas volantes (PAcalCV) e no provete constituído por duas carotes de granito do Porto e argamassa de cimento, não se observaram minerais de sais solúveis para além da calcite.

Lito et al (2005) verificaram a formação de cristais de etringite, calcite e trona em provetes constituídos por duas carotes de granito do Porto obtidas no Hospital de Santo António unidas por argamassas de cimento após a realização de ciclos de secagem e molhagem com água da chuva recolhida no Porto.

A cristalização de trona e de thermonatrite na superfície das argamassas e de pedras de granito foi referida por Costa Leite (2008) na Igreja de Santa Clara em Vila do Conde e por Bré (2008) na Capela do Senhor da Pedra em Miramar.

Os resultados obtidos nos ensaios de secagem e molhagem realizados neste trabalho, nomeadamente a formação de singenite, parecem assim reproduzir os mecanismos de formação da desagregação granular diferencial, eflorescências pulverulentas, placas e

plaquetas nas áreas das pedras contíguas às juntas onde aplicaram argamassas de cimento nas cantarias dos monumentos de granito.

6 CONCLUSÕES

O estudo das argamassas sobre o granito em cantarias e alvenarias conduziu à formulação das conclusões a seguir explicitadas.

A introdução de cinzas volantes numa argamassa de cimento Portland (com 50% de cimento e 50% de cinzas volantes) reduz quer a resistência à flexão quer a resistência à compressão.

Os provetes que possuem na sua composição cal aérea ou cal aérea com cinzas volantes, oferecem resistências à flexão e à compressão inferiores aos limites de sensibilidade da prensa para cada um dos ensaios, mesmo aos 90 dias de idade, não tendo sido assim possível obter qualquer tipo de resultado, em termos de resistências mecânicas.

No que concerne aos provetes de argamassas de cimento Portland, cimento Portland com cinzas volantes, cimento de calcário e de cal hidráulica, os últimos são os que apresentam as menores resistências mecânicas, enquanto que os provetes de cimento Portland são os mecanicamente mais resistentes.

As razões entre as resistências médias à flexão e à compressão obtidas entre os provetes de cimento Portland ou de cimento de calcário e os provetes de cal hidráulica foram diminuindo com o aumento da idade dos mesmos.

As argamassas de cal aérea e de cal hidráulica apresentam valores de porosidade livre às 48 horas muito semelhantes e, em média, cerca de 1,7 vezes superiores ao valor da argamassa de cimento Portland.

No conjunto dos provetes de cal aérea, verifica-se que as cinzas volantes proporcionam uma diminuição da porosidade livre, de cerca de 13,9%, podendo estar relacionada com o menor volume de água utilizado na amassadura.

De entre as argamassas de cimento, a de cimento calcário apresenta maior porosidade às 48 horas.

A colocação de cinzas volantes na argamassa de cimento Portland, quase que não teve influência no valor de porosidade livre, uma vez que a sua introdução traduz-se apenas por uma diminuição de 14,10% para 14,01%.

As argamassas têm porosidades livres superiores às do granito. De um modo geral, pedras graníticas deterioradas com quatro ou mais de quatro por cento de porosidade livre apresentam coeficientes de capilaridade A iguais ou superiores aos da argamassa de cimento Portland, apesar de a porosidade livre das mesmas ser significativamente inferior à da argamassa de cimento.

A ascensão de água por capilaridade em cantarias de granito transfere-se facilmente através das argamassas de cal antigas existentes sob a camada superficial das argamassas de cimento recentes, não ocorrendo, consequentemente, o efeito de barreira das juntas provocado pelas argamassas mais recentes aplicadas na superfície das mesmas.

Os fluxos de evaporação das argamassas de cimento Portland e cimento Portland e cinzas volantes são bastantes menores que os de granito, sendo 1,5 a 3,75 vezes menores que os valores mínimo ($-0,0018 \text{ g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1}$) e máximo ($-0,0045 \text{ g} \times \text{cm}^{-2} \times \text{h}^{-1}$) apresentados para os granitos. Nos provetes de argamassa de cimento de calcário, os fluxos de evaporação são 2 a 5 vezes menores que os de granito, e os de cal hidráulica 1,2 vezes a 3 vezes inferior.

Os fluxos de evaporação são mais elevados nos granitos do que nas argamassas, devido à diferente estrutura do meio poroso da pedra, basicamente constituída por fissuras finas e muito bem interligadas, apesar de a porosidade livre dos granitos ($1,70\% \leq N_{48} \leq 10,30\%$) ser significativamente inferior à da argamassa de cimento ($14,01\% \leq N_{48} \leq 14,10\%$).

A saturação crítica média dos provetes de granito varia entre 33% e 77%, isto é, entre valores muito menores, semelhantes ou muito superiores aos registados nas argamassas de cimento Portland ou de cimento Portland e cinzas volantes (54 % a 55 %). São muito menores ou semelhantes aos valores das argamassas de cimento de calcário e de cal hidráulica (70% a 71%).

O processo de evaporação, em termos de fluxo, em alvenarias e cantarias de granito, é muito mais rápido na pedra do que nas argamassas de cimento ou de cal hidráulica nas juntas.

Consequentemente, as argamassas mantêm-se molhadas por longos períodos de tempo após a secagem das pedras de granito, permitindo o fluxo de água por capilaridade das argamassas para as zonas das pedras em contacto com as mesmas, podendo dar origem a anomalias, como as elforescências e a desagregação granular diferencial.

Os ensaios de secagem e molhagem com água da chuva recolhida no Porto, realizados em provetes constituídos por duas pedras de granito do Porto e uma junta de argamassa, deram origem à cristalização de minerais de sais solúveis como a calcite, etringite, singenite e gesso.

Em termos de minerais de sais solúveis, constata-se que a principal diferença entre as argamassas de cimento e as de cal aérea resulta da presença de etringite nas primeiras e da sua ausência nas argamassas de cal aérea.

A calcite cristalizou nos contactos entre o granito e todas as argamassas e sobre argamassa de cimento Portland com cinzas volantes. Este mineral pode ter resultado de fases cíclicas de carbonatação do hidróxido de cálcio da argamassa e lixiviação da calcite precipitada.

A etringite deverá ter resultado da reacção no estado sólido entre o ião SO_4^{2-} proveniente da água da chuva do Porto e o aluminato tetracálcico hidratado em presença de uma solução sobressaturada em hidróxido de cálcio.

Nas argamassas de cal, a etringite não se forma porque nem o ligante, nem os agregados contêm aluminatos.

A presença de cinzas volantes na argamassa de cimento Portland não evitou a formação de etringite.

A singenite e o gesso cristalizaram sobre a superfície de argamassa de cimento Portland e cinzas volantes.

A singenite deverá ter resultado da reacção química entre os álcalis do cimento (neste caso o ião K^+) e o ião sulfato da água da chuva. Os sucessivos ciclos alternados de secagem e de molhagem tiveram efeito cumulativo na concentração dos iões K^+ , Ca^{2+} e SO_4^{2-} .

O gesso terá resultado da reacção química entre o ião cálcio presente nas argamassas do cimento sob a forma de hidróxido de cálcio e/ou carbonato de cálcio e o ião sulfato da água da chuva.

Por fim pode-se afirmar, que as argamassas de cimento apresentam-se assim como uma solução desadequada, quando aplicadas em cantarias e alvenarias de pedra, desempenhando o papel de reservatórios de água, permanecendo mais tempo húmidas, que as pedras de granito, originando um fluxo de água no sentido das argamassas para as pedras, fornecendo iões alcalinos sódio e potássio, que se combinam com o ião sulfato, originando minerais de sais solúveis como a singenite e o gesso responsáveis pela formação de eflorescências e desagregação granular diferencial.

BIBLIOGRAFIA

Aires-Barros, L., Maurício, A., 1996 – Chronology, probability estimations and salt efflorescence occurrences forecasts on monuments building stones surfaces. Proceedings of 8th Internacional Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Berlim, 1996, pp 497-511.

Aires-Barros, L., 1996 – Monitoring of some meteorological variables related with hygroscopic products occurring at monuments of Mediterranean basin. Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Enviroments, Bari, 1996. Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report n.º 4, pp 57-73.

Alonso, J.L., Weshe, K., 1991 – Characterization of the Fly Ash in Concrete. Report of technical committee 67, FAB, pp 3-23.

Alves, C., 1997 - Estudo de deterioração de materiais graníticos aplicados em monumentos da cidade de Braga. Implicações na conservação do Património Destruido. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, 291 pp.

Arnold, A., Kueng, A., 1985 - Crystallization and Habits of salts effloescences on walls. Proceedings, 5th Internacional Congress of Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, pp 255-267.

Arnold, A., Zehnder K., 1985 – Crystallization and habits of salt efflorescences on walls, 1- methods of investigation and, habits. Proceedings of 5th Internacional Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, 1985, pp 255-267.

Arnold, A., Zehnder K., 1987 – Monitoring wall paintings affected by soluble salts. Proceedings of the Symposium The Conservation of Wall Paintings, London, pp 103-135.

Arnold, A., Zehnder K., 1989 – Salt Weathering on monuments. Proceedings of 1st Symposium La Conservazione dei Monumenti nel Bacino del Mediterraneo-Bari 1989, Grafo, Brescia, pp 31-58.

ASTM C 88-05, 2005 - Standard Test Method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. ASTM Internacional, West Conshohocken, Pensilvânia, USA.

ASTM C 109/109M-08, 2008 - Standard Test Method for compressive strength of hydraulic cement mortar. ASTM Internacional, West Conshohocken, Pensilvânia, USA.

ASTM C 295-90, 1990 – Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete. ASTM Internacional, West Conshohocken, Pensilvânia, USA.

ASTM C 618 - 08a, 2008 - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM Internacional, West Conshohocken, Pensilvânia, USA.

ASTM C 1260-07, 2007 – Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). ASTM Internacional, West Conshohocken, Pensilvânia, USA.

Begonha, A., Sequeira Braga, M.A., Gomes da Silva, F., 1996 – Rain water as a source of the soluble salts responsible for stone decay in the granitic monuments of Oporto and Braga – Portugal. Proceedings of 8 th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, ed. Josef Riederer, vol.1, Berlin, pp 481-487.

Begonha, 2000 – Estudo da Patologia da Pedra no Mosteiro de S. Miguel de Refojos em Cabeceiras de Basto. Porto, 73 pp.

Begonha, A., 2001 – Meteorização do Granito e Deterioração da Pedra em Monumentos e Edifícios da Cidade do Porto. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, 445 pp.

Begonha, A., 2002a – Estudo da patologia da pedra da Igreja de S. Pedro de Rates. Protocolo DGEMN-FEUP Estudo de Materiais Pétreos e Argamassas. Relatório. 85 pp.

Begonha, A., 2002b – Igreja de S. Pedro de Rates: Estudo da deterioração da pedra. A intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais, Porto, pp 309-332.

Begonha, A., 2002c – Igreja de S. João de Tarouca: Estudo da deterioração da pedra. Relatório, Porto, 68 pp.

Begonha, A., 2003a – Igreja de S. João Baptista, Matriz de Vila do Conde: Estudo da deterioração e do tratamento da pedra. Protocolo DGEMN-FEUP Estudo de Materiais Pétreos e Argamassas. Relatório. 74 pp.

Begonha, A., 2003b – Estudo da aplicação de consolidantes em pedras da Igreja de S. Pedro de Rates. Protocolo DGEMN-FEUP Estudo de Materiais Pétreos e Argamassas. Relatório. 66 pp.

Begonha, A., 2003c – Igreja de Nossa Senhora da Ajuda, Matriz de Espinho: Estudo da deterioração e do tratamento da pedra. Relatório, Porto, 52 pp.

Begonha, 2004 – Convento de S. Gonçalo de Amarante: Estudo diagnóstico e proposta de tratamento da pedra. Protocolo DGEMN-FEUP Estudo de Materiais Pétreos e Argamassas. Relatório. 135 pp.

Begonha, A., 2005 – Patologia da pedra na fachada principal da Igreja de Nossa Senhora da Lapa no Porto: Diagnóstico e Proposta de Tratamento. Relatório, Porto, 87 pp.

Begonha, A., 2007 – Deterioration of granitic stones associated with pigeon activity in the S. Gonçalo Church in Amarante and the Lapa Church in Porto. Proceeding of 11 th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, 5-9 June, Porto, 15 pp.

Begonha, A., Pereira, M. J., 2007 – Mineralogical study of the deterioration of granite stones of two portuguese churches and characterization of the salt solutions in the porous network. Proceeding of 11 th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, 5-9 June, Porto, pp 12-14.

Begonha, A., 2009a – Agregados – Apontamentos da disciplina de Materiais de Construção I do Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 257 diapositivos.

Begonha, A., 2009b– Mineralogical study of the deterioration of granite stones of two Portuguese churches and characterization of salt solutions in the porous network by the presence of diatoms. Materials Characterization, in Press, Corrected Proof.15 pp

Bijen, J., Pietersen, H., 1994 – Mineral Admixtures: Reactions, Micro-Structure and Macro-Properties. Advances in Cement and Concrete , Proceedings of Eng. Found. Conf, 24th – 29th July, M.W. Grutzeck and S.L. Sarkar, Eds.

Binda, L., Baronio, G., 1996 – Mechanisms of masonry decay due salt crystallization. Studies of the durability of brick and stone masonry and their components, Crystallization tests, Politecnico di Milano, Milano.

Bré, J.M., 2008 – Capela do Senhor da Pedra: Diagnóstico e Proposta de Tratamento da Pedra. Tese de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 144 pp.

Cabaça, S., 2002 – Humidade ascendente em paredes de edifícios antigos – Processos de reabilitação e prevenção. Monografia n.º 9, www.construlink.pt.

Camões Azevedo, A., F., 2002 – Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas volantes. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, 456 pp.

Camuffo, D., 1988 – Surface moisture and conservation. European Cultural Heritage, Newsletter, volume 2 , n.º 5, pp 6-10.

Camuffo, D., 1996 – The role of climate on stone weathering. Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments – Bari, 1996. Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report n.º 4, pp 157-165.

Camuffo, D., Bernardi, A., 1995 – The microclimate of the Sistine Chapel. Edizione congiunta Bolletino Geofísico, European Cultural Heritage Newsletter on Research, Anno 18, n.º 2, pp 7-32.

Cardoso, F.S., 2008 – Estudo da deterioração da pedra na Igreja de Paço de Sousa – Proposta de Tratamento. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 108 pp.

Castro, E., Delgado Rodrigues J., Cravo, M. R. T., 1991 - Estudo relativo à acção dos pombos sobre a pedra das Igrejas do Carmo e dos Carmelitas, no Porto, e de S. Gonçalo, em Amarante. LNEC, Relatório 44/91 GERO/NQ, Lisboa, 27 pp.

Charola, A.E., Weber, J, 1992 – The Hydration-Dehydration Mechanism of Sodium Sulphate. 7th Internacional Congress on Deterioration and Conservation of Stone, F. Henriques, J. Delgado Rodrigues (eds), LNEC, LISBOA, pp 581-590.333

Costa Leite, A.L., 2008 – Estudo da deterioração da pedra na Igreja de Santa Clara em Vila do Conde – Proposta de Tratamento. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 178 pp.

Delgado Rodrigues, J. e Gil Saraiva, J., 1985 – Experimental and theoretical approach to the study of the mechanism of wind erosion of stone in monuments. LNEC, Memória, n. °654, Lisboa, 9 pp.

Delgado Rodrigues, J., 1991 - Causes, mechanisms and measurement of damage in stone monuments. Proceedings European Symposium Science, Technology and European Heritage – Bologna , 1989. Commission of the European Communities Butterworth, Heinemann, Oxford, pp 124-137.

Delgado Rodrigues, J., 1996 – Conclusions Reports - Project STEP CT 90-0110 – Conservation of granitic rocks with application to the megalithic monuments. Proceedings of the European Comission Workshop Degradation and Conservation of granitic rocks in monuments, Santiago de Compostela, Research Report n. ° 5, pp 161-242.

Dicionário Técnico da European Mortar Industry Organization (2001) – EMODICO, 3. ° Edição.

Dullien, F.A.L., 1979 – Porous media – Fluid transport and pore structure. Academic Press, New York.

Dohene, E., 1994 – In situ dynamics of sodium sulfate hydration and dehydration in stone pores: observations at high magnification using the environmental scanning electron microscope. Proceedings of 3. ° Simposio Internazionale La Conservazione dei Monumenti nel Bacino del Mediterraneo-Venezia. Venezia, 1994, pp 143-150.

EN 998-1 (2003) - Especificação para argamassas para alvenaria. Parte 1: Argamassas de rebocos exteriores e interiores. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels.

EN 998-2 (2003) - Especificação para argamassas para alvenaria. Parte 2: Argamassa de montagem. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-1 (1998) - Methods of test for mortar for masonry. Part 1: Determination of particle size distribution. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-2 (1998) - Methods of test for mortar for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-3 (1999)- Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-4 (1998)- Methods of test for mortar for masonry. Part 4: Determination of consistence of fresh mortar (by plunger penetration). CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-6 (1998)- Methods of test for mortar for masonry. Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-7 (1999) - Methods of test for mortar for masonry. Part 7: Determination of air content of fresh mortar. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-9 (1999) - Methods of test for masonry. Part 9: Determination of workable life and corrosion time of fresh mortar. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-10 (1999) - Methods of test for masonry. Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-11 (1999) - Methods of test for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-17 (2000) - Methods of test for mortar for masonry. Part 17: Determination of water-soluble chloride content of fresh mortars. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-18 (2002) - Methods of test for mortar for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1015-19 (1999) - Methods of test for mortar for masonry. Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 1504-9 (2008) Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Part 9: General principles for the use of products and systems. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 12004 (2007) - Colas para ladrilhos. Requisitos, avaliação da conformidade, classificação e designação. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

EN 13501-1 (2007) - Fire classification of construction products and building elements. Part 1: Classification using data from reaction to fire tests. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels

Fassina, V., Mignucci, A., Naccari, A., Stevan, A., Cassar, J., Torpiano, A., (1996a) – Investigation on the moisture and salt migration in the wall masonry and the presence of salt efflorescence on stone surface in the church of Sta. Marija Ta' Cwerra at Siggiewi, Malta. Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments – Bari, 1996. Protection and Conservation of European Cultural Heritage Research Report, pp 193-308.

Fassina, V., Arbizzani, R., Naccari, A., (1996b) - Salt efflorescence on the marble slabs of S. Maria dei Miracoli Church: A survey of their origin and on the methodology of their removal. Proceedings of 8 th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, ed. Josef Riederer, vol.1, Berlin, pp 523-534.

Ferreira, J. F. O., 2004 – Caracterização da acção da água em edifícios de pedra. Tese de Mestrado. Universidade do Minho, Guimarães, 177 pp.

Fichas de ensaio, Fe 06, 1999 – Pedras Naturais e Artificiais. Determinação de absorção de água por capilaridade. Ficha de Ensaio, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Freitas, V. P., Torres, M.I., Guimarães A.S., 2008 – Humidade Ascensional. Feup edições, Porto.

Freitas, V.P., Gonçalves, P., 2003 – Apontamentos das aulas teóricas da cadeira de Patologia da Construção, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Gonçalves, T., 2002 - Pesquisa de mercado sobre revestimentos para paredes sujeitas à acção de sais solúveis. Revestimento de paredes em edifícios antigos, Cadernos Edifícios, n.º 2, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. pp 175 - 190

Guía Práctica de la Cal y Estuco, 1998 – Editorial de los Oficios, Leon. pp 10-27.

Groot, C., Van Hees, R., Lubelli, B., Wijffles, T., Rooij, M., Petkovic, J., 2003 – Aspects of salt and moisture transport in restauration plasters and renders. 6th Internacional Conference on Materials Science and Restauration, September 2003, University Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.

Hammecker, C., 1993 - Importance des transferts d' eau dans le degradation des pierres en oeuvre. Tese de doutoramento, Université Louis Pasteur e Strasbourg, Strasbourg, 254 pp.

Henriques, F., 2001 – Humidade em Paredes. Colecção Edifícios, LNEC, Lisboa, pp 2-41.

Keller, A., Aberle, T., Zurbrigen, R., 2005 – Efflorescence Mechanisms of Formation and Ways to Prevent. Comunicação, Congresso APFAC, Lisboa, 10 pp.

Knöfel, D., 1991 – Causes, mechanisms and measurement of damages in cultural heritage materials: the state of the art: concrete structures. Proceedings European Symposium Science, Technology and European Heritage. Bologna, 1989, eds: N.S. Baer, C. Sabbioni e A.I. Sors, Commission of the European Communities, Butterworth-Heinemann, Oxford, pp 138 -148.

Kobuku, M., 1968 – Fly Ash and Fly Ash Cement. Proceedings of the Internacional Symp. On the Chemistry of Cement, Tokyo, pp 75-113.

Krammer K. e Lange-Bertalot H., 1991: *Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales. Fragilariaceae. Eunotiaceae.* Eds. Ettl H. Gerloff J. Heying H & Mollenhauer D, Süßwasserflora von Mitteleuropa. 2/3. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 577 pp.

Larsen, P., 1999 – Salt Damage to the medieval plaster on a vault in Fanefjord church in Paistey, Scotland. Internacional RILEM Workshoop on Historic Mortars, Bartos, Groot, Hughes (eds.), pp 43-50.

Lito, P.R., Ribeiro, N.D., Begonha, A., 2005 – Acção de argamassas de cimento Portland sobre pedras de granito do Porto. Artigo apresentada no âmbito da cadeira de Projecto da licenciatura em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 13 pp.

LNEC E 375 (1993) - Escória granulada de alto forno moída para betões. Características e verificação da conformidade. Especificação LNEC. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 378 (1996) - Betões. Guia para a utilização de ligantes hidráulicos. Especificação LNEC. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 461 (2007) – Betões – Metodologias para prevenir reacções expansivas internas. Especificação LNEC. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 466 (2005) – Fíleres calcários para ligantes hidráulicos. Especificação LNEC. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 467 (2005) – Agregados para betões – Características e requisitos de conformidade. Especificação LNEC. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Madureira, M.C.V., 2008 – Diagnóstico e Proposta de Tratamento da Pedra do Mosteiro da Serra do Pilar. Tese de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 200 pp.

Magalhães, A.C., 2002 – Patologia de rebocos antigos. Revestimento de paredes em edifícios antigos, Cadernos Edifícios, n.º 2, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, pp 69-84.

Margalha M. G., Veiga, M., R., Brito, J., 2007- Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea. Comunicação 58, APFAC, 2 ° Congresso Nacional de Argamassas de Construção, 22 e 23 de Novembro de 2007, Parque das Nações, Lisboa, 10 pp.

Mateus, J.M., 2002 – Técnicas Tradicionais de Construção de Alvenarias. Livros Horizonte, Lisboa. 430 pp

McMahon, D. J., Sandeberg, P., Folliard, K. e Mehta, P. K., (1992) – Deterioration mechanism of sodium sulfate. Proceedings 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. LNEC, Lisboa, 1992, volume 2, pp 705-714.

Mehta, P., Monteiro, P., 1993 – Concrete Structure Properties and Materials. Second Edition, New Jersey.

Mertz, J. D., 1991 – Structures de porosité et propriétés de transport dans les grés. Tese de doutoramento. Université Louis Pasteur, Sciences Géologiques, 90. Strasbourg, 149 pp.

Miranda, A. M., 2006 – Influência da proximidade do mar em estruturas de betão. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Mouga, T. M., 1997 – Biodeterioração por plantas superiores e conservação de monumentos: O Planalto de Conímbriga em análise. Tese de Doutoramento. Departamento de Zoologia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 394 pp.

Moutinho, A.M., 2005 – Estudo da Deterioração da Pedra da Igreja de Santa Maria de Leça do Mosteiro de Santa Maria de Leça – Contributo para o ensino das geociências. Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 304 pp.

Mortar Industry Association, 2002a – Terms, descriptions and definitions. Data sheet 13, London.

Mortar Industry Association, 2002b – Introduction to Mortars. Learning Texts, Part 1, London.

Moropolou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K., 2000 – Investigation of the Technology of Historic Mortars. Journal of Cultural Heritage, pp 45-98.

NP 1378 (1976) - Agregados. Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio ou pelo sulfato de magnésio. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP 4220 (1993) - Pozolanas para betão. Definições, especificações e verificação da conformidade. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 196-1 (2006) - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 196-2 (2006) - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2: Análise química dos cimentos. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 196-3 (2006) - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 196-6 (1996) - Métodos de ensaios de cimentos. Determinação da finura Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 196-21 (1990) - Métodos de ensaio de cimentos. Determinação do teor em cloretos, dióxido de carbono e álcalis nos cimentos. Instituto Português da Qualidade, Caparica

NP EN 197-1 (2001) - Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 450-1 (2006) - Cinzas volantes para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 450-2 (2006) - Cinzas volantes para betão. Parte 2: Avaliação da conformidade. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 451-1 (2006) - Métodos de ensaios das cinzas volantes. Parte 1; Determinação de teor de óxido de cálcio livre. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 451-2 (1995) - Métodos de ensaios das cinzas volantes. Parte 1; Determinação da finura por peneiração húmida. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 459-1 (2002) - Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 459-2 (2002) - Cal de construção. Parte 2: Métodos de ensaio. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 932-3 (2000) – Ensaio para determinação das propriedades gerais dos agregados. Parte 3: Procedimento e terminologia para a descrição petrográfica simplificada. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 933-1 (2000) - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 933-3 (2002) - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas - Índice de achatamento. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 933-4 (2002) – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas – Índice de forma. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 933-7, 2002 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 7: determinação do teor de conchas – Percentagem de conchas nos agregados grossos. . Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 1052-3 (2005) – Métodos de ensaio de alvenaria. Parte 3: Determinação da resistência inicial ao corte. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 1097-6 (2003) – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 1367-2 (2002) – Ensaio das propriedades térmicas e de meteorização dos agregados. Parte 2: Ensaio do sufato de magnésio. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 1504-1 (2006) - Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 1: Definições. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 1744-1 (2000) – Ensaio para determinação das propriedades químicas dos agregados – Parte 1: Análise química. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 1745 (2005) - Alvenarias e elementos de alvenaria. Métodos para determinação de valores térmicos de cálculo. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 12620 (2004) – Agregados para betão. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 13139 (2005) - Agregados para argamassas. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 13263-1 (2007) - Sílica de fumo para betão. Parte 1: Definições requisitos e critérios de conformidade Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 13263-2 (2007) - Sílica de fumo para betão. Parte 2: Avaliação da conformidade. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 15167-1 (2008) - Escória granulada de alto forno moída para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 15167-2 (2008) - Escória granulada de alto forno moída para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Avaliação da conformidade Instituto Português da Qualidade, Caparica.

Oliveira, S., Barros, O., Seabra, M.P., Silva, L., Labrincha; J.A., Ferreira, V.M. , 2005 – Comportamento das Argamassas e Elementos de Alvenaria Antiga Sujeitos à Acção de Sais. Comunicação, Congresso APFAC, Lisboa, 12 pp.

Papayianni, I., Theochadouri, K., 1993 – Aggregate graduation of Ancient mortars. Relationship to strength and porosity. Proceedings of the Internacional RILEM/UNESCO Congress on Conservation of the Stone and Other Material, 1993, Paris, vol.2, pp621-628.

Paulo, R. S., 2006 – Caracterização de Argamassas Industriais. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, pp 21-127.

Peruzzi, R., Polit, T., Toniolo, L., 2003 – The experimental test for evaluation of protection treatments; a critical survey of capillary absorption index. *Journal of Cultural Heritage*, Volume 4, Elsevier, pp 251-254.

Pietersen, H.S., 1993 – Reactivity of flu ash and slag in cement. Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.

Pinto, A., P., F., 1993 – Conservação de pedras graníticas – Estudo da acção de hidrófugos. Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 345 pp.

Rato, V., 2006 – Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas. Tese de Doutoramento. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 294 pp.

Rodrigues, M. P., 2004 – Argamassas de Revestimento para Alvenarias Antigas. Tese de Doutoramento. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa. 491 pp

Rondelet, J. B., 1864 – *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Tom. I, Firmin Didot Frères (eds), Paris, 153 pp.

Sampaio, J.C. , 1990 – Patologia dos Materiais. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 102 pp.

Secil, 2004a – CEM I 52.5 R Cimento Portland. Ficha Técnica da Secil, versão 3 de 2004, 2 pp.

Secil, 2004b – CEM I 42.5 R Cimento Portland. Ficha Técnica da Secil, versão 3 de 2004, 2 pp.

Secil, 2004c – CEM I/ B-L 32.5 N Cimento Portland de Calcário. Ficha Técnica da Secil, versão 3 de 2004, 2 pp.

Secil, 2004d – CEM II/ A-L 42.5 R Cimento Portland de Calcário. Ficha Técnica da Secil, versão 3 de 2004, 2 pp.

Secil, 2006 – Cal Hidráulica – Cal Hidráulica NHL 5. Ficha Técnica da Secil, 2 pp.

Shiyan, H., Cheng, J., 1986 – The Evalution of Pozzolanic Activity of Fly Ashes. *Proceedings of 8th CIQC- Congresso Internacional da Química do Cimento*, Rio de Janeiro.

Silva, S., 2002 – Caracterização de argamassas antigas – casos paradigmáticos. Revestimento de paredes em edifícios antigos, Cadernos Edifícios, n. ° 2 ,Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. pp 87-99

Sousa Ribeiro, M. S., 2004 – Argamassas cimentícias modificadas com adjuvantes poliméricos – composição e caracterização. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, pp 9-457

Sousa V., Pereira F. D., Brito J., 2005 – Rebocos tradicionais: Principais causas de degradação. Artigo apresentado na revista CEC, n. ° 23, Maio 2005. Centro de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pp 5-14.

Sousa Coutinho, A., 1988 – Fabrico e Propriedades do Betão. Volumes I e III, LNEC, Lisboa.

Sousa Coutinho, A., 1974 – Fabrico e Propriedades do Betão. Volume II, LNEC, Lisboa.

Stanton, T. E., 1940 – Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. J. Am. Soc. Civ. Eng., pp 17 -81.

Steiger, M., 1996 – Distribution of the salts ins a sand stone monument sources, transport and crystallitazion properties. Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments-Bari 1996, Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report n. ° 4, pp 241-246.

Steiger, M., Zeunert, A., 1996 – Crystallization properties of salt mixtures: comparison of experimental results adnd model comparison of experimental results and model calculations. Proceedings of 8 th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Berlin, 1996, eds. Josef Riederer volume I, Berlin, pp 535-544.

Tavasci,B., 1947 – Il Cemento, n.º 6.

Teles, M., 2007 – Apontamentos da cadeira de Materiais de Construção, capítulo I, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Teles, M., Begonha, A., 2001 – Scanning electron microscopy (SEM) as an auxiliary tool for determination of the present composition of old mortars. Proceedings of the 8 th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, eds. M. Stamatakis, B. Georgali, D. Fragoulis, E. Toumabakari. Athens, pp 399-404.

Tomé, M., 2002 – Património e Restauro em Portugal. Tese de Mestrado, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, pp 80-246.

Warke, P. A., Smith B. J., 1994 – Inheritance effects on the efficacy of salt weathering mechanisms in thermally cycled granite blocks under laboratory and field conditions. Proceedings of Conference Granite Weathering and Conservation, Dublin, pp 19-27.

Webber, J., Leitner, H., Gaggi, W., Szambelan, R., 1996 – Crystallization of sulphate salts induced by selective salt extraction by poultices: results from a case study. Proceedings of the European Commission Research Workshop Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments-Bari, 1996. Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report n. 4, pp 169-179.

Veiga, M. R., Aguiar, J., Silva, A. S., Carvalho, F., 2002 – Conservação e Renovação de Revestimentos de Paredes de Edifícios Antigos. Colecção Edifícios, LNEC, Lisboa, pp 3-81.

Zehnder, K., Arnold, A., 1988 – Crystal growth in salt efflorescence. Journal of Crystal Growth, 97, Amsterdam, pp 513-521.

ANEXOS

A1 OBSERVAÇÃO DE AMOSTRAS DE CINZAS VOLANTES POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE VARRIMENTO - CEMUP

DIA 8 DE JANEIRO DE 2008

Amostra CINZA VOL.

Revestimento a ouro

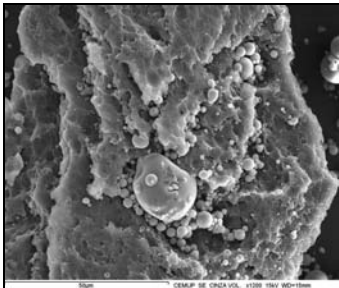


Foto 1 – cinzas volantes sobre partícula de carbono

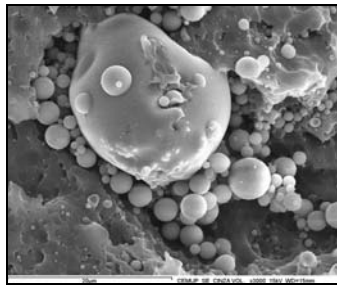


Foto 2 – ampliação da foto 1

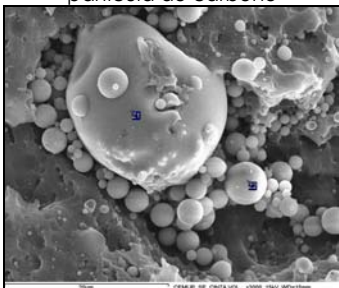
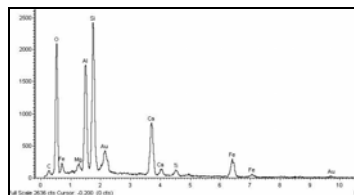
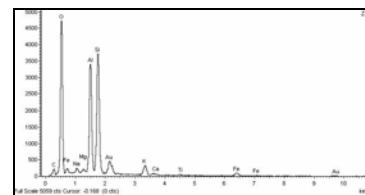


Foto 3 – espectro Z1 e Z2



Espectro Z1



Espectro Z2

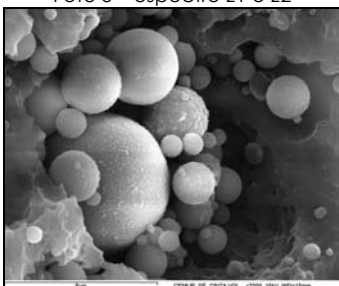


Foto 4 – ampliação da foto 1

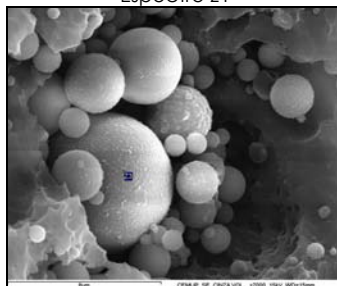
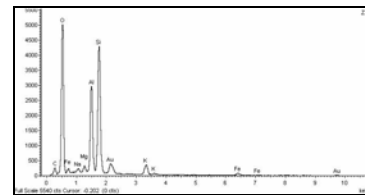


Foto 5 – espectro Z3



Espectro Z3

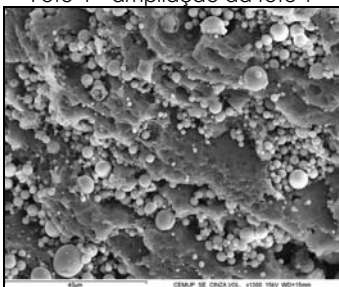


Foto 6 – cinzas volantes sobre partícula de carbono

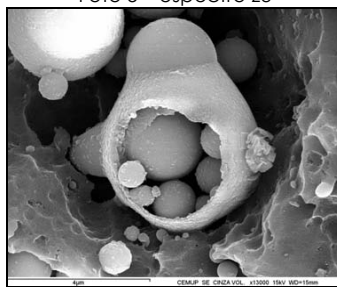


Foto 7 – "casulo" preenchido com cinzas volantes

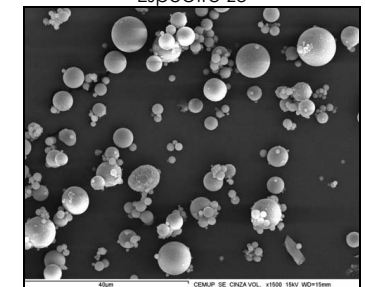


Foto 8 – conjunto de cinzas volantes

Figura A1.1 – Imagens e espectros de cinzas volantes observadas e analisadas por MEV

DIA 8 DE JANEIRO DE 2008

Amostra CINZA VOL.

Revestimento a ouro

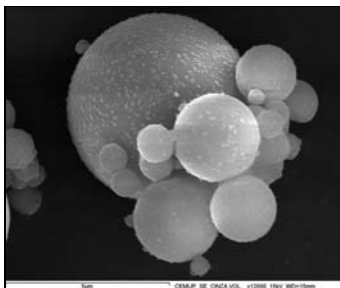


Foto 9 – ampliação de um conjunto de cinzas volantes da foto 8

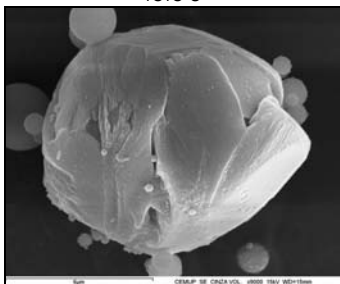


Foto 10 – cristais de gesso sobre cinza volante

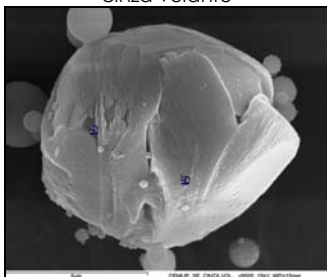
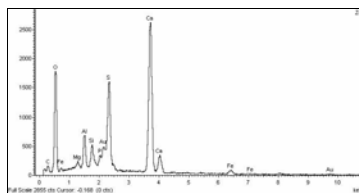
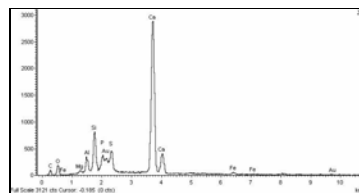


Foto 11 – espectro Z4



Espectro Z4



Espectro Z5

Figura A1.2 – Imagens e espectros de cinzas volantes observadas e analisadas por MEV

DIA 8 DE JANEIRO DE 2008

Amostra CINZA VOL.

Revestimento a ouro

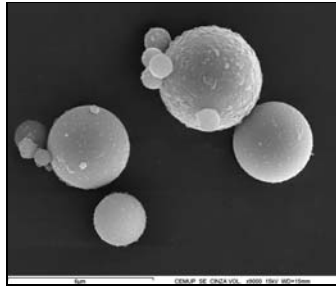


Foto 12 – conjunto de partículas de cinzas volantes

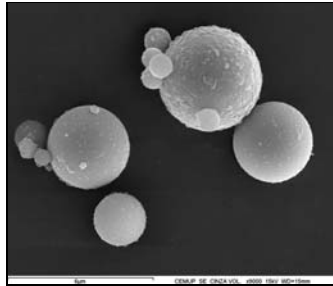


Foto 13 – observação de 2 grupos de granulometria de cinzas volantes

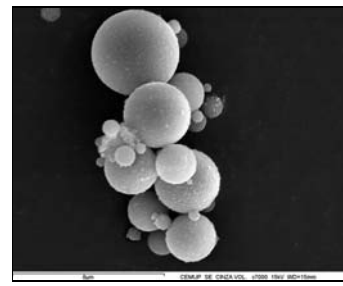


Foto 14 - conjunto de cinzas volantes

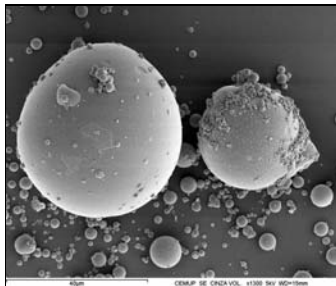


Foto 15 – 2 partículas de cinzas volantes de maior dimensão

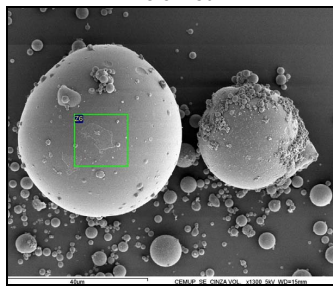
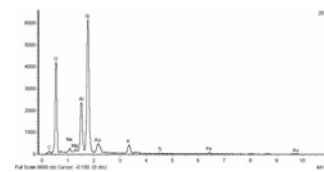


Foto 16 - espectro Z6



Espectro Z6

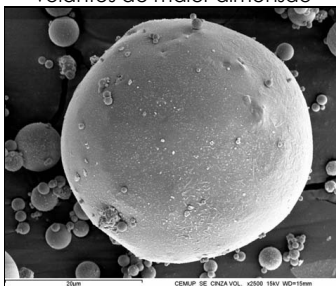


Foto 17 – partícula de cinza volante de grande dimensão

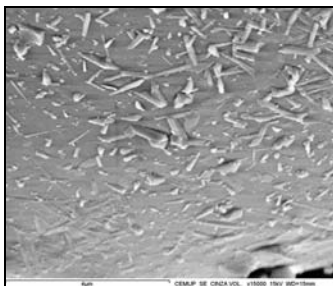


Foto 18 – ampliação da foto 17 – cristais de gesso sobre a superfície da cinza volante

Figura A1.3 – Imagens e espectros de cinzas volantes observadas e analisadas por MEV

A2 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Quadro A2.1 – Resistência mecânica do provete AC

IDADE:	2 dias	19.03.2007									
		massa (kg)	flexão (kgf)	compressão (kgf)		flexão (MPa)	compressão (MPa)		flexão (MPa)	compressão (MPa)	
referência	n.º										
C	1	540,5	260	4950	5100	5,98	30,35	31,27	6,44	31,22	
	2	587,1	270	4800	5200	6,21	29,43	31,88			
	3	589,7	300	5200	5300	6,90	31,88	32,50			

IDADE:	7 dias	26.03.2007									
		massa (kg)	flexão (kgf)	compressão (kgf)		flexão (MPa)	compressão (MPa)		flexão (MPa)	compressão (MPa)	
referência	n.º										
C	4	570	315	7100	6900	7,24	43,53	42,30	7,24	43,02	
	5	574	380	6800	7200	8,74	41,69	44,14			
	6	579,5	315	7100	7000	7,24	43,53	42,92			

IDADE:	28 dias	16.04.2007									
		massa (kg)	flexão (kgf)	compressão (kgf)		flexão (MPa)	compressão (MPa)		flexão (MPa)	compressão (MPa)	
referência	n.º										
C	7	587,6	340	8650	8950	7,82	53,04	54,87	8,62	51,80	
	8	581,6	350	8150	6900	8,05	49,97	42,30			
	9	580,8	410	8250	8250	9,43	50,58	50,58			

IDADE:	90 dias	20.06.2007									
		massa (kg)	flexão (kgf)	compressão (kgf)		flexão (MPa)	compressão (MPa)		flexão (MPa)	compressão (MPa)	
referência	n.º										
C	10	590,5	405	9950	9900	9,31	61,00	60,70	9,08	58,71	
	11	589	370	9300	9250	8,51	57,02	56,71			
	12	588,7	385	9600	9450	8,85	58,86	57,94			

Quadro A2.2 – Resistência mecânica do provete ACCV

IDADE: 2dias

26.04.2207

referência	n.º	massa	flexão	compressão		flexão	compressão		flexão	compressão
		(kg)	(kgf)	(kgf)		(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)
CCV	1	583	185	2350	2550	4,25	14,41	15,63	4,08	15,53
	2	576	160	2600	2500	3,68	15,94	15,33		
	3	582	170	2600	2600	3,91	15,94	15,94		

IDADE: 7dias

30.05.2007

referência	n.º	massa	flexão	compressão		flexão	compressão		flexão	compressão
		(kg)	(kgf)	(kgf)		(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)
CCV	4	594,7	240	3800	3800	5,52	23,30	23,30	5,17	22,53
	5	594,1	210	3600	3700	4,83	22,07	22,68		
	6	590	210	3550	3600	4,83	21,76	22,07		

IDADE: 28dias

30.05.2007

referência	n.º	massa	flexão	compressão		flexão	compressão		flexão	compressão
		(kg)	(kgf)	(kgf)		(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)
CCV	7	594,7	255	5400	4950	5,86	33,11	30,35	6,49	32,70
	8	594,1	295	5400	5500	6,78	33,11	33,72		
	9	590	310	5350	5450	7,12	32,80	33,41		

IDADE: 90dias

23.07.2007

referência	n.º	massa	flexão	compressão		flexão	compressão		flexão	compressão
		(kg)	(kgf)	(kgf)		(Mpa)	(Mpa)		(MPa)	(MPa)
CCV	11	590,3	310	6200	7100	7,13	38,01	43,53	7,47	41,44
	12	570,4	320	6450	6500	7,36	39,55	39,85		
	13	590,9	340	7200	7100	7,82	44,14	43,53		

Quadro A2.3 – Resistência mecânica do provete CL

IDADE: 7 dias 24.10.2007

		massa (kg)	flexão (kgf)	compressão (kgf)		flexão (MPa)	compressão (MPa)		flexão (MPa)	compressão (MPa)
referência	n.º									
CL	0.1	584,3	225	4950	4600	5,17	30,35	28,20	5,67	30,40
	0.2	582,2	260	4600	4950	5,98	28,20	30,35		
	0.3	589,5	255	5650	5000	5,86	34,64	30,66		

IDADE: 28 dias 25.12.2007

		massa (kg)	flexão (kgf)	compressão (kgf)		flexão (Mpa)	compressão (Mpa)		flexão (MPa)	compressão (MPa)
referência	n.º									
CL	0.4	588,3	275	6150	6200	6,32	37,71	38,01	6,38	36,40
	0.5	587,3	305	5500	5550	7,01	33,72	34,03		
	0.6	577	280	6200	6050	6,44	38,01	37,09		

Quadro A2.4 – Resistência mecânica do provete H

IDADE: 7 dias 24.10.2007

referência	n.º	massa	flexão	compressão		flexão	compressão		flexão	compressão
		(kg)	(kgf)	(kgf)		(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)
H	0.1	555,4	25	600	550	0,57	3,68	3,37	0,88	3,63
	0.2	552,9	50	600	600	1,15	3,69	3,68		
	0.3	558,1	40	600	600	0,92	3,69	3,68		

IDADE: 28dias 25.12.2007

referência	n.º	massa	flexão	compressão		flexão	compressão		flexão	compressão
		(g)	(kgf)	(kgf)		(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)
H	0.4	558,9	110	950	950	2,53	5,82	5,82	2,18	5,60
	0.5	556,7	105	900	900	2,41	5,52	5,52		
	0.6	563,2	80	900	900	1,84	5,52	5,52		

A3 POROSIDADE LIVRE

Quadro A3.1 – Porosidade livre – 1.º ensaio

	W ₀	W ₄₈	W ₄₈ -W ₀	volume	N ₄₈	N ₄₈ Media..... %.....	N ₄₈ desvio- padrão %
referência	g	g	g	cm ³	%		
Acalcv-ext19	455,13	507,00	51,87	256		20,25	0,39
Acalcv-ext21	457,62	508,28	50,66		19,79		
Acalcv-ext22	467,21	520,08	52,87		20,65		
Acalcv-ext23	467,48	519,86	52,38		20,46		
Acalcv-ext24	458,52	509,93	51,41		20,08		
Acalcv-estufa4	451,69	503,30	51,61		20,16	20,23	0,24
Acalcv-estufa5	464,23	516,20	51,97		20,30		
Acalcv-estufa6	454,27	505,80	51,53		20,13		
Acalcv-estufa7	469,8	521,08	51,28		20,03		
Acalcv-estufa8	469,2	521,77	52,57		20,54		
Acalcv-estufa9	465,81	516,83	51,02		19,93		
Acalcv-estufa10	462,05	513,88	51,83		20,25		
Acalcv-estufa11	462,22	513,55	51,33		20,05		
Acalcv-estufa12	459,66	511,28	51,62		20,16		
Acalcv-estufa13	465,15	518,24	53,09		20,74		
Acal7	375,49	434,60	59,11		23,09	23,50	0,40
Acal8	374,5	434,75	60,25		23,54		
Acal9	381,08	442,89	61,81		24,14		
Acal10	378,02	438,01	59,99		23,43		
Acal11	375,44	435,11	59,67		23,31		
CCV13	547,68	588,59	40,91		15,98	15,85	0,39
CCV14	547,57	588,64	41,07		16,04		
CCV15	556,81	596,92	40,11		15,67		
CCV16	552,68	594,54	41,86		16,35		
CCV17	541,42	582,08	40,66		15,88		
CCV19	533,29	572,21	38,92		15,20		
C11	524,37	551,18	26,81		10,47	13,08	1,57
C13	564,2	600,22	36,02		14,07		
C14	556,76	592,25	35,49		13,86		
C15	559,37	595,84	36,47		14,25		
C19	549,05	581,74	32,69		12,77		

Quadro A3.2 – Porosidade livre – 2.º ensaio

referência	W ₀	W ₄₈	W ₄₈ -W ₀	área	altura	volume	N ₄₈	N ₄₈ media	N ₄₈ desvio- padrão %
	g	g	g	cm ²	cm	cm ³	%	%	%
C1	139,61	148,14	8,53	15,819	4,09	64,70	13,18	14,15	0,57
C2	133,69	142,26	8,57	15,719	3,96	62,25	13,77		
C3	126,94	134,96	8,02	15,699	3,77	59,19	13,55		
C4	132,39	141,32	8,93	16,321	3,78	61,69	14,47		
C5	137,07	146,51	9,44	16,402	3,95	64,79	14,57		
C6	136,74	145,89	9,15	16,401	3,97	65,11	14,05		
C7	132,04	140,91	8,87	16,26	3,80	61,71	14,37		
C8	133,73	142,72	8,99	15,667	4,00	62,59	14,36		
C9	136,16	145,90	9,74	16,503	3,93	64,90	15,01		
CC1	128,86	137,68	8,82	15,58	3,89	60,53	14,57	14,01	0,77
CC2	129,83	138,52	8,69	15,795	3,89	61,40	14,15		
CC3	139,96	149,28	9,32	16,12	3,90	62,91	14,82		
CC4	126,54	135,17	8,63	15,92	4,04	64,32	13,42		
CC5	138,68	148,00	9,32	16,3	3,98	64,83	14,38		
CC6	139,69	147,93	8,24	16,179	4,04	65,28	12,62		
CC7	134,20	142,51	8,31	16,544	3,84	63,57	13,07		
CC8	137,89	147,32	9,43	16,301	3,99	64,96	14,52		
CC9	133,97	143,14	9,17	16,221	3,89	63,14	14,52		
CL1	129,12	139,46	10,34	16,201	3,91	63,31	16,33	16,58	0,30
CL2	132,47	143,28	10,81	16,281	4,00	65,08	16,61		
CL3	129,00	139,58	10,58	16,201	3,88	62,82	16,84		
CL4	131,37	141,75	10,38	16,201	3,96	64,12	16,19		
CL6	134,23	144,80	10,57	16	3,99	63,76	16,58		
CL7	131,58	142,07	10,49	15,8	4,05	63,95	16,40		
CL8	136,33	147,04	10,71	16,18	3,99	64,56	16,59		
CL9	131,19	142,13	10,94	15,999	3,99	63,88	17,13		
H1	117,66	132,01	14,35	16,675	3,75	62,53	22,95	23,32	0,43
H2	125,93	141,52	15,59	16,094	4,20	67,59	23,06		
H3	119,31	134,13	14,82	15,662	4,05	63,35	23,39		
H4	122,99	137,98	14,99	15,662	4,01	62,84	23,85		
H5	129,42	145,50	16,08	16,678	4,13	68,80	23,37		
H6	124,17	139,81	15,64	16,425	3,99	65,45	23,89		
H7	124,36	139,99	15,63	16,402	4,06	66,55	23,49		
H8	121,26	136,49	15,23	16,443	3,97	65,20	23,36		
H9	120,68	135,99	15,31	16,423	4,14	67,91	22,54		

A4 ENSAIO DE CAPILARIDADE

Quadro A4.1 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C1

PROVETE C 1									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	15	18	3	2008	139,30	0,20	0	0,0000	0,0000
10	54	18	3	2008	140,94	2,25	39	0,8062	0,1037
13	0	18	3	2008	143,10	2,98	165	1,6583	0,2402
13	28	18	3	2008	143,44	2,98	193	1,7935	0,2617
19	39	18	3	2008	146,70	3,23	564	3,0659	0,4678
22	48	18	3	2008	147,63	4,09	753	3,5426	0,5266
14	30	19	3	2008	148,03		1695	5,3151	0,5519
8	45	20	3	2008	148,09		2790	6,8191	0,5557
14	3	24	3	2008	148,21		8868	12,1573	0,5632
19	24	26	3	2008	148,23		12069	14,1827	0,5645
15	22	29	3	2008	148,25		16147	16,4048	0,5658
7	58	1	4	2008	148,30		20023	18,2679	0,5689

SECÇÃO - 15,819 cm²

ALTURA - 4,09 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 13,18%

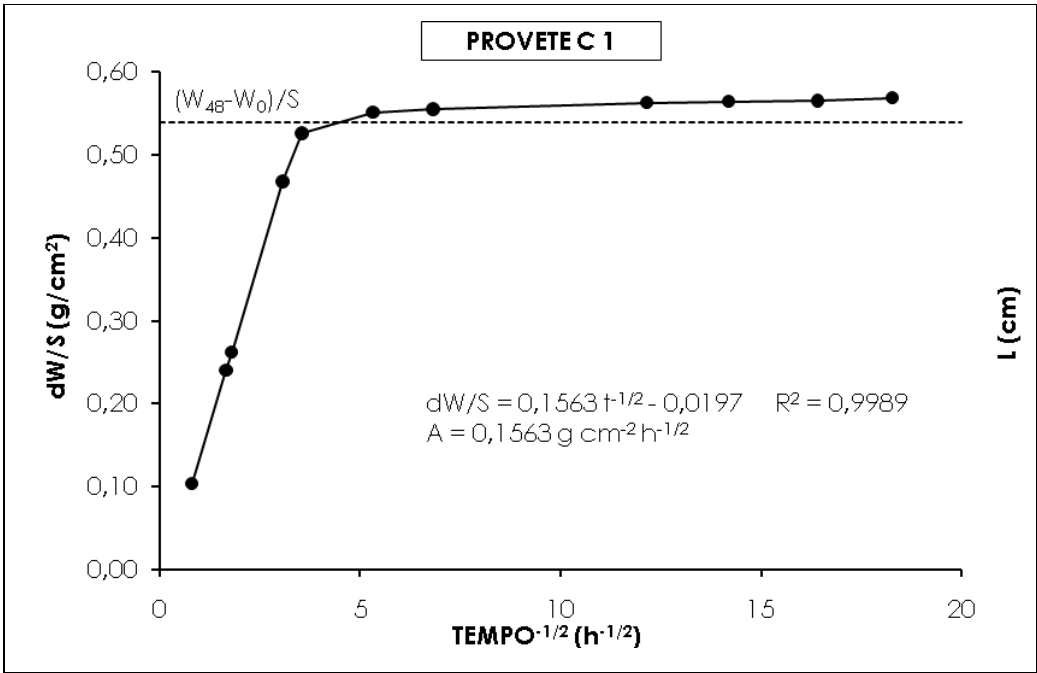


Figura A4.1 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C1

Quadro A4.2 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C2

PROVETE C 2										
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S	HORA ^{-1/2}
10	16	18	3	2008	133,37	0,00	0	0,0000	0,0000	0,0000
10	55	18	3	2008	135,08	2,25	39	0,8062	0,1088	0,8062
13	1	18	3	2008	137,07	3,41	165	1,6583	0,2354	1,6583
13	29	18	3	2008	137,42	3,41	193	1,7935	0,2576	1,7935
19	40	18	3	2008	140,5	3,71	564	3,0659	0,4536	3,0659
22	48	18	3	2008	141,5	3,79	752	3,5402	0,5172	3,5402
14	31	19	3	2008	141,92	3,96	1695	5,3151	0,5439	5,3151
8	46	20	3	2008	142,09		2790	6,8191	0,5547	6,8191
14	3	24	3	2008	142,28		8867	12,1566	0,5668	12,1566
19	25	26	3	2008	142,28		12069	14,1827	0,5668	14,1827
15	23	29	3	2008	142,28		16147	16,4048	0,5668	16,4048
7	59	32	4	2008	142,28		20023	18,2679	0,5668	18,2679

SECÇÃO - 15,719 cm²

ALTURA - 3,96 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 13,77%

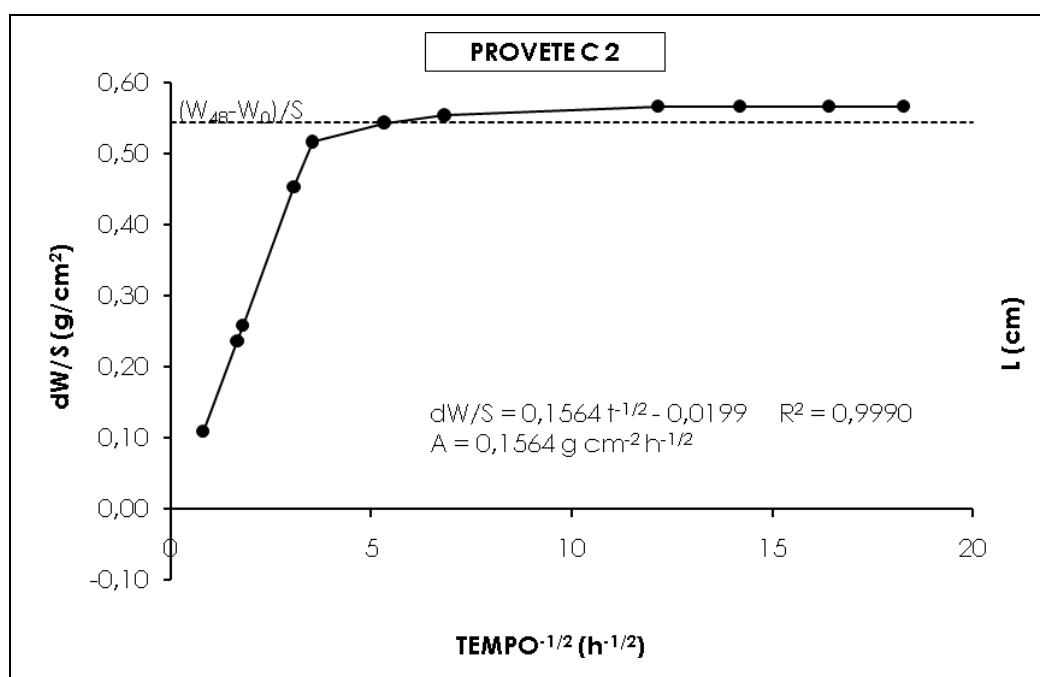


Figura A4.2 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C2

Quadro A4.3 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C3

PROVETE C 3										
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S	HORA ^{-1/2}
10	16	18	3	2008	133,37	0,00	0	0,0000	0,0000	0,0000
10	55	18	3	2008	135,08	2,25	39	0,8062	0,1088	0,8062
13	1	18	3	2008	137,07	3,41	165	1,6583	0,2354	1,6583
13	29	18	3	2008	137,42	3,41	193	1,7935	0,2576	1,7935
19	40	18	3	2008	140,5	3,71	564	3,0659	0,4536	3,0659
22	48	18	3	2008	141,5	3,79	752	3,5402	0,5172	3,5402
14	31	19	3	2008	141,92	3,96	1695	5,3151	0,5439	5,3151
8	46	20	3	2008	142,09		2790	6,8191	0,5547	6,8191
14	3	24	3	2008	142,28		8867	12,1566	0,5668	12,1566
19	25	26	3	2008	142,28		12069	14,1827	0,5668	14,1827
15	23	29	3	2008	142,28		16147	16,4048	0,5668	16,4048
7	59	32	4	2008	142,28		20023	18,2679	0,5668	18,2679

SECÇÃO (cm²) - 15,699 cm²

ALTURA - 3,77 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 13,55%

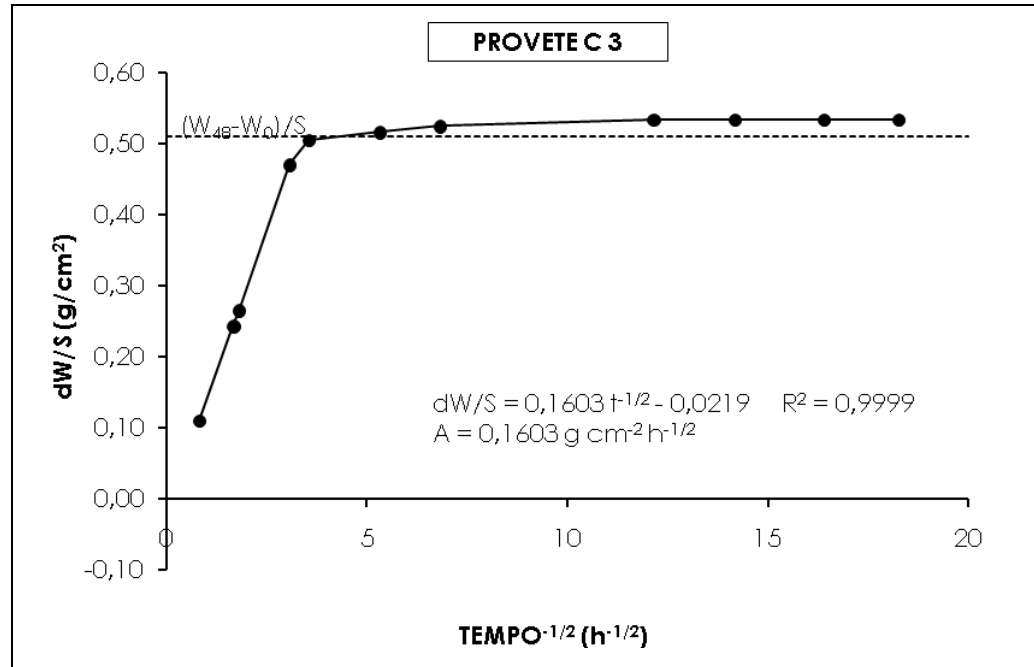


Figura A4.3 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C3

Quadro A4.4 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C4

PROVETE C 4									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	16	18	3	2008	132,11	0,00	0	0,0000	0,0000
10	57	18	3	2008	134,18	1,15	41	0,8266	0,1268
13	3	18	3	2008	136,48	1,50	167	1,6683	0,2678
13	30	18	3	2008	136,84	1,73	194	1,7981	0,2898
19	42	18	3	2008	140,22	2,23	566	3,0714	0,4969
22	50	18	3	2008	140,81	3,78	754	3,5449	0,5331
14	32	19	3	2008	140,94	3,78	1696	5,3166	0,5410
8	47	20	3	2008	141,08		2791	6,8203	0,5496
14	4	24	3	2008	141,18		8868	12,1573	0,5557
19	27	26	3	2008	141,21		12071	14,1839	0,5576
15	24	29	3	2008	141,31		16148	16,4053	0,5637
7	59	1	4	2008	141,31		20023	18,2679	0,5637

SECÇÃO - 16,321 cm²

ALTURA - 3,78 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 14,47%

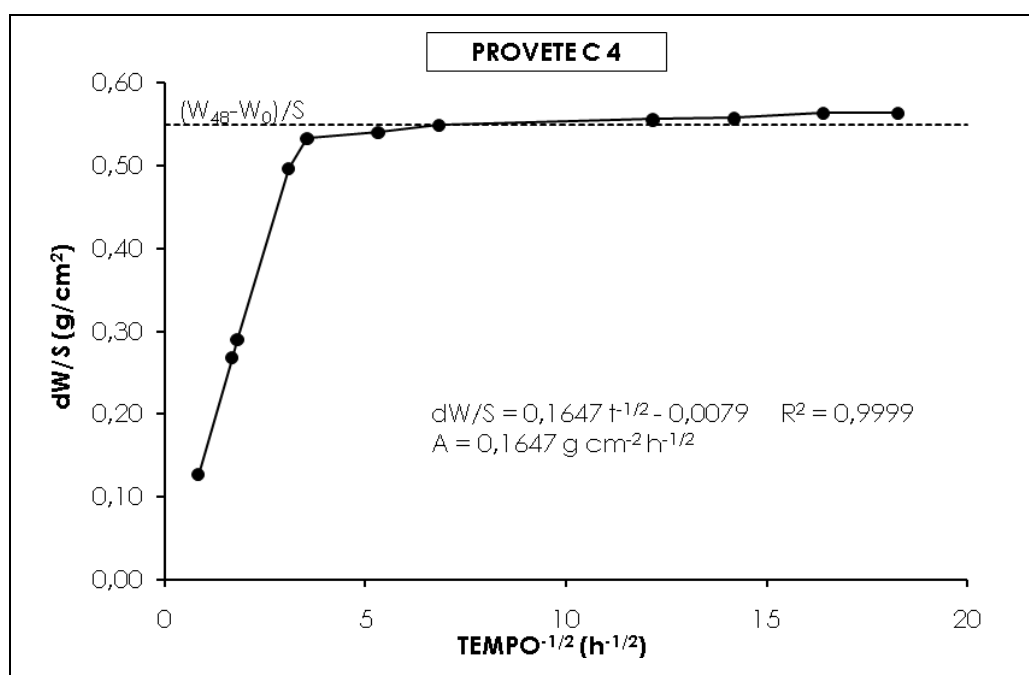


Figura A4.4 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C4

Quadro A4.5 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C5

PROVETE C 5									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	16	18	3	2008	136,78	0,00	0	0,0000	0,0000
10	58	18	3	2008	138,91	2,55	42	0,8367	0,1299
13	3	18	3	2008	141,35	2,67	167	1,6683	0,2786
13	30	18	3	2008	141,75	2,67	194	1,7981	0,3030
19	42	18	3	2008	145,12	2,80	566	3,0714	0,5085
22	50	18	3	2008	145,92	3,95	754	3,5449	0,5572
14	33	19	3	2008	146,21	3,95	1697	5,3182	0,5749
8	47	20	3	2008	146,3		2791	6,8203	0,5804
14	4	24	3	2008	146,59		8868	12,1573	0,5981
19	28	26	3	2008	146,59		12072	14,1845	0,5981
15	24	29	3	2008	146,59		16148	16,4053	0,5981
8	0	32	4	2008	146,47		20024	18,2684	0,5908

SECÇÃO (cm²) - 16,402 cm²
ALTURA - 3,95 cm
POROSIDADE LIVRE (%) -14,57%

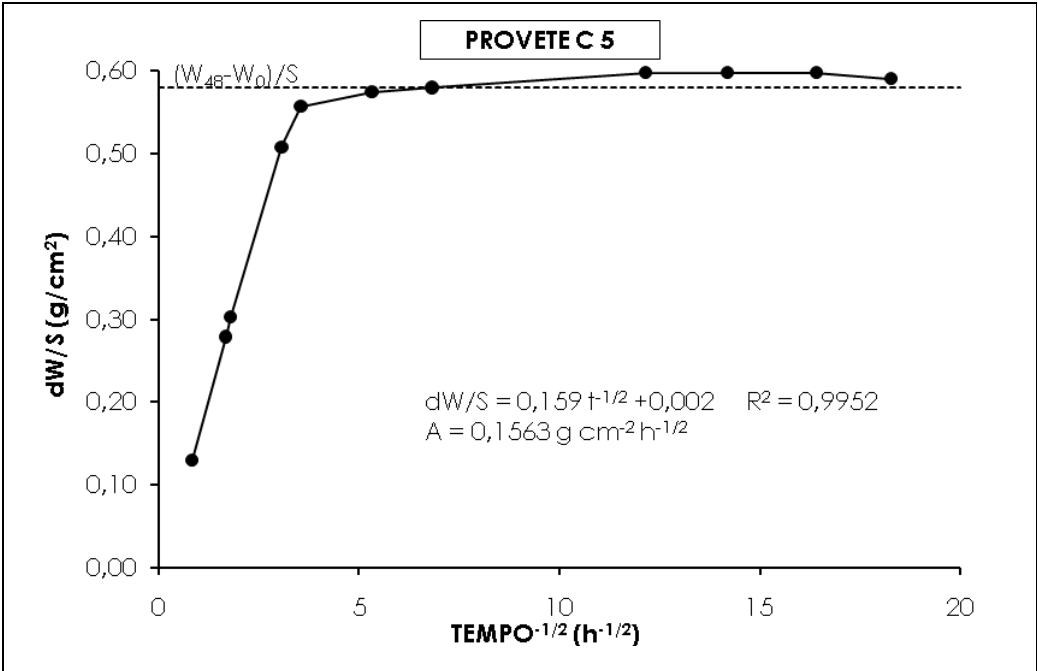


Figura A4.5 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C5

Quadro A4.6 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C6

PROVETE C 6									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	17	18	3	2008	136,43	0,00	0	0,0000	0,0000
10	59	18	3	2008	138,42	1,03	42	0,8367	0,1213
13	4	18	3	2008	140,73	1,68	167	1,6683	0,2622
13	31	18	3	2008	141,09	2,10	194	1,7981	0,2841
19	43	18	3	2008	144,39	2,40	566	3,0714	0,4853
22	51	18	3	2008	145,29	3,49	754	3,5449	0,5402
14	34	19	3	2008	145,65	3,97	1697	5,3182	0,5622
8	47	20	3	2008	145,73		2790	6,8191	0,5670
14	5	24	3	2008	146,00		8868	12,1573	0,5835
19	28	26	3	2008	146,04		12071	14,1839	0,5859
15	25	29	3	2008	146,04		16148	16,4053	0,5859
8	1	32	4	2008	146,04		20024	18,2684	0,5859

SECÇÃO (cm²) - 16,401 cm²

ALTURA - 3,97 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 14,05%

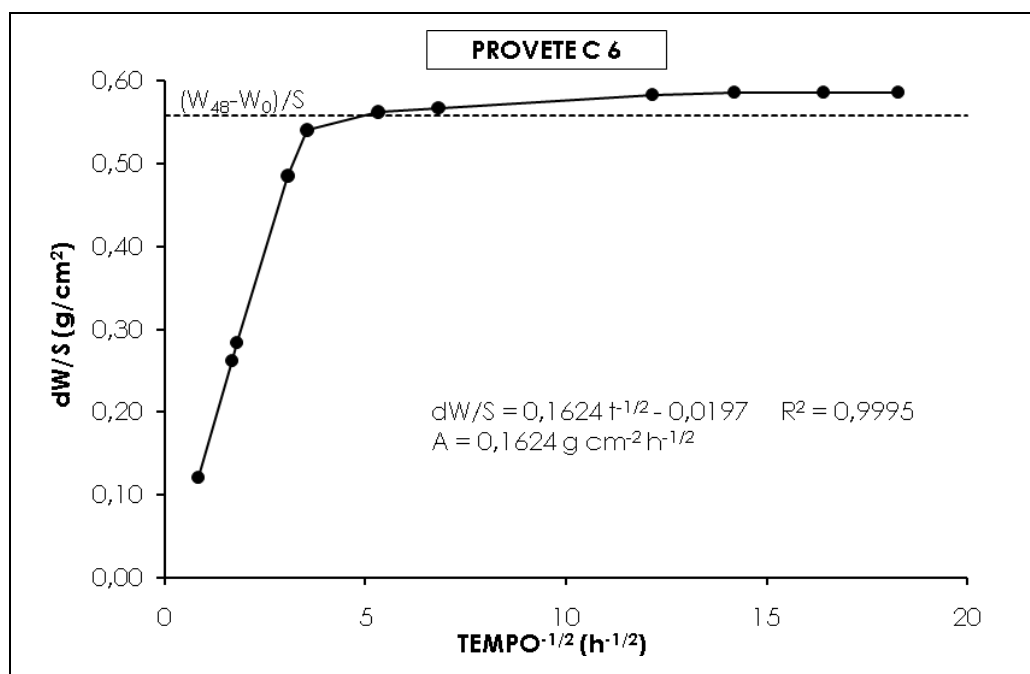


Figura A4.6 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C6

Quadro A4.7 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C7

PROVETE C 7									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	17	18	3	2008	131,73	0,000	0	0,0000	0,0000
10	59	18	3	2008	133,66	1,450	42	0,8367	0,1187
13	5	18	3	2008	135,77	1,850	168	1,6733	0,2485
13	31	18	3	2008	136,13	2,100	194	1,7981	0,2706
19	44	18	3	2008	139,5	2,700	567	3,0741	0,4779
22	52	18	3	2008	140,44	3,495	755	3,5473	0,5357
14	34	19	3	2008	140,65	3,795	1697	5,3182	0,5486
8	48	20	3	2008	140,78	3,795	2791	6,8203	0,5566
14	5	24	3	2008	141,03		8868	12,1573	0,5720
19	29	26	3	2008	141,03		12072	14,1845	0,5720
15	25	29	3	2008	141,03		16148	16,4053	0,5720
8	1	1	4	2008	141,03		18584	17,5992	0,5720

SECÇÃO (cm²) - 16,260m²

ALTURA - 3,795 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 14,37%

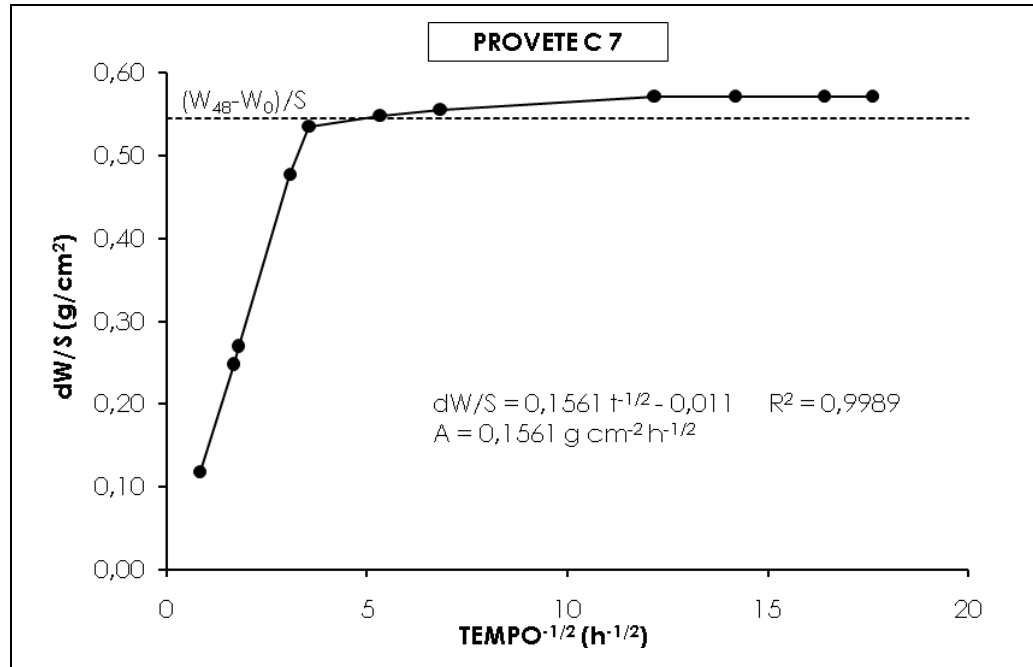


Figura A4.7 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C7

Quadro A4.8 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C8

PROVETE C 8									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	17	18	3	2008	133,36	0,000	0	0,0000	0,0000
11	0	18	3	2008	134,72	2,175	43	0,8466	0,0868
13	5	18	3	2008	136,85	3,320	168	1,6733	0,2226
13	32	18	3	2008	137,19	3,295	195	1,8028	0,2443
19	44	18	3	2008	140,67	3,270	567	3,0741	0,4663
22	52	18	3	2008	141,71	3,395	755	3,5473	0,5326
14	35	19	3	2008	142,41	4,045	1698	5,3198	0,5773
8	49	20	3	2008	142,61		2792	6,8215	0,5900
14	6	24	3	2008	142,66		8869	12,1580	0,5932
19	30	26	3	2008	142,69		12073	14,1851	0,5951
15	26	29	3	2008	142,81		16149	16,4058	0,6028
8	1	1	4	2008	142,81		18584	17,5992	0,6028

SECÇÃO (cm²) - 15,677 cm²

ALTURA - 3,995 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 14,36%

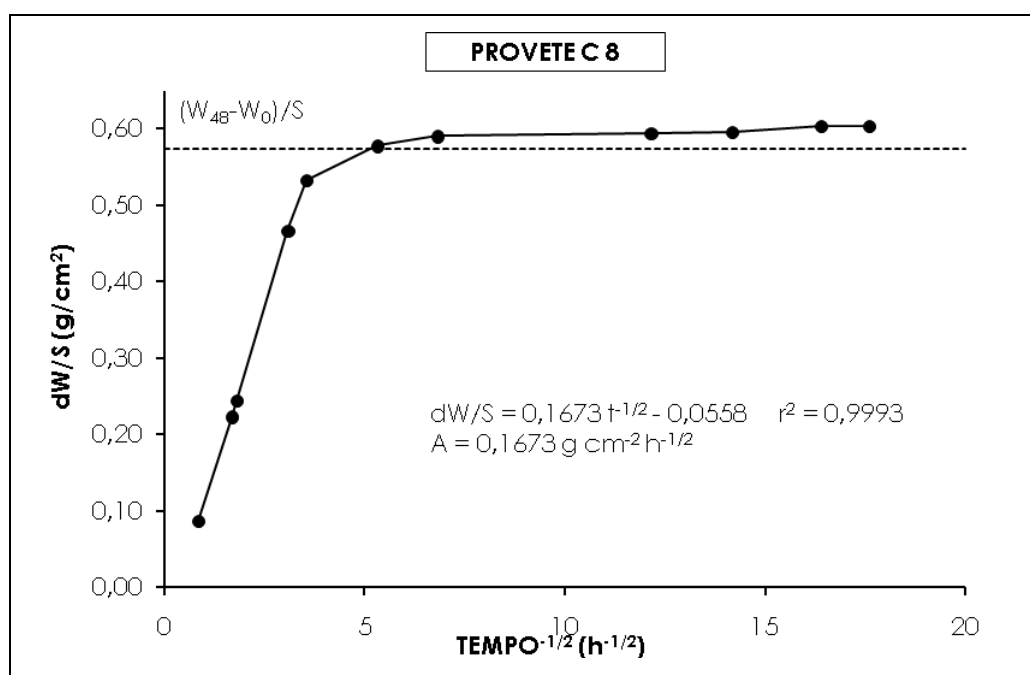


Figura A4.8 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C8

Quadro A4.9 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C9

PROVETE C 9									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	18	18	3	2008	136,43	0,0000	0	0,0000	0,0000
11	0	18	3	2008	138,43	2,0500	42	0,8367	0,1212
13	6	18	3	2008	140,63	2,5625	168	1,6733	0,2545
13	33	18	3	2008	140,99	2,5625	195	1,8028	0,2763
19	45	18	3	2008	144,35	3,4125	567	3,0741	0,4799
22	53	18	3	2008	145,42	3,9325	755	3,5473	0,5447
14	36	19	3	2008	145,65	3,9325	1698	5,3198	0,5587
8	49	20	3	2008	145,76	3,9325	2791	6,8203	0,5654
14	6	24	3	2008	146,05		8868	12,1573	0,5829
19	30	26	3	2008	146,05		12072	14,1845	0,5829
15	26	29	3	2008	146,05		16148	16,4053	0,5829
8	2	31	4	2008	146,05		18584	17,5992	0,5829

SECÇÃO (cm²) - 16,503 cm²

ALTURA - 3,9325 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 15,01%

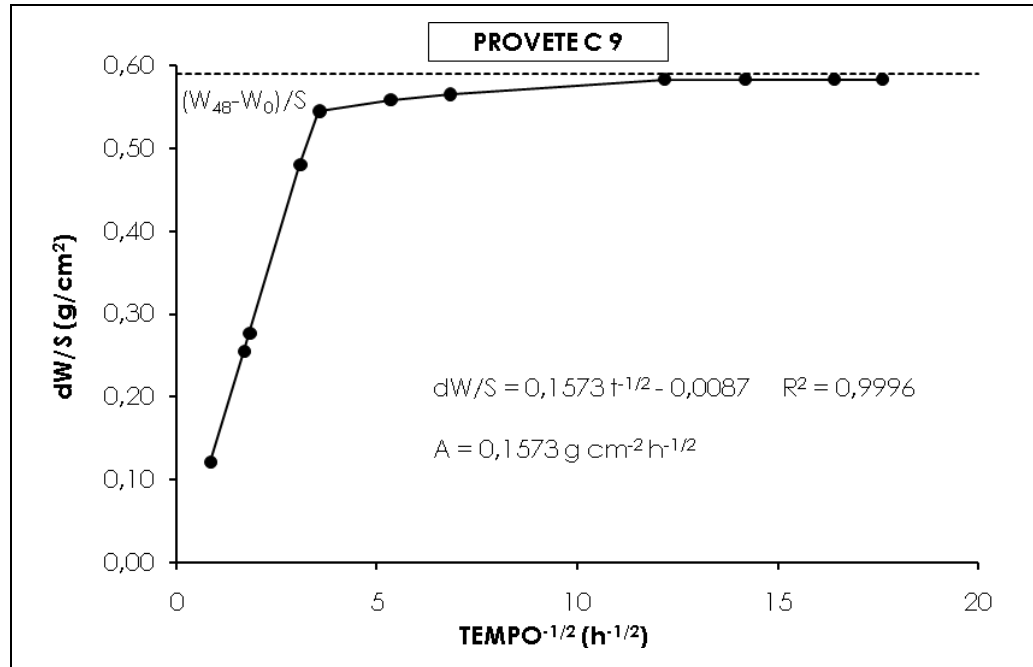


Figura A4.9 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete C9

Quadro A4.10 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC1

PROVETE CC 1									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	32	18	3	2008	128,29	0,0000	0	0,0000	0,0000
11	3	18	3	2008	129,87	2,9500	31	0,7188	0,1014
13	7	18	3	2008	132,14	3,7450	155	1,6073	0,2471
13	34	18	3	2008	132,51	3,8850	182	1,7416	0,2709
19	47	18	3	2008	135,67	3,8850	555	3,0414	0,4737
22	55	18	3	2008	136,59	3,8850	743	3,5190	0,5327
14	37	19	3	2008	137,32	3,8850	1685	5,2994	0,5796
8	50	20	3	2008	137,39	3,8850	2778	6,8044	0,5841
14	7	24	3	2008	137,53		8855	12,1484	0,5931
19	31	26	3	2008	137,62		12059	14,1769	0,5988
15	27	29	3	2008	137,62		16135	16,3987	0,5988
8	3	1	4	8	137,64		18571	17,5931	0,6001

SECÇÃO (cm²) - 15,580 cm²

ALTURA - 3,885 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 14,57%

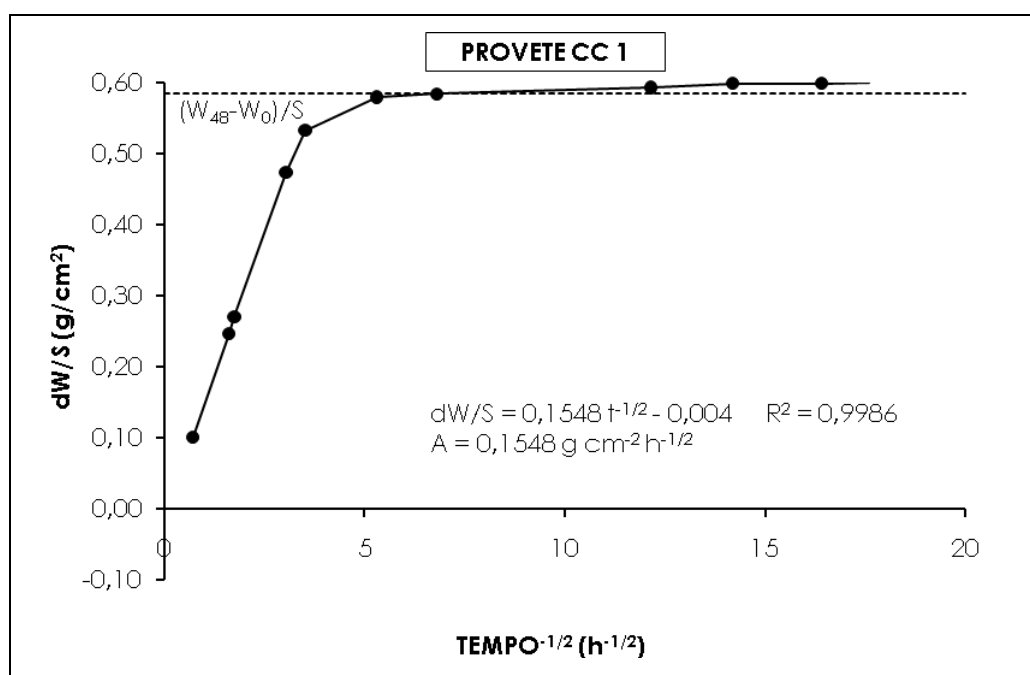


Figura A4.10 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC1

Quadro A4.11 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC2

PROVETE CC 2									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	32	18	3	2008	129,21	0,0000	0	0,0000	0,0000
11	3	18	3	2008	130,66	2,2500	31	0,7188	0,0918
13	8	18	3	2008	132,83	2,9975	156	1,6125	0,2292
13	35	18	3	2008	133,15	3,1975	183	1,7464	0,2494
19	47	18	3	2008	136,2	3,8875	555	3,0414	0,4425
22	55	18	3	2008	137,09	3,8875	743	3,5190	0,4989
14	38	19	3	2008	138,27	3,8875	1686	5,3009	0,5736
8	51	20	3	2008	138,3		2779	6,8056	0,5755
14	7	24	3	2008	138,46		8855	12,1484	0,5856
19	32	26	3	2008	138,49		12060	14,1774	0,5875
15	28	29	3	2008	138,5		16136	16,3992	0,5882
8	3	1	4	2008	138,57		18571	17,5931	0,5926

SECÇÃO (cm²) - 15,795 cm²

ALTURA - 3,8875 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 14,15%

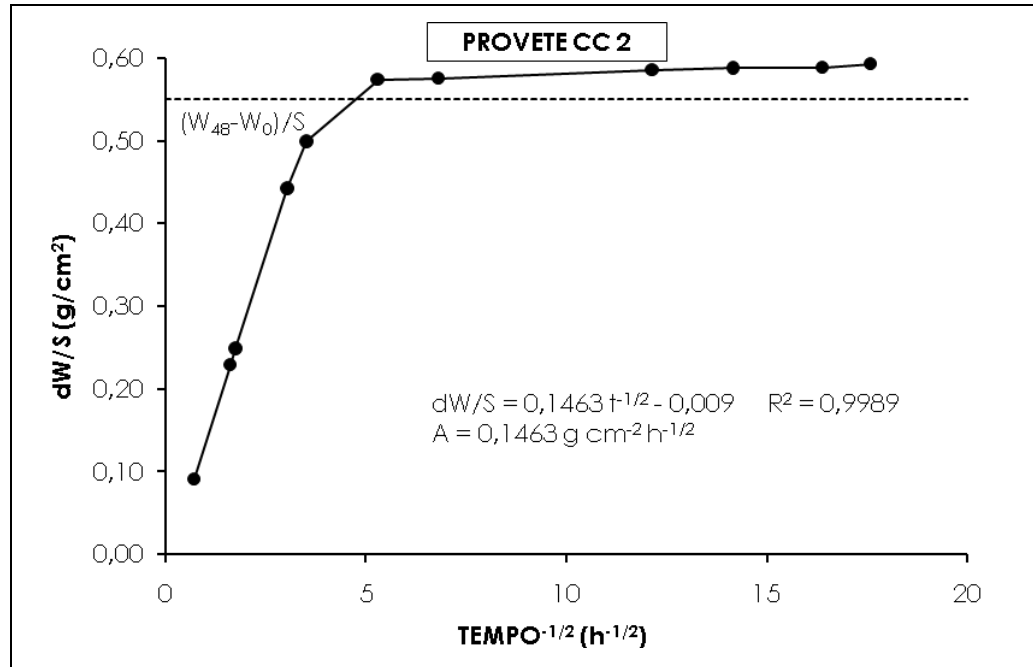


Figura A4.11 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC2

Quadro A4.12 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC3

PROVETE CC 3									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	33	18	3	2008	139,15	0,000	0	0,0000	0,0000
11	4	18	3	2008	140,32	2,025	31	0,7188	0,0726
13	8	18	3	2008	142,2	3,075	155	1,6073	0,1892
13	36	18	3	2008	142,46	3,250	183	1,7464	0,2053
19	48	18	3	2008	145,46	3,903	555	3,0414	0,3914
22	56	18	3	2008	146,45	3,903	743	3,5190	0,4529
14	39	19	3	2008	148,81	3,903	1686	5,3009	0,5993
8	51	20	3	2008	148,97	3,903	2778	6,8044	0,6092
14	7	24	3	2008	149,06		8854	12,1477	0,6148
19	32	26	3	2008	149,12		12059	14,1769	0,6185
15	28	29	3	2008	149,17		16135	16,3987	0,6216
8	4	1	4	2008	149,17		18571	17,5931	0,6216

SECÇÃO (cm²) - 16,120 cm²

ALTURA - 3,9025 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 14,82%

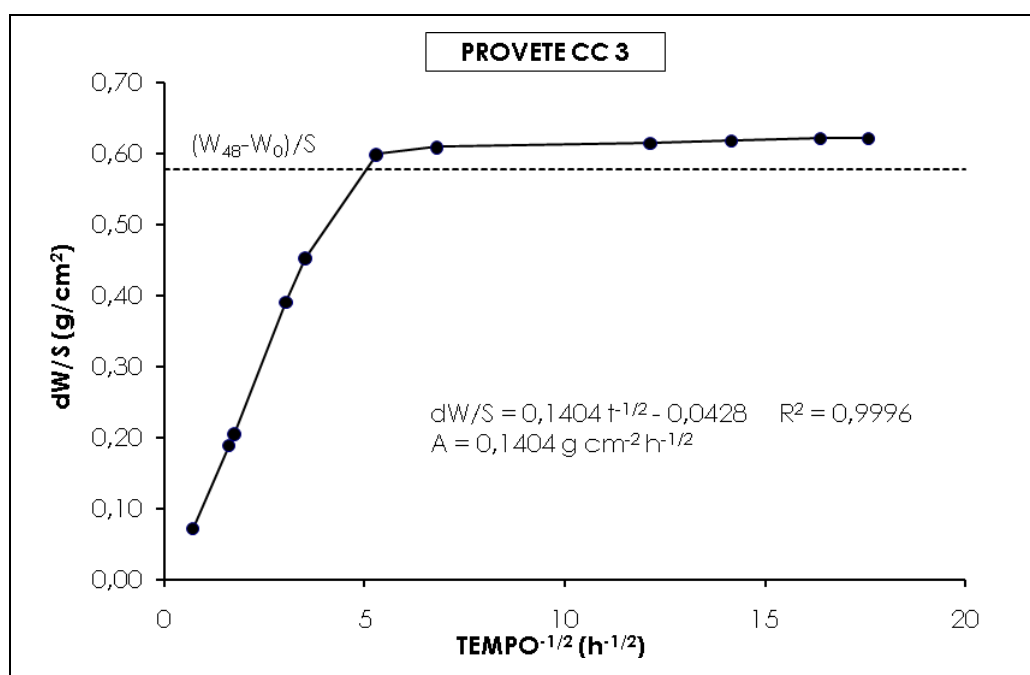


Figura A4.12 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC3

Quadro A4.13 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC4

PROVETE CC 4									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	33	18	3	2008	125,93	0,000	0	0,0000	0,0000
11	5	18	3	2008	127,14	1,975	32	0,7303	0,0760
13	9	18	3	2008	129,12	3,463	156	1,6125	0,2004
13	36	18	3	2008	129,46	3,563	183	1,7464	0,2217
19	49	18	3	2008	132,39	4,040	556	3,0441	0,4058
22	56	18	3	2008	133,31		743	3,5190	0,4636
14	40	19	3	2008	134,76		1687	5,3025	0,5546
8	52	20	3	2008	134,89		2779	6,8056	0,5628
14	8	24	3	2008	134,99		8855	12,1484	0,5691
19	32	26	3	2008	135,02		12059	14,1769	0,5710
15	28	29	3	2008	135,1		16135	16,3987	0,5760
8	4	1	4	2008	135,15		18571	17,5931	0,5791

SECÇÃO (cm²) - 15,920 cm²

ALTURA - 4,04 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 13,42%

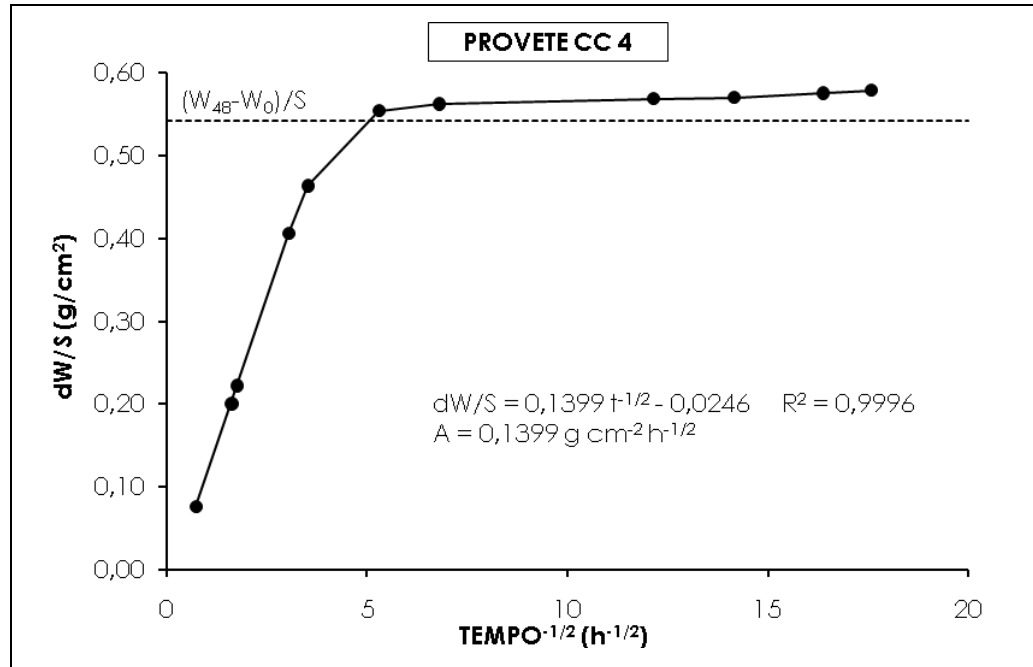


Figura A4.13 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC4

Quadro A4.14 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC5

PROVETE CC 5									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	33	18	3	2008	137,87	0	0	0,0000	0,0000
11	5	18	3	2008	139,15	2,35	32	0,7303	0,0785
13	10	18	3	2008	141,11	3,743	157	1,6176	0,1988
13	37	18	3	2008	141,4	3,768	184	1,7512	0,2166
19	50	18	3	2008	144,22	3,978	557	3,0469	0,3896
22	57	18	3	2008	145,15	3,978	744	3,5214	0,4466
14	40	19	3	2008	147,51	3,978	1687	5,3025	0,5914
8	52	20	3	2008	147,59	3,978	2779	6,8056	0,5963
14	8	24	3	2008	147,81		8855	12,1484	0,6098
19	33	26	3	2008	147,81		12060	14,1774	0,6098
15	28	29	3	2008	147,82		16135	16,3987	0,6104
8	4	31	4	2008	147,84		18571	17,5931	0,6117

SECÇÃO (cm²) - 16,30 cm²

ALTURA - 3,9775 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 14,38%

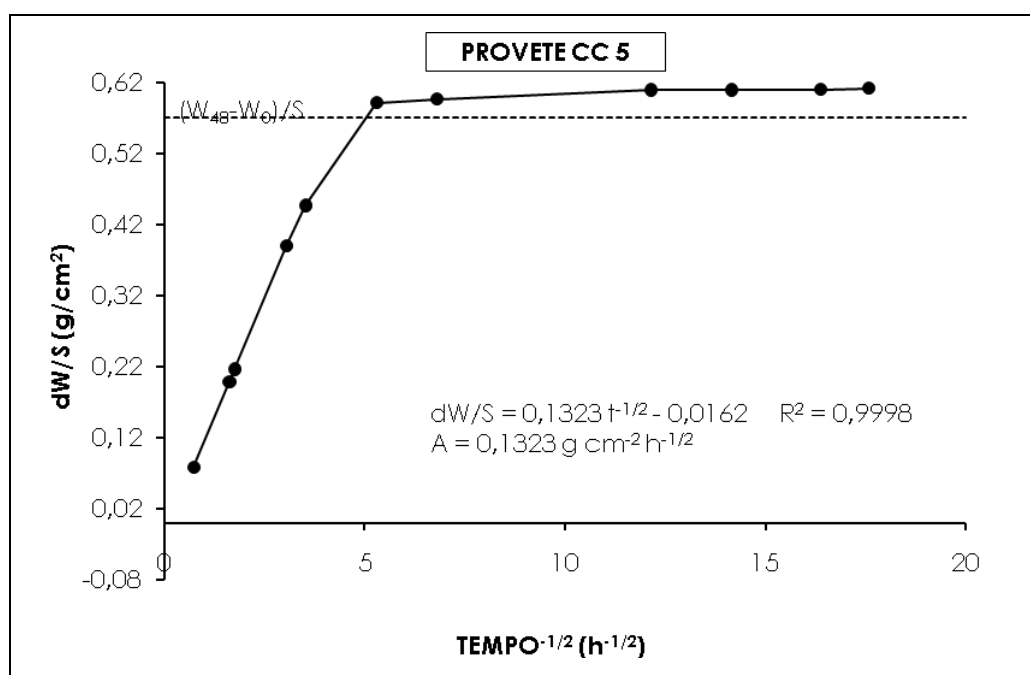


Figura A4.14 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC5

Quadro A4.15 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC6

PROVETE CC 6									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	34	18	3	2008	138,68	0,0000	0	0,0000	0,0000
11	6	18	3	2008	139,68	2,0500	32	0,7303	0,0618
13	10	18	3	2008	140,98	3,7400	156	1,6125	0,1422
13	38	18	3	2008	141,18	3,6650	184	1,7512	0,1545
19	50	18	3	2008	143,22	4,0350	556	3,0441	0,2806
22	58	18	3	2008	143,97	4,0350	744	3,5214	0,3270
14	41	19	3	2008	146,39	4,0350	1687	5,3025	0,4765
8	53	20	3	2008	147,33	4,0350	2779	6,8056	0,5346
14	9	24	3	2008	147,75		8855	12,1484	0,5606
19	34	26	3	2008	147,8		12060	14,1774	0,5637
15	29	29	3	2008	147,9		16135	16,3987	0,5699
8	5	31	4	2008	147,91		18571	17,5931	0,5705

SECÇÃO (cm²) - 16,179 cm²
ALTURA - 4,035 cm
POROSIDADE LIVRE (%) - 12,62%

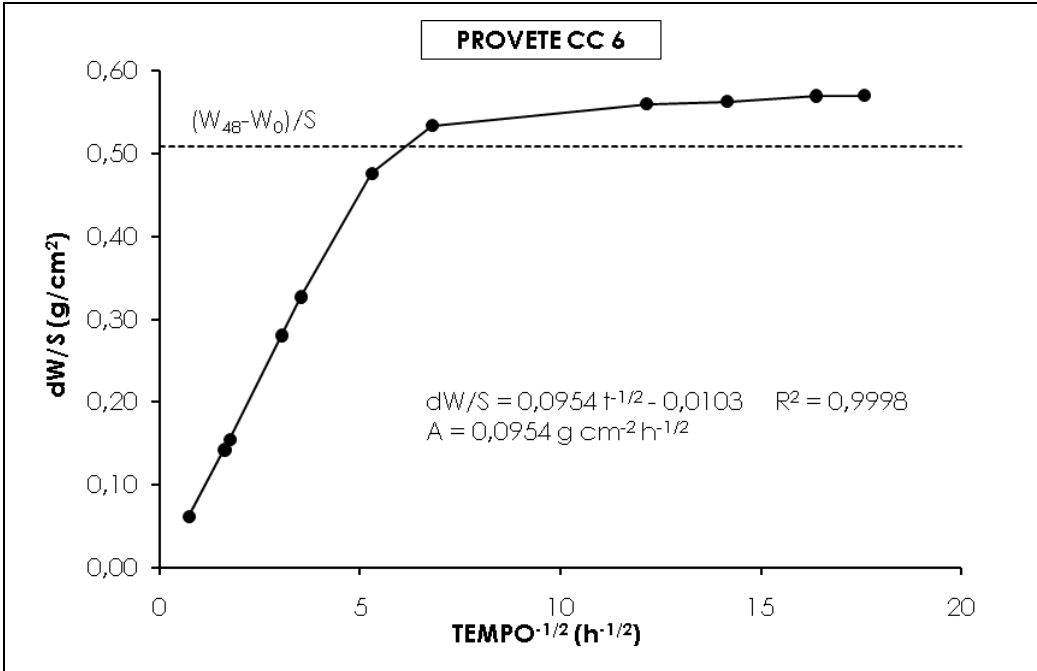


Figura A4.15 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC6

Quadro A4.16 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC7

PROVETE CC 7									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	34	18	3	2008	133,31	0,0000	0	0,0000	0,0000
11	7	18	3	2008	134,96	2,9750	33	0,7416	0,0997
13	39	18	3	2008	137,35	3,8425	185	1,7559	0,2442
19	51	18	3	2008	140,16	3,8425	557	3,0469	0,4140
22	58	18	3	2008	141,14	3,8425	744	3,5214	0,4733
14	41	19	3	2008	142,29	3,8425	1687	5,3025	0,5428
8	53	20	3	2008	142,37		2779	6,8056	0,5476
14	9	24	3	2008	142,49		8855	12,1484	0,5549
19	34	26	3	2008	142,55		12060	14,1774	0,5585
15	29	29	3	2008	142,60		16135	16,3987	0,5615
8	5	1	4	2008	142,65		18571	17,5931	0,5646

SECÇÃO (cm²) - 16,544 cm²

ALTURA - 3,8425 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 13,07%

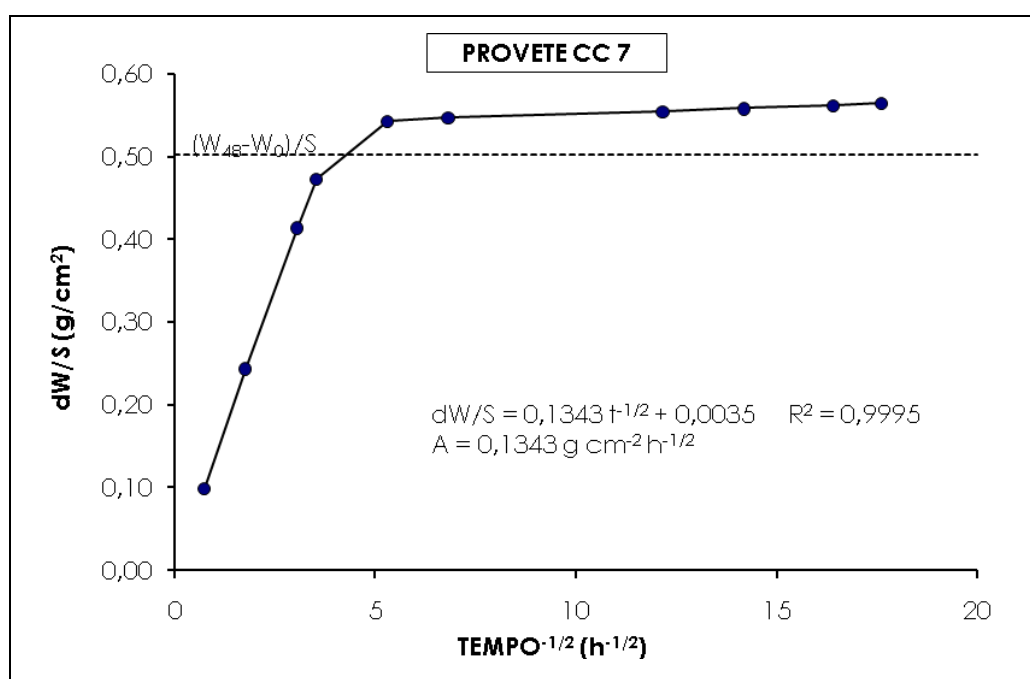


Figura A4.16 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC7

Quadro A4.17 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC8

PROVETE CC 8									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	34	18	3	2008	137,19	0,000	0	0,0000	0,0000
11	8	18	3	2008	138,69	2,100	34	0,7528	0,0920
13	12	18	3	2008	140,84	2,250	158	1,6228	0,2239
13	40	18	3	2008	141,2	2,400	186	1,7607	0,2460
19	53	18	3	2008	144,31	2,400	559	3,0523	0,4368
22	59	18	3	2008	145,3	2,425	745	3,5237	0,4975
14	42	19	3	2008	146,97	3,985	1688	5,3041	0,6000
8	54	20	3	2008	147,03		2780	6,8069	0,6036
14	9	24	3	2008	147,19		8855	12,1484	0,6135
19	34	26	3	2008	147,34		12060	14,1774	0,6227
15	30	29	3	2008	147,34		16136	16,3992	0,6227
8	5	1	4	2008	147,36		18571	17,5931	0,6239

SECÇÃO (cm²) - 16,301 cm²

ALTURA - 3,985cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 14,52%

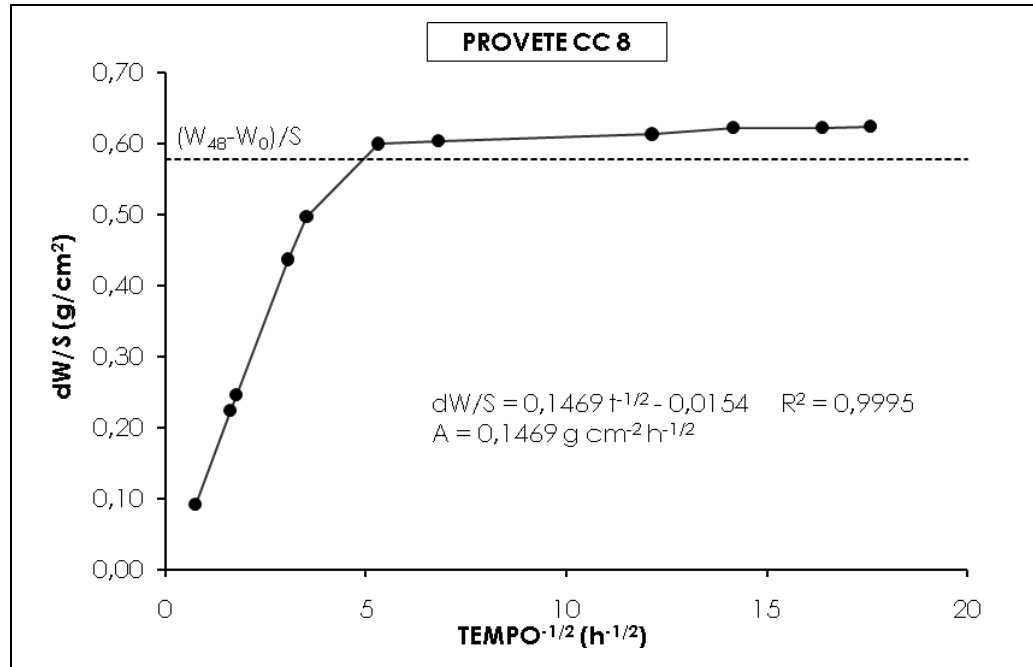


Figura A4.17 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC8

Quadro A4.18 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC9

PROVETE CC 9									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
10	34	18	3	2008	133,34	0,0000	0	0,0000	0,0000
11	8	18	3	2008	134,77	1,3500	34	0,7528	0,0882
13	13	18	3	2008	136,72	1,8750	159	1,6279	0,2084
13	40	18	3	2008	137,02	2,0500	186	1,7607	0,2269
19	58	18	3	2008	139,67	2,0500	564	3,0659	0,3902
23	0	18	3	2008	140,65	2,1500	746	3,5261	0,4507
14	43	19	3	2008	142,76	3,8925	1689	5,3057	0,5807
8	54	20	3	2008	142,78		2780	6,8069	0,5820
14	10	24	3	2008	142,99		8856	12,1491	0,5949
19	35	26	3	2008	143,07		12061	14,1780	0,5998
15	30	29	3	2008	143,09		16136	16,3992	0,6011
8	6	31	4	2008	143,09		18572	17,5936	0,6011

SECÇÃO (cm²) - 16,221 cm²

ALTURA - 3,8925cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 14,52%

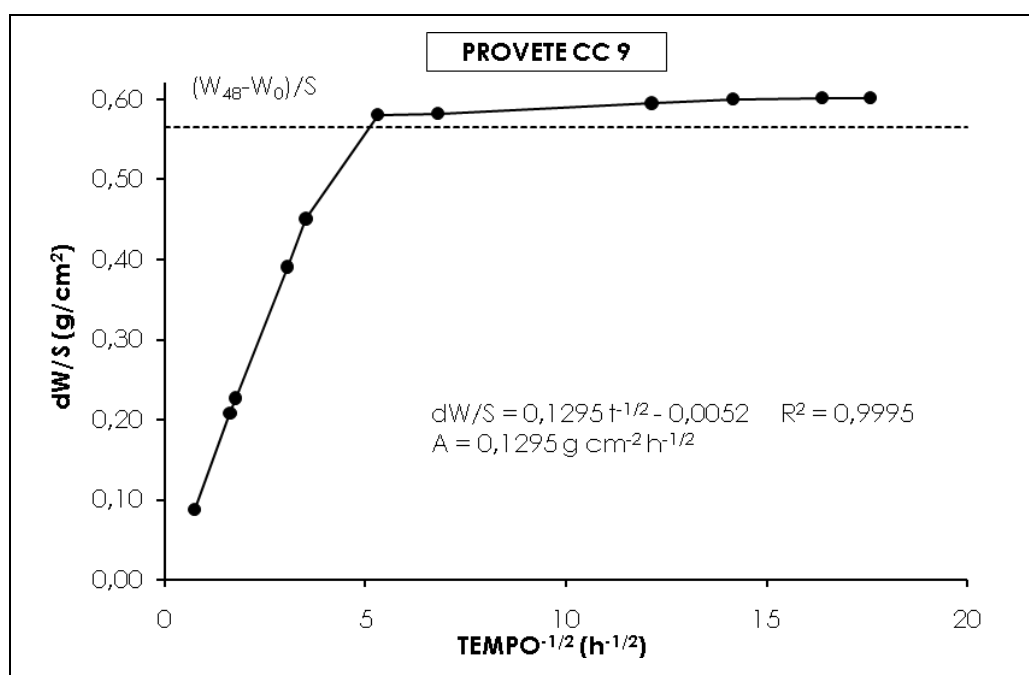


Figura A4.18 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CC9

Quadro A4.19 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL1

PROVETE CL 1									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	54	18	3	2008	128,58	0,0000	0	0,0000	0,0000
10	22	18	3	2008	130,57	0,5500	28	0,6831	0,1228
12	53	18	3	2008	133,34	0,6250	179	1,7272	0,2938
13	20	18	3	2008	133,8	0,7000	206	1,8529	0,3222
19	30	18	3	2008	136,88	0,8500	576	3,0984	0,5123
22	40	18	3	2008	137,85	0,9000	766	3,5730	0,5722
14	23	19	3	2008	138,99	3,9075	1709	5,3370	0,6426
8	40	20	3	2008	139,15	3,9075	2806	6,8386	0,6524
13	58	24	3	2008	139,34		8884	12,1683	0,6642
19	19	26	3	2008	139,36		12085	14,1921	0,6654
15	18	29	3	2008	139,43		16164	16,4134	0,6697
7	52	1	4	2008	139,43		18598	17,6059	0,6697

SECÇÃO (cm²) - 16,201 cm²

ALTURA - 3,9075cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 16,33%

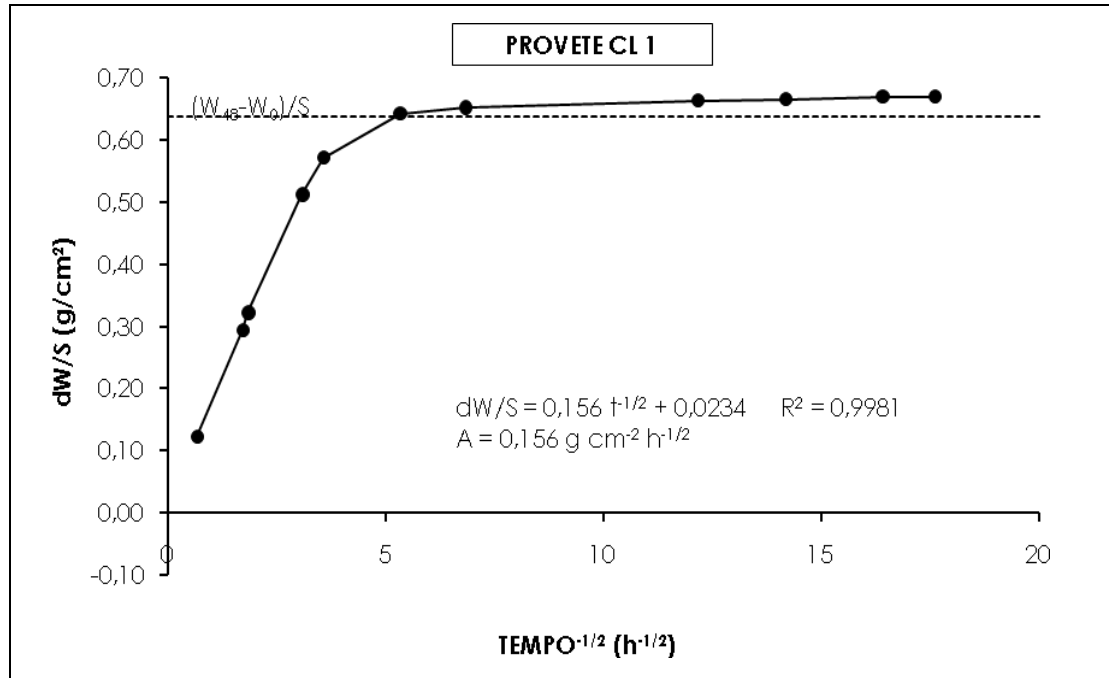


Figura A4.19 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL1

Quadro A4.20 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL2

PROVETE CL 2									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	55	18	3	2008	131,97	0,0000	0	0,0000	0,0000
10	23	18	3	2008	134,24	0,8000	28	0,6831	0,1394
12	53	18	3	2008	137,13	0,8500	178	1,7224	0,3169
13	21	18	3	2008	137,46	0,8750	206	1,8529	0,3372
19	31	18	3	2008	140,40	0,8750	576	3,0984	0,5178
22	41	18	3	2008	141,40	0,9500	766	3,5730	0,5792
14	24	19	3	2008	142,67	3,9975	1709	5,3370	0,6572
8	41	20	3	2008	142,76		2806	6,8386	0,6627
13	58	24	3	2008	143,00		8883	12,1676	0,6775
19	19	26	3	2008	143,08		12084	14,1915	0,6824
15	19	29	3	2008	143,16		16164	16,4134	0,6873
7	53	1	4	2008	143,16		18598	17,6059	0,6873

SECÇÃO (cm²) - 16,281 cm²

ALTURA - 3,9975cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 16,61%

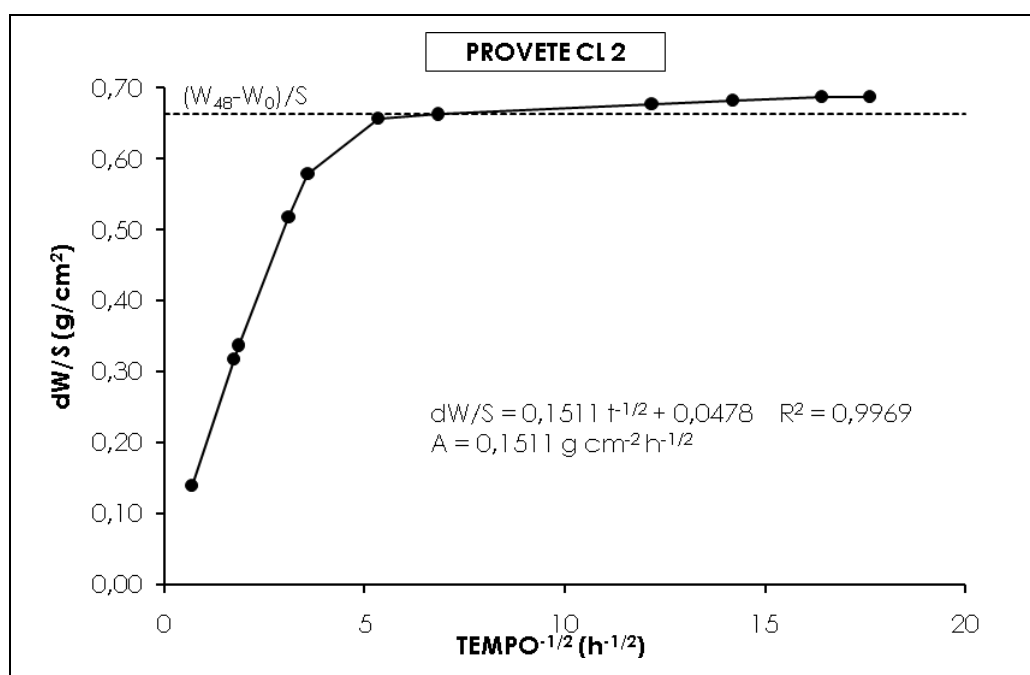


Figura A4.20 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL2

Quadro A4.21 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL3

PROVETE CL 3									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	55	18	3	2008	128,51	0,0000	0	0,0000	0,0000
10	24	18	3	2008	130,7	0,8500	29	0,6952	0,1352
12	54	18	3	2008	133,61	1,0250	179	1,7272	0,3148
13	22	18	3	2008	133,94	1,2000	207	1,8574	0,3352
19	32	18	3	2008	137	1,2500	577	3,1011	0,5240
22	41	18	3	2008	137,98	1,3000	766	3,5730	0,5845
14	25	19	3	2008	139,02	3,8775	1710	5,3385	0,6487
8	41	20	3	2008	139,11	3,8775	2806	6,8386	0,6543
13	58	24	3	2008	139,34		8883	12,1676	0,6685
19	19	26	3	2008	139,4		12084	14,1915	0,6722
15	19	29	3	2008	139,49		16164	16,4134	0,6777
7	54	1	4	2008	139,49		18599	17,6063	0,6777

SECÇÃO (cm²) - 16,201 cm²

ALTURA - 3,8775cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 16,84%

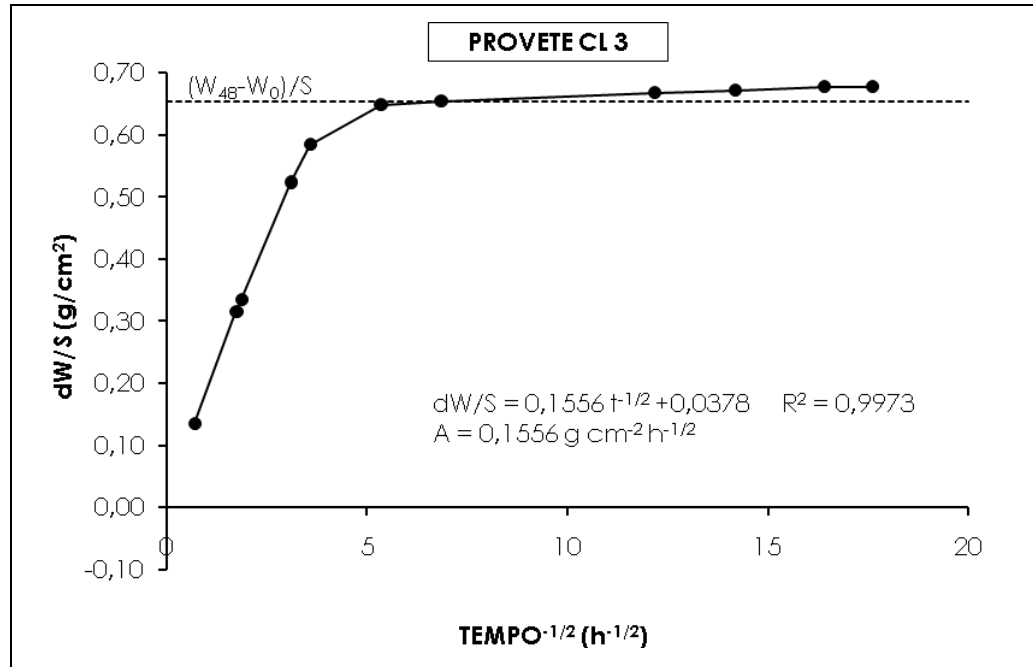


Figura A4.21 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL3

Quadro A4.22 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL4

PROVETE CL 4									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	55	18	3	2008	130,87	0,0000	0	0,0000	0,0000
10	24	18	3	2008	133,36	2,0000	29	0,6952	0,1537
12	55	18	3	2008	136,31	2,1000	180	1,7321	0,3358
13	22	18	3	2008	136,72	2,3000	207	1,8574	0,3611
19	32	18	3	2008	139,9	2,5675	577	3,1011	0,5574
22	42	18	3	2008	140,75	2,5675	767	3,5754	0,6098
14	25	19	3	2008	141,25	3,9575	1710	5,3385	0,6407
8	42	20	3	2008	141,31		2807	6,8398	0,6444
13	59	24	3	2008	141,55		8884	12,1683	0,6592
19	20	26	3	2008	141,61		12085	14,1921	0,6629
15	19	29	3	2008	141,73		16164	16,4134	0,6703
7	54	1	4	2008	141,73		18599	17,6063	0,6703

SECÇÃO (cm²) - 16,201 cm²

ALTURA - 3,9575m

POROSIDADE LIVRE (%) - 16,19%

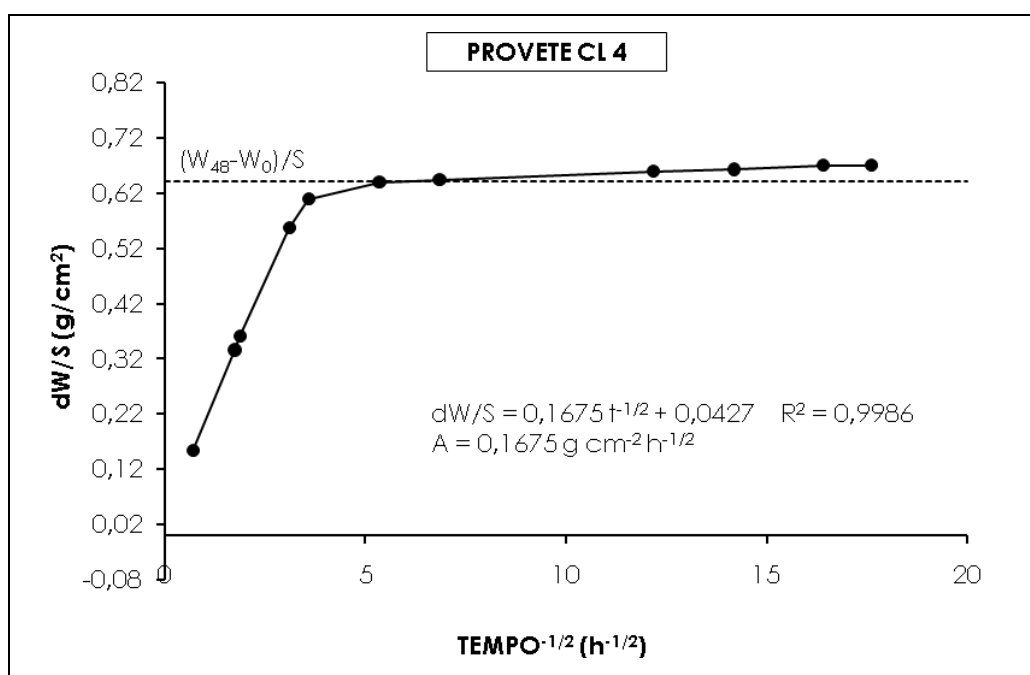


Figura A4.22 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL4

Quadro A4.23 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL6

PROVETE CL 6									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	55	18	3	2008	133,66	0	0	0,0000	0,0000
10	27	18	3	2008	135,28	0,6	32	0,7303	0,1013
12	56	18	3	2008	137,7	0,6	181	1,7369	0,2525
13	24	18	3	2008	137,99	0,65	209	1,8664	0,2706
19	34	18	3	2008	140,9	0,65	579	3,1064	0,4525
22	44	18	3	2008	141,85	0,65	769	3,5800	0,5119
14	27	19	3	2008	144,03	0,7	1712	5,3417	0,6481
8	43	20	3	2008	144,14	1,25	2808	6,8411	0,6550
14	0	24	3	2008	144,42	1,4	8885	12,1689	0,6725
19	21	26	3	2008	144,47	1,5	12086	14,1927	0,6756
15	20	29	3	2008	144,64		16165	16,4139	0,6862
7	55	31	4	2008	144,64		18600	17,6068	0,6862

SECÇÃO (cm²) - 16,00 cm²

ALTURA - 3,985cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 16,58%

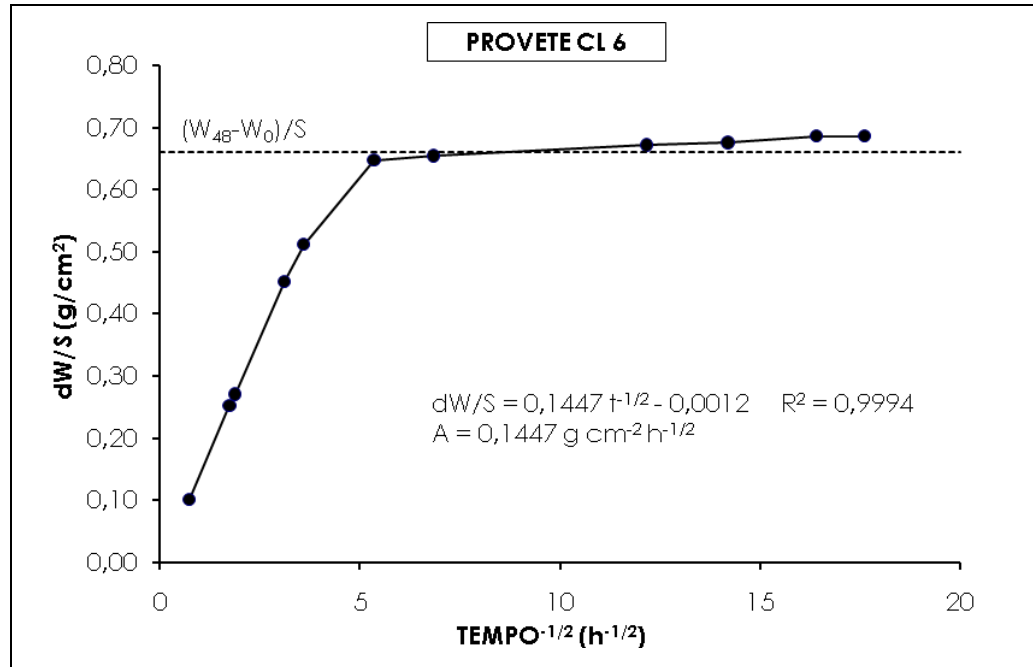


Figura A4.23 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL6

Quadro A4.24 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL7

PROVETE CL 7									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	56	18	3	2008	131,01	0,0000	0	0,0000	0,0000
10	28	18	3	2008	132,54	0,6750	32	0,7303	0,0968
12	58	18	3	2008	134,63	0,6750	182	1,7416	0,2291
13	25	18	3	2008	134,91	0,7000	209	1,8664	0,2468
19	37	18	3	2008	137,49	0,9250	581	3,1118	0,4101
22	45	18	3	2008	138,37	0,9300	769	3,5800	0,4658
14	28	19	3	2008	140,82	0,9500	1712	5,3417	0,6209
8	43	20	3	2008	141,21	1,6000	2807	6,8398	0,6456
14	1	24	3	2008	141,56	4,0475	8885	12,1689	0,6677
19	22	26	3	2008	141,63		12086	14,1927	0,6722
15	21	29	3	2008	141,7		16165	16,4139	0,6766
7	56	1	4	2008	141,7		18600	17,6068	0,6766

SECÇÃO (cm²) - 15,800 cm²

ALTURA - 4,0475cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 16,40%

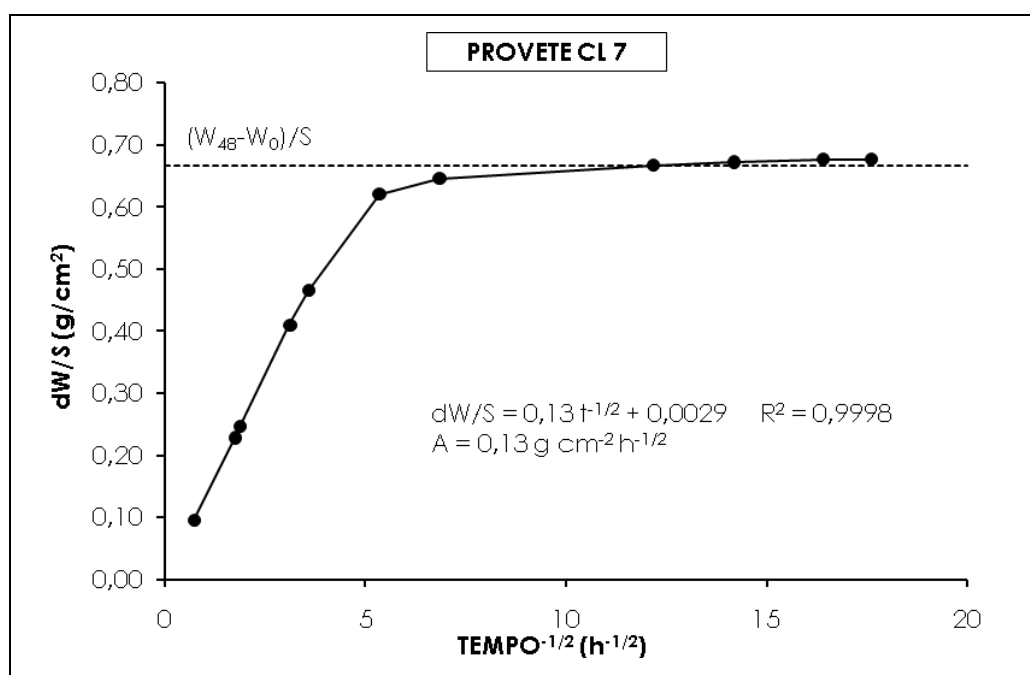


Figura A4.24 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL7

Quadro A4.25 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL8

PROVETE CL 8									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	56	18	3	2008	135,78	0,0000	0	0,0000	0,0000
10	28	18	3	2008	138,03	1,9000	32	0,7303	0,1391
12	58	18	3	2008	140,96	2,1000	182	1,7416	0,3201
13	26	18	3	2008	141,33	2,1000	210	1,8708	0,3430
19	37	18	3	2008	144,54	2,2500	581	3,1118	0,5414
22	46	18	3	2008	145,51	2,4450	770	3,5824	0,6014
14	29	19	3	2008	146,57	3,9950	1713	5,3432	0,6669
8	44	20	3	2008	146,72		2808	6,8411	0,6761
14	2	24	3	2008	147,05		8886	12,1696	0,6965
19	22	26	3	2008	147,05		12086	14,1927	0,6965
15	21	29	3	2008	147,07		16165	16,4139	0,6978
7	57	1	4	2008	147,07		18601	17,6073	0,6978

SECÇÃO (cm²) - 16,18 cm²

ALTURA - 3,99cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 16,59%

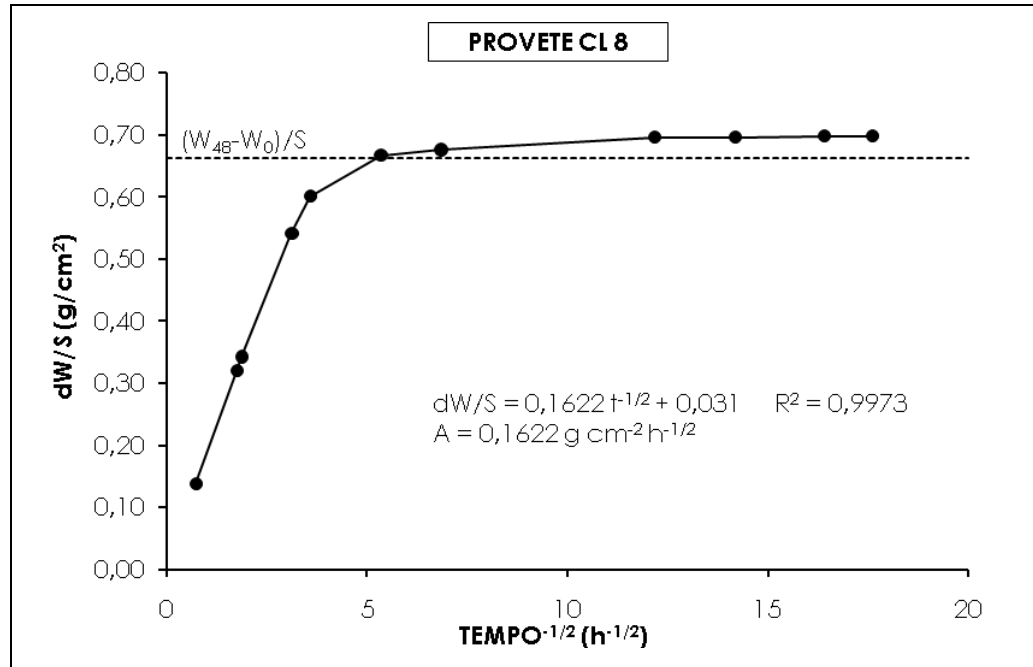


Figura A4.25 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL8

Quadro A4.26 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL9

PROVETE CL 9									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	56	18	3	2008	131,2	0	0	0,0000	0,0000
10	29	18	3	2008	133,14	1,6500	33	0,7416	0,1213
12	59	18	3	2008	135,74	1,9500	183	1,7464	0,2838
13	27	18	3	2008	136,06	2,0000	211	1,8753	0,3038
19	38	18	3	2008	139,11	2,1300	582	3,1145	0,4944
22	46	18	3	2008	140,16	2,0750	770	3,5824	0,5600
14	29	19	3	2008	141,65	3,9925	1713	5,3432	0,6532
8	44	20	3	2008	141,76	3,9925	2808	6,8411	0,6600
14	2	24	3	2008	142,08		8886	12,1696	0,6800
19	23	26	3	2008	142,19		12087	14,1933	0,6869
15	21	29	3	2008	142,19		16165	16,4139	0,6869
7	57	1	4	2008	142,19		18601	17,6073	0,6869

SECÇÃO (cm²) - 15,999 cm²

ALTURA - 3,9925cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 17,13%

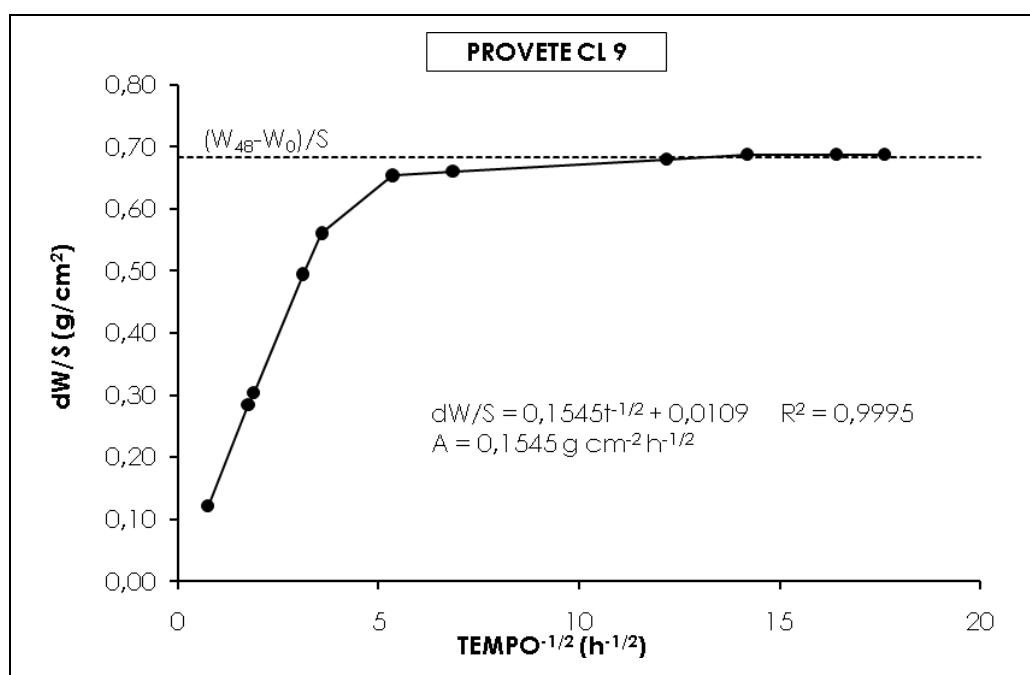


Figura A4.26 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete CL9

Quadro A4.27 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H1

PROVETE H 1									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	41	18	3	2008	116,99	0,0000	0	0,0000	0,0000
10	0	18	3	2008	119,1	1,3000	19	0,5627	0,1265
10	40	18	3	2008	121,57	1,4000	59	0,9916	0,2747
12	46	18	3	2008	125,55	1,6500	185	1,7559	0,5133
13	13	18	3	2008	126,15	1,7250	212	1,8797	0,5493
19	22	18	3	2008	131,13	3,7500	581	3,1118	0,8480
22	34	18	3	2008	131,55		773	3,5893	0,8732
14	18	19	3	2008	131,71		1717	5,3495	0,8828
8	36	20	3	2008	131,74		2815	6,8496	0,8846
13	54	24	3	2008	132,01		8893	12,1744	0,9007
19	15	26	3	2008	132,05		12094	14,1974	0,9031
15	14	29	3	2008	132,14		16173	16,4180	0,9085
7	48	1	4	2008	132,17		18607	17,6101	0,9103

SECÇÃO (cm²) - 16,675 cm²
ALTURA - 3,75cm
POROSIDADE LIVRE (%) - 22,95%

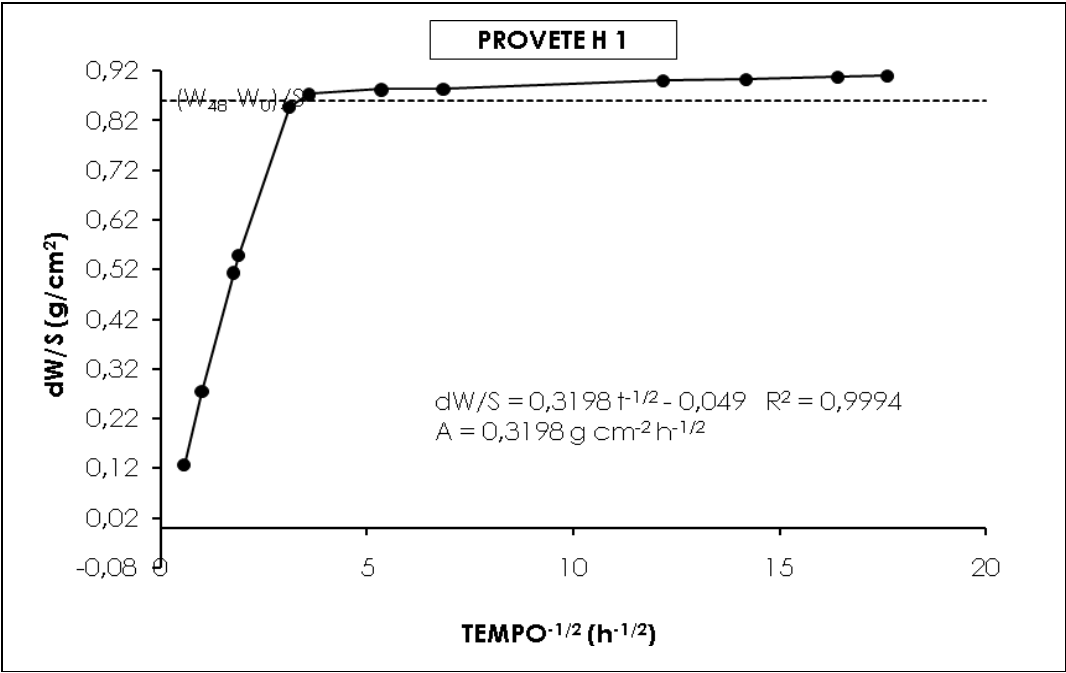


Figura A4.27 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H1

Quadro A4.28 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H2

PROVETE H 2									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	42	18	3	2008	125,19	0,000	0	0,0000	0,0000
10	2	18	3	2008	128,42	1,500	20	0,5774	0,2007
10	41	18	3	2008	132,37	1,650	59	0,9916	0,4461
12	47	18	3	2008	137,7	2,675	185	1,7559	0,7773
13	14	18	3	2008	138,33	2,750	212	1,8797	0,8165
19	23	18	3	2008	141,06	4,200	581	3,1118	0,9861
22	35	18	3	2008	141,1		773	3,5893	0,9886
14	19	19	3	2008	141,19		1717	5,3495	0,9942
8	36	20	3	2008	141,25		2814	6,8484	0,9979
13	54	24	3	2008	141,47		8892	12,1737	1,0116
19	15	26	3	2008	141,54		12093	14,1968	1,0159
15	14	29	3	2008	141,59		16172	16,4175	1,0190
7	48	31	4	2008	141,73		18606	17,6097	1,0277

SECÇÃO (cm²) - 16,094 cm²

ALTURA - 4,2 cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 23,06%

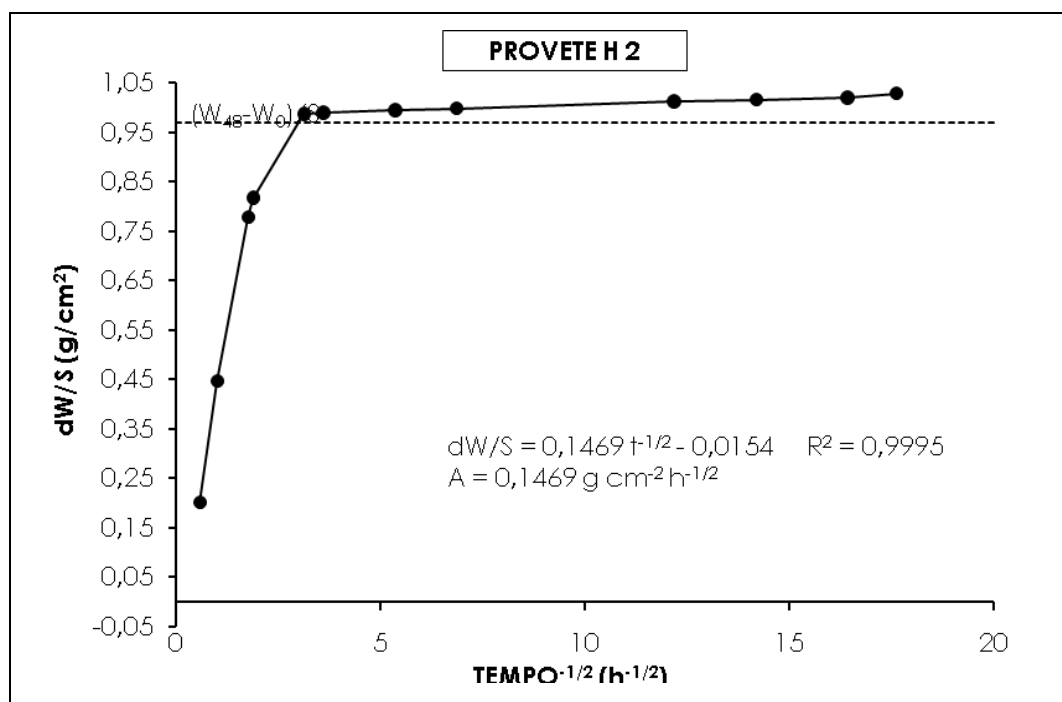


Figura A4.28 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H2

Quadro A4.29 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H3

PROVETE H 3									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	43	18	3	2008	118,61	0,0000	0	0,0000	0,0000
10	3	18	3	2008	121,54	1,3500	20	0,5774	0,1876
10	42	18	3	2008	125,09	1,5750	59	0,9916	0,4148
12	48	18	3	2008	130,99	3,1500	185	1,7559	0,7925
13	15	18	3	2008	131,76	3,1750	212	1,8797	0,8418
19	24	18	3	2008	133,66	4,0450	581	3,1118	0,9634
22	35	18	3	2008	133,7		772	3,5870	0,9659
14	19	19	3	2008	133,79		1716	5,3479	0,9717
8	36	20	3	2008	133,88		2813	6,8471	0,9775
13	55	24	3	2008	134,09		8892	12,1737	0,9909
19	15	26	3	2008	134,14		12092	14,1962	0,9941
15	14	29	3	2008	134,23		16171	16,4170	0,9999
7	49	1	4	2008	134,23		18606	17,6097	0,9999

SECÇÃO (cm²) - 15,622 cm²

ALTURA - 4,045cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 23,39%

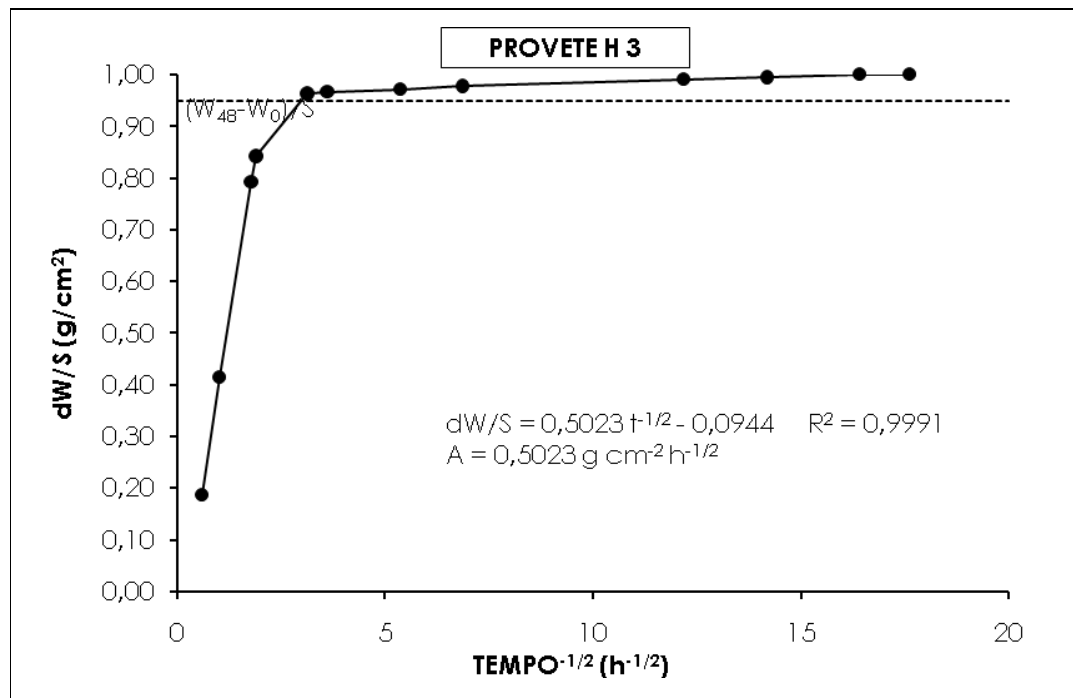


Figura A4.29 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H3

Quadro A4.30 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H4

PROVETE H 4									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	44	18	3	2008	122,28	0,0000	0	0,0000	0,0000
10	4	18	3	2008	124,81	1,3500	20	0,5774	0,1620
10	43	18	3	2008	127,45	1,6750	59	0,9916	0,3309
12	48	18	3	2008	131,97	2,2500	184	1,7512	0,6203
13	16	18	3	2008	132,66	2,2750	212	1,8797	0,6644
19	24	18	3	2008	137,34	4,0125	580	3,1091	0,9640
22	36	18	3	2008	137,48		772	3,5870	0,9730
14	20	19	3	2008	137,57		1716	5,3479	0,9787
8	37	20	3	2008	137,63		2813	6,8471	0,9826
13	55	24	3	2008	137,85		8891	12,1731	0,9967
19	16	26	3	2008	137,89		12092	14,1962	0,9992
15	15	29	3	2008	137,91		16171	16,4170	1,0005
7	49	1	4	2008	138,11		18605	17,6092	1,0133

SECÇÃO (cm²) - 15,622 cm²

ALTURA - 4,0125cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 23,85%

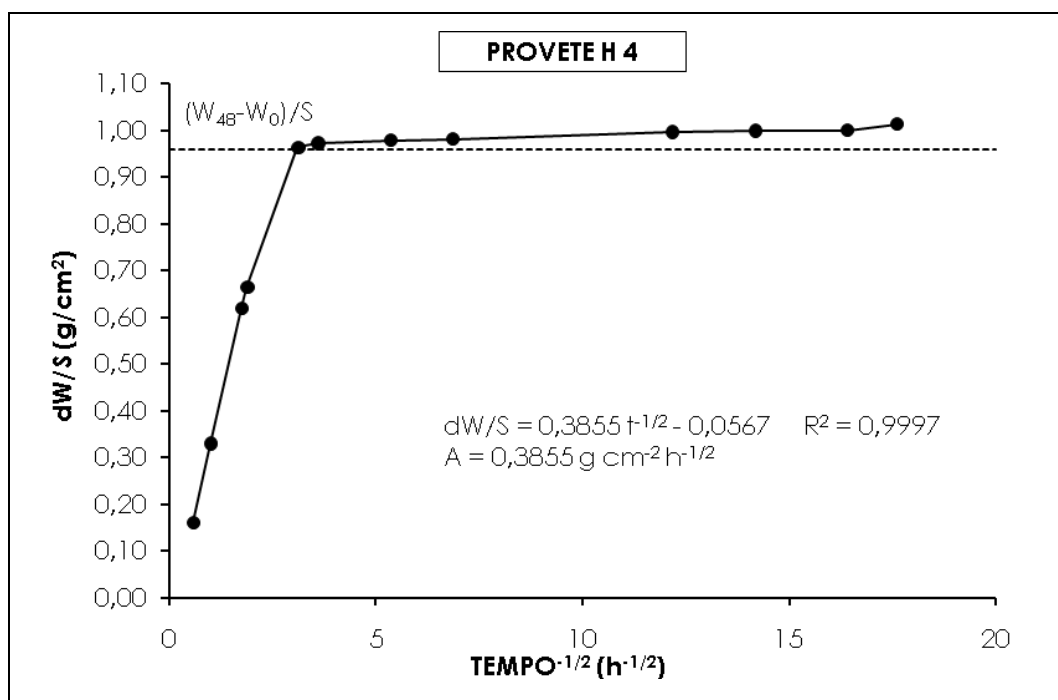


Figura A4.30 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H4

Quadro A4.31 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H5

PROVETE H 5									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	45	18	3	2008	122,28	0,000	0	0,0000	0,0000
10	5	18	3	2008	131,31	1,350	20	0,5774	0,5414
10	43	18	3	2008	134,48	1,450	58	0,9832	0,7315
12	49	18	3	2008	139,88	2,500	184	1,7512	1,0553
13	16	18	3	2008	140,69	2,800	211	1,8753	1,1038
19	25	18	3	2008	144,89	4,125	580	3,1091	1,3557
22	36	18	3	2008	144,95		771	3,5847	1,3593
14	20	19	3	2008	144,99		1715	5,3463	1,3617
8	37	20	3	2008	145,14		2812	6,8459	1,3707
13	55	24	3	2008	145,38		8890	12,1724	1,3851
19	16	26	3	2008	145,48		12091	14,1957	1,3911
15	15	29	3	2008	145,49		16170	16,4165	1,3917
7	50	1	4	2008	145,53		18605	17,6092	1,3941

SECÇÃO (cm²) - 16,678 cm²

ALTURA - 4,125cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 23,37%

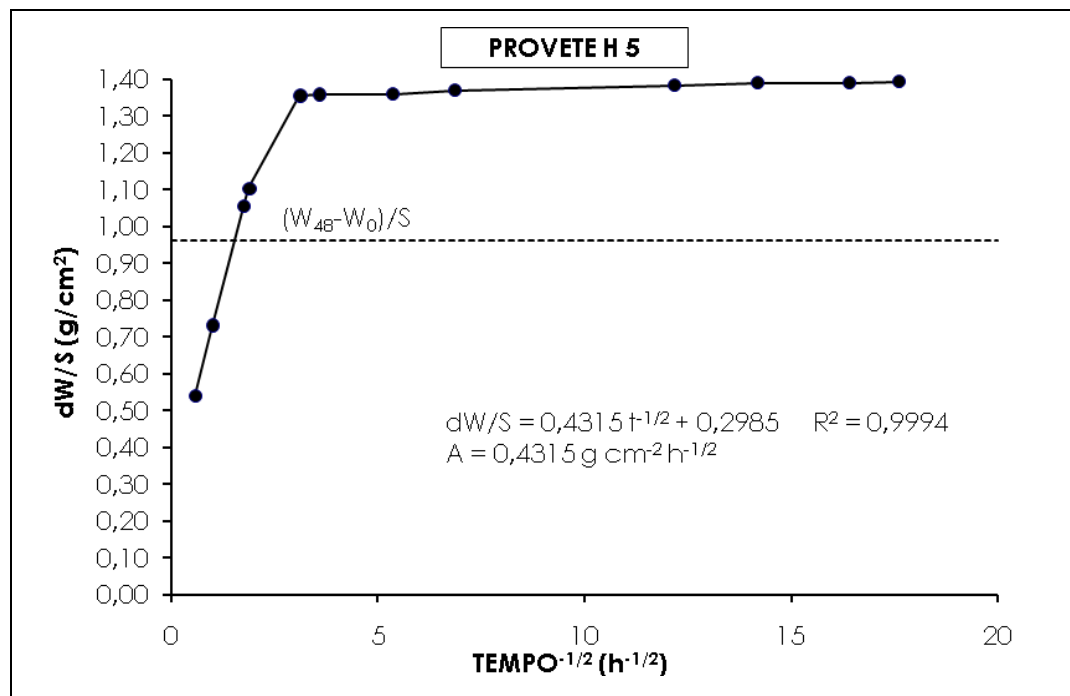


Figura A4.31 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H5

Quadro A4.32 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H6

PROVETE H 6									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	46	18	3	2008	123,43	0,0000	0	0,0000	0,0000
10	7	18	3	2008	129,59	1,6000	21	0,5916	0,3750
10	44	18	3	2008	131,04	1,8500	58	0,9832	0,4633
12	50	18	3	2008	136,49	3,0500	184	1,7512	0,7951
13	17	18	3	2008	137,26	3,6200	211	1,8753	0,8420
19	26	18	3	2008	139,13	4,0375	580	3,1091	0,9559
22	36	18	3	2008	139,24		770	3,5824	0,9626
14	21	19	3	2008	139,3		1715	5,3463	0,9662
8	38	20	3	2008	139,39		2812	6,8459	0,9717
13	56	24	3	2008	139,61		8890	12,1724	0,9851
19	17	26	3	2008	139,69		12091	14,1957	0,9900
15	15	29	3	2008	139,69		16169	16,4159	0,9900
7	50	1	4	2008	139,78		18604	17,6087	0,9954

SECÇÃO (cm²) - 16,425 cm²

ALTURA - 3,985cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 23,89%

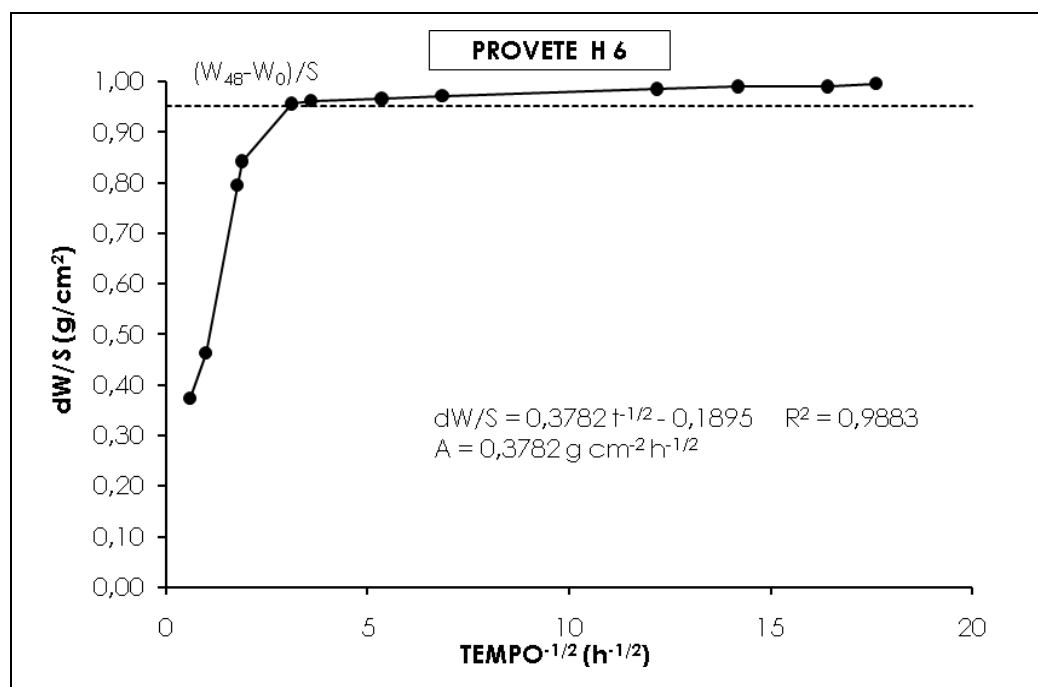


Figura A4.32 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H6

Quadro A4.33 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H7

PROVETE H 7									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	47	18	3	2008	123,65	0,0000	0	0,0000	0,0000
10	8	18	3	2008	126,63	1,4500	21	0,5916	0,1817
10	46	18	3	2008	129,07	1,6500	59	0,9916	0,3304
12	50	18	3	2008	133,43	1,9000	183	1,7464	0,5963
13	18	18	3	2008	134,1	1,9500	211	1,8753	0,6371
19	27	18	3	2008	139,24	4,0575	580	3,1091	0,9505
22	37	18	3	2008	139,45		770	3,5824	0,9633
14	21	19	3	2008	139,59		1714	5,3448	0,9718
8	38	20	3	2008	139,61		2811	6,8447	0,9731
13	56	24	3	2008	139,86		8889	12,1717	0,9883
19	17	26	3	2008	139,96		12090	14,1951	0,9944
15	16	29	3	2008	140,06		16169	16,4159	1,0005
7	50	31	4	2008	140,11		18603	17,6082	1,0035

SECÇÃO (cm²) - 16,402 cm²

ALTURA - 4,0575cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 23,49%

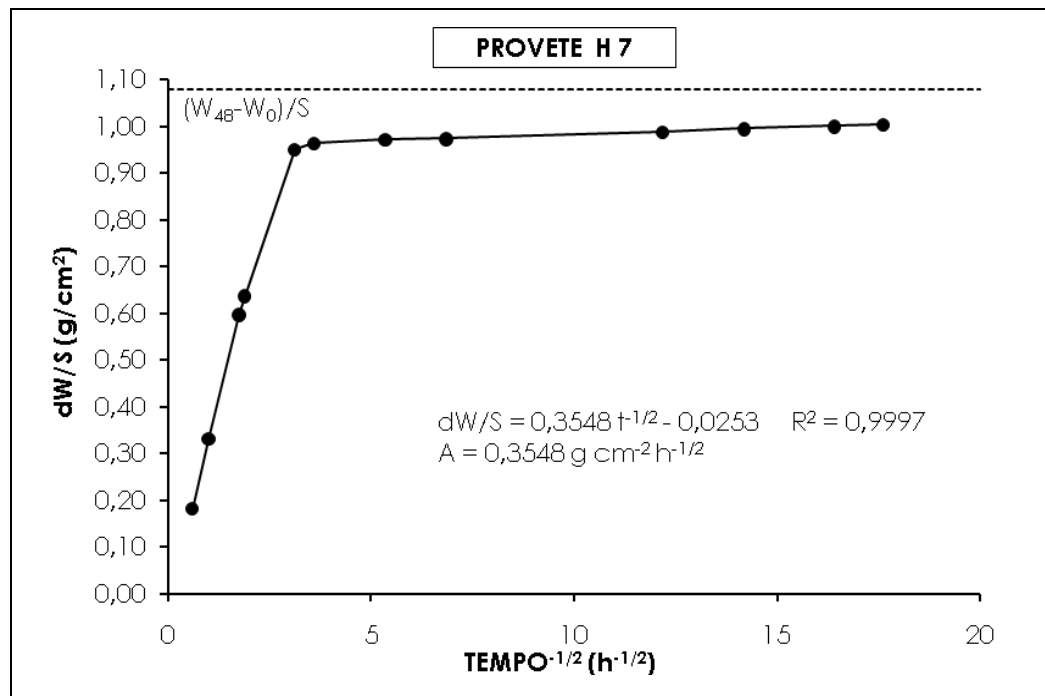


Figura A4.33 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H7

Quadro A4.34 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H8

PROVETE H 8									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	48	18	3	2008	120,6	0,000	0	0,0000	0,0000
10	9	18	3	2008	123,58	1,500	21	0,5916	0,1812
10	46	18	3	2008	126,09	1,850	58	0,9832	0,3339
12	51	18	3	2008	130,62	2,200	183	1,7464	0,6094
13	19	18	3	2008	131,26	2,750	211	1,8753	0,6483
19	28	18	3	2008	135,81	3,965	580	3,1091	0,9250
22	38	18	3	2008	135,84		770	3,5824	0,9268
14	22	19	3	2008	136,01		1714	5,3448	0,9372
8	39	20	3	2008	136,12		2811	6,8447	0,9439
13	56	24	3	2008	136,24		8888	12,1710	0,9512
19	17	26	3	2008	136,41		12089	14,1945	0,9615
15	17	29	3	2008	136,41		16169	16,4159	0,9615
7	51	1	4	2008	136,51		18603	17,6082	0,9676

SECÇÃO (cm²) - 16,443 cm²

ALTURA - 3,965cm

POROSIDADE LIVRE (%) - 23,36%

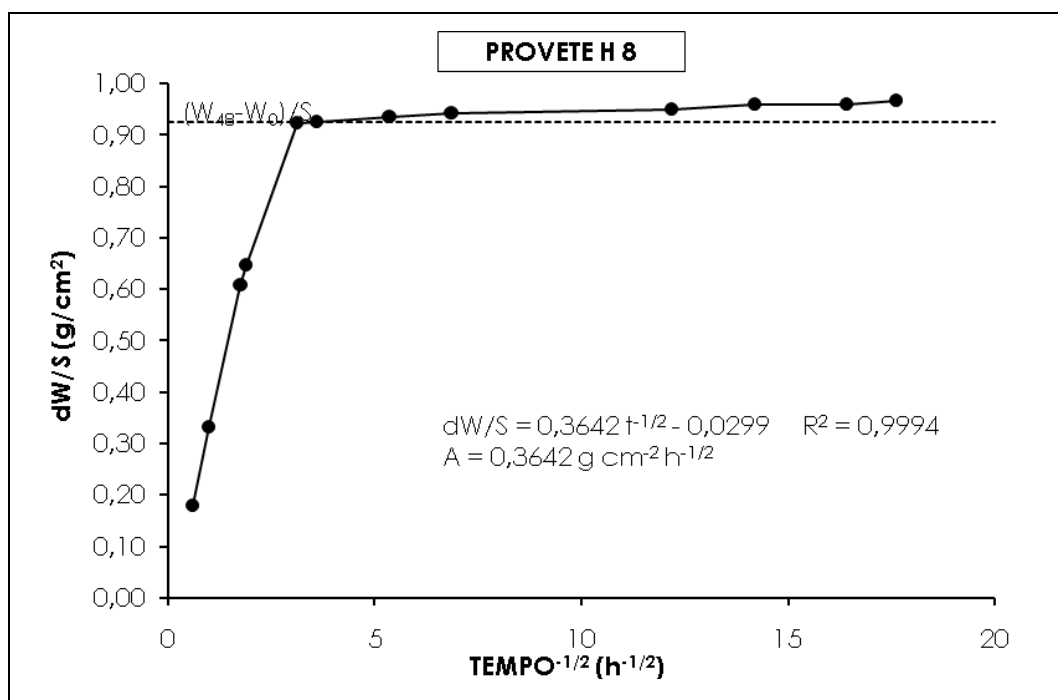


Figura A4.34 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H8

Quadro A4.35 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H9

PROVETE H 9									
Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	PESO	ALTURA	TEMPO (min)	HORA ^{-1/2}	dW/S
9	48	18	3	2008	120,01	0,000	0	0,0000	0,0000
10	10	18	3	2008	124,11	1,400	22	0,6055	0,2496
10	47	18	3	2008	127,77	1,850	59	0,9916	0,4725
12	51	18	3	2008	133,92	3,500	183	1,7464	0,8470
13	19	18	3	2008	134,79	4,135	211	1,8753	0,9000
19	29	18	3	2008	135,43	4,135	581	3,1118	0,9389
22	39	18	3	2008	135,43		771	3,5847	0,9389
14	22	19	3	2008	135,54		1714	5,3448	0,9456
8	39	20	3	2008	135,57		2811	6,8447	0,9475
13	57	24	3	2008	135,83		8889	12,1717	0,9633
19	18	26	3	2008	135,93		12090	14,1951	0,9694
15	17	29	3	2008	135,93		16169	16,4159	0,9694
7	51	31	4	2008	136,01		18603	17,6082	0,9742

SECÇÃO (cm²) - 16,423 cm²
ALTURA - 4,135cm
POROSIDADE LIVRE (%) - 22,54%

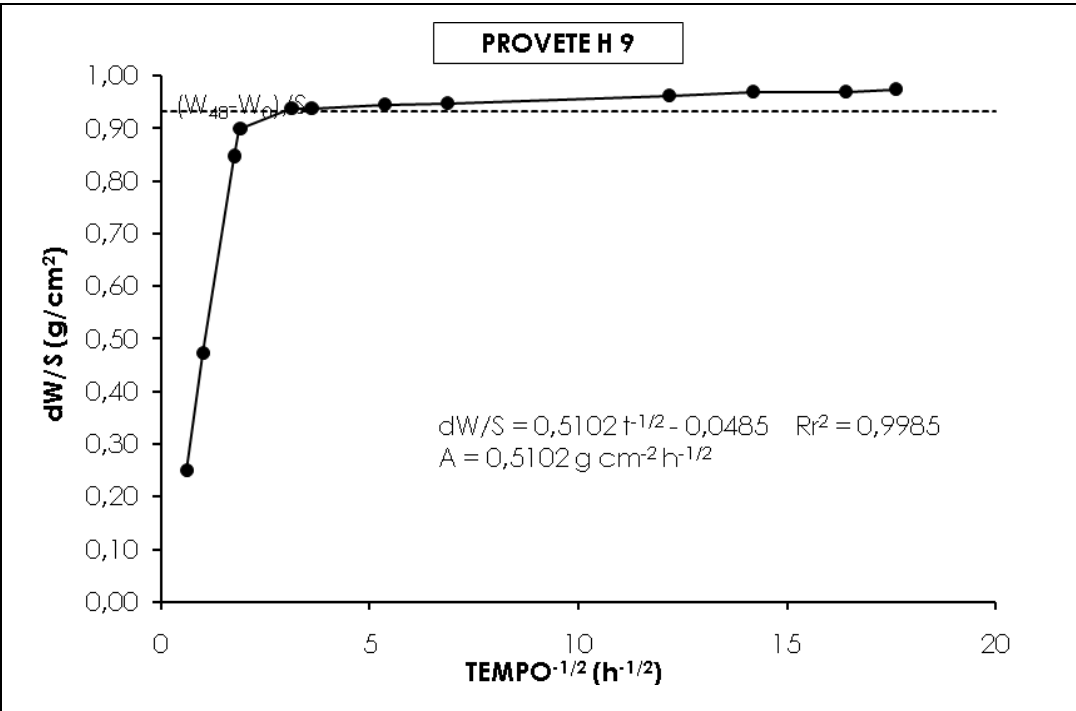


Figura A4.35 – Diagrama do ensaio de absorção de água por capilaridade do provete H9

A5 ENSAIO DE EVAPORAÇÃO

Quadro A5.1 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C1

PROVETE C 1								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	21	24	4	2008	148,49	0	0,00	0,0000
12	15	24	4	2008	148,44	54	0,90	-0,0032
14	50	24	4	2008	148,35	209	3,48	-0,0088
16	5	24	4	2008	148,32	284	4,73	-0,0107
17	22	24	4	2008	148,27	361	6,02	-0,0139
18	36	24	4	2008	148,24	435	7,25	-0,0158
23	34	24	4	2008	148,11	733	12,22	-0,0240
23	18	25	4	2008	147,63	2157	35,95	-0,0544
15	8	26	4	2008	147,36	3107	51,78	-0,0714
23	17	27	4	2008	146,77	5036	83,93	-0,1087
16	20	28	4	2008	146,47	6059	100,98	-0,1277
14	42	29	4	2008	146,17	7401	123,35	-0,1466
21	22	2	5	2008	145,55	12121	202,02	-0,1858
20	17	5	5	2008	145,25	16376	272,93	-0,2048
11	12	6	5	2008	145,18	17271	287,85	-0,2092
21	55	8	5	2008	144,99	20794	346,57	-0,2212
21	41	13	5	2008	144,70	27980	466,33	-0,2396
20	26	19	5	2008	144,45	36545	609,08	-0,2554
20	34	23	5	2008	144,31	42313	705,22	-0,2642
21	28	27	5	2008	144,21	48127	802,12	-0,2705
21	50	3	6	2008	144,07	58229	970,48	-0,2794
15	26	9	6	2008	143,98	66485	1108,08	-0,2851
10	7	13	6	2008	143,93	86326	1438,77	-0,2882
20	42	16	6	2008	143,90	91281	1521,35	-0,2901

N₄₈ = 13,18%SECÇÃO - 15,82 cm²

ALTURA - 4,0925 cm

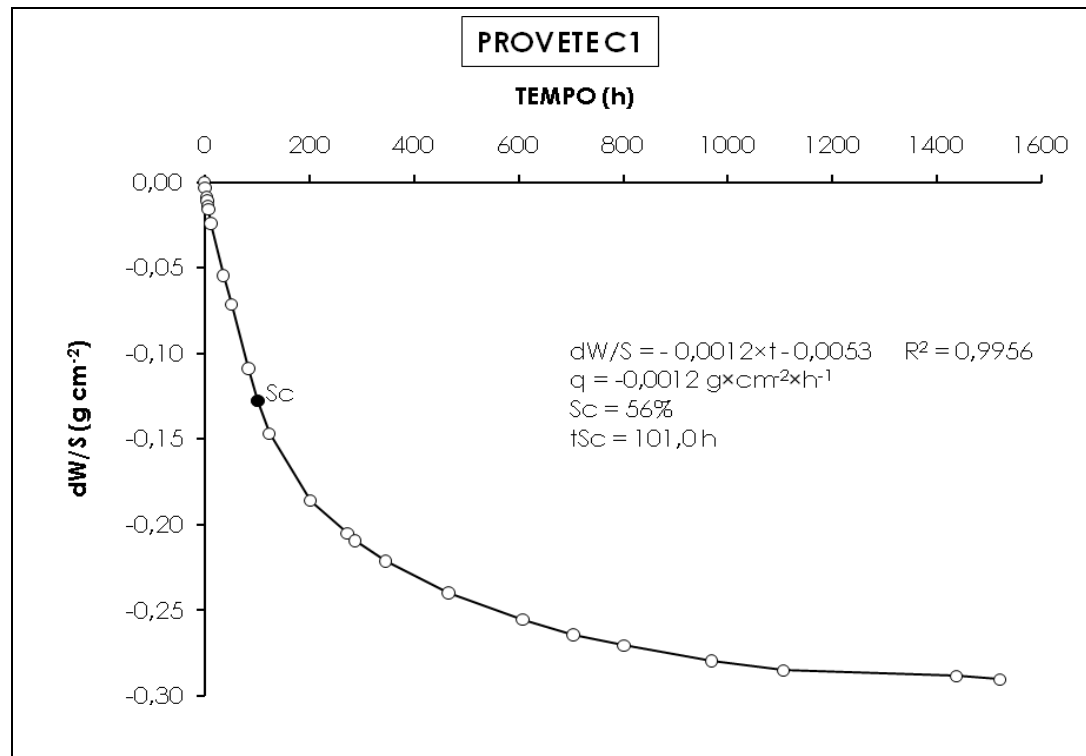


Figura A5.1 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C1

Quadro A5.2 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C2

PROVETE C 2								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	24	24	4	2008	142,71	0	0,00	0,0000
12	15	24	4	2008	142,64	51	0,85	-0,0045
14	50	24	4	2008	142,57	206	3,43	-0,0089
16	5	24	4	2008	142,56	281	4,68	-0,0095
17	22	24	4	2008	142,51	358	5,97	-0,0127
18	36	24	4	2008	142,48	432	7,20	-0,0146
23	34	24	4	2008	142,37	730	12,17	-0,0216
23	18	25	4	2008	141,85	2154	35,90	-0,0547
15	8	26	4	2008	141,57	3104	51,73	-0,0725
23	17	27	4	2008	141,07	5033	83,88	-0,1043
16	22	28	4	2008	140,67	6058	100,97	-0,1298
14	42	29	4	2008	140,36	7398	123,30	-0,1495
21	22	2	5	2008	139,72	12118	201,97	-0,1902
20	17	5	5	2008	139,33	16373	272,88	-0,2150
11	13	6	5	2008	139,30	17269	287,82	-0,2169
21	55	8	5	2008	139,09	20791	346,52	-0,2303
21	41	13	5	2008	138,77	27977	466,28	-0,2506
20	26	19	5	2008	138,53	36542	609,03	-0,2659
20	34	23	5	2008	138,40	42310	705,17	-0,2742
21	28	27	5	2008	138,31	48124	802,07	-0,2799
21	50	3	6	2008	138,21	58226	970,43	-0,2863
15	26	9	6	2008	138,15	66482	1108,03	-0,2901
10	7	13	6	2008	138,10	86323	1438,72	-0,2933
20	42	16	6	2008	138,10	91278	1521,30	-0,2933

$N_{48} = 13,18\%$ SECÇÃO - $15,72 \text{ cm}^2$ ALTURA - $4,0925 \text{ cm}$

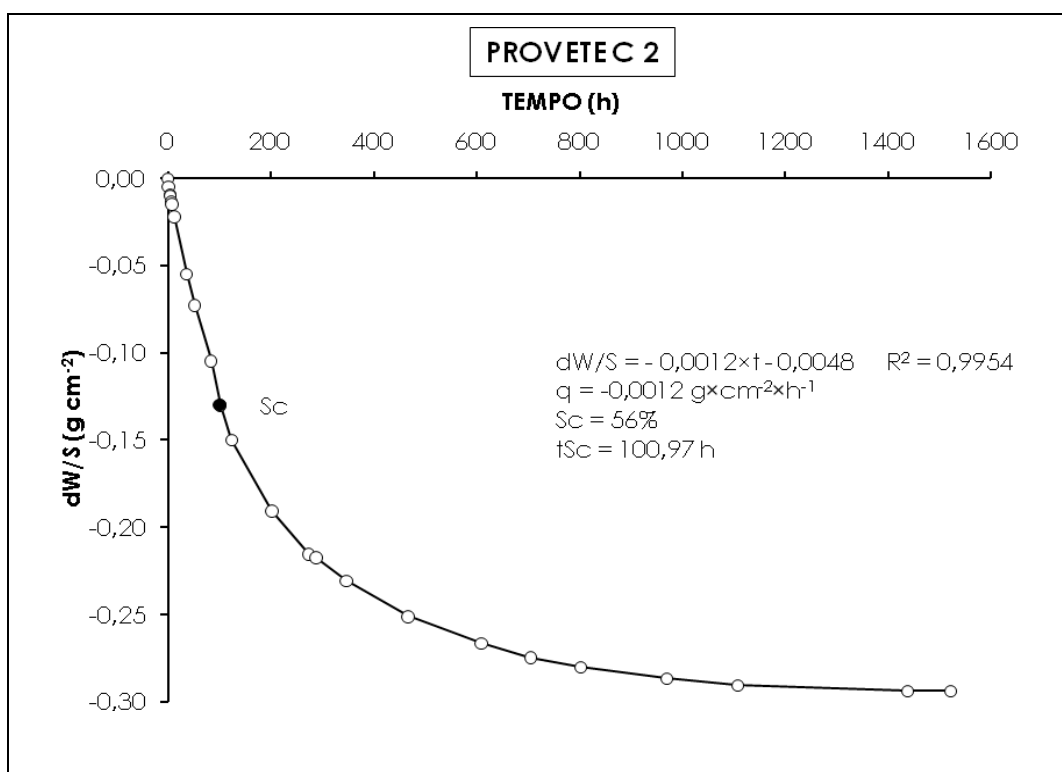


Figura A5.2 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C2

Quadro A5.3 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C3

PROVETE C 3								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	26	24	4	2008	135,66	0	0,00	0,0000
12	16	24	4	2008	135,54	50	0,83	-0,0076
14	50	24	4	2008	135,47	204	3,40	-0,0121
16	6	24	4	2008	135,45	280	4,67	-0,0134
17	22	24	4	2008	135,41	356	5,93	-0,0159
18	37	24	4	2008	135,38	431	7,18	-0,0178
23	34	25	4	2008	135,24	728	12,13	-0,0268
23	19	26	4	2008	134,78	2153	35,88	-0,0561
15	9	26	4	2008	134,47	3103	51,72	-0,0758
23	18	27	4	2008	133,87	5032	83,87	-0,1140
16	22	28	4	2008	133,58	6056	100,93	-0,1325
14	42	29	4	2008	133,25	7396	123,27	-0,1535
21	22	2	5	2008	132,61	12116	201,93	-0,1943
20	18	5	5	2008	132,26	16372	272,87	-0,2166
11	13	6	5	2008	132,19	17267	287,78	-0,2210
21	56	8	5	2008	131,98	20790	346,50	-0,2344
21	42	13	5	2008	131,71	27976	466,27	-0,2516
20	27	19	5	2008	131,51	36541	609,02	-0,2643
20	34	23	5	2008	131,42	42308	705,13	-0,2701
21	28	27	5	2008	131,34	48122	802,03	-0,2752
21	51	3	6	2008	131,26	58225	970,42	-0,2803
15	26	9	6	2008	131,21	66480	1108,00	-0,2835
10	7	13	6	2008	131,18	86321	1438,68	-0,2854
20	42	16	6	2008	131,16	91276	1521,27	-0,2866

N₄₈ = 13,18%

SECÇÃO - 13,55 cm²

ALTURA - 3,77 cm

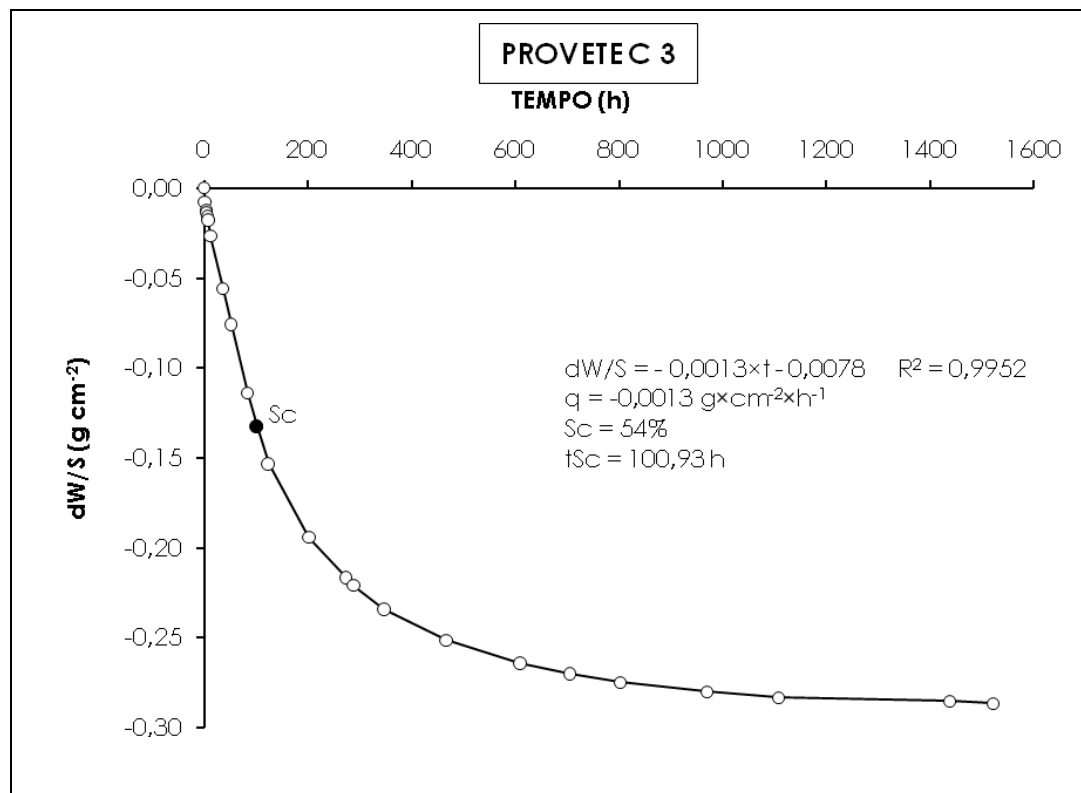


Figura A5.3 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C3

Quadro A5.4 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C4

PROVETE C 4								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	29	24	4	2008	141,72	0	0,00	0,0000
12	16	24	4	2008	141,68	47	0,78	-0,0025
14	51	24	4	2008	141,58	202	3,37	-0,0086
16	6	24	4	2008	141,56	277	4,62	-0,0098
17	23	24	4	2008	141,52	354	5,90	-0,0123
18	37	24	4	2008	141,50	428	7,13	-0,0135
23	35	25	4	2008	141,34	726	12,10	-0,0233
23	19	26	4	2008	140,84	2150	35,83	-0,0539
15	9	26	4	2008	140,58	3100	51,67	-0,0698
23	18	27	4	2008	139,99	5029	83,82	-0,1060
16	23	28	4	2008	139,69	6054	100,90	-0,1244
14	43	29	4	2008	139,32	7394	123,23	-0,1470
21	22	2	5	2008	138,55	12113	201,88	-0,1942
20	18	5	5	2008	138,18	16369	272,82	-0,2169
11	13	6	5	2008	138,10	17264	287,73	-0,2218
21	56	8	5	2008	137,91	20787	346,45	-0,2334
21	42	13	5	2008	137,61	27973	466,22	-0,2518
20	27	19	5	2008	137,35	36538	608,97	-0,2678
20	35	23	5	2008	137,24	42306	705,10	-0,2745
21	29	27	5	2008	137,12	48120	802,00	-0,2818
21	51	3	6	2008	136,99	58222	970,37	-0,2898
15	27	9	6	2008	136,90	66478	1107,97	-0,2953
10	8	13	6	2008	136,83	86319	1438,65	-0,2996
20	42	16	6	2008	136,81	91273	1521,22	-0,3008

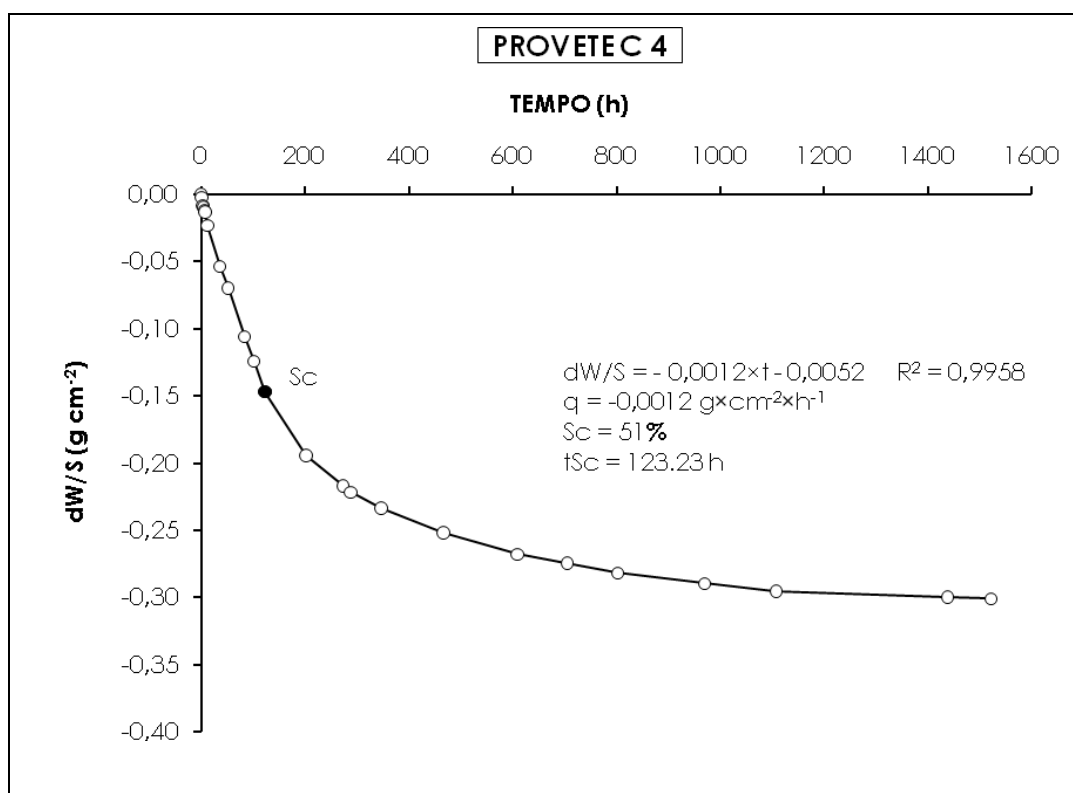
N₄₈ = 14.47%SECÇÃO - 16.321 cm² ALTURA - 3.78 cm

Figura A5.4 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C4

Quadro A5.5 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C5

PROVETE C 5								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	32	24	4	2008	146,83	0	0,00	0,0000
12	17	24	4	2008	146,79	45	0,75	-0,0024
14	51	24	4	2008	146,72	199	3,32	-0,0067
16	6	24	4	2008	146,7	274	4,57	-0,0079
17	23	24	4	2008	146,66	351	5,85	-0,0104
18	37	24	4	2008	146,65	425	7,08	-0,0110
23	35	25	4	2008	146,51	723	12,05	-0,0195
23	19	26	4	2008	146,02	2147	35,78	-0,0494
15	9	26	4	2008	145,74	3097	51,62	-0,0665
23	18	27	4	2008	145,12	5026	83,77	-0,1043
16	23	28	4	2008	144,79	6051	100,85	-0,1244
14	43	29	4	2008	144,41	7391	123,18	-0,1475
21	23	2	5	2008	143,61	12111	201,85	-0,1963
20	18	5	5	2008	143,23	16366	272,77	-0,2195
11	14	6	5	2008	143,11	17262	287,70	-0,2268
21	56	8	5	2008	142,94	20784	346,40	-0,2372
21	42	13	5	2008	142,62	27970	466,17	-0,2567
20	27	19	5	2008	142,33	36535	608,92	-0,2744
20	35	23	5	2008	142,15	42303	705,05	-0,2853
21	29	27	5	2008	142,04	48117	801,95	-0,2920
21	52	3	6	2008	141,89	58220	970,33	-0,3012
15	27	9	6	2008	141,79	66475	1107,92	-0,3073
10	8	13	6	2008	141,72	86316	1438,60	-0,3115
20	43	16	6	2008	141,71	91271	1521,18	-0,3122

$N_{48} = 14,57\%$

SECÇÃO - 16.402 cm² ALTURA - 3.9525 cm

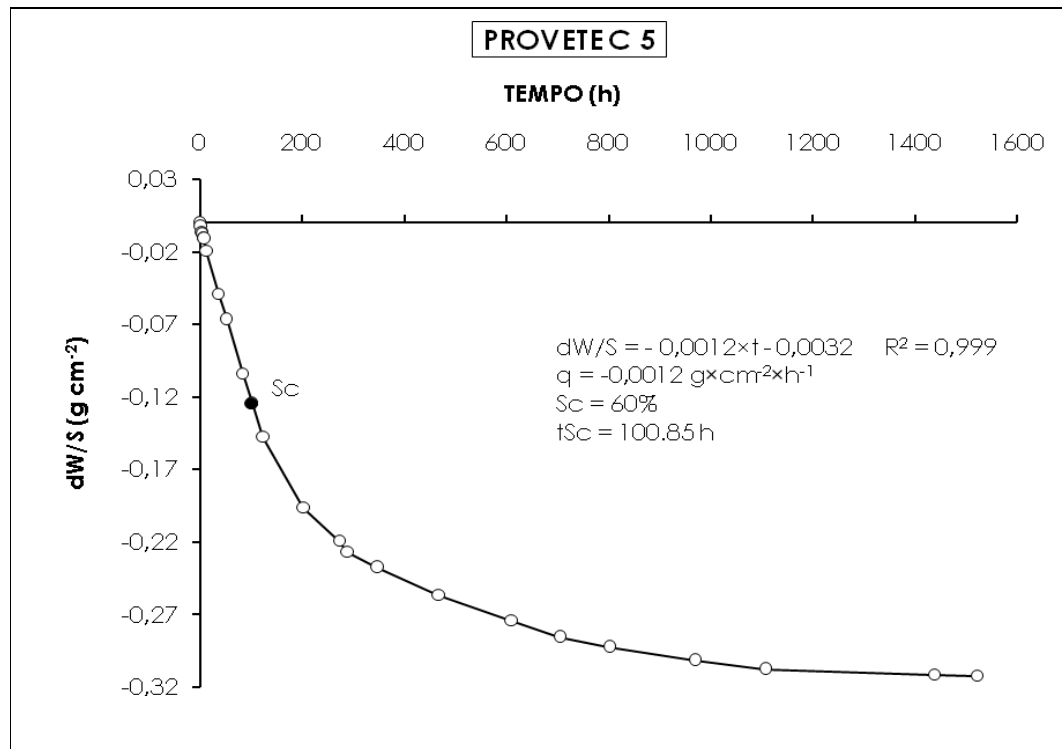


Figura A5.5 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C5

Quadro A5.6 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C6

PROVETE C 6								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	34	24	4	2008	146,39	0	0,00	0,0000
12	17	24	4	2008	146,35	43	0,72	-0,0024
14	51	24	4	2008	146,26	197	3,28	-0,0079
16	6	24	4	2008	146,25	272	4,53	-0,0085
17	23	24	4	2008	146,23	349	5,82	-0,0098
18	38	24	4	2008	146,21	424	7,07	-0,0110
23	35	25	4	2008	146,1	721	12,02	-0,0177
23	19	26	4	2008	145,65	2145	35,75	-0,0451
15	10	26	4	2008	145,43	3096	51,60	-0,0585
23	19	27	4	2008	144,9	5025	83,75	-0,0908
16	24	28	4	2008	144,62	6050	100,83	-0,1079
14	43	29	4	2008	144,29	7389	123,15	-0,1280
21	23	2	5	2008	143,41	12109	201,82	-0,1817
20	18	5	5	2008	142,95	16364	272,73	-0,2097
11	14	6	5	2008	142,88	17260	287,67	-0,2140
21	56	8	5	2008	142,61	20782	346,37	-0,2305
21	42	13	5	2008	142,23	27968	466,13	-0,2536
20	27	19	5	2008	141,93	36533	608,88	-0,2719
20	35	23	5	2008	141,78	42301	705,02	-0,2811
21	29	27	5	2008	141,65	48115	801,92	-0,2890
21	52	3	6	2008	141,52	58218	970,30	-0,2969
15	27	9	6	2008	141,42	66473	1107,88	-0,3030
10	8	13	6	2008	141,35	86314	1438,57	-0,3073
20	43	16	6	2008	141,33	91269	1521,15	-0,3085

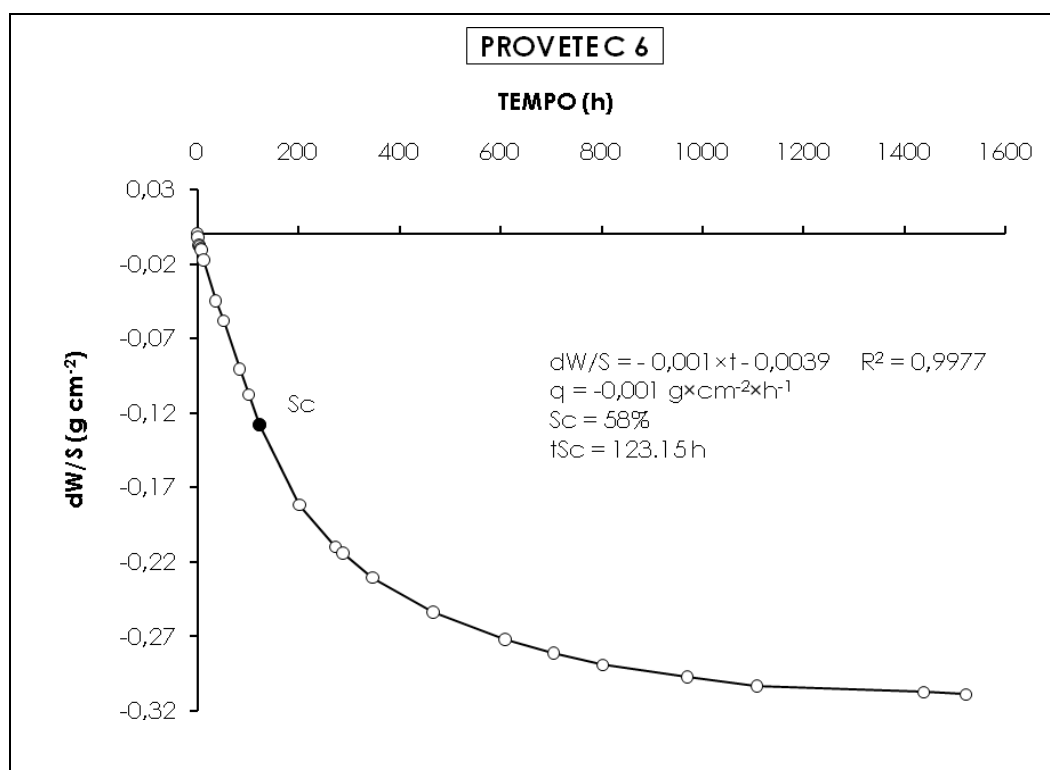
N₄₈ = 14.05%SECÇÃO - 16.401 cm² ALTURA - 3.9725 cm

Figura A5.6 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C6

Quadro A5.7 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C7

PROVETE C 7								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	37	24	4	2008	141,42	0	0,00	-0,0615
12	18	24	4	2008	141,38	41	0,68	-0,0640
14	52	24	4	2008	141,29	195	3,25	-0,0695
16	7	24	4	2008	141,28	270	4,50	-0,0701
17	23	24	4	2008	141,24	346	5,77	-0,0726
18	38	24	4	2008	141,21	421	7,02	-0,0744
23	36	25	4	2008	141,06	719	11,98	-0,0836
23	20	26	4	2008	140,59	2143	35,72	-0,1125
15	10	26	4	2008	140,32	3093	51,55	-0,1292
23	19	27	4	2008	139,71	5022	83,70	-0,1667
16	24	28	4	2008	139,43	6047	100,78	-0,1839
14	43	29	4	2008	139,06	7386	123,10	-0,2066
21	23	2	5	2008	138,36	12106	201,77	-0,2497
20	19	5	5	2008	137,98	16362	272,70	-0,2731
11	14	6	5	2008	137,92	17257	287,62	-0,2768
21	57	8	5	2008	137,70	20780	346,33	-0,2903
21	43	13	5	2008	137,37	27966	466,10	-0,3106
20	28	19	5	2008	137,08	36531	608,85	-0,3284
20	35	23	5	2008	136,94	42298	704,97	-0,3370
21	30	27	5	2008	136,83	48113	801,88	-0,3438
21	53	3	6	2008	136,70	58216	970,27	-0,3518
15	27	9	6	2008	136,60	66470	1107,83	-0,3579
10	9	13	6	2008	136,55	86312	1438,53	-0,3610
20	43	16	6	2008	136,52	91266	1521,10	-0,3629

$N_{48} = 14,37\%$ SECÇÃO - $16,26 \text{ cm}^2$ ALTURA - $3,795 \text{ cm}$

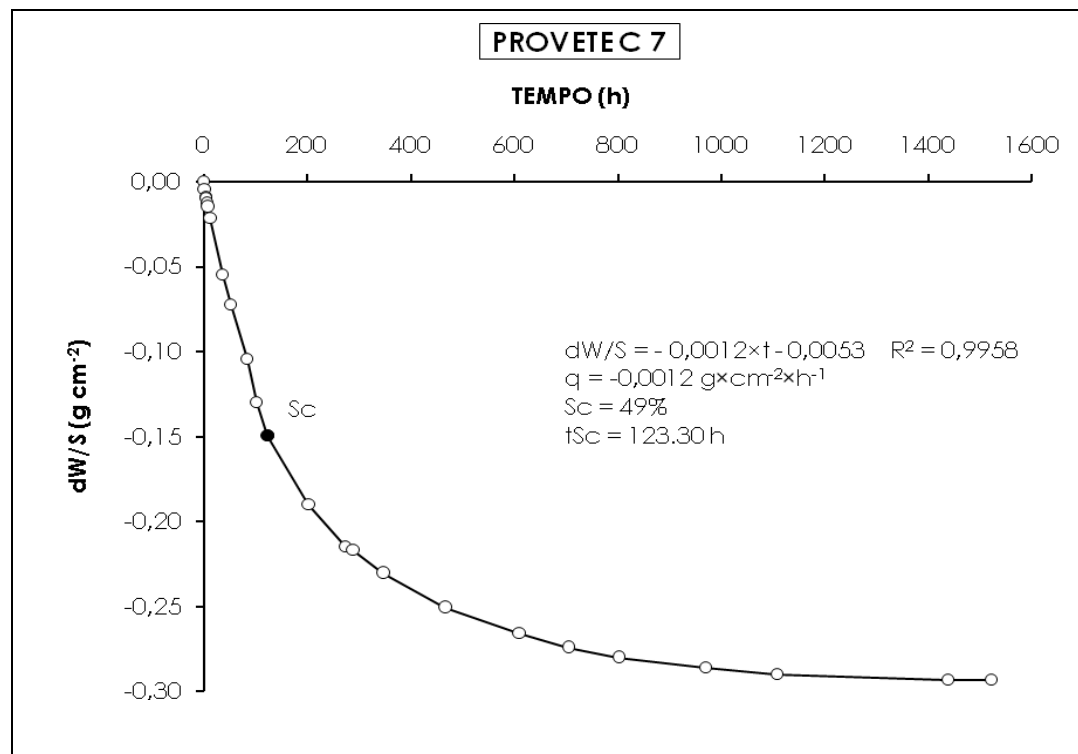


Figura A5.7 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C7

Quadro A5.8 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C8

PROVETE C 8								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	39	24	4	2008	143,18	0	0,00	0,0000
12	18	24	4	2008	143,14	39	0,65	-0,0025
14	52	24	4	2008	142,93	193	3,22	-0,0159
16	7	24	4	2008	142,90	268	4,47	-0,0178
17	24	24	4	2008	142,85	345	5,75	-0,0210
18	38	24	4	2008	142,81	419	6,98	-0,0235
23	36	25	4	2008	142,63	2157	35,95	-0,0350
23	20	26	4	2008	142,03	3581	59,68	-0,0732
15	10	26	4	2008	141,71	3091	51,52	-0,0935
23	19	27	4	2008	141,09	5020	83,67	-0,1330
16	25	28	4	2008	140,80	6046	100,77	-0,1514
14	44	29	4	2008	140,49	7385	123,08	-0,1711
21	24	2	5	2008	139,90	-31095	-518,25	-0,2087
20	19	5	5	2008	139,57	-26840	-447,33	-0,2296
11	14	6	5	2008	139,51	-25945	-432,42	-0,2335
21	57	8	5	2008	139,30	-22422	-373,70	-0,2468
21	43	13	5	2008	139,01	-15236	-253,93	-0,2653
20	28	19	5	2008	138,75	-6671	-111,18	-0,2818
20	36	23	5	2008	138,60	-903	-15,05	-0,2913
21	30	27	5	2008	138,49	4911	81,85	-0,2983
21	53	3	6	2008	138,32	-29626	-493,77	-0,3092
15	28	9	6	2008	138,25	-21371	-356,18	-0,3136
10	9	13	6	2008	138,18	-15930	-265,50	-0,3181
20	43	16	6	2008	138,16	-10976	-182,93	-0,3193

$N_{48} = 14,36\%$ SECÇÃO - 15,677 cm² ALTURA - 3,995 cm

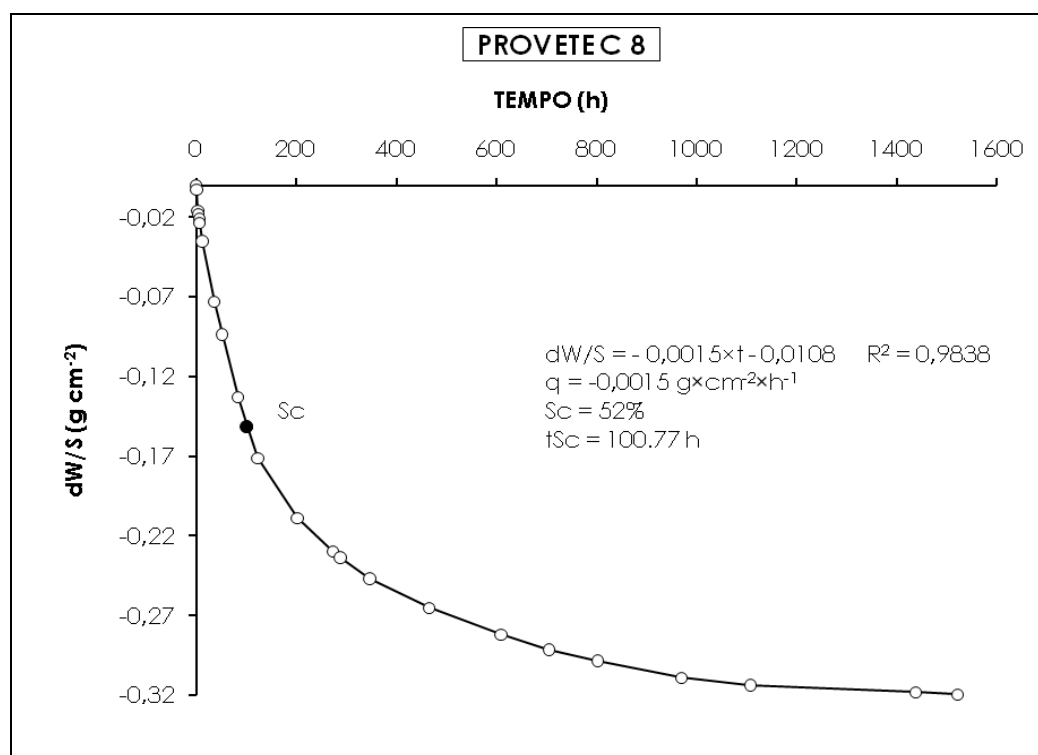


Figura A5.8 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C8

Quadro A5.9 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete C9

PROVETE C 9								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	42	24	4	2008	146,53	0	0,00	0,0000
12	19	24	4	2008	146,49	37	0,62	-0,0024
14	53	24	4	2008	146,42	191	3,18	-0,0067
16	8	24	4	2008	146,42	266	4,43	-0,0067
17	24	24	4	2008	146,38	342	5,70	-0,0091
18	39	24	4	2008	146,35	417	6,95	-0,0109
23	36	25	4	2008	146,26	714	11,90	-0,0164
23	20	26	4	2008	145,93	2138	35,63	-0,0364
15	10	26	4	2008	145,78	3088	51,47	-0,0454
23	20	27	4	2008	145,38	5018	83,63	-0,0697
16	25	28	4	2008	145,16	6043	100,72	-0,0830
14	44	29	4	2008	144,87	7382	123,03	-0,1006
21	24	2	5	2008	144,11	12102	201,70	-0,1466
20	19	5	5	2008	143,57	16357	272,62	-0,1794
11	15	6	5	2008	143,48	17253	287,55	-0,1848
21	58	8	5	2008	143,2	20776	346,27	-0,2018
21	43	13	5	2008	142,81	27961	466,02	-0,2254
20	28	19	5	2008	142,49	36526	608,77	-0,2448
20	36	23	5	2008	142,31	42294	704,90	-0,2557
21	30	27	5	2008	142,17	48108	801,80	-0,2642
21	54	3	6	2008	141,97	58212	970,20	-0,2763
15	28	9	6	2008	141,83	66466	1107,77	-0,2848
10	9	13	6	2008	141,73	86307	1438,45	-0,2909
20	44	16	6	2008	141,68	91262	1521,03	-0,2939

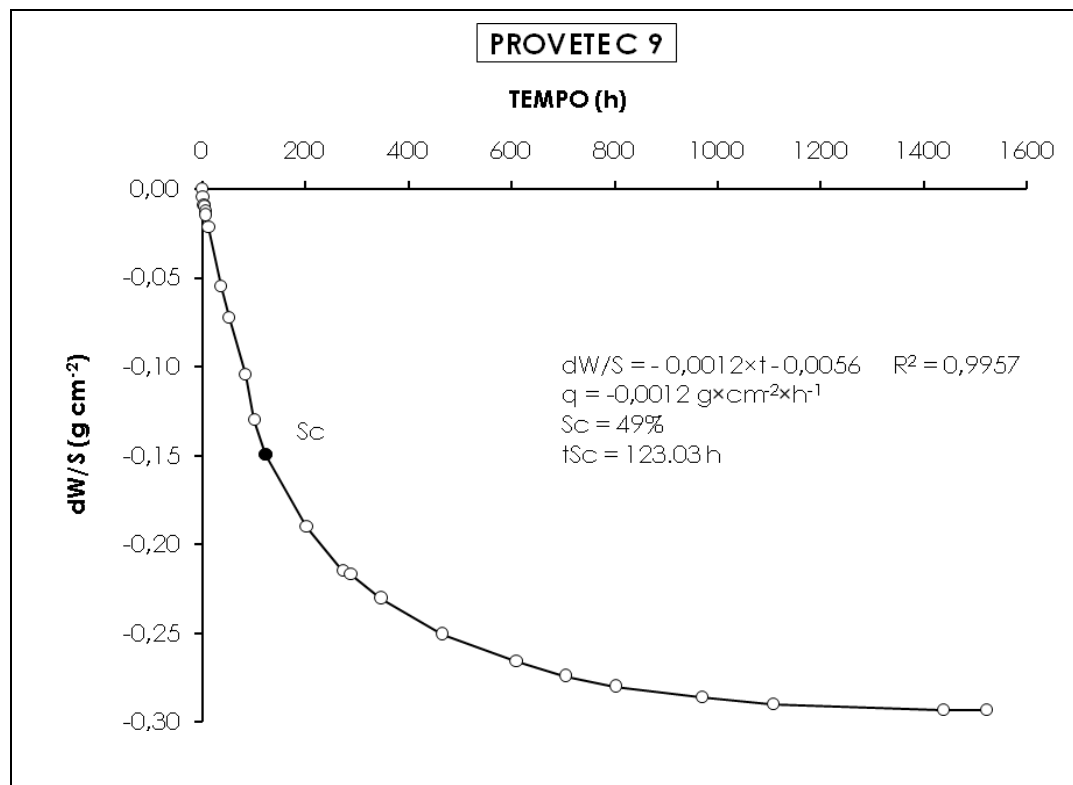
 $N_{48} = 15,01\%$ SECÇÃO - 16.503 cm² ALTURA - 3.9325 cm

Figura A5.9 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete C9

Quadro A5.10 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC1

PROVETE CC 1								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	45	24	4	2008	138,11	0	0,00	0,0000
12	19	24	4	2008	138,05	34	0,57	-0,0039
14	53	24	4	2008	137,98	188	3,13	-0,0083
16	8	24	4	2008	137,96	263	4,38	-0,0096
17	25	24	4	2008	137,91	340	5,67	-0,0128
18	39	24	4	2008	137,87	414	6,90	-0,0154
23	37	25	4	2008	137,75	2152	35,87	-0,0231
23	21	26	4	2008	137,21	3576	59,60	-0,0578
15	11	26	4	2008	136,85	3086	51,43	-0,0809
23	20	27	4	2008	136,20	5015	83,58	-0,1226
16	26	28	4	2008	135,90	6041	100,68	-0,1418
14	45	29	4	2008	135,60	7380	123,00	-0,1611
21	25	2	5	2008	135,08	-31100	-518,33	-0,1945
20	23	5	5	2008	134,79	-26842	-447,37	-0,2131
11	15	6	5	2008	134,74	-25950	-432,50	-0,2163
21	58	8	5	2008	134,56	-22427	-373,78	-0,2279
21	44	13	5	2008	134,32	-15241	-254,02	-0,2433
20	29	19	5	2008	134,09	-6676	-111,27	-0,2580
20	36	23	5	2008	133,97	-909	-15,15	-0,2657
21	30	27	5	2008	133,87	4905	81,75	-0,2721
21	54	3	6	2008	133,74	-29631	-493,85	-0,2805
15	29	9	6	2008	133,64	-21376	-356,27	-0,2869
10	10	13	6	2008	133,55	-15935	-265,58	-0,2927
20	44	16	6	2008	133,51	-10981	-183,02	-0,2953

$N_{48} = 15,05\%$ SECÇÃO - 15,58 cm² ALTURA - 3.8850 cm

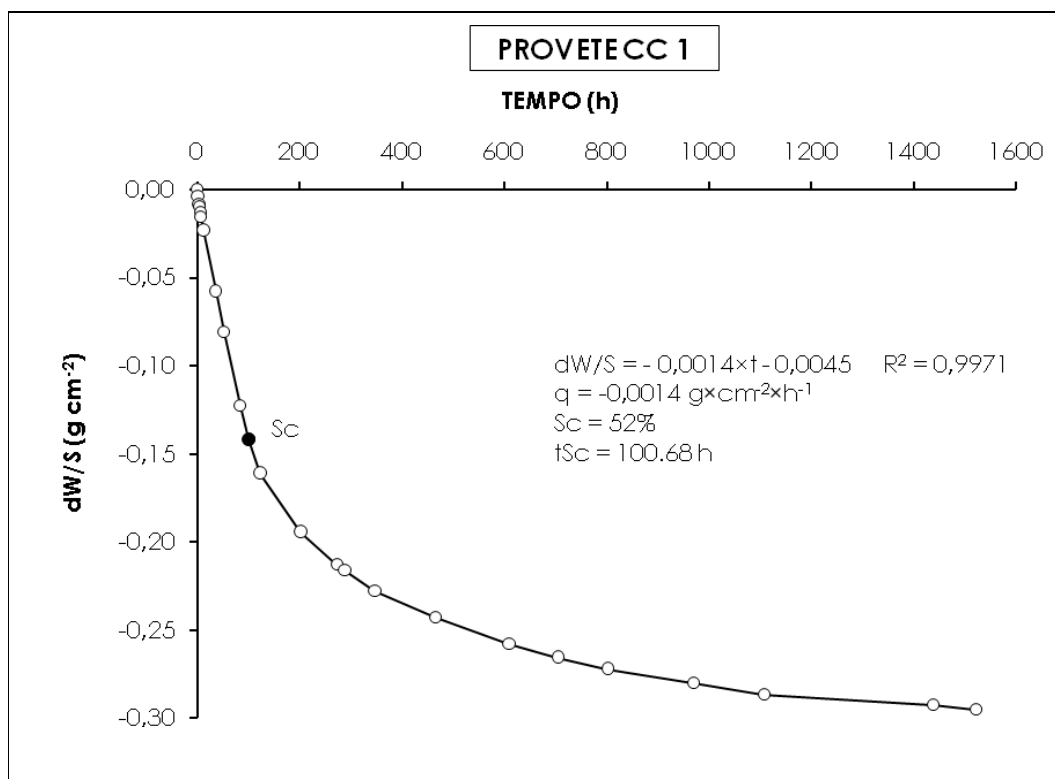


Figura A5.10 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC1

Quadro A5.11 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC2

PROVETE CC 2								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	48	24	4	2008	139,09	0	0,00	0,0000
12	20	24	4	2008	139,04	32	0,53	-0,0032
14	54	24	4	2008	138,96	186	3,10	-0,0082
16	8	24	4	2008	138,93	260	4,33	-0,0101
17	25	24	4	2008	138,89	337	5,62	-0,0127
18	40	24	4	2008	138,83	412	6,87	-0,0165
23	37	25	4	2008	138,68	709	11,82	-0,0260
23	21	26	4	2008	138,06	2133	35,55	-0,0652
15	11	26	4	2008	137,75	3083	51,38	-0,0848
23	20	27	4	2008	137,06	5012	83,53	-0,1285
16	27	28	4	2008	136,77	6039	100,65	-0,1469
14	45	29	4	2008	136,48	7377	122,95	-0,1652
21	25	2	5	2008	135,98	12097	201,62	-0,1969
20	23	5	5	2008	135,70	16355	272,58	-0,2146
11	16	6	5	2008	135,63	17248	287,47	-0,2191
21	58	8	5	2008	135,45	20770	346,17	-0,2305
21	44	13	5	2008	135,21	27956	465,93	-0,2456
20	29	19	5	2008	134,98	36521	608,68	-0,2602
20	36	23	5	2008	134,87	42288	704,80	-0,2672
21	31	27	5	2008	134,79	48103	801,72	-0,2722
21	54	3	6	2008	134,67	58206	970,10	-0,2798
15	29	9	6	2008	134,58	66461	1107,68	-0,2855
10	10	13	6	2008	134,48	86302	1438,37	-0,2919
20	44	16	6	2008	134,45	91256	1520,93	-0,2938

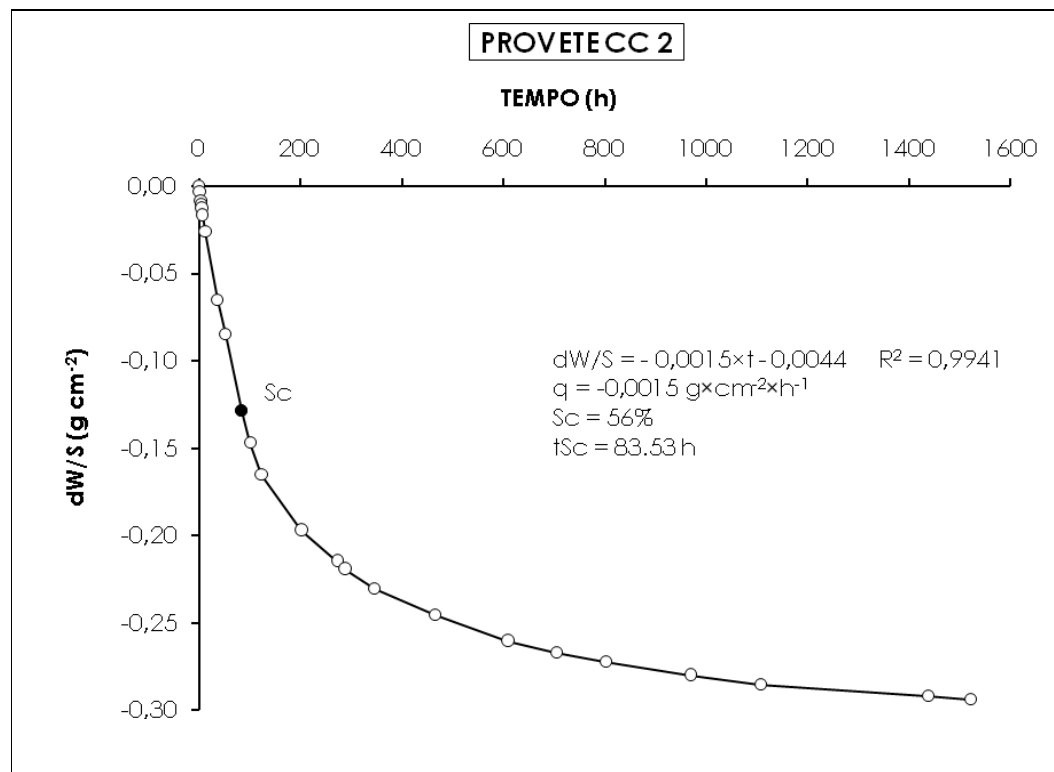
 $N_{48} = 14,15\%$ SECÇÃO - 15,795cm² ALTURA - 3,8875 cm

Figura A5.11 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC2

Quadro A5.12 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC3

PROVETE CC 3								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	51	24	4	2008	149,85	0	0,00	0,0000
12	20	24	4	2008	149,78	29	0,48	-0,0043
14	54	24	4	2008	149,68	183	3,05	-0,0105
16	9	24	4	2008	149,66	258	4,30	-0,0118
17	25	24	4	2008	149,61	334	5,57	-0,0149
18	40	24	4	2008	149,55	409	6,82	-0,0186
23	38	24	4	2008	149,42	707	11,78	-0,0267
23	22	25	4	2008	148,87	2131	35,52	-0,0608
15	12	26	4	2008	148,55	3081	51,35	-0,0806
23	21	27	4	2008	147,95	5010	83,50	-0,1179
16	27	28	4	2008	147,67	6036	100,60	-0,1352
14	45	29	4	2008	147,40	7374	122,90	-0,1520
21	25	32	5	2008	146,89	12094	201,57	-0,1836
20	23	35	5	2008	146,56	16352	272,53	-0,2041
11	16	36	5	2008	146,51	17245	287,42	-0,2072
21	59	38	5	2008	146,31	20768	346,13	-0,2196
21	44	43	5	2008	146,01	27953	465,88	-0,2382
20	29	49	5	2008	145,73	36518	608,63	-0,2556
20	37	53	5	2008	145,59	42286	704,77	-0,2643
21	31	57	5	2008	145,46	48100	801,67	-0,2723
21	55	64	6	2008	145,29	58204	970,07	-0,2829
15	29	70	6	2008	145,19	66458	1107,63	-0,2891
10	11	84	6	2008	145,09	86300	1438,33	-0,2953
20	45	87	6	2008	145,05	91254	1520,90	-0,2978

N₄₈ = 14.82%SECÇÃO -16.120cm²

ALTURA - 3.9025 cm

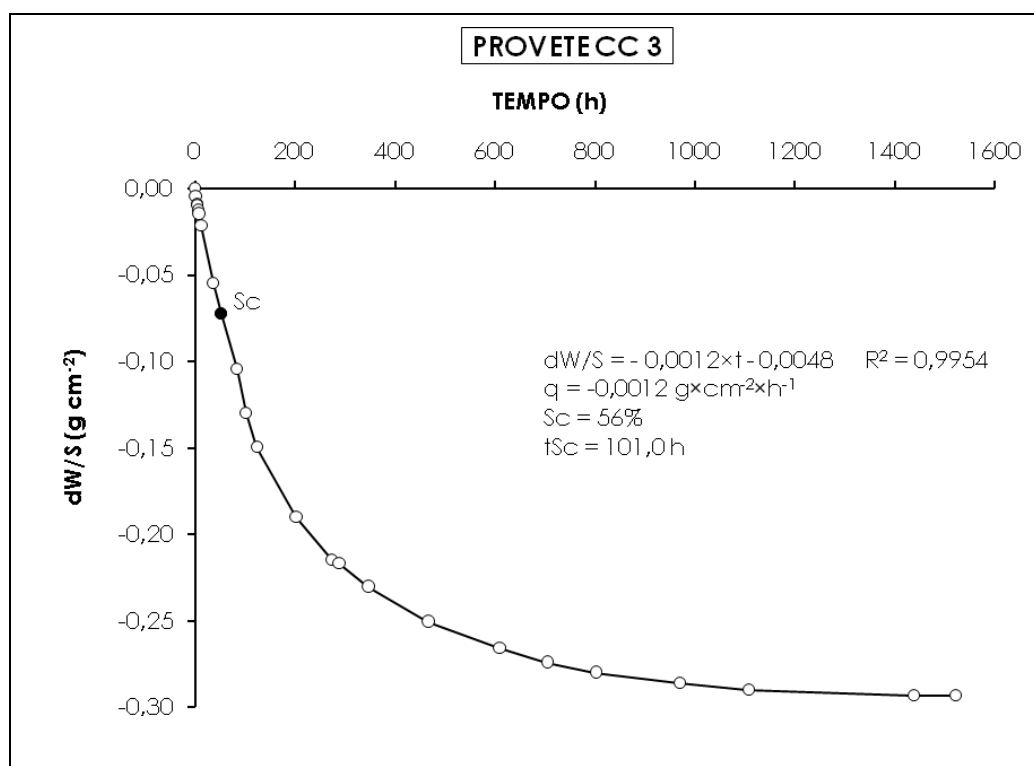


Figura A5.12 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC3

Quadro A5.13 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC4

PROVETE CC 4								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	53	24	4	2008	135,58	0	0,00	0,0000
12	20	24	4	2008	135,53	27	0,45	-0,0031
14	55	24	4	2008	135,47	182	3,03	-0,0069
16	9	24	4	2008	135,43	256	4,27	-0,0094
17	26	24	4	2008	135,38	333	5,55	-0,0126
18	40	24	4	2008	135,33	407	6,78	-0,0157
23	38	25	4	2008	135,22	705	11,75	-0,0226
23	22	26	4	2008	134,78	2129	35,48	-0,0503
15	12	26	4	2008	134,56	3079	51,32	-0,0641
23	21	27	4	2008	133,96	5008	83,47	-0,1018
16	28	28	4	2008	133,64	6035	100,58	-0,1219
14	45	29	4	2008	133,33	7372	122,87	-0,1413
21	25	2	5	2008	132,76	12092	201,53	-0,1771
20	23	5	5	2008	132,44	16350	272,50	-0,1972
11	16	6	5	2008	132,37	17243	287,38	-0,2016
21	59	8	5	2008	132,18	20766	346,10	-0,2136
21	45	13	5	2008	131,9	27952	465,87	-0,2312
20	30	19	5	2008	131,67	36517	608,62	-0,2456
20	37	23	5	2008	131,55	42284	704,73	-0,2531
21	31	27	5	2008	131,46	48098	801,63	-0,2588
21	55	3	6	2008	131,32	58202	970,03	-0,2676
15	29	9	6	2008	131,22	66456	1107,60	-0,2739
10	11	13	6	2008	131,15	86298	1438,30	-0,2783
20	45	16	6	2008	131,12	91252	1520,87	-0,2802

N₄₈ = 13,18% SECÇÃO - 15,92 cm² ALTURA - 4,04 cm

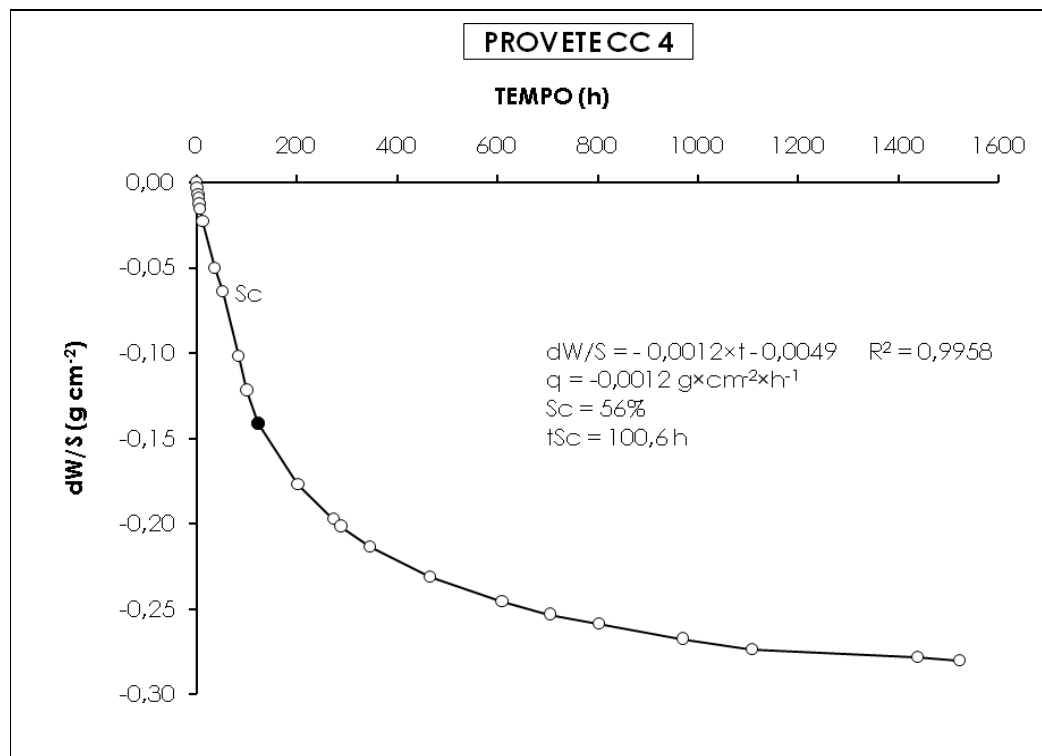


Figura A5.13 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC4

Quadro A5.14 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC5

PROVETE CC 5								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	55	24	4	2008	148,51	0	0,00	0,0000
12	21	24	4	2008	148,46	26	0,43	-0,0031
14	55	24	4	2008	148,42	180	3,00	-0,0055
16	9	24	4	2008	148,39	254	4,23	-0,0074
17	26	24	4	2008	148,36	331	5,52	-0,0092
18	41	24	4	2008	148,3	406	6,77	-0,0129
23	38	25	4	2008	148,19	703	11,72	-0,0196
23	22	26	4	2008	147,77	2127	35,45	-0,0454
15	12	26	4	2008	147,48	3077	51,28	-0,0632
23	21	27	4	2008	146,86	5006	83,43	-0,1012
16	29	28	4	2008	146,48	6034	100,57	-0,1245
14	46	29	4	2008	146,05	7371	122,85	-0,1509
21	26	2	5	2008	145,42	12091	201,52	-0,1896
20	24	5	5	2008	145,09	16349	272,48	-0,2098
11	17	6	5	2008	145,01	17242	287,37	-0,2147
21	59	8	5	2008	144,82	20764	346,07	-0,2264
21	45	13	5	2008	144,54	27950	465,83	-0,2436
20	30	19	5	2008	144,3	36515	608,58	-0,2583
20	37	23	5	2008	144,15	42282	704,70	-0,2675
21	31	27	5	2008	144,04	48096	801,60	-0,2742
21	55	3	6	2008	143,89	58200	970,00	-0,2834
15	30	9	6	2008	143,77	66455	1107,58	-0,2908
10	11	13	6	2008	143,67	86296	1438,27	-0,2969
20	45	16	6	2008	143,63	91250	1520,83	-0,2994

$N_{48} = 14.37\%$ SECÇÃO - 16.30 cm² ALTURA - 3.978 cm

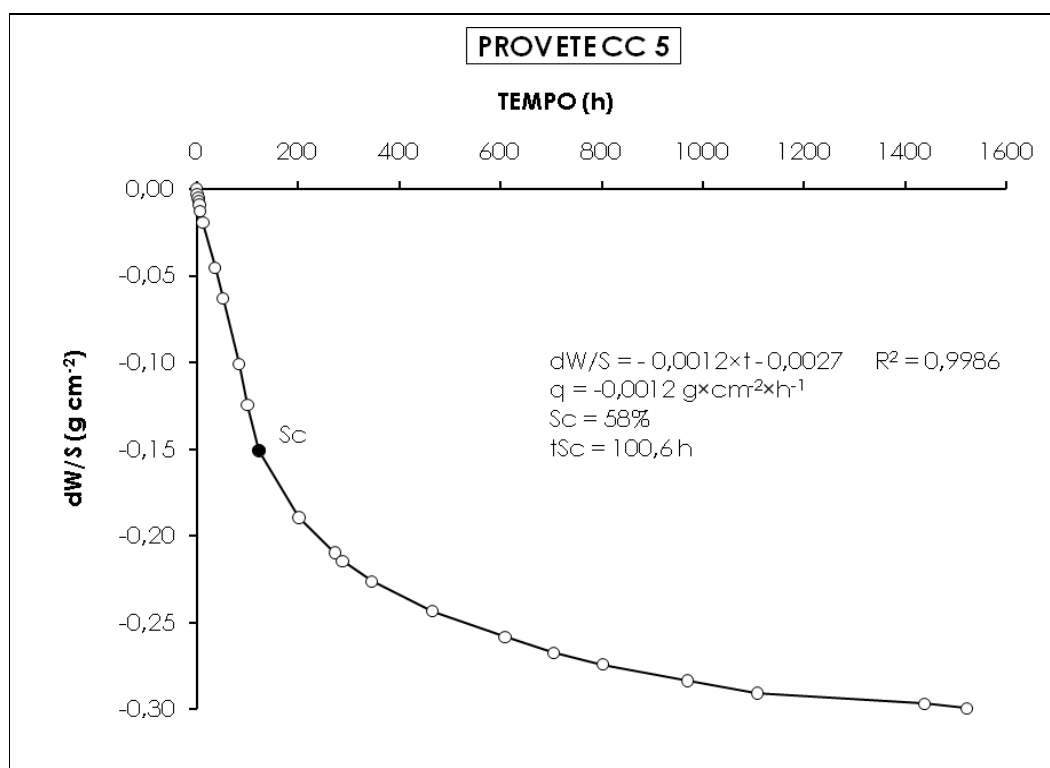


Figura A5.14 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC5

Quadro A5.15 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC6

PROVETE CC 6								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	56	24	4	2008	148,55	0	0,00	0,0000
12	21	24	4	2008	148,51	25	0,42	-0,0025
14	55	24	4	2008	148,44	179	2,98	-0,0068
16	10	24	4	2008	148,39	254	4,23	-0,0099
17	26	24	4	2008	148,36	330	5,50	-0,0117
18	41	24	4	2008	148,29	405	6,75	-0,0161
23	38	25	4	2008	148,14	702	11,70	-0,0253
23	23	26	4	2008	147,68	2127	35,45	-0,0538
15	12	26	4	2008	147,39	3076	51,27	-0,0717
23	22	27	4	2008	146,77	5006	83,43	-0,1100
16	30	28	4	2008	146,53	6034	100,57	-0,1249
14	46	29	4	2008	146,31	7370	122,83	-0,1385
21	26	2	5	2008	145,90	12090	201,50	-0,1638
20	24	5	5	2008	145,67	16348	272,47	-0,1780
11	17	6	5	2008	145,62	17241	287,35	-0,1811
21	59	8	5	2008	145,47	20763	346,05	-0,1904
21	45	13	5	2008	145,25	27949	465,82	-0,2040
20	30	19	5	2008	145,05	36514	608,57	-0,2163
20	37	23	5	2008	144,94	42281	704,68	-0,2231
21	32	27	5	2008	144,85	48096	801,60	-0,2287
21	55	3	6	2008	144,71	58199	969,98	-0,2373
15	30	9	6	2008	144,61	66454	1107,57	-0,2435
10	12	13	6	2008	144,51	86296	1438,27	-0,2497
20	45	16	6	2008	144,48	91249	1520,82	-0,2516

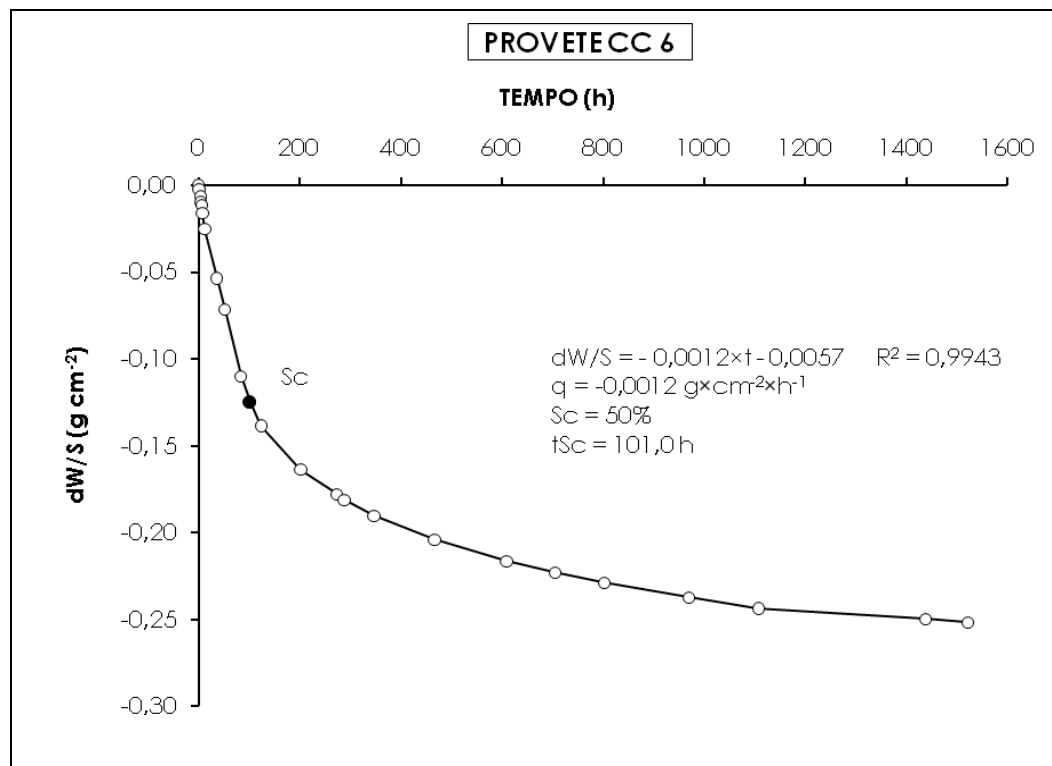
 $N_{48} = 12,62\%$ SECÇÃO - 16,179 cm² ALTURA - 4,035 cm

Figura A5.15 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC6

Quadro A5.16 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC7

PROVETE CC 7								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
12	2	24	4	2008	142,86	0	0,00	0,0000
12	22	24	4	2008	142,83	20	0,33	-0,0018
14	56	24	4	2008	142,78	174	2,90	-0,0048
16	10	24	4	2008	142,72	248	4,13	-0,0085
17	27	24	4	2008	142,70	325	5,42	-0,0097
18	41	24	4	2008	142,65	399	6,65	-0,0127
23	39	24	4	2008	142,52	697	11,62	-0,0206
23	23	25	4	2008	142,08	2121	35,35	-0,0471
15	13	26	4	2008	141,77	3071	51,18	-0,0659
23	22	27	4	2008	141,16	5000	83,33	-0,1028
16	31	28	4	2008	140,82	6029	100,48	-0,1233
14	46	29	4	2008	140,54	7364	122,73	-0,1402
21	26	32	5	2008	140,02	12084	201,40	-0,1717
20	24	35	5	2008	139,74	16342	272,37	-0,1886
11	17	36	5	2008	139,70	17235	287,25	-0,1910
22	0	38	5	2008	139,54	20758	345,97	-0,2007
21	46	43	5	2008	139,29	27944	465,73	-0,2158
20	32	49	5	2008	139,10	36510	608,50	-0,2273
20	38	53	5	2008	138,89	42276	704,60	-0,2400
21	33	57	5	2008	138,80	48091	801,52	-0,2454
21	56	64	6	2008	138,75	58194	969,90	-0,2484
15	31	70	6	2008	138,68	66449	1107,48	-0,2527
10	12	84	6	2008	138,61	86290	1438,17	-0,2569
20	46	87	6	2008	138,56	91244	1520,73	-0,2599

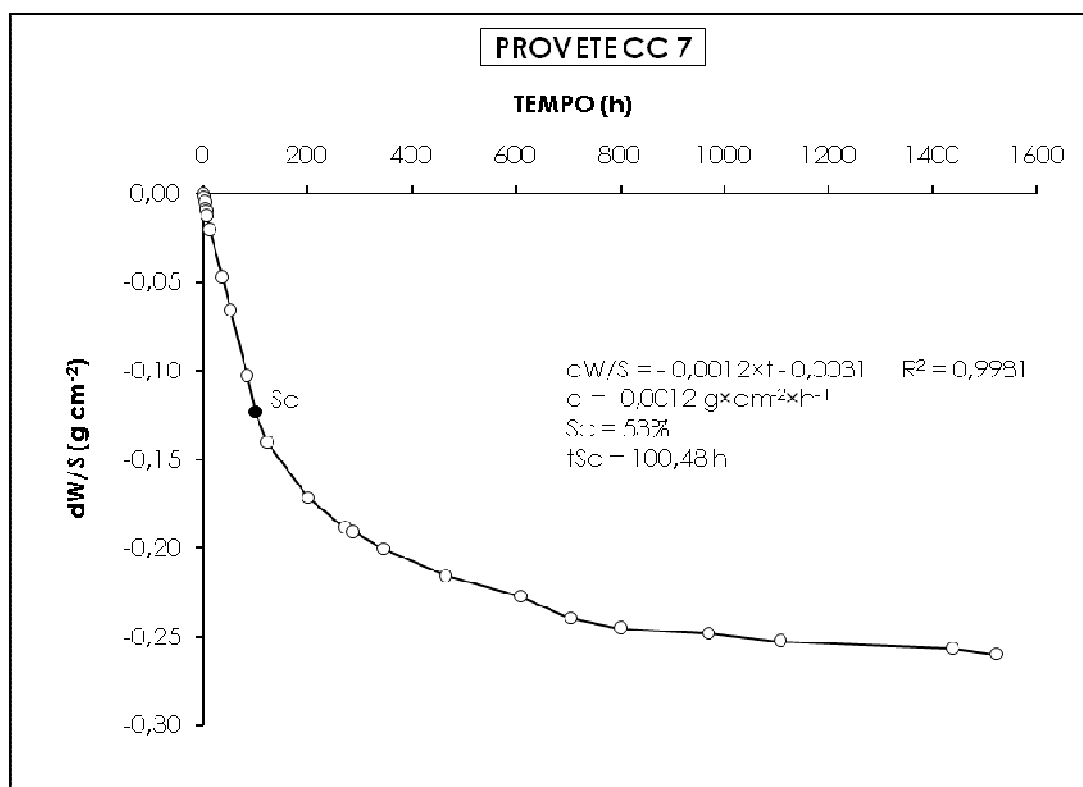
N₄₈ = 13,07%SECÇÃO - 16,544 cm² ALTURA - 3,8425 cm

Figura A5.16 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC7

Quadro A5.17 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC8

PROVETE CC 8								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
12	4	24	4	2008	147,66	0	0,00	0,0000
12	22	24	4	2008	147,63	18	0,30	-0,0018
14	56	24	4	2008	147,58	172	2,87	-0,0049
16	10	24	4	2008	147,54	246	4,10	-0,0074
17	27	24	4	2008	147,51	323	5,38	-0,0092
18	42	24	4	2008	147,47	398	6,63	-0,0117
23	39	25	4	2008	147,36	695	11,58	-0,0184
23	24	26	4	2008	147,00	2120	35,33	-0,0405
15	13	26	4	2008	146,76	3069	51,15	-0,0552
23	22	27	4	2008	146,16	4998	83,30	-0,0920
16	31	28	4	2008	145,76	6027	100,45	-0,1166
14	46	29	4	2008	145,35	7362	122,70	-0,1417
21	27	2	5	2008	144,62	12083	201,38	-0,1865
20	25	5	5	2008	144,22	16341	272,35	-0,2110
11	17	6	5	2008	144,19	17233	287,22	-0,2129
22	0	8	5	2008	143,97	20756	345,93	-0,2264
21	46	13	5	2008	143,64	27942	465,70	-0,2466
20	32	19	5	2008	143,37	36508	608,47	-0,2632
20	38	23	5	2008	143,23	42274	704,57	-0,2718
21	33	27	5	2008	143,15	48089	801,48	-0,2767
21	56	3	6	2008	142,97	58192	969,87	-0,2877
15	31	9	6	2008	142,86	66447	1107,45	-0,2945
10	12	13	6	2008	142,79	86288	1438,13	-0,2988
20	46	16	6	2008	142,72	91242	1520,70	-0,3030

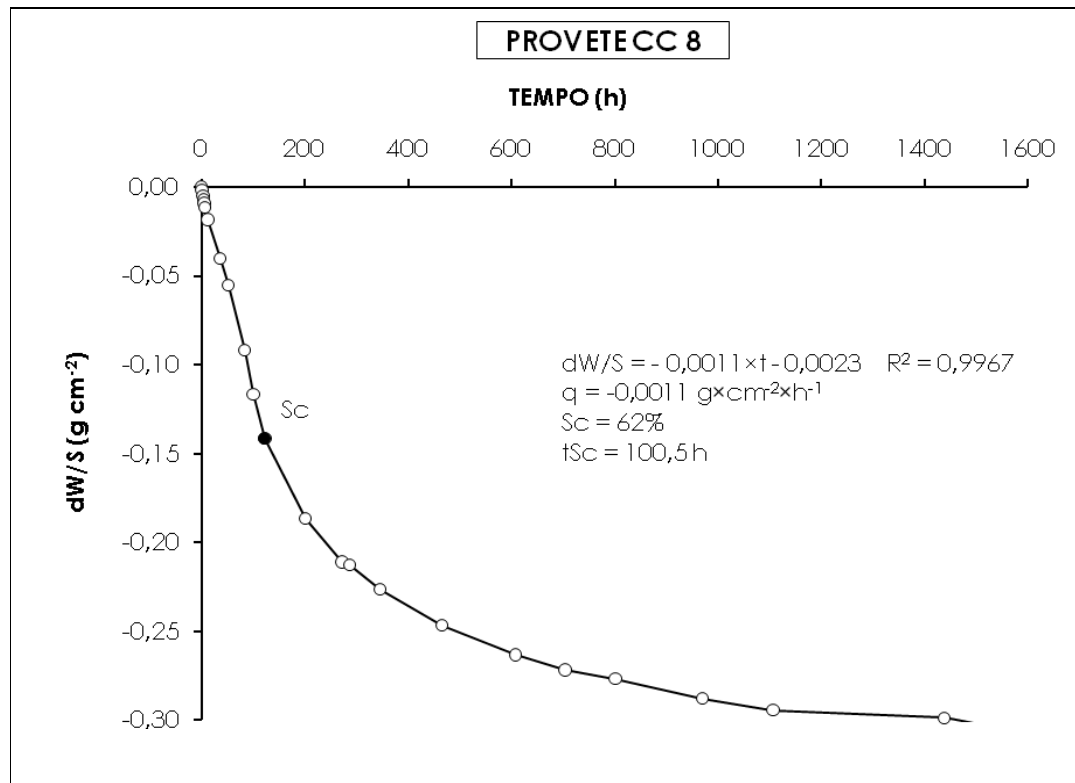
 $N_{48} = 14,52\%$ SECÇÃO - 16,301 cm² ALTURA - 3,985 cm

Figura A5.17 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC8

Quadro A5.18 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CC9

PROVETE CC 9								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
12	6	24	4	2008	143,79	0	0,00	0,0000
12	23	24	4	2008	143,75	17	0,28	-0,0025
14	56	24	4	2008	143,71	170	2,83	-0,0049
16	11	24	4	2008	143,67	245	4,08	-0,0074
17	27	24	4	2008	143,63	321	5,35	-0,0099
18	42	24	4	2008	143,59	396	6,60	-0,0123
23	40	24	4	2008	143,48	694	11,57	-0,0191
23	24	25	4	2008	143,08	2118	35,30	-0,0438
15	13	26	4	2008	142,79	3067	51,12	-0,0616
23	23	27	4	2008	142,25	4997	83,28	-0,0949
16	31	28	4	2008	141,85	6025	100,42	-0,1196
14	47	29	4	2008	141,39	7361	122,68	-0,1480
21	27	32	5	2008	140,59	12081	201,35	-0,1973
20	25	35	5	2008	140,21	16339	272,32	-0,2207
11	18	36	5	2008	140,14	17232	287,20	-0,2250
22	0	38	5	2008	139,92	20754	345,90	-0,2386
21	46	43	5	2008	139,59	27940	465,67	-0,2589
20	33	49	5	2008	139,33	36507	608,45	-0,2750
20	39	53	5	2008	139,22	42273	704,55	-0,2817
21	34	57	5	2008	139,10	48088	801,47	-0,2891
21	56	64	6	2008	138,94	58190	969,83	-0,2990
15	31	70	6	2008	138,84	66445	1107,42	-0,3052
10	13	84	6	2008	138,78	86287	1438,12	-0,3089
20	46	87	6	2008	138,71	91240	1520,67	-0,3132

$N_{48} = 14,52\%$ SECÇÃO - 16,221 cm² ALTURA - 3,8925 cm

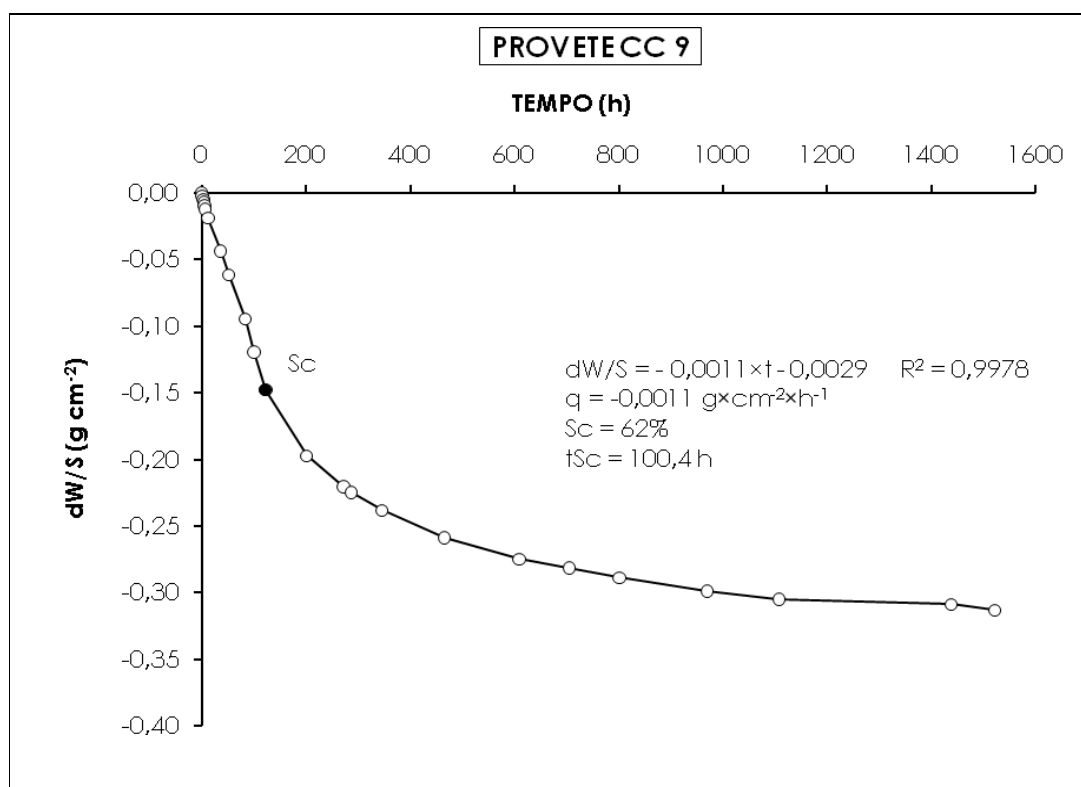


Figura A5.18 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CC9

Quadro A5.19 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL1

PROVETE CL 1								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	54	24	4	2008	140,00	0	0,00	0,0000
12	11	24	4	2008	139,94	77	1,28	-0,0037
14	47	24	4	2008	139,89	233	3,88	-0,0068
16	1	24	4	2008	139,86	307	5,12	-0,0086
17	19	24	4	2008	139,84	385	6,42	-0,0099
18	33	24	4	2008	139,81	459	7,65	-0,0117
23	31	25	4	2008	139,74	757	12,62	-0,0160
23	15	26	4	2008	139,44	2181	36,35	-0,0346
15	6	26	4	2008	139,29	3132	52,20	-0,0438
23	14	27	4	2008	139,00	5060	84,33	-0,0617
16	14	28	4	2008	138,84	6080	101,33	-0,0716
14	39	29	4	2008	138,64	7425	123,75	-0,0839
21	19	2	5	2008	138,05	12145	202,42	-0,1204
20	20	5	5	2008	137,56	16406	273,43	-0,1506
11	9	6	5	2008	137,46	17295	288,25	-0,1568
21	53	8	5	2008	137,08	20819	346,98	-0,1802
21	38	13	5	2008	136,45	28004	466,73	-0,2191
20	23	19	5	2008	135,80	36569	609,48	-0,2592
20	31	23	5	2008	135,49	42337	705,62	-0,2784
21	24	27	5	2008	135,21	48150	802,50	-0,2957
21	45	3	6	2008	134,86	58251	970,85	-0,3173
15	23	9	6	2008	134,63	66509	1108,48	-0,3315
10	3	13	6	2008	134,48	86349	1439,15	-0,3407
20	39	16	6	2008	134,39	91305	1521,75	-0,3463

N₄₈ = 16,33%

SECÇÃO - 16.201 cm² ALTURA - 3,9075 cm

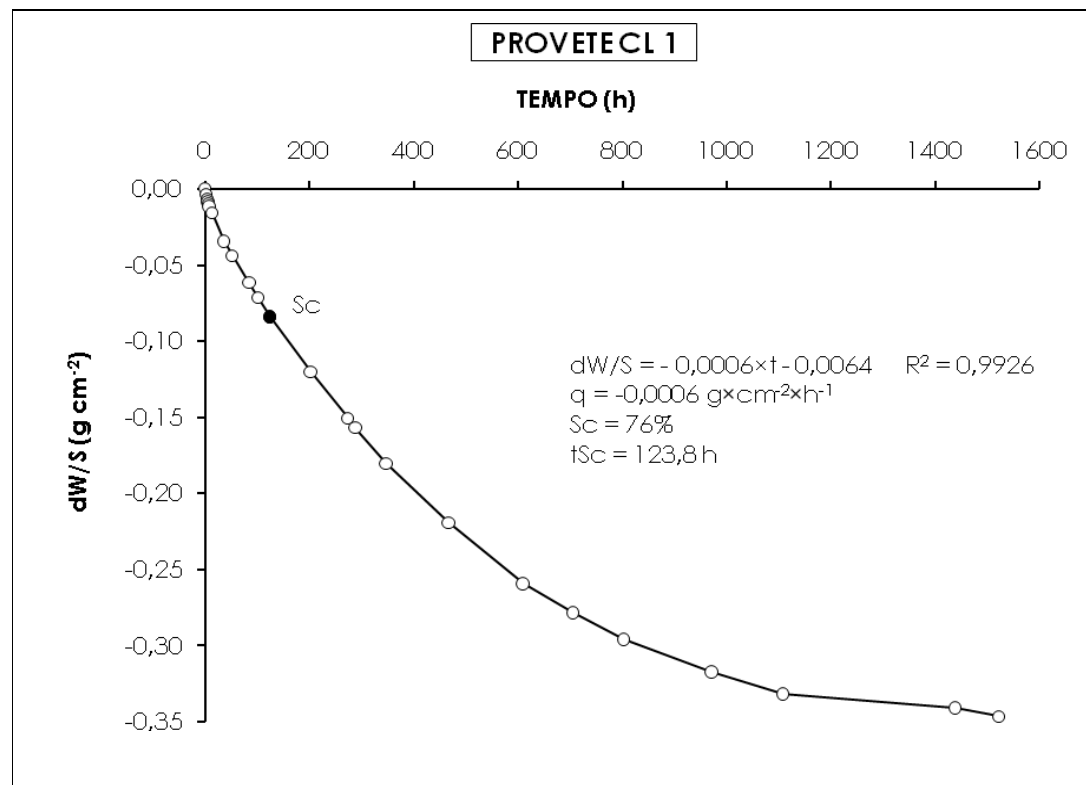


Figura A5.19 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL1

Quadro A5.20 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL2

PROVETE CL 2								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	57	24	4	2008	143,70	0	0,00	0,0000
12	11	24	4	2008	143,64	74	1,23	-0,0037
14	47	24	4	2008	143,55	230	3,83	-0,0092
16	1	24	4	2008	143,51	304	5,07	-0,0117
17	19	24	4	2008	143,47	382	6,37	-0,0141
18	33	24	4	2008	143,42	456	7,60	-0,0172
23	31	25	4	2008	143,28	754	12,57	-0,0258
23	15	26	4	2008	142,57	2178	36,30	-0,0694
15	6	26	4	2008	142,13	3129	52,15	-0,0964
23	15	27	4	2008	141,24	5058	84,30	-0,1511
16	14	28	4	2008	140,84	6077	101,28	-0,1757
14	39	29	4	2008	140,50	7422	123,70	-0,1965
21	19	2	5	2008	139,81	12142	202,37	-0,2389
20	20	5	5	2008	139,44	16403	273,38	-0,2617
11	10	6	5	2008	139,36	17293	288,22	-0,2666
21	53	8	5	2008	139,13	20816	346,93	-0,2807
21	38	13	5	2008	138,79	28001	466,68	-0,3016
20	23	19	5	2008	138,49	36566	609,43	-0,3200
20	31	23	5	2008	138,32	42334	705,57	-0,3304
21	24	27	5	2008	138,19	48147	802,45	-0,3384
21	45	3	6	2008	138,03	58248	970,80	-0,3483
15	23	9	6	2008	137,90	66506	1108,43	-0,3562
10	3	13	6	2008	137,81	86346	1439,10	-0,3618
20	39	16	6	2008	137,75	91302	1521,70	-0,3655

$N_{48} = 16,61\%$ SECÇÃO - 16.281 cm² ALTURA - 3.9975 cm

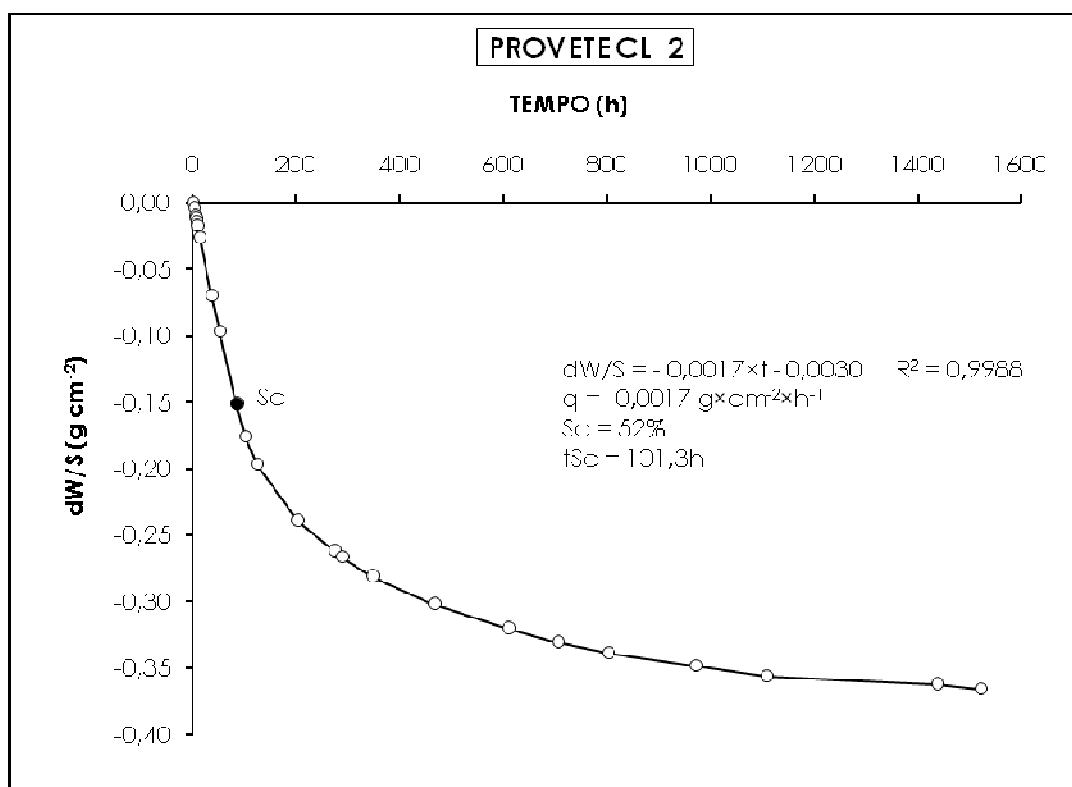


Figura A5.20 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL2

Quadro A5.21 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL3

PROVETE CL 3								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	59	24	4	2008	139,97	0	0,00	0,0000
12	12	24	4	2008	139,9	73	1,22	-0,0043
14	47	24	4	2008	139,8	228	3,80	-0,0105
16	2	24	4	2008	139,76	303	5,05	-0,0130
17	19	24	4	2008	139,72	380	6,33	-0,0154
18	33	24	4	2008	139,67	454	7,57	-0,0185
23	32	25	4	2008	139,51	753	12,55	-0,0284
23	16	26	4	2008	138,71	2177	36,28	-0,0778
15	6	26	4	2008	138,23	3127	52,12	-0,1074
23	15	27	4	2008	137,3	5056	84,27	-0,1648
16	16	28	4	2008	136,95	6077	101,28	-0,1864
14	39	29	4	2008	136,66	7420	123,67	-0,2043
21	19	2	5	2008	136,08	12140	202,33	-0,2401
20	20	5	5	2008	135,76	16401	273,35	-0,2599
11	10	6	5	2008	135,69	17291	288,18	-0,2642
21	53	8	5	2008	135,48	20814	346,90	-0,2771
21	39	13	5	2008	135,19	28000	466,67	-0,2950
20	24	19	5	2008	134,93	36565	609,42	-0,3111
20	32	23	5	2008	134,74	42333	705,55	-0,3228
21	24	27	5	2008	134,64	48145	802,42	-0,3290
21	46	3	6	2008	134,45	58247	970,78	-0,3407
15	24	9	6	2008	134,32	66505	1108,42	-0,3487
10	4	13	6	2008	134,23	86345	1439,08	-0,3543
20	39	16	6	2008	134,18	91300	1521,67	-0,3574

N₄₈ = 16,84% SECÇÃO - 16.201 cm² ALTURA - 3.8775 cm

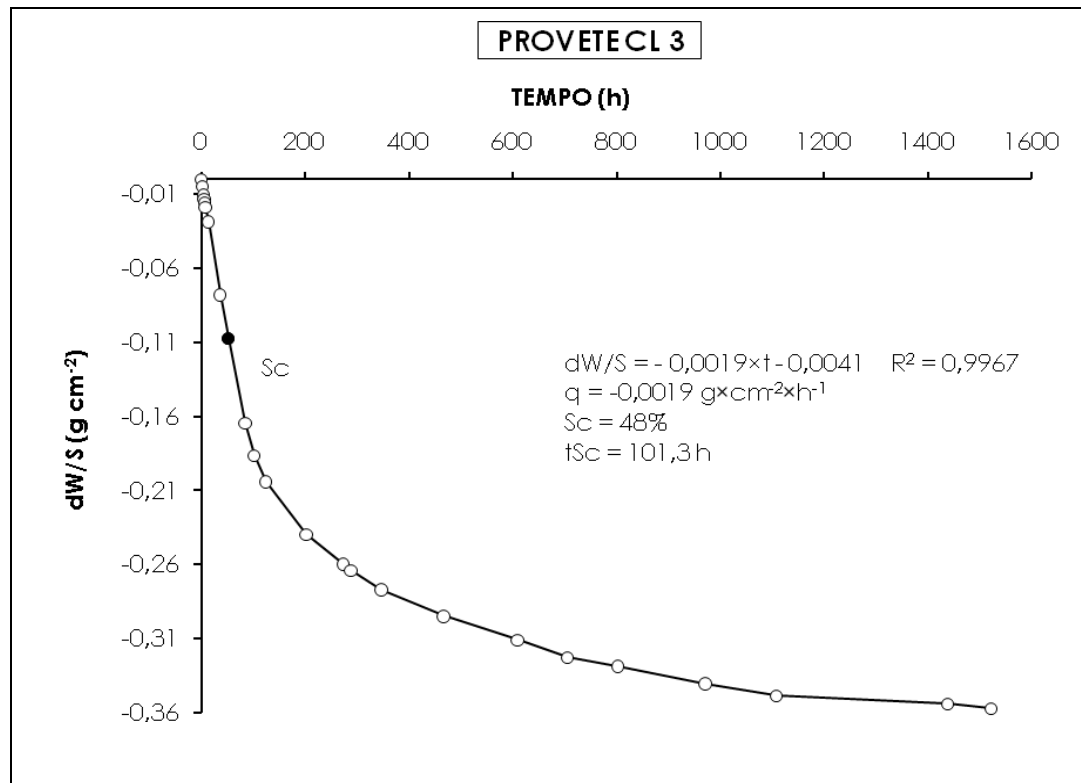


Figura A5.21 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL3

Quadro A5.22 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL4

PROVETE CL 4								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	3	24	4	2008	142,11	0	0,00	0,0000
12	12	24	4	2008	142,06	69	1,15	-0,0030
14	48	24	4	2008	141,99	225	3,75	-0,0073
16	2	24	4	2008	141,97	299	4,98	-0,0085
17	20	24	4	2008	141,95	377	6,28	-0,0098
18	34	24	4	2008	141,92	451	7,52	-0,0116
23	32	25	4	2008	141,86	749	12,48	-0,0152
23	16	26	4	2008	141,58	2173	36,22	-0,0323
15	6	26	4	2008	141,44	3123	52,05	-0,0409
23	15	27	4	2008	141,17	5052	84,20	-0,0573
16	16	28	4	2008	141,02	6073	101,22	-0,0665
14	39	29	4	2008	140,81	7416	123,60	-0,0793
21	20	2	5	2008	140,28	12137	202,28	-0,1116
20	21	5	5	2008	139,86	16398	273,30	-0,1372
11	10	6	5	2008	139,78	17287	288,12	-0,1421
21	53	8	5	2008	139,45	20810	346,83	-0,1622
21	39	13	5	2008	138,91	27996	466,60	-0,1951
20	24	19	5	2008	138,38	36561	609,35	-0,2274
20	32	23	5	2008	138,07	42329	705,48	-0,2463
21	25	27	5	2008	137,82	48142	802,37	-0,2616
21	46	3	6	2008	137,49	58243	970,72	-0,2817
15	24	9	6	2008	137,25	66501	1108,35	-0,2963
10	4	13	6	2008	137,07	86341	1439,02	-0,3073
20	40	16	6	2008	136,98	91297	1521,62	-0,3128

$N_{48} = 16,19\%$ SECÇÃO - 16.401 cm² ALTURA - 3.9575 cm

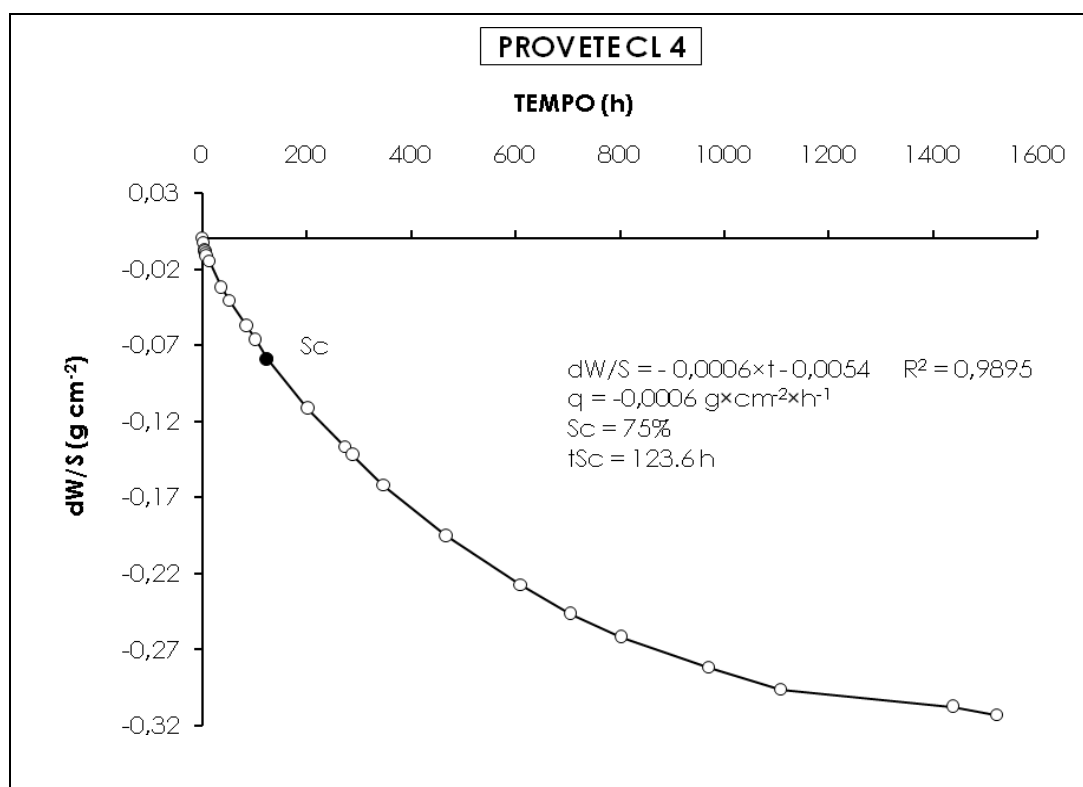


Figura A5.22 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL4

Quadro A5.23 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL6

PROVETE CL 6								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	6	24	4	2008	145,04	0	0,00	0,0000
12	13	24	4	2008	144,98	67	1,12	-0,0038
14	48	24	4	2008	144,94	222	3,70	-0,0062
16	3	24	4	2008	144,94	297	4,95	-0,0062
17	20	24	4	2008	144,9	374	6,23	-0,0087
18	35	24	4	2008	144,88	449	7,48	-0,0100
23	32	25	4	2008	144,82	746	12,43	-0,0137
23	17	26	4	2008	144,58	2171	36,18	-0,0287
15	7	26	4	2008	144,47	3121	52,02	-0,0356
23	16	27	4	2008	144,22	5050	84,17	-0,0512
16	17	28	4	2008	144,09	6071	101,18	-0,0594
14	40	29	4	2008	143,93	7414	123,57	-0,0694
21	20	2	5	2008	143,46	12134	202,23	-0,0987
20	21	5	5	2008	143,04	16395	273,25	-0,1250
11	11	6	5	2008	142,93	17285	288,08	-0,1319
21	54	8	5	2008	142,63	20808	346,80	-0,1506
21	40	13	5	2008	142,04	27994	466,57	-0,1875
20	25	19	5	2008	141,5	36559	609,32	-0,2213
20	32	23	5	2008	141,15	42326	705,43	-0,2431
21	27	27	5	2008	140,91	48141	802,35	-0,2581
21	46	3	6	2008	140,53	58240	970,67	-0,2819
15	25	9	6	2008	140,26	66499	1108,32	-0,2988
10	5	13	6	2008	140,07	86339	1438,98	-0,3106
20	40	16	6	2008	139,95	91294	1521,57	-0,3181

$N_{48} = 16,58\%$ SECÇÃO - 16,00 cm² ALTURA - 3,985 cm

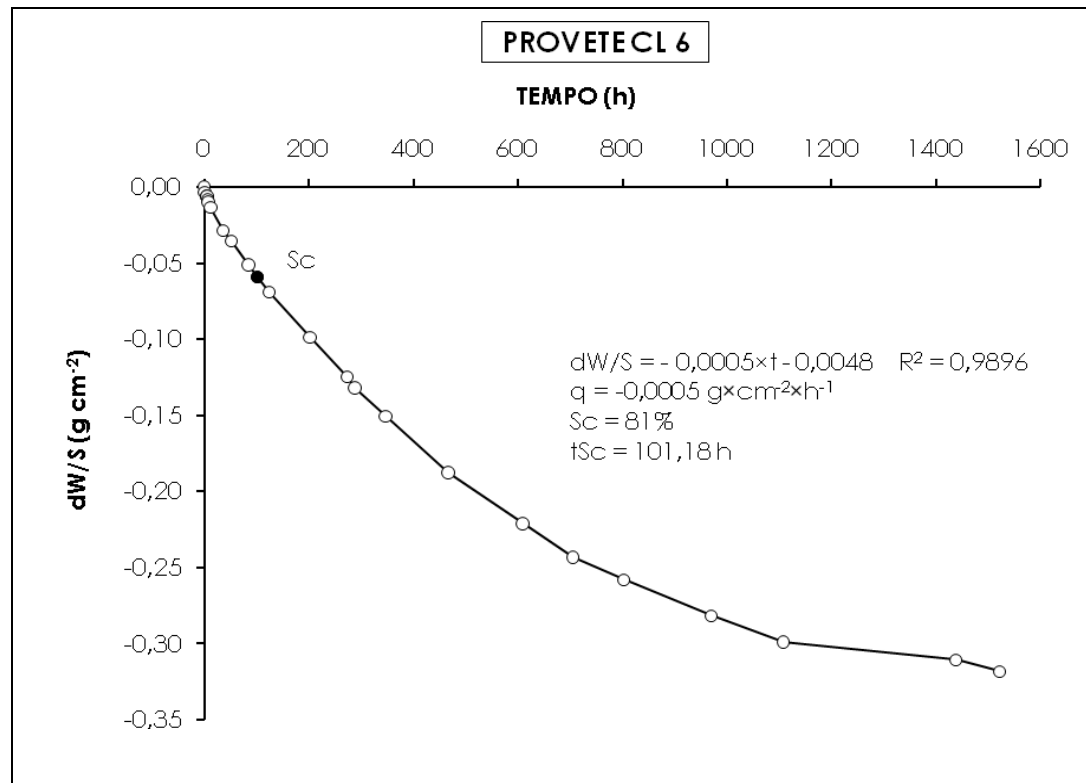


Figura A5.23 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL6

Quadro A5.24 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL7

PROVETE CL 7								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	8	24	4	2008	142,39	0	0,00	0,0000
12	14	24	4	2008	142,34	66	1,10	-0,0032
14	49	24	4	2008	142,31	221	3,68	-0,0051
16	3	24	4	2008	142,29	295	4,92	-0,0063
17	20	24	4	2008	142,25	372	6,20	-0,0089
18	35	24	4	2008	142,24	447	7,45	-0,0095
23	33	25	4	2008	142,18	745	12,42	-0,0133
23	17	26	4	2008	141,92	2169	36,15	-0,0297
15	7	26	4	2008	141,80	3119	51,98	-0,0373
23	16	27	4	2008	141,54	5048	84,13	-0,0538
16	18	28	4	2008	141,38	6070	101,17	-0,0639
14	40	29	4	2008	141,24	7412	123,53	-0,0728
21	21	2	5	2008	140,76	12133	202,22	-0,1032
20	22	5	5	2008	140,36	16394	273,23	-0,1285
11	11	6	5	2008	140,28	17283	288,05	-0,1335
21	54	8	5	2008	140,00	20806	346,77	-0,1513
21	40	13	5	2008	139,50	27992	466,53	-0,1829
20	25	19	5	2008	139,03	36557	609,28	-0,2127
20	33	23	5	2008	138,73	42325	705,42	-0,2316
21	27	27	5	2008	138,52	48139	802,32	-0,2449
21	47	3	6	2008	138,20	58239	970,65	-0,2652
15	25	9	6	2008	137,95	66497	1108,28	-0,2810
10	5	13	6	2008	137,79	86337	1438,95	-0,2911
20	40	16	6	2008	137,67	91292	1521,53	-0,2987

N₄₈ = 16,48%SECÇÃO - 15,80 cm²

ALTURA - 4,0475 cm

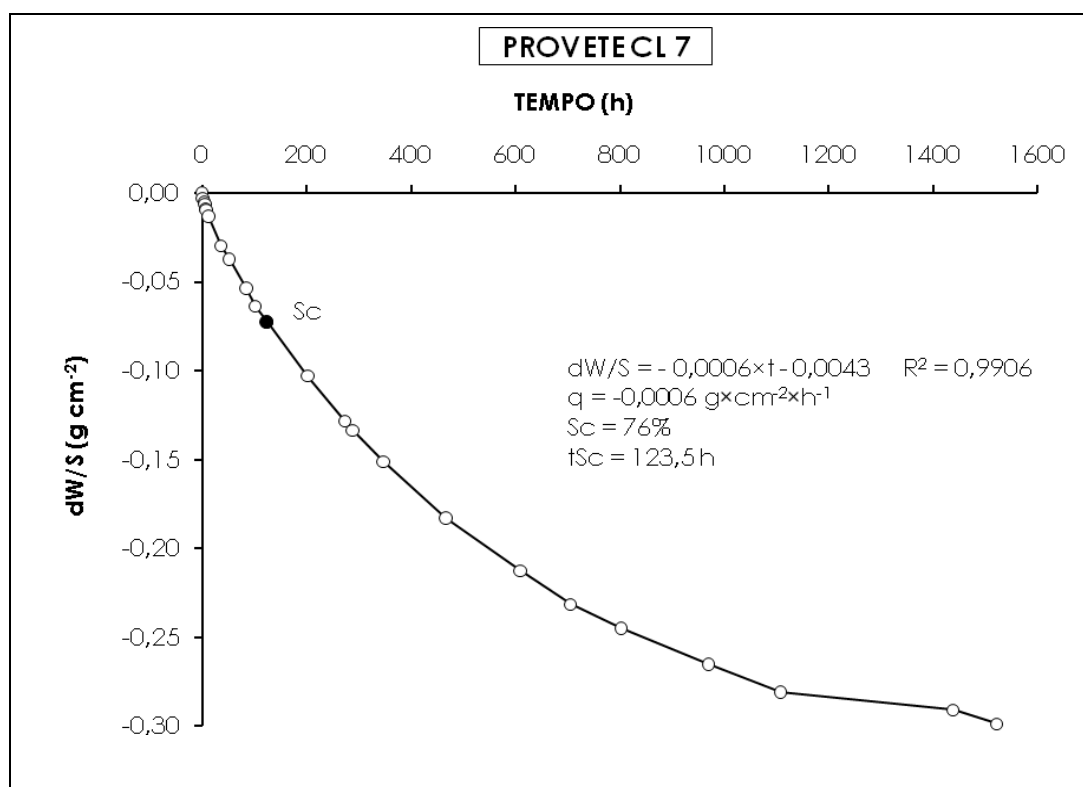


Figura A5.24 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL7

Quadro A5.25 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL8

PROVETE CL 8								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	13	24	4	2008	147,67	0	0,00	0,0000
12	14	24	4	2008	147,63	61	1,02	-0,0024
14	49	24	4	2008	147,60	216	3,60	-0,0042
16	4	24	4	2008	147,59	291	4,85	-0,0048
17	21	24	4	2008	147,57	368	6,13	-0,0060
18	35	24	4	2008	147,53	442	7,37	-0,0083
23	33	25	4	2008	147,50	740	12,33	-0,0101
23	17	26	4	2008	147,27	2164	36,07	-0,0238
15	7	26	4	2008	147,15	3114	51,90	-0,0310
23	16	27	4	2008	146,90	5043	84,05	-0,0458
16	19	28	4	2008	146,75	6066	101,10	-0,0548
14	41	29	4	2008	146,58	7408	123,47	-0,0649
21	21	2	5	2008	146,03	12128	202,13	-0,0976
20	22	5	5	2008	145,58	16389	273,15	-0,1244
11	12	6	5	2008	145,47	17279	287,98	-0,1310
21	54	8	5	2008	145,13	20801	346,68	-0,1512
21	40	13	5	2008	144,54	27987	466,45	-0,1863
20	25	19	5	2008	143,94	36552	609,20	-0,2220
20	33	23	5	2008	143,58	42320	705,33	-0,2435
21	27	27	5	2008	143,29	48134	802,23	-0,2607
21	48	3	6	2008	142,88	58235	970,58	-0,2851
15	25	9	6	2008	142,58	66492	1108,20	-0,3030
10	5	13	6	2008	142,39	86332	1438,87	-0,3143
20	41	16	6	2008	142,27	91288	1521,47	-0,3214

 $N_{48} = 16,57\%$ SECÇÃO - 16,80 cm²

ALTURA - 3,99 cm

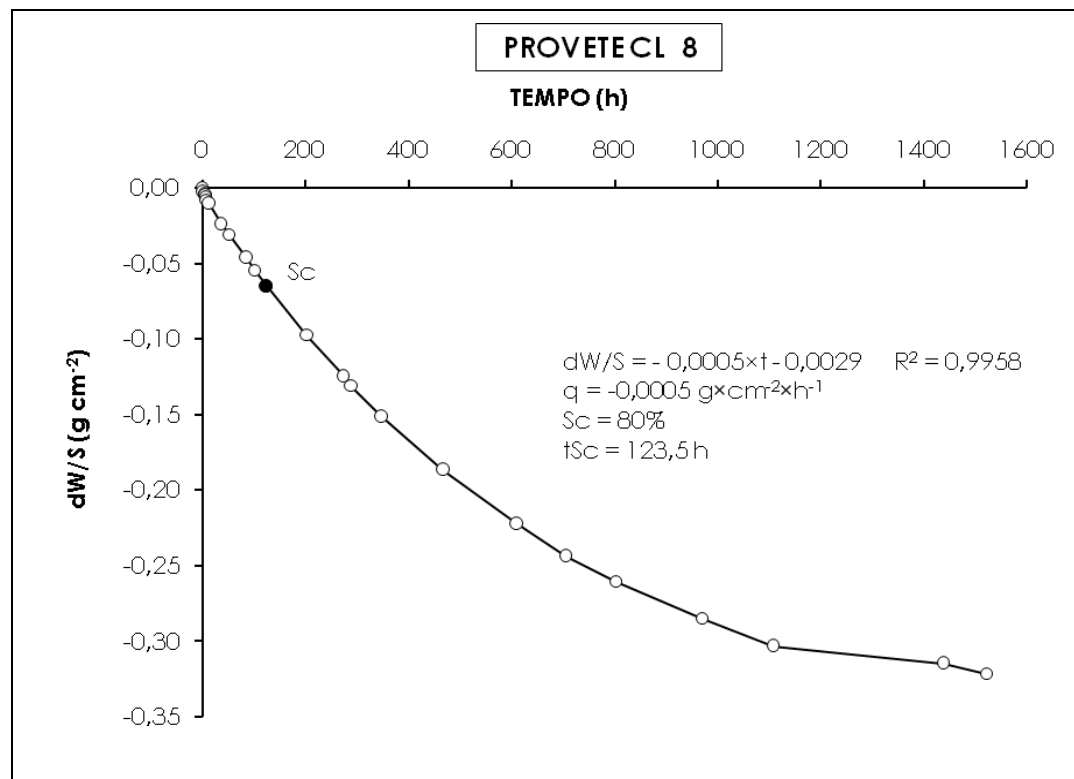


Figura A5.25 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL8

Quadro A5.26 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete CL9

PROVETE CL 9								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
11	17	24	4	2008	142,78	0	0,00	0,0000
12	14	24	4	2008	142,76	57	0,95	-0,0013
14	49	24	4	2008	142,72	212	3,53	-0,0038
16	4	24	4	2008	142,72	287	4,78	-0,0038
17	21	24	4	2008	142,69	364	6,07	-0,0056
18	36	24	4	2008	142,68	439	7,32	-0,0063
23	33	25	4	2008	142,65	736	12,27	-0,0081
23	18	26	4	2008	142,45	2161	36,02	-0,0206
15	8	26	4	2008	142,34	3111	51,85	-0,0275
23	17	27	4	2008	142,11	5040	84,00	-0,0419
16	20	28	4	2008	141,96	6063	101,05	-0,0513
14	41	29	4	2008	141,75	7404	123,40	-0,0644
21	21	2	5	2008	141,23	12124	202,07	-0,0969
20	22	5	5	2008	140,77	16385	273,08	-0,1257
11	12	6	5	2008	140,67	17275	287,92	-0,1320
21	54	8	5	2008	140,31	20797	346,62	-0,1545
21	41	13	5	2008	139,67	27984	466,40	-0,1945
20	26	19	5	2008	139,06	36549	609,15	-0,2326
20	33	23	5	2008	138,70	42316	705,27	-0,2552
21	27	27	5	2008	138,42	48130	802,17	-0,2727
21	49	3	6	2008	138,03	58232	970,53	-0,2971
15	25	9	6	2008	137,76	66488	1108,13	-0,3139
10	6	13	6	2008	137,59	86329	1438,82	-0,3246
20	41	16	6	2008	137,47	91284	1521,40	-0,3321

$N_{48} = 17,13\%$ SECÇÃO - 15,99 cm² ALTURA - 3,9925 cm

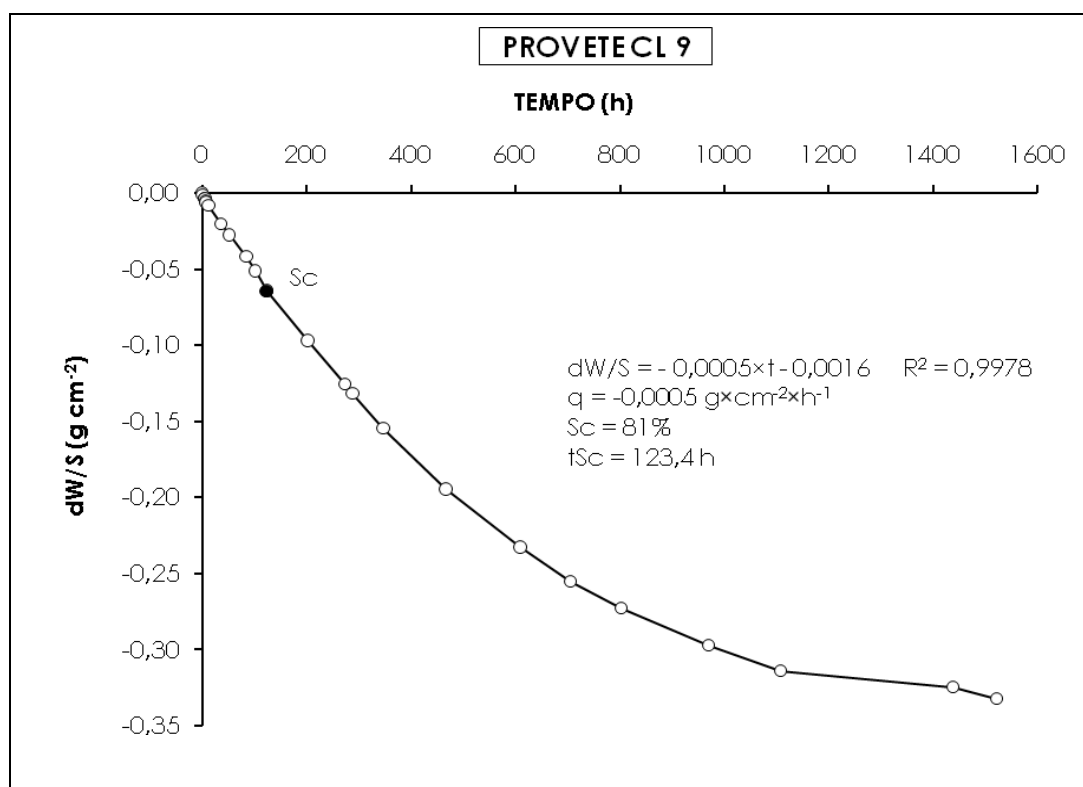


Figura A5.26 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete CL9

Quadro A5.27 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H1

PROVETE H 1								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	37	24	4	2008	132,52	0	0,00	0,0000
12	7	24	4	2008	132,43	90	1,50	-0,0054
14	42	24	4	2008	132,34	245	4,08	-0,0108
15	58	24	4	2008	132,30	321	5,35	-0,0132
17	15	24	4	2008	132,24	398	6,63	-0,0168
18	23	24	4	2008	132,21	466	7,77	-0,0186
23	28	24	4	2008	132,04	771	12,85	-0,0288
23	12	25	4	2008	131,41	2195	36,58	-0,0666
14	58	26	4	2008	131,00	3141	52,35	-0,0912
23	11	27	4	2008	130,13	5074	84,57	-0,1433
16	4	28	4	2008	129,65	6087	101,45	-0,1721
14	35	29	4	2008	129,02	7438	123,97	-0,2099
21	16	32	5	2008	127,37	12159	202,65	-0,3088
20	13	35	5	2008	126,54	16416	273,60	-0,3586
11	7	36	5	2008	126,38	17310	288,50	-0,3682
21	48	38	5	2008	125,86	20831	347,18	-0,3994
21	35	43	5	2008	125,07	28018	466,97	-0,4468
20	20	49	5	2008	124,39	36583	609,72	-0,4876
20	29	53	5	2008	124,01	42352	705,87	-0,5103
21	21	57	5	2008	123,69	48164	802,73	-0,5295
21	42	64	6	2008	123,23	58265	971,08	-0,5571
15	20	70	6	2008	122,98	66523	1108,72	-0,5721
9	59	84	6	2008	122,66	86362	1439,37	-0,5913
20	35	87	6	2008	122,49	91318	1521,97	-0,6015

N₄₈ = 22,95%

SECÇÃO - 16,675 cm² ALTURA - 3,75 cm

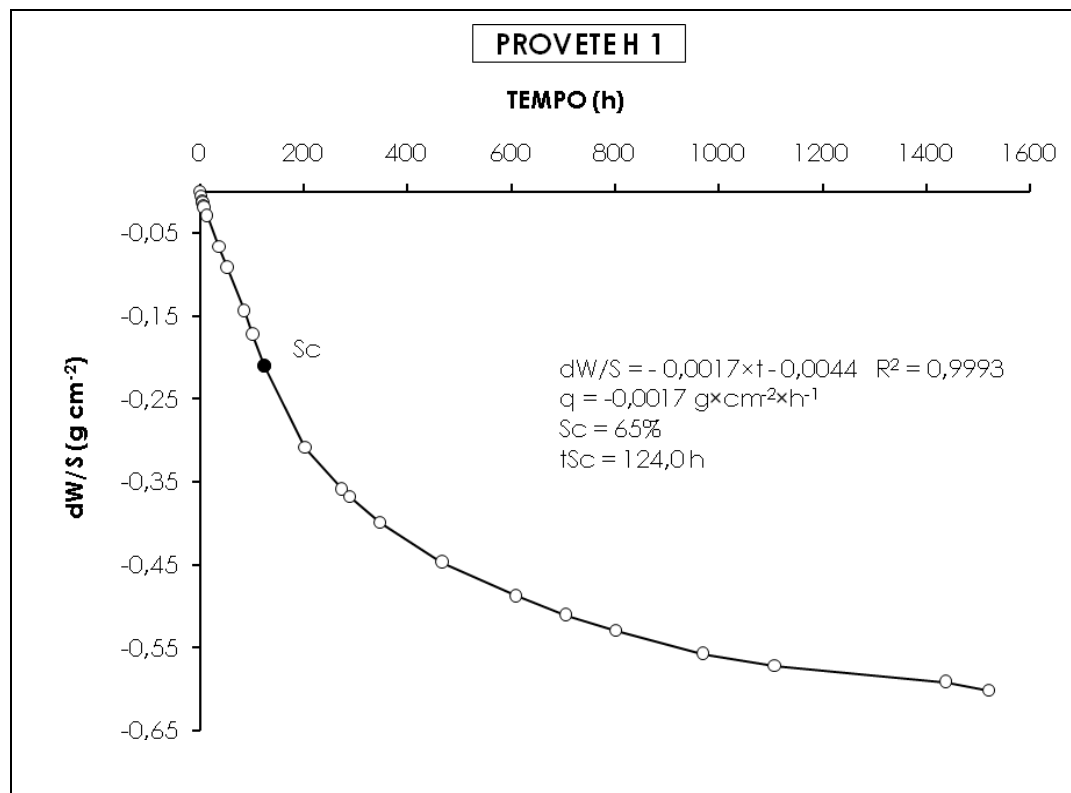


Figura A5.27 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H1

Quadro A5.28 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H2

PROVETE H 2								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	37	24	4	2008	142,01	0	0,00	0,0000
12	8	24	4	2008	141,93	91	1,52	-0,0050
14	43	24	4	2008	141,84	246	4,10	-0,0106
15	58	24	4	2008	141,79	321	5,35	-0,0137
17	16	24	4	2008	141,75	399	6,65	-0,0162
18	24	24	4	2008	141,72	467	7,78	-0,0180
23	28	25	4	2008	141,57	771	12,85	-0,0273
23	12	26	4	2008	140,99	2195	36,58	-0,0634
14	59	26	4	2008	140,59	3142	52,37	-0,0882
23	12	27	4	2008	139,75	5075	84,58	-0,1404
16	5	28	4	2008	139,28	6088	101,47	-0,1696
14	36	29	4	2008	138,75	7439	123,98	-0,2026
21	16	2	5	2008	137,20	12159	202,65	-0,2989
20	13	5	5	2008	136,26	16416	273,60	-0,3573
11	7	6	5	2008	136,10	17310	288,50	-0,3672
21	49	8	5	2008	135,56	20832	347,20	-0,4008
21	35	13	5	2008	134,72	28018	466,97	-0,4530
20	20	19	5	2008	133,98	36583	609,72	-0,4989
20	29	23	5	2008	133,56	42352	705,87	-0,5250
21	21	27	5	2008	133,20	48164	802,73	-0,5474
21	42	3	6	2008	132,68	58265	971,08	-0,5797
15	20	9	6	2008	132,28	66523	1108,72	-0,6046
9	59	13	6	2008	132,00	86362	1439,37	-0,6220
20	36	16	6	2008	131,76	91319	1521,98	-0,6369

$N_{48} = 23,06\%$ SECÇÃO - 16,094 cm² ALTURA - 4,2 cm

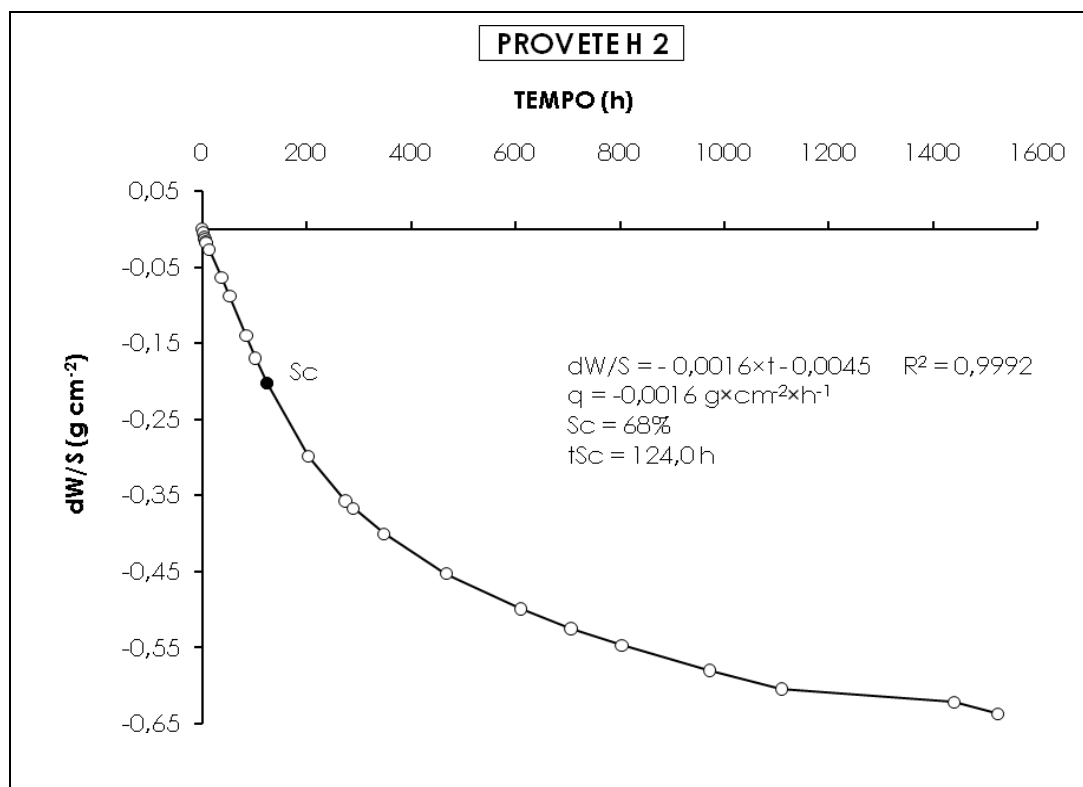


Figura A5.28 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H2

Quadro A5.29 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H3

PROVETE H 3								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	38	24	4	2008	134,72	0	0,00	0,0000
12	8	24	4	2008	134,65	90	1,50	-0,0045
14	44	24	4	2008	134,56	246	4,10	-0,0102
15	58	24	4	2008	134,52	320	5,33	-0,0128
17	16	24	4	2008	134,48	398	6,63	-0,0154
18	25	24	4	2008	134,44	467	7,78	-0,0179
23	28	24	4	2008	134,28	770	12,83	-0,0282
23	12	25	4	2008	133,67	2194	36,57	-0,0672
15	0	26	4	2008	133,29	3142	52,37	-0,0915
23	12	27	4	2008	132,45	5074	84,57	-0,1453
16	6	28	4	2008	132,00	6088	101,47	-0,1741
14	36	29	4	2008	131,45	7438	123,97	-0,2093
21	16	2	5	2008	129,91	12158	202,63	-0,3079
20	14	5	5	2008	129,05	16416	273,60	-0,3629
11	7	6	5	2008	128,90	17309	288,48	-0,3726
21	49	8	5	2008	128,39	20831	347,18	-0,4052
21	35	13	5	2008	127,60	28017	466,95	-0,4558
20	20	19	5	2008	126,91	36582	609,70	-0,4999
20	29	23	5	2008	126,53	42351	705,85	-0,5243
21	22	27	5	2008	126,18	48164	802,73	-0,5467
21	42	3	6	2008	125,69	58264	971,07	-0,5780
15	21	9	6	2008	125,31	66523	1108,72	-0,6024
10	0	13	6	2008	125,05	86362	1439,37	-0,6190
20	36	16	6	2008	124,83	91318	1521,97	-0,6331

N₄₈ = 23,45%

SECÇÃO - 15,622 cm²

ALTURA - 4,045 cm

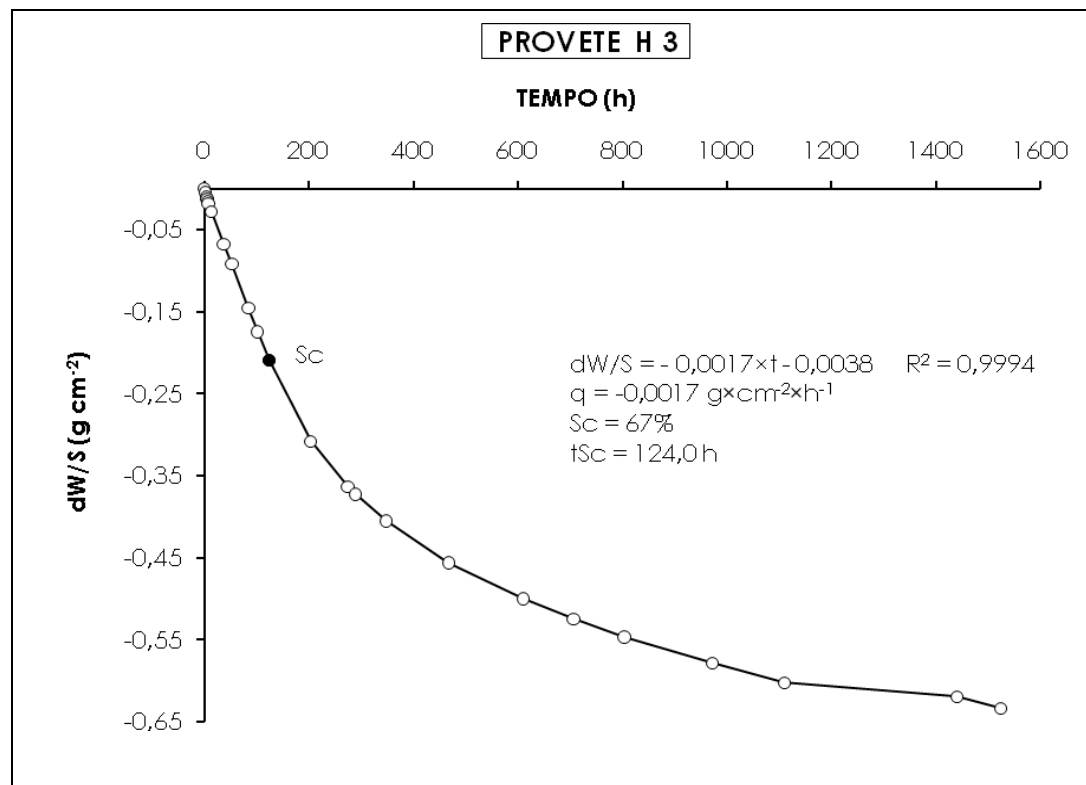


Figura A5.29 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H3

Quadro A5.30 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H4

PROVETE H 4								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	38	24	4	2008	138,47	0	0,00	0,0000
12	8	24	4	2008	138,38	90	1,50	-0,0054
14	44	24	4	2008	138,30	246	4,10	-0,0103
15	59	24	4	2008	138,26	321	5,35	-0,0127
17	16	24	4	2008	138,22	398	6,63	-0,0151
18	25	24	4	2008	138,17	467	7,78	-0,0181
23	29	25	4	2008	138,01	771	12,85	-0,0278
23	13	26	4	2008	137,41	2195	36,58	-0,0640
15	1	26	4	2008	137,06	3143	52,38	-0,0851
23	12	27	4	2008	136,27	5074	84,57	-0,1329
16	9	28	4	2008	135,81	6091	101,52	-0,1606
14	36	29	4	2008	135,13	7438	123,97	-0,2017
21	16	2	5	2008	133,39	12158	202,63	-0,3068
20	14	5	5	2008	132,54	16416	273,60	-0,3581
11	7	6	5	2008	132,37	17309	288,48	-0,3684
21	50	8	5	2008	131,88	20832	347,20	-0,3979
21	36	13	5	2008	131,07	28018	466,97	-0,4469
20	21	19	5	2008	130,40	36583	609,72	-0,4873
20	29	23	5	2008	130,00	42351	705,85	-0,5115
21	22	27	5	2008	129,67	48164	802,73	-0,5314
21	43	3	6	2008	129,17	58265	971,08	-0,5616
15	21	9	6	2008	128,78	66523	1108,72	-0,5851
10	0	13	6	2008	128,51	86362	1439,37	-0,6014
20	36	16	6	2008	128,31	91318	1521,97	-0,6135

N₄₈ = 23,91% SECÇÃO - 16,560 cm² ALTURA - 4,0125 cm

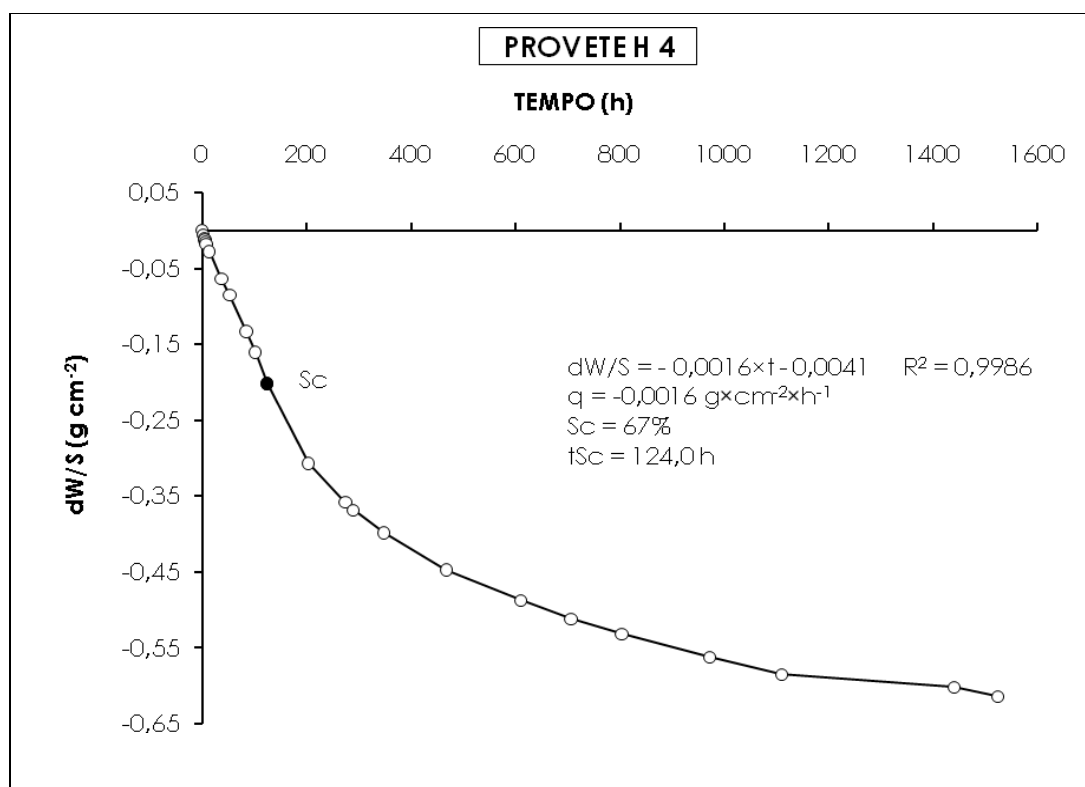


Figura A5.30 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H4

Quadro A5.31 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H5

PROVETE H 5								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	40	24	4	2008	145,87	0	0,00	0,0000
12	9	24	4	2008	145,79	89	1,48	-0,0048
14	45	24	4	2008	145,73	245	4,08	-0,0084
15	59	24	4	2008	145,69	319	5,32	-0,0108
17	17	24	4	2008	145,65	397	6,62	-0,0132
18	28	24	4	2008	145,62	468	7,80	-0,0150
23	29	25	4	2008	145,48	2209	36,82	-0,0234
23	13	26	4	2008	144,94	3633	60,55	-0,0558
15	1	26	4	2008	144,62	3141	52,35	-0,0749
23	13	27	4	2008	143,86	5073	84,55	-0,1205
16	10	28	4	2008	143,41	6090	101,50	-0,1475
14	37	29	4	2008	142,81	7437	123,95	-0,1835
21	17	2	5	2008	141,17	-31043	-517,38	-0,2818
20	14	5	5	2008	140,16	-26786	-446,43	-0,3424
11	8	6	5	2008	140,00	-25892	-431,53	-0,3520
21	50	8	5	2008	139,43	-22370	-372,83	-0,3861
21	36	13	5	2008	138,63	-15184	-253,07	-0,4341
20	21	19	5	2008	137,94	-6619	-110,32	-0,4755
20	30	23	5	2008	137,52	-850	-14,17	-0,5007
21	22	27	5	2008	137,18	4962	82,70	-0,5210
21	43	3	6	2008	136,65	-29577	-492,95	-0,5528
15	22	9	6	2008	136,26	-21318	-355,30	-0,5762
10	1	13	6	2008	135,98	-15879	-264,65	-0,5930
20	37	16	6	2008	135,74	-10923	-182,05	-0,6074

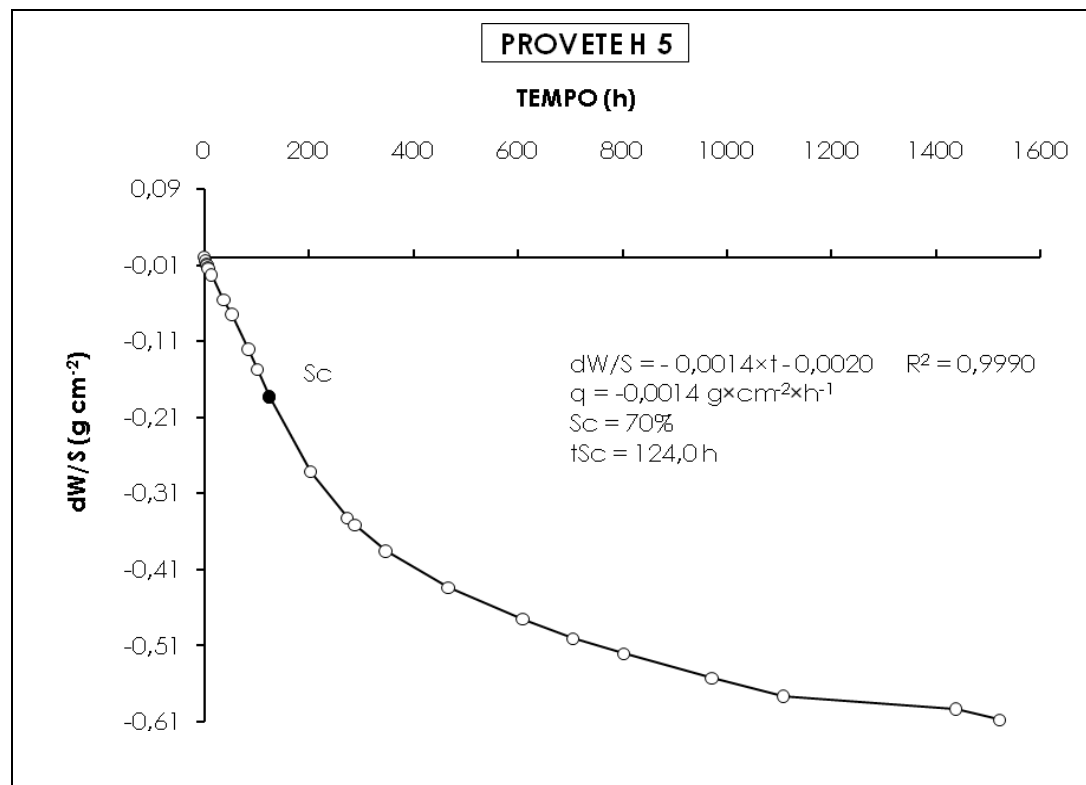
 $N_{48} = 19,27\%$ SECÇÃO - 16,678cm² ALTURA - 4,125 cm

Figura A5.31 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H5

Quadro A5.32 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H6

PROVETE H 6								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	43	24	4	2008	140,15	0	0,00	0,0000
12	9	24	4	2008	140,07	86	1,43	-0,0049
14	45	24	4	2008	140,04	242	4,03	-0,0067
16	0	24	4	2008	139,99	317	5,28	-0,0097
17	17	24	4	2008	139,96	394	6,57	-0,0116
18	28	24	4	2008	139,92	465	7,75	-0,0140
23	29	25	4	2008	139,78	766	12,77	-0,0225
23	13	26	4	2008	139,31	2190	36,50	-0,0511
15	2	26	4	2008	138,97	3139	52,32	-0,0718
23	13	27	4	2008	138,19	5070	84,50	-0,1193
16	11	28	4	2008	137,70	6088	101,47	-0,1492
14	37	29	4	2008	137,13	7434	123,90	-0,1839
21	17	2	5	2008	135,25	12154	202,57	-0,2983
20	15	5	5	2008	133,93	16412	273,53	-0,3787
11	8	6	5	2008	133,73	17305	288,42	-0,3909
21	50	8	5	2008	133,08	20827	347,12	-0,4304
21	37	13	5	2008	132,19	28014	466,90	-0,4846
20	21	19	5	2008	131,44	36578	609,63	-0,5303
20	30	23	5	2008	131,02	42347	705,78	-0,5559
21	23	27	5	2008	130,69	48160	802,67	-0,5760
21	43	3	6	2008	130,20	58260	971,00	-0,6058
15	22	9	6	2008	129,82	66519	1108,65	-0,6289
10	1	13	6	2008	129,59	86358	1439,30	-0,6429
20	37	16	6	2008	129,40	91314	1521,90	-0,6545

$N_{48} = 31,11\%$ SECÇÃO - 16,425 cm² ALTURA - 3,985 cm

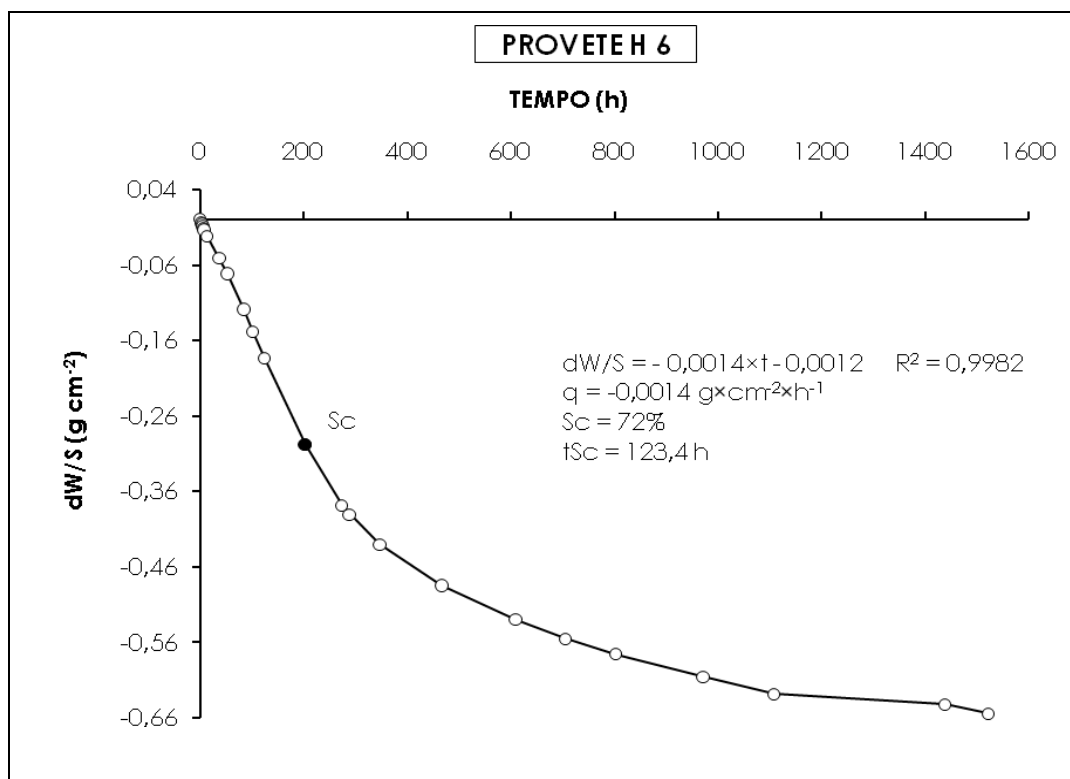


Figura A5.32 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H6

Quadro A5.33 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H7

PROVETE H 7								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	45	24	4	2008	140,27	0	0,00	0,0000
12	10	24	4	2008	140,22	85	1,42	-0,0030
14	45	24	4	2008	140,15	240	4,00	-0,0073
16	0	24	4	2008	140,11	315	5,25	-0,0098
17	17	24	4	2008	140,07	392	6,53	-0,0122
18	29	24	4	2008	140,05	464	7,73	-0,0134
23	30	25	4	2008	139,9	765	12,75	-0,0226
23	14	26	4	2008	139,45	2189	36,48	-0,0500
15	3	26	4	2008	139,14	3138	52,30	-0,0689
23	13	27	4	2008	138,35	5068	84,47	-0,1171
16	12	28	4	2008	137,84	6087	101,45	-0,1482
14	37	29	4	2008	137,3	7432	123,87	-0,1811
21	18	2	5	2008	135,51	12153	202,55	-0,2902
20	15	5	5	2008	134,39	16410	273,50	-0,3585
11	8	6	5	2008	134,22	17303	288,38	-0,3689
21	51	8	5	2008	133,62	20826	347,10	-0,4054
21	37	13	5	2008	132,69	28012	466,87	-0,4621
20	22	19	5	2008	131,92	36577	609,62	-0,5091
20	30	23	5	2008	131,46	42345	705,75	-0,5371
21	23	27	5	2008	131,12	48158	802,63	-0,5579
21	44	3	6	2008	130,61	58259	970,98	-0,5890
15	22	9	6	2008	130,19	66517	1108,62	-0,6146
10	2	13	6	2008	129,94	86357	1439,28	-0,6298
20	38	16	6	2008	129,72	91313	1521,88	-0,6432

N₄₈ = 26,61%

SECÇÃO - 16,402 cm²

ALTURA - 3,985 cm

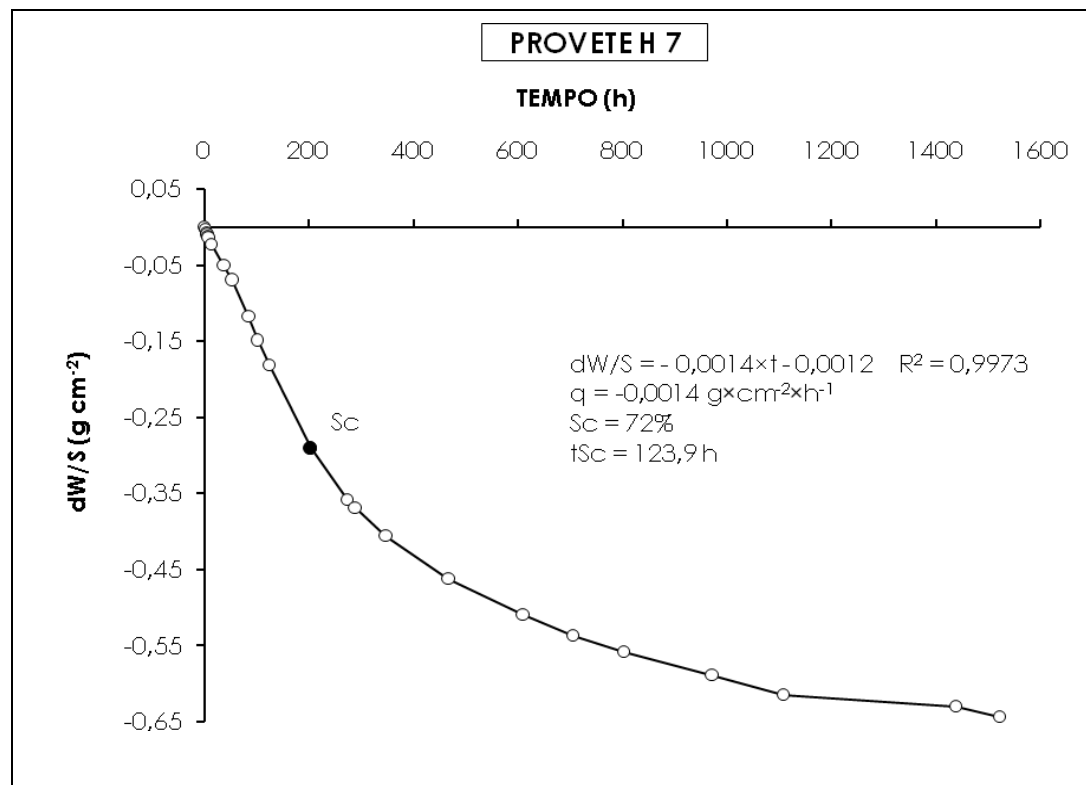


Figura A5.33 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H7

Quadro A5.34 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H8

PROVETE H 8								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	48	24	4	2008	136,8	0	0,00	0,0000
12	10	24	4	2008	136,73	82	1,37	-0,0043
14	46	24	4	2008	136,67	238	3,97	-0,0079
16	0	24	4	2008	136,64	312	5,20	-0,0097
17	18	24	4	2008	136,61	390	6,50	-0,0116
18	29	24	4	2008	136,58	461	7,68	-0,0134
23	30	25	4	2008	136,46	762	12,70	-0,0207
23	14	26	4	2008	136,05	2186	36,43	-0,0456
15	4	26	4	2008	135,77	3136	52,27	-0,0626
23	14	27	4	2008	135,16	5066	84,43	-0,0997
16	13	28	4	2008	134,69	6085	101,42	-0,1283
14	38	29	4	2008	134,09	7430	123,83	-0,1648
21	18	2	5	2008	132,13	12150	202,50	-0,2840
20	15	5	5	2008	131,05	16407	273,45	-0,3497
11	9	6	5	2008	130,92	17301	288,35	-0,3576
21	51	8	5	2008	130,32	20823	347,05	-0,3941
21	37	13	5	2008	129,54	28009	466,82	-0,4415
20	22	19	5	2008	128,89	36574	609,57	-0,4811
20	30	23	5	2008	128,51	42342	705,70	-0,5042
21	23	27	5	2008	128,19	48155	802,58	-0,5236
21	44	3	6	2008	127,75	58256	970,93	-0,5504
15	22	9	6	2008	127,38	66514	1108,57	-0,5729
10	2	13	6	2008	127,12	86354	1439,23	-0,5887
20	38	16	6	2008	126,93	91310	1521,83	-0,6003

N₄₈ = 23,36%SECÇÃO - 16,443 cm²

ALTURA - 3,965 cm

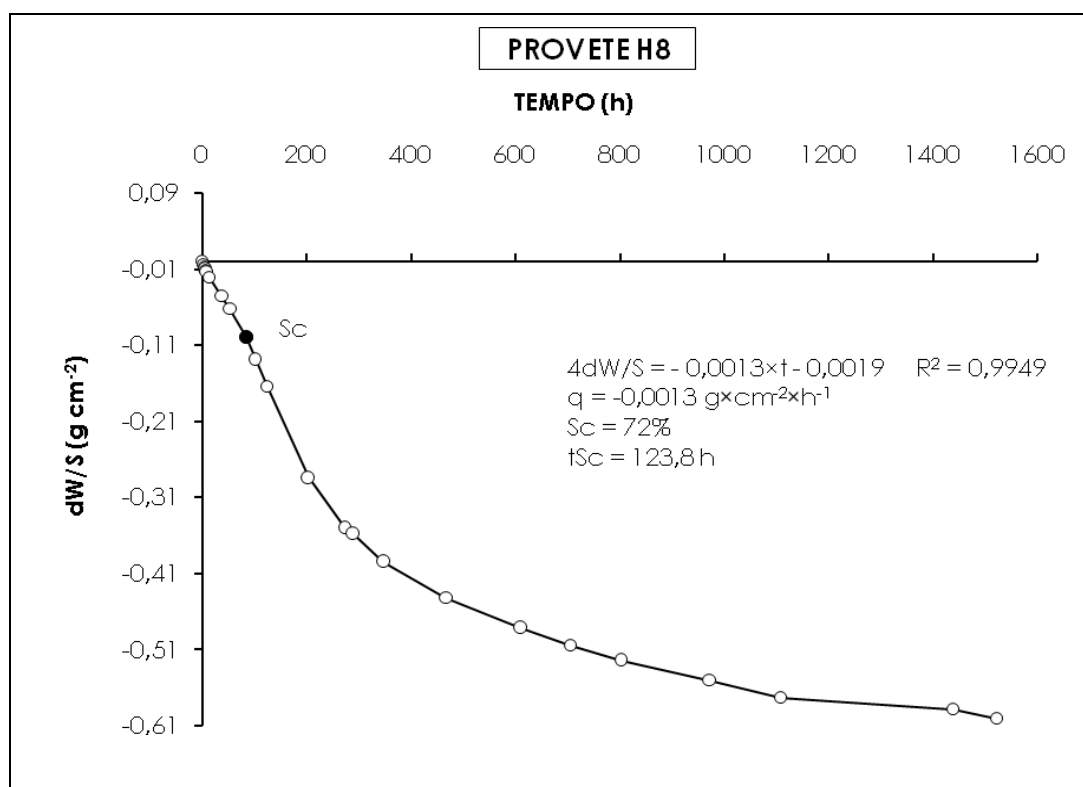


Figura A5.34 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H8

Quadro A5.35 – Resultados do ensaio de evaporação de água do provete H9

PROVETE H 9								
HORA	MINUTO	DIA	MÊS	ANO	PESO	MINUTOS	HORAS	dW/S
10	51	24	4	2008	136,48	0	0,00	0,0000
12	10	24	4	2008	136,43	79	1,32	-0,0030
14	46	24	4	2008	136,38	235	3,92	-0,0061
16	1	24	4	2008	136,35	310	5,17	-0,0079
17	18	24	4	2008	136,32	387	6,45	-0,0097
18	31	24	4	2008	136,29	460	7,67	-0,0116
23	30	25	4	2008	136,18	759	12,65	-0,0183
23	14	26	4	2008	135,77	2183	36,38	-0,0432
15	4	26	4	2008	135,49	3133	52,22	-0,0603
23	14	27	4	2008	134,9	5063	84,38	-0,0962
16	13	28	4	2008	134,43	6082	101,37	-0,1248
14	38	29	4	2008	133,93	7427	123,78	-0,1553
21	18	2	5	2008	132,31	12147	202,45	-0,2539
20	16	5	5	2008	131,11	16405	273,42	-0,3270
11	9	6	5	2008	130,93	17298	288,30	-0,3379
21	51	8	5	2008	130,31	20820	347,00	-0,3757
21	38	13	5	2008	129,44	28007	466,78	-0,4287
20	23	19	5	2008	128,67	36572	609,53	-0,4756
20	31	23	5	2008	128,25	42340	705,67	-0,5011
21	23	27	5	2008	127,89	48152	802,53	-0,5230
21	45	3	6	2008	127,35	58254	970,90	-0,5559
15	23	9	6	2008	126,95	66512	1108,53	-0,5803
10	2	13	6	2008	126,67	86351	1439,18	-0,5973
20	38	16	6	2008	126,45	91307	1521,78	-0,6107

N₄₈ = 22,54%

SECÇÃO - 16,423 cm²

ALTURA - 4,135cm

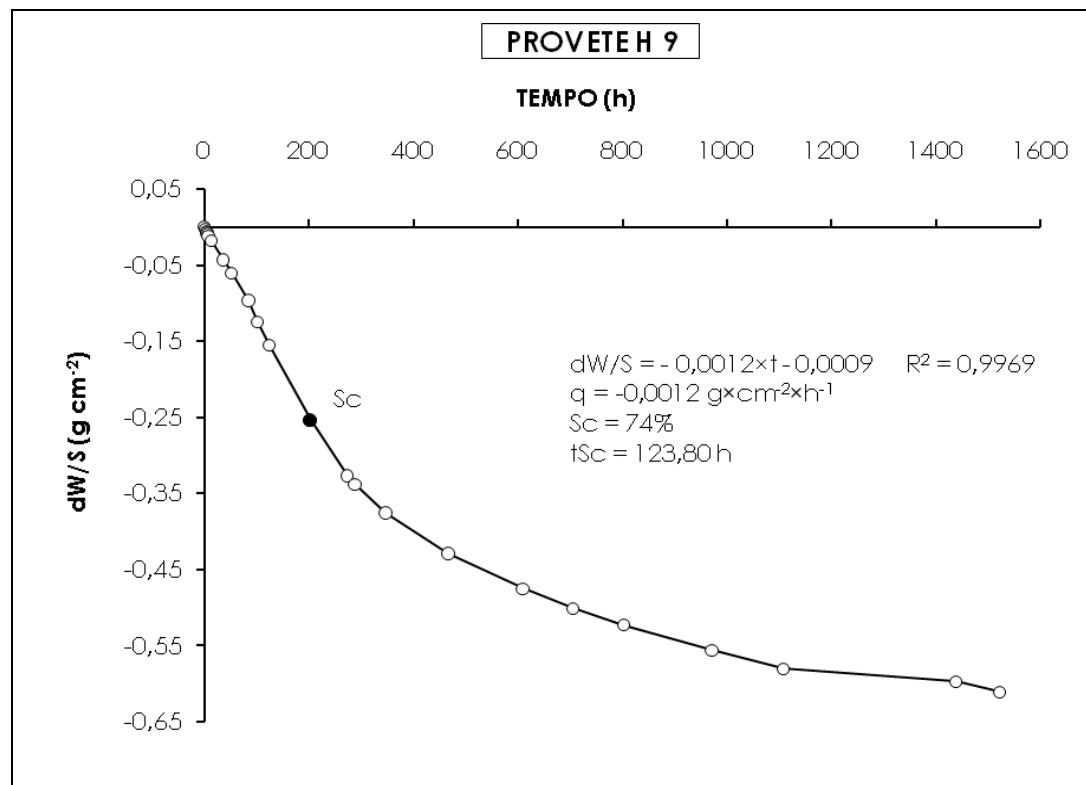


Figura A5.35 - Diagrama do ensaio de evaporação de água do provete H9

A6 OBSERVAÇÃO DE AMOSTRAS DE DETERIORAÇÕES POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE VARRIMENTO - CEMUP

DIA 21 DE DEZEMBRO DE 2007

Amostra CIM_CIN1

Revestimento a ouro.

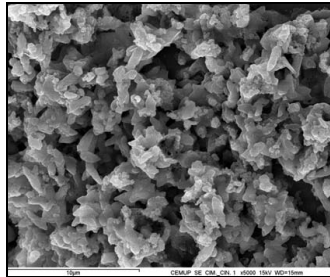


Foto 1- calcite

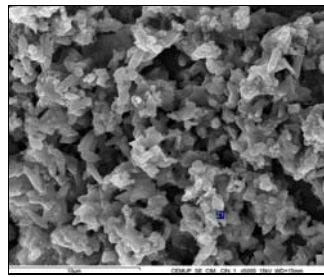
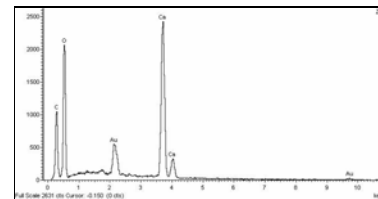


Foto 2 – área onde se obteve o espectro Z1



Espectro Z1

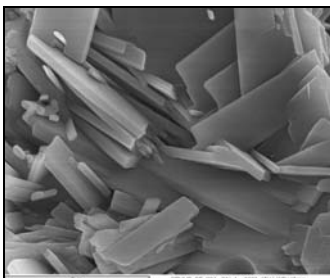


Foto 3 – singenite – cristais euédricos e subédricos

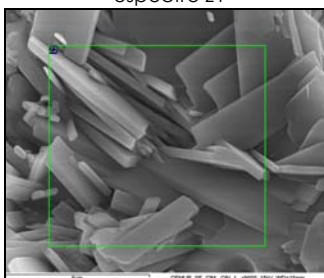
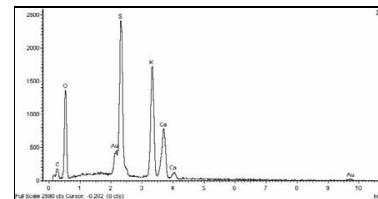


Foto 4 – área onde se obteve o espectro Z2



Espectro Z2

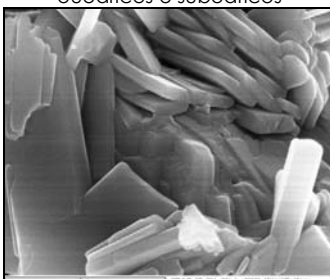


Foto 5 – singenite - cristais euédricos e subédricos

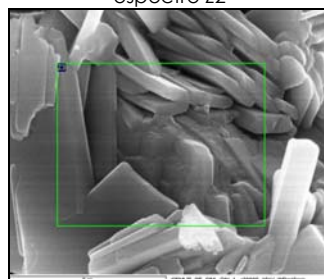
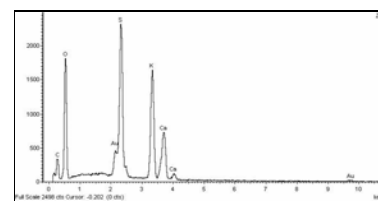


Foto 6 – área onde se obteve o espectro Z3



Espectro Z3

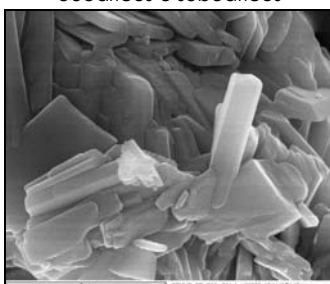


Foto 7 – singenite - cristais euédricos e subédricos

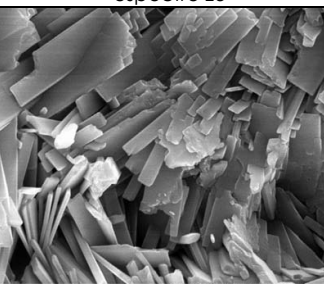


Foto 8 - singenite - cristais euédricos e subédricos

Figura A6.1 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN1 analisados por MEV

DIA 21 DE DEZEMBRO DE 2007

Amostra CIM_CIN1

Revestimento a ouro.

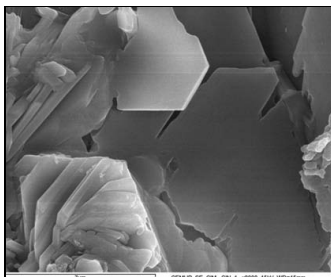


Foto 9 – gesso e cristais tabulares pseudo-hexagonais de singenite

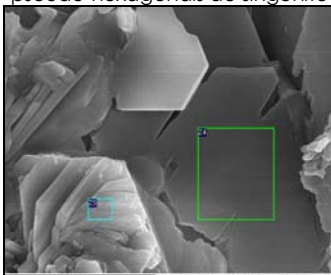


Foto 10 – áreas onde se obtiveram os espectros Z4 e Z5



Foto 11 – cristais de gesso com figuras de dissolução

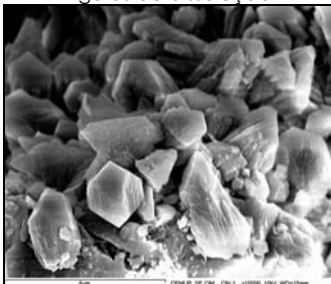
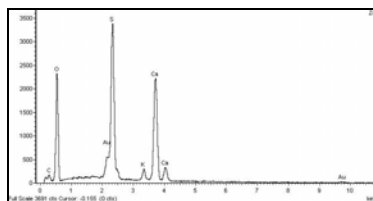
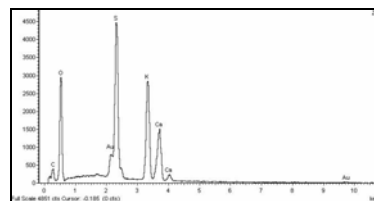


Foto 13 – carbonato de cálcio - calcite



Espectro Z4



Espectro Z5

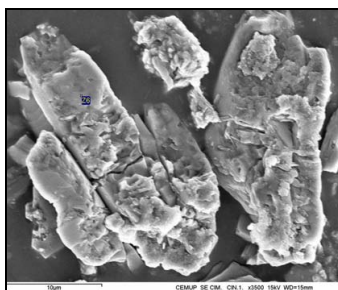
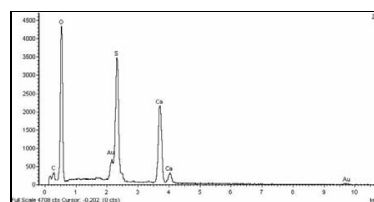


Foto 12 – áreas onde se obteve o espectro Z6



Espectro Z6

Figura A6.2 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN1 analisados por MEV

DIA 21 DE DEZEMBRO DE 2007

Amostra CIM_CIN1

Revestimento a ouro.

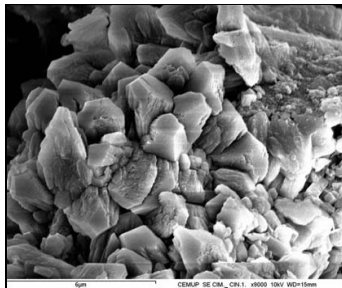


Foto 14 – calcite

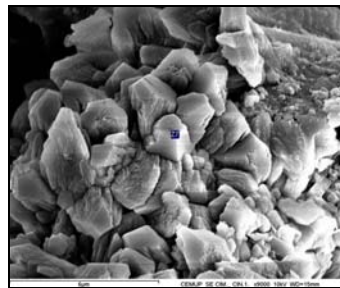
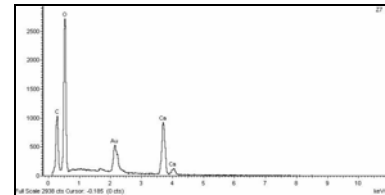


Foto 15 – espectro Z7



Espectro Z7

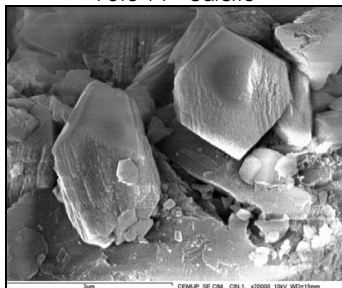


Foto 16 – calcite – ampliação da foto 13

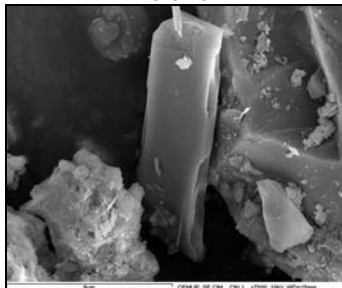
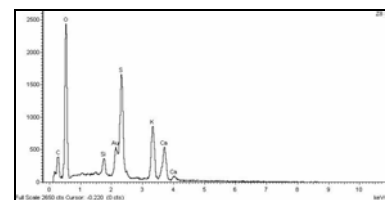


Foto 17 – singenite – cristal prismático



Foto 18 – espectro Z8



Espectro Z8

Figura A6.3 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN1 analisados por MEV

DIA 08 DE JANEIRO DE 2008

Amostra CIM_CIN2

Revestimento a ouro.

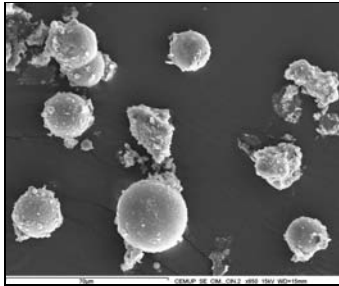


Foto 1 – cinzas volantes

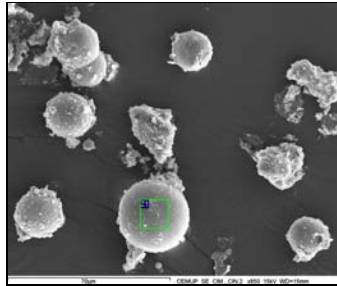
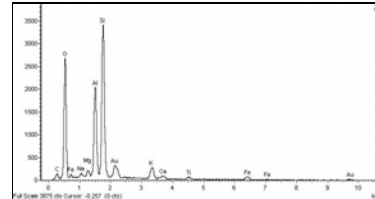


Foto 2 – espectro Z1 – cinza volante sobre uma superfície rica em alumínio e silício



Espectro Z1

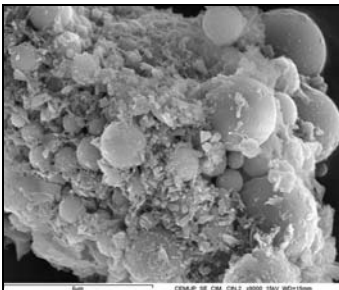


Foto 3 – conjunto de cinzas volantes

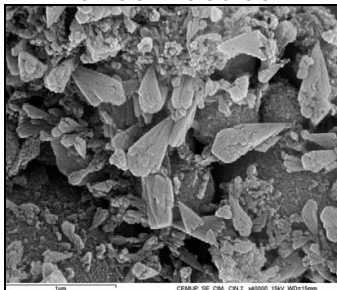


Foto 4 – ampliação da foto 3 – cristais de calcite

Figura A6.4 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN2 analisados por MEV

DIA 21 DE DEZEMBRO DE 2007

Amostra CIM_CIN3

Revestimento a ouro.

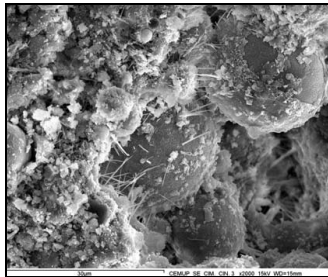


Foto 1 – cristais aciculares de etringite sobre cinzas volantes

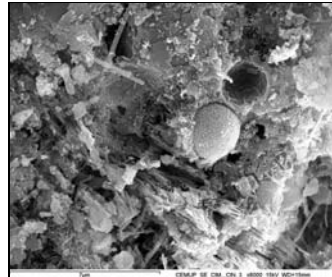


Foto 2 – cinza volante revestida por material folheado

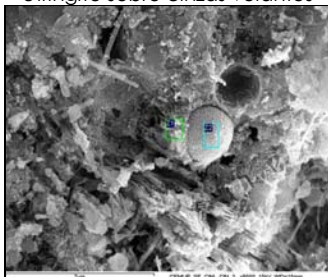
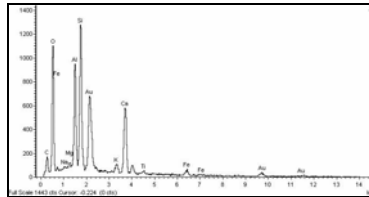
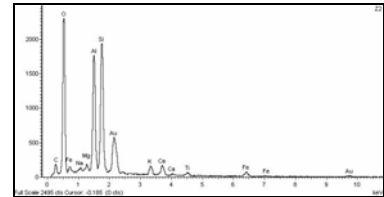


Foto3 – espectros Z1 e Z2



Espectro Z1



Espectro Z2



Foto 4 – material folheado – ampliação da foto 2

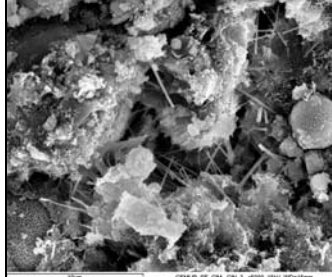


Foto 5 – cristais de etringite visíveis no poro

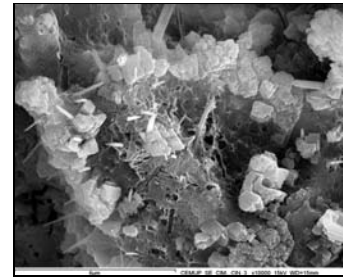


Foto 6 – carbonato de cálcio

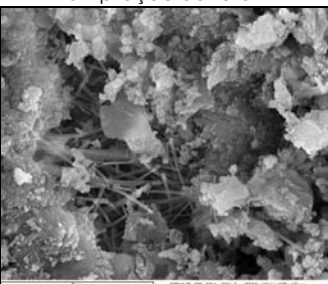


Foto 7 – cristais de etringite que vão preenchendo os poros

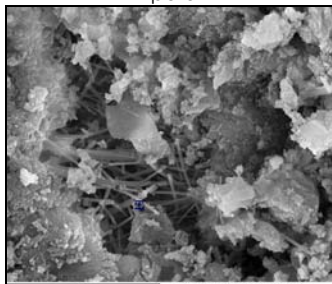
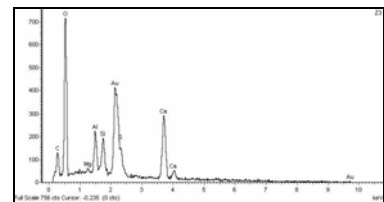


Foto 8 – espectro Z3



Espectro Z3

Figura A6.5 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN3 analisados por MEV

DIA 21 DE DEZEMBRO DE 2007

Amostra CIM_CIN3

Revestimento a ouro.

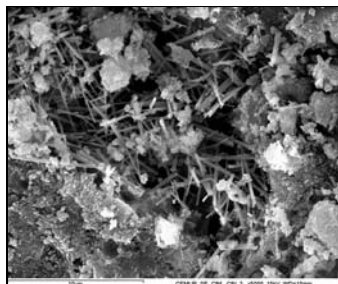


Foto 9 –zona com cristais em forma de agulha

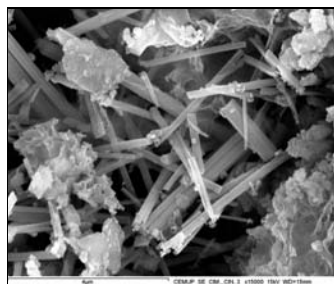


Foto 10 – ampliação da foto 9

Figura A6.6 – Imagens e espectros da amostra CIM_CIN3 analisados por MEV

DIA 21 DE DEZEMBRO DE 2007

Amostra CIM_4

Revestimento a ouro.

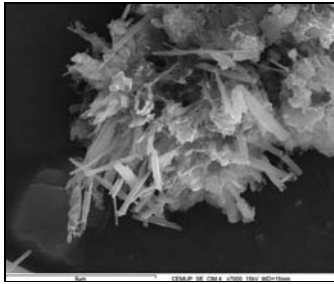


Foto 1- etringite

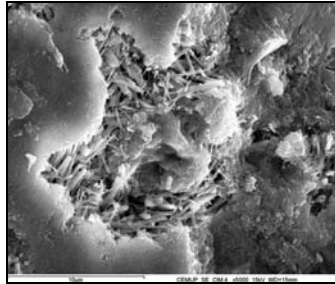


Foto 2 – poro “acentuado”
preenchido com etringite

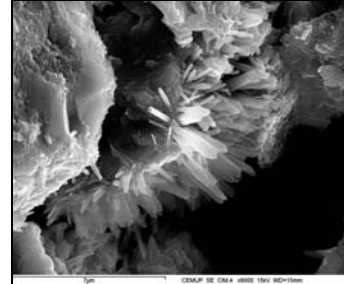


Foto 3 – cristais de Trona - etringite

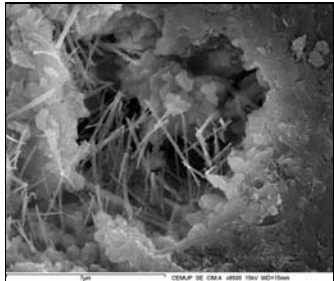


Foto 4 – poro com cristais muito
longos - etringite

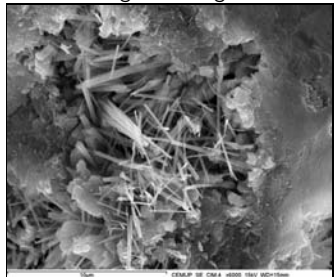


Foto 5 – grande concentração de
cristais de etringite

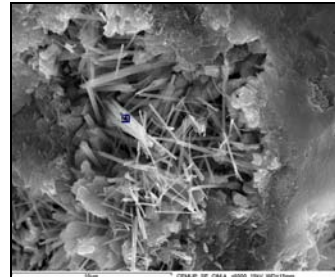
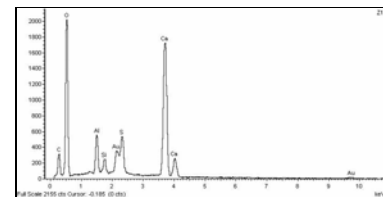


Foto 6 – espectro Z1



Espectro Z1

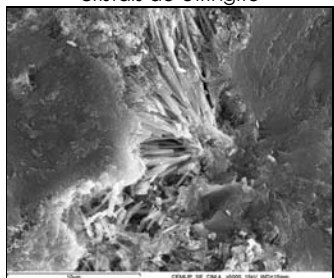


Foto 7 - etringite

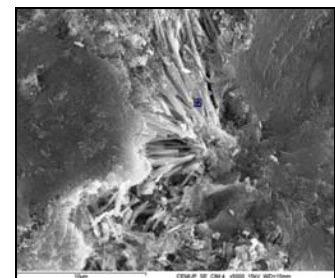
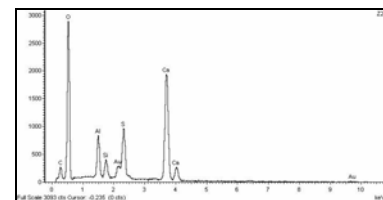


Foto 8 – espectro Z2



Espectro Z2

Figura A6.7 – Imagens e espectros da amostra CIM_4 analisados por MEV

DIA 21 DE DEZEMBRO DE 2007

Amostra CIM_5

Revestimento a ouro.

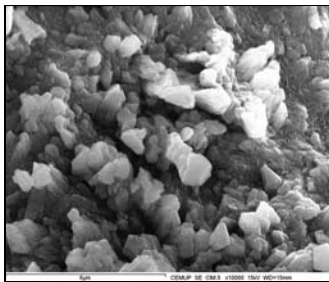


Foto 1 - calcite

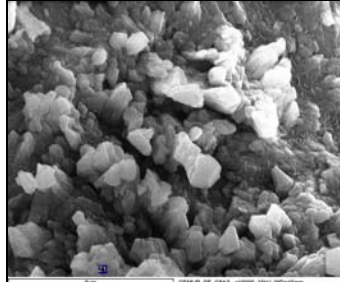
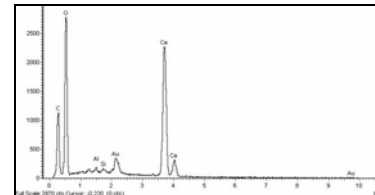


Foto 2 - calcite Z1



Espectro Z1

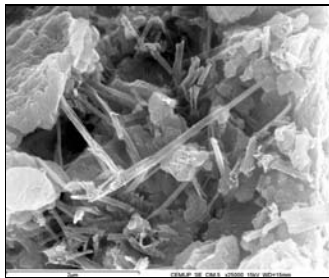


Foto 3 - zona particular com etringite

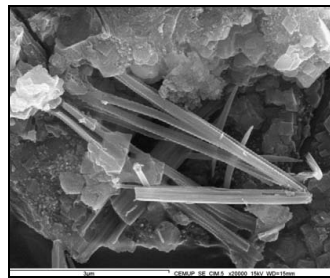


Foto 4 - etringite

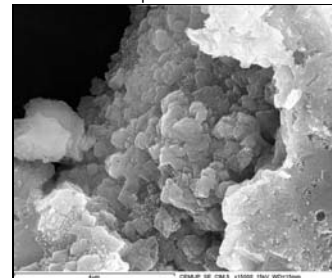


Foto 5 - cristais de calcite sobre silicato bicálcico e silicato tricálcico

Figura A6.8 – Imagens e espectros da amostra CIM_5 analisados por MEV

DIA 4 DE FEVEREIRO DE 2008

Amostra CAL_1

Revestimento a ouro

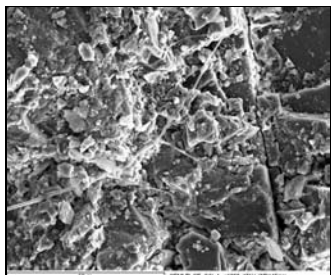


Foto 1 – contaminação orgânica

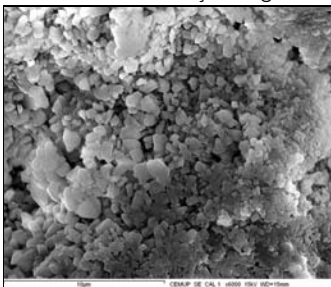


Foto 2 – carbonato de cálcio

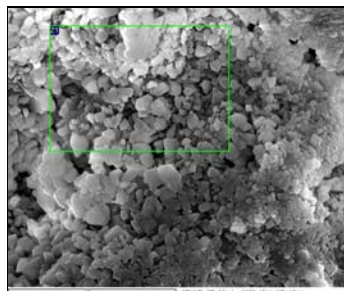
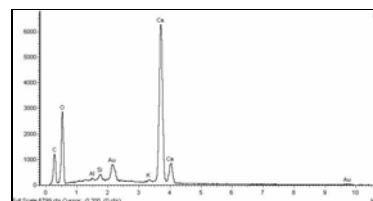


Foto 3 – espectro Z1



Espectro Z1

Figura A6.9 – Imagens e espectros da amostra CAL_1 analisados por MEV

DIA 4 DE FEVEREIRO DE 2008

Amostra HSA 126_128

Revestimento a ouro

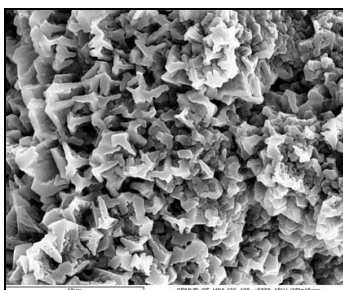


Foto 1 – carbonato de cálcio

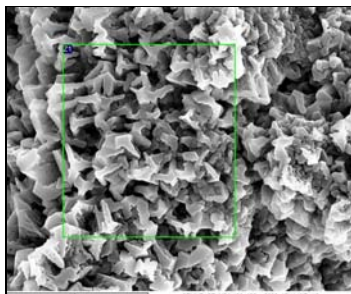
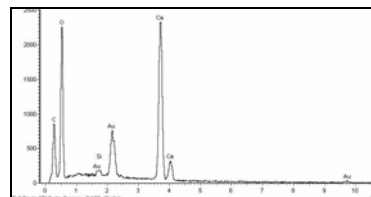


Foto 2 – espectro Z1



Espectro Z1

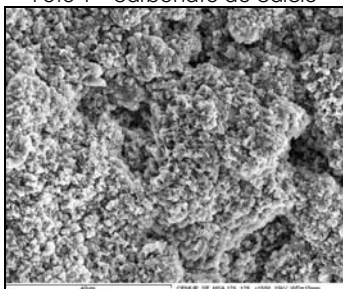


Foto 3 – zona generalizada

Figura A6.10 – Imagens e espectros da amostra HSA 126_128 analisados por MEV

DIA 4 DE FEVEREIRO DE 2008

Amostra CAL_CIN_1

Revestimento a ouro

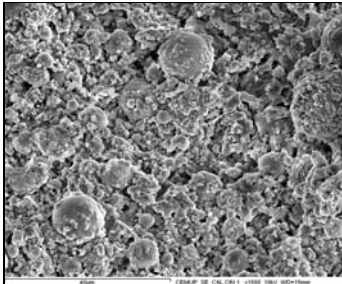


Foto 1 – imagem generalizada da argamassa de cal e cinzas volantes

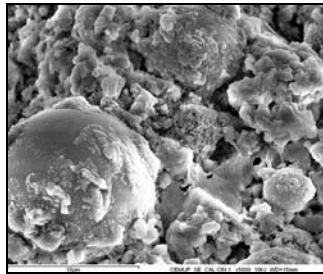


Foto 2 – ampliação da foto 1

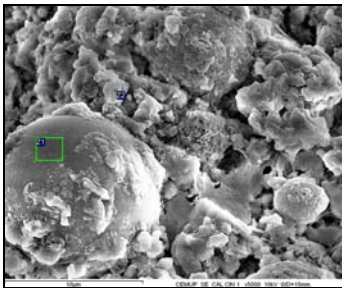
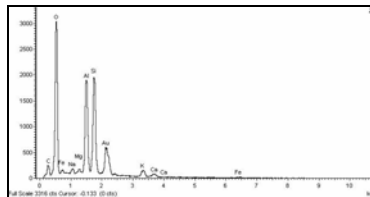
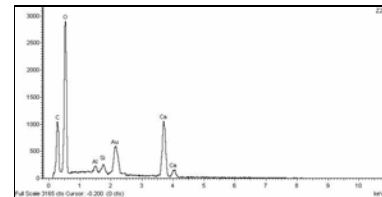


Foto 3 – espectro Z1 e Z2



Espectro Z1



Espectro Z2

Figura A6.11 – Imagens e espectros da amostra CAL_CIN_1 analisados por MEV