

AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE PROPRIEDADES HÍGRICAS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Transferência de água na fase líquida

EDUARDA MARIA PEREIRA DA SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JULHO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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 Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.*

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.

Aos meus Pais
Às minhas irmãs

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar este trabalho gostaria de deixar o meu agradecimento a todos os que, ao longo destes meses e de diferentes maneiras, contribuíram para a sua realização.

Ao Professor Dr. Nuno Manuel Monteiro Ramos presto o meu agradecimento especial, destacando a sua disponibilidade, o seu saber, o apoio e a confiança dada, ajuda preciosa e indispensável para a realização deste trabalho.

Ao Engº Pedro Pereira agradeço a disponibilidade, a atenção e a ajuda disponibilizada na realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Física das Construções desta instituição, agradeço a disponibilização do espaço, dos materiais e equipamentos imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Às minhas amigas e colegas de curso, Diana e Marlene, agradeço a amizade, a força, a dedicação e a confiança que sempre demonstraram ao longo de todos estes anos.

Por último, quero agradecer a toda a minha família, em particular aos meus pais e irmãs, namorado e amigos por todo o apoio e pela força dada em todos os momentos.

RESUMO

O conhecimento das propriedades higrotérmicas dos materiais de construção torna-se imprescindível para que se faça uma escolha adequada dos materiais em função das condições de temperatura e humidade a que os sistemas construtivos estarão sujeitos. Os fenómenos físicos associados à transferência de calor e de humidade também devem ser apreendidos para que no conjunto se possa prever o comportamento higrotérmico dos sistemas construtivos.

No presente trabalho, pretendeu-se determinar laboratorialmente três propriedades hígricas de materiais de construção, sendo estas, o coeficiente de absorção de água, o teor de humidade de saturação capilar e o coeficiente de difusividade hídrica. Estas propriedades estão associadas à transferência de humidade, particularmente devido ao fenómeno da capilaridade, pelo que, uma revisão ao estado da arte permitiu sintetizar conceitos associados ao fenómeno e às propriedades. Procedeu-se também a uma pesquisa e análise de normas técnicas e de trabalhos envolvendo estas propriedades e a sua determinação.

O trabalho experimental desenvolvido foi realizado de acordo com ensaios normalizados, tendo sido determinado laboratorialmente o coeficiente de absorção de água e o teor de humidade de saturação capilar de quatro materiais de construção (gesso projectado, placas de poliestireno extrudido (XPS), reboco com poliestireno expandido (EPS) e reboco com cortiça). O coeficiente de difusividade hídrica foi determinado através do cálculo de uma expressão que relaciona o coeficiente de absorção de água e o teor de humidade de saturação capilar.

Foi elaborada uma análise comparativa dos resultados obtidos com materiais de características e/ou funções idênticas, tendo por base catálogos de materiais de construção, a base de dados do programa de cálculo automático “WUFI” e literatura existente.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedades hígricas, Coeficiente de Absorção de Água, Teor de Humidade de Saturação Capilar, Coeficiente de Difusividade Hídrica, Determinação experimental.

ABSTRACT

The knowledge of the hygrothermal properties of building materials becomes essential in order to do a proper choice of materials according to the temperature and humidity conditions that influence every building system. The physical phenomena associated to the transfer of heat and humidity should also be noticed to foresee the hygrothermal behavior of building systems.

This study had the intention to determine in laboratory three hygric properties of construction materials. These three properties are the water absorption coefficient, the moisture content at capillary saturation and the moisture diffusivity. These properties are related to the transfer of moisture, in particular due to the phenomenon of capillarity, by which a state of the art reviews, synthesize concepts related to the phenomenon and the properties. It also contains a research and analysis of technical standards and studies involving these properties and their determination.

The experimental work developed was performed according to standardized tests. The water absorption coefficient and the moisture content at capillary saturation at four construction materials (gypsum projected, extruded polystyrene (XPS), plaster with expanded polystyrene (EPS) and plaster whit cork) was determined in the laboratory. The moisture diffusivity was determined through the calculation of an expression that relates the water absorption coefficient and the moisture content at capillary saturation.

The analysis of results was performed comparing the studied materials with materials with identical characteristics and/or purposes. This analysis was supported by brochures and catalogues of building materials, the database automatic calculation program "WUFI" as well as the available literature on the matter.

KEYWORDS: Hygric properties, Water Absorption Coefficient, Moisture Content at Capillary Saturation, Moisture Diffusivity, Laboratory Tests.

.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	2

2 MEDIÇÃO LABORATORIAL DE PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE NA FASE LÍQUIDA	4
2.2.1. MATERIAIS POROSOS E A TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE	4
2.2.2. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	7
2.3. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	10
2.3.1. DESCRIÇÃO DA PROPRIEDADE	10
2.3.2. ENSAIOS NORMALIZADOS APLICÁVEIS	12
2.4. COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE HÍGRICA	16
2.4.1. DEFINIÇÃO DA PROPRIEDADE	16
2.4.2. ENSAIOS APLICÁVEIS	16
2.4.3. MODELAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE ÁGUA LÍQUIDA EM PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO	19
2.5. ALGUNS ESTUDOS NESTE ÂMBITO	20
2.5.1. KUMARAN	20
2.5.2. PROJECTO HAMSTAD	21
2.5.3. NCR	25
2.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO	28

3 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	31
3.1. MATERIAIS TESTADOS	31

3.2. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	36
3.2.1. OBJECTO	36
3.2.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	36
3.2.3. EQUIPAMENTO UTILIZADO	39
3.3. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE DE SATURAÇÃO CAPILAR	42
3.3.1. OBJECTO	42
3.3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	42
3.3.3. EQUIPAMENTO UTILIZADO	43

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS 45

4.1. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	45
4.1.1. INTRODUÇÃO	45
4.1.2. RESULTADOS DO GESSO PROJECTADO	45
4.1.3. RESULTADOS DO XPS	47
4.1.4. RESULTADOS DO REBOCO COM EPS	49
4.1.5. RESULTADOS DO REBOCO COM CORTIÇA	52
4.1.6. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS	57
4.2. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE DE SATURAÇÃO CAPILAR, w_{CAP}	58
4.2.1. INTRODUÇÃO	58
4.2.2. RESULTADOS	58
4.3. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE HÍGRICA	60
4.3.1. INTRODUÇÃO	60
4.3.2. RESULTADOS	60
4.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM MATERIAIS SEMELHANTES	64
4.4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	64
4.4.2. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	64
4.4.3. TEOR DE HUMIDADE DE SATURAÇÃO CAPILAR	66
4.4.4. COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE HÍGRICA	67

5 CONCLUSÃO 69

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.2. CONCLUSÕES PRINCIPAIS	69
5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação de um material com porosidade aberta (a) e porosidade fechada (b) (adaptado de Freitas <i>et al.</i> , 2008)	5
Figura 2.2 – Comportamento higroscópico de materiais de construção em função da humidade relativa (Ramos, 2007)	6
Figura 2.3 – Higroscopicidade (adaptado de Freitas <i>et al.</i> , 2008)	6
Figura 2.4 – Esquema do princípio da descrição convencional do teor de humidade de um material (Ramos, 2007).....	7
Figura 2.5 – Fenómeno de capilaridade (adaptado de Freitas <i>et al.</i> , 2008).....	8
Figura 2.6 – Líquidos molhantes e não molhantes em capilares.....	8
Figura 2.7 – Modelo teórico cilíndrico de sucção e pressão capilar	9
Figura 2.8 – Movimento de água no interior de um material com uma superfície em contacto com água no estado líquido (adaptado de Mukhopadhyaya <i>et al.</i> , 2002)	10
Figura 2.9 – Curva de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo e esquema da absorção capilar (Arriaran, 2006).....	11
Figura 2.10 – Ar aprisionado no interior do poro (Arriaran, 2006)	11
Figura 2.11 – Desenho esquemático de um tanque ou recipiente para a execução do ensaio (adaptado de CEN, 2002)	13
Figura 2.12 – Gráfico do tipo A sem água à superfície do provete (CEN, 2002)	14
Figura 2.13 – Gráfico do tipo A com água à superfície do provete (CEN, 2002)	14
Figura 2.14 – Gráfico do tipo B (CEN, 2002)	15
Figura 2.15 – Princípio de cálculo de Boltzman (Janz, 1997).....	16
Figura 2.16 – Princípio de cálculo pelo método dos perfis (Janz, 1997)	17
Figura 2.17 – Resultado do ensaio de absorção de água (adaptado de Kumaran, 1999)	20
Figura 2.18 – Comparação dos valores obtidos do coeficiente de difusividade hídrica usando quatro procedimentos diferentes (adaptado de Kumaran, 1999).....	21
Figura 2.19 – Exemplo de curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo da placa de silicato de cálcio, tijolo cerâmico e betão celular (adaptado de Roels, <i>et al.</i> , 2004).....	23
Figura 2.20 – Funções de distribuição cumulativa do coeficiente de absorção de água e do teor de humidade de saturação capilar medidas nos diferentes laboratórios: a) tijolo cerâmico; b) placa de silicato de cálcio (adaptado de Roels, <i>et al.</i> , 2004).....	24
Figura 2.21 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo à temperatura de 35°C: (a) madeira de pinho e (b) tijolo de barro vermelho (adaptado de Mukhopadhyaya <i>et al.</i> , 2002)	26
Figura 2.22 – Coeficientes de absorção de água à temperatura de 3,12,21 e 35 °C: (a) madeira de pinho e (b) tijolo de barro vermelho (adaptado de Mukhopadhyaya <i>et al.</i> , 2002)	27

Figura 2.23 – Efeitos da temperatura nos coeficientes de difusividade hídrica (adaptado de Mukhopadhyaya <i>et al.</i> , 2002)	27
Figura 3.1 – Provetes de XPS e de reboco com EPS.....	31
Figura 3.2 – Provetes de gesso projectado (a) e de reboco com cortiça (b)	31
Figura 3.3 – Provetes no interior da câmara climática	36
Figura 3.4 – Medição de um provete com auxílio do paquímetro	37
Figura 3.5 – Provete com face impermeabilizada	37
Figura 3.6 – Provetes de XPS e de reboco com EPS durante o ensaio.....	38
Figura 3.7 – Superfície dos provetes A ₁ 6 de R EPS (lado esquerdo) e A ₁ 1 de R C no fim do ensaio (lado direito)	39
Figura 3.8 – Superfície dos provetes 2 e 5, 4h após o início do ensaio	39
Figura 3.9 – Câmara de ensaios climática FitoClima 3600 EDTU	40
Figura 3.10 – Balança <i>Precisa 800M</i> e cronómetro	40
Figura 3.11 – Utensílios utilizados para derreter a parafina.....	41
Figura 3.12 – Tina de ensaio	41
Figura 3.13 – Paquímetro digital	41
Figura 3.14 – Instrumentos de corte e medida.....	42
Figura 3.15 – Provetes de gesso projectado mergulhados em água.....	42
Figura 3.16 – Provetes no interior da estufa	43
Figura 3.17 – Estufa	44
Figura 4.1 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de GP	46
Figura 4.2 – Curva de absorção de água e respectiva regressão linear no provete 1 de GP	47
Figura 4.3 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de XPS	48
Figura 4.4 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de R EPS A ₁	50
Figura 4.5 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de R EPS A ₂	50
Figura 4.6 – Curva de absorção de água e respectiva regressão linear no provete 1 de R EPS A ₁	51
Figura 4.7 – Curva de absorção de água e respectiva regressão linear no provete 1 de R EPS A ₂	51
Figura 4.8 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de R C A ₁	54
Figura 4.9 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de R C A ₂	54

Figura 4.10 – Curva de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo no provete 1 de R C A ₁	55
Figura 4.11 – Curva de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo no provete 1 de R C A ₂	55
Figura 4.12 – Comparação dos valores de A _w de cada provete (A ₁ e A ₂) e respectiva média.....	57
Figura 4.13 – Comparação dos valores de D _w de cada provete de reboco com cortiça (A ₁ e A ₂) e respectivas médias.....	63
Figura 4.14 – Comparação do coeficiente de absorção de água do gesso projectado com outros materiais	65
Figura 4.15 – Comparação do coeficiente de absorção de água dos rebocos com EPS e cortiça com outros materiais	66
Figura 4.16 – Comparação do teor de humidade de saturação capilar do gesso projectado com outros materiais	66
Figura 4.17 – Comparação do coeficiente de transferência de água líquida por sucção do gesso projectado com outros materiais	67

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Propriedades higrotérmicas de materiais de construção (adaptado de Lanzinha <i>et al.</i> , 1998)	4
Quadro 2.2 – Média e desvio padrão de W_{cap} (kg/m^3) e A_w ($kg/m^2s^{1/2}$) (adaptado de Roels, <i>et al.</i> , 2004)	22
Quadro 3.1 – Dimensões nominais dos provetes	32
Quadro 3.2 – Dimensões efectivas dos provetes	33
Quadro 3.3 – Dimensões nominais dos provetes	34
Quadro 3.4 – Dimensões efectivas dos provetes	35
Quadro 4.1 – Resultados de Δm nos provetes de GP	46
Quadro 4.2 – Resultados do coeficiente de absorção de água no gesso projectado	47
Quadro 4.3 – Resultados de Δm nos provetes de XPS	48
Quadro 4.4 – Resultados de Δm nos provetes de R EPS A ₁	49
Quadro 4.5 – Resultados de Δm nos provetes de R EPS A ₂	49
Quadro 4.6 – Resultados do coeficiente de absorção de água no reboco com EPS	52
Quadro 4.7 – Resultados de Δm nos provetes de R C A ₁	53
Quadro 4.8 – Resultados de Δm nos provetes de R C A ₂	53
Quadro 4.9 – Resultados do coeficiente de absorção de água no reboco com cortiça	56
Quadro 4.10 – Resumo dos resultados obtidos	58
Quadro 4.11 – Resultados parciais dos ensaios	59
Quadro 4.12 – Resultados finais de w_{cap}	59
Quadro 4.13 – Resultados de D_w no gesso projectado	60
Quadro 4.14 – Resultados de D_w no reboco com EPS	61
Quadro 4.15 – Resultados de D_w no reboco com cortiça	62
Quadro 4.16 – Resumo dos valores obtidos de D_w nos diferentes materiais	63
Quadro 4.17 – Resultados de D_{ws}	64

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A - área da superfície do provete em contacto com a água [m^2]
A_w - coeficiente de absorção de água [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$]
B - coeficiente de ascensão capilar [$\text{m}^2/\text{s}^{1/2}$]
C - coeficiente de capilaridade [$\text{g}/\text{dm}^2\text{min}^{1/2}$]
c_p - calor específico [J / (kg.K)]
D_w - coeficiente de difusividade hídrica [m^2/s]
D_{ws} - coeficiente de transferência de água líquida por sucção [m^2/s]
D_{ww} - coeficiente de transferência de água líquida por redistribuição [m^2/s]
E - emissividade [-]
h (t) - altura de ascensão capilar [m]
M - massa do provete [kg]
m₀ - massa do provete seco [kg]
m_{cap} - massa do provete saturado [kg]
m_i - massa inicial do provete [kg]
m_t - massa do provete no tempo t [kg]
p_c - pressão capilar [Pa]
r - raio do capilar [m]
S - área da superfície do provete em contacto com a água [cm^2]
t - tempo [s]
u - teor de humidade mássico [kg/kg]
U - variável de Boltzman [-]
V_a - Volume de água absorvida [kg/m^3]
w - teor de humidade volúmico [kg/m^3]
w_{cap} - teor de humidade de saturação capilar [kg/m^3]
w_{cr} - teor de humidade crítico [kg/m^3]
w_{sat} - teor de humidade de saturação [kg/m^3]
W_w - coeficiente de absorção de água [$\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{1/2}$]
x - espaço medido normal à secção [m]
x(t) - progressão da água [m]
δ₀ - permeabilidade ao vapor no ar [$\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$]
δ_p - permeabilidade ao vapor de água [$\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$]

Δm - massa de água absorvida por área do provete em contacto com a água [kg/m^2]

$\Delta m'_0$ - massa de água absorvida no instante $t=0$ [kg/m^2]

$\Delta m'_t$ - massa de água absorvida para $t=f$ [kg/m^2]

α - coeficiente de dilatação térmica linear [K^{-1}]

α_a - factor de absorção [%]

ε_a - porosidade aberta [m^3/m^3 ou %]

η - viscosidade da água [kg/m.s]

θ - ângulo de contacto da água com o material [$^\circ$]

λ - condutibilidade térmica [$\text{W}/(\text{m.K})$]

μ - factor de resistência à difusão do vapor de água [-]

ρ - massa volúmica aparente [kg/m^3]

ρ_0 - densidade seca do material [kg/m^3]

σ - tensão superficial entre a água e o ar [N.m^{-1}]

CEN - Comité Europeu de Normalização

EPS - Poliestireno Expandido

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LFC - Laboratório de Física das Construções

NCR - National Research Council

NMR - Ressonância Magnética Nuclear

XPS - Poliestireno Extrudido

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Os materiais de construção são parte integrante dos sistemas/elementos construtivos, pelo que o conhecimento das suas propriedades higrotérmicas é essencial para avaliar o desempenho e o comportamento dos elementos face às solicitações de temperatura e humidade a que estes estarão sujeitos. A avaliação do desempenho e do comportamento dos elementos construtivos não se fica apenas pelo conhecimento das propriedades dos materiais seus constituintes, mas também pelo conhecimento dos fenómenos físicos associados à transferência de calor e de humidade.

Existe uma variedade de propriedades, assim como de materiais de construções pelo que, ao longo dos últimos anos tem existido uma preocupação em sintetizar e organizar catálogos com as propriedades higrotérmicas mais relevantes que permitem caracterizar o comportamento higrotérmico dos materiais de construção. Não obstante, a generalidade de materiais e suas propriedades não está totalmente catalogada e inventariada, havendo um extenso rol de materiais cujas propriedades higrotérmicas não são ainda conhecidas. É neste sentido que a presente dissertação, bem como outras da mesma área e com o mesmo objecto, se afiguram como essenciais e de enorme importância para um desenvolvimento crescente e um conhecimento gradual de materiais, com diferentes propriedades e características que possam ter aplicabilidade prática, e não só meramente comparativa.

Assim, a presente dissertação centraliza o seu objecto no estudo das propriedades hígricas que permitam avaliar o comportamento dos materiais face à transferência de humidade na fase líquida.

1.2. OBJECTIVOS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como principal objectivo a determinação laboratorial de propriedades hígricas de materiais de construção. As propriedades em causa – coeficiente de absorção de água, teor de humidade de saturação capilar e coeficiente de difusividade hídrica – são determinadas laboratorialmente, seguindo normas técnicas aplicáveis, sendo que uma delas é obtida em função das outras duas.

Com o propósito de se atingir integralmente este objectivo, houve necessidade de se concretizar e delinear objectivos parciais, como sejam:

- Elaboração do estado da arte sobre transferência de humidade na fase líquida nos materiais de construção, incluindo propriedades higrotérmicas relevantes para esse processo;

- Pesquisa de informações no que respeita a normas e ensaios aplicáveis para determinar as propriedades em estudo e aplicação prática destas;
- Recolha de informação acerca de estudos realizados sobre as propriedades hígricas em causa, nomeadamente, estudos que implicam a determinação laboratorial das propriedades;
- Avaliação laboratorial da absorção de água por capilaridade e saturação capilar de materiais de construção;
- Determinação da difusividade hídrica dos materiais testados a partir das propriedades determinadas laboratorialmente;
- Comparação dos valores obtidos com valores da literatura.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta dissertação apresenta-se estruturada em cinco capítulos:

- No presente capítulo é feito o enquadramento do tema desenvolvido, são apresentados os objectivos e a estrutura da dissertação;
- No Capítulo 2, de carácter essencialmente teórico, faz-se uma pequena abordagem à importância do conhecimento das propriedades higrotérmicas dos materiais de construção e ao fenómeno físico da transferência de humidade na fase líquida, essencialmente devida à capilaridade. São ainda definidos com mais pormenor, os coeficientes de absorção de água e de difusividade hídrica, bem como normas e ensaios aplicáveis para a sua determinação. No final deste capítulo, são apresentados três estudos realizados neste âmbito;
- No Capítulo 3, de carácter experimental, descrevem-se os procedimentos dos ensaios realizados, sendo referenciada as normas adoptadas para cada ensaio. É feita uma breve caracterização de todos os equipamentos e meios utilizados para efectuar a campanha experimental, assim como dos materiais testados;
- No Capítulo 4, apresenta-se os resultados e respectiva discussão dos ensaios realizados de cada material. Neste capítulo, são ainda apresentados os resultados da propriedade obtida em função das propriedades determinadas laboratorialmente. No final do capítulo é apresentada uma comparação e discussão dos resultados obtidos com materiais com características e/ou funções semelhantes;
- No Capítulo 5, sintetizam-se os resultados dos estudos realizados, apresentam-se as conclusões finais da dissertação e as perspectivas para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2

MEDIÇÃO LABORATORIAL DE PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS

2.1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades higrotérmicas dos materiais de construção é de elevada importância para que se proceda a uma escolha adequada dos materiais em função das condições ambientais (temperatura e humidade) a que os sistemas construtivos estarão sujeitos.

Na construção, as solicitações de temperatura e humidade não podem ser desprezados, pois estas são responsáveis por acções importantes que interferem no desempenho dos materiais de construção. São vários os efeitos das solicitações higrotérmicas a que estão sujeitos os materiais, assim como as consequências destas solicitações. Alguns exemplos destas consequências são (Lanzinha *et al.*, 1998):

- variação da sua resistência mecânica
- variação do desempenho térmico
- alteração do aspecto estético
- efeitos físico-químicos
- riscos no domínio da segurança
- efeitos biológicos
- prejuízos económicos.

A redução destas consequências só é possível pelo conhecimento e compreensão dos fenómenos físicos e um estudo cuidadoso do comportamento dos materiais. Daí a importância do conhecimento das propriedades higrotérmicas dos materiais e componentes da construção.

Existe um vasto conjunto de propriedades que permitem caracterizar o comportamento higrotérmico dos materiais de construção. Algumas propriedades utilizadas para caracterizar esse comportamento são listadas no Quadro 2.1, e podem ser divididas em propriedades gerais, térmicas e hígricas (Lanzinha *et al.*, 1998).

Quadro 2.1 – Propriedades higrotérmicas de materiais de construção (adaptado de Lanzinha *et al.*, 1998)

	Propriedade	Símbolo	Unidades
Propriedades Gerais	Massa Volúmica (aparente)	ρ	kg/m^3
	Porosidade Aberta	ε_a	m^3/m^3 ou %
Propriedades Térmicas	Calor Específico	c_p	$\text{J} / (\text{kg.K})$
	Condutibilidade Térmica	λ	$\text{W}/(\text{m.K})$
	Coeficiente de Dilatação Térmica Linear	α	K^{-1}
	Emissividade	E	
	Factor de Absorção	α_a	%
Propriedades Hígricas	Permeabilidade ao Vapor de Água	δ_p	$\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$
	Coeficiente de Absorção de Água	A_w	$\text{kg}/(\text{m}^2.\sqrt{\text{s}})$
	Teor de Humidade de Saturação	w_{sat}	kg/m^3

A determinação destas propriedades, na sua maioria, pode ser feita por via experimental recorrendo a ensaios normalizados. Por outro lado, existem algumas propriedades que podem ser derivadas de outras, como é o caso do factor de resistência à difusão do vapor de água (μ), que corresponde ao quociente da permeabilidade ao vapor no ar (δ_0) pela permeabilidade ao vapor de água (δ_p).

O coeficiente de difusividade hídrica (D_w) é uma propriedade, que apesar de se poder quantificar recorrendo a diferentes técnicas experimentais, também pode ser determinado por aproximações usando o coeficiente de absorção de água e o teor de humidade de saturação capilar.

2.2. TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE NA FASE LÍQUIDA

2.2.1. MATERIAIS POROSOS E A TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE

A maior parte dos materiais e componentes de construção possuem espaços vazios no interior da sua massa que se dominam por poros (Figura 2.1a). A porosidade de um material pode ser assim definida como sendo a razão entre o volume total de vazios (poros e canais) e o seu volume total aparente do material. Consoante os vazios, comuniquem entre si ou não, a porosidade pode ser aberta ou fechada (Figura 2.1).

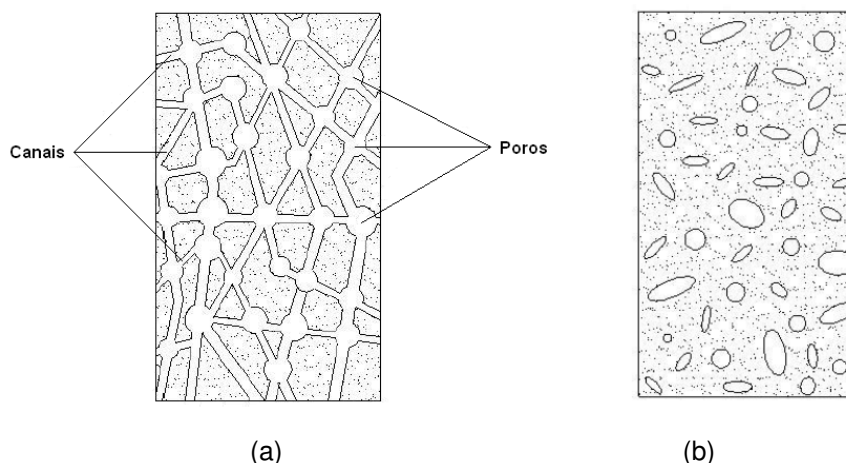


Figura 2.1 – Representação de um material com porosidade aberta (a) e porosidade fechada (b) (adaptado de Freitas *et al.*, 2008)

A maioria dos materiais de construção, como as argamassa, a pedra ou o tijolo, apresenta uma porosidade aberta, sendo a facilidade de embebição dos materiais pela água directamente relacionada com a sua porosidade. Os vazios comunicam entre si, formando uma rede interna por onde a água pode migrar sob a forma de líquido ou vapor. Os materiais com porosidade aberta conduzem a água por capilaridade que é tanto maior quanto menor for o diâmetro dos poros (Freitas *et al.*, 2008).

Os poros que formam este tipo de porosidade podem ser classificados em três tipos, de acordo com o seu tamanho e influência no transporte de humidade:

- Microporos – são os poros mais pequenos, com raios menores que cerca de $0.1\ \mu\text{m}$ (Gonçalves, 2007, citando Hilbert *et al.* 1992). Não têm influência no transporte de humidade porque o seu tamanho reduzido gera forças de capilaridade tão elevadas que, em condições correntes, a água não se consegue mover;
- Mesoporos (ou poros capilares) – são os poros de tamanho intermédio, com raios entre cerca de $0.1\ \mu\text{m}$ e $30\ \mu\text{m}$ (Gonçalves, 2007, citando Hilbert *et al.* 1992). A água líquida atravessa-os, principalmente sob a influência da capilaridade. O transporte de vapor é também possível nestes poros;
- Macroporos – são os poros de maior dimensão, com raios superiores a cerca de $30\ \mu\text{m}$ (Gonçalves, 2007, citando Hilbert *et al.* 1992). Possuem um papel importante no transporte de vapor. Em oposição, o transporte de líquido por capilaridade não é significativo, pois as forças capilares geradas são muito fracas.

No caso em que os poros do material não comunicam entre si – porosidade fechada – o material é impermeável, não permitindo a transferência de água no seu interior. Esta é uma situação pouco comum de encontrar nos materiais de construção. O poliestireno extrudido e grés porcelânico, por exemplo, são dois materiais que apresentam uma porosidade fechada.

Nos materiais de construção com estrutura porosa, a transferência de humidade processa-se através das redes e canais capilares seus constituintes. Em regra, estes materiais são higroscópicos, isto é, quando são colocados numa ambiência em que a humidade relativa varia, o seu teor de humidade também varia (Freitas *et al.*, 2008).

Em presença da humidade do ar, estes materiais, tendem a reter por adsorção vapor de água até atingirem um dado estado de equilíbrio com o ambiente – equilíbrio higroscópico – designando-se o respectivo teor de humidade de teor de humidade higroscópico (w_h). Este fenómeno é atribuído às forças intermoleculares ou de *Van der Waals* que actuam na interface sólido-líquido, no interior dos poros, e é representado graficamente por uma curva – curva higroscópica (Figura 2.2) (Freitas *et al.*, 2008).

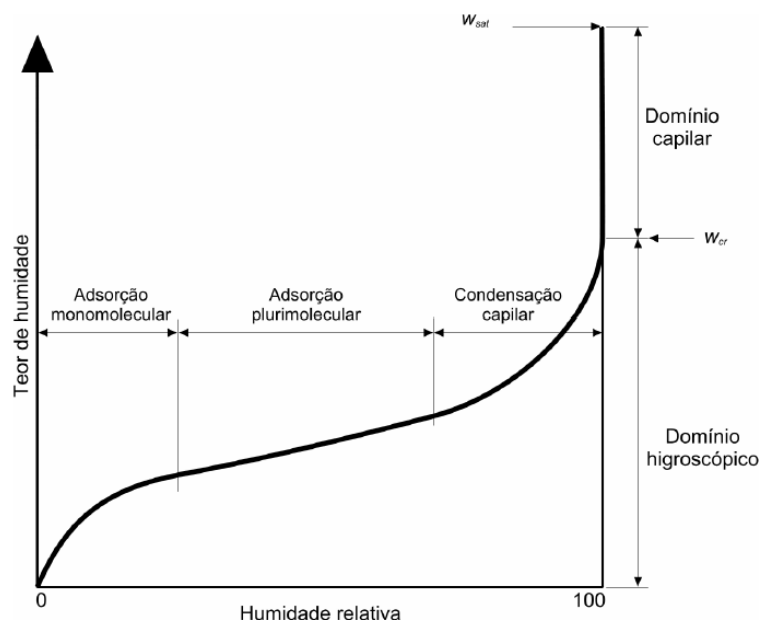


Figura 2.2 – Comportamento higroscópico de materiais de construção em função da humidade relativa (Ramos, 2007)

A curva higroscópica apresenta três fases. Numa primeira fase ocorre a fixação de uma camada de moléculas de água na superfície interior dos poros – adsorção monomolecular – a que se segue, numa segunda fase, a deposição de várias camadas de moléculas – adsorção plurimolecular. Quando o diâmetro dos poros é suficientemente pequeno há a junção das camadas plurimoleculares – condensação capilar (Freitas *et al.*, 2008). A Figura 2.3 pretende ilustrar as três fases do comportamento higroscópico dos materiais de construção.

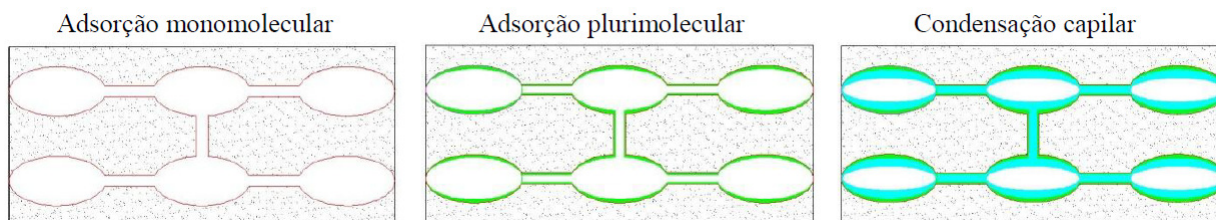


Figura 2.3 – Higroscopicidade (adaptado de Freitas *et al.*, 2008)

Quando o ambiente em contacto com o elemento está saturado o teor de humidade de equilíbrio higroscópico designa-se de teor de humidade crítico (w_{cr}); se este for posto em contacto com água líquida, o seu teor de humidade aumenta (pelo preenchimento dos poros e canais com água líquida)

sendo este preenchimento realizado por capilaridade até se atingir o valor de saturação, que corresponde ao teor de humidade máximo, w_{sat} . Acima deste valor, só por efeito de pressões externas se consegue aumentar o seu teor em água. O teor de humidade máximo dificilmente é atingido dada a facilidade de ar ficar aprisionado no interior da estrutura porosa. Por este motivo define-se o teor de humidade de saturação capilar, w_{cap} , que representa a quantidade máxima de humidade que um material contém após contacto com água líquida.

O teor de humidade de um material, em contacto com o ar, pode assim variar entre zero absoluto (se o ambiente tiver uma humidade relativa nula) e o teor de humidade crítico. Na figura mostra-se a descrição convencional dos diferentes valores do teor de humidade que um material pode apresentar.

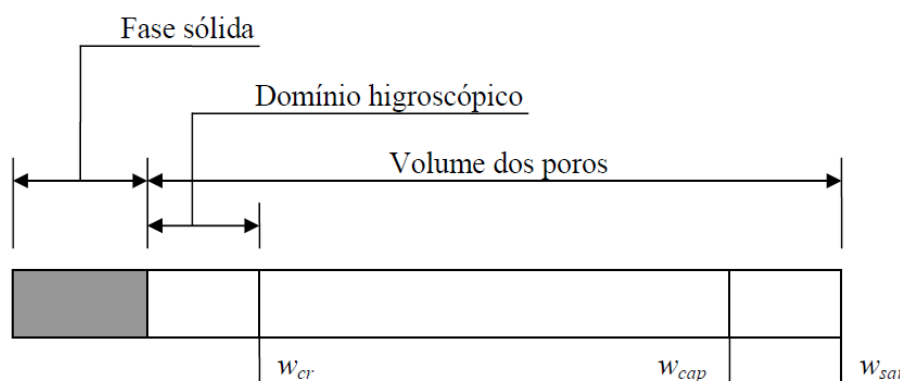


Figura 2.4 – Esquema do princípio da descrição convencional do teor de humidade de um material (Ramos, 2007)

Considerando estes níveis de teores de humidade de um material pode-se classificar dois domínios: higroscópico e capilar. Nesta dissertação o estudo vai estar centrado preferencialmente no domínio capilar.

A transferência de humidade nos elementos de construção pode explicar-se por mecanismos mais ou menos complexos e que diferem consoante a fase em que se verifiquem. Na fase de vapor predominará a difusão, enquanto que na fase líquida, a capilaridade, a gravidade e o efeito do gradiente de pressões externas controlam a transferência de humidade.

Contudo, na prática, o transporte em fase líquida e em fase de vapor ocorre em simultâneo e depende das condições de temperatura, humidade relativa, precipitação, radiação solar e pressão do vento das ambiências e das características dos materiais (Freitas *et al.*, 2008).

De entre os mecanismos que condicionam o transporte de humidade, é o fenómeno de capilaridade (transferência de água na fase líquida), que vai ser analisado mais ao pormenor nesta dissertação.

2.2.2. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Nos materiais de construção porosos, o transporte de água líquida ocorre essencialmente por capilaridade. A capilaridade corresponde assim à progressão de água através dos mesoporos ou poros capilares de um material. A humidificação do material por capilaridade é ilustrada na seguinte figura.

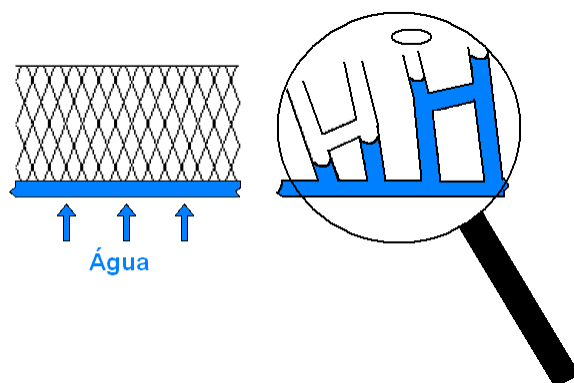


Figura 2.5 – Fenómeno de capilaridade (adaptado de Freitas *et al.*, 2008)

O fenómeno físico da capilaridade é facilmente observado quando se coloca um tubo capilar mergulhado numa tina com água. Se o líquido “molha” as paredes do tubo, subindo até uma altura superior ao do nível da tina, a superfície livre do líquido no tubo é côncava, logo o ângulo de contacto da água com o material (θ) é inferior a 90° . Na situação contrária, o nível do líquido no capilar é inferior ao da tina formando uma superfície livre convexa, sendo o ângulo de contacto da água com o material superior a 90° . Os materiais que são molhados pelo líquido denominam-se de hidrófilos, e os que não o são por hidrófugos. A Figura 2.6 ilustra o comportamento dos materiais, nas duas situações descritas, num tubo capilar.

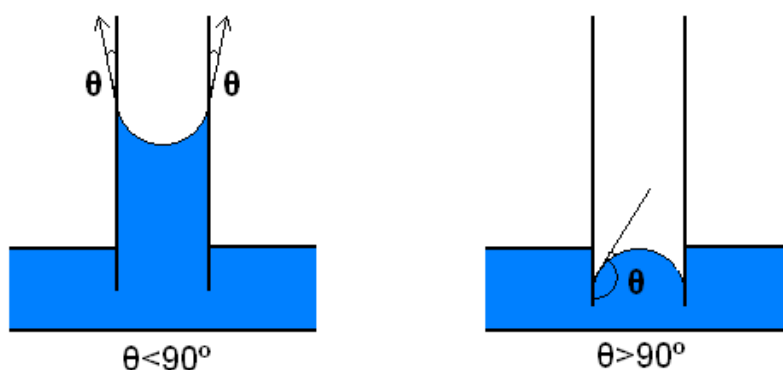


Figura 2.6 – Líquidos molhantes e não molhantes em capilares

Os materiais que constituem os elementos de construção são, em regra, “molháveis” pela água e a progressão da água, por capilaridade, corresponde à situação descrita na Figura 2.6 (à esquerda). A água ascende no tubo até ocorrer o equilíbrio. O facto de o líquido subir no tubo deve-se à diferença de pressão que é gerada na interface entre as fases líquida e gasosa, que é chamada pressão capilar (p_c) e funciona como uma força de sucção. O peso da coluna de água em cada momento opõe-se a esta ascensão e o equilíbrio ocorre quando as forças que causam a ascensão são equilibradas pelo peso da coluna de água. A Figura 2.7 ilustra o modelo teórico cilíndrico de sucção e pressão capilar (em que H_c corresponde à altura de ascensão capilar), sendo a pressão capilar dada por:

$$p_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (1)$$

em que:

p_c - pressão capilar (Pa)

σ - tensão superficial entre a água e o ar (N.m^{-1})

θ - ângulo de contacto da água com o material ($^\circ$)

r - raio do capilar (m).

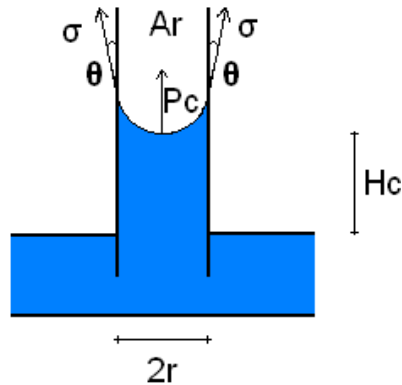


Figura 2.7 – Modelo teórico cilíndrico de sucção e pressão capilar

A progressão da água em função do tempo, ao longo de um tubo capilar é regida pela lei de Poiseuille,

$$x(t) = \left[\frac{\sigma \cdot r \cos \theta}{\eta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

sendo,

$x(t)$ – progressão da água (m)

η – viscosidade da água (kg/m.s)

e os restantes símbolos têm o significado anterior.

A maior parte dos materiais de construção possui complicadas redes de poros e canais capilares de variadas formas e dimensões, e a aplicação directa destas leis físicas que regem o fenómeno da capilaridade é, praticamente, inviável. Assim é necessário fazer uma avaliação a nível macroscópico deste fenómeno, através de coeficientes indicadores do comportamento dos materiais que integram os elementos de construção quando sujeitos ao contacto directo com a água. Estes coeficientes traduzem a progressão ao longo do tempo da quantidade de absorção de água ou da altura de ascensão.

Experimentalmente constata-se que, num meio poroso, semi-indefinido, assente numa “toalha” líquida, o volume total de água absorvida (em absorção vertical) é dado, em função do tempo e na sua fase inicial, por:

$$V_a(t) = A_w \cdot t^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

em que:

A_w – coeficiente de capilaridade ou absorção de água ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$)

t – tempo (s)

V_a – Volume de água absorvida (kg/m^3).

A sucção capilar será tanto menor quanto maior for o teor de humidade do material, anulando-se quando se atinge o teor de humidade de saturação capilar (Figura 2.2).

De modo análogo, é possível definir uma altura de ascensão capilar, $h(t)$, sendo h em metros e o t em segundos, dada por:

$$h(t) = B.t^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

sendo B o coeficiente de ascensão capilar ($\text{m}^2/\text{s}^{1/2}$).

Estes dois coeficientes constituem assim indicadores do comportamento dos materiais de construção quando sujeitos aos contacto directo com a água. O coeficiente de absorção de água é o mais utilizado, sendo o coeficiente de ascensão capilar mais difícil de se obter, face à dificuldade de detectar a fronteira que separa as zonas secas e húmidas ou por esta ser irregular (Künzel, 1995). No entanto, estes coeficientes complementam-se, pois dois materiais porosos podem absorver a mesma quantidade de humidade e apresentarem alturas de ascensão capilar distintas (Gonçalves, 2007).

2.3. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

2.3.1. DESCRIÇÃO DA PROPRIEDADE

O coeficiente de absorção de água ou de capilaridade caracteriza a propriedade de um material absorver água líquida, por sucção, quando em contacto com a água.

Quando um material que permite a transferência de água no seu interior é colocado em contacto directo com água no estado líquido, a massa varia ao longo do tempo (Figura 2.8). É esta relação entre a massa de água absorvida por área do material em contacto com a água e o tempo que permite determinar o coeficiente de absorção de água (Mukhopadhyaya *et al.*, 2002).

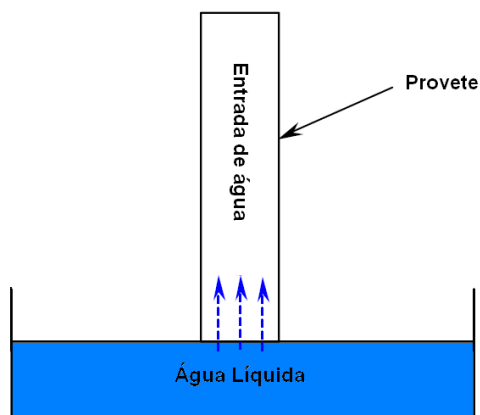


Figura 2.8 – Movimento de água no interior de um material com uma superfície em contacto com água no estado líquido (adaptado de Mukhopadhyaya *et al.*, 2002)

A absorção de água numa superfície livre dum material poroso é um processo de duas fases. Estas duas fases são bem explícitas quando se procede a um ensaio para determinar o coeficiente de absorção de água. Na primeira fase a água ascende devido às forças capilares que se formam no interior do material e à viscosidade, correspondendo ao preenchimento da maioria dos poros interligados (Roels *et al.*, 2004). A absorção de água por capilaridade dos materiais de construção, na sua maioria, segue a cognominada “Lei da raiz quadrada do tempo”. A quantidade de água absorvida por área de contacto com a água (kg/m^2) versus a raiz quadrada do tempo t produz, pelo menos na fase inicial do processo de absorção capilar, uma recta (Roels *et al.*, 2004). O declive desta recta corresponde ao coeficiente de absorção de água, A_w , como mostra a figura a seguir.

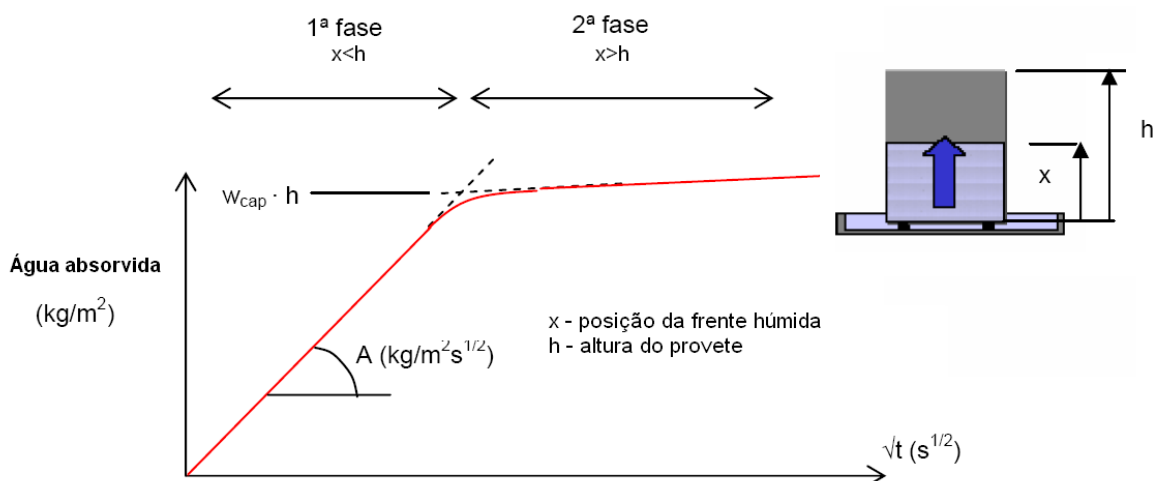


Figura 2.9 – Curva de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo e esquema da absorção capilar (Arriaran, 2006)

A segunda fase do processo inicia-se quando a frente de água atinge a superfície superior da amostra (ou é atingida a ascensão capilar máxima). Durante a segunda fase, as mudanças no teor de humidade na amostra são mais lentas, e corresponde à dissolução do ar aprisionado nos poros da amostra após estabilização da saturação capilar (Figura 2.10) (Mukhopadhyaya *et al.*, 2002). Nesta fase, a curva de absorção de água apresenta um declive inferior ao da fase inicial, como é possível verificar na figura anterior.

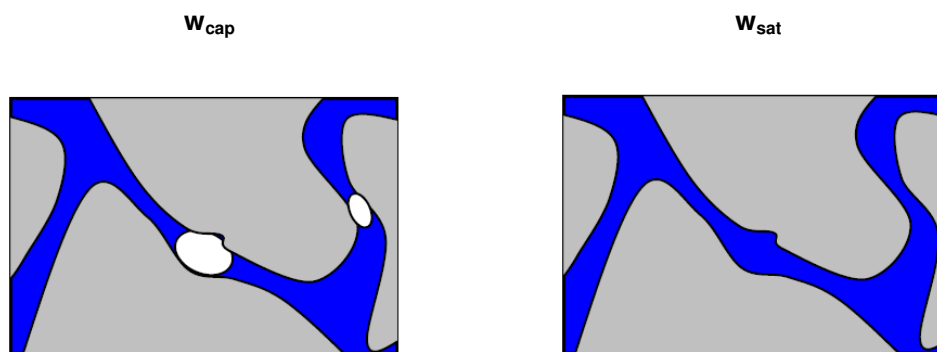


Figura 2.10 – Ar aprisionado no interior do poro (Arriaran, 2006)

O teor de humidade de saturação capilar, w_{cap} , é por definição, igual ao teor de humidade na amostra no final da transição da primeira fase para a segunda do processo de absorção de água por capilaridade

(Roels *et al.*, 2004). Sendo assim, o ponto de inflexão corresponde ao w_{cap} , logo ao momento em que a água atinge o topo da superfície da amostra (Figura 2.9).

2.3.2. ENSAIOS NORMALIZADOS APLICÁVEIS

A determinação do coeficiente de absorção de água dos materiais de construção é fixada por várias normas. A norma alemã DIN 52 617 (1987) e a norma francesa NF B 10502 (1980) permitem determinar respectivamente, o coeficiente de absorção de água (A_w) e o coeficiente de capilaridade (C), que representam a massa de água absorvida por área devido às forças capilares.

De acordo com a norma DIN 52 617, os provetes devem ser secos em estufa a 102°C até se obter massa constante. Deixam-se arrefecer os provetes, impermeabilizam-se as faces de maior dimensão, medem-se e pesam-se separadamente. De seguida, colocam-se os provetes, com a maior dimensão na vertical, num recipiente com cerca de 5 mm de altura de lâmina de água, registando-se para cada provete os valores da massa de água absorvida ao longo do tempo em função de $\sqrt{t}$, por unidade de área da face imersa. As medições são efectuadas de forma periódica durante 24 horas seguindo uma escala logarítmica sendo depois efectuadas pesagens por períodos de 24 horas. O cálculo do coeficiente de absorção é feito a partir da relação linear da variação do peso dos provetes e $\sqrt{t}$. Quando não existir tal relação a determinação é efectuada com os valores registados às 24 horas (Lanzinha *et al.*, 1998).

A determinação do coeficiente de capilaridade, de acordo com a norma francesa NF B 10502, pode ser efectuado em condições idênticas, com excepção da forma de preparação dos provetes. Neste caso não é efectuada a impermeabilização lateral dos provetes como no método da norma alemã. O coeficiente de capilaridade será o declive da recta que une os pontos correspondentes a $\sqrt{10}$ minutos e $\sqrt{90}$ minutos, na curva traçada a partir dos registos efectuados (10,30,60,90,180,300,480,1440 minutos), de acordo com a seguinte equação:

$$C = \frac{\frac{M}{S}}{\sqrt{90} - \sqrt{10}} \quad (5)$$

sendo M a massa em gramas, t o tempo em minutos e S a superfície em cm^2 (Lanzinha *et al.*, 1998).

Estas duas normas, consoante o valor dos coeficientes, permitem classificar os materiais de revestimento dos edifícios e consequentemente seleccionar o material mais adequado para a utilização pretendida.

De acordo com a norma alemã os materiais podem ser classificados em quatro grupos, consoante o valor de A_w .

$A_w > 2,0 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$	Sucção rápida
$A_w < 2,0 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$	Preventivo contra a água
$A_w < 0,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$	Quase impermeável
$A_w < 0,001 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$	Impermeável

A norma francesa NF B 10502 classifica os revestimentos à base de ligantes hidráulicos em três categorias, em relação ao coeficiente de capilaridade C expresso em $\text{g/dm}^2\text{min}^{1/2}$ ($*0,775=\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$).

$C > 4,0$	Revestimento de forte capilaridade
$1,5 < C < 4,0$	Revestimento de fraca capilaridade
$C < 1,5$	Revestimento de muita fraca capilaridade

Na caracterização de revestimentos de monocamada de impermeabilização para aplicação em exterior o CSTB estabelece uma classificação em que os coeficientes de capilaridade são os abaixo indicados expressos igualmente em $\text{g/dm}^2\text{min}^{1/2}$ (Sousa, 1996).

$C1 < 5,0$
$1,0 < C2 < 2,5$
$2,0 < C3 < 4,0$
$3,0 < C4 < 7,0$
$5,0 < C5 < 12,0$
$C6 > 10,0$

A norma mais recente (de 2002), EN ISO 15148 é a norma de referência para determinação por imersão parcial do coeficiente de absorção de água, A_w . O coeficiente é obtido a partir da curva da massa ou volume de água absorvida por unidade de área de absorção em função da raiz quadrada do tempo.

Os provetes devem estabilizar a sua massa a uma determinada humidade relativa. Com as faces laterais impermeabilizadas (para que haja apenas um fluxo unidireccional) e após estabilização da massa dos provetes, estes são colocados num tanque ou recipiente, provido de entrada de água, um dreno com a função de manter o nível da água em (5 ± 2) mm acima da base do provete e um suporte para a colocação do provete, impedindo que este toque no fundo do tanque, conforme a figura.

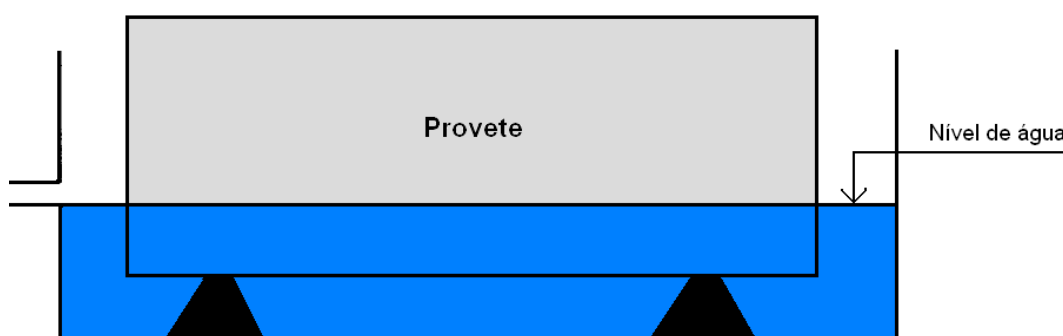


Figura 2.11 – Desenho esquemático de um tanque ou recipiente para a execução do ensaio (adaptado de CEN, 2002)

São efectuadas pesagens aos 5 minutos, 20 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas, após a imersão dos provetes em água e ainda mais duas pesagens abrangendo um período de 24 horas inclusive.

Calcula-se a massa de água absorvida (Δm) pela área da superfície do provete em contacto com a água (A), através da seguinte expressão, expressa em kg/m^2 ,

$$\Delta m = \frac{(m_t - m_i)}{A} \quad (6)$$

sendo m_i a massa inicial do provete e m_t a massa do provete no tempo t em kg e A a área do provete em contacto com a água em m^2 . Em seguida traça-se a curva de absorção de água que expressa a quantidade de água absorvida por unidade de área (kg/m^2) em função da raiz quadrada do tempo em segundos ($\sqrt{t}$).

Os resultados gráficos podem ser de dois tipos, do tipo A ou B. Nos gráficos do tipo A, a curva de absorção de água que expressa a quantidade de água absorvida por unidade de área (kg/m^2) em função da raiz quadrada do tempo em segundos ($\sqrt{t}$), podem ter dois tipos de desenvolvimentos, como é possível constatar nas figuras seguintes (Figura 2.12 e Figura 2.13). A primeira curva corresponde ao resultado de um ensaio, em que apenas a fase inicial do processo de absorção de água ocorreu. No segundo caso, a curva é típica de um ensaio, onde se verifica água à superfície do provete, e como tal, verifica-se a segunda fase do processo de absorção.

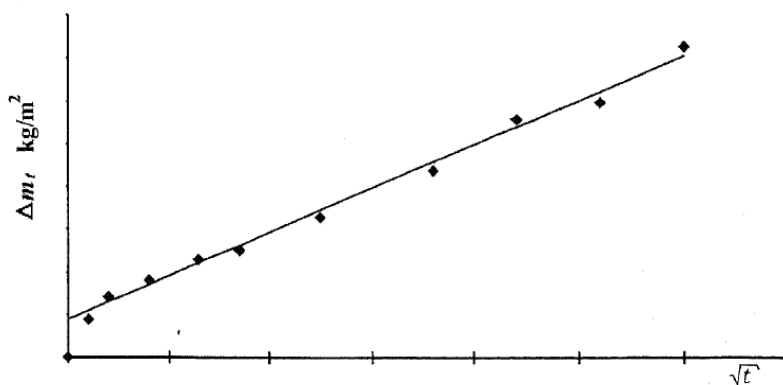


Figura 2.12 – Gráfico do tipo A sem água à superfície do provete (CEN, 2002)

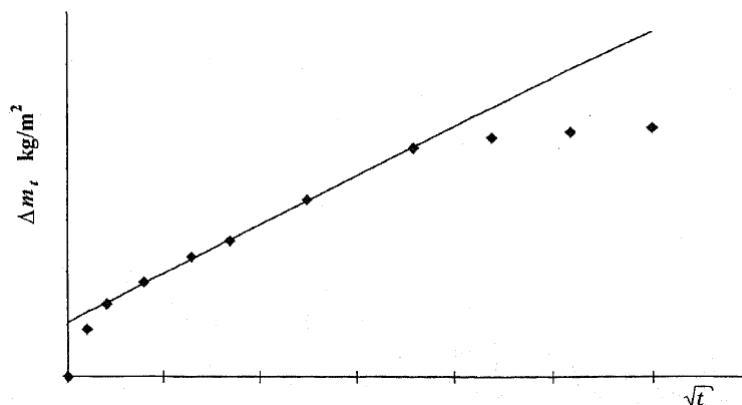


Figura 2.13 – Gráfico do tipo A com água à superfície do provete (CEN, 2002)

Ao traçar as curvas, é possível determinar o coeficiente de absorção de água, que corresponde ao declive do segmento de recta, pela seguinte expressão:

$$A_w = \frac{(\Delta m'_{tf} - \Delta m'_0)}{\sqrt{t_f}} \quad (7)$$

em que $\Delta m'_{tf}$ corresponde à massa de água absorvida no final do ensaio (24 horas no caso de não ter surgido água à superfície e inferior a 24 horas no caso contrário), em kg/m^2 e $\Delta m'_0$ corresponde à massa de água absorvida no instante inicial, ou seja, para $t=0$. t_f corresponde à duração do ensaio, geralmente um dia em segundos, sendo inferior quando surge água na superfície do provete. Quando o tempo é expresso em horas, o coeficiente de absorção de água é definida pelo símbolo W_w .

Nos casos em que o resultado é semelhante ao gráfico da Figura 2.13, A_w ou W_w pode ser determinado para um período inferior a um dia.

Os gráficos do tipo B, não apresentam uma linha recta, mas uma curva, como se pode verificar na Figura 2.14.

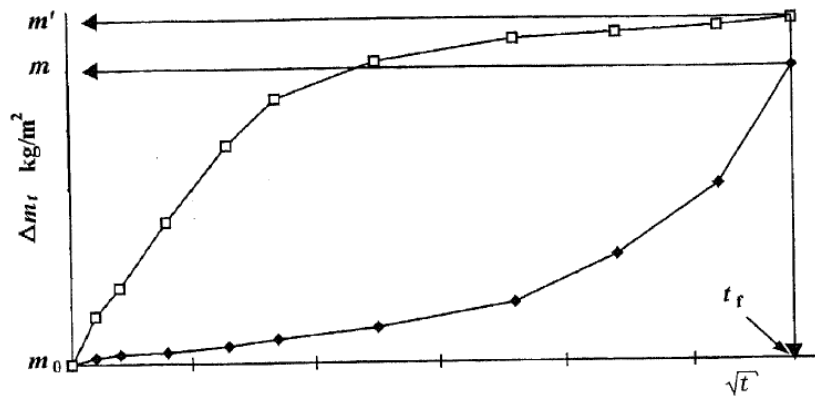


Figura 2.14 – Gráfico do tipo B (CEN, 2002)

Neste caso, a variável Δm_t , vinte e quatro horas após o ensaio deve ser tomado como Δm_{tf} , e $A_{w,24h}$ ou $W_{w,24h}$ e calculado da seguinte forma.

$$A_{w,24h} = \frac{\Delta m_{tf}}{\sqrt{86400}} \quad (8)$$

$$W_{w,24h} = \frac{\Delta m_{tf}}{\sqrt{24}} \quad (9)$$

Estes três ensaios normalizados que permitem determinar o coeficiente de absorção de água e o coeficiente de capilaridade, seguem de uma maneira geral um procedimento semelhante. São os aspectos relacionados com os intervalos de tempo das pesagens e o modo de preparação dos provetes que diferem de norma para norma.

2.4. COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE HÍGRICA

2.4.1. DEFINIÇÃO DA PROPRIEDADE

A difusividade descreve o transporte de água no estado líquido nos materiais porosos sendo como variável o teor de humidade (w). O coeficiente de difusividade higríca pode ser definido como sendo o parâmetro que liga o gradiente médio do teor de humidade ao fluxo médio de humidade (na fase líquida ou de vapor), em regime isotérmico. É designado por D_w e expressa-se em m^2/s . É também um parâmetro fundamental das equações de transferência de humidade, variável com a temperatura e sobretudo com o teor de humidade (Freitas, 1992).

O conhecimento deste coeficiente tem interesse na utilização de modelos de previsão da transferência de humidade dos materiais de construção durante os processos de embebição/secagem.

2.4.2. ENSAIOS APLICÁVEIS

A difusividade higríca (ou líquida) pode ser calculada através dos perfis dos teores de humidade medidos várias vezes após o início do processo de absorção de água. Os perfis são medidos em amostras que estão em contacto directo com a água no estado líquido (Figura 2.8) ou a partir da redistribuição quando o processo de absorção é interrompido. Existem vários métodos para determinar a difusividade higríca, sendo os mais comuns, o Método da Transformação de Boltzman e o Método dos Perfis (Freitas *et al.*, 1995).

No Método da Transformação de Boltzman, é utilizada a variável de Boltzman para determinar o coeficiente de difusividade higríca. Como o teor de humidade apenas depende da variável de Boltzman, a integração de U entre o teor de humidade mínimo (w_{min}) e o teor de humidade (w_2) leva à seguinte expressão da difusividade higríca (10). O princípio de cálculo de Boltzman é esquematicamente representado na Figura 2.15.

$$D_w(w_2) = -\frac{1}{2 \frac{\partial W}{\partial U}} \int_{w_{min}}^{w_2} U dw \quad (10)$$

Nesta expressão, w é o teor de humidade (kg/m^3) e U a variável de Boltzman em que:

$$U = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (11).$$

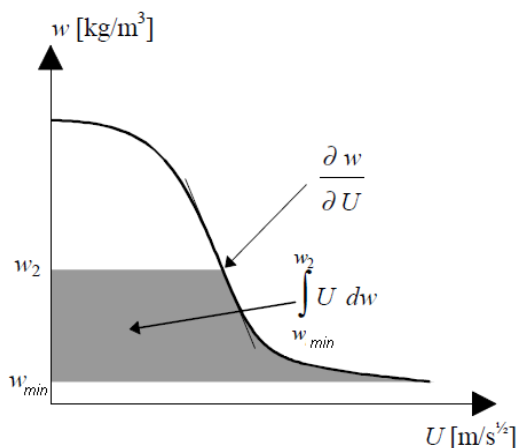


Figura 2.15 – Princípio de cálculo de Boltzman (Janz, 1997)

Este método utiliza curvas isotérmicas de embebição/secagem em regime unidireccional e na prática é apenas válido para alguns materiais (Freitas *et al.*, 1995).

O princípio de cálculo de $D_w(w)$ pelo método dos perfis (Pel *et al.*, 1996), utiliza os perfis do teor de humidade de embebição ou secagem. São utilizados dois perfis de humidade nos momentos t e $t+dt$ (x representa a superfície em contacto com a água). A quantidade de humidade transportada através da secção do provete, no comprimento x_0 , a partir da face do provete em contacto com a água, no período de tempo dt , é representada pela área sombreada na Figura 2.16.

O coeficiente de difusividade hídrica pode ser expresso a partir da curva média do perfil de humidade entre dois perfis medidos, como indica a expressão seguinte.

$$D_w(w) = -\frac{1}{dt} \frac{\int_{x=x_0}^{x=l} [w_{t+dt}(x) - w_t(x)] dx}{\frac{\partial w_0}{\partial x_0}} \quad (12)$$

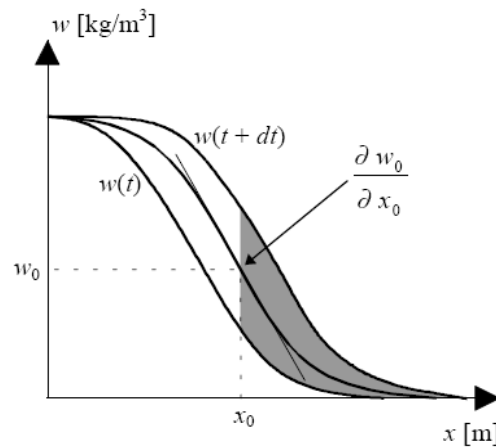


Figura 2.16 – Princípio de cálculo pelo método dos perfis (Janz, 1997)

A determinação de D_w , de acordo com os métodos referidos anteriormente, pressupõe o conhecimento dos perfis do teor de humidade em diferentes instantes de tempo. A determinação destes perfis pode ser feita recorrendo a métodos destrutivos ou não destrutivos.

Nos métodos destrutivos há destruição do provete, que embora sejam os mais precisos, deve-se ter em conta que o corte dos materiais produz aquecimento, alterando as condições de humidade iniciais e não há possibilidade de estudar a cinética de embebição. O método mais conhecido é o método gravimétrico, que consiste na pesagem do provete antes e após secagem, permitindo calcular por diferença de massa a quantidade de água contida no interior do material.

Nos métodos não destrutivos, o teor de humidade pode ser determinado ao longo do tempo de forma dinâmica e o provete utilizado várias vezes. Alguns dos métodos não destrutivos utilizados são os métodos eléctricos que utilizam a influência da humidade na resistência ou a impedância de um circuito eléctrico constituído a partir do meio poroso, os métodos da sonda de choque térmico, em que a determinação do teor de humidade é obtida a partir da relação entre a condutibilidade e o teor de humidade (esta técnica não permite a medição em contínuo). Outros métodos não destrutivos para determinar os perfis do teor de humidade são os métodos por atenuação de radiação gama, por ressonância magnética nuclear (NMR), entre outros (consultar Janz, 1997), que permitem determinar

os teores de humidade de uma forma dinâmica e contínua. Estas técnicas contudo exigem equipamentos sofisticados e caros, bem como operadores qualificáveis.

Assim, a determinação do coeficiente de difusividade hídrica a partir do conhecimento dos perfis dos teores de humidade torna-se complexo e caro, para além de várias experiências realizadas demonstrarem que os métodos para determinar os perfis nem sempre chegam a um único valor de D_w (Kumaran, 1999).

Neste sentido, foram desenvolvidos estudos que sugeriam que o coeficiente de absorção de água (A_w) em conjunto com o teor de humidade de saturação capilar (w_{cap}) poderia ser usado para determinar a difusividade média hídrica (Krus and Künzle, 1993). Esta relação surge a partir da equação da transferência de humidade, admitindo que na equação (14), D_w corresponde à difusividade média hídrica.

De acordo com a lei de Fick, a transferência de humidade no estado líquido nos materiais de construção isotrópicos, pode ser expressa pela seguinte relação (adaptado de Mukhopadhyaya *et al.*, 2002):

$$F = -D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (13)$$

sendo,

F – fluxo de água absorvida por unidade de área da secção ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

D_w – o coeficiente de difusividade hídrica do material (m^2/s)

w – teor de humidade volúmico (kg/m^3)

x - espaço medido normal à secção (m).

Na equação anterior, se o teor de humidade volúmico é expresso em termos de massa u (kg/kg), a equação pode ser escrita do seguinte modo:

$$F = -(\rho_0 D_w) \frac{\partial u}{\partial x} = -(\rho_0 D_w) \cdot \text{grad } u \quad (14)$$

onde, ρ_0 é a densidade seca do material (kg/m^3).

Assumindo um valor constante de D_w e utilizando a equação (14), a difusividade média hídrica pode ser expressa como (Krus e Künzle, 1993):

$$D_w \approx \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \quad (15)$$

em que, w_{cap} é o teor de humidade volúmico de saturação capilar (kg/m^3).

Tendo em conta a frente de progressão do teor de humidade, a expressão anterior, é modificada, passando a ser (Krus e Künzle, 1993):

$$D_w = \frac{\pi}{4} \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \quad (16)$$

Este método simplificado na determinação do coeficiente de difusividade hídrica, a partir do coeficiente de absorção de água e do teor de humidade de saturação capilar, foi estabelecida e confirmada por uma série de medições em laboratório.

2.4.3. MODELAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE ÁGUA LÍQUIDA EM PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO

Existem vários programas de cálculo de simulação numérica que permitem estudar o comportamento higrotérmico dos edifícios, sendo o WUFI um exemplo destes programas. O programa WUFI é um software para simulação da transferência de humidade e calor em elementos de construção, permitindo simulações em regime dinâmico e estudos de sensibilidade sobre composição, propriedades higrotérmicas dos materiais e condições climáticas.

No que respeita ao coeficiente de difusividade hídrica (propriedade higrotérmica relacionada com a transferência de água líquida), o programa de cálculo de simulação numérica, WUFI Light 5.0, designa este coeficiente por “coeficiente de transferência de água líquida” e identifica dois tipos de coeficientes. Esses coeficientes são os denominados de coeficiente de transferência de água líquida por sucção, D_{ws} e coeficiente de transferência de água líquida por redistribuição, D_{ww} .

O primeiro coeficiente descreve a absorção capilar de água quando a superfície absorvente (neste caso a superfície do paramento exterior) está totalmente húmida. Já o coeficiente de transferência de água líquida por redistribuição descreve a propagação da água absorvida quando o humedecimento estiver concluído, ou seja, quando não há mais entrada de água vinda do exterior e a água presente no material começa a redistribuir-se (fase de secagem), havendo migração de humidade para o exterior. Uma vez que a redistribuição tem lugar nos capilares menores, que apresentam uma alta resistência ao fluxo, o D_{ww} é geralmente bastante menor que o D_{ws} , dado ser um processo mais lento (<http://www.wufi-pro.com/>).

De acordo com o sítio do WUFI (<http://www.wufi-forum.com/>), os valores dos coeficientes de transferência de água líquida estão apenas disponíveis para um número relativamente pequeno de materiais e por isso torna-se necessário estima-los a partir de outras propriedades de valor conhecido. Para a maioria dos materiais de construção, o aumento de D_{ws} com o teor de humidade pode ser descrito por uma função exponencial. Nestas condições, há a seguinte relação aproximada entre D_{ws} e o valor do coeficiente de absorção de água (<http://www.wufi-pro.com/>):

$$D_{ws} = 3,8 \times \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \times 1000^{(w/w_{cap})-1} \quad (17)$$

em que:

D_{ws} - coeficiente de transferência de água líquida por sucção (m^2/s)

A_w - coeficiente de absorção de água ($kg/m^2\sqrt{s}$)

w - teor de humidade (kg/m^3)

w_{cap} - teor de humidade de saturação capilar (kg/m^3).

O WUFI permite assim criar automaticamente uma tabela com o coeficiente de transferência de água líquida estimado para a fase de capilaridade. Apenas o coeficiente de absorção de água precisa de ser inserido e o programa usará este valor, a função de armazenamento de humidade e a equação (17), para determinar este coeficiente. No entanto, deve-se ter em conta que este método é apenas uma estimativa, mas útil para os materiais que não tenham um coeficiente de difusividade hídrica definido (<http://www.wufi-pro.com/>).

2.5. ALGUNS ESTUDOS NESTE ÂMBITO

2.5.1. KUMARAN

Dada a dificuldade de obtenção do coeficiente de difusividade hídrica, ao longo de vários anos muitos estudos têm sido realizados.

A simplificação da obtenção do coeficiente de difusividade hídrica a partir do coeficiente de absorção de água e do teor de humidade de saturação capilar foi confirmada por Kumaran em 1999, no seu estudo intitulado “*Moisture diffusivity of building materials from water absorption measurements*”.

Kumaran ensaiou provetes de madeira (“spruce” – da família do pinheiro), cujas dimensões foram de 32,7cm x 29,9mm x 50mm. As faces laterais do provete foram impermeabilizadas com resina *epoxy*. A densidade do material era de 394 kg/m³.

O processo desta experiência é o ilustrado na Figura 2.8. O provete, a determinados intervalos de tempo, era retirado da água, limpo com papel absorvente para limpar o excesso de água e a formação de gotículas, pesado e colocado novamente na água. Este processo foi contínuo por vários dias. A Figura 2.17 mostra o resultado do ensaio. Desta dependência linear da massa com a raiz quadrada do tempo obteve-se um coeficiente de absorção de água (A_w) de 0,0096 kg/ m s^{1/2}.

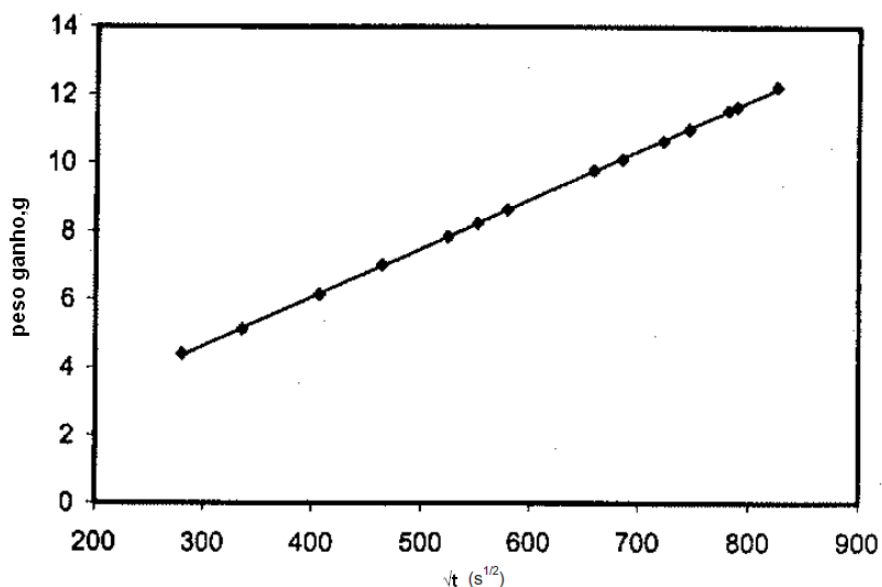


Figura 2.17 – Resultado do ensaio de absorção de água (adaptado de Kumaran, 1999)

O teor de humidade de saturação capilar (w_{cap}) foi obtido pelo método de atenuação de radiação gama, sendo este de 785 kg/m³ aproximadamente. Em pequenos provetes foi também determinado o teor de humidade de saturação capilar pelo método gravimétrico e o resultado foi o mesmo ($w_{cap} \approx 785 \text{ kg/m}^3$).

Ao usar directamente as equações (15) e (16), Kumaran obteve um D_w de $1,5 \times 10^{-10}$ e $1,2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivamente.

de Wit e van Schindel derivaram uma função exponencial para determinar a dependência do coeficiente de absorção de água (A_w) e o teor de humidade volumétrico (w), cuja expressão é:

$$D_w = \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \frac{b^2}{2b-1} \exp b \left(\frac{w}{w_{cap}} - 1 \right) \quad (18)$$

com $5 < b < 10$. O valor do coeficiente de difusividade hídrica calculada de acordo com a expressão (18) para o material em estudo (assumindo que b é 7,5 para a madeira) é o presente na figura seguinte. Na Figura 2.18 são comparados os resultados obtidos pelos quatro métodos diferentes.

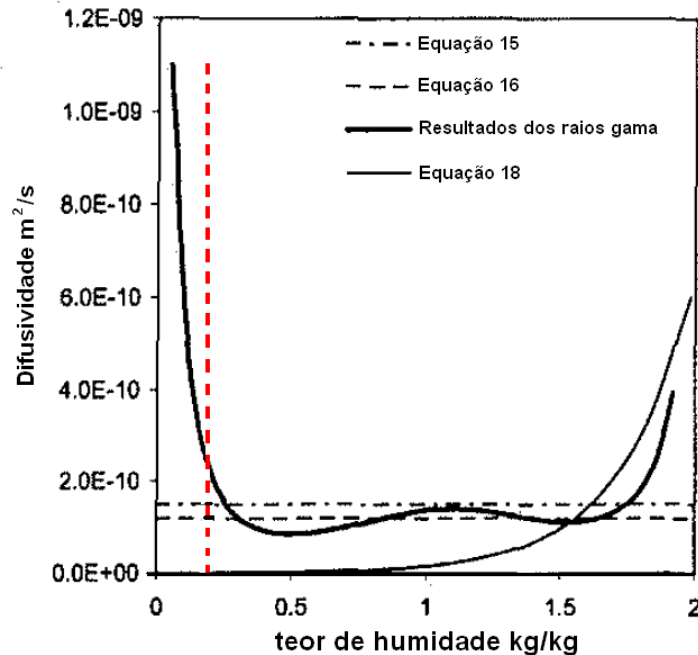


Figura 2.18 – Comparação dos valores obtidos do coeficiente de difusividade hídrica usando quatro procedimentos diferentes (adaptado de Kumaran, 1999)

Deste ensaio, Kumaran pôde concluir que o cálculo do coeficiente de difusividade hídrica usando as equações (15) ou (16) é bastante eficaz, uma vez que obteve valores muito próximos aos determinados usando o método dos raios gama. Quanto ao resultado obtido pela equação (18) este parece ajustar-se bem aos teores de humidade mais elevados, mas os resultados na faixa mais baixa parecem divergir consideravelmente.

De acordo com Freitas (1992), o método por atenuação de radiação gama é pouco preciso para os teores de humidade baixos, pelo que na Figura 2.18, os resultados obtidos até à linha vertical traçada não são válidos.

2.5.2. PROJECTO HAMSTAD

Com o propósito de determinar a precisão dos métodos utilizados na determinação de propriedades hígricas dos materiais de construção porosos foi realizado um estudo no âmbito da EU-initiated HAMSTAD-project: “*Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials*” (Roels, *et al.*, 2004).

O estudo consistiu em determinar propriedades hígricas de três materiais de construção em seis laboratórios distintos utilizando métodos de ensaio semelhantes. Os materiais escolhidos para este

estudo foram placas de silicato de cálcio, tijolos cerâmicos e betão celular. A escolha destes materiais deveu-se ao facto destes apresentarem uma estrutura porosa, homogeneidade e complexidade da estrutura de poros diferentes.

O teor de humidade de saturação capilar, w_{cap} , e o coeficiente de absorção de água, A_w , foram obtidos a partir de amostras secas que colocadas sobre um plano de água livre absorviam água líquida. A preparação dos provetes, incluindo as suas dimensões, a direcção do fluxo, estufa, etc, bem como as condições fronteiras durante o ensaio foram criteriosamente prescritas. Por sua vez, a impermeabilização das faces laterais dos provetes para reduzir a evaporação e permitir apenas um fluxo unidireccional ficou ao critério de cada laboratório.

O Quadro 2.2 e a Figura 2.19 mostram os resultados dos ensaios em cada laboratório, sendo dado entre parênteses o número de amostras ensaiadas. Os resultados do laboratório 1 foram desprezados para o cálculo da média de w_{cap} e A_w .

Quadro 2.2 – Média e desvio padrão de w_{cap} (kg/m^3) e A_w ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$) (adaptado de Roels, *et al.*, 2004)

	Placas de silicato de Cálcio		Tijolos cerâmicos		Betão celular	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
w_{cap} (kg/m^3)						
Laboratório 1	324,33	159,91 (19)	129,60	9,37 (16)	–	–
Laboratório 2	811,14	6,19 (21)	149,59	7,65 (17)	305,81	17,47 (12)
Laboratório 3	801,48	4,02 (10)	146,27	3,02 (10)	240,64	12,13 (10)
Laboratório 4	817,83	10,05 (10)	161,29	12,05 (10)	329,75	47,16 (10)
Laboratório 5	812,34	2,02 (10)	149,31	4,34 (15)	275,34	24,38 (10)
Laboratório 6	765,91	4,72 (11)	131,59	3,95 (12)	–	–
Média	802,83	22,37 (62)	147,46	10,97 (64)	288,74	42,85 (42)
A_w ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$)						
Laboratório 1	0,395	0,184 (20)	0,107	0,038 (17)	0,034	0,020 (16)
Laboratório 2	1,302	0,034 (21)	0,188	0,019 (21)	0,031	0,003 (16)
Laboratório 3	1,236	0,025 (10)	0,175	0,012 (10)	0,023	0,002 (10)
Laboratório 4	1,184	0,047 (10)	0,148	0,016 (10)	0,040	0,007 (10)
Laboratório 5	1,149	0,038 (10)	0,145	0,008 (21)	0,033	0,003 (10)
Laboratório 6	1,162	0,070 (11)	0,133	0,014 (12)	0,028	0,002 (7)
Média	1,223	0,085 (62)	0,160	0,028 (74)	0,031	0,007 (53)

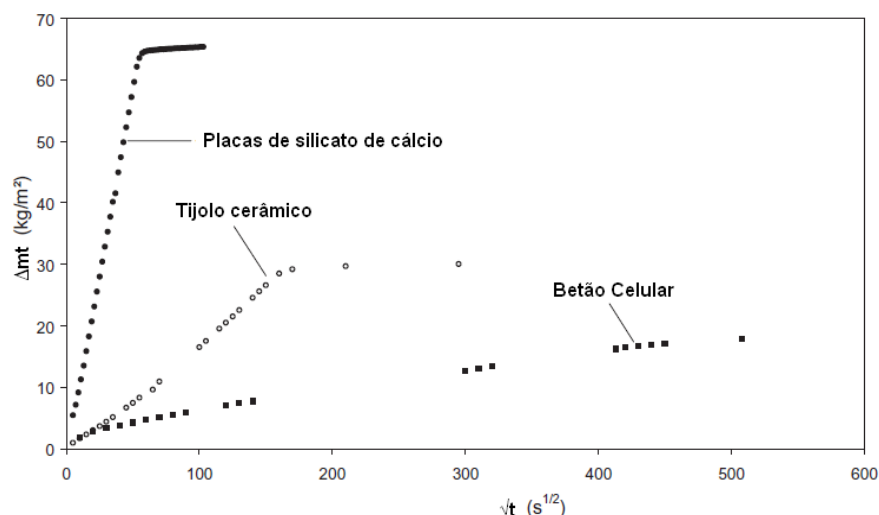


Figura 2.19 – Exemplo de curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo da placa de silicato de cálcio, tijolo cerâmico e betão celular (adaptado de Roels, *et al.*, 2004)

É de comum acordo que a obtenção de w_{cap} e A_w foi mais difícil para o betão celular. Pela análise da curva de absorção de água (Figura 2.19) do betão celular verifica-se uma não linearidade, que pode ser justificado pela presença de micro-fissuras e pelo preenchimento dos macro-poros devido ao contacto directo com água na fase inicial do processo de absorção de água ou devido à evaporação no topo da amostra. A distinção entre a primeira e segunda fase do processo de absorção de água não é clara.

Já no que diz respeito aos outros dois materiais, placas de silicato de cálcio e tijolo cerâmico, a distinção entre a primeira e segunda fase do processo de absorção de água é bastante claro. Para estes materiais, a determinação de w_{cap} e A_w parecem ser confiáveis, como é possível verificar pela Figura 2.20 que compara as distribuições cumulativas dos coeficientes em cada laboratório.

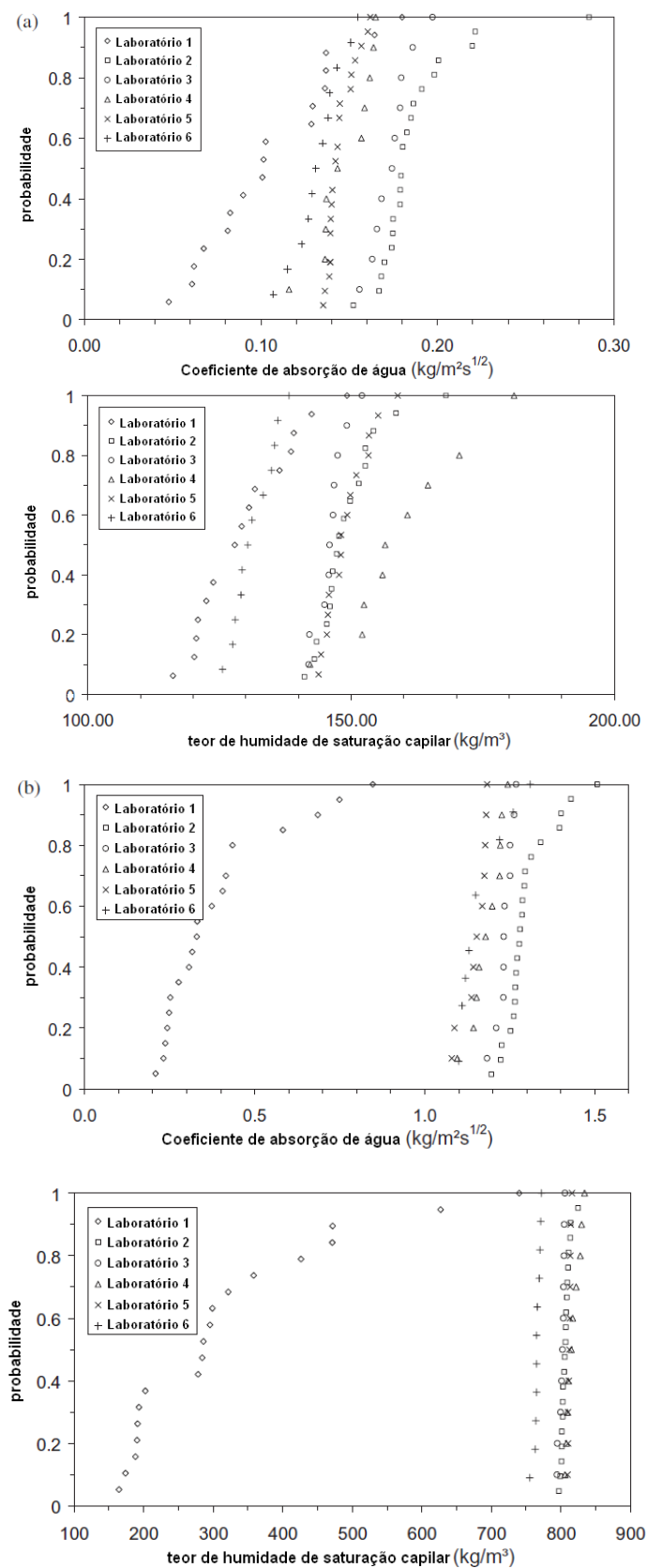


Figura 2.20 – Funções de distribuição cumulativa do coeficiente de absorção de água e do teor de humidade de saturação capilar medidas nos diferentes laboratórios: a) tijolo cerâmico; b) placa de silicato de cálcio (adaptado de Roels, *et al.*, 2004)

Os desvios entre os laboratórios das propriedades estudadas têm como principais origens as diferenças na preparação e manuseamento dos provetes e na aquisição de dados durante a realização dos ensaios. Como tal, foram realizados ensaios de absorção de água extra em que foi devidamente prescrito quais os passos a seguirem durante a execução do ensaio, nomeadamente no que diz respeito aos intervalos de tempo de pesagens dos provetes. Quatro dos seis laboratórios realizaram este ensaio extra, e os resultados para a placa de silicato de cálcio foram bastante satisfatórios, tendo-se obtido valores médios do coeficiente de absorção de água de 1,18, 1,19 e 1,18 kg/m²s^{1/2}. No caso do tijolo cerâmico, verificou-se que o modo e o tipo de material utilizado na impermeabilização das faces laterais dos provetes também influenciam os resultados. Deste modo, concluiu-se que o ensaio de absorção de água apesar de ser um ensaio simples de realizar e de obter informações acerca dos materiais, torna-se necessário que haja um método preciso e rigoroso, baseado em estudos de possíveis influências, como por exemplo o modo de impermeabilização, sobre os resultados obtidos.

2.5.3. NCR

O National Research Council (NCR) do Canadá, em 2002, efectuou um estudo (*“Effect of Surface Temperature on Water Absorption Coefficient of Building Materials”*) de forma a avaliar o efeito no coeficiente de absorção de água nos revestimentos exteriores estando expostos a diferentes temperaturas (Mukhopadhyaya *et al.*, 2002). Sendo o coeficiente de absorção de água a propriedade do material responsável pela transferência de humidade no seu interior, é nos vários elementos que envolvem os edifícios, nomeadamente nos revestimentos exteriores, que esta propriedade deve ser avaliada. Os diversos componentes que envolvem os edifícios estão expostos a vários regimes de temperatura. É esta variação de temperatura a que os revestimentos exteriores estão sujeitos e a sua influência no coeficiente de absorção de água e no coeficiente de difusividade hídrica que foram estudados.

Os materiais testados foram um tipo madeira de pinho e tijolo de barro vermelho, através do ensaio de absorção de água, seguindo o procedimento descrito na CEN/TC 89/WG10 N70 (1994) *“Thermal performance of buildings and building components – Determination of water absorption coefficient”*, e tendo quatro níveis de temperatura na superfície dos materiais. O coeficiente de difusividade hídrica foi também avaliado pela expressão (16).

Os níveis de temperatura pretendidos (3 ° C, 12 ° C, 21 ° C e 35 ° C) foram obtidos através do aumento e manutenção da temperatura da água líquida em contacto com a superfície dos provetes. Os intervalos de temperatura escolhido estão muito próximas do intervalo mínimo e máximo previsto no Norte da América.

Foram ensaiados seis provetes de cada material para as quatro temperaturas distintas. Ao fazer uma análise inicial às curvas de absorção de água obtidas para cada material, foi possível observar algumas características do processo de absorção de água (Figura 2.21).

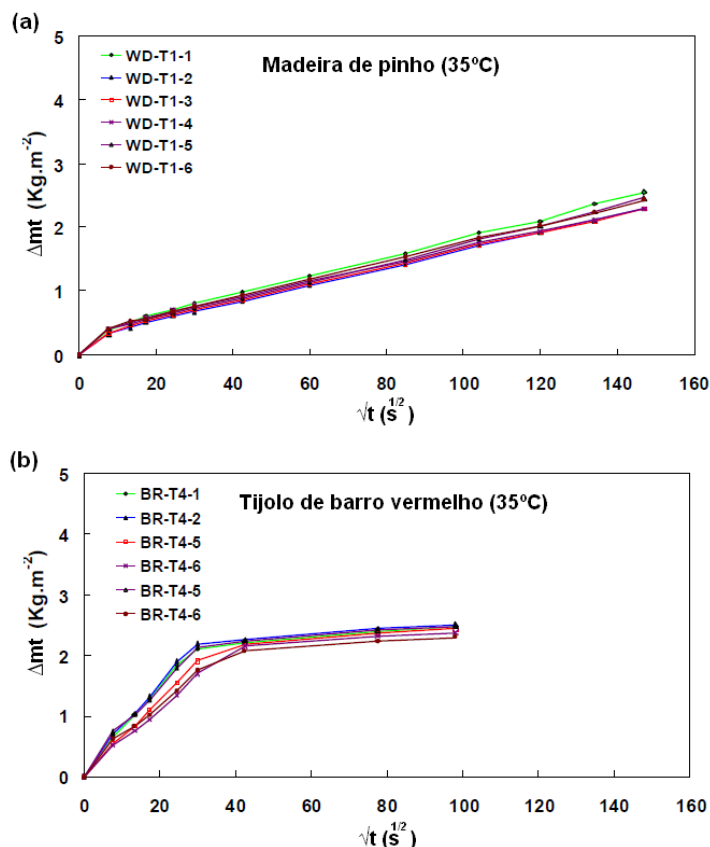


Figura 2.21 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo à temperatura de 35°C: (a) madeira de pinho e (b) tijolo de barro vermelho (adaptado de Mukhopadhyaya *et al.*, 2002)

No caso dos tijolos de barro vermelho, a forma das curvas mostram as duas fases distintas do processo de absorção de água (Figura 2.21 (b)). No caso da madeira de pinho, a segunda fase do processo ainda não foi atingido, embora o ensaio tenha sido o mais longo (Figura 2.21 (a)). O consumo de água é mais lento, e por isso também tem o mais baixo valor de A_w (Figura 2.22).

A variabilidade observada da curva de consumo de água nos seis provetes testados, neste estudo, foi muito menor na madeira de pinho do que no tijolo de barro vermelho. Isto pode ser devido ao grau de homogeneidade associados aos materiais. Da análise das curvas e dos coeficientes de absorção de água conclui-se que o barro vermelho tem o valor mais elevado e a madeira de pinho o valor mais baixo de A_w (Figura 2.22).

As figuras a seguir mostram a influência da temperatura nos coeficientes A_w e D_w nos materiais em estudo.

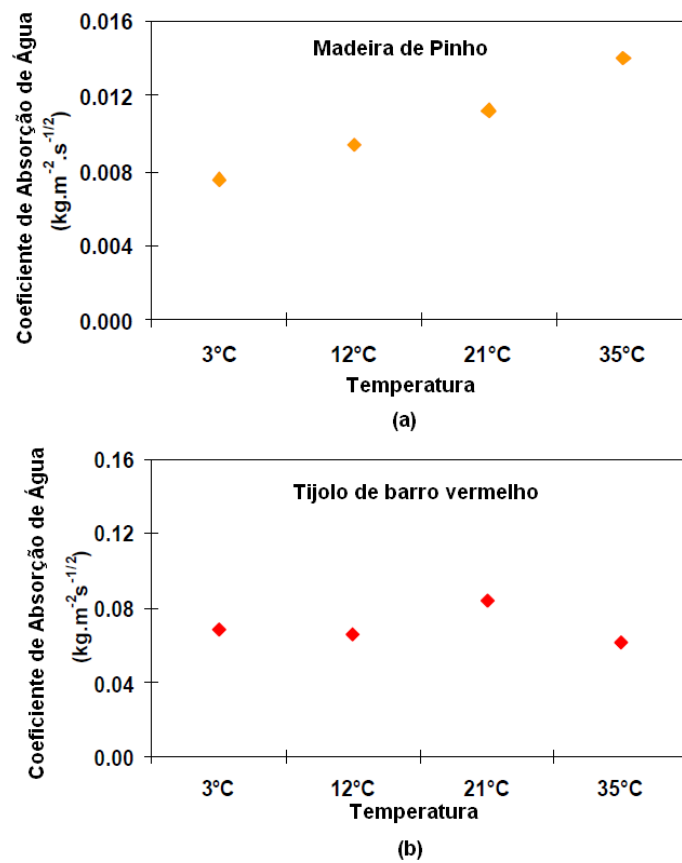


Figura 2.22 – Coeficientes de absorção de água à temperatura de 3,12,21 e 35 $^{\circ}\text{C}$: (a) madeira de pinho e (b) tijolo de barro vermelho (adaptado de Mukhopadhyaya *et al.*, 2002)

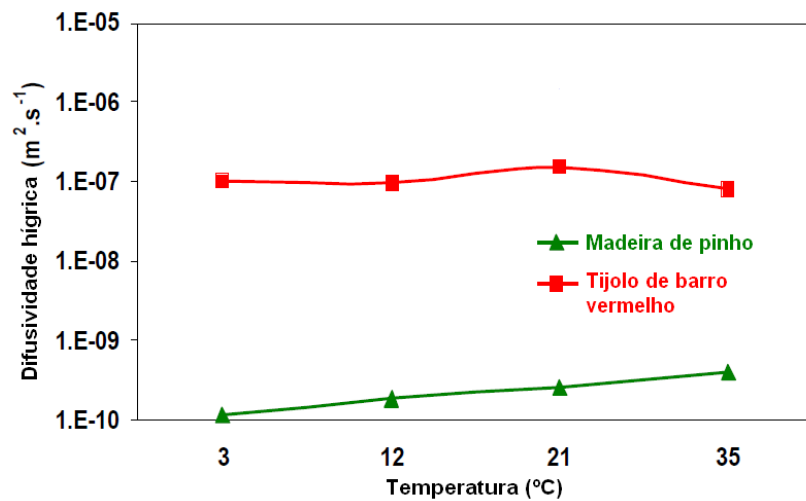


Figura 2.23 – Efeitos da temperatura nos coeficientes de difusividade higríca (adaptado de Mukhopadhyaya *et al.*, 2002)

É visível um claro efeito da temperatura no coeficiente de absorção de água e de difusividade hídrica na madeira de pinho, enquanto que no tijolo de barro vermelho não afecta. Deste trabalho, e apesar de ser necessário realizar mais estudos sobre o efeito da temperatura nestes coeficientes, concluiu-se que:

- A temperatura na superfície do material tem efeito sobre a absorção de água em certos materiais de construção;
- Há indícios que magnitude do efeito da temperatura na superfície no coeficiente de absorção de água pode estar relacionada com as propriedades físicas inerentes ou propriedades de transporte dos materiais;
- Os coeficientes de absorção de água e de difusividade hídrica mais baixos (na ordem dos 10^{-10} m²/s neste estudo) são mais susceptíveis ao efeito da variação da temperatura na superfície;
- Os coeficientes de absorção de água e de difusividade hídrica maiores (na ordem dos 10^{-7} m²/s neste estudo) são menos ou nada susceptíveis ao efeito da variação da temperatura na superfície;
- Simples ensaios de absorção de água realizados cuidadosamente em laboratórios podem identificar o efeito da temperatura no coeficiente de absorção de água dos materiais de construção.

2.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo pretendeu apresentar uma síntese do conhecimento relevante para o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

O estudo da transferência de humidade na fase líquida revelou que nos materiais de construção porosos esta ocorre essencialmente devido à capilaridade. A aplicação directa das leis físicas que regem este fenómeno é impraticável sendo necessário fazer uma avaliação do fenómeno a nível macroscópico, através de coeficientes indicadores do comportamento dos materiais face ao contacto directo com a água no estado líquido. Estes coeficientes são os denominados de coeficiente de absorção de água ou de capilaridade (A_w ou C) e o coeficiente de ascensão capilar (B), sendo este último o menos utilizado.

Um material que permite a transferência de água no seu interior, quando em contacto directo com água no estado líquido, tende a variar a sua massa ao longo do tempo, sendo a relação entre a massa de água absorvida por área do material em contacto directo com a água e a raiz quadrada do tempo que permite determinar A_w . Na fase inicial do processo, a curva de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo, produz uma recta, cujo declive corresponde ao coeficiente de absorção de água, A_w . Quando o material permanece em contacto com a água e esta surge na superfície, o processo de absorção de água devido à capilaridade e viscosidade findou, sendo agora o processo mais lento e devido à dissolução do ar aprisionado nos poros do material após a estabilização da saturação capilar. O teor de humidade presente no material na transição das duas fases do processo corresponde ao teor de humidade de saturação capilar, w_{cap} .

Existem várias normas disponíveis que permitem determinar o coeficiente de absorção de água, havendo sido descritas três delas (uma das quais permite determinar o coeficiente de capilaridade). O procedimento adoptado em cada uma delas é semelhante, sendo os aspectos relacionados com o modo de preparação dos provetes e intervalos de tempo de pesagens que diferem.

Para além de A_w e w_{cap} , o estudo da transferência de água na fase líquida revelou outra propriedade hídrica importante deste processo, o coeficiente de difusividade hídrica (D_w), que descreve o

transporte de água nos materiais de construção porosos. A sua determinação experimental é complexa e cara, devido ao facto de se ter que determinar os perfis do teor de humidade em diferentes instantes de tempo. Como tal, foram desenvolvidos estudos que relacionavam o coeficiente de absorção de água e o teor de humidade de saturação capilar no cálculo de D_w . Em 1993, Krus e Künzel chegaram a uma relação (expressão 16), que permite determinar D_w de forma simples, sendo necessário apenas conhecer A_w e w_{cap} .

Dos estudos contidos nesta dissertação verifica-se a aplicação da expressão simplificada de Krus e Künzel para o cálculo de D_w . Em ambos os estudos procede-se à determinação de algumas propriedades hígricas em materiais de construção, tendo contudo objectivos diferentes. O estudo realizado por Kumaran veio confirmar a simplificação no cálculo de D_w ; o Projecto Hamstad pretendeu determinar a precisão dos métodos utilizados na determinação de A_w e w_{cap} em diferentes laboratórios; o estudo apresentado do NCR pretendeu analisar o efeito nos coeficientes de absorção de água e de difusividade hídrica em revestimentos exteriores expostos a diferentes temperaturas.

3 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

3.1. MATERIAIS TESTADOS

Os ensaios realizados no âmbito desta dissertação procuraram caracterizar o coeficiente de absorção de água e o teor de humidade de saturação capilar em provetes de gesso projectado (Figura 3.2 a), placas de poliestireno extrudido (XPS) (Figura 3.1), reboco com poliestireno expandido (EPS) (Figura 3.1) e reboco com cortiça (Figura 3.2 b).

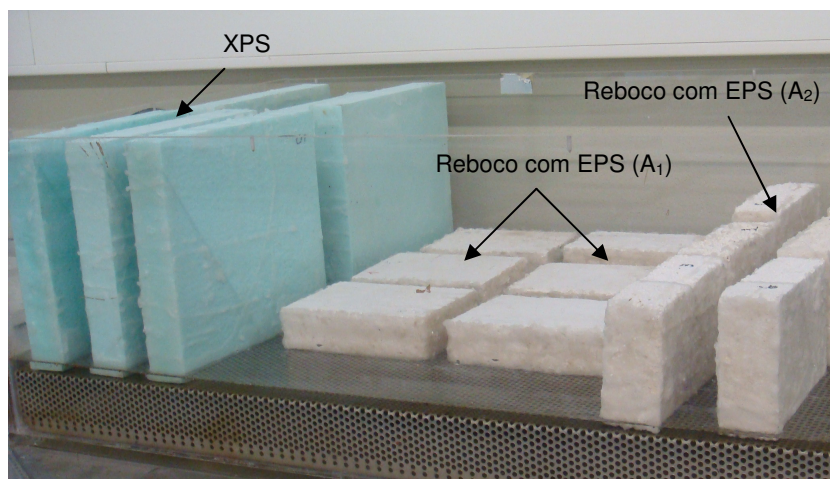


Figura 3.1 – Provetes de XPS e de reboco com EPS



(a)



(b)

Figura 3.2 – Provetes de gesso projectado (a) e de reboco com cortiça (b)

Os provetes foram preparados através de amostras já existentes no laboratório de física das construções (LFC) da FEUP.

Para o ensaio de absorção de água, a norma exige que os provetes tenham uma área mínima (área em contacto com a água, A) de 50 cm^2 e uma espessura que seja a total do produto a testar. A espessura dos provetes utilizada foi a espessura total da amostra em ambos os materiais.

Tendo em conta a área mínima exigida pela norma, tentou-se produzir provetes de maneira a que este requisito fosse cumprido. As dimensões escolhidas para os provetes são as presentes no Quadro 3.1. Para o reboco com EPS e o reboco com cortiça, foram preparados provetes com uma área de contacto com a água diferentes e por esse motivo surge no quadro e na Figura 3.1 e 3.2 as designações de A_1 e A_2 .

Quadro 3.1– Dimensões nominais dos provetes

Material	Dimensões (cm)			$A \text{ (cm}^2\text{)}$
	b	d	h	bxd
Gesso Projectado	2	25	10	50,0
XPS	4	21	21	84,0
Reboco com EPS				
A_1	10	15	4,5	150,0
A_2	4,5	15	10	67,5
Reboco com Cortiça				
A_1	10	15	4,5	150,0
A_2	4,5	15	10	67,5

Ao cortar os provetes, com as dimensões acima referidas, houve uma perda residual de material produzida pelo corte e pelos instrumentos utilizados para o seu fraccionamento, pelo que os provetes têm dimensões diferentes às indicadas no Quadro 3.1.

Apesar dos provetes não terem as dimensões inicialmente previstas, todos têm a área mínima exigida pela norma, à excepção dos provetes de gesso projectado, cuja área ficou um pouco aquém do exigido, conforme é possível verificar no Quadro 3.2. Todos os provetes foram medidos individualmente com o paquímetro.

No mínimo era necessário preparar três provetes e se a área em contacto com a água fosse inferior a 100 cm^2 , teriam de ser utilizados no mínimo seis provetes. Optou-se, no entanto, por preparar e ensaiar seis provetes de cada material, independentemente da sua área.

As dimensões dos provetes do ensaio de absorção de água e respectiva área A são as indicadas no quadro seguinte.

Quadro 3.2 – Dimensões efectivas dos provetes

Material	Provete	Dimensões (mm)		A (cm ²)
		b	d	
GP	1	16,56	249,05	41,24
	2	19,22	249,73	48,00
	3	17,66	249,60	44,08
	4	16,90	251,01	42,42
	5	15,22	249,64	38,00
	6	14,18	249,79	35,42
XPS	1	41,61	208,63	86,81
	2	39,87	208,85	83,27
	3	40,23	209,49	84,28
	4	40,31	200,15	80,68
	5	39,36	209,69	82,53
	6	40,38	209,77	84,71
R EPS	A ₁	1	98,29	147,28
		2	98,66	144,66
		3	98,57	146,58
		4	86,63	150,11
		5	97,38	144,64
		6	99,73	144,66
R EPS	A ₂	1	44,63	148,24
		2	45,30	145,85
		3	44,88	145,30
		4	42,36	146,23
		5	42,74	147,82
		6	41,53	145,20
RC	A ₁	1	99,38	147,69
		2	97,60	147,45
		3	97,97	143,21
		4	93,35	153,63

Quadro 3.2 – Dimensões efectivas dos provetes (continuação)

Material	Provete	Dimensões (mm)		A (cm ²)
		b	d	
RC	A ₁	5	88,89	144,12
		6	97,63	149,09
	A ₂	1	39,95	146,84
		2	42,68	152,08
		3	42,57	151,80
		4	42,26	152,22
		5	41,80	150,80
		6	42,84	150,73

No ensaio para determinar o teor de humidade de saturação capilar, foram usados provetes com dimensões inferiores às do ensaio de absorção de água. Para este ensaio foram preparados seis provetes de cada material. Não sendo dito nada quanto à dimensão mínima dos provetes no procedimento adoptado, as dimensões escolhidas foram as indicadas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Dimensões nominais dos provetes

Material	Dimensões (cm)		
	b	d	h
Gesso Projectado	6	7	2
XPS	5	6	4
Reboco com EPS	6	7	4,5
Reboco com Cortiça	5	6	4,5

Com a perda de material no corte dos provetes, as suas dimensões efectivas são as que constam no Quadro 3.4, assim como o respectivo volume.

Quadro 3.4 – Dimensões efectivas dos provetes

Material	Provete	Dimensões (mm)			V (cm ³)
		b	d	h	
GP	1	60,04	70,13	19,01	80,04
	2	59,27	71,46	19,33	81,87
	3	61,42	69,75	18,58	79,60
	4	59,43	71,31	18,63	78,95
	5	60,20	71,65	19,25	83,03
	6	60,59	70,05	19,15	81,28
XPS	1	50,71	59,54	39,61	119,59
	2	49,69	59,60	40,17	118,96
	3	49,36	59,44	39,47	115,80
	4	49,33	60,13	39,51	117,20
	5	49,44	60,17	40,44	120,30
	6	50,84	59,75	41,91	127,31
R EPS	1	60,57	69,79	42,49	179,61
	2	61,19	69,73	43,09	183,86
	3	58,85	69,77	42,85	175,94
	4	58,61	71,93	42,68	179,93
	5	61,85	69,48	42,79	183,88
	6	59,11	70,90	42,90	179,79
RC	1	49,61	58,01	42,62	122,66
	2	58,19	58,93	44,29	151,88
	3	55,00	59,81	40,87	134,44
	4	58,65	59,90	41,13	144,50
	5	54,80	55,02	43,77	131,97
	6	50,01	59,23	42,62	126,24

3.2. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

3.2.1. OBJECTO

O ensaio de absorção de água por imersão parcial tem como objectivo determinar o coeficiente de absorção de água, A_w . O coeficiente é obtido a partir da curva da massa ou volume de água absorvida por unidade de área de absorção, em função da raiz quadrada do tempo. Foram utilizados como objecto de estudo quatro tipos de materiais.

3.2.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de absorção de água foram realizados de acordo com a norma EN ISO 15148 (CEN, 2002). As condições de temperatura e humidade relativa do laboratório onde se realizaram os ensaios eram de aproximadamente 20°C e 60% respectivamente.

Os provetes, antes de serem ensaiados, foram colocados numa câmara climática, com o propósito de estabilizarem a sua massa a uma determinada temperatura e humidade relativa. A massa dos provetes considerou-se estabilizada quando a diferença de massa era inferior a 0,1%, num período mínimo de 24 horas. A estabilização da massa foi feita a uma temperatura e humidade relativa de 20°C e 50%, respectivamente. A Figura 3.3 mostra os provetes no interior da câmara aquando a estabilização da sua massa.

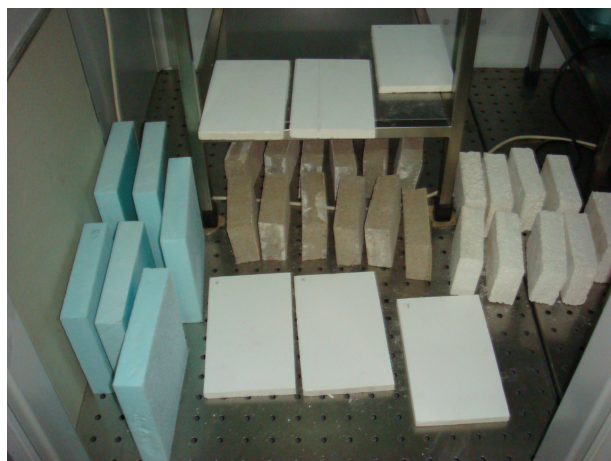


Figura 3.3 – Provetes no interior da câmara climática

Com o auxílio de um paquímetro mediu-se (Figura 3.4), com uma precisão de 0,01 milímetros, as dimensões dos provetes para determinar a área de contacto com a água (A).



Figura 3.4 – Medição de um provete com auxílio do paquímetro

Com a massa estabilizada e uma vez conhecida a área dos provetes que está em contacto com a água, procedeu-se à impermeabilização das faces laterais dos provetes. Esta impermeabilização revela-se necessária, uma vez que permite a existência de apenas um fluxo unidireccional. Executou-se este procedimento de impermeabilização, utilizando parafina que, depois de derretida em banho-maria, e com a ajuda de uma colher, foi aplicada às faces laterais dos provetes. A Figura 3.5 apresenta o resultado deste procedimento e o aspecto de um dos provetes, já com as faces impermeabilizadas.



Figura 3.5 – Provete com face impermeabilizada

Depois de impermeabilizados, os provetes foram pesados e registou-se a sua massa inicial como sendo m_i . A partir deste ponto, o provete considerou-se adequado à realização do ensaio propriamente dito.

Encheu-se a tina com água, que já possuía um suporte que impedia os provetes de estarem em contacto com o fundo da mesma, e verificou-se se esta se encontrava nivelada, caso contrário teria de se efectuar as devidas correcções. Estando a tina nivelada, imergiu-se parcialmente os provetes, havendo a registar que a altura da água era de aproximadamente (5 ± 2) mm acima da base dos provetes. As figuras seguintes registam precisamente provetes de XPS e de reboco com EPS imersos, sendo possível visualizar com maior pormenor na figura do lado direito a altura da água.

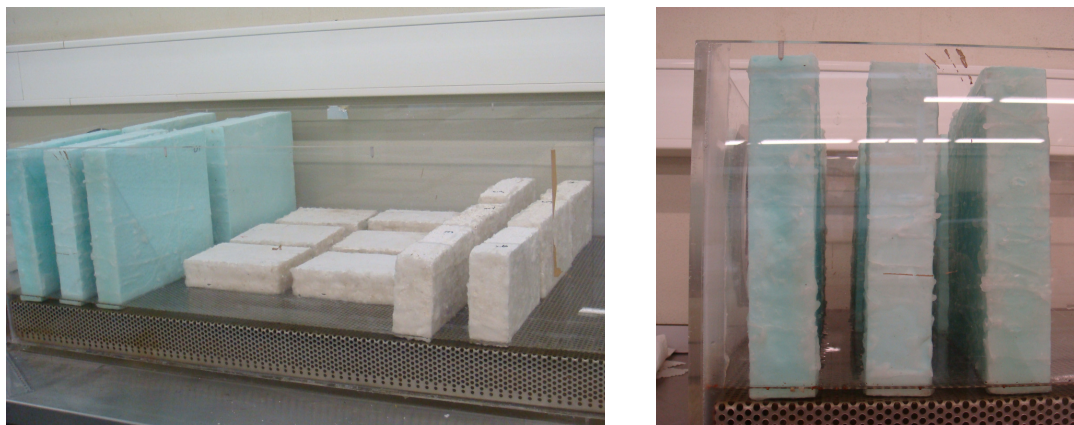


Figura 3.6 – Provetes de XPS e de reboco com EPS durante o ensaio

Depois de colocados em posição de repouso os provetes foram retirados da água, cuidadosamente, após cinco minutos da imersão, a sua base foi limpa com papel absorvente de modo a eliminar o excesso de água e a consequente formação de gotículas. Cada provete foi pesado com uma precisão de $\pm 0,1\%$ da sua massa.

Este procedimento de imersão, retirada, secagem da superfície e pesagem foi repetido após a primeira imersão, aos tempos de 20 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, e 8 horas, efectuando-se ainda mais duas pesagens, abrangendo um período de 24 horas inclusive, obtendo-se assim uma série de massas “m” por tempo “t” (m_t).

O nível de água foi mantido sensivelmente constante no decorrer dos ensaios, através da reposição de água quando necessário.

É de referir que, na execução deste procedimento, foram ensaiados 6 provetes ao mesmo tempo, e que as operações de secagem e pesagem foram feitas individualmente para cada provete, retornando logo de seguida à água. A ordem pela qual se efectuaram estas operações foi sempre a mesma, isto é, o primeiro provete a ser pesado, foi sempre o primeiro provete nos vários tempos estipulados, e assim sucessivamente. Estas operações duraram ao todo, aproximadamente 3 minutos (para os 6 provetes).

Após cada pesagem, calculou-se a massa de água absorvida (Δm) pela área do provete em contacto com a água (A), através da expressão (6).

A partir dos valores de Δm traça-se, para cada provete ensaiado, a curva de absorção de água que expressa a quantidade de água absorvida por unidade de área (kg/m^2) em função da raiz quadrada do tempo em segundos ($\sqrt{t}$). O coeficiente de absorção de água corresponde ao declive do troço inicial da curva de absorção.

Foram realizados os ensaios de absorção de água aos materiais indicados no subcapítulo anterior apresentando-se o detalhe e a análise dos resultados no capítulo 4 do presente trabalho.

Durante a realização deste ensaio, em três ocasiões, observou-se água à superfície de alguns provetes indiferenciados. Todos os provetes de reboco com EPS (6 provetes), designados como R EPS A₁, no final do ensaio, continham água à superfície. Na Figura 3.7, o contraste existente na superfície do provete é visível a olho nu, sendo que a zona mais escura corresponde à água à superfície. No provete de reboco com cortiça (R C), A₁ 1, também surgiu água à superfície no fim do ensaio, como é possível constatar pela Figura 3.7 (figura do lado direito).

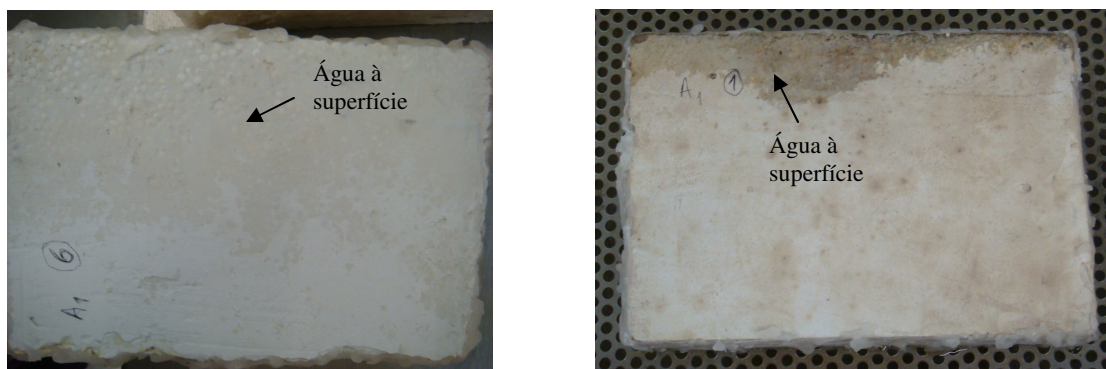


Figura 3.7 – Superfície dos provetes A₁ 6 de R EPS (lado esquerdo) e A₁ 1 de R C no fim do ensaio (lado direito)

Nos provetes de gesso projectado, provetes 2 e 5, quatro horas após o início do ensaio, já era possível observar água na superfície sendo que, o provete 2 era o que apresentava uma mancha maior de água (Figura 3.8). Após 8 horas de ensaio, já todos os provetes apresentavam água na superfície. Há também que mencionar que apesar de a norma referir que o ensaio termina antes das 24 horas no caso de se verificar o surgimento de água na superfície, este teve a duração total de 24 horas (um dia).

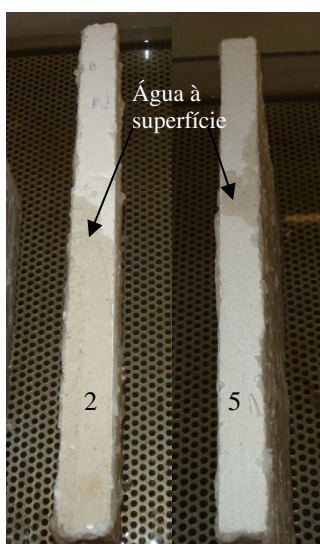


Figura 3.8 – Superfície dos provetes 2 e 5, 4h após o início do ensaio

3.2.3. EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para a estabilização da massa dos provetes foi utilizada a câmara climática, modelo FitoClima 3600 EDTU (Figura 3.9). A câmara climática permite o controlo da temperatura e da humidade e tem, como característica principal, a possibilidade de acesso ao seu interior pelo operador do ensaio, sendo dessa forma possível pesar os provetes sem grande perturbação da temperatura e da humidade relativa interiores. O controlo das condições de temperatura e humidade relativa no interior da câmara é possível, através de uma unidade de controlo sensível ao toque (*touch screen*).



Figura 3.9 – Câmara de ensaios climática FitoClima 3600 EDTU

Foram utilizadas duas balanças durante o ensaio, ambas de marca Precisa, uma 800M e outra de 5000D-12000G (Figura 3.10). A primeira com uma precisão de 0,001g e a segunda de 0,1g. Foi necessário utilizar a segunda balança para os provetes de gesso projectado, pois estes excediam o peso máximo que a primeira balança consegue pesar. O controlo do tempo, para se efectuarem as pesagens, conforme consta na norma, foi feito com um cronómetro (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Balança *Precisa 800M* e cronómetro

Para a impermeabilização dos provetes, foi necessário derreter a parafina em banho-maria, pelo que foram usados vários utensílios como uma placa eléctrica, um tacho e um fervedor, como mostra a Figura 3.11.



Figura 3.11 – Utensílios utilizados para derreter a parafina

O recipiente utilizado para a imersão dos provetes foi uma tina de ensaio. Esta tina, como já se referiu, possuía um suporte que impede que os provetes estejam em contacto com o fundo desta (Figura 3.12).

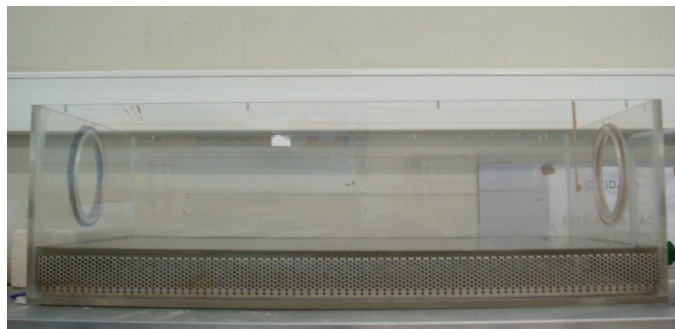


Figura 3.12 – Tina de ensaio

Na medição da área dos provetes em contacto com a água, foi utilizado um paquímetro digital (Figura 3.13), cuja precisão é de 0,01 milímetros. Este paquímetro permite assim, uma leitura rápida e fácil das dimensões que se pretende determinar.



Figura 3.13 – Paquímetro digital

Para o corte dos provetes foi necessário recorrer a vários instrumentos, tanto de corte como de medida. Foi assim usada uma fita métrica, duas serras metálicas e uma lima como consta na figura seguinte.



Figura 3.14 – Instrumentos de corte e medida

3.3. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE DE SATURAÇÃO CAPILAR

3.3.1. OBJECTO

O objectivo deste ensaio é determinar o teor de humidade de saturação capilar, w_{cap} , em kg/m^3 , dos mesmos materiais ensaiados anteriormente.

3.3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento do ensaio para determinar o teor de humidade de saturação em kg/m^3 , foi adaptado do *Nordtest Method*, NT BUILD 472 (Nordtest, 1996), que permite determinar o grau de saturação capilar. Este ensaio pode ser dividido em duas partes: numa primeira fase leva-se o provete à saturação, e na segunda fase o provete é limpo e seco em estufa.

Foram preparados seis provetes de cada material, com dimensões inferiores aos usados no ensaio de absorção de água. Depois de cortados, mediu-se com rigor as dimensões de cada provete com o paquímetro, obtendo-se assim o volume de cada um.

Colocaram-se os provetes num tabuleiro de plástico e depois encheu-se o tabuleiro com água, até que o nível de água fosse de 2 mm acima do provete. Deixaram-se ficar os provetes mergulhados na água por um determinado período de tempo (24 horas), mantendo constante o nível da água, repondo-a sempre que necessário. A Figura 3.15 retrata o momento em que os provetes de gesso projectado se encontravam mergulhados em água.



Figura 3.15 – Provetes de gesso projectado mergulhados em água

Após submersos durante 24 horas em água, os provetes foram pesados, e registada a sua massa. Depois, efectuaram-se pesagens num intervalo de tempo menor, aproximadamente de 4 em 4 horas. Quando em duas pesagens consecutivas a diferença de massa era igual ou inferior a 1%, o provete tinha atingido o equilíbrio, e encontrava-se saturado. Designou-se então esta massa por m_{cap} . Ao fim de três pesagens, todos os provetes já estavam saturados, à excepção dos provetes de XPS.

É importante salientar que os provetes de gesso projectado não estiveram 24 horas mergulhados em água, pois atingiram a saturação muito tempo antes.

Antes das pesagens os provetes foram limpos com papel absorvente, para retirar o excesso de água e a formação de gotículas.

Depois de saturados todos os provetes e uma vez determinada a respectiva massa, m_{cap} , procedeu-se à segunda parte do ensaio.

Os provetes foram postos em tabuleiros de inox e colocados na estufa a secar a uma temperatura próxima dos 105°C (Figura 3.16). Após 15 horas, aproximadamente, os provetes foram pesados. Passadas 4 horas foram novamente pesados, e a diferença entre estas duas pesagens foi inferior a 0,5%, ou seja, segundo o procedimento adoptado, os provetes já estavam secos. Esta massa é designada por m_0 , e corresponde à massa do provete seco.



Figura 3.16 – Provetes no interior da estufa

Tendo os valores de m_{cap} (kg) e m_0 (kg), determinou-se w_{cap} (kg/m³) para cada provete, de acordo com a seguinte expressão,

$$w_{cap} = \frac{m_{cap} - m_0}{V} \quad (19)$$

sendo V o volume do provete em m³.

Fazendo a média aritmética entre os seis valores de cada material, determinou-se o w_{cap} dos materiais em estudo. Os resultados do ensaio são apresentados no capítulo seguinte.

3.3.3. EQUIPAMENTO UTILIZADO

Neste ensaio foi utilizada a balança da marca Precisa 800 M, o paquímetro digital e os mesmos instrumentos de corte utilizados no ensaio de absorção de água. Foi utilizado ainda um tabuleiro de

plástico para colocar os provetes imersos em água e dois tabuleiros em inox quando estes foram colocados na estufa.

Na secagem dos provetes foi usada uma estufa (Figura 3.17), que permitiu secar os provetes à temperatura de 105°C.



Figura 3.17 – Estufa

4

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

4.1.1. INTRODUÇÃO

Dos ensaios de absorção de água obteve-se um conjunto de pesagens, nos intervalos de tempo definidos no capítulo 3. Ao calcular a massa de água absorvida (Δm) pela área do provete em contacto com a água (A), através da expressão (6), obteve-se um conjunto de valores que permitiu traçar a curva de absorção de água, em função da raiz quadrada do tempo em segundos ($\sqrt{t}$). As curvas obtidas podem ser do tipo A (Figura 2.12 ou Figura 2.13) ou do tipo B (Figura 2.14) como define a norma.

Uma vez traçadas as curvas para todos os provetes, determinou-se o coeficiente de absorção de água, A_w , para cada um deles. Tendo presente que o coeficiente de absorção de água corresponde à inclinação do troço inicial da curva de absorção, foi adicionada a cada curva uma linha de tendência do tipo linear, com o auxílio do programa Excel. O programa Excel fornece, automaticamente, a equação da recta de regressão linear e o coeficiente de correlação, R^2 . Da equação de recta do tipo $y=mx+b$, retirou-se o valor de m , correspondente à inclinação da mesma, ou seja, o coeficiente de absorção de água. O coeficiente de correlação linear, mede o grau de associação linear entre as duas variáveis, Δm e $\sqrt{t}$, e quanto mais próximo da unidade estiver, mais adequado e correcto será o ajuste.

Os resultados dos ensaios são os expostos no capítulo 4.1.2. Numa primeira fase são apresentados os valores de Δm , em função da raiz quadrada do tempo, em segundos, e as curvas de absorção de água dos provetes ensaiados. Na segunda fase, e a título de exemplo, é apresentada a curva de absorção de água de um provete, a linha de tendência linear e a respectiva equação da recta do troço inicial da curva. Através do cálculo da média dos valores parciais do coeficiente de absorção de água, obtém-se o valor dos coeficientes de absorção dos materiais em estudo.

4.1.2. RESULTADOS DO GESSO PROJECTADO

No ensaio de gesso projectado obtiveram-se os resultados indicados no Quadro 4.1, traduzidos graficamente na Figura 4.1.

Quadro 4.1 – Resultados de Δm nos provetes de GP

$t \text{ (s}^{1/2}\text{)}$									
Provetes		17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	169,71	289,83	293,94
$\Delta m \text{ (kg/m}^2\text{)}$	1	5,537	11,744	20,861	33,590	43,677	51,778	52,236	52,188
	2	7,125	13,292	22,480	34,626	43,814	47,398	47,689	47,710
	3	6,670	12,523	22,028	35,368	45,600	51,702	52,156	52,133
	4	5,660	11,035	19,757	32,062	41,775	50,143	50,497	50,403
	5	8,152	14,368	23,962	36,779	46,807	51,149	51,597	51,465
	6	7,870	13,546	22,590	36,039	46,005	51,144	51,454	51,398

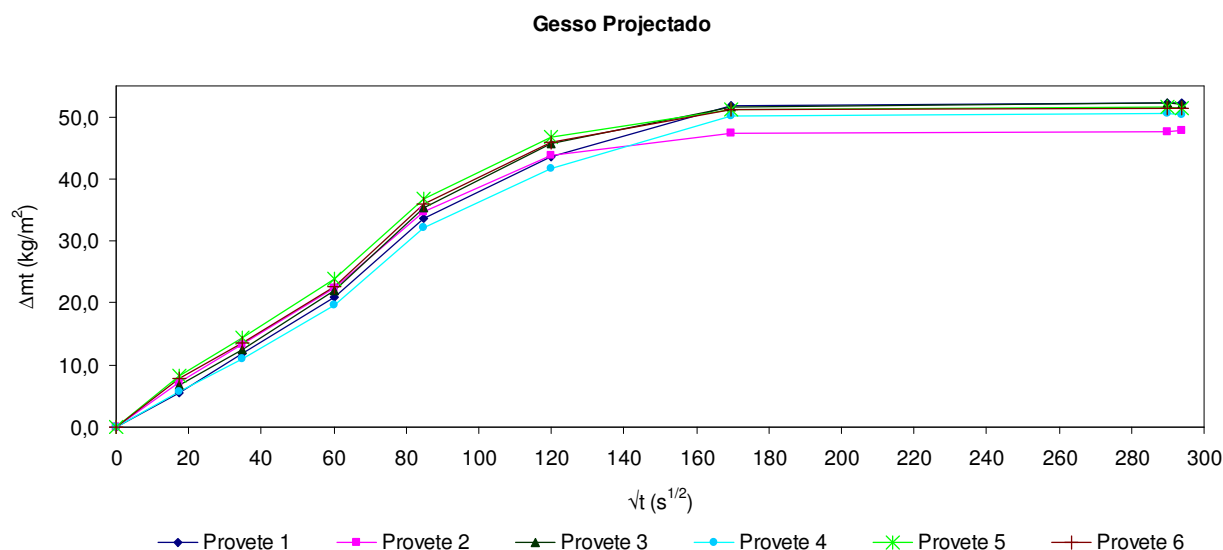


Figura 4.1 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de GP

Da análise da figura, é possível verificar que as curvas de absorção de água relativas aos provetes objecto do presente ensaio, possuem uma evolução muito semelhante.

É possível constatar as duas fases distintas do processo de absorção de água, fases essas melhor descritas no capítulo 2. Da análise da figura acima identificada, verifica-se igualmente, que aos $169,71 \text{ s}^{1/2}$ (cerca de 8 horas), Δm manteve-se sensivelmente constante em todos os provetes até o final do ensaio, constituindo este tramo a segunda fase do processo de absorção em análise.

Visto que o valor de A_w é obtido através da inclinação do troço inicial da curva, que corresponde à fase inicial do processo, o ensaio poderia ter finalizado de imediato, aquando da detecção de água na superfície dos provetes (4 horas após o início do ensaio nos provetes 2 e 5, e 8 horas nos restantes, como foi descrito no capítulo anterior), pelo facto deste indicador apontar desde logo, para o início da segunda fase do processo.

Sendo assim, o valor de A_w é determinado para um período de tempo inferior a 24 horas (um dia).

Os resultados parciais dos ensaios dos provetes de gesso projectado e a respectiva equação do troço inicial da curva, correspondente à regressão linear, são os expostos no anexo A1. Na Figura 4.2, é apresentado, a título de exemplo, os resultados no provete 1. No traçado da linha de regressão linear, deste provete, considerou-se um intervalo de 8 horas de ensaio, ao contrário dos restantes, em que se considerou um intervalo de apenas 6 horas.

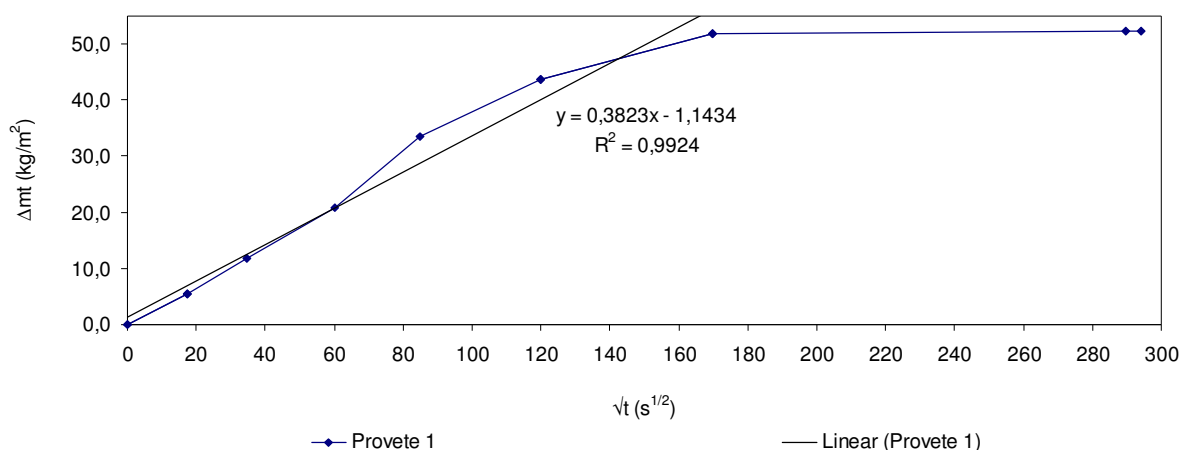


Figura 4.2 – Curva de absorção de água e respectiva regressão linear no provete 1 de GP

No quadro seguinte apresenta-se os valores de A_w de cada provete, assim como o coeficiente de correlação. Ao calcular a média dos 6 valores, obteve-se o valor do coeficiente de absorção de água do gesso projectado, sendo de $0,3816 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}$ no presente estudo.

Quadro 4.2 – Resultados do coeficiente de absorção de água no gesso projectado

Provete	A_w ($\text{kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}$)	Correlação R^2	A_w médio ($\text{kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}$)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
1	0,3823	0,9924	0,3816	0,0137	3,59
2	0,3732	0,9938			
3	0,3903	0,9940			
4	0,3586	0,9940			
5	0,3958	0,9941			
6	0,3895	0,9933			

4.1.3. RESULTADOS DO XPS

Dos ensaios efectuados aos provetes de XPS, obtiveram-se valores de Δm muito reduzidos, variando entre os $0,0029$ e os $0,128 \text{ kg/m}^2$, como é possível aferir no Quadro 4.3. Estes valores reduzidos relativos à quantidade de água absorvida, comprovam que a absorção de água por capilaridade é desprezável. Do que antecede, pode-se deduzir que o material XPS tem uma capacidade de resistência à água muito elevada, podendo ser considerado como impermeável.

As placas de poliestireno extrudido apresentam assim uma estrutura porosa fechada, uma vez que não houve absorção de água, ou seja, transferência de água no seu interior, ao longo do ensaio.

Observa-se também que, ao longo do ensaio, os valores de Δm vão oscilando, aumentando e diminuindo indiscriminadamente. Esta oscilação poderá ter como causa o modo como se procedia à operação de limpeza dos provetes, nomeadamente quanto à remoção do excesso de água e gotículas, antes de se iniciar a operação de pesagem. Apresentando o material XPS uma alta capacidade de resistência à água, o modo como se efectuou a operação de limpeza, exercendo uma maior ou menor pressão nos provetes, poderá ter originado tais oscilações de Δm .

O resultado gráfico deste ensaio (Figura 4.3), permite apenas aferir a resistência do XPS à absorção de água determinando, por conseguinte, que o coeficiente de absorção de água é nulo.

Quadro 4.3 – Resultados de Δm nos provetes de XPS

	Provetes	$t \text{ (s}^{1/2}\text{)}$							
		17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	150,00	274,95	293,94
$\Delta m \text{ (kg/m}^2\text{)}$	1	0,062	0,080	0,081	0,085	0,095	0,099	0,123	0,057
	2	0,054	0,031	0,043	0,045	0,081	0,058	0,097	0,050
	3	0,051	0,031	0,031	0,045	0,077	0,091	0,107	0,062
	4	0,097	0,085	0,086	0,082	0,098	0,098	0,128	0,088
	5	0,029	0,031	0,071	0,055	0,076	0,063	0,088	0,050
	6	0,084	0,056	0,073	0,086	0,086	0,093	0,123	0,082

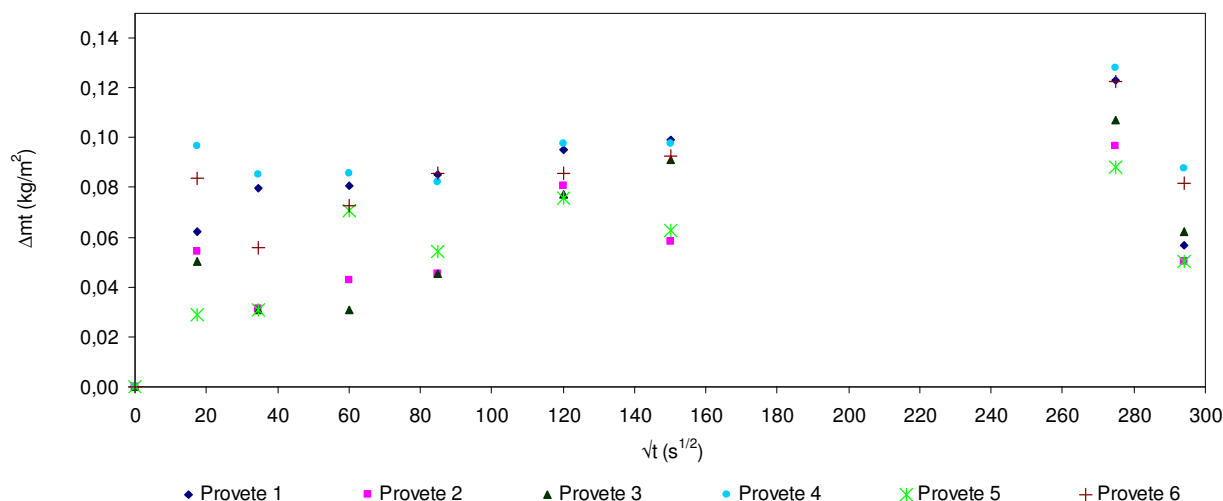


Figura 4.3 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de XPS

4.1.4. RESULTADOS DO REBOCO COM EPS

Para a determinação do coeficiente de absorção de água no reboco com EPS, foram ensaiados provetes com diferentes áreas em contacto com a água, que foram designadas por A_1 e A_2 , sendo A_1 maior que A_2 . Os quadros 4.4 e 4.5 apresentam os resultados dos ensaios (R EPS A_1 e R EPS A_2).

Quadro 4.4 – Resultados de Δm nos provetes de R EPS A_1

	Provetes	$t \text{ (s}^{1/2}\text{)}$							
		17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	169,71	285,55	293,94
$\Delta m \text{ (kg/m}^2\text{)}$	1	0,865	1,631	2,830	3,945	5,319	6,474	6,878	6,872
	2	0,945	2,157	3,597	4,881	6,312	6,822	6,941	6,926
	3	1,010	2,087	3,516	4,751	6,194	7,169	7,348	7,334
	4	0,958	1,708	2,989	4,267	5,823	7,045	7,439	7,467
	5	0,826	1,586	2,773	3,908	5,327	6,249	6,466	6,477
	6	0,585	1,427	3,059	4,451	5,935	6,395	6,856	6,855

Quadro 4.5 – Resultados de Δm nos provetes de R EPS A_2

	Provetes	$t \text{ (s}^{1/2}\text{)}$							
		17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	169,71	285,55	293,94
$\Delta m \text{ (kg/m}^2\text{)}$	1	1,235	2,088	3,354	4,543	6,116	8,056	11,813	12,056
	2	1,291	2,213	3,507	4,745	6,369	8,480	12,273	12,429
	3	1,270	2,071	3,253	4,432	5,958	8,030	11,873	12,058
	4	1,218	2,018	3,207	4,428	6,055	8,082	11,826	12,042
	5	1,372	2,228	3,525	4,804	6,463	8,686	12,779	12,968
	6	1,232	1,963	3,129	4,267	5,797	7,685	11,154	11,343

Nos provetes com área A_1 , Δm varia entre os 0,585 e os 7,467 kg/m² enquanto que nos provetes com área A_2 varia entre os 1,218 e os 12,968 kg/m².

É possível verificar que nos provetes A_1 , a partir das 8 horas (169,71s^{1/2}) de ensaio até ao fim, Δm mantém-se sensivelmente constante, enquanto que nos provetes A_2 , Δm vai aumentando. Da leitura dos valores de Δm é expectável o desenvolvimento diferente das curvas de absorção.

As curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo dos provetes de reboco com EPS, A_1 e A_2 , são as presentes nas figuras seguintes.

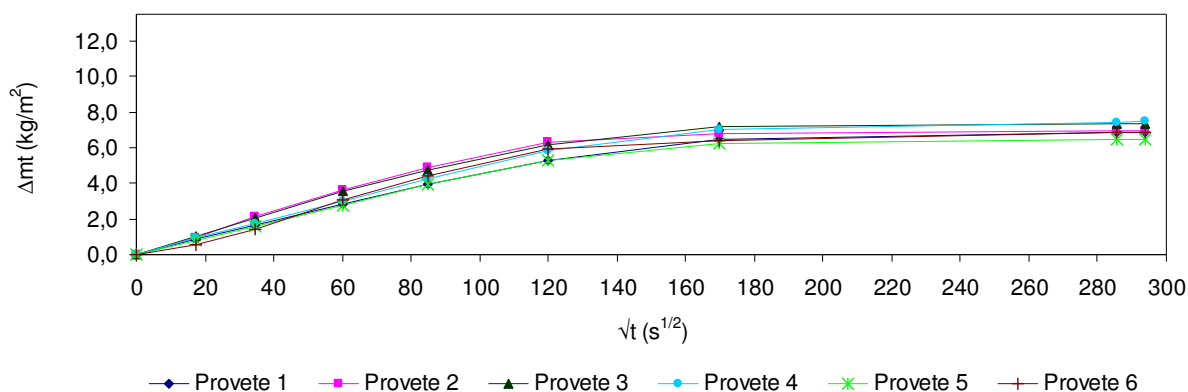


Figura 4.4 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de R EPS A₁

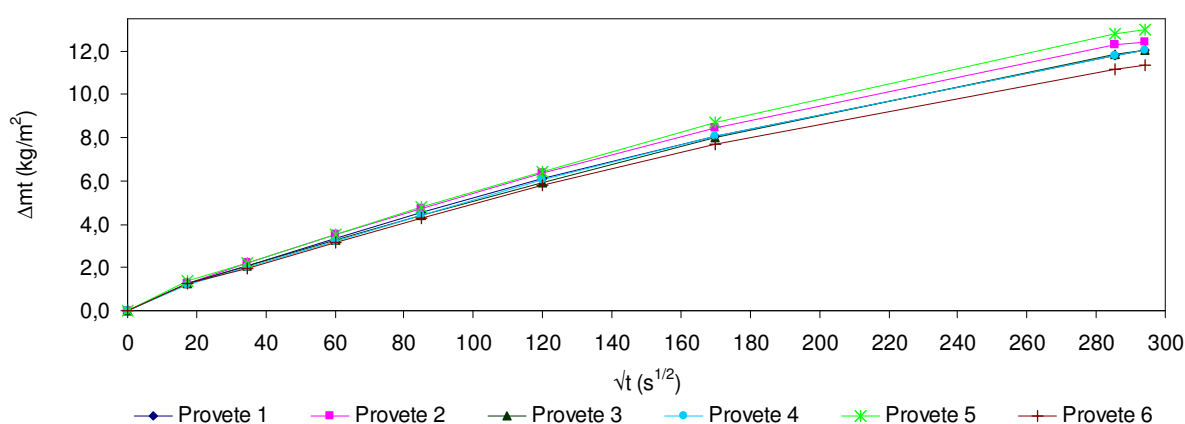


Figura 4.5 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de R EPS A₂

Ao observar as figuras verifica-se o diferente desenvolvimento das curvas nos provetes com área A₁ e A₂.

Tal como acontecia nos provetes de gesso projectado, nos provetes de R EPS A₁, é possível distinguir claramente as duas fases do processo de absorção de água por capilaridade. A segunda fase do processo ter-se-á iniciado pelo menos 8 horas após o início do ensaio, visto que, como já foi referido anteriormente, a partir daqui a quantidade de água absorvida mantém-se sensivelmente constante até ao fim do ensaio. A existência do tramo correspondente à segunda fase do processo (tramo de menor inclinação), vem comprovar o surgimento de água na superfície dos provetes no final do ensaio, conforme se referiu no capítulo anterior.

Quanto aos provetes de R EPS A₂ observando as curvas constata-se que ao fim de 24 horas a absorção de água é contínua, correspondendo à primeira fase do processo. Não se encontrando uma clara divisão entre as duas fases, é possível antever que pouco tempo antes do ensaio finalizar, se estivesse a iniciar a segunda fase, uma vez que os dois últimos valores medidos são bastante próximos. No entanto, só prolongando o ensaio seria possível comprovar, objectivamente, tal resultado o qual, não foi efectuado pela sua clara exiguidade, uma vez que já se possuía dados suficientes para determinar A_w.

De seguida, é apresentada na Figura 4.6, a curva de absorção de água e respectiva linha de tendência linear do provete 1 do R EPS A₁. Os restantes resultados gráficos vêm expostos no anexo A1. Em todos os provetes, para traçar a linha de regressão linear do troço inicial da curva, foi desprezado o valor de Δm correspondente às 8 horas de ensaio. Isto porque, desprezando esse valor, o ajuste da recta ao troço inicial da curva é melhor.

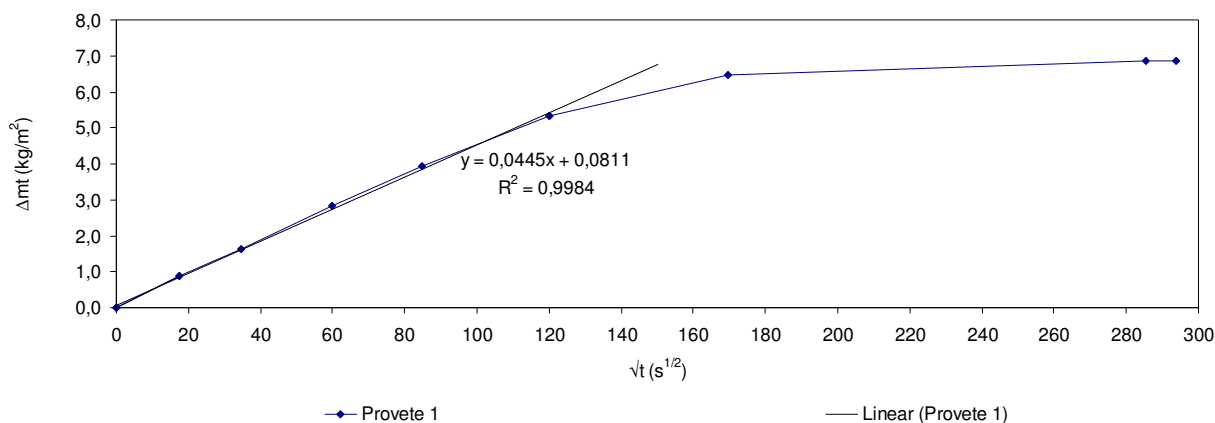


Figura 4.6 – Curva de absorção de água e respectiva regressão linear no provete 1 de R EPS A₁

Nos provetes de R EPS A₂ foram desprezados os dois últimos valores de Δm para determinar a inclinação da parte inicial da curva de absorção de água, pelo mesmo motivo supra referido, de facto se se desprezar os dois últimos valores, o ajuste torna-se melhor. A curva de absorção de água e respectivo ajuste linear, presente na figura seguinte, pertencem ao provete 1, encontrando-se os restantes resultados no anexo A1.

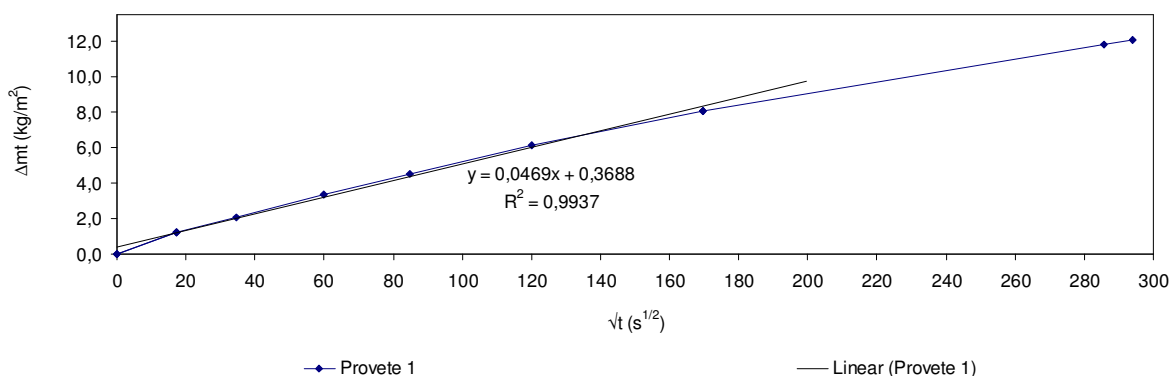


Figura 4.7 – Curva de absorção de água e respectiva regressão linear no provete 1 de R EPS A₂

Dos dois conjuntos de provetes, A₁ e A₂, os valores de A_w e do coeficiente de correlação obtidos, são os indicados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Resultados do coeficiente de absorção de água no reboco com EPS

Provete	A_w (kg/m ² s ^{1/2})	Correlação R^2	A_w médio (kg/m ² s ^{1/2})	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
A ₁	1	0,0445	0,0492	0,004	8,02
	2	0,0535			
	3	0,0522			
	4	0,0486			
	5	0,0446			
	6	0,0518			
A ₂	1	0,0469	0,0474	0,002	4,34
	2	0,0492			
	3	0,0463			
	4	0,0470			
	5	0,0502			
	6	0,0445			

Ao comparar os dois valores médios obtidos do coeficiente de absorção de água, verifica-se que estes são próximos, sendo maior nos provetes com uma área de contacto com a água maior (A₁). Apesar de a área em contacto com a água ser diferente, era expectável que A_w fosse muito próximo, pois trata-se do mesmo material.

Ao fazer-se o cálculo da média entre os dois valores obtém-se um coeficiente de absorção de água do reboco com EPS de 0,0483 kg/m²s^{1/2}.

4.1.5. RESULTADOS DO REBOCO COM CORTIÇA

No reboco com cortiça também foram ensaiados provetes com diferentes áreas de contacto com a água. Os resultados obtidos da quantidade de água absorvida ao longo do tempo são os indicados nos seguintes quadros.

Quadro 4.7 – Resultados de Δm nos provetes de R C A₁

	Provetes	t (s ^{1/2})							
		17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	169,71	286,39	293,94
Δm (kg/m ²)	1	0,297	0,501	0,755	0,997	1,298	1,672	2,470	2,506
	2	0,289	0,438	0,615	0,793	1,073	1,445	2,263	2,314
	3	0,279	0,447	0,720	0,951	1,257	1,677	2,580	2,631
	4	0,335	0,499	0,778	1,007	1,243	1,535	2,089	2,152
	5	0,218	0,303	0,409	0,499	0,658	0,845	1,276	1,317
	6	0,251	0,339	0,495	0,660	0,869	1,140	1,759	1,800

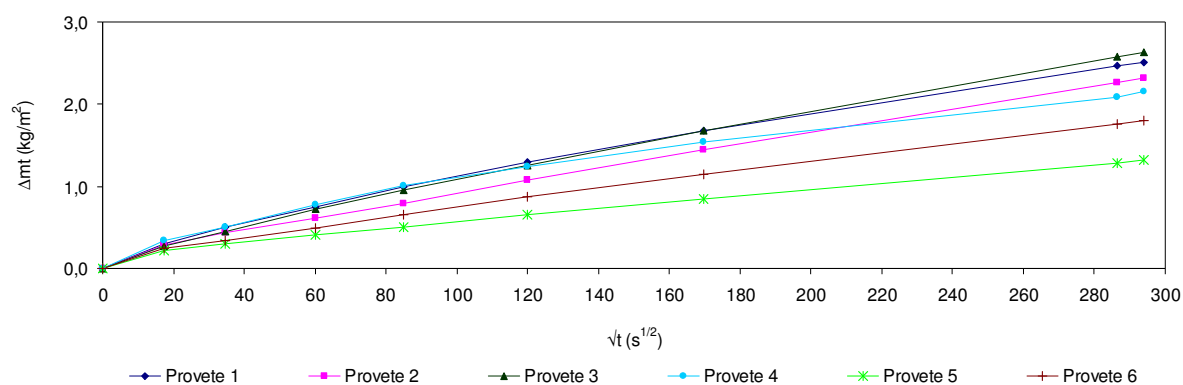
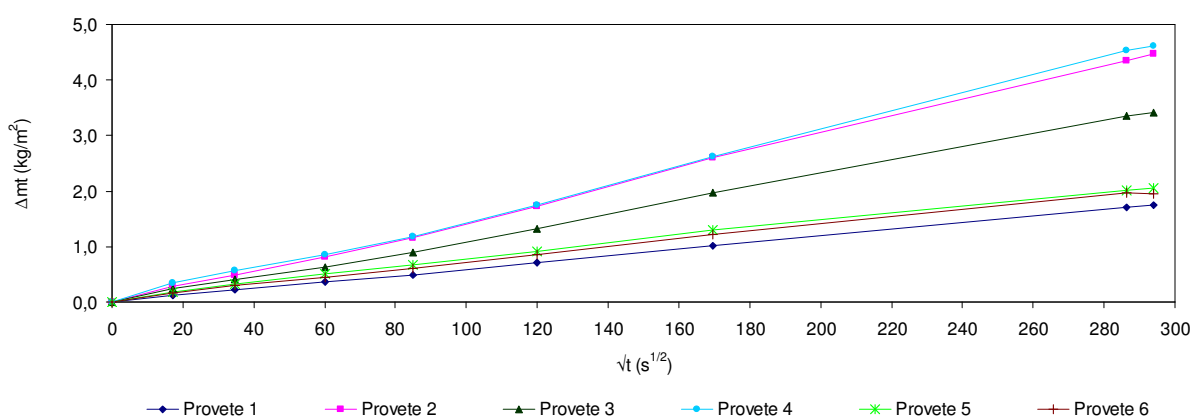
Quadro 4.8 – Resultados de Δm nos provetes de R C A₂

	Provetes	t (s ^{1/2})							
		17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	169,71	286,39	293,94
Δm (kg/m ²)	1	0,120	0,215	0,362	0,488	0,707	1,022	1,709	1,742
	2	0,289	0,493	0,813	1,163	1,732	2,593	4,344	4,471
	3	0,242	0,402	0,637	0,898	1,314	1,977	3,353	3,421
	4	0,341	0,570	0,857	1,176	1,750	2,616	4,534	4,605
	5	0,192	0,326	0,499	0,669	0,906	1,296	2,013	2,053
	6	0,168	0,297	0,441	0,612	0,848	1,217	1,964	1,947

Da análise do Quadro 4.7, verifica-se que Δm varia ao longo do tempo entre os 0,218 e os 2,631 kg/m². Nos provetes 5 e 6, é possível constatar que há uma diferença na ordem de grandeza dos valores de Δm , nomeadamente no provete 5, quando comparados com os restantes.

Do Quadro 4.8, constata-se de imediato a enorme diferença de valores de Δm nos provetes ao longo do ensaio. No fim do ensaio, Δm chega a variar entre 1,742 e os 4,605 kg/m². Esta variação tão grande vai influenciar o valor do coeficiente a determinar, pois este também vai variar de provete para provete.

Os resultados gráficos destes ensaios são os ilustrados na Figura 4.8 e Figura 4.9.

Figura 4.8 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de R C A₁Figura 4.9 – Curvas de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo nos provetes de R C A₂

De acordo com o desenvolvimento das curvas de absorção de água em função do tempo, em ambos os ensaios constata-se que ao fim das 24 horas de ensaio, apenas a primeira fase do processo de absorção de água é verificado. O processo de absorção de água por capilaridade, é assim contínuo ao longo de um dia de ensaio, e o valor de A_w é determinado para um período de 24 horas.

Na Figura 4.9, é bem visível a discrepância e a variabilidade da quantidade de água absorvida ao longo do tempo nos provetes. É possível reunir os provetes em três grupos, cujas curvas de absorção de água têm desenvolvimentos semelhantes (valores de Δm com a mesma ordem de grandeza). Os provetes 1, 5 e 6 formam um grupo, cujos valores de Δm são os mais baixos e os provetes 2 e 4 outro grupo com valores mais elevados. O provete 3 com valores intermédios forma o terceiro grupo.

Nas figuras 4.10 e 4.11, são apresentadas as curvas de absorção de água dos provetes 1 (com área A₁ e A₂), assim como a equação da recta da aproximação linear feita. Nestes ensaios, foi traçada a linha de regressão linear tendo em conta todos os valores da curva de absorção de água. Os restantes resultados gráficos vêm apresentados no anexo A1.

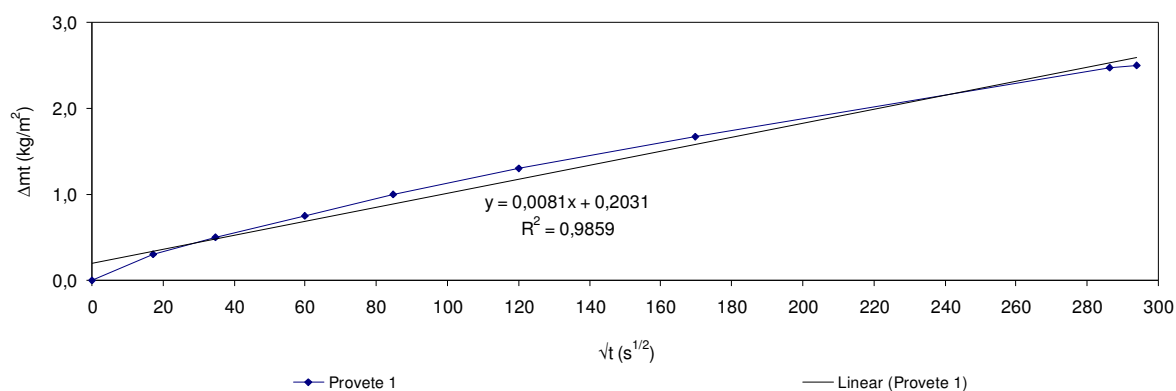


Figura 4.10 – Curva de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo no provete 1 de R C A₁

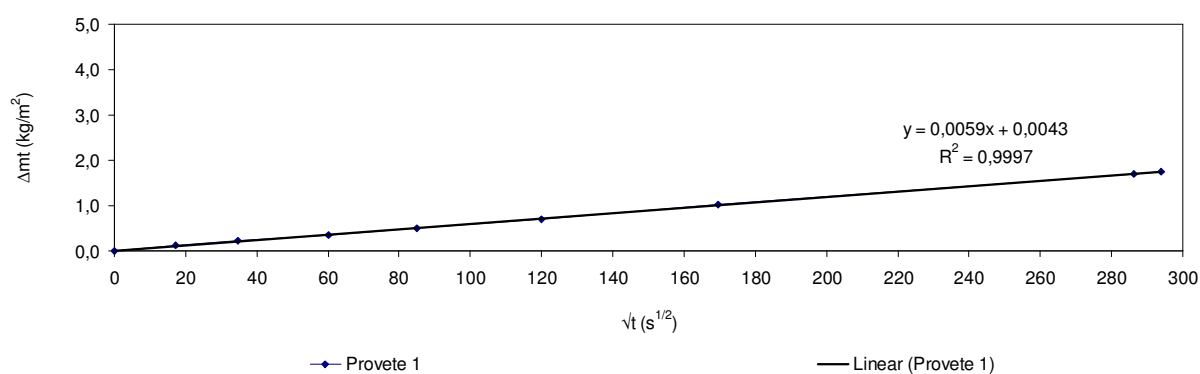


Figura 4.11 – Curva de absorção de água em função da raiz quadrada do tempo no provete 1 de R C A₂

O Quadro 4.9 apresenta os valores obtidos do coeficiente de absorção de água em cada provete, bem como o coeficiente de correlação da aproximação feita.

Quadro 4.9 – Resultados do coeficiente de absorção de água no reboco com cortiça

Provete	A_w (kg/(m ² s ^{1/2}))	Coeficiente R^2	A_w médio (kg/(m ² s ^{1/2}))	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
A ₁	1	0,0081	0,0068	0,0017	24,36
	2	0,0075			
	3	0,0086			
	4	0,0067			
	5	0,0041			
	6	0,0058			
A ₂	1	0,0059	0,0103	0,0045	43,58
	2	0,0153			
	3	0,0117			
	4	0,0157			
	5	0,0068			
	6	0,0066			

É possível verificar que, nestes provetes de reboco com cortiça, há uma grande variedade dos valores do coeficiente de absorção de água. Esta variação é bem visível no gráfico da Figura 4.12. Analisando a figura e os valores obtidos constata-se que nos provetes com área A₁, A_w varia entre os 0,0081 e os 0,0041 kg/m²s^{1/2}, enquanto que nos provetes com área A₂, o intervalo de valores é maior, estando compreendido entre os 0,0059 e os 0,0157 kg/m²s^{1/2}.

Pelo gráfico, observa-se que nos provetes A₁ a variação dos coeficientes é menor quando comparada com os provetes A₂. A divisão em grupos destes provetes anteriormente feita, também se adequa, no que diz respeito ao coeficiente de absorção de água. Nos provetes 1,5 e 6, 2 e 4, obtiveram-se coeficientes da mesma ordem de grandeza.

Ao calcular a média obteve-se um coeficiente de absorção de água de 0,0068 e 0,0103 kg/m²s^{1/2} nos provetes com área A₁ e A₂, respectivamente.

No gráfico, assim como através dos coeficientes de variação, é possível verificar que nos provetes com área A₂, os coeficientes de absorção de água estão mais afastados da média.

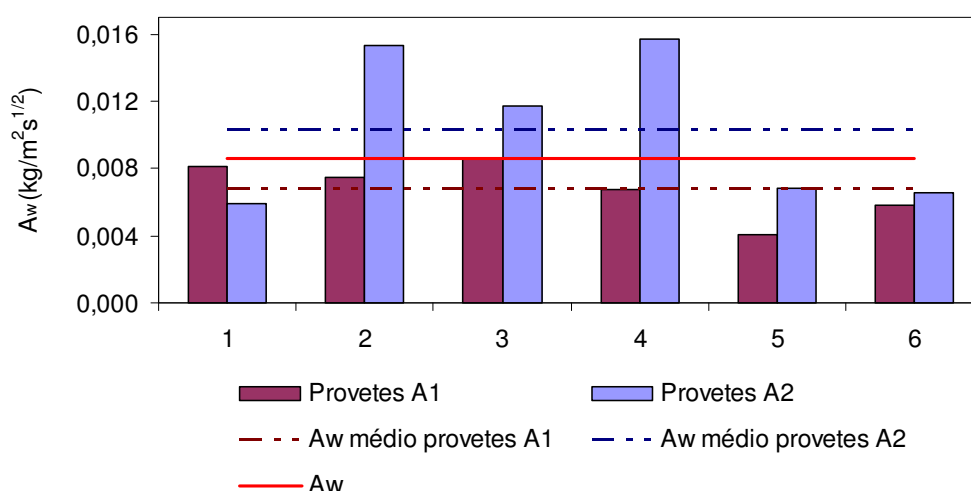


Figura 4.12 – Comparação dos valores de A_w de cada provete (A_1 e A_2) e respectiva média

Verifica-se que existe uma diferença considerável entre os dois valores médios de A_w . Sendo estes provetes do mesmo material, apenas tendo áreas de contacto com a água diferentes, seria espectável que os coeficientes de absorção de água fossem semelhantes, como verificado nos provetes de reboco com EPS.

Contudo, esta diferença não pode ser atribuída ao facto de as áreas serem diferentes, pois como já se verificou anteriormente, há uma variedade de valores dos coeficientes em cada grupo de provetes (A_1 e A_2). Aquando do corte das amostras de reboco com cortiça, nos provetes com as dimensões desejáveis, verificou-se que existia um certo tipo de inertes no seu interior. Este tipo de inertes, presentes no seu interior, poderá ser uma das causas destas diferenças de valores do coeficiente de absorção de água.

Ao calcular a média aritmética entre os dois valores médios adquiridos de A_w , obteve-se um coeficiente de absorção de água do reboco com cortiça de $0,0086 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$.

4.1.6. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Analisados os resultados de todos os materiais ensaiados, verifica-se que o gesso projectado é o que tem um maior coeficiente de absorção de água, seguindo-se-lhe o reboco com EPS e depois o reboco com cortiça. Quanto às placas de XPS, que possuem uma alta resistência à água, o coeficiente de absorção de água é nulo.

O desenvolvimento das curvas de absorção de água e os valores dos coeficientes, em muito indicam o consumo de água ao longo do ensaio. No gesso projectado, o processo de absorção de água foi rápido, tendo-se chegado a uma massa de água absorvida por unidade de área de $52,236 \text{ kg/m}^2$, atingindo-se mesmo a segunda fase do processo, e por isso obteve-se um coeficiente de absorção mais elevado. No reboco com EPS e com cortiça, o consumo de água foi mais lento, e como tal, os coeficientes são mais baixos.

O quadro abaixo reúne os valores obtidos dos coeficientes de absorção de água dos materiais objecto de estudo e dos coeficientes de variação.

Quadro 4.10 – Resumo dos resultados obtidos

Material		A_w (kg/m ² s ^{1/2})	Coefficiente de variação (%)
Gesso Projectado		0,3816	3,59
XPS		-	-
Reboco com EPS	A ₁	0,0492	8,02
	A ₂	0,0474	4,34
Reboco com Cortiça	A ₁	0,0068	24,36
	A ₂	0,0103	43,58

De acordo com o coeficiente de variação de cada material, verifica-se que no gesso projectado este apresenta o menor valor relativamente aos demais. Assim, na determinação desta propriedade há uma maior homogeneidade de valores no gesso projectado, ao contrário do reboco com cortiça, onde se obteve valores mais elevados do coeficiente de variação (menor homogeneidade entre valores, como verificado anteriormente).

Tendo em conta o que antecede, pode-se afirmar que para o gesso projectado, assim como para o reboco com EPS, a determinação da propriedade em causa é mais coerente do que para o reboco com cortiça.

4.2. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE DE SATURAÇÃO CAPILAR, w_{CAP}

4.2.1. INTRODUÇÃO

Dos ensaios para determinar o teor de humidade de saturação capilar resultaram dois tipos de massa, m_{cap} e m_0 , como descritos anteriormente. Neste ensaio a determinação do volume de cada provete foi essencial para que através da expressão (19) fosse possível determinar o w_{cap} .

4.2.2. RESULTADOS

Os resultados obtidos deste ensaio são os apresentados no quadro seguinte, em que se expõe, não só os dados recolhidos durante o ensaio (m_{cap} e m_0), mas também o volume dos provetes, necessários para o cálculo do w_{cap} . No anexo A2 são apresentadas as fichas de ensaio dos quatro materiais.

Não vem apresentado no quadro os resultados dos provetes de XPS, pois apesar de se ter dado início ao ensaio, ao fim de quatro pesagens ao longo de três dias, os provetes não saturaram. Este comportamento revela, como no ensaio para determinar o coeficiente de absorção de água, que o XPS é altamente resistente à água.

Quadro 4.11 – Resultados parciais dos ensaios

Material	Provetes	V (m ³)	m _{cap} (kg)	m ₀ (kg)	w _{cap} (kg/m ³)
GP	1	8,00E-05	0,112	0,079	417,385
	2	8,19E-05	0,116	0,081	421,969
	3	7,96E-05	0,112	0,078	427,488
	4	7,90E-05	0,111	0,078	417,337
	5	8,30E-05	0,115	0,081	409,808
	6	8,13E-05	0,113	0,079	422,090
R EPS	1	1,80E-04	0,098	0,066	176,875
	2	1,84E-04	0,102	0,069	179,603
	3	1,76E-04	0,099	0,066	187,882
	4	1,80E-04	0,102	0,068	189,028
	5	1,84E-04	0,102	0,069	177,319
	6	1,80E-04	0,099	0,066	181,623
R C	1	1,23E-04	0,116	0,094	175,166
	2	1,52E-04	0,145	0,119	172,897
	3	1,34E-04	0,130	0,106	177,851
	4	1,44E-04	0,145	0,119	179,688
	5	1,32E-04	0,138	0,113	190,413
	6	1,26E-04	0,123	0,100	182,915

Ao calcular a média aritmética dos teores de humidade de saturação dos seis provetes, obteve-se para cada material os seguintes valores (Quadro 4.12).

Quadro 4.12 – Resultados finais de w_{cap}

Material	w _{cap} médio (kg/m ³)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Gesso Projectado	419,346	5,993	1,43
Reboco com EPS	182,055	5,254	2,89
Reboco com Cortiça	179,822	6,249	3,48

4.3. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE HÍGRICA

4.3.1. INTRODUÇÃO

A determinação do coeficiente de difusividade hídrica, D_w , é feita a partir da equação simplificada de Krus e Künzel como descrito anteriormente no capítulo 2 (Equação 16). Para tal foram utilizados os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água e de determinação do teor de humidade de saturação capilar.

Dos ensaios para determinar o coeficiente de absorção de água obteve-se um conjunto de valores de A_w para cada material ensaiado (seis valores para o gesso projectado e doze para o reboco com EPS e reboco com cortiça). Sendo assim calculou-se D_w para cada provete dos diferentes materiais, e por fim a média desses mesmos valores para obter D_w dos materiais em estudo. Procedeu-se também ao cálculo de D_w utilizando apenas o valor do coeficiente de absorção de água obtido em cada material (A_w médio).

São assim apresentados em seguida os resultados obtidos de D_w pelas duas hipóteses de cálculo acima descritas e comparados os seus valores.

De acordo com a expressão que o programa de cálculo WUFI utiliza para estimar o coeficiente de transferência de água líquida para a fase de capilaridade, procedeu-se também ao cálculo deste coeficiente que corresponde ao coeficiente de transferência de água líquida por sucção, D_{ws} .

4.3.2. RESULTADOS

Ao calcular os coeficientes de difusividade hídrica para todos os provetes de gesso projectado obtiveram-se os seguintes valores indicados no Quadro 4.13. A média destes valores corresponde a um D_w médio de $6,511E-07$ m²/s.

Quadro 4.13 – Resultados de D_w no gesso projectado

Material	Provete	A_w (kg/m ² s ^{1/2})	w_{cap} (kg/m ³)	D_{wi} (m ² /s)	D_w médio (m ² /s)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
GP	1	0,3823	419,346	6,528E-07	6,511E-07	4,617E-08	7,09
	2	0,3732		6,221E-07			
	3	0,3903		6,804E-07			
	4	0,3586		5,743E-07			
	5	0,3958		6,997E-07			
	6	0,3895		6,776E-07			

Ao determinar D_w partindo agora do coeficiente de absorção de água obtido para o gesso projectado, neste estudo de $0,3816$ kg/m²s^{1/2}, obteve-se um coeficiente de difusividade hídrica de $6,504E-07$ m²/s. Ao comparar os dois valores verifica-se que o resultado é sensivelmente o mesmo, sendo a diferença de apenas $6,996E-10$ m²/s.

Nos provetes de reboco com EPS obtiveram-se dois conjuntos de valores de coeficientes de difusividade hídrica correspondentes aos provetes A_1 e A_2 conforme é possível verificar no Quadro

4.14. Ao calcular a média entre os dois valores obtidos de cada conjunto de provetes, obteve-se um D_w de $5,544\text{E-}08 \text{ m}^2/\text{s}$.

Quadro 4.14 – Resultados de D_w no reboco com EPS

Material	Proвете	A_w ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2})$)	w_{cap} (kg/m^3)	D_{wi} (m^2/s)	D_w médio (m^2/s)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
R EPS	1	0,0445	182,055	4,693E-08	5,767E-08	9,110E-09	15,80
	2	0,0535		6,783E-08			
	3	0,0522		6,457E-08			
	4	0,0486		5,597E-08			
	5	0,0446		4,714E-08			
	6	0,0518		6,358E-08			
	1	0,0469		5,212E-08	5,321E-08	4,622E-09	8,69
	2	0,0492		5,736E-08			
	3	0,0463		5,080E-08			
	4	0,0470		5,235E-08			
	5	0,0502		5,972E-08			
	6	0,0445		4,693E-08			

A determinação do coeficiente de difusividade hídrica partindo do coeficiente de absorção de água obtido para este material ($0,0483 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$) resulta num D_w de $5,522\text{E-}08 \text{ m}^2/\text{s}$. Assim como no gesso projectado a diferença entre os dois valores obtidos é mínima ($2,157\text{E-}10 \text{ m}^2/\text{s}$).

Nos provetes de reboco com cortiça, a variabilidade nos coeficientes de absorção de água obtidos reflecte-se nos coeficientes de difusividade hídrica que também variam. Como é possível verificar pelo

Quadro 4.15, D_w varia entre os $4,083\text{E-}10$ e $1,058\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{s}$. É possível constatar uma diferença entre a média dos coeficientes de difusividade hídrica dos provetes com área A_1 e A_2 , sendo de $1,179\text{E-}09$ e $3,004\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{s}$ respectivamente.

Quadro 4.15 – Resultados de D_w no reboco com cortiça

Material	Provete	A_w (kg/(m ² s ^{1/2}))	W_{cap} (kg/m ³)	D_w (m ² /s)	D_w médio (m ² /s)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
R C	1	0,0081	179,822	1,594E-09	1,179E-09	5,140E-10	43,61
	2	0,0075		1,366E-09			
	3	0,0086		1,796E-09			
	4	0,0067		1,090E-09			
	5	0,0041		4,083E-10			
	6	0,0058		8,171E-10			
	1	0,0469		8,455E-10	3,004E-09	2,374E-09	79,02
	2	0,0492		5,686E-09			
	3	0,0463		3,325E-09			
	4	0,0470		5,987E-09			
	5	0,0502		1,123E-09			
	6	0,0445		1,058E-09			

A variabilidade e diferenças dos valores do coeficiente de difusividade hídrica são bem visíveis no gráfico da Figura 4.13. Tais diferenças também foram observadas no coeficiente de absorção de água e como D_w é determinado em função deste coeficiente (e do teor de humidade de saturação capilar que é constante) faz sentido que este também seja diferente.

Pela análise do gráfico da Figura 4.13, verifica-se que nos provetes com área A_2 , os coeficientes de difusividade hídrica estão mais afastados da média (D_w médio provetes A_2), facto este também constatado pelo coeficiente de variação que é mais elevado (79,02%). Ao calcular a média entre os dois valores de D_w obteve-se um coeficiente de difusividade hídrica para o reboco com cortiça de 2,091E-09 m²/s (valor que corresponde a D_w médio na figura).

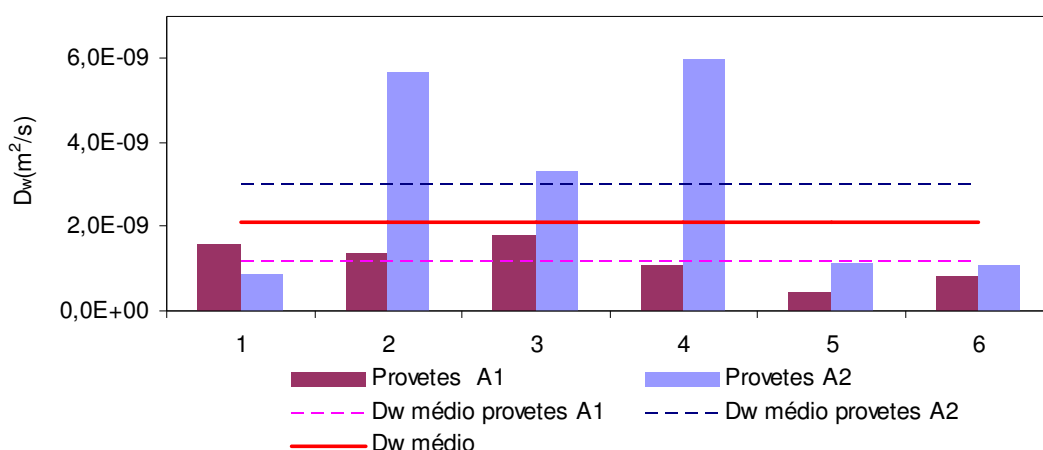


Figura 4.13 – Comparação dos valores de D_w de cada provete de reboco com cortiça (A_1 e A_2) e respectivas médias

Ao determinar agora o coeficiente de difusividade hídrica pela segunda hipótese de cálculo, tendo presente o coeficiente de absorção de água do reboco com cortiça como sendo de $0,0086 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ neste estudo, obtém-se um D_w de $1,782\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{s}$. Neste material, a diferença entre as duas hipóteses do cálculo para obter D_w é maior quando comparado com os outros materiais.

O Quadro 4.16 apresenta os valores obtidos dos coeficientes de difusividade hídrica dos três materiais em estudo, contemplando os resultados das duas hipóteses de cálculo.

Quadro 4.16 – Resumo dos valores obtidos de D_w nos diferentes materiais

Material	$D_w \text{ (m}^2/\text{s)}$	
	Hipótese 1	Hipótese 2
Gesso projectado	6,511E-07	6,504E-07
Reboco com EPS	5,544E-08	5,522E-08
Reboco com Cortiça	2,091E-09	1,782E-09

Tendo presente os resultados obtidos dos coeficientes de difusividade hídrica dos três materiais em estudo, verifica-se que o gesso projectado é o que apresenta um maior coeficiente, em oposição ao reboco com cortiça em que o coeficiente é menor.

De acordo com a expressão (17) procedeu-se ao cálculo de D_{ws} (coeficiente de transferência de água líquida por sucção). Os resultados obtidos desta aproximação nos três materiais são os indicados no Quadro 4.17.

Quadro 4.17 – Resultados de D_{ws}

Material	D_{ws} (m^2/s)
Gesso Projectado	3,147E-06
Reboco com EPS	2,672E-07
Reboco com Cortiça	8,624E-09

É possível constatar que os resultados obtidos de D_{ws} são diferentes de D_w (Quadro 4.16) pois trata-se de cálculos e coeficientes diferentes.

4.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM MATERIAIS SEMELHANTES

4.4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o objectivo de se poder comparar os resultados obtidos nos ensaios com propriedades definidas em materiais com características e/ou funções idênticas, procedeu-se a uma pesquisa na literatura existente e na base de dados do programa de simulação numérica WUFI Light 5.0.

4.4.2. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

No que respeita ao XPS, cujo coeficiente de absorção de água é nulo, é comum encontrar-se em catálogos de empresas que produzem e vendem este tipo de produto, designações como “resistente à água” ou “absorção de água muito baixa” e em alguns casos “capilaridade nula”. Em publicações de catálogos de materiais de construção, para este material não surge qualquer tipo de referência a estes coeficientes. Numa dissertação (Sousa, 1996) é dado o valor do coeficiente de capilaridade do poliestireno extrudido como sendo de $0,00035 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$.

Para o gesso projectado e o reboco com EPS não foi encontrado qualquer valor destes coeficientes. Contudo, para o gesso projectado, alguns materiais de composição idêntica servem de base de comparação para com os valores obtidos. Sendo assim, após uma pesquisa no WUFI três tipos de materiais são analisados, ambos pertencentes à base de dados da MASEA. Estes materiais apresentam uma densidade aparente próxima, sendo no gesso projectado de 1200 kg/m^3 , *Gypsum Version A* de 1237 kg/m^3 , *Gypsum Version B* de 906 kg/m^3 e no *Gypsum Plaster ip22* de 1043 kg/m^3 . No gráfico da figura seguinte estão patentes os valores do coeficiente de absorção de água do gesso projectado e dos três materiais em causa.

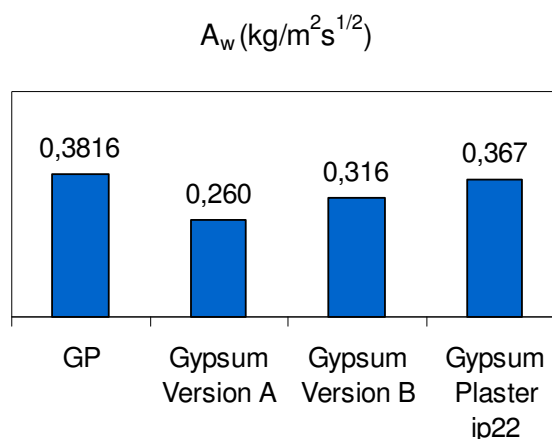


Figura 4.14 – Comparação do coeficiente de absorção de água do gesso projectado com outros materiais

Pela Figura 4.14 verifica-se que o valor do coeficiente do gesso projectado obtido enquadrasse no grupo de materiais que servem de comparação. O *Gypsum Plaster ip22* é o material que mais se assemelha ao gesso projectado pois o coeficiente de absorção de água é o mais próximo.

Quanto ao reboco com cortiça, a *DiaSen* apresenta uma gama de reboco com cortiça “Diathonite”. Nos dados técnicos deste material é apresentado o coeficiente de absorção de água, cujo valor, determinado segundo a norma DIN 52 617, é de 0,35 kg/m²h^{1/2} o que corresponde a 0,0058 kg/m²s^{1/2} (Figura 4.15). (http://www.profitinta.pt/pics/produtos/Diathonite_reboco_com_cortica_4d6b74319d8cf.pdf)

Ao comparar este valor com o A_w obtido para o reboco com cortiça objecto de estudo, verifica-se que este é maior, sendo de 0,0086 kg/m²s^{1/2}. No entanto, em alguns provetes deste material, obtiveram-se valores muito próximos de 0,0058 kg/m²s^{1/2}.

Numa pesquisa feita em relação ao material cortiça encontra-se definido um intervalo de valores do coeficiente de capilaridade que se situa entre os 0,0067 e os 0,0108 kg/m²s^{1/2} (Sousa, 1996). Não sendo exactamente o material em estudo a cortiça, verifica-se que coeficiente de absorção de água do reboco com cortiça se encontra dentro deste intervalo de valores.

Em relação ao reboco com EPS não foi encontrada qualquer tipo de informação acerca das propriedades em causa. No entanto, na figura seguinte, apresentam-se alguns materiais com características e/ou funções semelhantes aos dos rebocos com EPS e com cortiça estudados. Os dados presentes no gráfico do estuque e da argamassa foram retirados do *Final Report from ASHRAE Research Project 1018-RP*, enquanto que o reboco à base de ligantes hidráulicos (RLH) de Lanzinha *et al.*, 1998. Efectivamente, o coeficiente de absorção de água do estuque e da argamassa é de 0,012±0,001 e 0,02±0,01 kg/m²s^{1/2}, respectivamente.

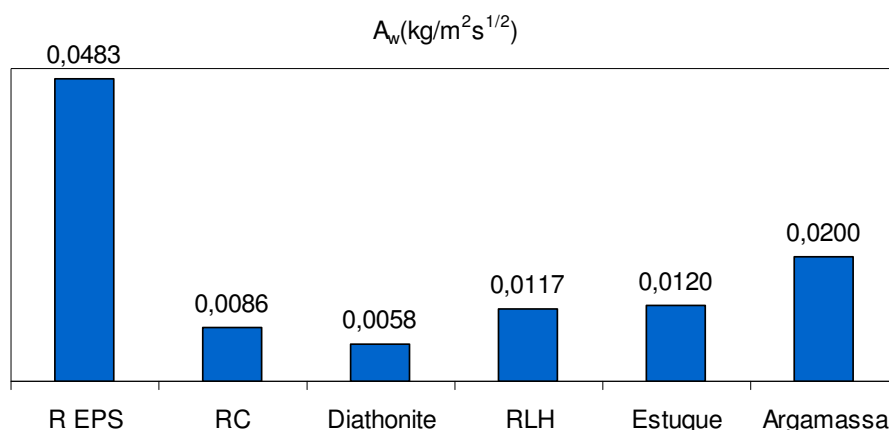


Figura 4.15 – Comparação do coeficiente de absorção de água dos rebocos com EPS e cortiça com outros materiais

É possível constatar, que o reboco com EPS, não se assemelha a nenhum dos materiais presentes na figura. De entre os cinco materiais, o reboco com EPS é o que apresenta um coeficiente de absorção de água mais elevado, tendo portanto o pior desempenho face ao contacto directo com água no estado líquido. Já os rebocos com cortiça, tanto o reboco em estudo nesta dissertação, como o “Diathonite”, apresentam coeficientes de absorção de água mais baixos que os restantes materiais, pelo que o seu desempenho face à transferência de humidade na fase líquida é melhor.

4.4.3. TEOR DE HUMIDADE DE SATURAÇÃO CAPILAR

A comparação do teor de humidade de saturação capilar do gesso projectado é feita tendo em conta os mesmos materiais comparados anteriormente. No gráfico da Figura 4.16 estão patentes os teores de humidade de saturação capilar dos materiais em causa.

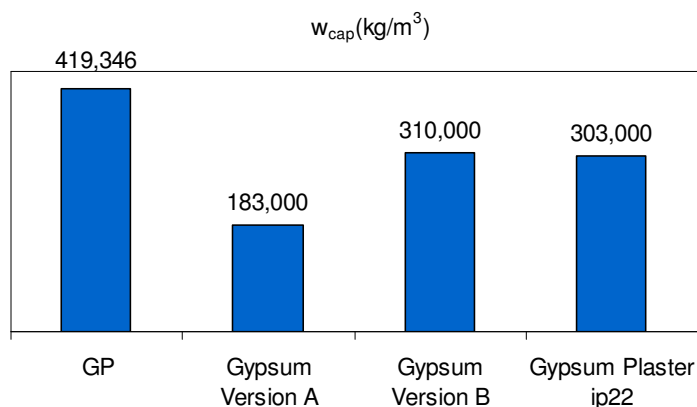


Figura 4.16 – Comparação do teor de humidade de saturação capilar do gesso projectado com outros materiais

Analisando os dados da figura, verifica-se que o teor de humidade de saturação capilar do gesso projectado em estudo é mais próximo do *Gypsum Version B*, sendo bastante diferente do *Gypsum Version A* cujo valor é muito inferior ao obtido neste trabalho.

Quanto aos rebocos com EPS e com cortiça, na bibliografia onde consta os materiais que serviram de comparação para o coeficiente de absorção de água, não são referenciados os teores de humidade de saturação capilar.

4.4.4. COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE HÍGRICA

Ao comparar o coeficiente de transferência de água líquida por sucção do gesso projectado com os demais materiais que constam na base de dados do programa WUFI, verifica-se que este é inferior, como é possível constatar pela análise da Figura 4.17.

É possível verificar que o *Gypsum Version B* é mais uma vez, de todos os materiais, o que mais se assemelha ao gesso projectado, tendo um D_{ws} mais próximo deste. Estas diferenças de valores vêm demonstrar que o teor de humidade de saturação capilar interfere no cálculo de D_{ws} .

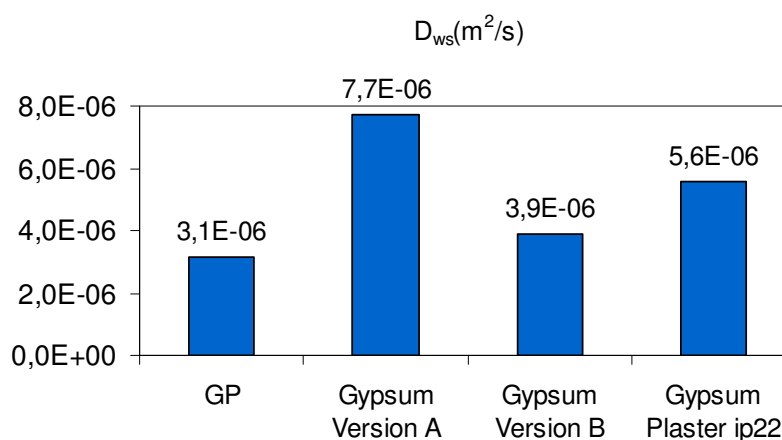


Figura 4.17 – Comparação do coeficiente de transferência de água líquida por sucção do gesso projectado com outros materiais

Para os restantes materiais, reboco com EPS e reboco com cortiça, como não são dados os valores de w_{cap} dos materiais que serviram de base de comparação, não é possível efectuar um estudo comparativo dos resultados obtidos de D_w .

5

CONCLUSÃO

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação teve como base uma forte componente experimental, no qual se utilizaram os equipamentos e os materiais disponíveis no Laboratório de Física das Construções da FEUP. Todos os ensaios efectuados: ensaio de absorção de água e de determinação do teor de humidade de saturação capilar, foram realizados no referido laboratório.

Para além desta componente experimental, esta dissertação também se baseou na análise de estudos análogos ao tema, por pesquisa de informações, normas técnicas, catálogos de materiais de construção e de trabalhos ligados ao estudo das propriedades hígricas dos materiais de construção.

5.2. CONCLUSÕES PRINCIPAIS

Finda a presente dissertação e em tom de conclusão, pode-se afirmar a concretização do seu principal objectivo. A concretização dos objectivos parciais, estabelecidos inicialmente, foram cruciais para que o trabalho se desenvolvesse tendo como fim o objectivo principal.

A elaboração do estado da arte (capítulo 2) permitiu estabelecer o seguinte:

- Prever o comportamento higrotérmico dos sistemas construtivos face às solicitações de temperatura e ambiente a que estes estarão sujeitos só é possível pelo conhecimento das propriedades higrotérmicas dos materiais e componentes da construção, bem como dos fenómenos físicos associados aos processos de transferência de calor e de humidade;
- As propriedades higrotérmicas podem ser divididas em propriedades gerais, térmicas e hígricas, sendo a sua maioria determinadas laboratorialmente a partir de ensaios normalizados, havendo algumas que são derivadas de outras;
- A maioria dos materiais de construção possui uma estrutura porosa aberta, pelo que, estes em contacto directo com água no estado líquido, tendem a conduzir a água por capilaridade;
- O processo de absorção de água divide-se em duas fases, correspondendo a primeira à fase em que a ascensão da água é devida à capilaridade e à viscosidade. Nesta fase, a quantidade de água absorvida por área do material em contacto com a água e a raiz quadrada do tempo produz uma recta. O declive desta recta corresponde ao coeficiente de absorção de água, A_w , que traduz o comportamento dos materiais de construção face ao contacto directo com a água no estado líquido. A segunda fase do processo de absorção de água inicia-se quando a frente de água atinge a superfície superior da amostra. No final da transição da primeira para a segunda fase é atingido o teor de humidade de saturação

capilar, w_{cap} . Existem vários métodos normalizados que permitem determinar tais propriedades;

- O coeficiente de difusividade hídrica, D_w , é um parâmetro que liga o gradiente médio do teor de humidade ao fluxo médio de humidade em regime isotérmico sendo também um parâmetro fundamental das equações de transferência de humidade, variável com a temperatura e sobretudo com o teor de humidade. Este coeficiente pode ser determinado em amostras em contacto com água no estado líquido. Existem vários métodos para determinar este coeficiente a partir do conhecimento dos perfis dos teores de humidade. Contudo, as várias metodologias para determinar os perfis dos teores de humidade são caras e complexas, pelo que foram desenvolvidos estudos que possibilitaram chegar a expressões que relacionam A_w e w_{cap} no cálculo de D_w .
- O programa de cálculo WUFI apresenta o coeficiente de transferência de água líquida por sucção, D_{ws} , que descreve a absorção de água por capilaridade. Este pode ser determinado de forma aproximada partindo do conhecimento do coeficiente de absorção de água.

A determinação laboratorial do coeficiente de absorção de água de quatro materiais de construção com características distintas, realizada de acordo com a norma EN ISO 15148, levou aos seguintes resultados:

- Nos provetes de gesso projectado, durante a realização do ensaio, foram alcançadas as duas fases do processo de absorção de água, distinguindo-se claramente estas duas etapas pela observação das curvas de absorção. Para este material chegou-se a um A_w de $0,3816 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$.
- As placas de poliestireno extrudido demonstraram ser resistentes à absorção de água, ou seja, impermeáveis, sendo o coeficiente de absorção de água nulo;
- No reboco com EPS, foram ensaiados provetes com áreas de contacto com a água diferentes, A_1 e A_2 , tendo os provetes A_1 uma maior área e uma menor espessura. Nos provetes com área A_1 , distingue-se claramente as duas fases do processo de absorção de água, contrariamente aos provetes A_2 , cujo processo de absorção de água foi contínuo ao longo de um dia de ensaio. O coeficiente de absorção de água do reboco com EPS neste estudo é de $0,0483 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$;
- Nos provetes de reboco com cortiça o processo de absorção de água é mais lento e contínuo ao longo de um dia de ensaio atingindo-se apenas a primeira fase do processo. Nos dois grupos de provetes, A_1 e A_2 , obteve-se uma variabilidade de valores de A_w e resultados diferentes do coeficiente em cada grupo. Da variação dos valores de A_w , resultaram coeficientes de variação elevados, sendo maior nos provetes com área A_2 . O resultado final deste ensaio é um A_w de $0,0086 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ do reboco com cortiça.

Do ensaio para determinar o teor de humidade de saturação capilar de acordo com o procedimento da Nordtest Method, NT BUILD 472, chegou-se aos seguintes resultados:

- No gesso projectado obteve-se um w_{cap} de $419,346 \text{ kg/m}^3$, tendo sido o material cujo processo de saturação foi o mais rápido;
- O processo de saturação dos provetes de XPS não foi atingido, pelo que este é altamente resistente água;
- No reboco com EPS e reboco com cortiça, obtiveram-se teores de humidade de saturação capilar de $182,055$ e $179,822 \text{ kg/m}^3$ respectivamente.

O cálculo do coeficiente de difusividade hídrica de acordo com a expressão (16) que relaciona A_w e w_{cap} levou aos seguintes resultados:

- O gesso projectado é o que apresenta um maior coeficiente, sendo D_w de $6,5E-07 \text{ m}^2/\text{s}$;
- No reboco com EPS obteve-se um D_w de $5,5E-08 \text{ m}^2/\text{s}$;
- O reboco com cortiça é o material que apresenta o menor valor de D_w . De acordo com as duas hipóteses de cálculo efectuadas este toma um valor próximo de $2,1E-09 \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,8E-09 \text{ m}^2/\text{s}$.

Através dos coeficientes de absorção de água e teores de humidade de saturação capilar foi possível determinar o coeficiente de transferência de água líquida por sucção, D_{ws} pela aplicação da expressão que o programa WUFI utiliza. O resultado de D_{ws} no gesso projectado permitiu compará-lo com materiais semelhantes existentes na base de dados do WUFI.

A realização deste trabalho permitiu aferir que existem catálogos e outros documentos de investigação, que identificam e quantificam as propriedades higrotérmicas de materiais de construção, assim como a base de dados do programa WUFI. No que respeita às propriedades hígricas em estudo verificou-se que, de um modo geral, o coeficiente de absorção de água é mais facilmente conhecido que as restantes propriedades. Em relação aos materiais aqui estudados, há que referir com cuidado, o reboco com EPS, uma vez que as propriedades deste material eram até então, desconhecidas.

5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O estudo desenvolvido nesta dissertação permite ser instrumento para futuros estudos, que desenvolvam especificamente ou que dêem continuidade ao trabalho iniciado. De seguida são indicadas algumas vias de continuidade:

- Estudo laboratorial de propriedades hígricas de outros materiais, nomeadamente de materiais cujas propriedades não são conhecidas;
- Com o objectivo de comprovar os resultados obtidos do coeficiente de difusividade hídrica dos materiais deste estudo, sugere-se a sua determinação pelo Método de Transformação de Boltzman e dos Perfis. De forma a determinar os perfis do teor de humidade, indica-se o método por atenuação de raios gama, usufruindo do equipamento desenvolvido nesta instituição, o HUMIGAMA.VF;
- Avaliação de outras propriedades necessárias à caracterização dos materiais e sua inserção na base de dados do WUFI.

BIBLIOGRAFIA

- Arriaran, I. (2006). *Caracterización Higroscópica de Materiales de Construcción: Arcilla Aligerada y Picón*. Dissertação de Doutoramento, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones de Bilbao.
- CEN (2002). EN ISO 15148: Higrothermal Peformance of Buildings Materials and Products: Determination of water absorption coefficient by partial immersion.
- Freitas, V. (1992). *Transferência de humidade em paredes de edifícios*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Freitas, V., Krus, M., Künzle, H., Quenard, D. (1995). *Determination of the water diffusivity of porous materials by gamma-ray attenuation and NMR*. Proceeding of the International symposium on Moisture Problems in Building Walls, 11-13 de Setembro, Porto, pg 445-460.
- Freitas, V., Torres, M., Guimarães, A. (2008). *Humidade Ascensional*. FEUP Edições, Porto.
- Gonçalves, T. (2007). *Salt crystallization in plastered or rendered walls*. Dissertação de Doutoramento, LNEC e IST.
- http://beesl.syr.edu/HT_1E-SUTUD-moist-transp.htm. 25/02/11.
- http://www.profitinta.pt/pics/produtos/Diathonite_reboco_com_cortica_4d6b74319d8cf.pdf. 19/05/11
- <http://www.wufi-forum.com/>. 13/05/11
- <http://www.wufi-pro.com/>. 13/05/11. WUFI. Manual de utilizador. Fraunhofer Institute of Buildings Physics.
- Janz, M. (1997). *Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels*. Licentiate thesis, University of Lund – Lund Institute of technology.
- Krus, M., Künzle, H., (1993). *Determination of D_w from A-value*. IEA Annex XXIV, Report T3-D-93/02.
- Kumaran, K. (2002). *A Thermal and Moisture Transport Property Database for Common Building and Insulating Materials - Final Report from ASHRAE Research Project 1018-RP*. <http://rp.ashrae.biz/page/rp-1018.pdf>. 02/05/11.
- Künzel, H. (1995). *Simultaneous heat and moisture transport in building components*. Dissertação de Doutoramento, Fraunhofer Institute of Building Physics, Germany.
- Lanzinha, J., Freitas, V. (1998). *Propriedades higrotérmicas dos materiais de construção – Um catálogo*. 6^{as} Jornadas de Construções Cívicas, Novembro 1998, FEUP, pg 127-148, Porto.
- Mukhopadhyaya, P., Kumaran, K., Normandin, N., Goudreau, P., (2002). *Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials*. <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc45369/nrcc45369.pdf>. 16/02/11.
- NORDTEST (1996). Building Materials: degree of capillary saturation.
- Pel, L., Brocken, H., Koping, K. (1996). *Determination of moisture diffusivity in porous media using moisture concentration profiles*. International Journal of Heat Mass Transfer, vol 36,nº6,1996.
- Piedade, A. (1998). *Humidade em Edifícios – Uma perspectiva existencial*. 6^{as} Jornadas de Construções Cívicas, Novembro 1998, FEUP, pg 21-26, Porto.

Plagge, R., Scheffler G., Grunewald, J.. *Automatic Measurement of Water Uptake Coefficient of Building Materials*. http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_026.pdf . 16/02/11.

Ramos, N. (2007). *A importância da inércia higroscópica no comportamento higrotérmico dos edifícios*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Adan, O., Brocken, H., Cerny, R., Pavlik, Z., Hall, C., Kumaran, K., Pel, L., Plagge, R. (2004). *Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials*. Journal of Thermal Env. & Bldg. Sci.Vol.27, número 4, Abril 2004. Sage Publications.

Sousa, J. (1996). *Caracterização da Capilaridade de Revestimentos de Fachada*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

ANEXOS

A1 – FICHAS DE ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

A2 – FICHAS DE ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE DE SATURAÇÃO CAPILAR

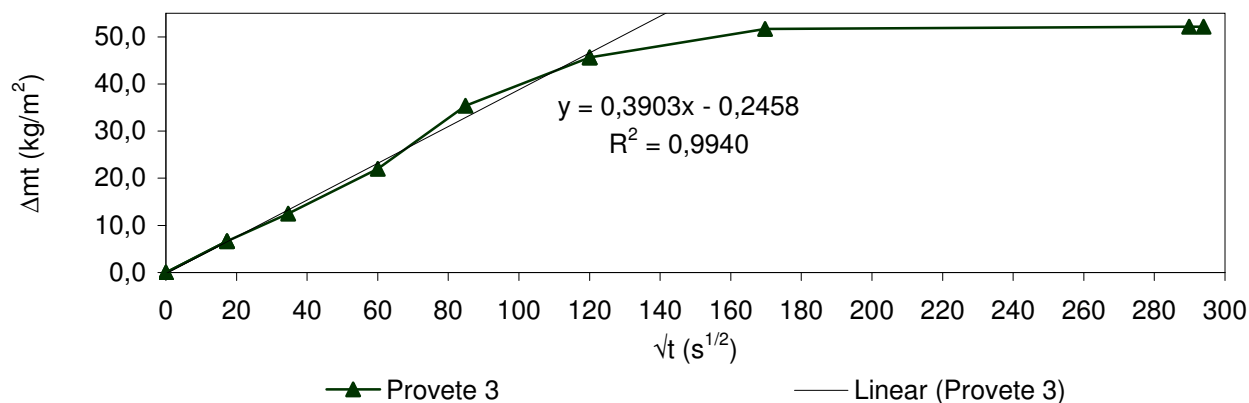
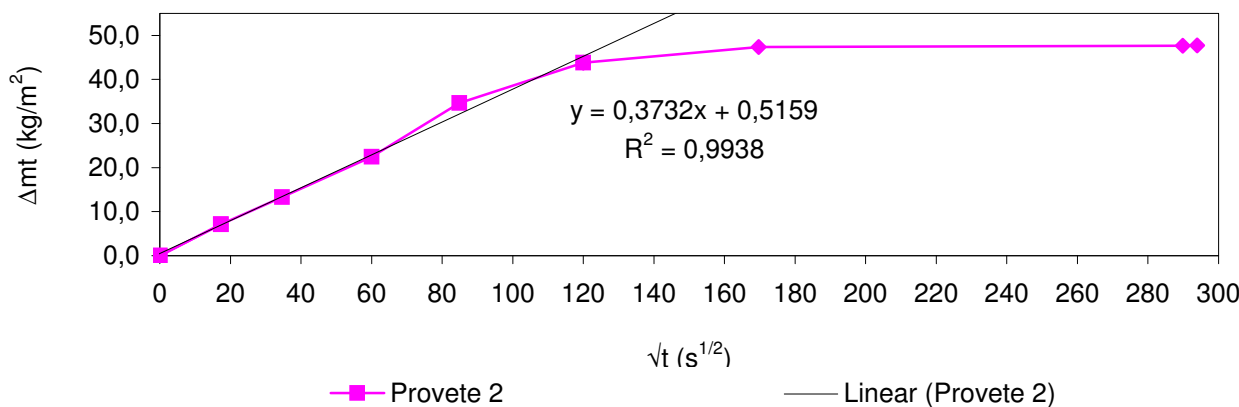
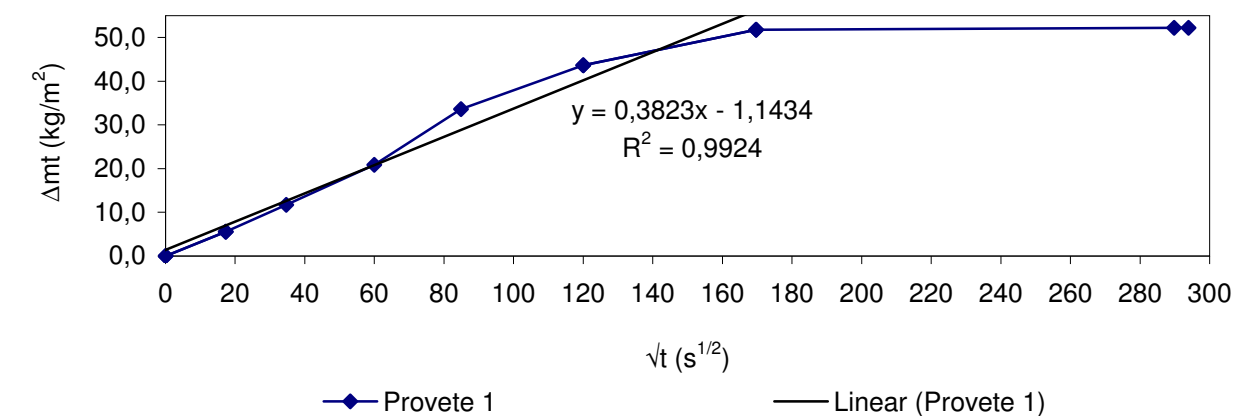
ANEXO A1

FICHAS DE ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Determinação do coeficiente de absorção de água										FE01
Identificação do produto										
Gesso projectado (GP)										
Determinação										
Estabilização da massa dos provetes com precisão de $\pm 0,1\%$ da sua massa										
Impermeabilização das faces laterais dos provetes										
Obtenção da massa dos provetes após imersão em água nos intervalos de tempo definidos na norma										
Equipamento										
Câmara climática										
Balança <i>Precisa 800 M</i> com precisão de 0,001 g										
Balança <i>Precisa 5000D-12000G</i> com precisão de 0,1 g										
Cronómetro										
Tina de ensaio										
Resultados										
Provetes	m_i (g)	m_t (g)								
		0 min	5min	20min	1h	2h	4h	8h	23h20min	24h
1	794,564	794,564	817,400	843,000	880,600	933,100	974,700	1008,110	1010,000	1009,800
2	892,500	892,500	926,700	956,300	1000,400	1058,700	1102,800	1120,000	1121,400	1121,500
3	888,800	888,800	918,200	944,000	985,900	1044,700	1089,800	1116,700	1118,700	1118,600
4	792,489	792,489	816,500	839,300	876,300	928,500	969,700	1005,200	1006,700	1006,300
5	722,957	722,957	753,932	777,550	814,000	862,700	900,800	917,300	919,000	918,500
6	682,948	682,948	710,823	730,929	762,963	810,600	845,900	864,100	865,200	865,000
	t (min/h)	0	5	20	1	2	4	8	23,33333	24
	t (s)	0	300	1200	3600	7200	14400	28800	84000	86400
	t ($s^{1/2}$)	0	17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	169,71	289,83	293,94
Δm (kg/m ²)	1	0,000	5,537	11,744	20,861	33,590	43,677	51,778	52,236	52,188
	2	0,000	7,125	13,292	22,480	34,626	43,814	47,398	47,689	47,710
	3	0,000	6,670	12,523	22,028	35,368	45,600	51,702	52,156	52,133
	4	0,000	5,660	11,035	19,757	32,062	41,775	50,143	50,497	50,403
	5	0,000	8,152	14,368	23,962	36,779	46,807	51,149	51,597	51,465
	6	0,000	7,870	13,546	22,590	36,039	46,005	51,144	51,454	51,398
m_i massa inicial do provete (g) m_t massa do provete no tempo t (g) A área da superfície do provete em contacto com a água (m ²) Δm massa de água absorvida pela área do provete em contacto com a água (kg/m ²)										
$\Delta m = \frac{(m_t - m_i)}{A}$										

Identificação do produto
Gesso projectado (GP)

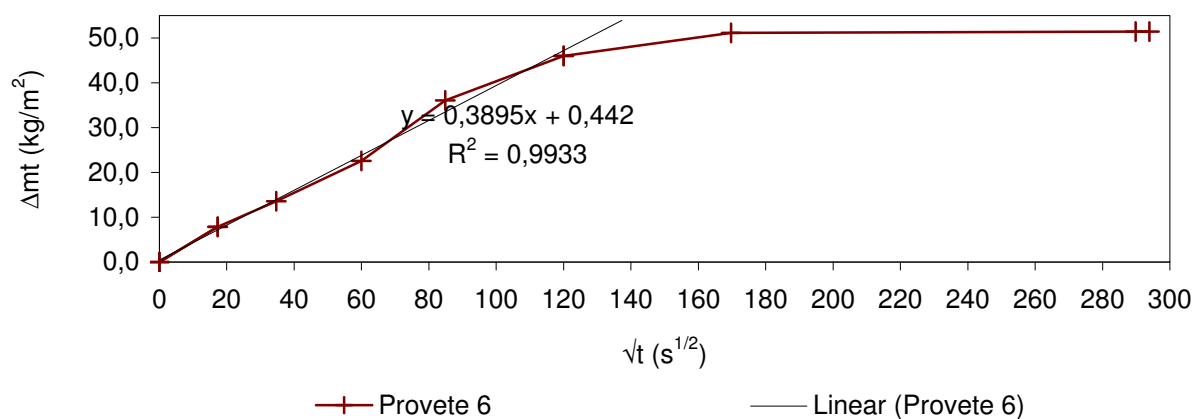
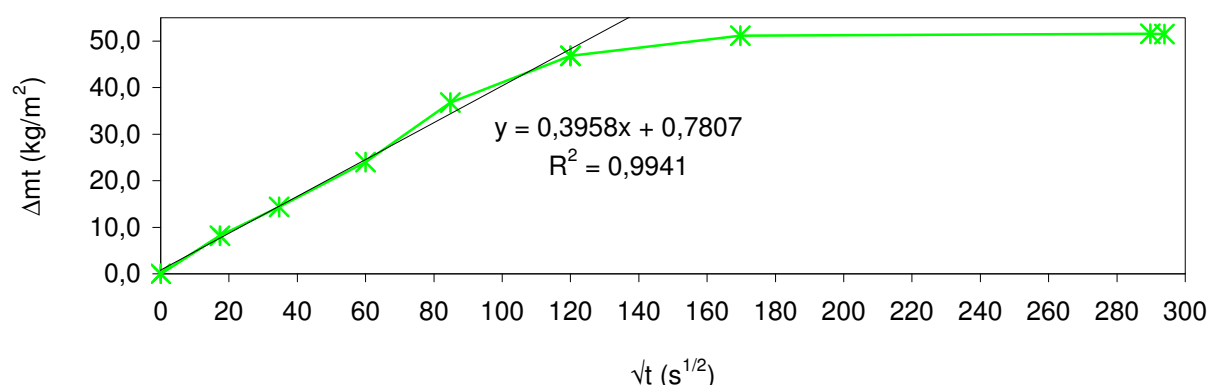
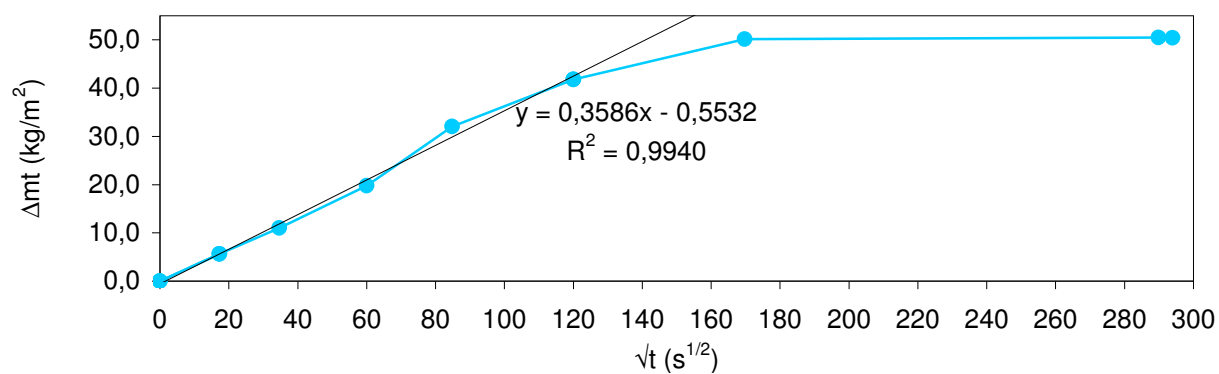
Resultados Gráficos



Identificação do produto

Gesso projectado (GP)

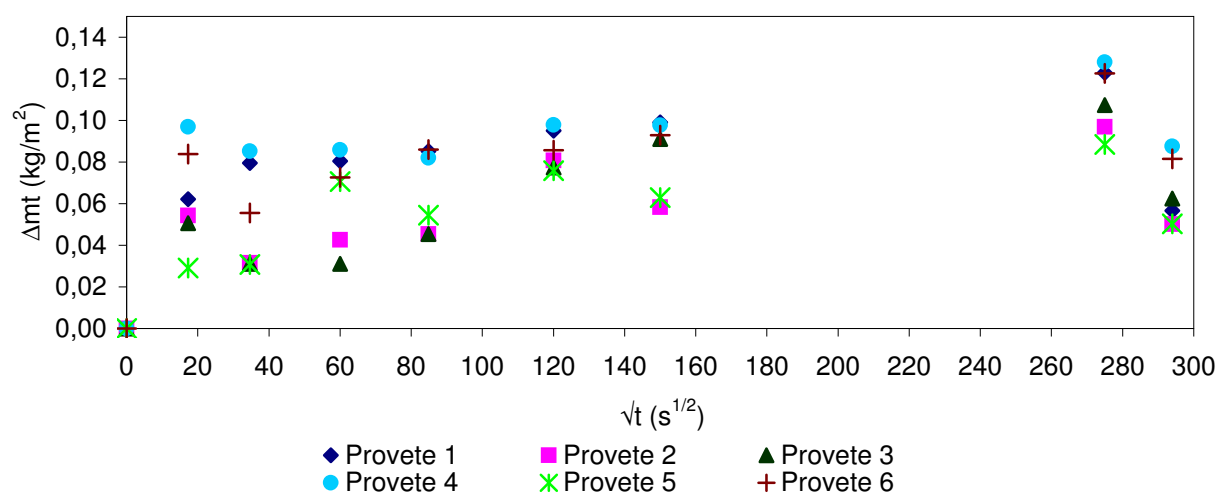
Resultados Gráficos



Determinação do coeficiente de absorção de água										FE02
Identificação do produto										
Placas de poliestireno extrudido (XPS)										
Determinação										
Estabilização da massa dos provetes com precisão de $\pm 0,1\%$ da sua massa										
Impermeabilização das faces laterais dos provetes										
Obtenção da massa dos provetes após imersão em água nos intervalos de tempo definidos na norma										
Equipamento										
Câmara climática										
Balança <i>Precisa 800 M</i> com precisão de 0,001 g										
Cronómetro										
Tina de ensaio										
Resultados										
Provetes	m_i (g)	m_t (g)								
		0 min	5min	20min	1h	2h	4h	6h15min	21h	24h
1	112,111	112,111	112,651	112,802	112,810	112,851	112,937	112,971	113,178	112,603
2	173,855	173,855	174,307	174,117	174,210	174,233	174,527	174,340	174,662	174,273
3	180,938	180,938	181,364	181,200	181,200	181,321	181,590	181,705	181,843	181,464
4	106,997	106,997	107,779	107,685	107,690	107,659	107,787	107,785	108,030	107,703
5	144,148	144,148	144,388	144,402	144,731	144,598	144,774	144,667	144,878	144,563
6	121,433	121,433	122,143	121,904	122,048	122,161	122,159	122,220	122,472	122,124
Δm (kg/m ²)	t (min/h)	0	5	20	1	2	4	6,25	21	24
	t (s)	0	300	1200	3600	7200	14400	22500	75600	86400
	t (s ^{1/2})	0	17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	150,00	274,95	293,94
	1	0,000	0,062	0,080	0,081	0,085	0,095	0,099	0,123	0,057
	2	0,000	0,054	0,031	0,043	0,045	0,081	0,058	0,097	0,050
	3	0,000	0,051	0,031	0,031	0,045	0,077	0,091	0,107	0,062
	4	0,000	0,097	0,085	0,086	0,082	0,098	0,098	0,128	0,088
	5	0,000	0,029	0,031	0,071	0,055	0,076	0,063	0,088	0,050
	6	0,000	0,084	0,056	0,073	0,086	0,086	0,093	0,123	0,082
m_i massa inicial do provete (g) m_t massa do provete no tempo t (g) A área da superfície do provete em contacto com a água (m ²) Δm massa de água absorvida pela área do provete em contacto com a água (kg/m ²)										
$\Delta m = \frac{(m_t - m_i)}{A}$										

Identificação do produto
Placas de poliestireno extrudido (XPS)

Resultados Gráficos

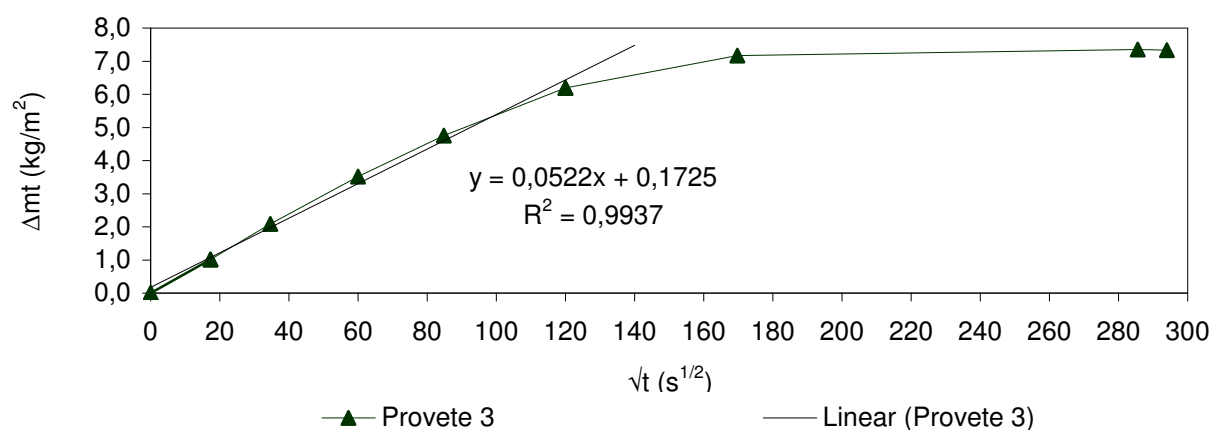
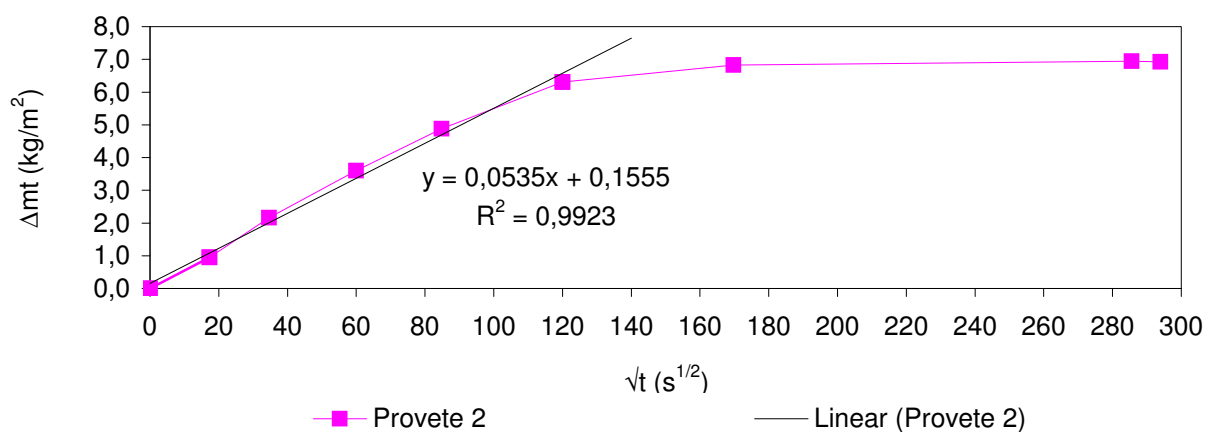
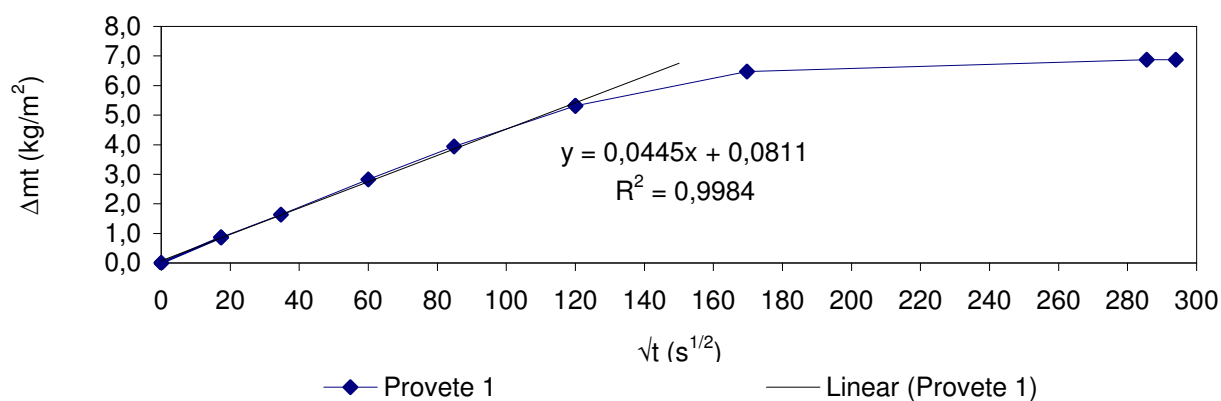


Determinação do coeficiente de absorção de água										FE03
Identificação do produto										
Reboco com poliestireno expandido (EPS) - A ₁										
Determinação										
Estabilização da massa dos provetes com precisão de ± 0,1% da sua massa										
Impermeabilização das faces laterais dos provetes										
Obtenção da massa dos provetes após imersão em água nos intervalos de tempo definidos na norma										
Equipamento										
Câmara climática										
Balança <i>Precisa 800 M</i> com precisão de 0,001 g										
Cronómetro										
Tina de ensaio										
Resultados										
Provetes	m _i (g)	m _t (g)								
		0 min	5min	20mim	1h	2h	4h	8h	22h39min	24h
1	254,669	254,669	267,194	278,284	295,638	311,775	331,673	348,391	354,229	354,155
2	272,57	272,570	286,053	303,362	323,904	342,238	362,650	369,928	371,626	371,426
3	284,924	284,924	299,519	315,081	335,725	353,567	374,424	388,504	391,090	390,884
4	277,724	277,724	290,176	299,936	316,596	333,209	353,446	369,339	374,465	374,819
5	271,482	271,482	283,118	293,825	310,546	326,528	346,519	359,504	362,556	362,717
6	292,229	292,229	300,664	312,818	336,366	356,445	377,852	384,490	391,134	391,132
Δm (kg/m ²)	t (min/h)	0	5	20	1	2	4	6,25	22,65	24
	t (s)	0	300	1200	3600	7200	14400	22500	81540	86400
	t (s ^{1/2})	0	17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	150,00	285,55	293,94
	1	0,000	0,865	1,631	2,830	3,945	5,319	6,474	6,878	6,872
	2	0,000	0,945	2,157	3,597	4,881	6,312	6,822	6,941	6,926
	3	0,000	1,010	2,087	3,516	4,751	6,194	7,169	7,348	7,334
	4	0,000	0,958	1,708	2,989	4,267	5,823	7,045	7,439	7,467
	5	0,000	0,826	1,586	2,773	3,908	5,327	6,249	6,466	6,477
	6	0,000	0,585	1,427	3,059	4,451	5,935	6,395	6,856	6,855
m _i massa inicial do provete (g)										
m _t massa do provete no tempo t (g)										
A área da superfície do provete em contacto com a água (m ²)										
Δm massa de água absorvida pela área do provete em contacto com a água (kg/m ²)										
Δm = $\frac{(m_t - m_i)}{A}$										

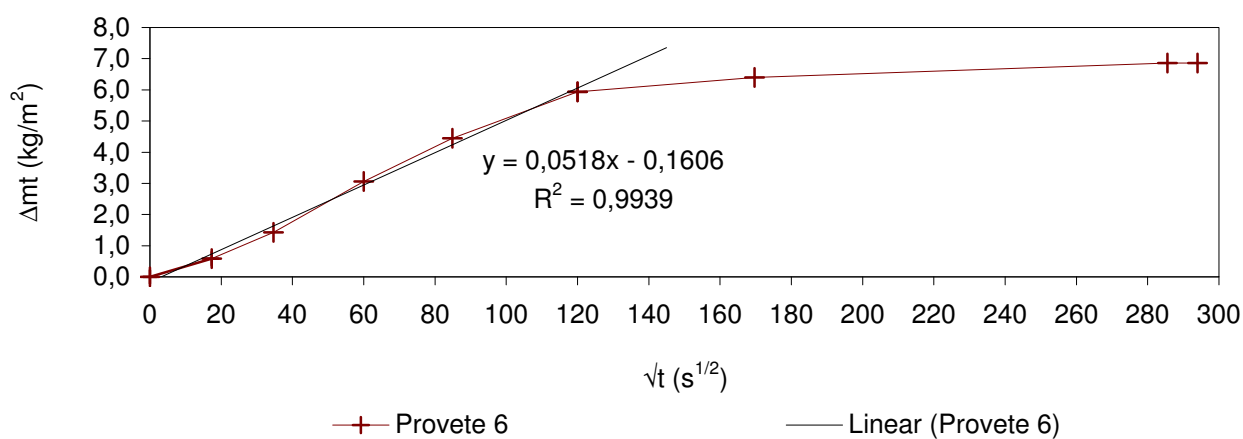
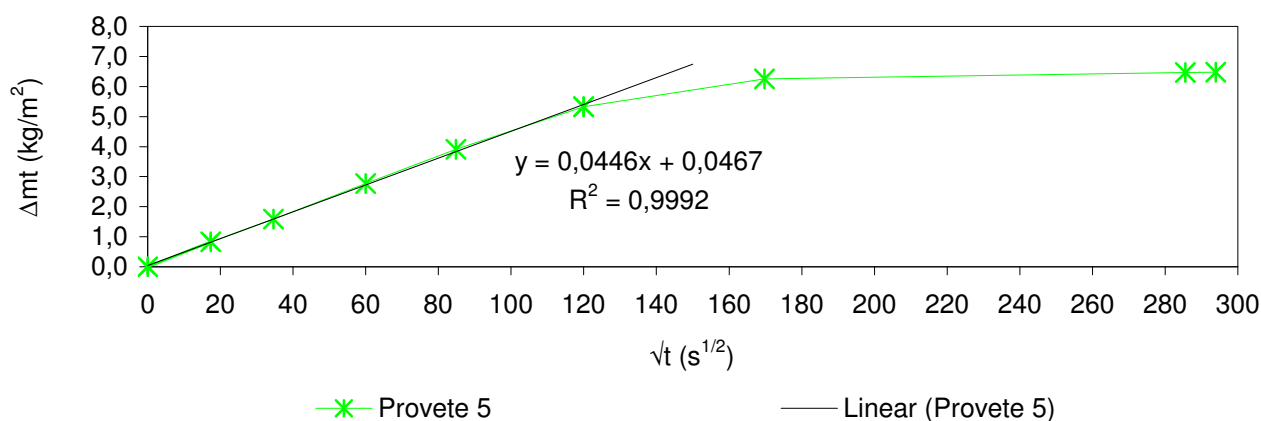
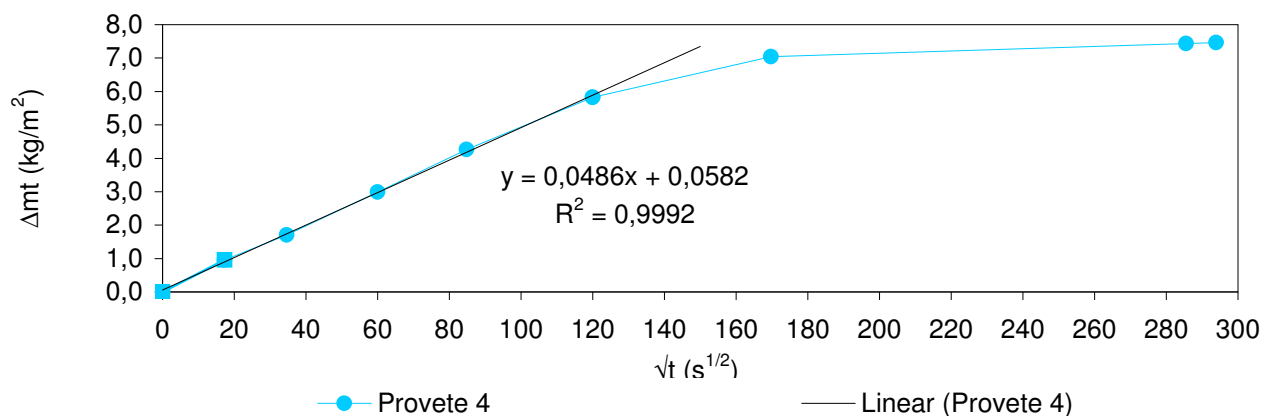
Identificação do produto

Reboco com poliestireno expandido (EPS) - A₁

Resultados Gráficos



Identificação do produto

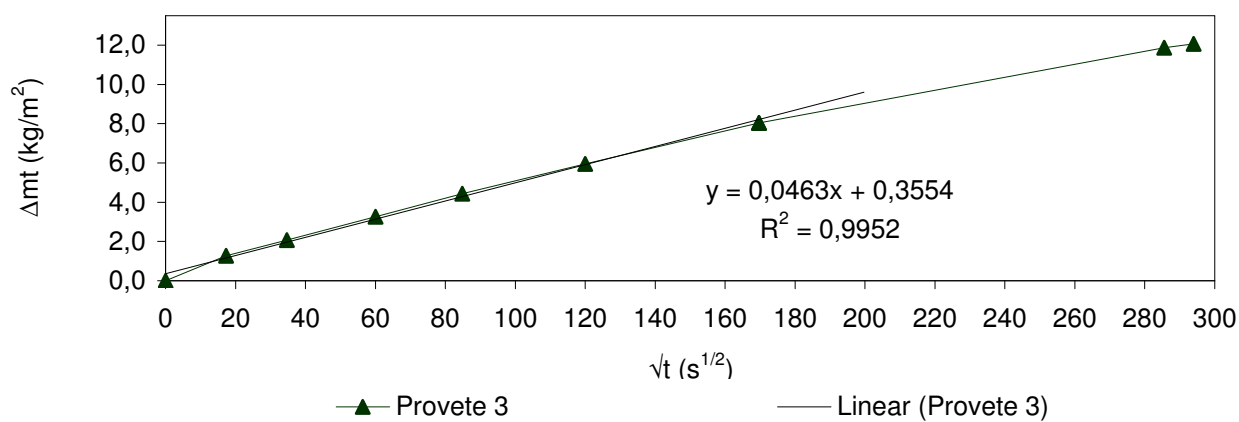
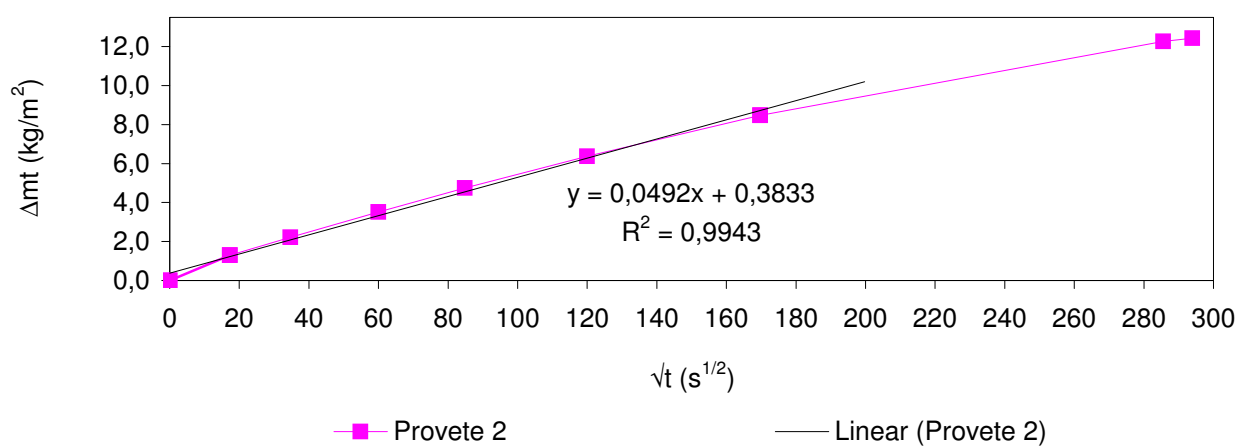
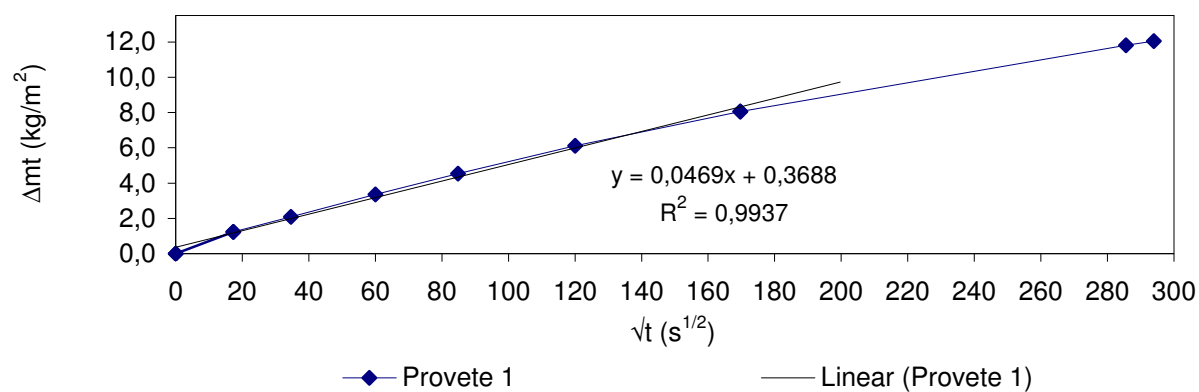
 Reboco com poliestireno expandido (EPS) - A₁
Resultados Gráficos


Determinação do coeficiente de absorção de água										FE04
Identificação do produto										
Reboco com poliestireno expandido (EPS) - A ₂										
Determinação										
Estabilização da massa dos provetes com precisão de ± 0,1% da sua massa										
Impermeabilização das faces laterais dos provetes										
Obtenção da massa dos provetes após imersão em água nos intervalos de tempo definidos na norma										
Equipamento										
Câmara climática										
Balança <i>Precisa 800 M</i> com precisão de 0,001 g										
Cronómetro										
Tina de ensaio										
Resultados										
Provetes	m _i (g)	m _t (g)								
		0 min	5min	20mim	1h	2h	4h	8h	22h39min	24h
1	269,155	269,155	277,324	282,969	291,346	299,212	309,619	322,455	347,311	348,914
2	282,238	282,238	290,770	296,859	305,410	313,589	324,318	338,263	363,323	364,359
3	259,561	259,561	267,846	273,067	280,777	288,460	298,411	311,925	336,987	338,194
4	274,133	274,133	281,679	286,631	293,999	301,564	311,638	324,195	347,385	348,724
5	272,248	272,248	280,918	286,322	294,518	302,596	313,082	327,127	352,983	354,178
6	268,869	268,869	276,300	280,707	287,739	294,598	303,825	315,208	336,131	337,268
Δm (kg/m ²)	t (min/h)	0	5	20	1	2	4	6,25	22,65	24
	t (s)	0	300	1200	3600	7200	14400	22500	81540	86400
	t (s ^{1/2})	0	17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	150,00	285,55	293,94
	1	0,000	1,235	2,088	3,354	4,543	6,116	8,056	11,813	12,056
	2	0,000	1,291	2,213	3,507	4,745	6,369	8,480	12,273	12,429
	3	0,000	1,270	2,071	3,253	4,432	5,958	8,030	11,873	12,058
	4	0,000	1,218	2,018	3,207	4,428	6,055	8,082	11,826	12,042
	5	0,000	1,372	2,228	3,525	4,804	6,463	8,686	12,779	12,968
	6	0,000	1,232	1,963	3,129	4,267	5,797	7,685	11,154	11,343
m _i massa inicial do provete (g)										
m _t massa do provete no tempo t (g)										
A área da superfície do provete em contacto com a água (m ²)										
Δm massa de água absorvida pela área do provete em contacto com a água (kg/m ²)										
Δm = $\frac{(m_t - m_i)}{A}$										

Identificação do produto

Reboco com poliestireno expandido (EPS) - A₂

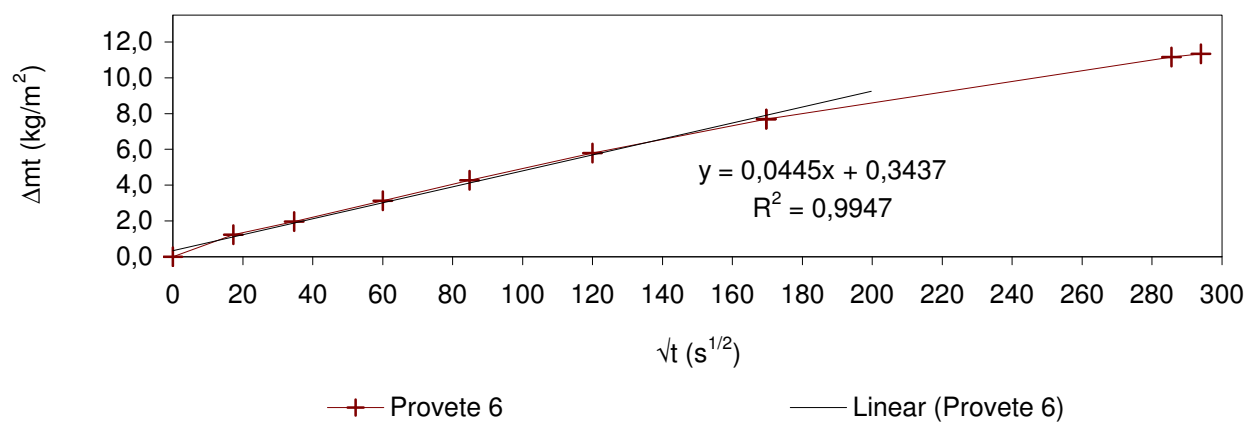
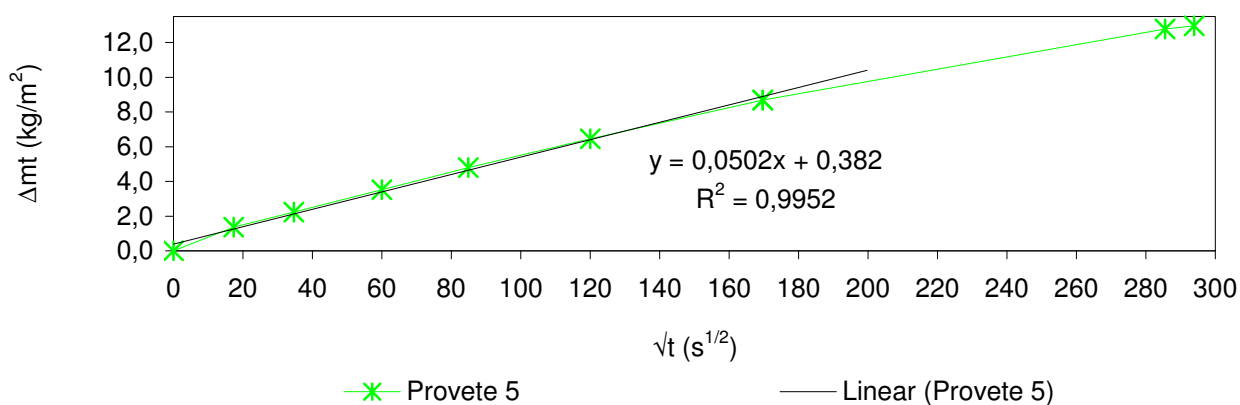
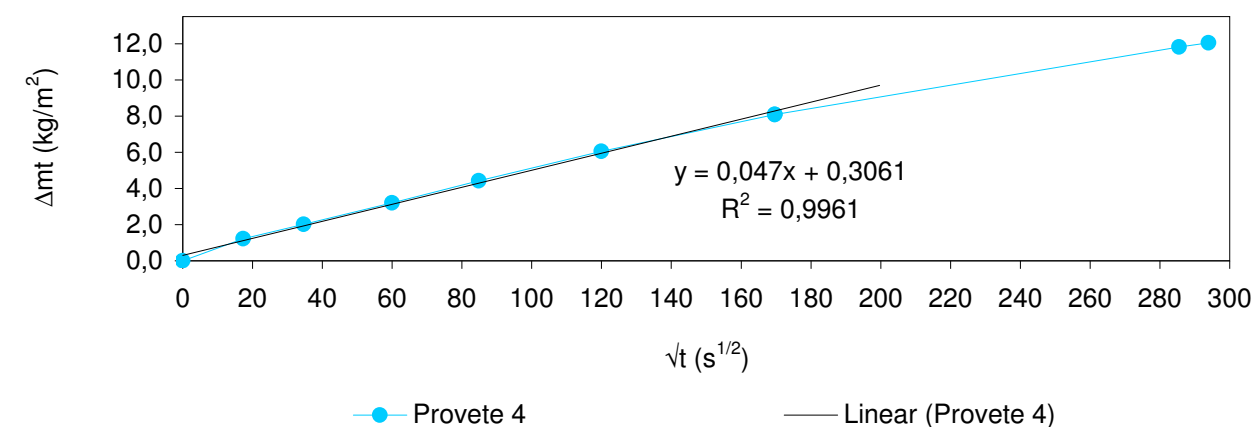
Resultados Gráficos



Identificação do produto

Reboco com poliestireno expandido (EPS) - A₂

Resultados Gráficos

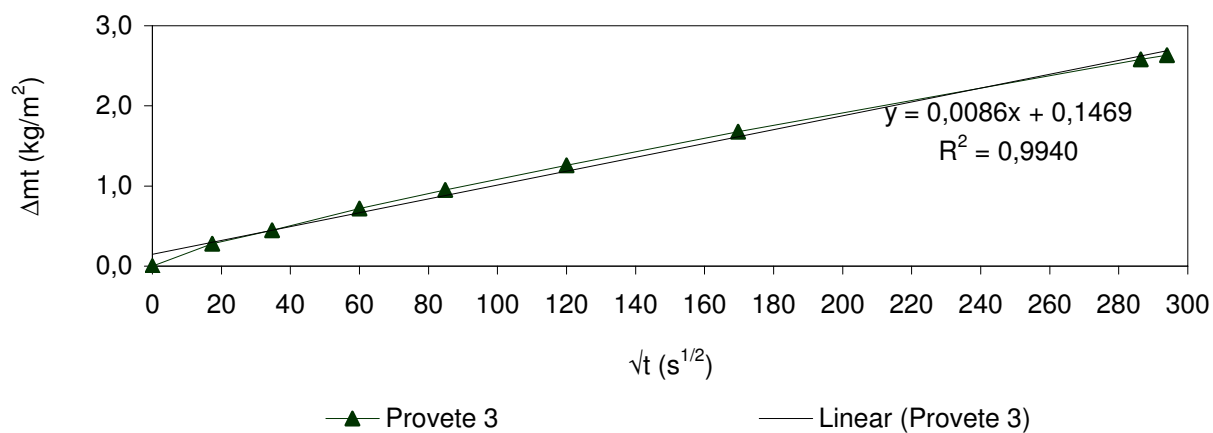
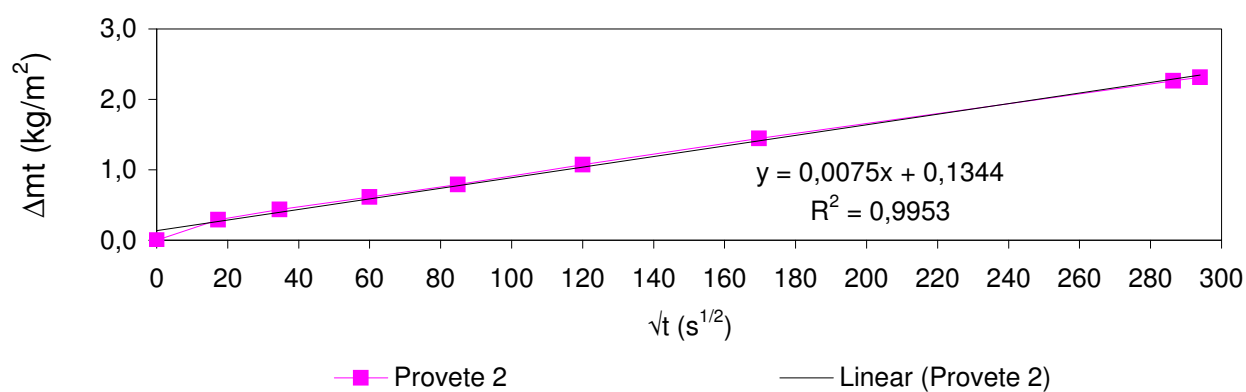
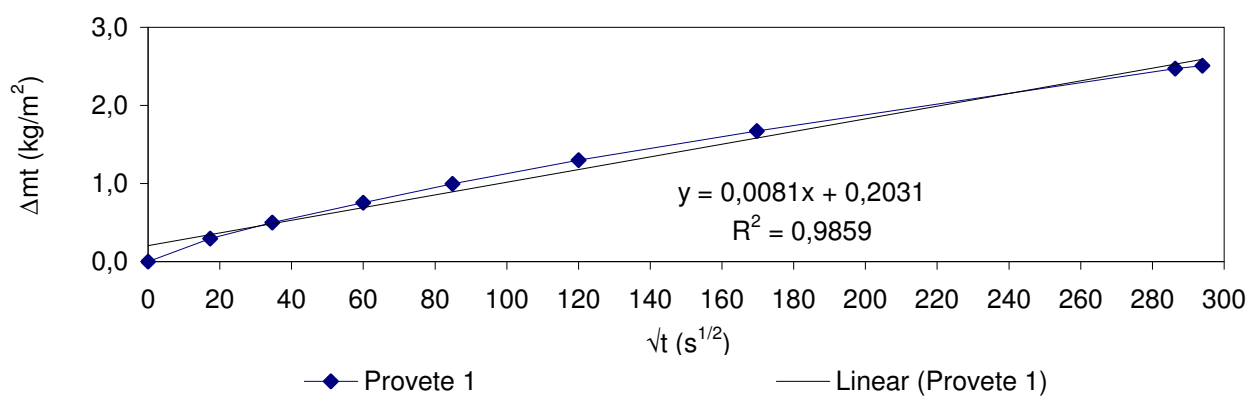


Determinação do coeficiente de absorção de água										FE05
Identificação do produto										
Reboco com cortiça - A ₁										
Determinação										
Estabilização da massa dos provetes com precisão de ± 0,1% da sua massa										
Impermeabilização das faces laterais dos provetes										
Obtenção da massa dos provetes após imersão em água nos intervalos de tempo definidos na norma										
Equipamento										
Câmara climática										
Balança <i>Precisa 800 M</i> com precisão de 0,001 g										
Cronómetro										
Tina de ensaio										
Resultados										
Provetes	m _i (g)	m _t (g)								
		0 min	5min	20min	1h	2h	4h	8h	22h47min	24h
1	612,538	612,538	616,895	619,893	623,618	627,167	631,586	637,074	648,786	649,326
2	611,619	611,619	615,775	617,918	620,468	623,029	627,060	632,410	644,187	644,925
3	604,726	604,726	608,642	610,997	614,825	618,068	622,368	628,260	640,929	641,638
4	616,245	616,245	621,052	623,405	627,399	630,688	634,067	638,264	646,203	647,109
5	571,425	571,425	574,212	575,304	576,671	577,818	579,858	582,245	587,777	588,298
6	622,154	622,154	625,807	627,090	629,364	631,765	634,801	638,753	647,754	648,351
Δm (kg/m ²)	t (min/h)	0	5	20	1	2	4	6,25	22,78333	24
	t (s)	0	300	1200	3600	7200	14400	22500	82020	86400
	t (s ^{1/2})	0	17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	150,00	286,39	293,94
	1	0,000	0,297	0,501	0,755	0,997	1,298	1,672	2,470	2,506
	2	0,000	0,289	0,438	0,615	0,793	1,073	1,445	2,263	2,314
	3	0,000	0,279	0,447	0,720	0,951	1,257	1,677	2,580	2,631
	4	0,000	0,335	0,499	0,778	1,007	1,243	1,535	2,089	2,152
	5	0,000	0,218	0,303	0,409	0,499	0,658	0,845	1,276	1,317
	6	0,000	0,251	0,339	0,495	0,660	0,869	1,140	1,759	1,800
m_i massa inicial do provete (g) m_t massa do provete no tempo t (g) A área da superfície do provete em contacto com a água (m²) Δm massa de água absorvida pela área do provete em contacto com a água (kg/m²) $\Delta m = \frac{(m_t - m_i)}{A}$										

Identificação do produto

Reboco com cortiça - A₁

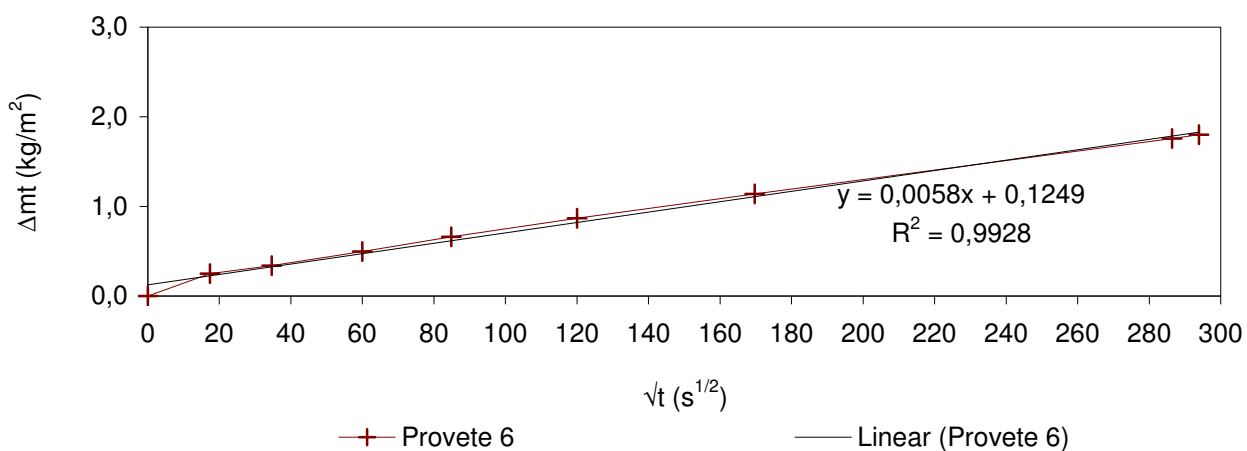
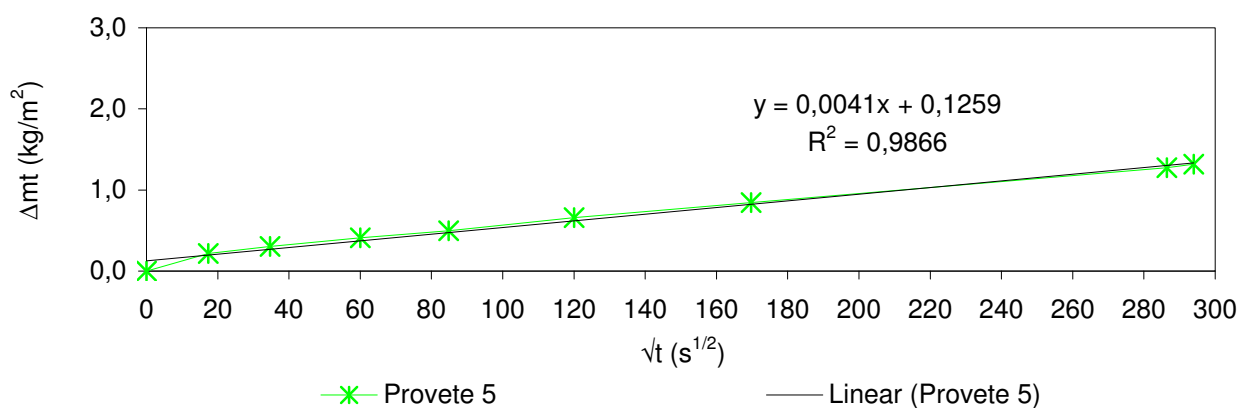
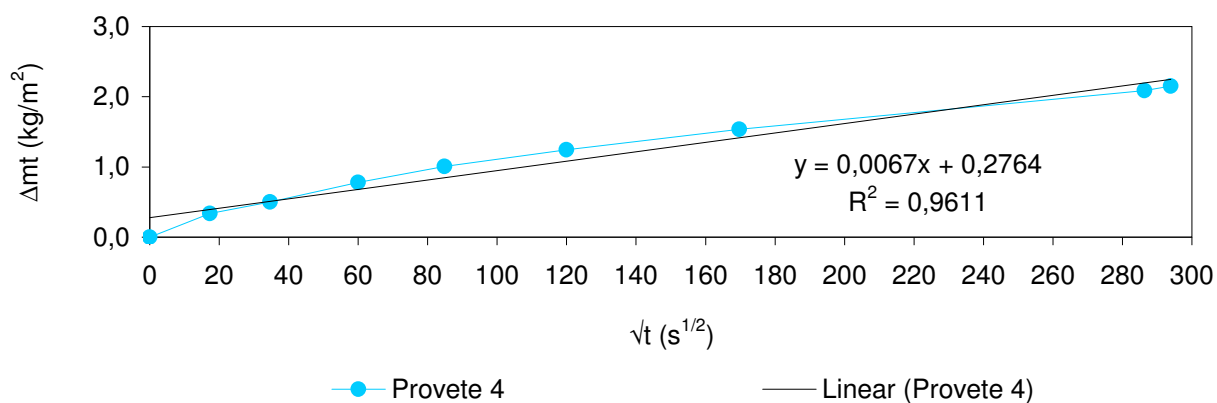
Resultados Gráficos



Identificação do produto

Reboco com cortiça - A₁

Resultados Gráficos

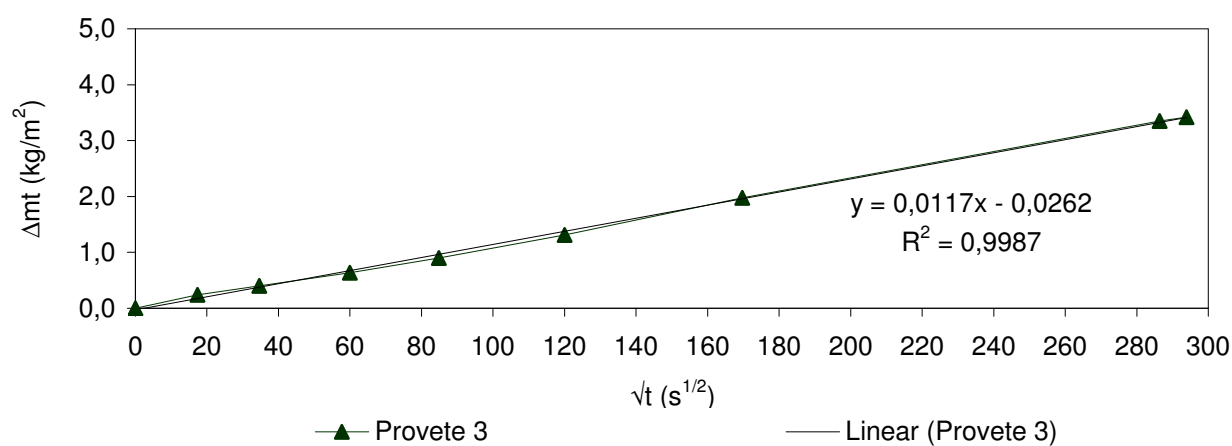
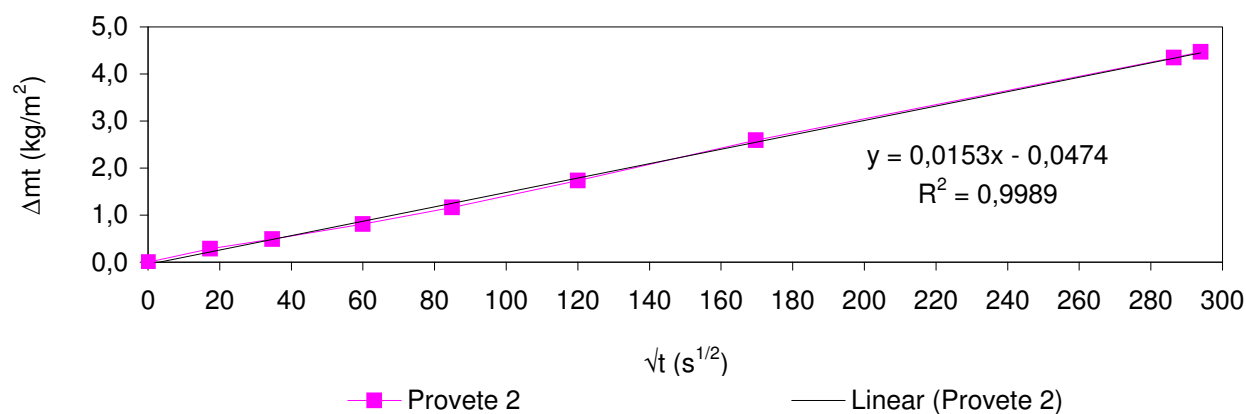
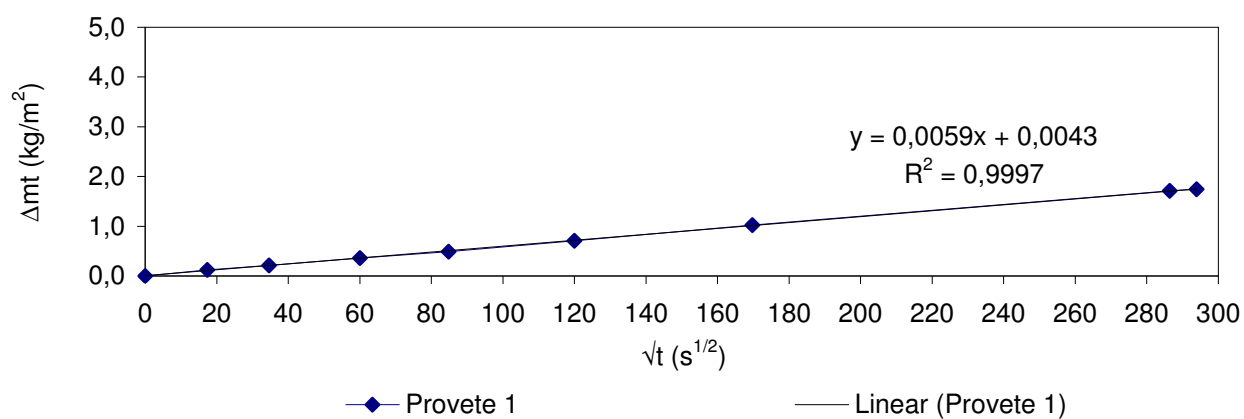


Determinação do coeficiente de absorção de água										FE06
Identificação do produto										
Reboco com cortiça - A ₂										
Determinação										
Estabilização da massa dos provetes com precisão de ± 0,1% da sua massa										
Impermeabilização das faces laterais dos provetes										
Obtenção da massa dos provetes após imersão em água nos intervalos de tempo definidos na norma										
Equipamento										
Câmara climática										
Balança <i>Precisa 800 M</i> com precisão de 0,001 g										
Cronómetro										
Tina de ensaio										
Resultados										
Provetes	m _i (g)	m _t (g)								
		0 min	5min	20min	1h	2h	4h	8h	22h47min	24h
1	605,381	605,381	606,086	606,640	607,505	608,246	609,528	611,379	615,406	615,601
2	654,579	654,579	656,453	657,777	659,853	662,128	665,824	671,412	682,772	683,598
3	628,341	628,341	629,908	630,941	632,459	634,143	636,833	641,118	650,010	650,449
4	585,465	585,465	587,656	589,131	590,979	593,027	596,720	602,293	614,629	615,091
5	613,071	613,071	614,279	615,128	616,217	617,286	618,783	621,240	625,762	626,011
6	641,837	641,837	642,925	643,755	644,687	645,787	647,314	649,696	654,519	654,412
Δm (kg/m ²)	t (min/h)	0	5	20	1	2	4	6,25	22,78333	24
	t (s)	0	300	1200	3600	7200	14400	22500	82020	86400
	t (s ^{1/2})	0	17,32	34,64	60,00	84,85	120,00	150,00	286,39	293,94
	1	0,000	0,120	0,215	0,362	0,488	0,707	1,022	1,709	1,742
	2	0,000	0,289	0,493	0,813	1,163	1,732	2,593	4,344	4,471
	3	0,000	0,242	0,402	0,637	0,898	1,314	1,977	3,353	3,421
	4	0,000	0,341	0,570	0,857	1,176	1,750	2,616	4,534	4,605
	5	0,000	0,192	0,326	0,499	0,669	0,906	1,296	2,013	2,053
	6	0,000	0,168	0,297	0,441	0,612	0,848	1,217	1,964	1,947
m _i massa inicial do provete (g) m _t massa do provete no tempo t (g) A área da superfície do provete em contacto com a água (m ²) Δm massa de água absorvida pela área do provete em contacto com a água (kg/m ²)										
$\Delta m = \frac{(m_t - m_i)}{A}$										

Identificação do produto

Reboco com cortiça - A₂

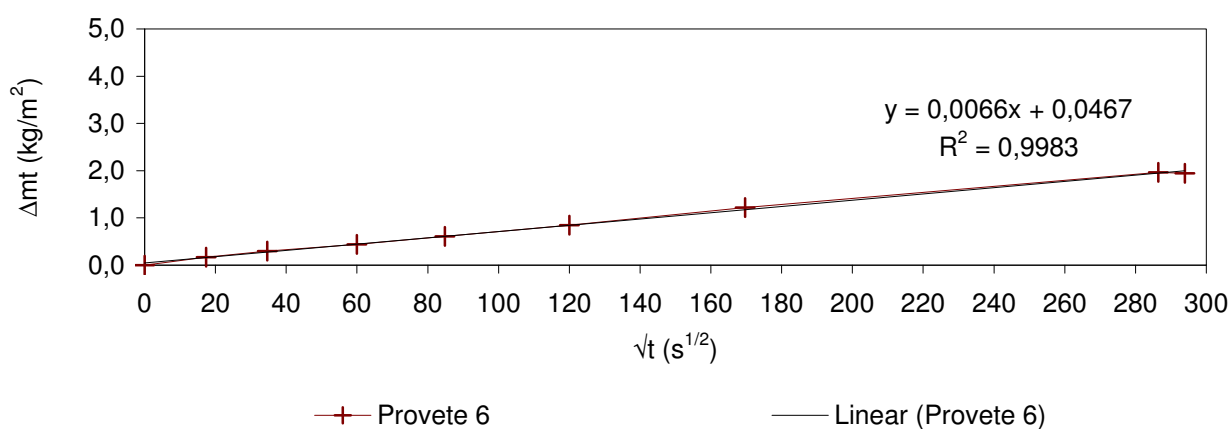
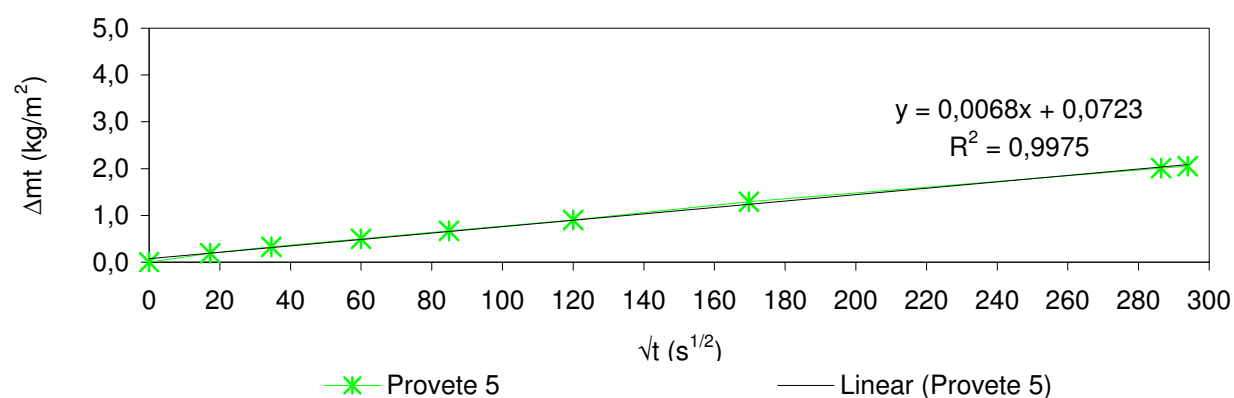
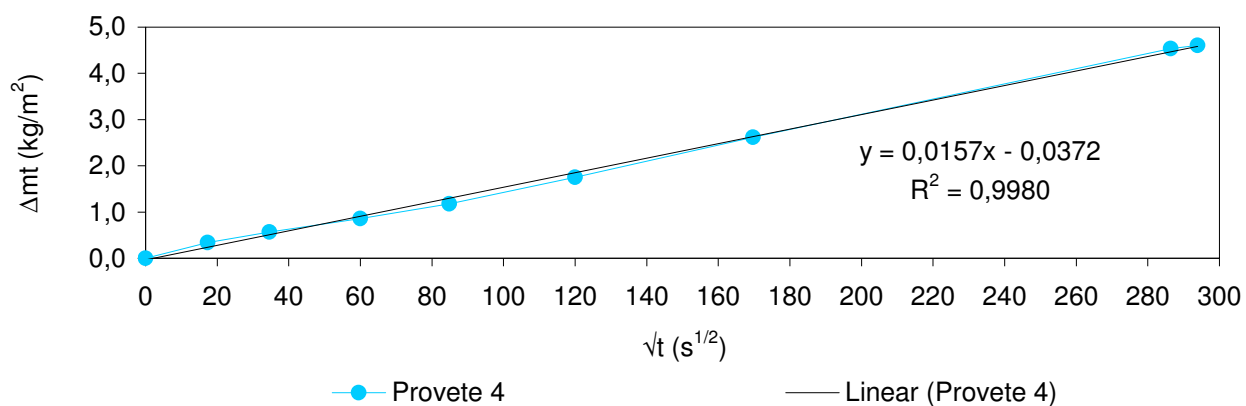
Resultados Gráficos



Identificação do produto

Reboco com cortiça - A₂

Resultados Gráficos



ANEXO A2

FICHAS DE ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE DE SATURAÇÃO CAPILAR

Determinação do teor de humidade de saturação capilar							FE01	
Identificação do produto								
Gesso projectado (GP)								
Determinação								
Saturação dos provetes por imerção, obtendo-se m_{cap} , quando em 2 pesagens consecutivas a diferença de massa é menor ou igual a 1 %								
Secagem dos provetes em estufa a 105°C, obtendo-se m_0 , quando em 2 pesagens consecutivas a diferença de massa é de pelo menos 0,5%								
Equipamento								
Balança <i>Precisa 800 M</i> com precisão de 0,001 g								
Tabuleiros de plástico e inox								
Estufa								
Resultados								
Provetes	Massa (g)			Variação 1-2 (%)	Variação 2 3 (%)	m_{cap} (g)	m_{cap} (kg)	
	1	2	3					
	1	111,651	112,058	112,200	0,363	0,127	112,200	0,11220
	2	116,367	115,941	115,629	-0,367	-0,270	115,629	0,11563
	3	112,215	112,577	112,240	0,322	-0,300	112,240	0,11224
	4	110,344	110,485	110,605	0,128	0,108	110,605	0,11061
	5	114,672	114,937	114,947	0,231	0,009	114,947	0,11495
	6	112,617	112,804	113,213	0,166	0,361	113,213	0,11321
<1%								
Provetes	Massa (g)			Variação 1-2 (%)	Variação 2 3 (%)	m_0 (g)	m_0 (kg)	
	1	2	3					
	1	79,103	78,903	78,791	-0,253	-0,142	78,791	0,07879
	2	81,376	81,189	81,082	-0,230	-0,132	81,082	0,08108
	3	78,496	78,322	78,213	-0,222	-0,139	78,213	0,07821
	4	77,943	77,755	77,655	-0,242	-0,129	77,655	0,07766
	5	81,220	81,028	80,920	-0,237	-0,133	80,920	0,08092
	6	79,092	78,908	78,906	-0,233	-0,003	78,906	0,07891
<0,5%								
Provetes	$V\ (m^3)$	$m_{cap}(kg)$	$m_0\ (kg)$	$w_{cap}\ (kg/m^3)$				
	1	8,00E-05	0,112	0,079	417,385			
	2	8,19E-05	0,116	0,081	421,969			
	3	7,96E-05	0,112	0,078	427,488			
	4	7,90E-05	0,111	0,078	417,337			
	5	8,30E-05	0,115	0,081	409,808			
	6	8,13E-05	0,113	0,079	422,090			
$w_{cap} = \frac{m_{cap} - m_0}{V}$								
m_{cap} massa do provete saturado								
m_0 massa do provete seco								
V volume do provete								
w_{cap} teor de humidade de saturação capilar								

Determinação do teor de humidade de saturação capilar								FE02		
Identificação do produto										
XPS										
Determinação										
Saturação dos provetes por imersão, obtendo-se m_{cap} , quando em 2 pesagens consecutivas a diferença de massa é menor ou igual a 1 %										
Secagem dos provetes em estufa a 105°C, obtendo-se m_0 , quando em 2 pesagens consecutivas a diferença de massa é de pelo menos 0,5%										
Equipamento										
Balança <i>Precisa 800 M</i> com precisão de 0,001 g										
Tabuleiros de plástico e inox										
Estufa										
Resultados										
	Provetes	Massa (g)				Variação 2-1 (%)	Variação 3-2 (%)	Variação 4-3 (%)	m_{cap} (g)	m_{cap} (kg)
		1	2	3	4					
	1	4,601	5,030	4,903	4,927	9,324	-2,525	0,489		
	2	4,519	4,606	4,590	4,742	1,925	-0,347	3,312		
	3	4,538	4,618	4,440	4,887	1,763	-3,854	10,068		
	4	4,593	4,774	4,726	4,916	3,941	-1,005	4,020		
	5	4,788	5,050	5,010	4,908	5,472	-0,792	-2,036		
6	5,138	5,100	5,180	5,296	-0,740	1,569	2,239			
>1%										
	Provetes	Massa (g)		Variação 1-2 (%)	m_0 (g)	m_0 (kg)				
		1	2							
	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
6										
<0,5%										
	Provetes	V (m ³)	m_{cap} (kg)	m_0 (kg)	w_{cap} (kg/m ³)					
	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
$w_{cap} = \frac{m_{cap} - m_0}{V}$										
m_{cap} massa do provete saturado m_0 massa do provete seco V volume do provete w_{cap} teor de humidade de saturação capilar										

Determinação do teor de humidade de saturação capilar	FE03
--	-------------

Identificação do produto
Reboco com poliestireno expandido (EPS)

Determinação
Saturação dos provetes por imerção, obtendo-se m_{cap} , quando em 2 pesagens consecutivas a diferença de massa é menor ou igual a 1 %
Secagem dos provetes em estufa a 105°C, obtendo-se m_0 , quando em 2 pesagens consecutivas a diferença de massa é de pelo menos 0,5%

Equipamento
Balança <i>Precisa 800 M</i> com precisão de 0,001 g
Tabuleiros de plástico e inox
Estufa

Resultados

Provetes	Massa (g)			Variação 1-2 (%)	Variação 2-3 (%)	m_{cap} (g)	m_{cap} (kg)
	1	2	3				
1	97,738	97,861	97,927	-0,126	-0,067	97,927	0,09793
2	102,569	101,769	102,331	0,780	-0,552	102,331	0,10233
3	98,222	98,414	98,568	-0,195	-0,156	98,568	0,09857
4	102,267	102,057	102,209	0,205	-0,149	102,209	0,10221
5	100,830	101,496	101,687	-0,661	-0,188	101,687	0,10169
6	98,990	99,114	99,142	-0,125	-0,028	99,142	0,09914

<1%

Provetes	Massa (g)		Variação 1-2 (%)	m_0 (g)	m_0 (kg)
	1	2			
1	66,173	66,158	-0,023	66,158	0,06616
2	69,329	69,310	-0,027	69,310	0,06931
3	65,529	65,512	-0,026	65,512	0,06551
4	68,218	68,197	-0,031	68,197	0,06820
5	69,100	69,081	-0,027	69,081	0,06908
6	66,506	66,488	-0,027	66,488	0,06649

<0,5%

Provetes	V (m³)	m_{cap} (kg)	m_0 (kg)	w_{cap} (kg/m³)
1	1,80E-04	0,098	0,066	176,875
2	1,84E-04	0,102	0,069	179,603
3	1,76E-04	0,099	0,066	187,882
4	1,80E-04	0,102	0,068	189,028
5	1,84E-04	0,102	0,069	177,319
6	1,80E-04	0,099	0,066	181,623

$$w_{cap} = \frac{m_{cap} - m_0}{V}$$

- m_{cap} massa do provete saturado
- m_0 massa do provete seco
- V volume do provete
- w_{cap} teor de humidade de saturação capilar

