FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

A IMPORTÂNCIA DA INÉRCIA HIGROSCÓPICA NO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DOS EDIFÍCIOS

Nuno Manuel Monteiro Ramos

Mestre em Construção de Edifícios pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor
em Engenharia Civil pela
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador: Prof. Doutor Vasco Manuel Araújo Peixoto de Freitas

JUNHO 2007

Dedicatória

À Paula

Ao David e ao Pedro

Agradecimentos

A realização de uma Tese de Doutoramento é uma tarefa individual, semelhante a uma corrida de fundo, durante a qual o atleta só pode contar com as suas capacidades para a concluir. No entanto, mesmo um maratonista depende de um conjunto de ajudas essenciais para o seu sucesso, seja ao nível material, seja ao nível espiritual.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, o Prof. Vasco Peixoto de Freitas, por todo o seu apoio empenhado ao trabalho desenvolvido. A proposta de tema, a disponibilização dos meios laboratoriais necessários ao seu estudo, o estabelecimento de contactos com grupos de investigadores internacionais, a concretização de parcerias com a indústria nacional e o aconselhamento durante as várias fases do trabalho são alguns dos aspectos que gostaria de destacar dessa orientação. O empenho do Prof. Vasco Peixoto de Freitas neste processo permitiu uma envolvente de alta competição a um trabalho que, de outra forma, poderia ter corrido no pelotão dos amadores.

Agradeço o apoio da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projecto POCI/ECM/57722/2004 – Humidade na Construção, co-financiado pelo FEDER. Agradeço também o valioso apoio na realização de provetes prestado pelas empresas CIN e SIVAL.

Pela possibilidade de discussão científica ao melhor nível agradeço a todos os colegas que participaram nos trabalhos do projecto de investigação IEA Annex 41. Destaco o inestimável apoio da Profª Angela Sasic Kalagasidis no pronto esclarecimento de dúvidas decorrentes da utilização do programa HAM-Tools.

A todos os docentes da Secção de Construções Civis, pela sua contribuição, a diferentes níveis, para o sucesso deste trabalho, deixo o meu agradecimento. Devo destacar a acção do Prof. Moreira da Costa e da Profª Helena Corvacho, enquanto Directores da Secção no período de realização deste trabalho. A sua resposta pronta às minhas diversas solicitações foi um factor decisivo para o sucesso desta Tese. A

disponibilidade da Eng.ª Eva Barreira foi também muito relevante para a troca de ideias sobre assuntos muitas vezes áridos e onde faltam interlocutores.

Os colegas do LFC-FEUP merecem também o meu sincero agradecimento pela sua ajuda em algumas tarefas e pela paciência que evidenciaram, ouvindo os meus lamentos nos momentos mais negros deste percurso. Um obrigado muito especial ao Eng. Nuno Machado, não só pela realização de algumas figuras de grande qualidade desta Tese, mas também pelo seu companheirismo e compreensão. Obrigado também ao Dr. João Delgado pela ajuda na procura de ideias.

A minha família é, como sempre foi e sempre será, a minha torre de força. Obrigado a todos pelo amor e carinho com que sei que posso sempre contar. Agradeço à Tina e ao Zé Alberto a leitura atenta do texto.

E pedindo perdão pelo plágio descarado…agradeço à Paula por sermos um só.

Resumo

A variação da humidade relativa interior é um aspecto crucial do desempenho dos edifícios. Afecta significativamente o conforto térmico, a percepção da qualidade do ar, a saúde dos utilizadores, a durabilidade dos materiais de construção e o consumo de energia dos edifícios.

No presente trabalho pretendeu-se aprofundar o conceito de inércia higroscópica. Trata-se de um factor relevante cujo estudo detalhado permitiu dar um novo passo na direcção de uma melhor compreensão da variação da humidade relativa interior.

A revisão do estado da arte do conhecimento sobre a humidade e os edifícios permitiu sistematizar a formulação teórica da transferência de calor e humidade, avaliar os limites ideais para a humidade relativa interior numa lógica exigencial, definir o processo de quantificação dos factores que condicionam a humidade interior e sintetizar os trabalhos mais relevantes sobre inércia higroscópica.

A componente numérica desta Tese foi suportada pelo programa de simulação HAM-Tools, que permite uma modelação detalhada do comportamento higrotérmico dos edifícios. Foi possível, por isso, realizar uma análise aprofundada da capacidade de armazenamento de humidade dos materiais porosos e conjugar simultaneamente esse efeito com a análise do comportamento higrotérmico global de um compartimento.

O trabalho experimental desenvolvido foi composto por duas tarefas distintas. A primeira pretendeu caracterizar a capacidade de armazenamento de humidade de materiais e elementos que podem influenciar o ambiente interior. Para isso foi determinada a curva higroscópica de três tipos de revestimentos à base de gesso e a permeabilidade ao vapor desses materiais e de esquemas de pintura aplicados sobre eles. Foi também determinada uma propriedade definida como *MBV* – "Moisture Buffer Value", que permite estimar a capacidade de armazenamento de humidade de um

elemento para um ciclo diário de variação da humidade relativa do ar. A segunda tarefa experimental correspondeu à análise do efeito da inércia higroscópica na variação da humidade relativa. Foi construída uma câmara de fluxo que permite, a escala reduzida, reproduzir o comportamento higrotérmico de um compartimento. A versatilidade deste equipamento permitiu testar a inércia higroscópica diária introduzida por diferentes combinações de elementos.

A simulação numérica dos ensaios *MBV* e dos ensaios na câmara de fluxo com o programa HAM-Tools, associada às propriedades medidas experimentalmente, permitiu validar e calibrar o modelo aplicado. A simulação do comportamento higrotérmico de um quarto virtual permitiu uma análise de sensibilidade ao efeito da variação dos parâmetros mais relevantes para a definição da humidade relativa interior e das condições de desenvolvimento de patologias em elementos construtivos.

A proposta de uma metodologia de avaliação da relação entre inércia higroscópica e variação da humidade relativa assentou na definição do índice de inércia higroscópica diária, $I_{h,d}$, e da sua relação com a amplitude média diária da variação de humidade relativa de um compartimento. Esta abordagem permitiu a definição de classes de inércia higroscópica.

PALAVRAS CHAVE: Edifícios, Humidade Relativa, Inércia Higroscópica, Simulação Numérica, Trabalho Experimental.

Abstract

The variation of inside relative humidity is a crucial aspect of building performance. It affects thermal comfort, perception of air quality, health, material's durability and energy consumption.

This work intended to develop a deeper understanding of hygroscopic inertia. It's a relevant factor that, studied in detail, allowed for a new step towards a better comprehension of the inside relative humidity variation.

The revision of the state-of-the-art on humidity and buildings allowed for a systematic treatment of the theoretical formulation of heat and moisture transfer, the evaluation of relative humidity ideal limits, the definition of the quantification process of factors that affect inside humidity and the relevant work on the hygroscopic inertia subject.

The numerical part of this Thesis used HAM-Tools simulation program that allows for a detailed analysis of a building's hygrothermal behaviour. The analysis of porous materials moisture buffer capacity, combined with its effect on the global hygrothermal behaviour of a zone was, therefore, made possible.

The experimental work was divided in two parts. The first one intended the characterization of the moisture buffer capacity of elements present in the indoor environment. It included the determination of the sorption isotherms of three types of gypsum based materials, their vapour permeability and the vapour resistance introduced by different painting schemes applied on their surfaces. A property called *MBV,* Moisture Buffer Value, was also determined, allowing for an estimate of the moisture buffer capacity of an element facing a daily cycle of relative humidity variation. The second part of the experimental work was the analysis of the effect of hygroscopic inertia on relative humidity variation. A flux chamber was built, allowing for small scale testing of a room's hygrothermal behaviour. This equipment's ver-

satility allowed for the testing of the daily hygroscopic inertia, produced by the combination of different elements.

The numerical simulation of *MBV* tests and flux chamber tests, using HAM-Tools and the basic properties determined experimentally, provided validation and calibration of the modelling process. The hygrothermal behaviour simulation of a virtual bedroom supported a sensitivity analysis of the variation of the most important parameters for the inside relative humidity variation and the correspondent conditions for building pathology occurrence.

An evaluation methodology of the relation between hygroscopic inertia and the variation of relative humidity was proposed, based on the definition of the daily hygroscopic inertia index, $I_{h,d}$, and its relation with the average daily amplitude of the relative humidity variation in a room. This approach also produced the definition of hygroscopic inertia classes.

KEY WORDS: Buildings, Relative Humidity, Hygroscopic Inertia, Numerical Simulation, Laboratory Tests.

.

Résumé

La variation de l'humidité relative intérieure est un aspect crucial de la performance des bâtiments. Elle affecte significativement le confort thermique, la perception de la qualité de l'air, la santé des utilisateurs des bâtiments, la durabilité des matériaux de construction et la consommation d'énergie des bâtiments.

Dans le présent travaille, le concept d'inertie hygroscopique a été approfondi. Il s'agit d'un facteur important dont l'étude détaillée a permit de donner un nouveau pas dans la direction d'une meilleur compréhension de la variation de l'humidité relative intérieure.

La révision de l'état de l'art des connaissances sur l'humidité et sur les bâtiments a permit de systématiser la formulation théorique du transfert de chaleur et humidité, évaluer les limites idéales pour l'humidité relative intérieur, définir le processus de quantification des facteurs qui conditionnent l'humidité relative intérieur et synthétiser les travaux plus important sur l'inertie hygroscopique.

La partie numérique de cette Thèse a été supportée par le programme de simulation HAM-Tools, qui permet une modulation détaillée du comportement hygrothermique des bâtiments. De ce fait, il a été possible de réaliser une analyse approfondie de la capacité de stockage de l'humidité des matériaux poreux et conjuguer simultanément cet effet avec l'analyse du comportement hygrothermique global d'un compartiment.

Le travaille expérimentale développé a été composé par deux tâche différentes. La première a prétendu caractériser la capacité de stockage d'humidité de matériaux et d'éléments qui peuvent influencer l'ambiance intérieur. Pour cela, la courbe hygroscopique de trois types de revêtements à base de plâtre a été déterminée, ainsi comme la perméabilité à la vapeur de ces matériaux et de la peinture appliqué dessus.

Une propriété défini comme *MBV* – "Moisture Buffer Value" a aussi été déterminée, qui permet d'estimer la capacité de stockage d'humidité d'un élément pour un cycle journalier de variation de l'humidité relative de l'air. La deuxième tâche expérimentale a correspondu à l'analyse de l'effet de l'inertie hygroscopique sur la variation de l'humidité relative. Une chambre de flux a été construite, et permet, à une échelle réduite, reproduire le comportement hygrothermique d'un compartiment. La versatilité de cet équipement a permit de tester l'inertie hygroscopique journalière introduite par différente combinaison d'éléments.

La simulation numérique des essais *MBV* et des essais dans la chambre de flux avec le programme HAM-Tools, associée aux propriétés mesurées expérimentalement, ont permit de valider et calibrer le modèle appliqué. La simulation du comportement hygrothermique d'une chambre virtuelle a permit une analyse de sensibilité à l'effet de la variation des paramètres plus importants pour la définition de l'humidité relative intérieure et des conditions de développement des pathologies dans les éléments constructifs.

La proposition d'une méthodologie d'évaluation de la relation entre l'inertie hygroscopique et la variation de l'humidité relative a été appuyée sur la définition de l'index d'inertie hygroscopique journalière, $I_{h,d}$, et de sa relation avec l'amplitude moyenne journalière de la variation de l'humidité relative d'un compartiment. Cette abordage a permit la définition de classes d'inertie hygroscopique.

MOTS CLÉS: Bâtiments, Humidité Relative, Inertie Hygroscopique, Simulation Numérique, Travaille Expérimental.

.

Índice

Capítulo 1 Introdução 35
1.1 Enquadramento 35
1.2 Objectivos 36
1.3 Organização do Texto 37
Capítulo 2 A Humidade e os Edifícios 39
2.1 A Humidade e os Materiais Porosos 39
2.1.1 A humidade do ar 39
2.1.2 A humidade dos materiais porosos 41
2.2 A Transferência de Humidade nos Materiais Porosos 45
2.2.1 Mecanismos de transferência de humidade 45
2.2.2 Avaliação da humidade em meios porosos 47
2.2.3 Condições fronteira 49
2.3 A Importância da Humidade para os Utilizadores dos Edifícios 50
2.3.1 Introdução 50
2.3.2 A influência da humidade no conforto térmico e na percepção da qualidade do ar 51
2.3.3 A influência da humidade na degradação de materiais e elementos construtivos 53
2.3.4 A humidade nos edifícios e a saúde dos utilizadores 55
2.3.5 A humidade e o consumo de energia nos edifícios 56
2.3.6 Limites ideais para a variação da humidade relativa 57
2.4 Alguns Factores Definidores da Humidade Relativa Interior 58
2.4.1 Contextualização 58
2.4.2 Utilizadores 58
2.4.3 Sistemas de ventilação 61

2.4.4 Clima exterior 63
2.4.5 Avaliação simplificada da humidade interior 66
2.5 Estudos Desenvolvidos Sobre a Influência dos Materiais Porosos na Moderação da Variação da Humidade Relativa Interior 70
2.5.1 Introdução 70
2.5.2 EDF 70
2.5.3 IEA ECBCS Annex 14 71
2.5.4 Plathner & Woloszyn 73
2.5.5 Padfield 74
2.5.6 Rode *et al.* 77
2.5.7 Simonson *et al.* 78
2.5.8 Svennberg 79
2.5.9 IEA ECBCS Annex 41 80
2.6 Síntese Crítica do Capítulo 2 84
Capítulo 3 Modelação Higrotérmica de Edifícios 87
3.1 Introdução 87
3.2 Modelo Teórico de Transferência de Calor, Ar e Humidade em Edifícios 88
3.2.1 Discretização espacial do edifício 88
3.2.2 Balanço energético de um compartimento 89
3.2.3 Balanço de humidade de um compartimento 91
3.2.4 Transferência unidireccional de ar e calor em elementos construtivos 92
3.2.5 Transferência unidireccional de humidade em elementos construtivos 94
3.2.6 Transferência unidireccional de calor, ar e humidade em superfícies de elementos construtivos expostas ao ambiente exterior 96
3.2.7 Transferência unidireccional de calor, ar e humidade em superfícies de elementos construtivos expostas ao ambiente interior 97
3.3 Aplicação do Modelo Teórico no Programa HAM-Tools 98
3.3.1 Características do programa de simulação 98
3.3.2 Propriedades dos materiais 101
3.3.3 Coeficientes de transferência superfície-ar 103
3.3.4 Dados climáticos 105

3.4 Síntese Crítica do Capítulo 3 107
Capítulo 4 Caracterização de Materiais e Elementos de Construção 109
4.1 Introdução 109
4.2 Equipamento 109
4.3 Caracterização de Curvas Higroscópicas 110
4.3.1 Enquadramento 110
4.3.2 Materiais 112
4.3.3 Procedimento de ensaio 114
4.3.4 Resultados 116
4.4 Caracterização da Permeabilidade ao Vapor 121
4.4.1 Enquadramento 121
4.4.2 Configurações testadas 122
4.4.3 Procedimento de ensaio 124
4.4.4 Resultados 128
4.4.5 Análise dos Resultados 133
4.5 Determinação Experimental do MBV 144
4.5.1 Introdução 144
4.5.2 Definição do conceito 146
4.5.3 Procedimento de ensaio 149
4.5.4 Resultados obtidos 152
4.5.5 Análise dos resultados 158
4.6 Síntese Crítica do Capítulo 4 160
Capítulo 5 Análise Experimental do Efeito da Inércia Higroscópica na Variação da Humidade Relativa 163
5.1 Introdução 163
5.2 Descrição da Infra-estrutura de Ensaio 164
5.2.1 Conceito 164
5.2.2 Câmara climática envolvente 165
5.2.3 Concepção da câmara de fluxo 166
5.2.4 Descrição da câmara de fluxo 169
5.2.5 Sistema de monitorização 174
5.3 Descrição Geral dos Ensaios 176
5.4 Avaliação da Infra-estrutura de Ensaio 178

5.4.1 Avaliação do sistema de monitorização 178
5.4.2 Desempenho da câmara climática envolvente 180
5.4.3 Higroscopicidade da câmara de fluxo 181
5.4.4 Processo de produção de vapor 182
5.4.5 Homogeneidade do ar 184
5.4.6 Duração do ciclo 189
5.5 Ensaios na Câmara de Fluxo 191
5.5.1 Ciclos diários com N=1 h^{-1} 191
5.5.2 Ciclos diários com N=0,5 h^{-1} 193
5.6 Síntese Crítica do Capítulo 5 198
Capítulo 6 Análise do Impacto da Inércia Higroscópica na Variação da Humidade Relativa Interior 201
6.1 Introdução 201
6.2 Simulação Numérica de Ensaios MBV 201
6.2.1 Modelação aplicada 201
6.2.2 Resultados em provetes sem pintura 204
6.2.3 Resultados em provetes pintados 211
6.3 Simulação Numérica de Ensaios na Câmara de Fluxo 217
6.3.1 Modelação aplicada 217
6.3.2 Resultados obtidos 219
6.3.3 Discussão dos resultados 222
6.4 Simulação Numérica do Comportamento Higrotérmico Global de Um Compartimento 226
6.4.1 Modelação aplicada 226
6.4.2 Descrição dos cenários de simulação 228
6.4.3 Resultados obtidos 234
6.4.4 Risco de desenvolvimento de fungos associado aos resultados obtidos 243
6.4.5 Discussão dos resultados 247
6.5 Avaliação da Relação Entre Inércia Higroscópica e Variação da Humidade Relativa Interior 252
6.5.1 Proposta de estratégia de avaliação 252
6.5.2 Aplicação aos resultados disponíveis 257

6.5.3 Correlação matemática dos resultados 261
6.5.4 Classes de inércia higroscópica diária 263
6.6 Síntese Crítica do Capítulo 6 265
Capítulo 7 Conclusões 267
7.1 Conclusões Principais 267
7.2 Desenvolvimentos Futuros 272
Bibliografia 275
Anexos 287
Anexo A Fichas de Ensaio de Determinação da Curva Higroscópica A.1
Anexo B Fichas de Ensaio de Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor B.1
Anexo C Fichas de Ensaio de Determinação do MBV C.1

Índice de Figuras

Figura 1 – Exemplo de diagrama psicrométrico 40
Figura 2 – Esquema de princípio da descrição convencional do teor de humidade de um material (Hagentoft, 2001) 41
Figura 3 – Etapas da fixação de água por adsorção ao nível de um poro, adaptado de Couasnet (1989) 42
Figura 4 – Percurso típico de uma curva higroscópica, adaptado de Hansen (1996) 43
Figura 5 – Histerese das curvas de adsorção e desadsorção (Freitas, 1992) 44
Figura 6 – Curva de retenção de água 45
Figura 7 – Esquema dos processos possíveis de transferência de humidade em meios porosos (Peukhuri, 2003) 47
Figura 8 – Percentagem de insatisfeitos com o conforto respiratório, em função da temperatura e da humidade relativa. 52
Figura 9 – Isopletas generalizadas de germinação de esporos e crescimento do micélio, para diferentes espécies de fungos, de acordo com a temperatura (em abcissa) e a humidade relativa (em ordenada) (Sedlbauer, 2001). 54
Figura 10 – O efeito da humidade em vários parâmetros relacionados com saúde e qualidade do ar interior, indicando que a humidade relativa ideal deveria situar-se entre 30 % e 55 % (Simonson *et al.*, 2001) 57
Figura 11 – Zonamento climático de Portugal continental do RCCTE:2006 64
Figura 12 – Relação entre a diferença de pressão interior e exterior e o número de renovações horárias para um exemplo onde V=30 m^3 e M_{ganhos} toma os valores 75, 150 e 225 g/h. 67

Figura 13 – Gráfico retirado de França (2002) com medições de higrometria em edifícios portugueses (a preto) comparadas com as classes sugeridas pela EN ISO 13788 (a vermelho) e por Freitas e Pinto (1998) (a azul) 69
Figura 14 – Gráficos retirados de Plathner e Woloszyn (2002)..... 74
Figura 15 – Imagens retiradas de Padfield (1998) mostrando um esquema da sua câmara de fluxo e a própria câmara, aberta..... 75
Figura 16 – Imagem retirada de Padfield (1999), com o esquema de determinação do parâmetro "água disponível" (available water)..... 76
Figura 17 – Imagens retiradas de (Rode *et al.*, 2002), com o esquema da célula de teste e alguns resultados obtidos nos ensaios e simulações realizados..... 77
Figura 18 – Imagem retirada de Simonson *et al.* (2004b) com a representação sobre o diagrama psicrométrico dos valores horários de temperatura e humidade interior durante um ano, obtidos por simulação numérica 79
Figura 19 – Imagem retirada de Svennberg (2006), com os resultados obtidos para a variação da humidade relativa interior numa célula de teste..... 80
Figura 20 – Esquema retirado de Talukdar *et al.* (2004) representando a infra-estrutura para ensaio da transferência de humidade, em regime variável, entre materiais porosos e o ar de um túnel de vento..... 83
Figura 21 – Esquema retirado de Yoshino *et al.* (2005), representando a câmara de ensaio a escala reduzida de um compartimento..... 83
Figura 22 – Esquema retirado de Fazio *et al.* (2004), representando a câmara de ensaio que reproduz, à escala real, um edifício de dois pisos 84
Figura 23 – Imagens de compartimentos de teste retiradas de Kunzel *et al.* (2004) . 84
Figura 24 – Níveis de discretização espacial de um edifício (Woloszyn, 1999) 88
Figura 25 – Representação esquemática do princípio do balanço energético de um compartimento..... 91
Figura 26 – Conteúdo parcial do bloco de cálculo do balanço de humidade de um nó interior de um elemento construtivo no programa HAM-Tools.... 100
Figura 27 – Variação típica dos coeficientes de transporte de humidade num modelo com separação de fluxo (Kalagasidis, 2004)..... 102

Figura 28 – Variação típica da permeabilidade ao vapor se utilizada como coeficiente global de transporte de humidade 103
Figura 29 – Variação anual da temperatura exterior, de Janeiro a Dezembro, de acordo com os dados produzidos pelo METEONORM 106
Figura 30 – Variação anual da humidade relativa exterior, de Janeiro a Dezembro, de acordo com os dados produzidos pelo METEONORM 107
Figura 31 – Variação anual da pressão de vapor exterior, de Janeiro a Dezembro, de acordo com os dados produzidos pelo METEONORM 107
Figura 32 – Câmara climática Vötsh VC 4034 do LFC-FEUP 110
Figura 33 – Dissecador do LFC-FEUP utilizado em ensaios de determinação da curva higroscópica 111
Figura 34 – Sequência de preparação dos provetes de gesso projectado 113
Figura 35 – Resultados do ensaio de determinação da Curva Higroscópica do Gesso Cartonado (GC) 117
Figura 36 – Resultados do ensaio de determinação da Curva Higroscópica do Gesso Projectado (GP) 118
Figura 37 – Resultados do ensaio de determinação da Curva Higroscópica do Reboco de Gesso e Cal (GT) 118
Figura 38 – Curvas resultantes do ajuste de funções matemáticas aos resultados obtidos nos ensaios 119
Figura 39 – Comparação de curvas higroscópicas de adsorção do gesso cartonado 120
Figura 40 – Curvas de variação da capacidade higroscópica específica dos materiais ensaiados 121
Figura 41 – Representação esquemática da tina de ensaio 125
Figura 42 – Conjunto tina/provete durante pesagem 125
Figura 43 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes sem pintura 129
Figura 44 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes pintados com tinta vinílica 129
Figura 45 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes pintados com primário e tinta vinílica 130
Figura 46 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes pintados com tinta acrílica 130

Figura 47 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes pintados com primário e tinta acrílica 131
Figura 48 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes pintados com primário e tinta de látex 131
Figura 49 – Relação da permeabilidade variável com a humidade relativa e a permeabilidade média..... 135
Figura 50 – Perfil de humidade dos provetes durante os ensaios de permeabilidade ao vapor 136
Figura 51 – Variação da permeabilidade ao vapor com a humidade relativa para os materiais base..... 138
Figura 52 – Variação da espessura da camada equivalente de ar com a humidade relativa para os materiais base..... 138
Figura 53 – Variação da espessura da camada equivalente de ar com a humidade relativa para esquemas de pintura do tipo 2 141
Figura 54 – Variação da espessura da camada equivalente de ar com a humidade relativa para esquemas de pintura do tipo 2A 142
Figura 55 – Variação da espessura da camada equivalente de ar com a humidade relativa para esquemas de pintura do tipo 3A 143
Figura 56 – Variação da espessura da camada equivalente de ar com a humidade relativa para o esquema de pintura do tipo 4A..... 144
Figura 57 – Representação esquemática do ensaio de determinação do *MBV* 150
Figura 58 – Diagrama de humidade relativa teórico *vs.* real no ensaio *MBV* 151
Figura 59 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GC em ensaios *MBV* 153
Figura 60 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GP em ensaios *MBV* 153
Figura 61 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GT em ensaios *MBV* 154
Figura 62 – Valores de *MBV* determinados para os elementos construtivos testados e respectivos valores do desvio padrão 154
Figura 63 – Ciclo estável de variação da massa, de elementos que não são produtos da construção, em ensaios *MBV* 155

Figura 64 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GC em ensaios em regime transitório 155
Figura 65 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GP em ensaios em regime transitório 156
Figura 66 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GT em ensaios em regime transitório 156
Figura 67 – Classificação de elementos quanto à sua capacidade de armazenamento de humidade com base em ensaios *MBV* (Rode *et al.*, 2005) 158
Figura 68 – Ideia base para a infra-estrutura de ensaio 164
Figura 69 – Aspecto exterior da câmara climática "walk-in" e do painel de controlo 165
Figura 70 – Interface do programa Fitoview para visualização de dados das câmaras climáticas 166
Figura 71 – Esquema de variação da humidade na câmara climática envolvente ... 168
Figura 72 – Esquema da câmara de fluxo 169
Figura 73 – Imagem da câmara de fluxo colocada no interior de uma câmara climática "walk-in" 170
Figura 74 – Pormenores das aberturas de acesso ao interior da câmara de fluxo 170
Figura 75 – Pormenores do sistema de ventilação da câmara de fluxo, incluindo os orifícios de admissão (a) e extracção (b) de ar e a bomba de ar controlada por rotâmetros (c) 171
Figura 76 – Pormenores do sistema de dosagem de água, incluindo: a) capilar de transporte de água, b) vista do painel de controlo da bomba peristáltica e c) vista global do conjunto 173
Figura 77 – Sistema de dissipação de humidade 174
Figura 78 – Esquema de funcionamento do sistema base de produção de vapor 174
Figura 79 – Pormenores do sistema de monitorização incluindo: a) sonda HygroClip SC04, b) registador de dados modelo HygroLog NT e c) visão global do sistema 175
Figura 80 – Imagens dos provetes utilizados em ensaios na câmara de fluxo 177
Figura 81 – Variação da temperatura registada pelas várias sondas colocadas na câmara climática 178

Figura 82 – Variação da humidade relativa registada pelas várias sondas colocadas na câmara climática 179
Figura 83 – Variação da pressão de vapor no ensaio IH19, registada na câmara climática envolvente (S1) e na câmara de fluxo (S2 a S6), e calculada pelo modelo teórico para N=1 h^{-1} (ideal_1) e N=0,5 h^{-1} (ideal_0,5)..... 182
Figura 84 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc) nos ensaios IH11 e IH20..... 183
Figura 85 – Registos de temperatura na câmara climática envolvente (CC) e na câmara de fluxo (S2 a S6) antes (<15 h) e após (>15 h) a activação da ventoinha auxiliar do sistema de dispersão de vapor 184
Figura 86 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor no interior da câmara de fluxo (cf), correspondente à média das sondas S2 a S6, e na câmara climática envolvente (cc) nos ensaios IH11, IH21, IH22 e IH23..... 186
Figura 87 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor registado no interior da câmara de fluxo pelas várias sondas, nos ensaios IH11, IH21, IH22 e IH23 186
Figura 88 – Posição das sondas S2 a S6 nos ensaios IH24, IH25, IH26 e IH27 188
Figura 89 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor registado no interior da câmara de fluxo pelas várias sondas, nos ensaios IH24 a IH27..... 189
Figura 90 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc) nos ensaios IH28 a IH32..... 190
Figura 91 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor registado no interior da câmara de fluxo pelas várias sondas, nos ensaios IH31 e IH32..... 190
Figura 92 – Ciclo estável de variação da humidade relativa, no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc), nos ensaios com N=1 h^{-1} 192
Figura 93 – Frequências acumuladas da variação da humidade relativa, no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc), nos ensaios com N=1 h^{-1} 192

Figura 94 – Ciclo estável de variação da humidade relativa, no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc), nos ensaios IH5 (vazio), IH6 (0,75 m^2 GC), IH11 (0,75 m^2 GP) e IH13 (0,75 m^2 GT) 195
Figura 95 – Ciclo estável de variação da humidade relativa, no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc), nos ensaios IH5 (vazio), IH8 (0,75 m^2 GC2A), IH12 (0,75 m^2 GP2A) e IH14 (0,75 m^2 GT2A) 195
Figura 96 – Ciclo estável de variação da humidade relativa no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc) nos ensaios IH5 (vazio), IH7 (0,75 m^2 GC + 0,75 m^2 GC3), IH9 (0,75 m^2 GC2A + 0,25 m^2 GC) e IH10 (0,75 m^2 GC2A + 0,75 m^2 GC) 196
Figura 97 – Ciclo estável de variação da humidade relativa, no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc), nos ensaios IH5 (vazio), IH15 (1 resma), IH16 (4 × ¼ resma), IH17 (8 × ¼ resma) e IH18 (8 × ¼ resma + 0,75 m^2 GC) 196
Figura 98 – O modelo MBVsim1 202
Figura 99 – Esquema de simulação do modelo MBVsim1 203
Figura 100 – Curvas higroscópicas para simulação numérica de GC, GP e GT 205
Figura 101 – Variação da massa dos provetes GC nas simulações 1 a 4 206
Figura 102 – Variação da massa na simulação 1 com dados alternativos 208
Figura 103 – Variação da massa dos provetes GP nas simulações 1 a 4 208
Figura 104 – Variação da massa dos provetes GP_1cm nas simulações 1 e 3 209
Figura 105 – Variação da massa dos provetes GT nas simulações 1 a 4 209
Figura 106 – Variação da humidade relativa nos volumes de cálculo dos provetes analisados na simulação 1 210
Figura 107 – Variação da massa em provetes GP e GT com diferentes espessuras, na simulação 1 210
Figura 108 – Exemplo de curvas higroscópicas de pinturas definidas por (Goossens, 2003) 212
Figura 109 – Influência da histerese na definição da espessura equivalente da camada de ar de um material higroscópico 213
Figura 110 – Resultados obtidos para o esquema de pintura 2 sobre materiais de base GC, GP e GT e dados utilizados na simulação 214

Figura 111 – Resultados obtidos para o esquema de pintura 2A sobre materiais de base GC, GP e GT e dados utilizados na simulação 214
Figura 112 – Resultados obtidos para o esquema de pintura 3A sobre materiais de base GC, GP e GT e dados utilizados na simulação 215
Figura 113 – O modelo CAM_FLUX1 217
Figura 114 – Esquema de simulação do modelo CAM_FLUX1 218
Figura 115 – O modelo CAM_FLUX2 219
Figura 116 – Ciclo estável de variação da humidade relativa em testes na câmara vazia 220
Figura 117 – Resultados experimentais e numéricos para o ciclo estável de variação da humidade relativa em IH7 e IH8 221
Figura 118 – Campo de velocidades do ar na câmara de fluxo produzido no programa Fluent por Angela Sasic Kalagasidis a pedido do autor 224
Figura 119 – Resultados experimentais e numéricos para o ciclo estável de variação da humidade relativa em IH20 225
Figura 120 – O modelo QUARTO adaptado a partir do modelo SC_CE1_Case600_open 227
Figura 121 – Esquema de simulação do modelo QUARTO 227
Figura 122 – Esquema do quarto virtual 229
Figura 123 – Composição dos elementos construtivos do quarto virtual 229
Figura 124 – Ciclo estável de variação de massa das amostras virtuais com 1 cm de espessura: "gb_1 cm_2e-8" ("gypsum board" com β_p=2×10^{-8} s/m), "gb_1 cm_2E-9" ("gypsum board" com β_p=2×10^{-9} s/m), "gb_1 cm_2e-10" ("gypsum board" com β_p=2×10^{-10} s/m), "sp_1 cm_2e-8" ("spruce" com β_p=2×10^{-8} s/m) 232
Figura 125 – Variação da temperatura interior do quarto virtual, nas simulações SG1 e SG2, e da temperatura exterior correspondente ao clima de Lisboa, no período Outubro – Março 234
Figura 126 – Variação da humidade relativa interior do quarto virtual, nas simulações SG1 e SG2, no período Outubro – Março 235
Figura 127 – Variação da pressão de vapor interior do quarto virtual, nas simulações SG1 e SG2, e da pressão de vapor exterior correspondente ao clima de Lisboa, no período Outubro – Março 235

Figura 128 – Valores médios mensais, semestrais e anuais da humidade relativa interior nas simulações SG1 e SG2 236
Figura 129 – Valores médios mensais, semestrais e anuais da pressão de vapor interior e exterior nas simulações SG1 e SG2 237
Figura 130 – Valores médios mensais do excesso de pressão de vapor interior, nas simulações SG1 e SG2, em função da temperatura média mensal exterior 238
Figura 131 – Curva de frequência acumulada da humidade relativa interior nas simulações SG1 e SG2, referente ao período Outubro – Março 239
Figura 132 – Curva de frequência acumulada da pressão de vapor nas simulações SG1 e SG2, referente ao período Outubro – Março 239
Figura 133 – Valores de TOW diário, na simulação SG1, no período de Outubro a Março, para dois níveis de qualidade da envolvente 244
Figura 134 – Valores da temperatura média interior, nas simulações de referência, para o período Outubro – Março 247
Figura 135 – Valores médios do excesso de pressão de vapor verificados nas simulações de referência para o período Outubro – Março 248
Figura 136 – Valores da média e do percentil 90 da humidade relativa, calculados nas simulações de referência, para o período Outubro – Março 249
Figura 137 – Valores de $f_{Rsi,90}$ nas simulações de referência para o período Outubro – Março 249
Figura 138 – Valores de nd_{cond} nas simulações de referência para o período Outubro – Março, admitindo f_{Rsi}=0,5 numa ponte térmica da envolvente 250
Figura 139 – Valores do percentil 90 da humidade relativa, calculados nas simulações de referência e em simulações com inércia higroscópica, para o período Outubro – Março 251
Figura 140 – Valores de $f_{Rsi,90}$ calculados nas simulações de referência e em simulações com inércia higroscópica para o período Outubro – Março 251
Figura 141 – Máximos dos pares de valores $nd_{TOW>0,5}$ e nd_{cond}, admitindo f_{Rsi}=0,5, calculados nas simulações de referência e em simulações com inércia higroscópica para o período Outubro – Março 252

Figura 142 – Representação gráfica da relação (MBV.S, *AMDR*) correspondente a cada simulação SCF 255
Figura 143 – Representação gráfica da relação ($I_{h,d}$, *AMDR*) correspondente a cada simulação SCF 256
Figura 144 – Gráfico obtido para a representação da relação ($I_{h,d}$, *AMDR*) correspondente a cada caso analisado na câmara de fluxo 259
Figura 145 – Gráfico obtido para a representação da relação ($I_{h,d}$, *AMDR*) correspondente a cada caso analisado nas simulações do quarto virtual 259
Figura 146 – Gráfico obtido para a representação da relação ($I_{h,d}$, *AMDR*) e das curvas ajustadas dos conjuntos de resultados seleccionados 262
Figura 147 – Gráfico da relação ($I_{h,d}$, *AMDR*) com delimitação das classes de inércia higroscópica diária propostas 263
Figura 148 – Nova classificação de elementos quanto à sua capacidade de armazenamento de humidade com base em ensaios MBV 264

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Alguns valores da produção de vapor em edifícios 59
Tabela 2 – Estimativa da produção de vapor em actividades domésticas 59
Tabela 3 – Valores de projecto da humidade absoluta exterior do RSECE:1998 64
Tabela 4 – Classificação dos edifícios em função da sua higrometria. 68
Tabela 5 – Valores adoptados para o coeficiente de transferência h_c. 104
Tabela 6 – Características dos provetes utilizados nos ensaios de determinação da curva higroscópica 114
Tabela 7 – Ambiências adoptadas nos ensaios de adsorção/desadsorção 115
Tabela 8 – Parâmetros de ajuste da função que descreve a curva higroscópica 119
Tabela 9 – Configurações utilizadas nos ensaios de permeabilidade ao vapor 123
Tabela 10 – Condições dos ensaios de transmissão de vapor 124
Tabela 11 – Resumo dos resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor 132
Tabela 12 – Parâmetros de ajuste da função permeabilidade ao vapor 137
Tabela 13 – Espessura da camada de ar de difusão equivalente dos esquemas de pintura e humidade relativa média da camada de pintura 140
Tabela 14 – Parâmetros de ajuste da função espessura equivalente da camada de ar 141
Tabela 15 – Provetes de produtos da construção testados em ensaios *MBV* 149
Tabela 16 – Elementos adicionais testados em ensaios *MBV* 150
Tabela 17 – Ensaios em regime transitório de ciclo diário de variação de humidade 151
Tabela 18 – Resultados dos ensaios em regime transitório de produtos da construção 157
Tabela 19 – Comparação MBV_{ideal} *vs.* $MBV_{prático}$ 159
Tabela 20 – Comparação de registos de temperatura e humidade relativa 179

Tabela 21 – Características do ensaio IH19 181
Tabela 22 – Características dos ensaios IH11 e IH20 183
Tabela 23 – Valores característicos da variação da humidade relativa, na câmara de fluxo, nos ensaios IH11 e IH20 183
Tabela 24 – Características dos ensaios IH11, IH21, IH22 e IH23 185
Tabela 25 – Valores característicos da variação da pressão de vapor na câmara de fluxo nos ensaios IH11, IH21, IH22 e IH23 187
Tabela 26 – Características dos ensaios IH24, IH25, IH26 e IH27 188
Tabela 27 – Valores característicos da variação da pressão de vapor na câmara de fluxo nos ensaios IH24 a IH27 188
Tabela 28 – Características dos ensaios IH28 a IH32 190
Tabela 29 – Valores característicos da variação da pressão de vapor na câmara de fluxo nos ensaios IH28 a IH32 191
Tabela 30 – Características dos ensaios de ciclo diário com N=1 h^{-1} 191
Tabela 31 – Valores característicos da variação da humidade relativa, na câmara de fluxo, nos ensaios com N=1 h^{-1} 193
Tabela 32 – Características dos ensaios de ciclo diário com N=0,5 h^{-1} 194
Tabela 33 – Valores característicos da variação da humidade relativa na câmara de fluxo nos ensaios com N=1 h^{-1} 197
Tabela 34 – Simulações numéricas de ensaios dinâmicos de ciclo diário 205
Tabela 35 – Resumo das simulações de ensaios dinâmicos de ciclo diário realizados em provetes não pintados 206
Tabela 36 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados na câmara de fluxo e nas simulações correspondentes 222
Tabela 37 – Configuração de superfícies interiores 231
Tabela 38 – Resumo das características das simulações no quarto virtual 233
Tabela 39 – Resumo dos parâmetros de caracterização dos resultados das simulações no quarto virtual, referentes ao período Outubro-Março – 1ª parte 241
Tabela 40 – Resumo dos parâmetros de caracterização dos resultados das simulações no quarto virtual, referentes ao período Outubro-Março – 2ª parte 242

Tabela 41 – Resumo dos parâmetros de avaliação de risco de desenvolvimento de fungos nas simulações no quarto virtual, referentes ao período Outubro-Março 246
Tabela 42 – Características das simulações da câmara de fluxo virtual 254
Tabela 43 – Resumo dos valores ($I_{h,d}$, *AMDR*) referentes à análise do efeito da inércia higroscópica realizada com base nos ensaios na câmara de fluxo 258
Tabela 44 – Resumo dos valores ($I_{h,d}$, *AMDR*) referentes à análise do efeito da inércia higroscópica realizada com base nas simulações do quarto virtual 260
Tabela 45 – Parâmetros das curvas de ajuste 262
Tabela 46 – Classes de inércia higroscópica diária 263

Lista de Símbolos, Abreviaturas e Nomenclatura

Símbolo	Unidade	Designação
a_w	-	Actividade da água num substrato
A	m^2	Área
A_w	$g/(m^2 \cdot dia)$	Água disponível
b	$W \cdot s^{1/2}/(m^2 \cdot K)$	Efusividade térmica
bl	m	Largura de apoio de um provete no bordo de uma tina de ensaio de permeabilidade ao vapor
b_m	$kg/(m^2 \cdot Pa \cdot s^{1/2})$	Efusividade hígrica
CF_{sol}	-	Fracção convectiva dos ganhos de calor
$C_{H,ad}$	J/K	Calor específico volumétrico adicional do ar
c_{le}	-	Correcção "lado escondido"
c_p	$J/(kg \cdot K)$	Calor específico
d	m	Espessura
d_a	m	Espessura de camada de ar
D_{ar}	m^2/s	Coeficiente de difusão do vapor no ar
D_T	$m^2/(s \cdot K)$	Coeficiente de difusão higrotérmica
D_w	m^2/s	Coeficiente de difusão de humidade
D_w'	m^2/s	Coeficiente de difusão de humidade em modelos com separação de fluxo
d_p	m	Profundidade de penetração
g_{ar}	$kg/(m^2 \cdot s)$	Densidade de fluxo de ar
g_{chuva}	$kg/(m^2 \cdot s)$	Densidade de fluxo de chuva para a superfície
g_l	$kg/(m^2 \cdot s)$	Densidade de fluxo de água líquida
g_{me}	$kg/(m^2 \cdot s)$	Densidade de fluxo de humidade medida
g_v	$kg/(m^2 \cdot s)$	Densidade de fluxo de vapor
g	$kg/(m^2 \cdot s)$	Densidade de fluxo total de humidade
G	kg/s	Fluxo total de humidade

Símbolo	Unidade	Designação
h_c	W/(m^2·K)	Coeficiente de transferência de calor por convecção
h_r	W/(m^2·K)	Coeficiente de transferência de calor por radiação
H	J/kg	Entalpia
HR, ϕ	%, -	Humidade relativa
I_{diff}	W/m^2	Energia proveniente de radiação solar difusa
I_{dir}	W/m^2	Energia proveniente de radiação solar directa
I_{lw}	W/m^2	Energia de radiação de grande comprimento de onda
k	m^2	Permeabilidade ao ar
L	m	Comprimento ou largura
m_{MBV}	g/(m^2.%HR)	Massa de vapor por unidade de área e ponto percentual de diferença de humidade relativa
m_0	kg	Massa de provete seco
m_w	kg	Massa de provete em equilíbrio com ambiência
$M_{construções}$	kg/s	Fluxo de vapor para o compartimento com origem nos elementos construtivos
M_{ganhos}	kg/s	Fluxo de vapor para o compartimento por ganhos internos
M_{vent}	kg/s	Fluxo de vapor para o compartimento por renovação de ar
MBV	kg/(m^2·%HR)	"Moisture Buffer Value" – Valor representativo da capacidade de armazenamento de vapor por um material ou elemento num ciclo diário
N	h^{-1}	Número de renovações horárias
p_{ar}	Pa	Pressão total do ar
p_v	Pa	Pressão parcial de vapor no ar
$p_{v,sat}$	Pa	Pressão de saturação de vapor
PD	%	Percentagem de insatisfeitos
$Q_{construções}$	W	Fluxo de calor superfície-ar por convecção
Q_{ganhos}	W	Ganhos de calor sem origem na radiação solar
Q_{solar}	W	Ganhos solares de um compartimento
Q_{vent}	W	Fluxo de calor equivalente devido ao efeito da ventilação
q	W/m^2	Densidade de fluxo de calor
q_{rad}	W/m^2	Densidade de fluxo de energia radiante absorvida por uma superfície opaca
R^2	-	Coeficiente de correlação linear
R_p	m^2·s·Pa/kg	Resistência ao vapor
S	m	Diâmetro hidráulico
s	Pa	Pressão de sucção
s_d	m	Espessura da camada de ar de difusão equivalente

Símbolo	Unidade	Designação
$\bar{s}_d$	m	Espessura média da camada de ar de difusão equivalente
T	ºC	Temperatura
TOW	h	"Time of wetness"
T_{po}	ºC	Temperatura de ponto de orvalho
t_p	s	Período
u	kg/kg	Teor de humidade em massa de um material
v	kg/m^3	Concentração de vapor no ar
vv	m/s	Velocidade do ar
V	m^3	Volume
w	kg/m^3	Teor de humidade em volume aparente de um material
w_{cap}	kg/m^3	Teor de humidade de saturação capilar
w_{cr}	kg/m^3	Teor de humidade crítico
w_{sat}	kg/m^3	Teor de humidade máximo
W	kg/(m^2·s·Pa)	Permeância ao vapor de água
x_{ar}	kg/kg	Humidade absoluta do ar
Z	m^2·s·Pa/kg	Resistência ao vapor
α_{sol}	-	Absorção de radiação solar de uma superfície
β_p	s/m	Coeficiente de transferência de vapor ar-superfície para um gradiente de pressão de vapor
β_v	m/s	Coeficiente de transferência de vapor ar-superfície para um gradiente de concentração de vapor
δ_a	kg/(m·s·Pa)	Permeabilidade ao vapor no ar
δ_p	kg/(m·s·Pa)	Permeabilidade ao vapor de materiais porosos
δ_p'	kg/(m·s·Pa)	Permeabilidade ao vapor em modelos com separação de fluxo
$\overline{\delta_p}$	kg/(m·s·Pa)	Permeabilidade média ao vapor de materiais porosos
δ_v	m^2/s	Permeabilidade ao vapor de materiais porosos
δ_v'	m^2/s	Permeabilidade ao vapor em modelos com separação de fluxo
ε	-	Emissividade de uma superfície
Φ_c	W	Ganhos de calor transmitidos por convecção
Φ_r	W	Ganhos de calor transmitidos por radiação
λ	W/(m·K)	Condutibilidade térmica
$\lambda_{m,l}$	s	Condutibilidade hidráulica
μ	-	Factor de resistência ao vapor
ν	kg/(m·s)	Viscosidade dinâmica
ρ_{ar}	kg/m^3	Massa volúmica do ar

Símbolo	Unidade	Designação
ρ_l	kg/m^3	Massa volúmica da água
ρ_s	kg/m^3	Massa volúmica seca do material sólido
τ	-	Transmissividade de uma superfície envidraçada
ξ_u	kg/kg	Capacidade higroscópica específica
ξ_w	kg/m^3	Capacidade higroscópica específica

Constante	Valor	Designação
h_e	2,5x10^6 J/kg	Calor latente de evaporação
p_0	1013,25 hPa	Pressão barométrica padrão
R_a	287 J/(kg·K)	Constante universal dos gases relativa ao ar seco
R_v	461,4 J/(kg·K)	Constante universal dos gases relativa ao vapor de água
σ_s	5,67x10^{-8} W/(m^2·K^4)	Constante de Stefan-Boltzmann

Índice	Designação
ar	ar
cond	condução
conv	convecção
ext	exterior
eq	equilíbrio
g	Material base (gesso)
i	índice
int	Interior
l	líquido
m	médio
p	pintura
rad	Radiação
spf	referente a uma superfície

Capítulo 1
Introdução

1.1 Enquadramento

A humidade relativa interior dos edifícios é um parâmetro fundamental para a avaliação do seu desempenho, contribuindo directamente para a definição de exigências de conforto higrotérmico. A relação entre o desenvolvimento de fungos e a humidade relativa interior permite identificar exigências de salubridade, de qualidade do ar e de durabilidade das construções, relativamente às quais, o desempenho dos edifícios será afectado por um mau controlo desse parâmetro. O controlo da humidade relativa do ar através de sistemas de desumidificação ou ar condicionado agrava o consumo de energia dos edifícios, pelo que, o controlo por meios passivos é uma estratégia a privilegiar.

A variação da humidade relativa do ar interior é influenciada por um grande número de factores. A pressão de vapor exterior, a temperatura interior, a ventilação e a produção de vapor são obviamente alguns desses factores. A existência de materiais higroscópicos em contacto com o ar interior pode também ser relevante para a definição dessa variação. A importância deste efeito não está suficientemente quantificada para que o conceito de inércia higroscópica possa influenciar a concepção dos edifícios. No entanto, os progressos recentes da Física das Construções, mais concretamente do estudo dos processos de transferência de calor, ar e humidade através de elementos construtivos, possibilitam o progresso da avaliação da importância da inércia higroscópica. O desenvolvimento de modelos físicos fiáveis, traduzidos por ferramentas de simulação numérica poderosas e apoiados por técnicas laboratoriais eficazes, para medição de propriedades dos materiais e elementos de construção, permitem hoje efectuar uma avaliação quantitativa dos parâmetros definidores do comportamento higrotérmico dos edifícios.

O desenvolvimento de um enquadramento científico favorável, somado à necessidade de aprofundar a capacidade de quantificação da variação da humidade relativa interior, tem estimulado vários estudos sobre a capacidade de armazenamento de humidade dos materiais de construção e a sua interacção com o ar. O desenvolvimento do conceito de inércia higroscópica e de uma metodologia que permita a sua aplicação na concepção de edifícios surge, assim, como um progresso possível e desejável.

1.2 Objectivos

O trabalho desenvolvido nesta Tese tem como objectivo central a avaliação da importância da inércia higroscópica no comportamento higrotérmico dos edifícios. O cumprimento deste objectivo poderá responder às perguntas seguintes:

- A inércia higroscópica existe?
- É relevante para o comportamento higrotérmico dos edifícios?
- É possível traduzir a inércia higroscópica de uma forma simples, associada a uma metodologia aplicável à concepção de edifícios?

A resposta afirmativa a estas questões define as hipóteses que este trabalho pretende confirmar.

Para atingir o objectivo central, definiu-se um conjunto de objectivos parciais que em conjunto o materializam:

- Elaboração do estado da arte sobre a humidade e o clima interior, nos aspectos relevantes para a inércia higroscópica, implicando a sistematização da informação ao nível de conceitos gerais de base e ao nível de trabalhos relevantes para a construção do conceito;
- Selecção de um programa de cálculo, existente, adequado à análise do comportamento higrotérmico de edifícios, avaliação da sua base teórica e definição de detalhes de aplicação;
- Determinação laboratorial de propriedades dos materiais, que condicionam a sua capacidade de armazenamento de humidade, nomeadamente a curva higroscópica e a permeabilidade ao vapor;

— Análise laboratorial da capacidade de armazenamento de humidade de elementos construtivos, expostos a condições transitórias de variação da humidade relativa ambiente;
— Desenvolvimento de um dispositivo experimental destinado à avaliação laboratorial do efeito da inércia higroscópica na variação da humidade relativa interior;
— Utilização desse dispositivo experimental na obtenção de resultados que relacionam o potencial de armazenamento de humidade, dos elementos de construção expostos ao ar, com a sua efectiva influência na moderação da variação da humidade relativa do ar;
— Validação do modelo numérico seleccionado, através da comparação dos resultados de simulações, com os valores obtidos em ensaios de avaliação da capacidade de armazenamento de humidade de elementos e em ensaios do efeito da inércia higroscópica;
— Simulação numérica do comportamento higrotérmico de um compartimento, como suporte a uma análise de sensibilidade da influência dos aspectos mais relevantes para a variação da humidade relativa interior;
— Construção de uma metodologia de aplicação prática do conceito de inércia higroscópica, utilizável no processo de concepção de edifícios.

1.3 Organização do Texto

A presente Tese divide-se em sete capítulos:

— O Capítulo 1 introduz os restantes capítulos e resume os objectivos deste trabalho;
— O Capítulo 2 corresponde a uma síntese do estado da arte do conhecimento no domínio da humidade nas construções e da sua influência no clima interior. Aborda, em primeiro lugar, os conceitos base sobre a humidade e os processos de transferência em materiais porosos relevantes para este trabalho. Em segundo lugar, avalia a relevância da humidade relativa para o clima interior. Em terceiro lugar, refere alguns factores definidores da humidade relativa interior. Por fim, inclui uma análise sintética de trabalhos de outros autores realizados no âmbito da caracterização da inércia

higroscópica ou da capacidade de armazenamento de humidade dos materiais expostos ao ar;

— O Capítulo 3 sistematiza a formulação teórica da modelação higrotérmica de edifícios adoptada neste trabalho. Os mecanismos de transferência simultânea de calor, ar e humidade são analisados, assim como os dados necessários para a modelação adoptada;

— O Capítulo 4 descreve ensaios de caracterização de materiais e elementos de construção, realizados no âmbito deste trabalho. Os resultados obtidos nesses ensaios incluem as curvas higroscópicas de alguns materiais, de revestimento de paredes e tectos, comummente utilizados em Portugal. Incluem também a permeabilidade ao vapor desses materiais e de pinturas aplicadas sobre eles. Por fim, obteve-se um parâmetro que permite referir, de forma simples, a capacidade de armazenamento de humidade, em regime dinâmico, de um elemento de construção;

— O Capítulo 5 apresenta os ensaios laboratoriais para análise experimental do efeito da inércia higroscópica na variação da humidade relativa interior. Procede-se à descrição de um dispositivo laboratorial inovador, concebido especificamente para a realização desses ensaios, e à apresentação dos resultados obtidos;

— O Capítulo 6 engloba o trabalho de simulação numérica realizado e a definição da metodologia de aplicação prática do conceito de inércia higroscópica. Descreve-se a aplicação do programa de cálculo HAM-Tools e os vários pressupostos admitidos nessa aplicação. Apresenta-se o processo de validação e calibração do modelo, suportado pela comparação com os resultados de alguns dos ensaios realizados. Descrevem-se os resultados obtidos com a simulação do comportamento higrotérmico de edifícios. Apresenta-se, por fim, a metodologia de aplicação prática do conceito de inércia higroscópica;

— O Capítulo 7 resume as principais conclusões e perspectiva o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo 2

A Humidade e os Edifícios

2.1 A Humidade e os Materiais Porosos

2.1.1 A humidade do ar

O ar húmido consiste numa mistura de ar seco e vapor de água onde se admite que ambos os gases se comportam de forma ideal. É, por isso, possível aplicar a lei geral dos gases para relacionar a pressão parcial de vapor no ar, p_v, e a concentração de vapor no ar, v, através da seguinte expressão (Hagentoft, 2001):

$$\frac{p_v}{v} = R_v \cdot \left(T + 273{,}15\right) \tag{1}$$

A temperatura, T, está aqui referida em ºC e a constante universal dos gases relativa ao vapor de água, R_v, toma o valor 461,4 J/(kg·K).

Devido ao equilíbrio entre a fase líquida e a fase gasosa da água, existe um limite para a quantidade de água que um volume de ar pode conter, que em termos de pressão de vapor se pode designar por pressão de saturação, $p_{v,sat}$. Este limite depende da temperatura do ar e pode ser descrito pelas seguintes expressões (Hens, 1991):

$$\begin{aligned} &p_{v,sat} = 611 \cdot \exp\left(82{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot T - 288{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 4{,}403 \cdot 10^{-6} \cdot T^3\right), \\ &-30\,^{\circ}C \le T \le 0\,^{\circ}C \end{aligned} \tag{2}$$

$$p_{v,sat} = \exp\left(23{,}5771 - \frac{4042{,}9}{T + 273{,}15 - 37{,}58}\right), \quad 0\,^{\circ}C \le T \le 80\,^{\circ}C \tag{3}$$

A descrição da humidade do ar pode beneficiar com a utilização de outras grandezas que se relacionam com a pressão de vapor, através das expressões apresentadas a seguir. Com efeito, a humidade absoluta do ar, x_{ar}, pode relacionar-se com a pressão

de vapor e a pressão total do ar, p_{ar}, através da seguinte expressão (Kalagasidis, 2004):

$$x_{ar} = \frac{0{,}621 \cdot p_v}{p_{ar} - 0{,}379 \cdot p_v} \approx 6{,}21 \times 10^{-6} \cdot p_v \tag{4}$$

Por sua vez, a humidade relativa do ar, *HR*, em percentagem, define-se como:

$$HR = 100 \frac{p_v}{p_{v,sat}} \tag{5}$$

Pode, ainda, caracterizar-se a humidade de uma massa de ar, através da sua temperatura de ponto de orvalho, T_{po}, que corresponde à temperatura para a qual uma determinada massa de ar, onde não se verifica variação da pressão de vapor, atinge a saturação.A entalpia, *H*, de uma massa de ar representa a energia contida nessa massa de ar e pode ser definida de acordo com a seguinte expressão:

$$H = T + x_{ar} \cdot (2500{,}8 + 1{,}805 \cdot T) \tag{6}$$

A utilização de um diagrama psicrométrico (Figura 1) permite representar as propriedades termodinâmicas do ar húmido e as relações existentes entre elas. A representação de uma massa de ar no diagrama, através de um ponto, de que se conhece, por exemplo, a temperatura e a humidade relativa, permite a leitura imediata dos valores de outras propriedades, como a pressão de vapor ou a entalpia.

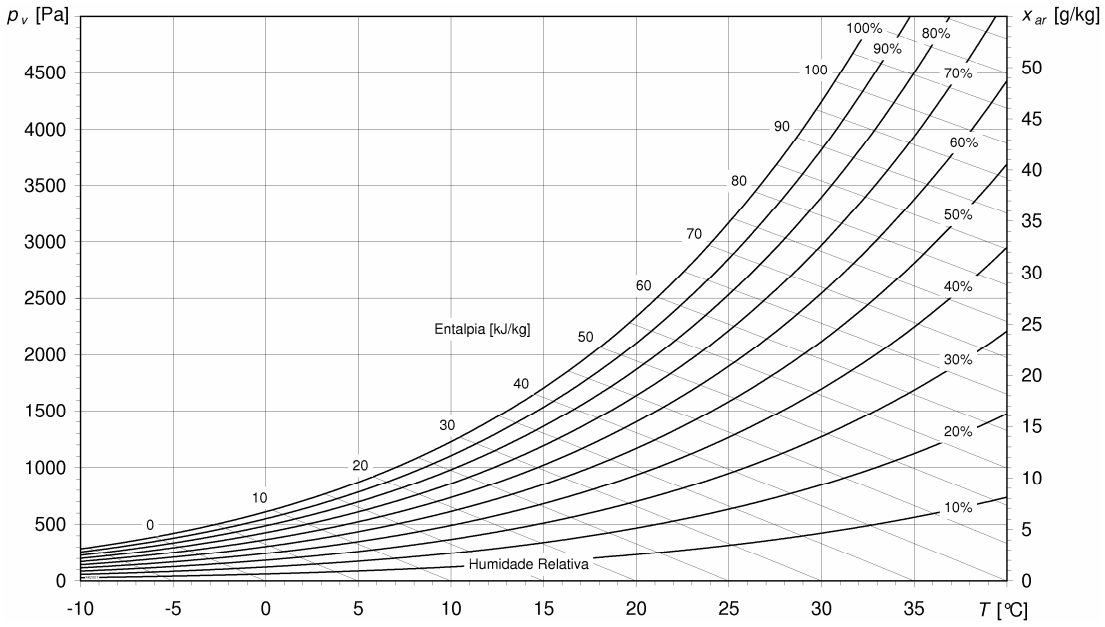


Figura 1 – Exemplo de diagrama psicrométrico

2.1.2 A humidade dos materiais porosos

Os materiais que estão em contacto com o ar interior dos edifícios são, em geral, porosos, sendo normalmente constituídos por três fases (Couasnet, 1989):

- A fase sólida, ligada à estrutura (ou esqueleto) do material;
- A fase líquida, compreendendo a água, livre e adsorvida, contida nos poros formados pela fase sólida;
- A fase gasosa, relativa ao ar contido nos poros.

A partir da quantidade de água que um material contém, pode definir-se o seu teor de humidade. Assim, o teor de humidade pode ser definido em massa, u – kg/kg, se representar o quociente da massa de água do material pela sua massa seca, ou em volume, w – kg/m^3, se representar o quociente da massa de água do material pelo seu volume aparente. A relação entre as duas grandezas depende do valor da massa volúmica seca do material sólido, ρ_s, e é expressa por:

$$w = \rho_s \cdot u \tag{7}$$

O teor de humidade dos materiais pode variar entre o zero absoluto e um valor máximo. Na Figura 2 mostra-se a descrição convencional dos diferentes valores do teor de humidade que um material pode apresentar.

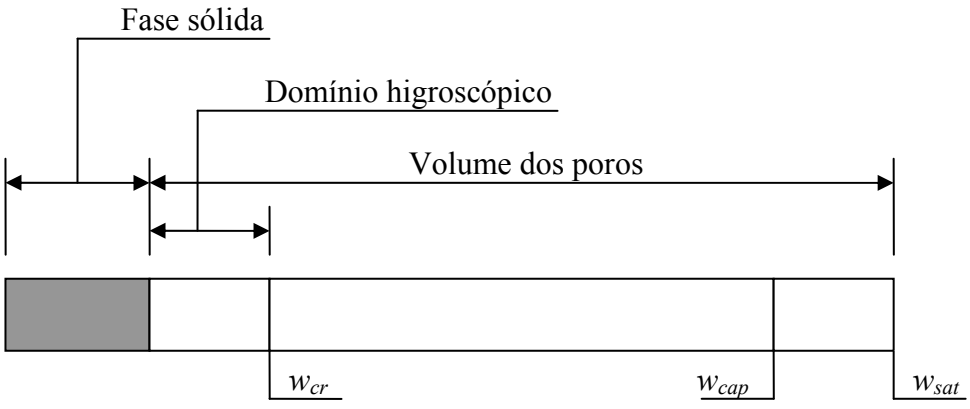


Figura 2 – Esquema de princípio da descrição convencional do teor de humidade de um material (Hagentoft, 2001)

O teor de humidade de um material, em contacto com o ar, pode variar entre o zero absoluto, se o ambiente tiver uma humidade relativa nula, e o teor de humidade crítico, w_{cr}, que corresponde ao teor de humidade que um material apresentam, quando

em contacto com um ambiente saturado, durante longos períodos. Estes dois limites correspondem ao que se define, aproximadamente, como o domínio higroscópico.

Uma maior quantidade de humidade pode ser fixada por um material, se for posto em contacto com água líquida, sendo o limite, para a quantidade de humidade fixada, o teor de humidade máximo, w_{sat}. Este valor, no entanto, dificilmente é atingido dada a facilidade com que o ar fica aprisionado no interior da estrutura porosa. Define-se, por isso, 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.

No domínio higroscópico, a fixação de vapor de água por adsorção é atribuída às forças intermoleculares, ou de *Van Der Waals*, que actuam na interface sólido-fluido no interior dos poros (Freitas, 1992). Podem distinguir-se diferentes etapas deste processo: adsorção monomolecular, com a fixação de uma camada de moléculas de água sobre a superfície dos poros; adsorção plurimolecular, com a fixação de várias camadas sobre a primeira adsorvida; por fim, condensação capilar sobre os meniscos formados pela junção das camadas plurimoleculares.

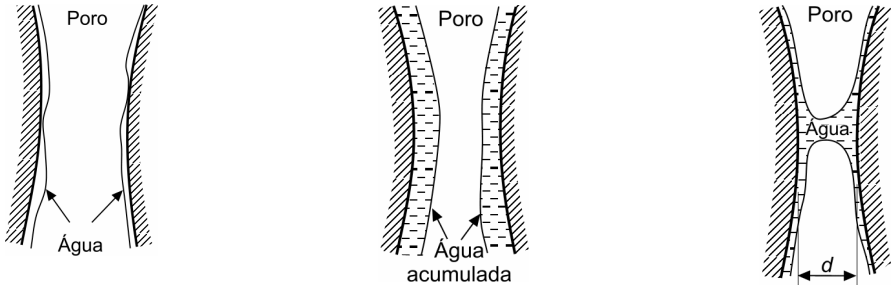


Figura 3 – Etapas da fixação de água por adsorção ao nível de um poro, adaptado de Couasnet (1989)

A tradução gráfica da relação entre o valor de equilíbrio do teor de humidade de um material, no domínio higroscópico, e a humidade relativa da ambiência correspondente, permite representar a sua curva higroscópica. Os materiais utilizados na construção apresentam normalmente curvas com uma forma em S, semelhantes à que se esquematiza na Figura 4.

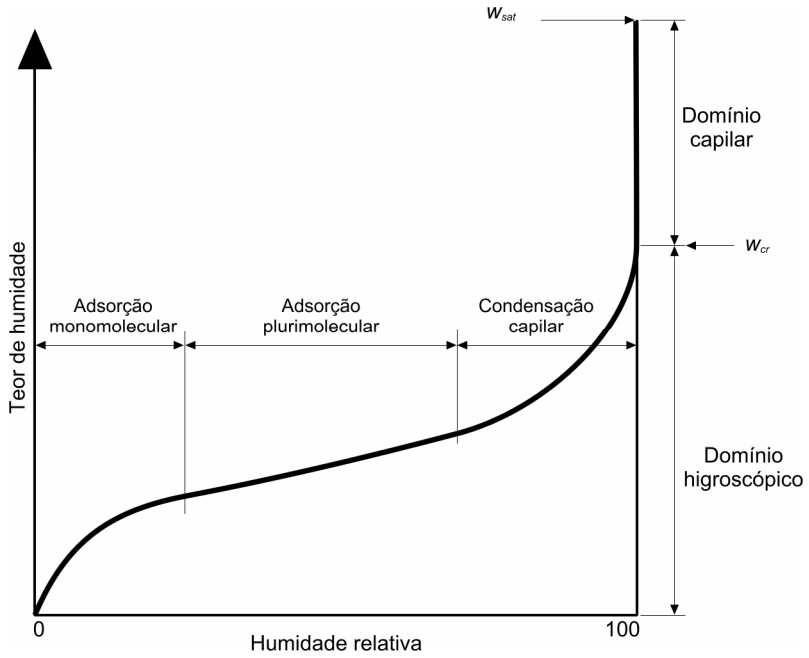


Figura 4 – Percurso típico de uma curva higroscópica, adaptado de Hansen (1996)

A capacidade higroscópica específica de um material, ξ, traduz a sua propensão para a adsorção de humidade a partir de uma ambiência cujas condições variaram em relação ao equilíbrio. Matematicamente, define-se a partir da derivada da curva higroscópica, com as variantes ligadas à grandeza utilizada para representar o teor de humidade:

$$\xi_u = \frac{du}{d\phi} \tag{8}$$

$$\xi_w = \frac{dw}{d\phi} \tag{9}$$

Mas que se relacionam, a partir da expressão (7), de acordo com:

$$\xi_w = \rho_s \cdot \xi_u \tag{10}$$

O comportamento dos materiais higroscópicos é caracterizado, frequentemente, pela não coincidência das curvas higroscópicas obtidas em adsorção e desadsorção, ocupando sempre esta última uma posição superior à primeira.

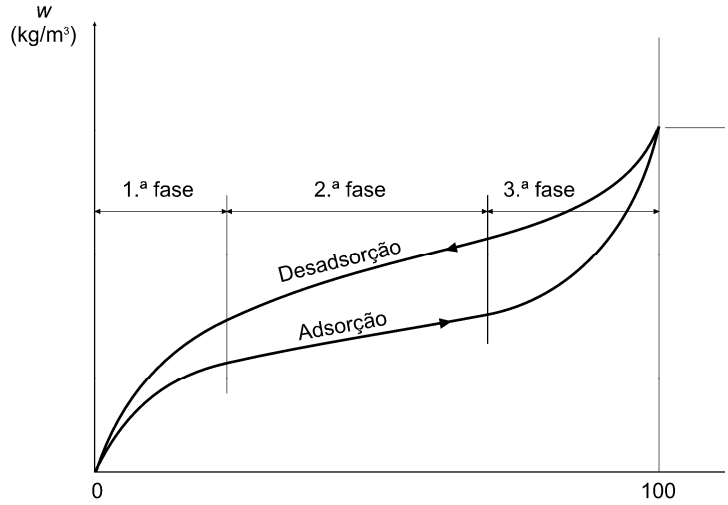


Figura 5 – Histerese das curvas de adsorção e desadsorção (Freitas, 1992)

Este efeito é designado por histerese e, apesar de não haver ainda uma teoria que o explique completamente, são normalmente avançadas duas hipóteses possíveis (Merouani, 1987). A primeira hipótese aponta para uma diferença entre os ângulos de contacto da água com os poros na fase de condensação capilar, dependendo se o menisco "avança", em adsorção, ou "recua", em desadsorção. Neste último efeito, o ângulo de ligação entre a superfície do poro e o menisco é inferior ao ângulo observado no efeito de adsorção. Uma vez que a superfície se encontra já molhada, pelo vapor de água condensado, a desadsorção de vapor de água na fase de condensação capilar é dificultada. A segunda hipótese é conhecida como efeito "frasco de tinta" e resulta da interpenetração de poros com secções diferentes. Em adsorção, o preenchimento do poro com maior secção é função do seu raio. Em desadsorção será o raio do poro mais pequeno a definir a velocidade de desadsorção do vapor que é, por isso, mais lenta, tendo a curva de desadsorção uma pendente menos acentuada na zona de condensação capilar.

O âmbito desta Tese coloca a ênfase da análise da humidade dos materiais porosos no domínio higroscópico. Breves referências ao comportamento no domínio sobre-higroscópico são, no entanto, desejáveis para uma compreensão global dos processos de transferência de humidade. Assim, pode utilizar-se a expressão de Thomson (Hagentoft, 2001), para estabelecer a relação entre a pressão de sucção, s, e a humidade relativa, ϕ.

$$s = -\rho_l \cdot R_v \cdot (T + 273{,}15) \cdot \ln \phi \tag{11}$$

A utilização da pressão de sucção para caracterizar a humidade permite definir a curva de retenção de água de um material, através da relação entre essa grandeza e o teor de humidade do material, de acordo com o esquema apresentado na Figura 6.

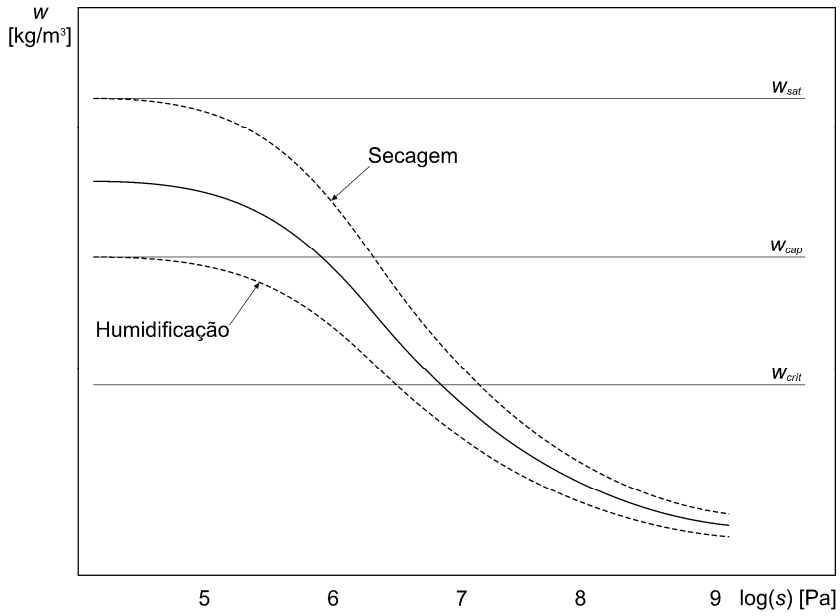


Figura 6 – Curva de retenção de água

2.2 A Transferência de Humidade nos Materiais Porosos

2.2.1 Mecanismos de transferência de humidade

No interior de uma camada de ar estagnado com espessura conhecida, onde se verifica uma diferença de concentração de vapor entre os seus extremos, pode expressar-se a densidade fluxo de vapor por difusão, g_v, que aí se verifica, através da lei de difusão de Fick, de acordo com a expressão (Hagentoft, 2001):

$$g_v = -D_{ar} \frac{dv}{dx} \tag{12}$$

O valor do coeficiente de difusão do vapor no ar, D_{ar}, varia com a temperatura de acordo com:

$$D_{ar} = (22{,}2 + 0{,}14 \cdot T) \cdot 10^{-6} \tag{13}$$

Os fluxos de ar, através de elementos construtivos, implicam uma transferência de vapor de água por convecção, associada a esse fluxo de ar. Tendo em conta o tipo de materiais e elementos construtivos analisados neste trabalho, comuns na construção portuguesa, optou-se por não aprofundar a análise deste processo de transferência.

A densidade de fluxo de vapor, g_v, num meio poroso, em regime isotérmico, pode ser traduzida teoricamente pela lei de Fick, de acordo com a expressão seguinte (Hagentoft, 2001). O factor μ_0 traduz a redução do espaço disponível para a difusão e o aumento do seu percurso, utilizando-se o índice 0 para reforçar a ideia de transferência pura de vapor.

$$g_v = -\frac{D_{ar}}{\mu_0}\nabla v \tag{14}$$

Em regime não isotérmico, a deslocação de moléculas de água é condicionada não só pelos gradientes de concentração do vapor de água mas também pelos gradientes de temperatura. A transferência de vapor associada a esses gradientes é designada por termodifusão. A difusão de vapor no ar resulta de colisões das moléculas de água. Em sistemas porosos existe também a colisão com as paredes dos poros. Quando os poros são muito pequenos essa colisão tem influência no processo de difusão, chamando-se a esse processo efusão ou difusão de Knudsen. O efeito da termodifusão de vapor e da efusão é normalmente considerado muito mais pequeno do que a difusão provocada por gradientes de concentração de vapor de água.

A densidade de fluxo de água líquida, g_l, num meio poroso saturado, em regime isotérmico e unidireccional, pode ser definida teoricamente através da lei de Darcy como o produto da condutividade hidráulica pura, $\lambda_{m,l,0}$, pelo gradiente da pressão de sucção, s.

$$g_l = -\lambda_{m,l,0} \cdot \nabla s \tag{15}$$

A transferência de humidade num meio poroso só raramente pode ser definida de forma isolada como sendo difusão de vapor pura ou sucção capilar pura. A existência de difusão pura implica uma humidade relativa da ambiência muito baixa e a sucção capilar pura implica a saturação do meio poroso.

A Figura 7 esquematiza os diferentes cenários de transferência de humidade que podem desenvolver-se num meio poroso. O primeiro cenário refere-se a uma situação

de baixo teor de humidade onde existe apenas difusão pura de vapor. O segundo cenário representa a transferência em série de vapor e água líquida, para um teor de humidade crescente. Admitindo um novo aumento do teor de humidade, observa-se, no terceiro cenário, a associação da transferência em série à difusão de superfície, também designada por transferência vapor-líquido em paralelo. Por fim, no quarto cenário, representa-se a transferência pura de água líquida.

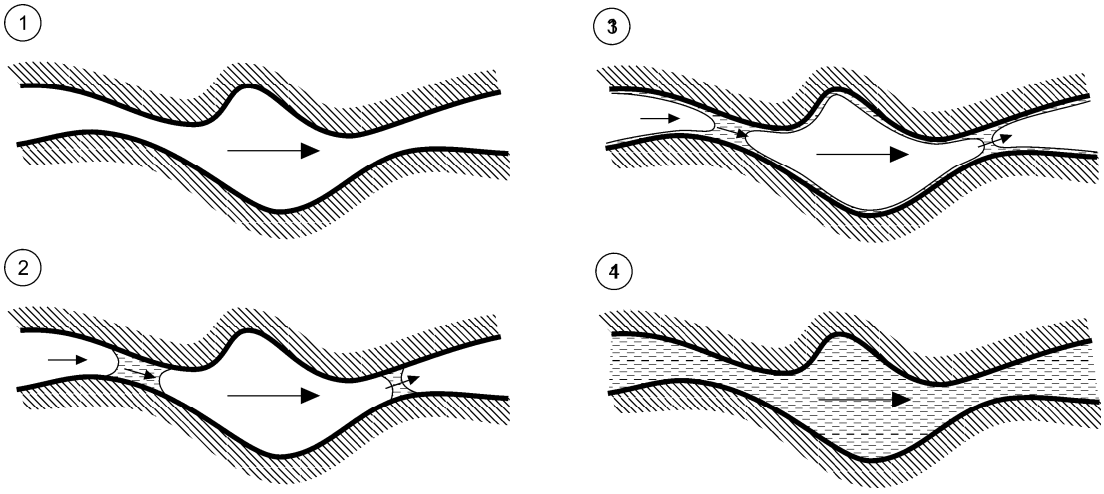


Figura 7– Esquema dos processos possíveis de transferência de humidade em meios porosos (Peukhuri, 2003)

2.2.2 Avaliação da humidade em meios porosos

A avaliação do fluxo de humidade num meio poroso, em regime isotérmico, poderia ser efectuada, em princípio, a partir do gradiente de qualquer uma das variáveis de estado que são utilizadas para descrever a humidade (Hagentoft, 2001).

A aplicação da lei de Fick à definição da densidade de fluxo total de humidade, g, pode tomar a forma de uma das expressões seguintes, dependendo do potencial utilizado, em função da permeabilidade ao vapor δ_v ou δ_p.

$$g = -\delta_v \cdot \nabla v \tag{16}$$

$$g = -\delta_p \cdot \nabla p \tag{17}$$

Tendo em conta o que já se referiu na subsecção anterior, a lei de Fick deveria ser aplicada apenas no regime higroscópico.

A utilização do teor de humidade do material como potencial, inspirada na lei de Darcy, permite determinar a densidade de fluxo de humidade no regime sobre-higroscópico e, também, estender a sua utilização ao regime higroscópico, de acordo com:

$$g = -D_w \cdot \nabla w \tag{18}$$

A relação entre os vários coeficientes de transferência pode ser obtida a partir das relações entre potenciais. A temperatura constante pode escrever-se (Hagentoft, 2001):

$$\delta_v = \frac{D_a}{\mu} \tag{19}$$

$$\delta_v = R_v \cdot (T + 273{,}15) \cdot \delta_p \tag{20}$$

$$\delta_v = \xi_w \cdot \frac{1}{v_s} \cdot D_w \tag{21}$$

Uma forma alternativa de avaliação da transferência de humidade em meios porosos parte do princípio da divisão do fluxo de humidade numa componente de vapor e numa componente líquida. Trata-se, obviamente, de uma aproximação, uma vez que essa separação não existe de facto. Matematicamente pode ter-se, então, as seguintes expressões, onde δ'_v e D'_w representam a permeabilidade ao vapor e o coeficiente de difusão de humidade a adoptar com esta formulação.

$$g = g_v + g_l \tag{22}$$

$$g_v = -\delta'_v \cdot \nabla v \tag{23}$$

$$g_l = -D'_w \cdot \nabla w \tag{24}$$

A aplicação prática deste tipo de formulação pode ter formas diversas, dependendo dos pressupostos que forem aplicados na definição dos coeficientes de transferência que forem utilizados.

Na avaliação de fluxos de humidade em regime não isotérmico é necessário ter em conta a influência de duas variáveis de estado independentes (Hagentoft, 2001). Mas a aplicação de modelos físicos exactos a situações reais é muito difícil uma vez

que é impossível, com as técnicas hoje disponíveis, avaliar os coeficientes de transferência necessários à implementação desses modelos. É necessário, por isso, aplicar simplificações.

Um dos caminhos possíveis consiste em aplicar a já referida modelação da transferência de humidade, baseada na separação entre o fluxo de vapor e o fluxo de água líquida, na forma correspondente às expressões (22), (23) e (24). A componente que define o fluxo de vapor depende do gradiente de temperatura dado que o valor da concentração de vapor depende da temperatura. O transporte de água líquida é assumido como independente do gradiente de temperatura.

Uma formulação que é também bastante utilizada, como por exemplo em (Freitas, 1992), corresponde ao modelo proposto por Philip e De Vries (1957), definido pela expressão seguinte, onde se utilizam como potenciais o teor de humidade do material e a temperatura.

$$g = -D_w \cdot \nabla w - D_T \cdot \nabla T \tag{25}$$

Na literatura podem ser encontrados diferentes modelos que permitem avaliar a transferência de humidade em meios porosos. Em geral, todos eles apresentam simplificações face à realidade, contendo um conjunto de vantagens e desvantagens que os tornam mais adequados para um conjunto de problemas e menos para os restantes.

O balanço da variação de humidade num meio poroso pode, por fim, escrever-se:

$$-\nabla g = \frac{dw}{dt} \tag{26}$$

2.2.3 Condições fronteira

A análise da transferência de humidade em meios porosos implica, normalmente, o tratamento de duas condições fronteira: a transferência de humidade ar-sólido e a transferência de humidade entre dois materiais sólidos em contacto.

A relação entre uma massa de ar e um material sólido pode ser estabelecida, de forma aproximada, através da definição de um fluxo de vapor definido à custa de um coeficiente de transferência, β_v (m/s), e do gradiente de vapor definido pela concentração de vapor à superfície do material, v_{spf}, e na massa de ar, v_{ar}, de acordo com a expressão (Hagentoft, 2001):

$$g_v = \beta_v \cdot \left(v_{ar} - v_{spf} \right) \tag{27}$$

O valor do coeficiente de transferência depende da velocidade do ar à superfície e da rugosidade da mesma (Worch, 2004).

O problema da transferência de humidade, ao nível da interface entre duas camadas de materiais distintos, implica também a adopção de algumas simplificações. É necessário, desde logo, assumir um nível de contacto entre as duas superfícies, que condiciona os pressupostos admitidos para a transferência de humidade na interface. Uma abordagem possível a este problema foi definida por Freitas (1992). Se for assumido um contacto perfeito entre as duas camadas, a formulação a adoptar terá de ter em conta a continuidade do fluxo definido para ambos os lados da interface. O que implica uma igualdade da concentração de vapor se não existir uma resistência térmica de contacto.

2.3 A Importância da Humidade para os Utilizadores dos Edifícios

2.3.1 Introdução

As características do ar interior são muito relevantes para os utilizadores dos edifícios, dado que o clima interior e a qualidade do ar interior podem influenciar o seu conforto, saúde e produtividade. Esta afirmação é sustentada por investigação recente, de que se cita a título de exemplo Fang *et al.* (1998), Wargocki *et al.* (1999) e Seppannen *et al.* (1999). Um bom ambiente interior dos edifícios é uma necessidade evidente para uma sociedade saudável, produtiva e próspera, dado que os utilizadores passam 80 % a 90 % da sua vida no seu interior (Simonson *et al.*, 2001).

A humidade contribui para a caracterização do ambiente interior mas normalmente é pouco valorizada, por comparação com a temperatura do ar. É possível, no entanto, citar trabalhos de investigação onde se demonstra que a humidade relativa interior afecta significativamente:

- O conforto térmico segundo a norma ISO 7730 (ISO, 1994);
- A percepção da qualidade do ar (Fang *et al.*, 1998);
- A saúde dos utilizadores dos edifícios (Bornehag *et al.*, 2001);
- A durabilidade dos materiais de construção (Henriques, 1994);

— O consumo de energia nos edifícios (Simonson, 2000).

Nas subsecções seguintes procura definir-se os valores ideais da humidade relativa interior, em função de questões relevantes para os utilizadores como as enumeradas atrás.

2.3.2 A influência da humidade no conforto térmico e na percepção da qualidade do ar

O estado de neutralidade térmica, onde o metabolismo do corpo humano é igualado pela energia trocada com o ambiente, depende de factores ambientais e do tipo de ocupação (Piedade *et al.*, 2000). Os factores ambientais incluem a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a velocidade do ar e a humidade relativa do ar. No tipo de ocupação inclui-se o nível de actividade e o tipo de vestuário. A neutralidade térmica é em geral realizada para largos limites das condições ambientais.

Os mecanismos pelos quais a humidade afecta o conforto térmico humano não estão, ainda, completamente definidos, mas vários autores tentaram estabelecer essa relação (Fanger, 1970, Toftum *et al.*, 1998a e Toftum *et al.*, 1998b). A partir da investigação sobre este tema é possível, também, concluir que a humidade tem um efeito pequeno no conforto térmico geral, isto é, no conforto do corpo como um todo, mas pode ser muito relevante para o conforto térmico local, como é o caso nos órgãos do sistema respiratório (Simonson *et al.*, 2001).

A definição das exigências de conforto térmico global, apesar de complexa, foi já objecto de normalização através das normas ISO 7730 (ISO, 1994) e ANSI/ASHRAE 55 (ANSI/ASHRAE, 1992), com inclusão da influência da humidade relativa. Dependendo do nível de temperatura admitido, a humidade relativa máxima recomendada varia entre 60 % e 80 %, conforme esteja associada a temperaturas mais elevadas ou menos, respectivamente. A definição destes limites corresponde, nessas normas, a uma percentagem de insatisfeitos (PD) de 10 % e 15 %, respectivamente. A nível nacional, a sugestão de Piedade *et al.* (2000) apontou para valores semelhantes, com limites da humidade relativa entre 35 % e 85 %, não devendo no período de Verão exceder-se os 60 %.

O conforto térmico local pode ser afectado por gradientes de temperatura ou correntes de ar, fazendo com que uma parte do corpo fique mais quente ou mais fria do que o restante. O trabalho de alguns autores, como Toftum *et al.* (1998a e 1998b),

demonstrou que o conforto térmico local pode ser afectado por uma humidade elevada da pele ou por um arrefecimento insuficiente das mucosas do tracto respiratório superior. A partir da resposta de pessoas submetidas a condições ambiente controladas, Toftum *et al.* (1998b) estabeleceu a expressão seguinte, que relaciona a percentagem de insatisfeitos (PD) com a pressão de vapor e a temperatura.

$$PD = \frac{100}{1+\exp\left(-3{,}58+0{,}18\cdot\left(30-T\right)+0{,}14\cdot\left(42{,}5-0{,}01p_v\right)\right)}\% \qquad (28)$$

A partir dessa expressão, Simonson *et al.* (2001) traçou o gráfico que se apresenta na Figura 8. É possível verificar que para uma temperatura de 22 ºC se espera uma percentagem de insatisfeitos, com o conforto respiratório, inferior a 15 % para uma humidade relativa de 55 % enquanto que para 24 ºC não seria possível ultrapassar 40 % HR para obter o mesmo PD.

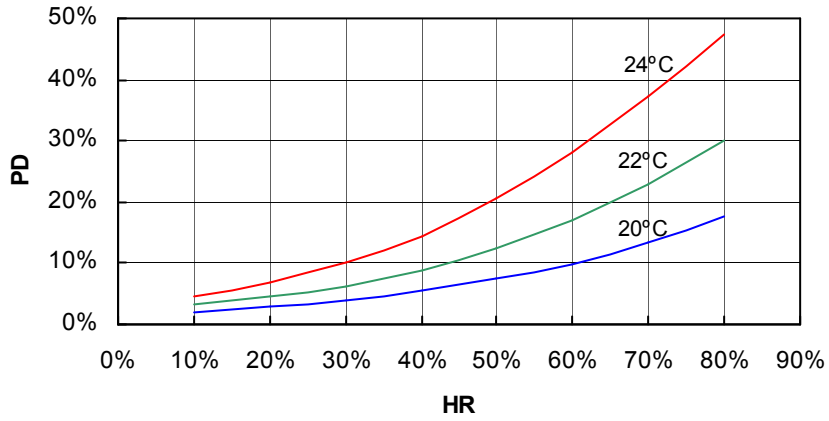


Figura 8 – Percentagem de insatisfeitos com o conforto respiratório, em função da temperatura e da humidade relativa.

A percepção da qualidade do ar interior, PAQ – "perceived air quality", e o conforto térmico local, condicionado pelo arrefecimento do sistema respiratório, estão intimamente ligados. Se esse arrefecimento não for adequado diminui a aceitabilidade do ar. De acordo com Fang *et al.* (1998), a PAQ varia linearmente com a entalpia. O ar é mais aceitável para uma entalpia baixa e à medida que esta aumenta, diminui a aceitabilidade do ar. Acima de uma entalpia de 50 kJ/kg, correspondente a 24 ºC e 55 % HR o ar será considerado inaceitável, independentemente do seu nível de poluição.

2.3.3 A influência da humidade na degradação de materiais e elementos construtivos

O desenvolvimento de fungos nos elementos construtivos é a patologia que mais facilmente indica que a humidade relativa do ar interior é demasiado elevada. As superfícies ficam danificadas, afectando o bem-estar psicológico dos utilizadores, odores desagradáveis são libertados e a própria saúde pode ser afectada pelos esporos libertados (Hunter, 1991).

O processo de germinação e crescimento dos fungos em elementos de construção tem sido estudado por vários autores, citando-se como exemplo Hunter (1991), Adan (1994) e Sedlbauer (2001). O ciclo de vida de uma colónia de fungos pode ser dividido em três fases: a germinação dos esporos, o crescimento do micélio e a produção de esporos. É necessário que um conjunto de condições, designadas como factores de desenvolvimento, se reúna, para a ocorrência de cada uma destas fases. Este conjunto inclui a infestação do ar com esporos, a disponibilidade de humidade, de nutrientes e de oxigénio e condições de temperatura, alcalinidade, radiação, e movimento do ar adequadas.

Uma análise de alguns destes factores permite concluir que os edifícios têm condições para o desenvolvimento de diferentes tipos de fungos. A infestação a partir do ar exterior contendo esporos ocorre naturalmente. A necessidade de nutrientes é garantida pela maior parte das superfícies interiores ou pelas poeiras que nelas se depositam. Apesar de a temperatura ideal para o desenvolvimento de fungos se situar entre 22 ºC e 35 ºC, os limites deste factor podem ir de -8 ºC a 60 ºC (Sedlbauer, 2001), dependendo da espécie e da fase de desenvolvimento. O pH das superfícies pode situar-se entre 2 e 11. Diferentes espécies de fungos sobrevivem em diferentes condições de radiação e de velocidade do ar sobre as superfícies.

Tendo em conta que os factores referidos são facilmente identificáveis nos edifícios, resta analisar as condições de humidade. Pode utilizar-se a actividade da água no substrato, a_w, para definir as condições de humidade para o desenvolvimento de fungos. Esta grandeza pode variar entre 0 e 1 e, em regime permanente, corresponde à humidade relativa do ar expressa em dízima. Numa análise em regime variável é , no entanto, mais adequado utilizar a humidade relativa do ar como referência, dado que a variação de a_w no substrato é mais difícil de avaliar (Adan, 1994).

Em regime permanente, podem encontrar-se espécies de fungos que se desenvolvem para uma humidade relativa de 62 %, ou até mais baixa, se a disponibilidade de nutrientes for ideal. Mas para as espécies que se desenvolvem normalmente sobre elementos construtivos, o valor de HR deverá situar-se entre 70 % e 100 % (Sedlbauer, 2001). A disponibilidade de humidade pode ser a única forma de limitar o desenvolvimento de fungos, se se excluir a utilização de fungicidas. Os limites para este factor devem ser correlacionados com os limites da temperatura, de acordo com cada espécie de fungo e com a disponibilidade de nutrientes. A representação de curvas de igual regime de desenvolvimento em função da temperatura e humidade relativa, designadas por isopletas, permite visualizar estas relações. Na Figura 9 apresenta-se um exemplo desta representação.

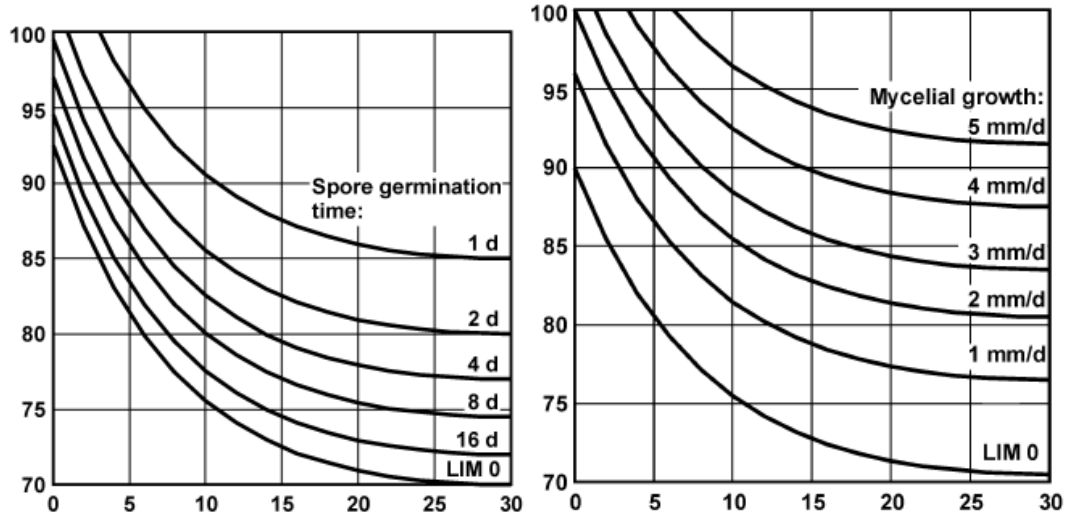


Figura 9 – Isopletas generalizadas de germinação de esporos e crescimento do micélio, para diferentes espécies de fungos, de acordo com a temperatura (em abcissa) e a humidade relativa (em ordenada) (Sedlbauer, 2001).

A análise do desenvolvimento de fungos num regime variável de temperatura e humidade assume alguma complexidade. O modelo proposto por Adan (1994), para a análise desse tipo de problema, apoia-se na definição do quociente entre o período de tempo correspondente a uma humidade relativa da superfície superior a 80 % e o tempo total de duração do ciclo considerado, *TOW* (*time of wetness*). Este conceito permitiu obter algumas conclusões relativamente ao problema em causa. Ensaios em regime variável permitiram concluir que o desenvolvimento de determinadas espécies de fungos, normalmente presentes no ar interior, sobre gesso simples ou pintado

seria muito reduzido para *TOW* inferior a 0,5. Para valores crescentes de *TOW* a aceleração da taxa de crescimento dos fungos foi evidente. Esta conclusão é particularmente relevante, pois evidencia a importância do controlo de picos de humidade relativa num regime variável.

Como curiosidade refira-se, ainda, o modelo biohigrotérmico proposto por Sedlbauer (2001), que permite a previsão do processo de desenvolvimento de fungos com base num modelo de simulação numérica. A sua aplicação permite avaliar o risco de desenvolvimento de fungos, a partir da análise do comportamento higrotérmico de um determinado elemento construtivo, de que se conheçam as condições fronteira.

2.3.4 A humidade nos edifícios e a saúde dos utilizadores

A humidade relativa interior pode afectar a saúde dos utilizadores dos edifícios através de diferentes mecanismos. Alguns são já bem conhecidos mas em relação a outros existem apenas suspeitas.

Uma das relações que é relativamente fácil de estabelecer entre saúde e humidade relativa estabelece-se de forma indirecta. Os riscos para a saúde associados ao desenvolvimento de fungos em espaços interiores incluem doenças como micoses, micotoxicoses e alergias (Sedlbauer, 2001). Tendo em conta as características dos edifícios de habitação e serviços, as alergias serão o risco mais frequente, podendo por isso encontrar-se casos de conjuntivites, rinites, bronquites e asma que se desenvolvem por contacto com os esporos libertados pelos fungos. A possível contribuição dos fungos para a síndroma dos edifícios doentes também está documentada, sendo associada não apenas à produção de esporos mas, também, à produção de compostos orgânicos voláteis por parte desses fungos. Como se expôs na subsecção anterior, o desenvolvimento de fungos em elementos construtivos depende das condições de humidade relativa do ar interior. Uma forma de eliminar este tipo de risco pode passar, por isso, pelo controlo da humidade relativa do ar, de forma a impedir o desenvolvimento dos fungos.

Outro risco para a saúde radica no desenvolvimento de ácaros no ambiente interior. Diversos trabalhos citados por Svennberg e Wadso (2005) estabeleceram já a ligação entre o desenvolvimento de doenças de fundo alérgico, incluindo asma, e a produção de alergénicos produzidos pelos ácaros. Diversos estudos tentaram determinar, também, a possibilidade do seu controlo através da actuação sobre as condi-

ções higrotérmicas dos compartimentos (Cunningham, 1996). De acordo com Arlian *et al.* (2001), a hipótese de controlar o desenvolvimento dos ácaros foi verificada *in situ*, com a manutenção da média da humidade relativa diária abaixo de 50 %. Este resultado evidenciou o controlo da média da variação da humidade relativa como o ponto relevante, sendo os valores de pico menos significativos.

A procura de relações entre a saúde dos utilizadores e os níveis de humidade do ar interior foi sintetizada por Bornehag *et al.* (2001). A partir de 61 artigos científicos, foi possível encontrar indícios da ligação entre humidade elevada em compartimentos e o aumento do risco de doenças respiratórias, como a asma, ou mesmo de sintomas menos específicos como dores de cabeça e cansaço. Não foi possível, no entanto, nesse estudo, identificar claramente quais os mecanismos responsáveis por essa ligação. Também não foi encontrada uma definição para edifício húmido, tendo sido apenas possível afirmar que a ligação entre humidade elevada e riscos para saúde existe e que se deve evitar trabalhar ou viver em edifícios com humidade elevada.

O limite inferior da humidade relativa em edifícios foi estudado por diversos investigadores, podendo referir-se o valor de 30 % associado ao limite para prevenção do risco de infecções respiratórias (ASHRAE, 1997). No trabalho realizado por Green (1985), por exemplo, concluiu-se que o aumento da humidade relativa, de 20 % para 40 %, em escolas localizadas em regiões frias e secas, podia reduzir o absentismo, devido a infecções respiratórias do tracto superior, em 50 %.

2.3.5 A humidade e o consumo de energia nos edifícios

A influência da humidade interior no consumo de energia pode ser maior ou menor dependendo, essencialmente, do tipo de sistemas de controlo do clima interior existentes em cada edifício. Num edifício que não dispõe de sistemas de aquecimento nem de ventilação mecânica regulável pelo utilizador, os níveis de humidade não podem afectar o consumo de energia. Obviamente, a qualidade do ar, ou o controlo de fungos em elementos construtivos, só terão níveis aceitáveis em condições muito particulares de clima exterior ou de utilização dos compartimentos.

Já no caso, totalmente oposto, de um edifício equipado com um sistema de ar condicionado programado para o controlo não só da temperatura mas também da humidade relativa o peso da humidade na factura energética é evidente e facilmente mensurável.

Nos casos mais comuns de edifícios onde se proceda apenas ao controlo da temperatura interior, a humidade pode também influenciar o consumo de energia. O aumento da humidade relativa afecta negativamente a percepção da qualidade do ar por parte do utilizador, levando-o a actuar sobre a ventilação. Essa actuação pode traduzir-se em algo tão simples como a abertura de janelas. Mas o aumento da ventilação, na estação de aquecimento, num edifício com sistema de aquecimento, implica um maior consumo de energia.

2.3.6 Limites ideais para a variação da humidade relativa

A definição objectiva dos valores ideais da humidade relativa em edifícios não é simples. A análise das várias condicionantes, enunciadas nas subsecções anteriores, não permite definir limites para a humidade relativa sem ter em conta, por exemplo, a temperatura do ar ou o tempo de duração de valores extremos.

É possível, apesar de tudo, referir alguns limites como referência para este trabalho. A humidade relativa num regime permanente deverá ter como limite inferior 30 %, tendo em conta exigências de saúde, e 50 % a 60 % como limite superior, tendo em conta o controlo de ácaros e as exigências de conforto térmico e de percepção da qualidade do ar. Apenas como exemplo, apresenta-se na Figura 10 uma análise de limitações à humidade relativa do ar citada por Simonson *et al.* (2001).

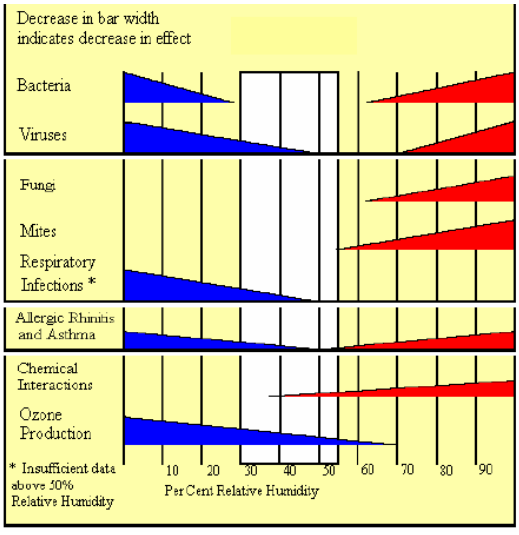


Figura 10 – O efeito da humidade em vários parâmetros relacionados com saúde e qualidade do ar interior, indicando que a humidade relativa ideal deveria situar-se entre 30 % e 55 % (Simonson *et al.*, 2001)

Num regime variável, os limites superiores da variação de humidade relativa teriam de ser afinados, em relação às várias exigências, de acordo com a utilização de cada compartimento. O limite fornecido pelo controlo de desenvolvimento de fungos pode ser aqui relevante, podendo usar-se como referência o valor de *TOW* inferior a 50 %, já referido em 2.3.3.

2.4 Alguns Factores Definidores da Humidade Relativa Interior

2.4.1 Contextualização

A variação da humidade relativa, ao longo do tempo, numa determinada zona de um edifício, depende de um elevado número de factores. O balanço da humidade absoluta numa zona depende, essencialmente, dos seguintes factores:

- Produção de vapor pelos utilizadores e suas actividades;
- Ventilação;
- Humidade absoluta exterior;
- Trocas de vapor com elementos interiores.

A dependência da humidade relativa face à temperatura do ar obriga à consideração de factores adicionais, tais como:

- Produção de calor pelos utilizadores e suas actividades;
- Produção de calor pelos sistemas de aquecimento;
- Ventilação;
- Nível de desempenho térmico da envolvente;
- Temperatura exterior;
- Ganhos solares.

A análise de alguns destes factores é abordada de forma resumida nas subsecções seguintes. Tendo em conta o âmbito desta Tese, as principais conclusões de trabalhos anteriores sobre a contribuição de elementos interiores, para o balanço de humidade numa zona, são referidas com maior detalhe na secção 2.5.

2.4.2 Utilizadores

Os utilizadores têm um impacto decisivo no clima interior, pois intervêm sobre vários factores que condicionam a humidade relativa. Uma parte desse impacto pode

ser sistematizado através de valores numéricos, que são fundamentais para a utilização de ferramentas de previsão do comportamento higrotérmico dos edifícios. Na prática, subsistem sempre muitas dúvidas sobre a temperatura, os caudais de ventilação e a produção de vapor que se verificam de facto num compartimento. O tipo de compartimento, o clima exterior e a atitude dos ocupantes face ao consumo de energia, são apenas alguns exemplos dos muitos factores que determinam o comportamento dos utilizadores e a sua influência no clima interior.

Apesar de todas as incógnitas associadas ao comportamento humano, é possível obter, em diferentes referências, valores da produção de vapor associados a diferentes actividades humanas. Na Tabela 1 apresentam-se alguns valores citados em Raatschen *et al.* (1991). Apresentam-se ainda, na Tabela 2, outros valores contidos na norma BS5925 (BSI, 1991). Este tipo de valores tem especial interesse para a análise de cenários de comportamento higrotérmico de edifícios, através de ferramentas de simulação.

Tabela 1 – Alguns valores da produção de vapor em edifícios

Fonte de vapor		**Valor (g/h)**
Humanos	Actividade reduzida	30 – 60
	Actividade intermédia	120 – 200
	Actividade elevada	200 – 300
Higiene	Banho	~700
	Duche	~2600
Cozinha		600 – 1500
Plantas em vasos		5 – 20
Secagem de roupa (4,5 kg)	Após centrifugação	50 – 200
	Sem centrifugação	100 – 500

Tabela 2 – Estimativa da produção de vapor em actividades domésticas

Actividade	**Vapor de água (g/dia)**
Cozinhar a electricidade	2000
Cozinhar a gás	3000
Lavagem de loiça	400
Banho (por pessoa)	200
Lavagem de roupa	500
Secagem de roupa no interior de um compartimento (por pessoa)	1500

A avaliação da produção de vapor numa habitação, ao longo de um dia, permite encontrar grandes dispersões. Em Raatschen *et al.* (1991) pode encontrar-se o valor de 8 kg/dia para uma família de duas pessoas, que aumenta para 12 kg/dia com uma criança e para 14 kg/dia com duas crianças. Nessa referência, e também em Aoki-Kramer e Karagiozis (2004), citam-se, no entanto, diferentes fontes que fazem variar a produção de vapor numa habitação entre 4 e 14 kg/dia numa habitação ocupada por duas pessoas. Estes dados evidenciam a grande variabilidade que o comportamento humano introduz no parâmetro produção de vapor.

A produção de calor associada às actividades humanas no interior de um edifício assume, também, uma grande variabilidade. No Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios, RCCTE:2006, definem-se valores nominais, para ganhos térmicos médios por unidade de área útil, correspondentes a 4 W/m^2 em edifícios de tipo residencial e 7 W/m^2 em edifícios de serviços.

A influência dos utilizadores sobre o clima interior manifesta-se, ainda, de outras formas, com carácter mais subjectivo e com ainda maior dificuldade de quantificação. Os caudais de ventilação podem ser dramaticamente alterados pela abertura de janelas por parte dos utilizadores. Valores adicionais de renovações horárias entre 0,25 h^{-1} e 0,35 h^{-1} foram detectados por estudos realizados em países do Norte da Europa e citados em Raatschen *et al.* (1991).

A temperatura que vigora, de facto, no interior de um edifício, é também extremamente variável e muito dependente da atitude do utilizador face ao consumo de energia pelos sistemas de aquecimento. Os regulamentos de comportamento térmico, incluindo o RCCTE (2006), apontam normalmente para 20 ºC como temperatura de cálculo para o Inverno. De acordo com Raatschen *et al.* (1991), muitas pessoas preferem temperaturas em quarto de dormir abaixo de 17 ºC, verificando-se nas salas ocupadas temperaturas entre 20 ºC e 24 ºC.

A homogeneização da distribuição de calor e humidade num edifício depende também da acção dos utilizadores. Tomando como exemplo uma habitação, é fácil intuir como a abertura de portas pode condicionar a circulação de ar entre compartimentos. A abertura de portas do WC após o banho, para diminuir a concentração de vapor nesse compartimento, é uma atitude muito comum e que resulta num aumento substancial da concentração de vapor em compartimentos adjacentes. A decisão de

dormir com a porta do quarto fechada ou aberta também modifica radicalmente a distribuição de vapor numa habitação.

Os sistemas de aquecimento adoptados num edifício afectam os níveis de temperatura interior e o campo de temperaturas em cada zona. No caso dos edifícios portugueses, a discussão deve começar pela existência ou não de sistema de aquecimento. Muitos edifícios não dispõem, ainda, de sistemas de aquecimento adequados, assistindo-se a um aquecimento pontual de alguns compartimentos, apenas nos dias mais frios do ano.

Se um edifício dispuser de um sistema de aquecimento adequado, com capacidade de controlo efectivo sobre a temperatura interior, é importante analisar o efeito que diferentes regimes de operação têm nos níveis de temperatura diários e, por consequência, na humidade relativa interior.

Estas considerações não pretendem inviabilizar o tratamento sistemático do comportamento higrotérmico de edifícios através de ferramentas de simulação numérica. No entanto, chamam a atenção para o cuidado que é necessário para a leitura dos resultados aí obtidos. As conclusões a retirar desse tipo de estudos deveriam suportar análises de risco que poderiam tornar as conclusões mais válidas. Mas como esse tipo de análise ainda não está suficientemente desenvolvida na área da Física das Construções, deve, pelo menos, haver o cuidado de criar cenários credíveis para os estudos numéricos e que contemplem algumas peculiaridades do comportamento humano.

2.4.3 Sistemas de ventilação

Os sistemas de ventilação assumem uma grande importância na definição do clima interior, sendo absolutamente determinantes para o controlo dos níveis de humidade absoluta interior. A ventilação corresponde à troca de ar poluído por fresco e relativamente mais limpo. Esta troca pode ocorrer por dispositivos colocados propositadamente para esse fim, caso que se designa usualmente por ventilação, ou por vias não concebidas explicitamente para esse fim, situação designada por infiltração (Concannon, 2002).

A ventilação é necessária para a remoção de poluentes e para garantir os níveis de oxigénio necessários ao metabolismo humano e aos aparelhos de combustão. A existência de ventilação implica perdas de energia que, em 13 países da OCDE, represen-

ta 33 % dos consumos de energia em climatização, em edifícios de serviços e residenciais (Concannon, 2002).

Diversos países dispõem de regulamentação para os caudais de ventilação a adoptar em edifícios, que pode apresentar uma maior ou menor sofisticação. As exigências mínimas encontradas podem variar entre 0,3 e 1,0 renovações horárias globais (Concannon, 2002). É possível encontrar exigências mínimas de 0,35 renovações horárias, no caso da norma ANSI/ASHRAE 62 (ANSI/ASHRAE, 2004), para a globalidade do edifício, complementadas com caudais mínimos para os compartimentos de serviços. Outros países adoptam valores mínimos mais altos para a globalidade do edifício, como é o caso de Portugal, onde a norma NP 1037-1 (IPQ, 2002), toma como exigência mínima, para os edifícios de habitação, uma renovação por hora nos compartimentos principais e quatro renovações por hora nos compartimentos de serviços. O RCCTE:2006 admite 0,6 como valor global da renovação horária de edifícios em conformidade com a NP 1037-1.

Os caudais de ventilação que existem, na prática, nos edifícios, dependem em grande medida dos sistemas de ventilação adoptados. Os sistemas de ventilação natural eram os mais utilizados nos países da OCDE, à data da realização de um levantamento apresentado em Mansson (1995). Como dependem do vento e das diferenças de temperatura, e estes potenciais são bastante variáveis, os caudais de ventilação reais são de difícil controlo. É comum a adopção de dispositivos de extracção mecânica nos compartimentos de serviços, como complemento a este tipo de ventilação. Nos países com climas frios os sistemas de ventilação mecânica prevalecem, especialmente em edifícios novos.

As estratégias de ventilação a utilizar podem variar. A mais simples corresponde a um sistema que garanta um caudal permanente. A ventilação resultante da abertura de janelas por um período curto, com a intenção de diminuir a humidade absoluta interior, não é eficaz, pois a desadsorção da humidade armazenada nos elementos interiores rapidamente restabelece os níveis iniciais de humidade (Raatschen *et al.*, 1991). Uma estratégia de ventilação que pode representar um compromisso entre o controlo dos níveis de humidade interior e a conservação de energia pode apoiar-se em sistemas de ventilação de caudal variável determinado pelos valores de humidade relativa ou de concentração de CO_2, de acordo com resultados evidenciados por vários autores de que se cita, como exemplo, Millet e Villenave (2003).

2.4.4 Clima exterior

O clima exterior tem um impacto decisivo sobre o clima interior dos edifícios. A temperatura do ar exterior e a radiação solar condicionam a temperatura interior, especialmente nos casos em que não existem sistemas de aquecimento adequados ou, se existem, são utilizados de forma intermitente. A humidade absoluta do ar exterior, devido às trocas de ar por ventilação, determina em grande medida o valor da humidade absoluta interior. Os próprios caudais de ventilação podem ser afectados pelas condições climáticas exteriores. Esse efeito pode fazer-se sentir em sistemas de ventilação natural, onde os gradientes que produzem as trocas dependem do vento e das diferenças de temperatura entre o interior e o exterior. Mas também se faz sentir sobre a frequência de abertura de janelas pelos utilizadores, que reagem de forma diferente em função da chuva e da intensidade do vento.

Tendo em conta o âmbito deste trabalho, é importante avaliar pelo menos algumas características do clima português e definir algumas fontes de informação relevantes para os dados climáticos, necessários ao estudo que se pretende desenvolver.

Portugal, apesar de ter uma dimensão relativamente pequena, apresenta uma variação apreciável de alguns parâmetros climáticos, geograficamente e ao longo do ano.

Na Figura 11 pode ser observado o zonamento climático adoptado no RCCTE:2006 para Portugal continental. A partir deste zonamento é possível obter no RCCTE dados climáticos necessários a estimativas de consumos energéticos através do método simplificado aí previsto. O Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, RSECE:1998, inclui ainda dados de projecto para sistemas de climatização, reportados a este zonamento, e que se reproduzem no Tabela 3.

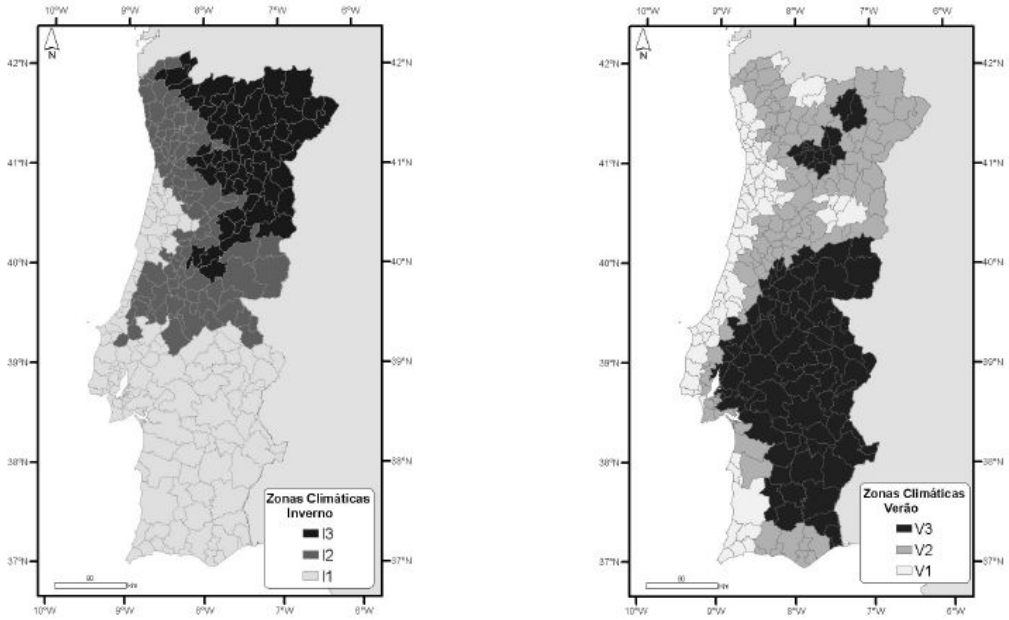


Figura 11 – Zonamento climático de Portugal continental do RCCTE:2006

Tabela 3 – Valores de projecto da humidade absoluta exterior do RSECE:1998

Zona climática – Inverno	I_1	I_2	I_3	Açores	Madeira
Humidade de projecto (g/kg)	4	3	2	6	7
Zona climática – Verão	V_1	V_2	V_3	Açores	Madeira
Humidade de projecto (g/kg)	10	11	10	14	14

Este tipo de dados, que é bastante útil em determinados tipos de estimativas, não é adequado a simulações higrotérmicas detalhadas. Para essas aplicações é normalmente utilizada informação constituída por valores horários dos parâmetros climáticos utilizados pelos modelos numéricos. Existe um grande número de estações climáticas a nível mundial, onde é possível obter registos horários de parâmetros climáticos para períodos de 30 anos. A utilização destes dados requer um tratamento prévio que transforme dados em bruto em bases de dados com anos de referência adequados aos estudos climáticos que se pretende realizar.

A construção de anos climáticos de referência, constituídos por valores horários de parâmetros climáticos, tem sido bastante aplicada na obtenção de dados para avaliação do desempenho energético de edifícios. Estes anos climáticos de referência devem ser construídos de modo a que correspondam a um ano médio, no que toca a médias mensais e sazonais e ocorrência e persistência de períodos quentes, frios, e com ou sem sol (Lund, 1991). Para isso devem ser observados três requisitos. Em

primeiro lugar, a adopção de frequências verdadeiras, com a maior proximidade possível das médias reais a longo prazo e uma distribuição natural de máximos e mínimos diários. Em segundo lugar, a adopção de sequências verdadeiras onde os cenários climáticos tenham uma duração e se sucedam, uns aos outros, de forma similar aos valores registados para o local em estudo. Por fim, a adopção de correlações verdadeiras entre os vários parâmetros.

Existem vários tipos de bases de dados a nível mundial, construídas a partir de registos de estações climáticas, que seguem estes princípios. A sua construção é realizada por métodos diversos, como seja o caso dos "Test Reference Years" (TRY) na Europa ou os "Typical Meteorological Years" (TMY) e "Weather Years for Energy Calculations" (WYEC) nos Estados Unidos. O método preconizado pela pré norma prEN ISO 15927-4 (CEN, 2005) permite a produção de informação semelhante a essas bases, mas contém maior sofisticação, aproximando-se da definição de "Design Reference Year" proposta por Lund (1991). Em Portugal, foi produzido um Ano Climático de Referência para Lisboa (INMG/LNEC, 1988).

A utilização de anos climáticos sintéticos, não constituídos por valores efectivamente medidos, mas gerados com base em métodos estocásticos, pode ser interessante quando, para uma determinada região, não existem anos de referência baseados totalmente em dados medidos. O programa METEONORM (Meteotest, 2003), que se cita como exemplo, inclui este tipo de funcionalidade.

A construção de anos climáticos de referência, para análise do desempenho hígrico de edifícios, não tem tido tantos desenvolvimentos como os anos climáticos destinados a análises de desempenho energético. As duas grandes diferenças, do segundo tipo de série horária para o primeiro, são a falta de dados sobre precipitação e a utilização de valores médios para os diversos parâmetros. De acordo com Sanders (1996), tendo em conta os diferentes objectivos das duas análises, os anos climáticos para análise do desempenho hígrico devem impor, ao edifício, uma solicitação mais severa do que a associada ao ano médio, sendo sugerida a consideração de um período de retorno de 10 anos. A construção deste tipo de ano climático reveste-se, no entanto, de uma maior complexidade, pois é necessário ter em conta qual o efeito que se pretende avaliar. O ano de referência para a análise de condensações internas pode ser diferente do ano de referência para avaliação de risco de desenvolvimento de fungos, como verificado por Kalamees e Vinha (2004).

2.4.5 Avaliação simplificada da humidade interior

A humidade interior de uma zona de um edifício pode ser definida a partir do conhecimento de algumas condições fronteira, para cenários muito simples, com base em expressões deduzidas do balanço da humidade interior.

O cenário mais simples que se pode analisar corresponde a um regime constante. Ou seja, admite-se para uma determinada zona, que o caudal de ventilação, $N.V$, a produção de vapor, M_{ganhos}, a pressão de vapor exterior, $p_{v,e}$, e a temperatura interior, T_i, têm valores constantes. Se a este cenário forem adicionadas algumas simplificações como a mistura ideal do ar e a inexistência de trocas de humidade com elementos interiores, a pressão de vapor interior, $p_{v,i}$, define-se pela expressão seguinte (Hens, 1991):

$$p_{v,i} = p_{v,e} + \frac{462 \cdot (T_i + 273{,}15) \cdot M_{ganhos}}{N \cdot V} \tag{29}$$

Os cenários que correspondem a um regime variável não são normalmente passíveis de tratamento através de expressões simples, salvo algumas excepções. Uma delas corresponde a um cenário de caudal de ventilação, pressão de vapor exterior e temperatura interior constantes, com um início da produção de vapor num determinado instante conhecido. Neste caso, pode aplicar-se a expressão seguinte, para definir a variação da pressão de vapor interior em função do tempo (Hens, 1991). Nesta expressão, $p_{v,i,\infty}$ corresponde à pressão de vapor interior determinada para o regime constante e $p_{v,i,0}$ corresponde ao valor inicial dessa pressão.

$$p_{v,i} = p_{v,i,\infty} + (p_{v,i,0} - p_{v,i,\infty}) \cdot e^{-N \cdot t} \tag{30}$$

A análise destas expressões permite, desde logo, concluir sobre a forma como algumas condições fronteira podem afectar a variação da humidade interior. A partir da expressão (29) verifica-se que, a longo prazo, a pressão de vapor interior não pode ser inferior ao valor da pressão exterior. A diferença ($p_{v,i}$ -$p_{v,e}$) aumenta com a produção de vapor e diminui com o caudal de ventilação, sendo a relação [M_{ganhos}, ($p_{v,i}$ - $p_{v,e}$)] linear e a relação [N, ($p_{v,i}$ -$p_{v,e}$)] hiperbólica.

Este tipo de variação, esquematizado na Figura 12, evidencia que a diminuição da pressão de vapor interior, por aumento da ventilação, só tem ganhos significativos até um valor determinado, dependente da produção de vapor interior. A diferença ($p_{v,i}$ -

$p_{v,e}$) também aumenta com a diminuição do volume, se os outros parâmetros permanecerem constantes.

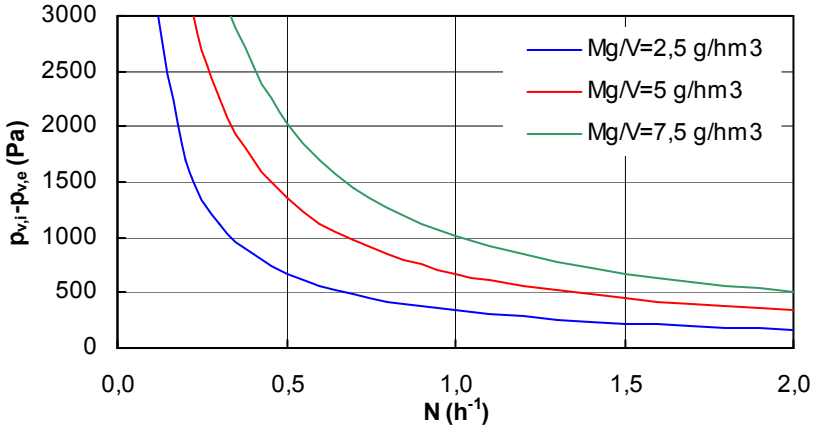


Figura 12 – Relação entre a diferença de pressão interior e exterior e o número de renovações horárias para um exemplo onde V=30 m^3 e M_{ganhos} toma os valores 75, 150 e 225 g/h.

A expressão (30) mostra que, quanto maior for o caudal de ventilação, mais rapidamente se atinge o valor da pressão de vapor correspondente ao regime permanente, mas, tendo em conta a expressão (29), menor será esse valor.

O quociente entre a produção de vapor interior e o caudal de renovação de ar designa-se por higrometria (Freitas e Pinto, 1998), ou excesso de humidade interior na EN ISO 13788 (CEN, 2001b), e fornece a base para uma classificação de edifícios. Apresenta-se na Tabela 4 os valores propostos por Freitas e Pinto (1998) para Portugal. A norma EN ISO 13788 sugere classes de humidade interior de referência, dependentes da temperatura exterior, que devem ser confirmadas regionalmente.

O trabalho desenvolvido por França (2002) procurou avaliar a higrometria real em edifícios de habitação portugueses, apresentando-se no gráfico da Figura 13 os resultados aí obtidos e comparados com as duas classificações citadas. A variação com a temperatura sugerida pela EN ISO 13788 não parece adequada aos edifícios estudados em Portugal, mas é necessário um estudo mais aprofundado do clima interior dos edifícios portugueses para obter conclusões definitivas.

Algumas disparidades ao nível da relação entre a higrometria e a temperatura exterior, proposta pela EN ISO 13788, foram também detectadas em trabalhos de campo realizados na Finlândia (Kalamees *et al.*, 2005). Verificou-se a existência de

diferenças de pressão de vapor, entre o interior e o exterior, para valores da temperatura superiores a 20 ºC e a inflexão das classes verificava-se para valores diferentes dos sugeridos pela norma.

A avaliação do clima interior através de classes de higrometria é útil para a definição de condições fronteira, para a avaliação do risco de ocorrência de condensações internas em elementos construtivos, através de métodos simplificados, como o método de Glaser (Freitas e Pinto, 1998).

Na EN ISO 13788, além da abordagem à questão das condensações internas, é também definida uma metodologia para o cálculo da temperatura superficial interior mínima, para a prevenção de humidades superficiais críticas que levem ao desenvolvimento de fungos. O risco de formação de fungos é definido, na norma, para humidades relativas superficiais superiores a 80 % durante vários dias. O objectivo da aplicação dessa metodologia é a definição de um nível mínimo de qualidade térmica para a envolvente do edifício.

Tabela 4 – Classificação dos edifícios em função da sua higrometria.

Classe	**Higrometria**	**Tipo de Edifício**
I – Fraca higrometria	$\frac{M_{ganhos}}{N \cdot V} \leq 2{,}5 g/m^3$	Escritórios, escolas, ginásios
II – Média higrometria	$2{,}5 \leq \frac{M_{ganhos}}{N \cdot V} \leq 5{,}0 g/m^3$	Edifícios de habitação não sobreocupados e correctamente ventilados
III – Forte higrometria	$5{,}0 \leq \frac{M_{ganhos}}{N \cdot V} \leq 7{,}5 g/m^3$	Edifícios de habitação com ventilação deficiente, indústrias
IV – Muito forte higrometria	$\frac{M_{ganhos}}{N \cdot V} \geq 7{,}5 g/m^3$	Piscinas, certas indústrias

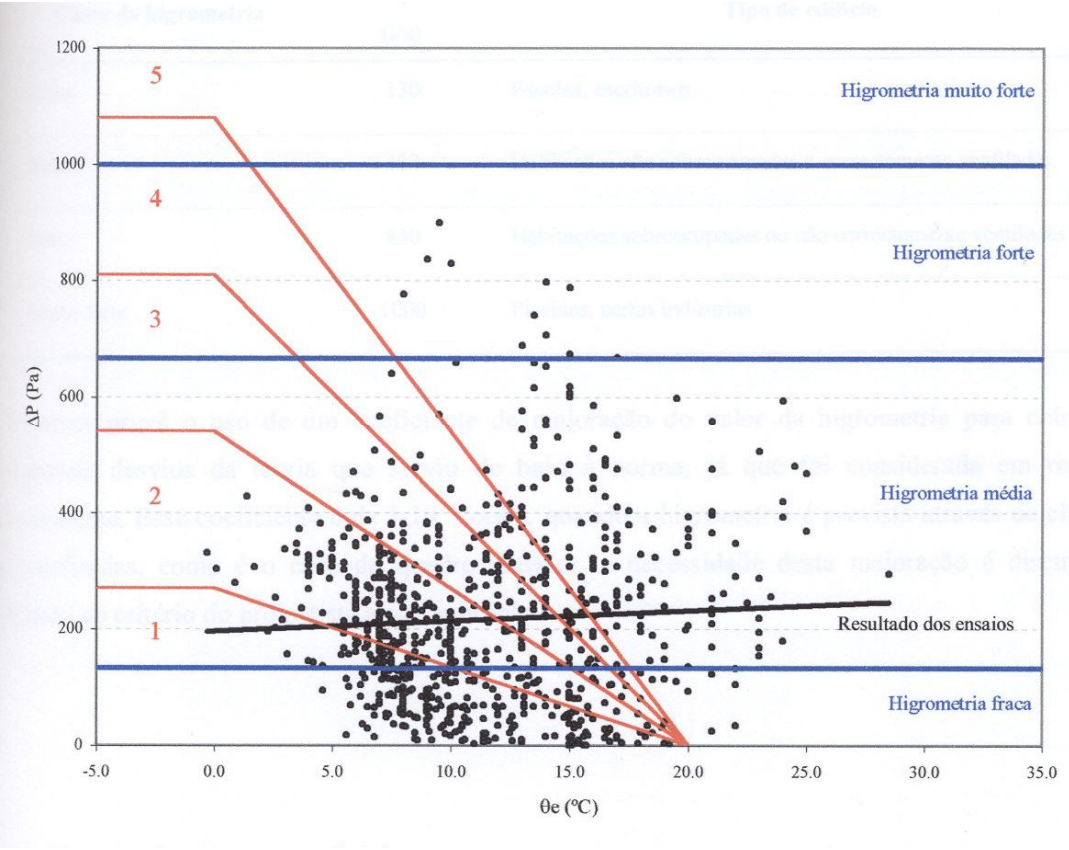


Figura 13 – Gráfico retirado de França (2002) com medições de higrometria em edifícios portugueses (a preto) comparadas com as classes sugeridas pela EN ISO 13788 (a vermelho) e por Freitas e Pinto (1998) (a azul)

A utilização de classes de higrometria na caracterização do clima interior dos edifícios cumpre determinados objectivos. A suposição de um regime permanente para a humidade interior, apesar de afastada da realidade, é muitas vezes suficiente para análises de risco como as previstas na EN ISO 13788. Uma avaliação mais detalhada do clima interior implica o conhecimento da evolução da humidade relativa num regime dinâmico. Nesse caso, não se pode desprezar a capacidade de armazenamento de humidade dos elementos interiores. Este aspecto é abordado, em seguida, através da análise do trabalho de diversos autores.

2.5 Estudos Desenvolvidos Sobre a Influência dos Materiais Porosos na Moderação da Variação da Humidade Relativa Interior

2.5.1 Introdução

A variação da humidade relativa interior dos edifícios pode ser muito condicionada pelos elementos construtivos e pelo mobiliário de uma zona em análise. Esta questão tem sido abordada, por diversos autores, que têm tentado avaliar o papel que as trocas de humidade entre o ar e os materiais porosos podem desempenhar no comportamento higrotérmico global dos edifícios.

Nas subsecções seguintes apresenta-se a revisão de alguns desses trabalhos. Pretende analisar-se não apenas as conclusões obtidas mas também a metodologia utilizada nos trabalhos desenvolvidos.

As conclusões a destacar nos trabalhos anteriores corresponderam à avaliação da relevância do papel dos materiais porosos no balanço hígrico de uma zona e, também, à definição da conjugação das condições fronteira que pode condicionar essa relevância.

A exploração de metodologias utilizadas procurou avaliar, em primeiro lugar, se os estudos conduzidos têm uma componente numérica, laboratorial, de campo ou uma combinação das três. Em seguida, foi importante detectar as particularidades das simulações numéricas apresentadas, como as simplificações adoptadas, ou as análises de sensibilidade dos parâmetros envolvidos no cálculo. Foi também importante apreender o tipo de ensaios que podem ser desenvolvidos neste âmbito, dado que a normalização existente cobre, essencialmente, a determinação de propriedades básicas. A análise de trabalhos de campo foi, obviamente, importante pelo retrato da realidade que permite obter.

2.5.2 EDF

A "Electricité de France" (EDF) patrocinou o desenvolvimento de investigação sobre o efeito dos materiais porosos na variação da humidade relativa interior em edifícios.

Os trabalhos de Fauconnier *et al.* (1989), Dalicieux *et al.* (1989) e Duforestel (1994) procuraram desenvolver modelos numéricos de variação de humidade numa zona que incluíssem o efeito dos elementos construtivos e do mobiliário. No modelo

proposto por Fauconnier *et al.* (1989), as trocas de calor e humidade com os elementos construtivos são calculadas de forma detalhada com base no modelo de Philip e De Vries e as trocas com o mobiliário são incluídas, de forma simplificada, utilizando coeficientes de troca determinados experimentalmente. Os modelos de Dalicieux *et al.* (1989) e de Duforestel (1994) representam o efeito do "tampão higroscópico" através de um modelo simplificado de troca, entre o ar e esse tampão, caracterizado por um conjunto de três parâmetros globais.

Os três modelos foram comparados com medições em quartos reais onde a produção de vapor, a ventilação e o aquecimento tinham um controlo estrito. As medições iniciais forneciam os valores dos parâmetros para a consideração do mobiliário, no caso do primeiro modelo, e para toda a envolvente nos outros dois.

Estes trabalhos procuraram produzir, essencialmente, modelos de avaliação da variação da humidade interior passíveis de ser incluídos em modelos de análise do comportamento térmico. As medições realizadas permitiram confirmar a necessidade da consideração das trocas com os materiais porosos, para uma avaliação correcta da variação da humidade interior. O efeito de amortecimento de variações da humidade interior, provocado por essas trocas, é identificado por estes autores como inércia higroscópica.

2.5.3 IEA ECBCS Annex 14

O projecto de investigação "Annex 14 – Condensation and Energy" (Hens *et al.*, 1991) foi patrocinado pela Agência Internacional de Energia (http://www.iea.org/) no âmbito do programa "Energy Conservation in Buildings and Community Systems" (http://www.ecbcs.org/). Foram desenvolvidos diversos trabalhos sobre modelação das condições interiores de humidade. A contribuição das trocas de humidade com os materiais porosos, para o balanço de massa de uma zona, foi considerada e a sua influência avaliada.

As análises efectuadas foram essencialmente numéricas, havendo também algumas medições em compartimentos reais com condições interiores controladas.

A análise do efeito de condensações superficiais e da higroscopicidade dos materiais foi incluída nos modelos numéricos aplicados. A contabilização das condensações superficiais, no balanço de humidade de uma zona, pôde ser efectuado com recurso a um número de simplificações limitado. A consideração da higroscopicidade

dos materiais obrigou a simplificações mais profundas, adequadas aos meios computacionais existentes no final da década de 80, aquando da realização deste trabalho.

Uma das estratégias utilizadas, para simplificar o cálculo do efeito da higroscopicidade dos elementos interiores, correspondeu à utilização do conceito de multiplicador efectivo da massa de ar. Este conceito assimila o armazenamento de humidade nos materiais porosos a um armazenamento numa massa de ar equivalente. O valor desse multiplicador é definido pelas características de cada zona e, devido à sua simplicidade, é muitas vezes utilizado no dimensionamento de instalações de ar condicionado. Apresenta, no entanto, muitas limitações por não poder reproduzir correctamente as propriedades dos materiais.

Outra estratégia utilizada correspondeu a uma aproximação de primeira ordem ao efeito higroscópico dos materiais, apoiada no conceito de profundidade efectiva de penetração. Este conceito assume que só uma pequena espessura dos materiais contribui para as trocas de humidade com o ar, em regime dinâmico. A correcta aplicação deste método implica uma escolha adequada dos parâmetros que representam essa camada.

Uma aproximação de segunda ordem foi também tentada, calculando efectivamente o processo de transferência de humidade nos elementos construtivos, mas considerando as propriedades dos materiais constantes e admitindo apenas o cenário de variação periódica de parâmetros, como a produção de vapor e a pressão exterior.

O conjunto de trabalhos realizados, no âmbito deste projecto, produziu várias conclusões relativamente à influência da inércia higroscópica na variação da humidade relativa interior. Foi demonstrado que pode ser um efeito relevante, podendo assistir-se a elevadas trocas de vapor entre as superfícies higroscopicamente activas e o ar. A análise de segunda ordem detectou que, em ciclos diários, só os primeiros milímetros dos elementos construtivos contribuem para essas trocas. Para ciclos anuais, toda a espessura de um elemento construtivo pode ser considerada higroscopicamente activa, sendo esse aspecto mais notório para edifícios com ventilação muito reduzida.

A possível contribuição da difusão de vapor através da envolvente, para o balanço de humidade de uma zona, também foi discutida. Em regime variável, essa difusão associa-se ao efeito de inércia higroscópica, devendo por isso ser tratada com um dos métodos citados. Em regime permanente, o efeito de difusão através da envolvente

pode ser desprezado pois só em situações extremas, de ventilação muito reduzida e envolventes muito permeáveis ao vapor, essa componente teria significado. Esta conclusão pretendeu afastar o conceito de que o edifício pode "respirar através da envolvente".

2.5.4 Plathner & Woloszyn

A pesquisa apresentada por Plathner e Woloszyn (2002) pretendeu avaliar a transferência de vapor em edifícios através dos modelos multi-zona BREEZE (BRE, 1993), desenvolvido pelo Building Research Establishment (BRE), e CLIM2000 (Bonneau *et al.*, 1993), desenvolvido pela EDF. Foi realizada uma campanha experimental numa casa de teste do tipo unifamiliar, com dois pisos interligados, cujos resultados serviram para avaliar o desempenho dos modelos numéricos utilizados.

As simulações numéricas do cenário produzido na campanha experimental utilizaram modelos existentes, de análise de ventilação e distribuição de ar em edifícios, aos quais foram adaptados módulos de simulação do efeito da higroscopicidade dos materiais. O módulo adicionado ao programa CLIM2000 correspondia ao modelo de Duforestel (1994). O módulo inserido no programa BREEZE foi desenvolvido por Plathner *et al*. (1998) e tem algumas semelhanças com o primeiro. São ambos modelos de primeira ordem, onde toda a higroscopicidade interior é representada, de forma simplificada, por um conjunto de parâmetros que permitem calcular fluxos de humidade entre o ar e o "tampão higroscópico".

No caso específico do modelo de Plathner *et al*. (1998), são usadas duas parcelas, referentes a trocas higroscópicas, uma correspondendo a materiais de adsorção rápida, como os tecidos, e outra representando os materiais de adsorção lenta, como os componentes dos elementos construtivos. Os coeficientes necessários à implementação do modelo foram obtidos a partir de medidas *in situ*, combinadas com processos de ajuste da modelação numérica.

A simulação do efeito higroscópico permitiu, aos modelos numéricos, produzir resultados bastante próximos dos valores obtidos experimentalmente, realçando mais uma vez a necessidade de ter em conta esse efeito na modelação higrotérmica do comportamento de edifícios.

A Figura 14 apresenta alguns resultados obtidos nesse trabalho, mostrando a comparação entre medidas na casa de testes e simulações. À esquerda estão os resul-

tados obtidos com o programa BREEZE e à direita com CLIM2000. Em baixo os cálculos incluem o efeito da higroscopicidade e em cima não incluem esse efeito.

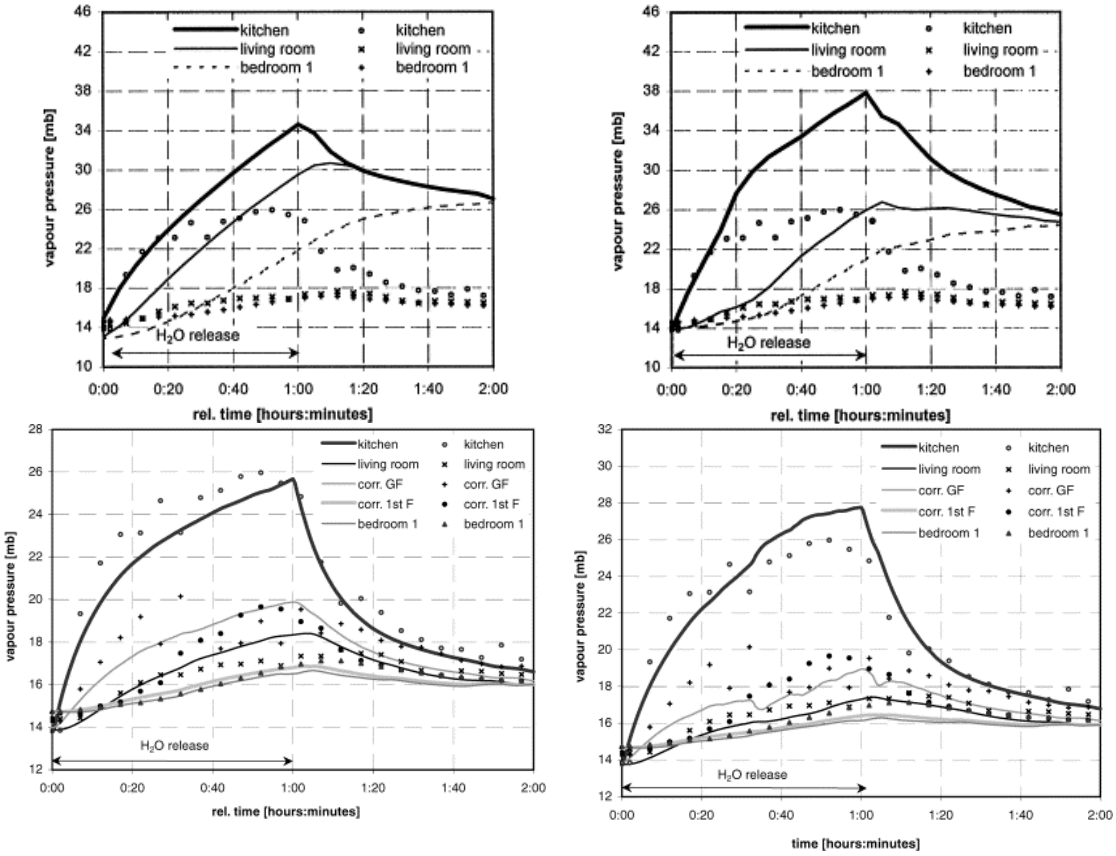


Figura 14 – Gráficos retirados de Plathner e Woloszyn (2002)

2.5.5 Padfield

O trabalho apresentado por Padfield (1998 e 1999) procurou defender o papel dos materiais porosos como moderadores da variação da humidade relativa no interior dos edifícios. Englobou a realização de trabalho experimental, modelação numérica e análise do comportamento higrotérmico real de alguns museus e igrejas.

A construção de uma câmara com controlo de fluxo de vapor, de pequenas dimensões, foi um dos contributos interessantes deste trabalho. Essa câmara, supostamente estanque ao ar, dispunha de um sistema bastante complexo de geração/extracção de vapor que permitiu testar a amplitude de variação da humidade relativa em função dos materiais contidos no seu interior. Na prática, a estanquidade não era total e o controlo de fluxo de vapor tinha alguma falta de precisão mas, ainda assim, foi possível realizar ensaios com diferentes materiais e comparar o seu efeito na moderação da variação da humidade relativa.

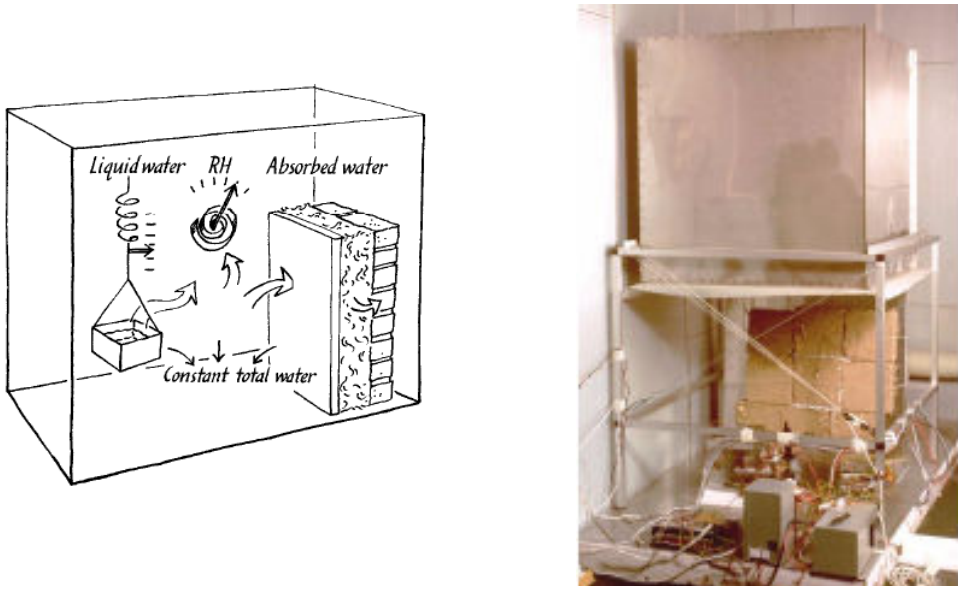


Figura 15 – Imagens retiradas de Padfield (1998) mostrando um esquema da sua câmara de fluxo e a própria câmara, aberta

Em Padfield (1999) é possível encontrar, também, uma proposta de classificação de materiais de construção, quanto à sua capacidade de armazenamento de humidade, para um ciclo predefinido. Esta proposta apoia-se na definição do parâmetro "água disponível", A_w, relativo a um período de tempo determinado, e que seria obtido pelo produto da capacidade higroscópica específica de um material, ξ_w , pela profundidade de penetração, d_p, de acordo com a expressão:

$$A_w = \xi_w \cdot d_p \tag{31}$$

A profundidade de penetração define a camada activa do elemento construtivo, em termos de trocas de humidade com o ar, que neste estudo, em particular, correspondeu à profundidade onde a variação da humidade relativa no material é um terço da variação no compartimento. Para uma variação sinusoidal da humidade relativa interior, d_p pode ser determinada em função do período do ciclo de variação de humidade admitido, t_p, e do coeficiente de difusão de humidade, D_w, relacionado pela expressão (21) com a permeabilidade ao vapor, a capacidade higroscópica específica e a pressão de saturação.

$$d_p = \sqrt{\frac{D_w \cdot t_p}{\pi}} \tag{32}$$

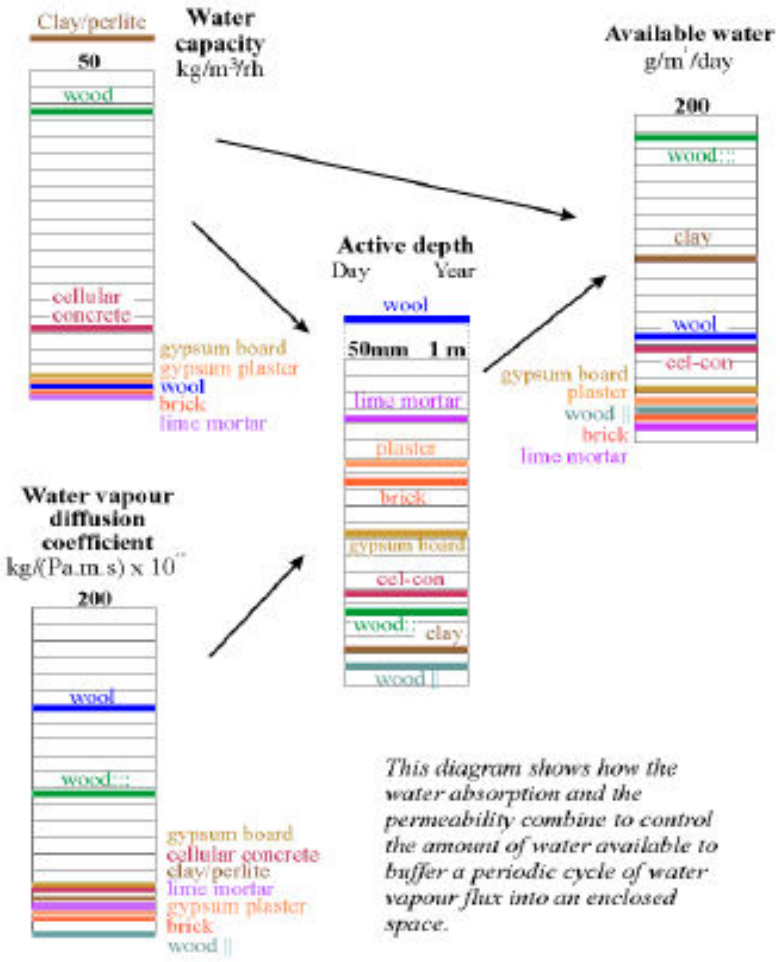


Figura 16 – Imagem retirada de Padfield (1999), com o esquema de determinação do parâmetro "água disponível" (available water)

Podem ser retiradas algumas conclusões, da discussão sobre a importância do armazenamento de humidade pelos materiais porosos, realizada neste trabalho. Foi defendido o interesse da aplicação de materiais de revestimento com elevado A_w diário, para o amortecimento de variações de humidade relativa, em ciclos diários, em edifícios com taxas de renovação de ar abaixo de 1 h^{-1}. Elementos construtivos dispondo de um A_w anual elevado permitiriam o amortecimento de variações sazonais de humidade, para edifícios com ventilação muito reduzida, como é o caso de arquivos ou salas de museus com reduzida permanência de pessoas.

2.5.6 Rode *et al.*

Na sequência da pesquisa de Padfield, foram desenvolvidos na DTU (Technical University of Denmark) outros trabalhos sobre a influência do armazenamento de humidade pelos materiais na moderação da humidade interior.

A DTU dispunha de duas células de teste PASSYS (European Comission, 1994), construídas originalmente para pesquisa na área do comportamento térmico e sistemas solares passivos. Uma dessas células foi adaptada para ensaios à escala real do comportamento hígrico de compartimentos de edifícios (Rode *et al.*, 2002). Essa infra-estrutura permitiu a realização de ensaios, onde o interior da célula é submetido a ciclos de fornecimento e subtracção de vapor, que originam diagramas triangulares sucessivos de variação da humidade relativa interior. A introdução, na célula, de diferentes materiais, permitiu comparar as diferentes contribuições, desses materiais, para o amortecimento dessa variação. Permitiu ainda avaliar o desempenho do programa de simulação higrotérmica de edifícios BSim2000 (Rode e Grau, 2004).

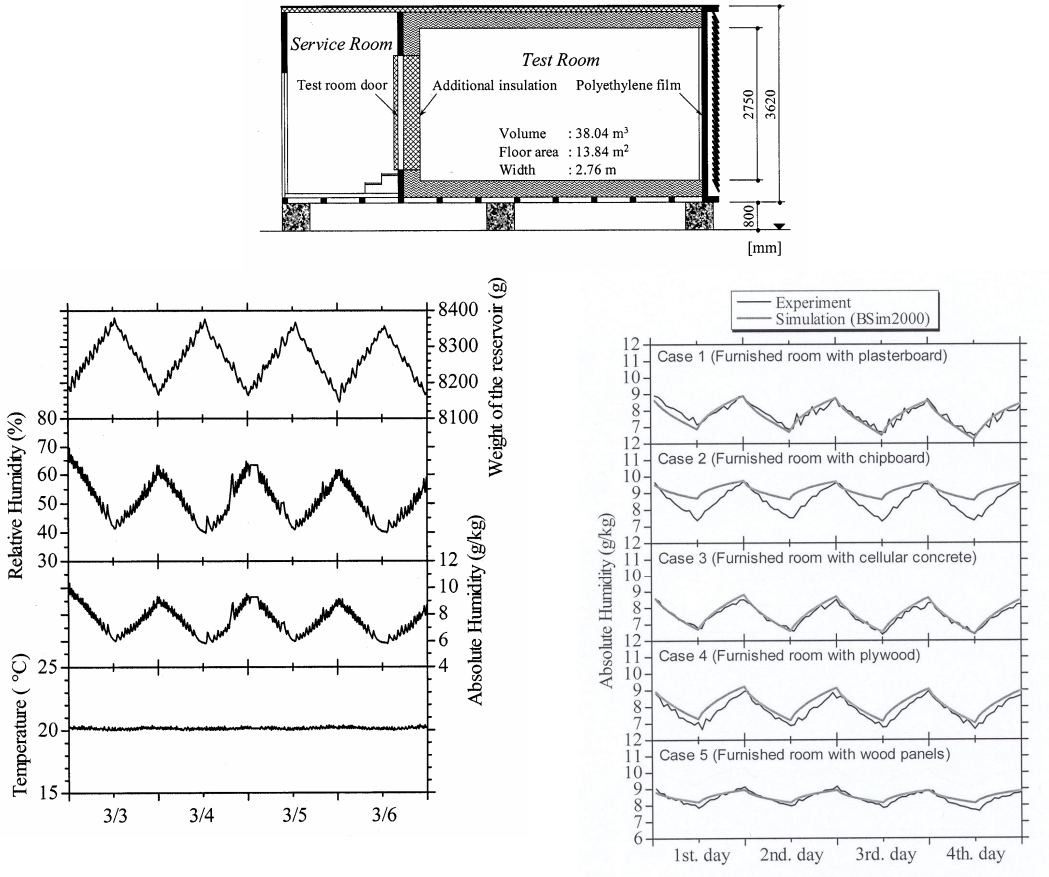


Figura 17 – Imagens retiradas de (Rode *et al.*, 2002), com o esquema da célula de teste e alguns resultados obtidos nos ensaios e simulações realizados

2.5.7 Simonson *et al.*

Um conjunto de trabalhos de investigação, realizados no VTT (Technical Research Centre of Finland), procurou avaliar a influência de elementos construtivos, permeáveis e higroscópicos, nas características do ar interior. As medições realizadas num quarto, localizado numa habitação unifamiliar, e uma análise de sensibilidade baseada em simulações numéricas foram divulgados através de várias publicações (Simonson *et al.* (2004a, 2004b, 2002, 2001) e Simonson, 2000).

No trabalho de campo realizado, o desempenho higrotérmico de um quarto, com os seus elementos construtivos revestidos com pinturas permeáveis, foi comparado com uma situação onde esses elementos foram revestidos por plástico pouco permeável. A comparação mostrou uma redução dos picos de humidade relativa para a situação sem o revestimento plástico.

Foi também realizado um conjunto de simulações numéricas com o programa LATENITE, descrito em Karagiosis *et al.* (1994), com capacidade para o cálculo integrado da transferência simultânea de calor e humidade entre o ar e elementos construtivos. A verificação do programa foi efectuada, numa primeira fase, por comparação dos seus resultados com as medições realizadas no trabalho de campo, descrito acima. Em seguida, o modelo foi aplicado ao cálculo da humidade, conforto e qualidade do ar de um quarto virtual, com um interior revestido a madeira e situado em quatro regiões diferentes (Figura 18).

Esse estudo evidenciou diversas vantagens da inércia higroscópica, incluindo uma redução de picos de humidade relativa interior de até 35 % HR, da percentagem de insatisfeitos com desconforto respiratório de até 10 % e da percentagem de insatisfeitos com a qualidade do ar interior de até 25 %.

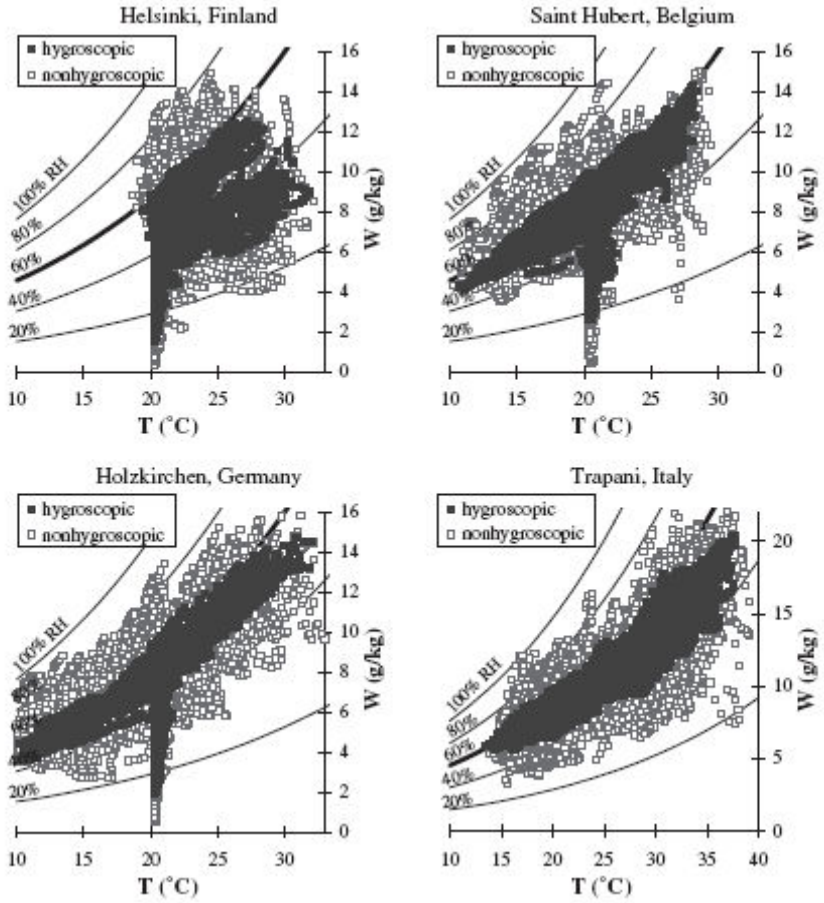


Figura 18 – Imagem retirada de Simonson *et al.* (2004b) com a representação sobre o diagrama psicrométrico dos valores horários de temperatura e humidade interior durante um ano, obtidos por simulação numérica

2.5.8 Svennberg

A influência dos têxteis e mobiliário na capacidade de armazenamento de humidade, e na subsequente moderação das variações de humidade relativa interior, foi estudada por Svennberg (2006). Foi desenvolvido um modelo matemático que permite incluir o cálculo da transferência de humidade nesses elementos em modelos higrotérmicos mais abrangentes. A avaliação de curvas higroscópicas e permeabilidade ao vapor de têxteis também foi realizada. Os resultados de vários ensaios de campo, incluindo medições na célula de teste da DTU, já referida em 2.5.6, permitiram avaliar essa capacidade de armazenamento e a validade do modelo numérico.

A modelação numérica do comportamento higrotérmico de têxteis evidenciou algumas dificuldades. A determinação das propriedades, necessárias à modelação, de acordo com métodos normalmente utilizados noutros materiais, contém um elevado

grau de incerteza, quando aplicada a elementos finos e permeáveis. A modelação de um elemento formado por várias camadas de têxteis, com camadas de ar de espessura variável entre camadas sólidas, como é o caso de uma cama, não foi totalmente satisfatória neste trabalho. A consideração da histerese das curvas higroscópicas foi também referida como um factor importante para o sucesso do processo de modelação. A contribuição dos têxteis e mobiliário para a redução dos picos de humidade relativa interior foi avaliada em ensaios, reproduzindo-se na Figura 19 alguns resultados obtidos.

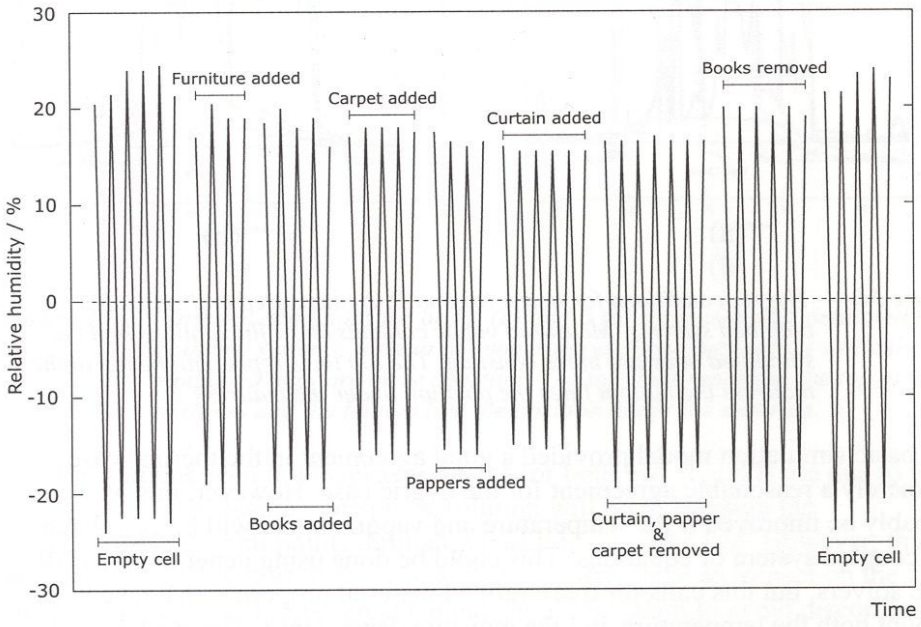


Figura 19 – Imagem retirada de Svennberg (2006), com os resultados obtidos para a variação da humidade relativa interior numa célula de teste

2.5.9 IEA ECBCS Annex 41

O projecto de investigação "Annex 41: Whole Building Heat, Air and Moisture Response (MOIST-ENG)" (http://www.kuleuven.ac.be/bwf/projects/annex41/index.htm) encontrava-se ainda em curso à data da elaboração desta Tese. À semelhança do já citado Annex 14, foi patrocinado pela Agência Internacional de Energia no âmbito do programa "Energy Conservation in Buildings and Community Systems". Este projecto pretendeu desenvolver um melhor conhecimento sobre os balanços de calor, ar e humidade ao nível da análise global de um edifício. Esse conhecimento deveria, entre outros objectivos, possibilitar uma melhor compreensão dos processos de

armazenamento de humidade em elementos interiores e analisar o seu impacto no conforto, durabilidade e consumo de energia dos edifícios. O autor e o orientador desta Tese participaram neste projecto internacional como representantes oficiais portugueses.

Este projecto desenvolveu-se em várias vertentes, englobando trabalhos de natureza muito diversa. Destacam-se, em seguida, apenas aqueles que se relacionam com o armazenamento de humidade em elementos interiores e a avaliação do efeito da inércia higroscópica.

Um conjunto de exercícios comuns, de simulação numérica, pretendeu suportar a comparação de vários programas de cálculo, que têm capacidade para modelar a transferência conjunta de calor, ar e humidade em edifícios. A comparação dos resultados obtidos com os programas HAMTools, BSim2000, Wufi+, Xam, PowerDomus, IDA ICE, TRNSYS, HAMLab permitiu detectar grandes disparidades de resultados em simulações do comportamento higrotérmico global, sobretudo para casos de complexidade crescente, envolvendo, por exemplo, a modelação de ganhos solares (Rode e Peuhkuri, 2005).

Os trabalhos de modelação numérica realizados tiveram ainda outras componentes. O impacto da inércia higroscópica, no clima interior, foi discutido por Hens (2005), através de modelos simplificados. Essa discussão permitiu evidenciar que a inércia higroscópica tem um efeito de curto prazo, de amortecimento das variações diárias da pressão de vapor interior. Tem também um efeito de longo prazo, traduzido por uma histerese da evolução do excesso de pressão de vapor médio mensal. Ou seja, este valor deveria ser constante para um mesmo valor da temperatura exterior, para as condições de um determinado edifício. Mas a inércia higroscópica faz com que nos meses de Outono e de Primavera, que têm temperaturas médias exteriores semelhantes, o excesso de pressão de vapor médio mensal seja diferente, dependendo se os elementos interiores estão em fase de adsorção ou desadsorção da humidade a longo prazo.

Numa abordagem oposta à anterior, o cálculo da transferência simultânea de calor, ar e humidade num compartimento foi realizado por alguns investigadores com um programa de CFD (Computational Fluid Dynamics) designado por Fluent (http://www.fluent.com). Este tipo de ferramenta de cálculo permite avaliar, com bastante detalhe, as características do ar de um compartimento e, recentemente, tem

havido várias tentativas para incluir a influência dos materiais porosos nessa análise (Steeman *et al.*, 2005 e 2006). O elevado tempo de cálculo, requerido por este tipo de modelação, obriga a análises limitadas, mas que podem fornecer informação para os modelos que admitem o ar de uma zona como sendo homogéneo e, por isso, assumem uma mistura perfeita dessa massa de ar. Ainda não existem conclusões definitivas para este tipo de abordagem. A análise de alguns casos evidenciou uma variabilidade de 10% para a humidade relativa média de um compartimento, avaliada por métodos comuns, face aos resultados com utilização de CFD.

A criação de modelos de transferência de calor e humidade adaptados a livros foi também apresentada (Hannelore, 2006).

A realização de vários tipos de ensaios laboratoriais e *in situ* forneceu resultados, simultaneamente, para a avaliação do desempenho de revestimentos interiores e para a validação de modelos numéricos. Os exercícios de comparação de resultados experimentais e numéricos evidenciaram, em geral, que existem vários modelos com capacidade para prever correctamente a variação da humidade relativa interior e a humidade armazenada por revestimentos interiores, mas são altamente sensíveis às propriedades dos materiais utilizadas.

Nas figuras seguintes apresentam-se algumas das infra-estruturas experimentais utilizadas por participantes deste projecto. O equipamento da Figura 20 permite avaliar a transferência de calor e humidade, através de um elemento sólido, e a dependência dos coeficientes de transporte à superfície, em relação à velocidade do ar. A câmara da Figura 21 foi construída para avaliar a relação entre o armazenamento de humidade dos elementos interiores e a variação da humidade relativa interior. A infra-estrutura da Figura 22 permite uma análise aprofundada de diversas facetas do comportamento higrotérmico de um edifício. Por fim, os dois compartimentos da Figura 23 têm sido usados para a comparação do efeito de moderação da variação da humidade interior, de várias soluções de revestimento submetidas a um clima real. Todos os ensaios estavam em curso ao tempo de redacção deste texto. É, contudo, possível ter uma ideia das diferentes aproximações existentes a ensaios que pretendem produzir resultados comparáveis.

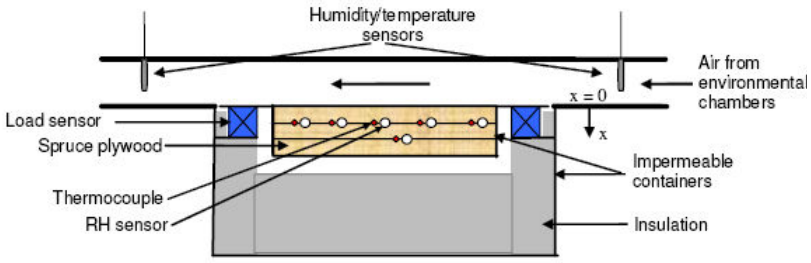


Figura 20 – Esquema retirado de Talukdar *et al.* (2004) representando a infra-estrutura para ensaio da transferência de humidade, em regime variável, entre materiais porosos e o ar de um túnel de vento

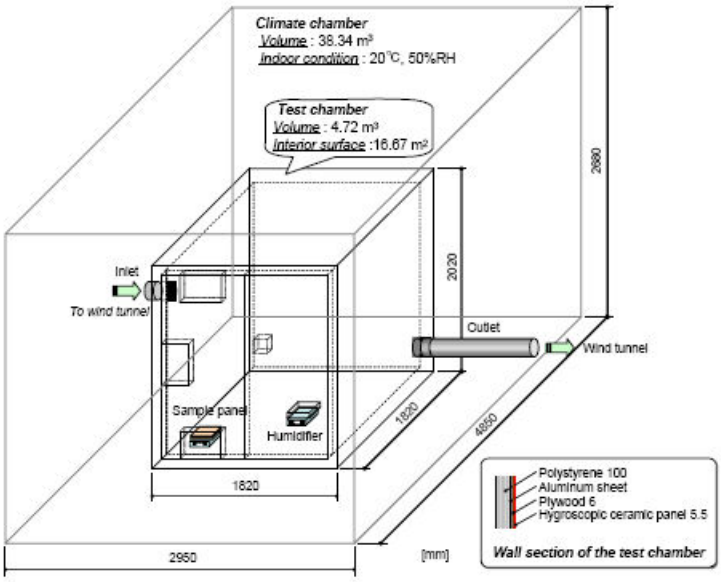


Figura 21 – Esquema retirado de Yoshino *et al.* (2005), representando a câmara de ensaio a escala reduzida de um compartimento

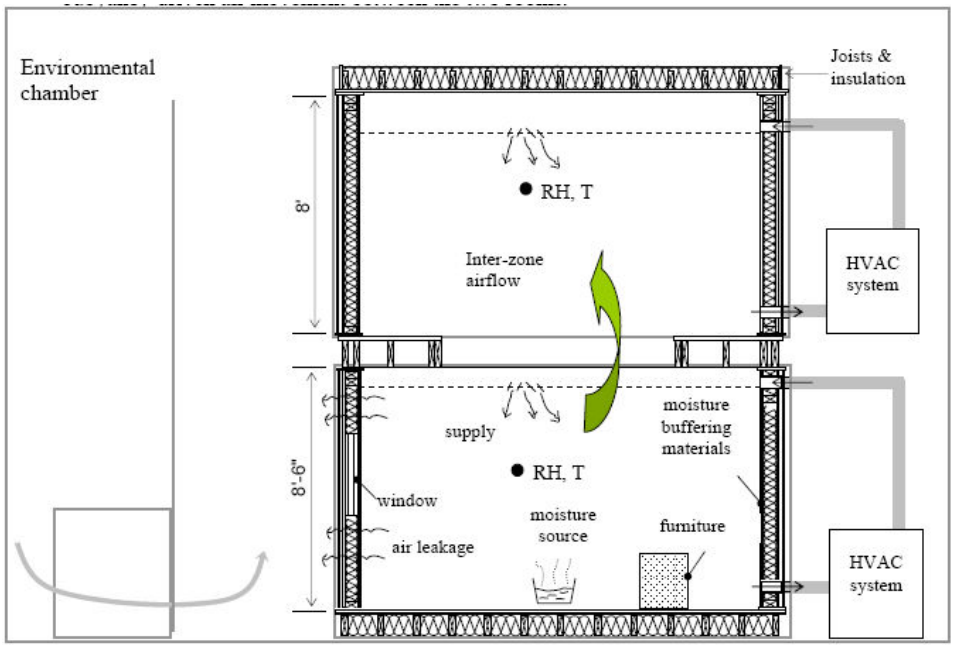


Figura 22 – Esquema retirado de Fazio *et al.* (2004), representando a câmara de ensaio que reproduz, à escala real, um edifício de dois pisos

Figura 23 – Imagens de compartimentos de teste retiradas de Kunzel *et al.* (2004)

2.6 Síntese Crítica do Capítulo 2

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

O conjunto de princípios teóricos apresentados, sobre a humidade e os materiais porosos, permitiu verificar que a descrição da transferência de calor, ar e humidade em elementos construtivos e entre estes e o ar pode ser efectuada com recurso a modelos coerentes. Existem, no entanto, mecanismos que são tratados de forma simplificada pela Física das Construções, por força da complexidade dos próprios meca-

nismos, ou pela dificuldade associada à determinação laboratorial dos coeficientes de transporte necessários aos modelos teóricos.

A humidade é importante para os utilizadores dos edifícios porque afecta o conforto térmico, a percepção da qualidade do ar, a saúde dos ocupantes, a durabilidade dos materiais de construção e o consumo de energia. O estabelecimento de limites ideais para a humidade relativa reveste-se de alguma complexidade, especialmente em compartimentos onde predomine um regime higrotérmico variável.

A consideração de alguns factores, como a produção de vapor, a ventilação e a pressão de vapor exterior, permite avaliar, através de modelos simplificados, o valor da humidade interior para certo tipo de análises do comportamento higrotérmico dos edifícios. A acção dos utilizadores, as características dos sistemas de ventilação e aquecimento e a variabilidade do clima exterior produzem condições fronteira de grande complexidade, para a determinação da humidade relativa interior, e uma análise mais detalhada da sua variação implica modelos avançados de análise. A utilização desse tipo de modelos deve incluir a influência dos materiais porosos, para poder aproximar-se à realidade observada nos edifícios.

Os modelos de simulação têm evoluído rapidamente, impulsionados pelo desenvolvimento dos meios computacionais disponíveis. Pretende-se já sistematizar a análise global da transferência conjunta de calor, ar e humidade num edifício. É necessária, porém, a consideração de várias simplificações, referindo-se como exemplo os limites da capacidade dos computadores no caso do CFD, ou a limitação dos modelos teóricos face a processos como a histerese das curvas higroscópicas dos materiais.

A influência dos elementos construtivos e do mobiliário na variação da humidade relativa interior tem sido estudada por diversos investigadores. Vários estudos demonstraram que a inércia higroscópica, associada à capacidade de armazenamento de humidade em regime variável desses elementos, pode ter um efeito no ciclo diário e no ciclo anual de variação da humidade interior. Esse efeito não substitui o correcto dimensionamento e implementação de sistemas de ventilação e aquecimento, mas a redução de picos de humidade em regimes variáveis pode ser útil em vários cenários.

Os diversos estudos sobre inércia higroscópica abordaram vários dos seus aspectos mas algumas questões devem ser mais aprofundadas. O tratamento da higroscopicidade de um compartimento através de métodos simplificados, ditos de primeira ordem, onde a transferência de humidade nos materiais porosos não é calculada deta-

lhadamente, é útil para uma primeira abordagem ao problema. Não se pode dispensar, no entanto, uma análise profunda dos processos de transferência de humidade se se pretender avaliar, por exemplo, o efeito que um determinado esquema de pintura tem na inércia higroscópica de um compartimento.

A discussão sobre inércia higroscópica padece, frequentemente, de incorrecções impostas pelas limitações dos meios de análise. A necessidade de simplificações, como a adopção de propriedades constantes para os materiais, espessuras de penetração predefinidas ou suposição de elementos semi-infinitos e inexistência de revestimentos, pode reduzir a generalização das conclusões obtidas em trabalhos anteriores. O erro associado à consideração de mistura perfeita de uma massa de ar, admitido pela generalidade dos modelos não associados ao cálculo de CFD, deve também ser avaliado.

O carácter regional de alguns estudos deve também ser tido em conta. Grande parte dos estudos sobre inércia higroscópica foi desenvolvida no Norte da Europa e no Canadá pelo que a transposição de algumas conclusões, para os edifícios portugueses, deve ser no mínimo cuidadosa. O tipo de construção apresenta várias diferenças, o aquecimento contínuo durante a estação de aquecimento não é a norma em Portugal e o clima temperado e húmido português pode representar um maior desafio do que os climas frios e secos de maiores latitudes.

O conceito de inércia higroscópica necessita, ainda, de uma abordagem que permita a sua divulgação e utilização na concepção de edifícios, para que possa influenciar os processos de construção utilizados usualmente.

Capítulo 3
Modelação Higrotérmica de Edifícios

3.1 Introdução

A avaliação da influência da inércia higroscópica, no comportamento higrotérmico dos edifícios, implica o recurso a um modelo numérico de simulação, que inclua os principais parâmetros que condicionam a variação da humidade relativa interior.

O desenvolvimento integral de um modelo holístico de transferência de calor, ar e humidade de um edifício seria incomportável no âmbito deste trabalho, dada a complexidade dos vários processos envolvidos e do seu efeito combinado. O programa HAM-Tools (Kalagasidis, 2004) foi, por isso, escolhido para o trabalho de modelação numérica. A adequação ao tipo de análise pretendida, a fiabilidade, a possibilidade de acesso ao código fonte e a modularidade foram algumas das razões que motivaram essa selecção.

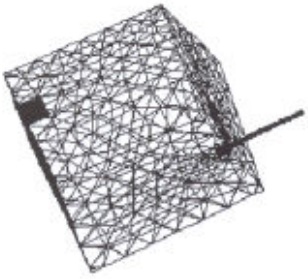
Apresenta-se, neste capítulo, uma revisão dos princípios físicos teóricos referentes à transferência de calor, ar e humidade em edifícios, adoptados no programa HAM-Tools. Optou-se por desenvolver, em detalhe, apenas os aspectos relevantes para o trabalho de simulação realizado, que se apresenta no Capítulo 6. Os limites da aplicabilidade do modelo e a comparação com opções de modelação de outros modelos existentes são também abordados.

A descrição de alguns aspectos da aplicação do programa HAM-Tools, que se apresenta também neste capítulo, pretende clarificar o processo de construção do modelo e a sua resolução numérica, proporcionados pelo ambiente Simulink. A caracterização dos dados climáticos, da estrutura das propriedades dos materiais e das condições fronteira adoptadas completa essa descrição.

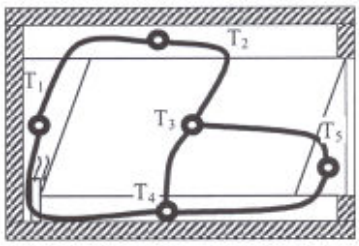
3.2 Modelo Teórico de Transferência de Calor, Ar e Humidade em Edifícios

3.2.1 Discretização espacial do edifício

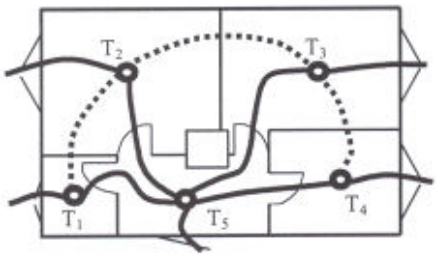
A complexidade geométrica, de um edifício comum, é o primeiro obstáculo que um modelo numérico de transferência de calor, ar e humidade encontra. Essa dificuldade é, normalmente, ultrapassada com recurso a uma das quatro estratégias esquematizadas na Figura 24.



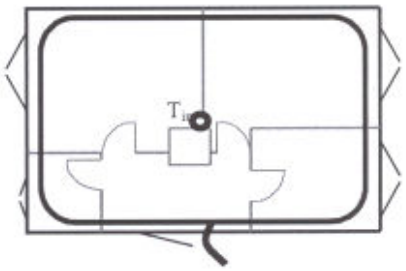
A – Modelo CFD



B – Modelo Zonal



C – Modelo Multizona



D – Modelo Monozona

Figura 24 – Níveis de discretização espacial de um edifício (Woloszyn, 1999)

Computational Fluid Dynamics (CFD) é o termo utilizado para a solução numérica, com métodos computacionais, das equações que descrevem o movimento dos fluidos. Os modelos de CFD permitem seguir, ao longo do tempo, a evolução do movimento do ar, da temperatura e da humidade no interior de um volume, com grande detalhe. Dada a complexidade desses modelos, e a consequente exigência em termos de meios informáticos e de tempo associados às simulações, são apenas usados no estudo de compartimentos. Mesmo em aplicações limitadas, os modelos de CFD são

extremamente exigentes na descrição do problema a analisar (posição exacta das aberturas, formato dos dispositivos de ventilação, etc.).

No extremo oposto, em nível de complexidade, surgem os Modelos Monozona, onde se admitem características uniformes para todo o interior de um edifício. São modelos simples que necessitam, apenas, de dados relativos à envolvente, ao sistema de ventilação e à inércia. Actualmente, são essencialmente utilizados para estimar consumos energéticos. O seu nível de precisão não é elevado e não permitem uma avaliação das características dos diferentes compartimentos, que constituem o edifício, de forma isolada.

Entre os dois extremos de discretização espacial do edifício pode, obviamente, optar-se por modelos de complexidade intermédia. A aproximação clássica, correspondente aos Modelos Multizona, consiste em fazer coincidir cada zona considerada uniforme com cada compartimento do edifício. Esta modelação permite ter em conta as diferentes condições de cada compartimento e os movimentos de ar dentro do edifício. Como se baseia na hipótese de que o ar tem características uniformes no interior de cada zona, as suas limitações surgem em compartimentos onde se verificam fortes heterogeneidades do ar.

Os Modelos Zonais permitem modelar zonas onde se identifiquem estratos da massa de ar com características térmicas muito diferentes dos estratos vizinhos. No caso de configurações geométricas complexas, no entanto, apresentam bastantes limitações se comparados com os modelos de CFD.

Da análise dos vários níveis de discretização espacial de um edifício, os Modelos Multizona surgem como um bom compromisso entre a complexidade da modelação e a precisão dos resultados. Estes modelos adaptam-se bem a edifícios de habitação e comércio, onde os compartimentos não têm dimensões elevadas e o ar interior é bastante uniforme (Woloszyn, 1999). O programa HAM-Tools está vocacionado para a modelação Multizona de edifícios.

3.2.2 Balanço energético de um compartimento

O balanço energético de um compartimento, realizado pelo programa HAM-Tools, baseia-se no modelo de comportamento higrotérmico de edifícios designado por WAVO (Wit, 2004). Num compartimento, coincidente com uma zona caracterizada

por uma temperatura uniforme, podem identificar-se várias contribuições para o seu balanço energético, que se identificam em seguida.

O somatório dos fluxos de calor, por convecção, das *n* superfícies opacas de um compartimento para o ar, $Q_{construções}$, é definido a partir do coeficiente de transferência de calor por convecção de cada superfície, $h_{c,i}$, da área de cada superfície, A_i, e da diferença de temperatura entre cada superfície e o ar do compartimento, $T_{spf} - T_{ar,int}$, de acordo com a expressão:

$$Q_{construções} = \sum_{i=1}^{n} h_{c,i} \cdot A_i \cdot \left(T_{spf,i} - T_{ar,\text{int}}\right) \tag{33}$$

O efeito das trocas de ar com o exterior e os *n* compartimentos contíguos é traduzido por um fluxo de calor equivalente, Q_{vent}, definido a partir da soma dos produtos da massa volúmica do ar, ρ_{ar}, do calor específico do ar, $c_{p,ar}$, do volume do compartimento, V, do número de renovações horárias, N, e da diferença de temperatura entre locais de troca de fluxo de ar.

$$Q_{vent} = \rho_{ar} \cdot c_{p,ar} \cdot V \cdot \left[\frac{N_{ext}}{3600} \cdot \left(T_{ar,ext} - T_{ar,\text{int}}\right) + \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i}{3600} \cdot \left(T_{ar,i} - T_{ar,\text{int}}\right) \right] \tag{34}$$

Os ganhos de calor, na zona em análise, podem ter origem na radiação solar, nos sistemas de aquecimento ou em situações casuais como o funcionamento de electrodomésticos e a actividade humana. Seja qual for a sua origem podem ser sempre separados numa componente transmitida por convecção e outra por radiação.

Os ganhos solares, Q_{solar}, originados pela radiação solar, que penetra no compartimento através dos seus *n* envidraçados, definem-se como uma soma da contribuição de cada envidraçado, de que se conhece a transmissividade, τ, a área, A, e a energia proveniente de radiação directa e difusa, I_{dir} e I_{diff}.

$$Q_{solar} = \sum_{i=1}^{n} \tau_i \cdot \left(I_{dir} + I_{diff}\right)_i \cdot A_i \tag{35}$$

E os ganhos de calor devidos ao sistema de aquecimento ou a situações casuais serão:

$$Q_{ganhos} = \sum_{i=1}^{n} \left(Q_{ganhos,conv} + Q_{ganhos,rad}\right)_i \tag{36}$$

A parte dos ganhos de calor transmitida ao ar por convecção, Φ_c, pode escrever-se através da expressão seguinte, onde CF_{sol} representa a fracção convectiva dos ganhos de calor:

$$\Phi_c = CF_{sol} \cdot Q_{solar} + \sum_{i=1}^{n} Q_{ganhos,conv,i} \tag{37}$$

E a parte dos ganhos de calor transmitida por radiação, Φ_r, será:

$$\Phi_r = \left(1 - CF_{sol}\right) \cdot Q_{solar} + \sum_{i=1}^{n} Q_{ganhos,rad,i} \tag{38}$$

Identificadas as várias componentes do balanço energético de um compartimento, pode escrever-se a equação diferencial que o rege, da seguinte forma, onde se considera $C_{H,ad}$ o calor específico volumétrico adicional do ar, correspondente, por exemplo, ao efeito do mobiliário:

$$\left(\rho_{ar} \cdot c_{p,ar} \cdot V + C_{H,ad}\right) \cdot \frac{dT_{ar,\text{int}}}{dt} = Q_{construções} + Q_{vent} + \Phi_c \tag{39}$$

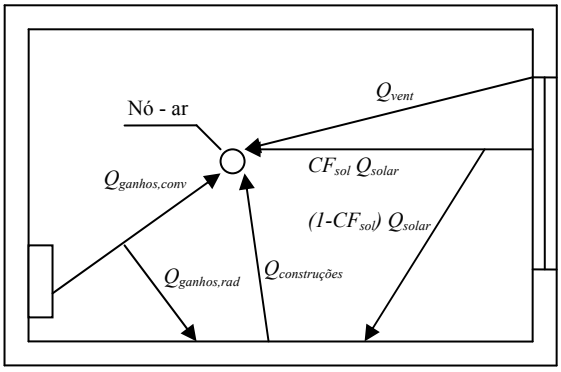


Figura 25 – Representação esquemática do princípio do balanço energético de um compartimento

3.2.3 Balanço de humidade de um compartimento

À semelhança do raciocínio desenvolvido para o balanço energético, é possível definir, matematicamente, as várias componentes do balanço de humidade de um compartimento.

A troca de humidade com os *n* elementos construtivos de um compartimento pode ser associada a um fluxo, $M_{construções}$, definido pela expressão seguinte, em função da

diferença de pressão de vapor entre o ar e a superfície do elemento construtivo, $p_{v,ar,int}$ e $p_{v,spf}$, a área do elemento, A, e a resistência ao vapor à superfície, R_p.

$$M_{construções} = \sum_{i=1}^{n} \frac{(p_{v,ar,\text{int}} - p_{v,spf,i}) \cdot A_i}{R_{p,i}} \tag{40}$$

A contribuição das trocas de ar com o exterior e os n compartimentos contíguos, M_{vent}, pode ser calculada de forma similar às trocas de calor por ventilação, substituindo as diferenças de temperatura entre locais de troca de fluxo de ar por diferenças de pressão de vapor.

$$M_{vent} = 6{,}21\times10^{-6} \cdot \rho_{ar} \cdot V \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{N_{ext}}{3600} \cdot \left(p_{v,ar,ext} - p_{v,ar,\text{int}}\right) \\ + \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i}{3600} \cdot \left(p_{v,ar,i} - p_{v,ar,\text{int}}\right) \end{array} \right] \tag{41}$$

As fontes internas de humidade de um compartimento são, normalmente, definidas como valores constantes, ou obedecendo a uma função do tempo, assimiladas a fluxos que podem ser agrupados na variável M_{ganhos}.

A equação de balanço de humidade de um compartimento pode ser escrita a partir do conhecimento dos componentes do balanço da seguinte forma:

$$6{,}21\times10^{-6} \cdot \rho_{ar} \cdot V \cdot \frac{dp_{v,ar,\text{int}}}{dt} = M_{construções} + M_{vent} + M_{ganhos} \tag{42}$$

3.2.4 Transferência unidireccional de ar e calor em elementos construtivos

A aplicação das expressões definidoras dos balanços energético e de humidade, do compartimento, requerem o conhecimento da temperatura superficial, T_{spf}, e pressão de vapor superficial, $p_{v,spf}$, dos elementos construtivos desse compartimento. A obtenção desses valores obriga à análise dos mecanismos de transferência conjunta de calor, ar e humidade em elementos construtivos.

O programa HAM-Tools segue o modelo definido em Hagentoft (2002 e 2001) para a transferência unidireccional de calor, ar e humidade. A pré norma prEN 15026 (CEN, 2004) segue também o essencial deste modelo, que apresenta as seguintes simplificações:

— A temperatura admitida varia entre -30ºC e +80ºC;

— Os efeitos associados a mudanças de fase líquido-sólido são ignorados;
— A histerese não é considerada;
— Os efeitos da gravidade não são considerados;
— As reacções químicas não são consideradas;
— O envelhecimento e as variações dimensionais não são tidos em conta.

A transferência de ar através de elementos construtivos tem pouca relevância para esta Tese. Fazem-se, por isso, apenas breves referências a este tipo de transferência. De acordo com este modelo, a densidade de fluxo de ar através de um elemento construtivo, g_{ar}, de largura L, pode ser definida a partir da lei de Darcy, através da seguinte expressão, conhecida a permeabilidade do ar, k, a viscosidade dinâmica do ar, ν, e a diferença de pressão entre o interior e o exterior.

$$g_{ar} = \rho_{ar} \cdot \frac{k}{\nu} \cdot \frac{p_{ar,\text{int}} - p_{ar,ext}}{L} \tag{43}$$

A densidade de fluxo de calor, q, através de um elemento construtivo, de acordo com o modelo seguido, pode ser dividida numa componente de condução, q_{cond}, e outra de convecção, q_{conv}.

$$q = q_{cond} + q_{conv} \tag{44}$$

A componente de condução é proporcional ao gradiente de temperatura e pode obter-se por aplicação da lei de Fourier, conhecida a condutibilidade térmica, λ, que varia com a temperatura e o teor de humidade.

$$q_{cond} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \tag{45}$$

A componente de convecção é modelada como a soma do fluxo de entalpia sensível específica, associada ao fluxo de ar, e o fluxo de entalpia latente específica, associada ao fluxo de vapor, também designado por calor latente:

$$q_{conv} = g_{ar} \cdot c_{p,ar} \cdot T + g_v \cdot H \tag{46}$$

Os fluxos de entalpia associados a fluxos de água em fase líquida são desprezados neste modelo.A equação de balanço energético será:

$$-\frac{\partial q}{\partial x} = c_p \cdot \rho_s \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \tag{47}$$

3.2.5 Transferência unidireccional de humidade em elementos construtivos

A modelação dos mecanismos de transferência de humidade em elementos construtivos obriga, normalmente, à adopção de simplificações de maior ou menor grau, dependendo do detalhe com que se pretende abordar o problema.

Actualmente, e de acordo com os princípios já citados em 2.2, tem sido clara a opção por uma modelação onde se admite a separação, fictícia, do fluxo total de humidade, g, numa componente resultante da difusão de vapor, g_v, e outra com origem no transporte em fase líquida, g_l.

$$g = g_v + g_l \tag{48}$$

A pressão parcial de vapor, p_v, é utilizada como variável de estado para o transporte de vapor e a pressão de sucção, s, para o transporte da fase líquida.

A densidade de fluxo da fase líquida é proporcional ao gradiente da pressão de sucção, sendo a condutibilidade hidráulica, $\lambda_{m,l}$, o coeficiente de proporcionalidade.

$$g_l = \lambda_{m,l} \cdot \frac{\partial s}{\partial x} \tag{49}$$

A densidade de fluxo de vapor é constituída por uma componente de difusão e uma de convecção:

$$g_v = -\delta'_p \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} + g_{ar} \cdot x_{ar} \tag{50}$$

A componente de difusão é proporcional ao gradiente de pressão parcial de vapor, difusão de Fick, com a permeabilidade ao vapor δ'_p como coeficiente de proporcionalidade. A componente de convecção só existe se for tido em conta o fluxo de ar através do elemento construtivo.

A equação de balanço de humidade será:

$$-\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial t} \tag{51}$$

O conjunto de equações apresentado exprime um caminho possível, para modelar o transporte de humidade em meios porosos. É conveniente recordar, no entanto, algumas considerações que espelham a diversidade de estratégias, que podem ser utilizadas neste tipo de problemas, e que foram já enumeradas por Hens (2006).

A primeira consideração importante diz respeito aos potenciais utilizados na modelação do transporte conjunto de calor, ar e humidade. Em geral, os modelos de simulação higrotérmica de elementos construtivos usam a temperatura como motor para as trocas de calor. Os fluxos de entalpia associados à transferência de ar e humidade, porém, implicam que os potenciais associados a esses fluxos também tenham de ser tidos em conta. No caso do ar, a pressão é o potencial essencial, mas as diferenças de temperatura e de concentração de vapor são também responsáveis por fluxos de ar.

A transferência de humidade é o mecanismo que apresenta menos unanimidade para os potenciais a adoptar na modelação. O modelo clássico de Philip e De Vries (1957), por exemplo, usa a temperatura e o teor de humidade. Outros autores optaram por diferentes potenciais: pressão de vapor ou pressão de vapor associada a teor de humidade (Salonvaara, 1993); pressão de sucção e pressão de vapor (Van der Laan, 1992); temperatura e humidade relativa (Kunzel, 1993 e 1994); temperatura e potencial químico (Matsumoto, 1994). Ainda de acordo com as conclusões da investigação realizada no âmbito do projecto "Hamtie" (Hens, 1996), foi possível definir algum consenso em torno dos seguintes pontos:

— Só verdadeiros potenciais devem ser utilizados. O teor de humidade, por exemplo, não é um verdadeiro potencial. O seu valor é descontínuo nas interfaces dos materiais que compõem um elemento construtivo.
— Deve evitar-se a utilização de potenciais que resultam de transformadas do verdadeiro potencial, como é o caso do logaritmo da pressão de sucção que é utilizado para reduzir a magnitude de variação dessa pressão.
— Do ponto de vista da modelação, a separação entre o fluxo de vapor e o fluxo líquido é benéfica. Esta separação, embora não seja real, facilita a implementação numérica dos problemas. Um exemplo prático é o facto de a transferência de calor latente ser gerada essencialmente pelo fluxo de vapor.

Esta breve referência à evolução recente da modelação higrotérmica permite compreender a formulação adoptada para a transferência de humidade em elementos construtivos aqui apresentada. Verifica-se justamente a separação de fluxo líquido e de vapor e a utilização de verdadeiros potenciais, como a pressão de vapor e a pressão de sucção.

3.2.6 Transferência unidireccional de calor, ar e humidade em superfícies de elementos construtivos expostas ao ambiente exterior

A superfície exterior dos elementos construtivos está exposta à troca de calor e humidade por convecção com o ar exterior, à radiação solar incidente, à radiação de grande comprimento de onda, à transferência de calor latente, ao ar e à chuva. No programa HAM-Tools, os fluxos que traduzem essas solicitações definem-se com a formulação apresentada em seguida.

A densidade de fluxo de calor para a superfície exterior de um elemento construtivo, q_{ext}, proveniente da ambiência que o envolve será:

$$q_{ext} = h_c \cdot \left(T_{ar,ext} - T_{spf}\right) + q_{rad,ext} + \left(g_{ar}.c_{p,ar} + g_{chuva}.c_{p,l}\right) \cdot T_{ar,ext} + g_v \cdot H \qquad (52)$$

Os dois primeiros termos representam as trocas por convecção e radiação com o ar. O terceiro e quarto termos referem-se aos fluxos de entalpia do ar e da água da chuva. O fluxo de entalpia do vapor de água é representado pelo último termo da equação, onde só a parte latente é tida em conta e a parte sensível é desprezada.

Se o fluxo de ar se der do elemento para o ar, q_{ext} escreve-se:

$$q_{ext} = h_c \cdot \left(T_{ar,ext} - T_{spf}\right) + q_{rad,ext} + g_{ar} \cdot c_{p,ar} \cdot T_{spf} + g_v \cdot H \qquad (53)$$

Admite-se que a água no estado líquido não pode transferir-se de um elemento para o ar.

A energia radiante absorvida pela superfície da parede, $q_{rad,ext}$, tem origem na componente directa e na componente difusa da radiação solar e nas trocas de radiação de grande comprimento de onda com a envolvente.

$$q_{rad,ext} = \alpha_{sol} \cdot \left(I_{dir} + I_{diff}\right) + \varepsilon \cdot \left(I_{lw} - \sigma_s \cdot T_{spf}^4\right) \qquad (54)$$

O modelo preconizado pela prEn 15026 difere ligeiramente deste ao recorrer ao conceito de temperatura equivalente ar-sol para definir os fluxos de calor entre as superfícies exteriores e a ambiência por convecção e radiação, admitindo, no entanto, processos alternativos como o apresentado.

Os fluxos de humidade do ar para uma superfície exterior podem ser divididos numa componente vapor e numa componente líquida. A primeira componente define-se pela expressão seguinte, sendo o fluxo de ar positivo se se dirigir para o interior do edifício:

$$g_v = \beta_p \cdot \left(p_{v,ar,ext} - p_{v,spf}\right) + \begin{cases} g_{ar} \cdot x_{ar,ext}, & g_{ar} > 0 \\ g_{ar} \cdot x_{ar,spf}, & g_{ar} < 0 \end{cases} \tag{55}$$

O coeficiente de transferência de vapor ar-superfície, β_p, pode definir-se em função da permeabilidade ao vapor no ar, δ_a, e da espessura de difusão ao vapor equivalente da superfície, $s_{d,spf}$. Esta espessura equivalente pode incluir a resistência ao vapor adicional induzida por pinturas. A relação destas grandezas será:

$$\beta_p = \frac{\delta_a}{s_{d,spf}} \tag{56}$$

A componente líquida do fluxo de humidade deve-se à sucção de água da chuva, podendo o fluxo associado ser definido como:

$$g_l = \min\left(g_{chuva}, \left(\lambda_{m,l} \cdot \frac{\partial s}{\partial x}\right)_{x=0}\right) \tag{57}$$

3.2.7 Transferência unidireccional de calor, ar e humidade em superfícies de elementos construtivos expostas ao ambiente interior

A transferência de calor do ar interior para a superfície de um elemento construtivo, q_{int}, pode ser modelada como se apresenta em seguida, admitindo que o fluxo de ar se dá para o interior do edifício:

$$q_{\text{int}} = h_c \cdot \left(T_{ar,\text{int}} - T_{spf}\right) + q_{rad,\text{int}} + g_{ar} \cdot c_{p,ar} \cdot T_{ar,\text{int}} + g_v \cdot H \tag{58}$$

No caso de o fluxo de ar ter o sentido contrário, será:

$$q_{\text{int}} = h_c \cdot \left(T_{ar,\text{int}} - T_{spf}\right) + q_{rad,\text{int}} + g_{ar} \cdot c_{p,ar} \cdot T_{spf} + g_v \cdot H \tag{59}$$

Para a definição da densidade de fluxo de energia de radiação absorvida pela superfície da parede, $q_{rad,int}$, admite-se que vai ser adicionado à radiação que entra na zona a que pertence a superfície interior, definida na Eq. (38), o efeito da radiação emitida por cada superfície dessa zona. Como se assume, por simplificação, que essa radiação se distribui igualmente pelas superfícies interiores e cada superfície também emite radiação, o efeito de troca nessa superfície *j* resulta em:

$$h_r \cdot \left(T_{spf,med} - T_j\right) \tag{60}$$

Onde h_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação. Assume-se para este coeficiente o valor constante de 6 W/(m^2·K) em todas as superfícies. O valor procurado de $q_{rad,int}$ de uma superfície *j* será então:

$$q_{rad,\mathrm{int},j} = \frac{\Phi_r}{\sum_{i=1}^{n} A_i} + h_r \cdot \left(T_{spf,med} - T_j\right) \tag{61}$$

No caso particular dos envidraçados, uma parte da radiação solar que lhes é transmitida é emitida para o interior, pelo que o valor $q^e_{rad,\mathrm{int}}$ é definido como:

$$q^e_{rad,\mathrm{int},j} = q_{rad,\mathrm{int},j} - \left(1 - CF_{sol}\right) \cdot \frac{Q_{solar}}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{62}$$

O fluxo de humidade, entre o ar e uma superfície interior, corresponde a um fluxo de vapor que se expressa pela expressão seguinte, sendo o fluxo de ar positivo se se dirigir para fora do edifício:

$$g_v = \beta_p \cdot \left(p_{v,ar,\mathrm{int}} - p_{v,spf}\right) + \begin{cases} g_{ar} \cdot x_{ar,spf}, & g_{ar} > 0 \\ g_{ar} \cdot x_{ar,\mathrm{int}}, & g_{ar} < 0 \end{cases} \tag{63}$$

3.3 Aplicação do Modelo Teórico no Programa HAM-Tools

3.3.1 Características do programa de simulação

O programa HAM-Tools foi desenvolvido em ambiente Simulink (MathWorks, 2006). O Simulink é uma ferramenta de desenvolvimento, simulação e análise de sistemas dinâmicos, com variação no tempo das variáveis de estado, incluída na aplicação informática Matlab (MathWorks, 2006).

A construção de modelos em Simulink pressupõe a definição de um diagrama de blocos que traduz, graficamente, as relações matemáticas entre os dados do sistema, as variáveis de estado e os resultados. O utilizador pode recorrer à biblioteca de blocos do Simulink, que cobre uma vasta gama de funções aritméticas e outros componentes, ou desenvolver os seus próprios blocos e rotinas de cálculo. O Simulink dispõe ainda de um conjunto de rotinas de resolução de equações diferenciais ordinárias

que configura, automaticamente, durante o processo de simulação do modelo para obter, de forma optimizada, a sua resolução. Esta é uma das grandes vantagens deste ambiente, pois o utilizador só tem de desenvolver correctamente o modelo físico, sendo a sua resolução numérica assegurada pelo próprio Simulink.

A programação em Simulink apresenta uma elevada flexibilidade, estrutura modular, transparência dos modelos e facilidade do seu desenvolvimento. Pelas características do ambiente de desenvolvimento, o programa HAM-Tools funciona como uma biblioteca de módulos que podem ser adaptados e associados, para analisar um problema específico do comportamento higrotérmico de um edifício.

Os blocos que compõem o programa HAM-Tools materializam o modelo teórico constituído pelas equações apresentadas nas subsecções anteriores. A resolução numérica dessas expressões é efectuada com base na técnica de volumes de controlo e um esquema explícito de discretização. A divisão do edifício é efectuada segundo um Modelo Multizona (Figura 24), sendo aplicadas as equações de balanço a um nó que representa cada uma das zonas, normalmente identificadas com cada compartimento. Os elementos construtivos que contactam com cada zona são discretizados por um conjunto de volumes de controlo tendo, cada um, associado um nó.

Como exemplo desta metodologia de discretização de equações diferenciais, apresenta-se a sua aplicação à equação de balanço de humidade (51) para um nó interior. O nó em causa é designado pelo índice *i* e os nós anterior e seguinte pelos índices *i-1* e *i+1*, respectivamente. Os índices *n* e *n+1* representam dois tempos de cálculo consecutivos. As resistências à difusão de vapor, R_p, e à difusão de água líquida, R_s, entre o nó e a superfície do volume (correspondentes a metade da espessura total *d*) são definidas por:

$$R_p = \frac{d/2}{\delta_p^{'}}, R_s = \frac{d/2}{\lambda_{m,l}} \tag{64}$$

A forma discretizada da equação de balanço do nó será:

$$\frac{w_i^{n+1} - w_i^n}{\Delta t} = \frac{1}{d} \cdot \left[\left(\frac{p_{v,i-1} - p_{v,i}}{R_{p,i-1} + R_{p,i}} + \frac{p_{v,i+1} - p_{v,i}}{R_{p,i+1} + R_{p,i}} \right) - \left(\frac{s_{i-1} - s_i}{R_{s,i-1} + R_{s,i}} + \frac{s_{i+1} - s_i}{R_{s,i+1} + R_{s,i}} \right) \right]^n \ldots$$
$$+ \begin{cases} 6{,}21 \cdot 10^{-6} \cdot g_{ar} \cdot \left(p_{v,i-1} - p_{v,i} \right)^n, & g_{ar} > 0 \\ 6{,}21 \cdot 10^{-6} \cdot g_{ar} \cdot \left(p_{v,i} - p_{v,i+1} \right)^n, & g_{ar} < 0 \end{cases} \tag{65}$$

Ainda a título de exemplo, apresenta-se o aspecto parcial do diagrama de blocos referente à implementação desta equação de balanço, no programa HAM-Tools, em ambiente Simulink.

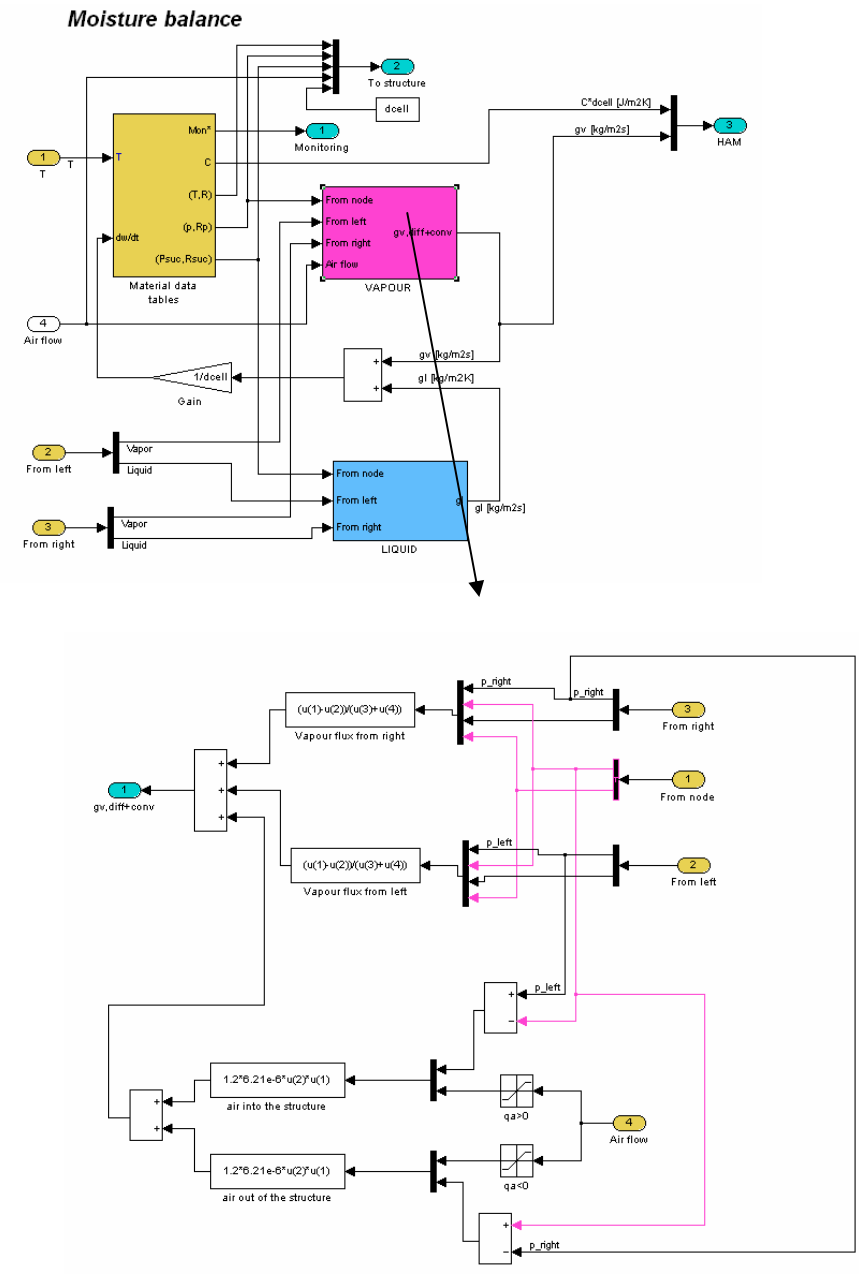


Figura 26 – Conteúdo parcial do bloco de cálculo do balanço de humidade de um nó interior de um elemento construtivo no programa HAM-Tools

3.3.2 Propriedades dos materiais

O programa HAM-Tools pode utilizar as seguintes propriedades dos materiais em cálculos higrotérmicos: massa volúmica seca, ρ_s, calor específico, c_p, condutibilidade térmica, $\lambda(T, w)$, curva higroscópica, (ϕ, w), permeabilidade ao vapor, (ϕ,δ_p), condutibilidade hidráulica, $(w, \lambda_{m,l})$, permeabilidade ao ar, k, absorção de radiação solar, α_{sol}, emissividade, ε, e transmissividade, τ. Para o trabalho desenvolvido nesta Tese, cada uma destas propriedades foi encarada com diferentes níveis de importância.

O calor específico, a condutibilidade térmica e a sua dependência face à humidade e temperatura, a absorção de radiação solar, a emissividade e a transmissividade formam um conjunto de propriedades que foi utilizado nas simulações realizadas, mas cujos valores não foram determinados pelo autor. A consulta de bases de dados, como Kumaran (1996), permitiu obter esses valores para materiais genéricos. Como se verifica no Capítulo 6, as conclusões obtidas pelas simulações realizadas não são substancialmente afectadas por estas propriedades, que afectam essencialmente o comportamento térmico, desde que se usem valores verosímeis e coerentes para os elementos simulados.

A massa volúmica seca, a curva higroscópica e a permeabilidade ao vapor constituem o grupo de propriedades necessárias ao cálculo que exigiram uma determinação precisa. A massa volúmica seca dos materiais envolvidos foi obtida a partir de valores dos fabricantes. As curvas higroscópicas e a permeabilidade ao vapor foram obtidas de acordo com o processo descrito no Capítulo 4.

Os valores da permeabilidade ao ar e da condutividade hidráulica não foram necessários aos cálculos efectuados. No caso da permeabilidade ao ar, não foram simulados casos onde este processo é relevante. A não utilização da condutividade hidráulica já pressupõe uma simplificação do modelo base.

Na determinação do fluxo total de humidade num meio poroso, de acordo com a expressão (48), a variação dos coeficientes de transporte assume normalmente a forma apresentada na Figura 27.

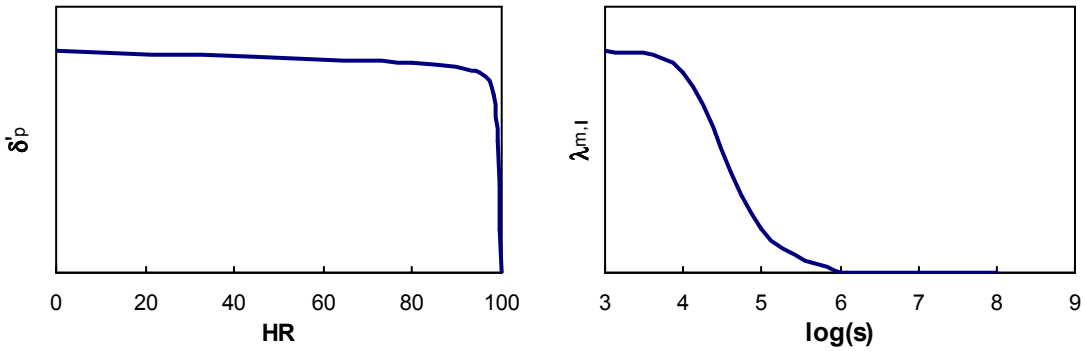


Figura 27 – Variação típica dos coeficientes de transporte de humidade num modelo com separação de fluxo (Kalagasidis, 2004)

A determinação de coeficientes de transporte de humidade para modelos com separação de fluxo pode ser efectuada, experimentalmente, através de técnicas inovadoras (Galbraith *et al.*, 2003). O cálculo a partir de coeficientes de transferência globais, obtidos em ensaios de permeabilidade ao vapor normalizados, de acordo com o método de separação de fluxo proposto por Kalagasidis (2004), é no entanto a forma mais prática de obter dados para a aplicação destes modelos.

Os casos a simular no âmbito deste trabalho correspondem a análises no regime higroscópico. Neste regime, a opção ou não por modelos com separação de fluxo de vapor e líquido tem um impacto reduzido nos resultados finais, mas ainda assim sensível (Kalagasidis, 2003).

Nas simulações que se apresentam no Capítulo 6 optou-se por calcular o fluxo de vapor em materiais porosos apenas através da componente de difusão de vapor. A validade dessa aproximação é verificada em detalhe, nesse capítulo, através do processo de calibração do modelo adoptado. Neste processo de cálculo, os valores da permeabilidade ao vapor, correspondem a um coeficiente de transporte global, coincidente com os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade ao vapor do Capítulo 4. A variação da permeabilidade ao vapor com a humidade relativa terá, então, a forma apresentada na Figura 28.

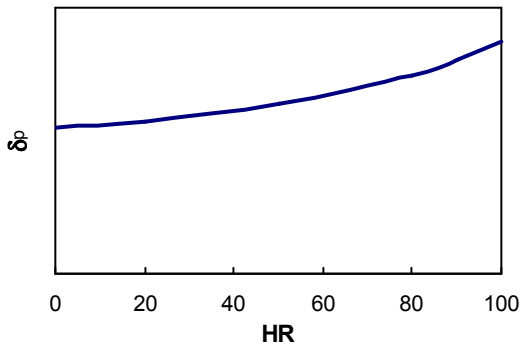


Figura 28 – Variação típica da permeabilidade ao vapor se utilizada como coeficiente global de transporte de humidade

3.3.3 Coeficientes de transferência superfície-ar

Os coeficientes de transferência de calor e humidade, entre as superfícies de um edifício e o ar que com eles contacta, são dados importantes para a realização de simulações higrotérmicas. Aborda-se, por isso, nesta subsecção, de forma sintética, o processo seguido para a definição dos valores do coeficiente de transferência de calor por convecção, h_c, e do coeficiente de transferência de vapor ar-superfície para um gradiente de pressão de vapor, β_p. A quantificação destes coeficientes é tratada com algum detalhe porque, além da sua relevância para as simulações realizadas, se trata de valores que devem ser introduzidos como dados para o programa HAM-Tools.

O valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, h_c, depende da direcção e sentido do fluxo de calor, da velocidade e tipo de regime da deslocação do ar à superfície e da diferença de temperatura entre a superfície e o ar (Sanders, 1996). É possível encontrar, em diferentes referências, vários valores nominais ou expressões de quantificação para este coeficiente (Reib e Erhorn, 1991). Nas simulações efectuadas nesta Tese aplicaram-se os valores referidos pela prEn 15026, apresentados na Tabela 5. O valor de h_c, para superfícies exteriores, foi determinado a partir da expressão (66), de acordo com a prEN 15026, e admitindo uma velocidade do ar, *vv*, de 6 m/s.

$$h_{c,e} = 4 + 4 \cdot vv \tag{66}$$

Tabela 5– Valores adoptados para o coeficiente de transferência h_c.

Fluxo de calor	$\boldsymbol{h_{c,i}}$ W/(m^2.K)	$\boldsymbol{h_{c,e}}$ W/(m^2.K)
Horizontal	2,5	28,0
Ascendente	5,0	
Descendente	0,7	

A definição do coeficiente de transferência de vapor ar-superfície, para um gradiente de pressão de vapor, β_p, é normalmente efectuada admitindo que existe uma camada de ar estagnado, sobre a superfície de um elemento, que o vapor tem de atravessar por difusão (Sanders, 1996). De acordo com este conceito, pode definir-se o valor de β_p em função de uma espessura de difusão equivalente à superfície, $s_{d,spf}$, e da permeabilidade ao vapor no ar, δ_a, através da expressão seguinte:

$$\beta_p = \frac{\delta_a}{s_{d,spf}} \tag{67}$$

O valor de $s_{d,spf}$ foi estudado experimentalmente por Worch (2004), que sugere, para superfícies interiores de edifícios, a adopção de $s_{d,spf}$ = 0,015 m e, para superfícies exteriores, uma expressão dependente da velocidade do ar.

$$s_{d,spf} = \frac{1}{67 + 90 \cdot vv} \tag{68}$$

Na prEN 15026, a expressão (68) é também utilizada, mas os valores definidos para superfícies interiores variam em função do coeficiente de transferência de calor por convecção, h_c. Este tipo de aproximação baseia-se na relação de Lewis, traduzida pela seguinte expressão (Rode, 1990):

$$\beta_p = \frac{h_c}{R_v \cdot (T + 273{,}15) \cdot \rho_{ar} \cdot c_{p,ar}} \tag{69}$$

A aplicação das expressões (68) e (69) e de h_c correspondente a um fluxo horizontal resultaria em $s_{d,spf} \sim$ 0,012 m. Na prEN 15026 os valores apresentados para $s_{d,spf}$ em superfícies interiores são 0,008 m, 0,004 m e 0,03 m, em correspondência com o fluxo horizontal, ascendente e descendente, respectivamente. A aplicação destes valores na expressão (68) produziria um valor de β_p entre 6,3x10^{-9} e 2,4x10^{-8} s/m aproximadamente. Outras referências (Hagentoft, 2001, Rode *et al*., 2005) adoptam em geral

para β_p, em superfícies interiores, o valor 2,0x10^{-8} s/m, correspondente a um $s_{d,spf}$ de aproximadamente 0,01 m.

Esta breve síntese permite verificar que existe bastante incerteza sobre os valores do coeficiente β_p. Foi, por isso, tomada a decisão de adoptar, como ponto de partida nas simulações realizadas no Capítulo 6, o valor 2,0x10^{-8} s/m para β_p.

3.3.4 Dados climáticos

O programa HAM-Tools utiliza os seguintes dados climáticos exteriores: temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho, radiação global em superfície horizontal, radiação difusa em superfície horizontal, radiação directa em superfície normal, radiação incidente de grande comprimento de onda, velocidade do vento, direcção do vento, pressão total e pluviosidade. A introdução destes dados é efectuada através de um ficheiro, com os valores de cada um destes parâmetros associados a um intervalo de tempo, que pode ser qualquer, mas que para a simulação do comportamento de um edifício corresponde, normalmente, a um regime horário.

Os dados climáticos relativos à radiação solar são tratados por uma rotina do programa de cálculo, com a informação sobre a orientação e inclinação de cada superfície, introduzida pelo utilizador.

As simulações realizadas, no âmbito desta Tese, incluíram a reprodução numérica de ensaios laboratoriais e a análise do comportamento higrotérmico global de um compartimento virtual. No primeiro caso, utilizou-se como dados climáticos os valores da temperatura do ar e da temperatura de ponto de orvalho com intervalos de 5 ou 10 minutos, obtidos a partir dos registos das câmaras climáticas que suportaram esses ensaios. No segundo caso, foi necessário gerar ficheiros de dados que incluíam praticamente todos os parâmetros climáticos, com excepção da caracterização do vento e da pluviosidade, dada a sua pouca relevância para o estudo a efectuar.

A geração dos ficheiros de dados climáticos, destinados a simulações higrotérmicas globais, teve em atenção a reflexão apresentada na subsecção 2.4.4. Pretendeu-se utilizar dados climáticos referentes a Portugal, tomando como exemplo as cidades de Lisboa e Porto.

A obtenção desses dados poderia ser efectuada a partir de dados reais, de estações climáticas nacionais. Esse procedimento permitiria, inclusive, a geração de anos climáticos adaptados à análise do desempenho hígrico. Mas essa opção implicaria uma

quantidade de trabalho incompatível com o tempo previsto para o desenvolvimento desta Tese.

Como alternativa, existia a possibilidade de utilizar o já referido Ano Climático de Referência para Lisboa ou gerar dados sintéticos com o programa METEONORM. Tendo em conta que se pretendia também uma comparação entre cidades diferentes, optou-se pela geração de dados sintéticos para Lisboa e Porto, para que as comparações a efectuar fossem coerentes. Outra vantagem em utilizar este tipo de dados está na facilidade em gerar os parâmetros definidores da radiação solar, utilizados pelo programa HAM-Tools. Deve salientar-se que as análises apresentadas no Capítulo 6, para um compartimento virtual, com base nos dados climáticos adoptados, reflectem a resposta a uma variação climática típica, baseada em valores médios dos vários parâmetros.

Nas figuras seguintes apresenta-se o aspecto da variação anual da temperatura exterior, da humidade relativa exterior e da pressão de vapor exterior para o Porto e Lisboa, de acordo com os dados gerados pelo METEONORM.

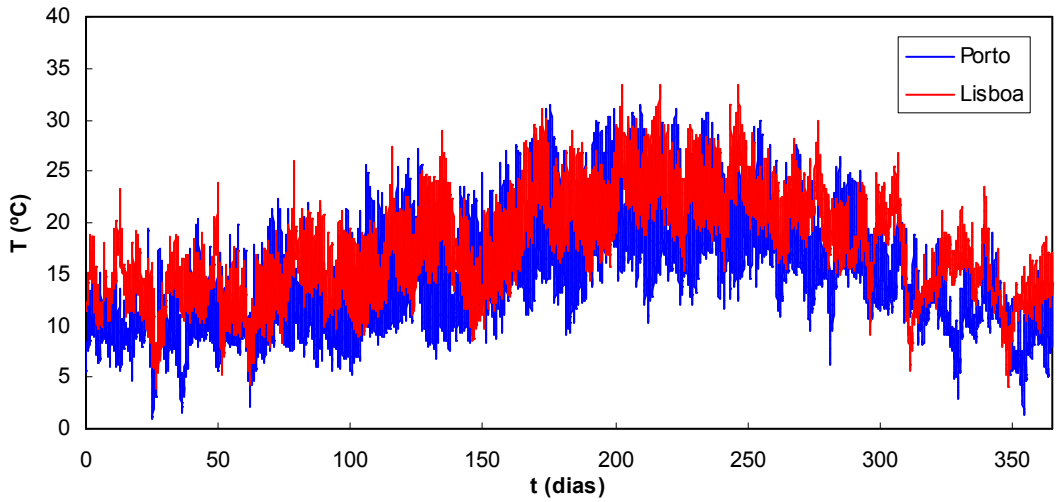


Figura 29 – Variação anual da temperatura exterior, de Janeiro a Dezembro, de acordo com os dados produzidos pelo METEONORM

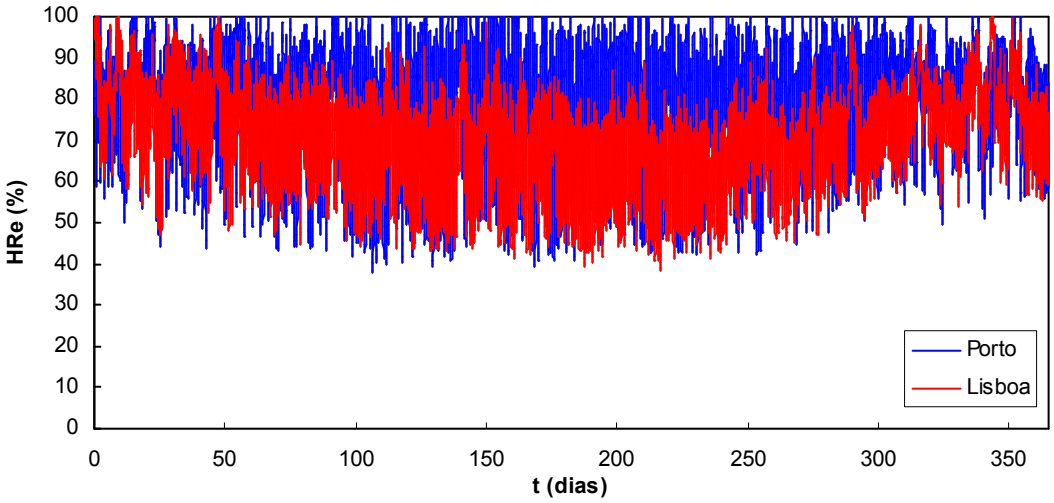


Figura 30 – Variação anual da humidade relativa exterior, de Janeiro a Dezembro, de acordo com os dados produzidos pelo METEONORM

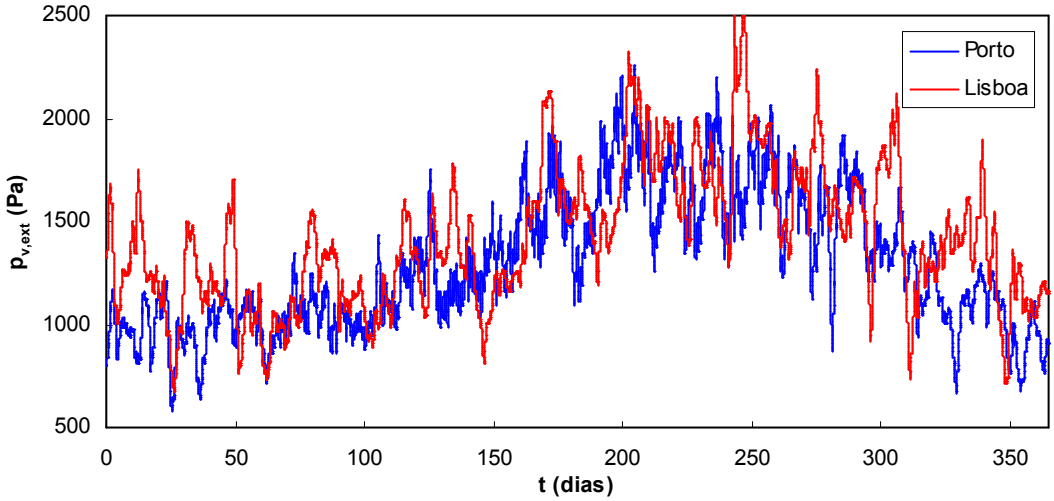


Figura 31 – Variação anual da pressão de vapor exterior, de Janeiro a Dezembro, de acordo com os dados produzidos pelo METEONORM

3.4 Síntese Crítica do Capítulo 3

A descrição do modelo teórico, em que se baseia o programa de cálculo HAM-Tools, adoptado nesta Tese para o trabalho de simulação, foi abordada em detalhe neste Capítulo. Alguns aspectos da implementação do programa foram também discutidos.

O modelo teórico que suporta o programa HAM-Tools é do tipo multizona, onde cada compartimento do edifício corresponde a uma zona, dentro da qual as variáveis

de estado são homogéneas. Os modelos de transferência em elementos construtivos permitem uma análise detalhada do seu comportamento. Os processos mais relevantes para o comportamento higrotérmico de um edifício podem ser abordados com este modelo.

Como limitações mais relevantes, face ao comportamento de um edifício real, destaca-se o tratamento unidireccional dos processos de transferência em elementos da envolvente, o que impossibilita a análise de pontes térmicas. A impossibilidade de analisar as características do ar de uma zona com maior detalhe é também uma limitação relevante da abordagem com modelos multizona.

A implementação do modelo em Simulink apresenta aspectos muito positivos. A simplicidade da modelação, que dispensa um conhecimento aprofundado de métodos numéricos pelos utilizadores, e a transparência dos modelos, tornando-os muito interessantes do ponto de vista pedagógico, são alguns desses aspectos. Estas características, associadas à acessibilidade ao código, permitindo alterações, foram motivadoras para a utilização do programa HAM-Tools nesta Tese. Mas estes aspectos poderiam ser encarados de forma menos positiva. A utilização do programa pressupõe um conhecimento aprofundado da sua estrutura e uma constante manipulação dos módulos que o constituem, tornando a sua aplicação pouco amigável, quando comparada com programas comerciais.

A utilização do programa, nas simulações desta Tese, implicou algumas opções que foram assumidas pelo autor. O modelo de transferência de fluxo de humidade em elementos construtivos foi implementado sem a componente líquida. A definição do coeficiente de transferência de vapor ar-superfície para um gradiente de pressão de vapor, β_p, contém um grau elevado de incerteza. A qualidade dos dados climáticos utilizados é adequada à avaliação de um cenário típico, associado a valores verificados num ano médio. Não é, por isso, possível estender as conclusões obtidas a uma avaliação de risco, onde devem ser utilizados valores com um período de retorno mais elevado.

Capítulo 4

Caracterização de Materiais e Elementos de Construção

4.1 Introdução

O conhecimento de propriedades básicas de materiais, como a curva higroscópica e a permeabilidade ao vapor, é essencial para a caracterização desses materiais e para o desenvolvimento de estudos de simulação numérica, como ficou patente no Capítulo 3. Estas propriedades foram, por isso, avaliadas para alguns materiais seguindo procedimentos normalizados.

As propriedades básicas dos materiais podem ser utilizadas na simulação numérica do comportamento em regime transitório de elementos de construção, constituídos por esses materiais. Essa simulação permite determinar qual a capacidade de armazenamento de humidade desses elementos, associada ao regime escolhido. No entanto, seria interessante dispor de uma propriedade que indicasse, de forma simples, a magnitude da capacidade de armazenamento de humidade de um elemento, sem passar por um processo de simulação tão complexo.

De acordo com este princípio, apresenta-se, também neste Capítulo, um estudo experimental destinado especificamente à aferição da capacidade de armazenamento de humidade, em regime transitório, de materiais e elementos presentes no ambiente interior.

4.2 Equipamento

Na realização dos ensaios, descritos neste Capítulo, foram utilizadas duas câmaras climáticas existentes no Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LFC-FEUP. Uma delas, modelo Vötsh VC 4034 (Figura 32), permite um controlo de temperatura entre -40 ºC e 180 ºC, com

uma flutuação no tempo inferior a 0,3 ºC. O controlo de humidade relativa permite variações entre 10 % e 98 %, com flutuações no tempo inferiores a 3 %. A outra câmara climática, modelo Aralab Fitoclima 3600 EDTU Climaplus V, permite um controlo de temperatura entre 15 ºC e 35 ºC, com uma flutuação no tempo inferior a 0,3 ºC. O controlo de humidade relativa permite variações entre 30 % e 90 %, com flutuações no tempo inferiores a 3 %.

Figura 32 – Câmara climática Vötsh VC 4034 do LFC-FEUP

Foram também utilizadas três balanças de precisão: Kern 824 com precisão de 0,001 g, Sartorius BP 3100 S com precisão de 0,01 g e Precisa 5000D-12000G com precisão de 0,1 g.

4.3 Caracterização de Curvas Higroscópicas

4.3.1 Enquadramento

A determinação de curvas higroscópicas de materiais pode ser executada com recurso a diferentes métodos. Pode referir-se que os mais utilizados em materiais de construção são os métodos gravimétricos, mas existem métodos alternativos do tipo calorimétrico ou higrométrico. Os procedimentos de cada um podem apresentar diversas

variantes. Uma breve referência a estes métodos pretende enquadrar o procedimento adoptado neste trabalho.

Nos métodos gravimétricos, as curvas higroscópicas são determinadas por avaliação da massa de água contida numa amostra, por pesagem, para uma determinada humidade relativa do ar com que a amostra está em equilíbrio. Os equipamentos de ensaios podem ser mais ou menos complexos. Os dispositivos mais simples consistem em dissecadores, semelhantes aos da Figura 33, onde as amostras são colocadas sobre uma grelha, acima de uma solução salina.

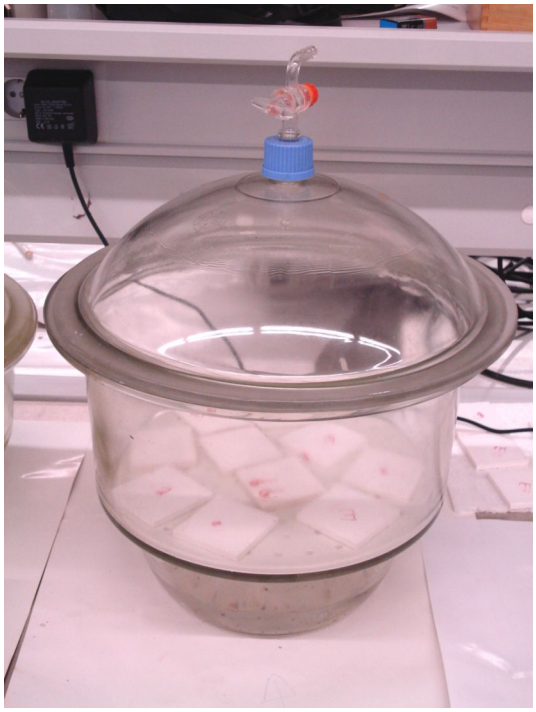


Figura 33 – Dissecador do LFC-FEUP utilizado em ensaios de determinação da curva higroscópica

Este dispositivo implica alguma perturbação das amostras por serem pesadas numa balança exterior. Podem ser utilizadas diferentes variações deste princípio, sendo um exemplo interessante os dispositivos compostos por microbalanças colocadas no interior de câmaras climáticas (Peuhkuri, 2003, Galbraith *et al.*, 2001).

Os dispositivos mais simples têm como vantagem o seu baixo custo, mas implicam um período de tempo muito elevado para a realização dos ensaios, que pode atingir vários meses. A utilização de meios mais sofisticados, como o acima referido, mas substancialmente mais caros, permite a definição das curvas higroscópicas de

um material em poucas semanas. Há, no entanto, limitações para as dimensões das amostras, cuja massa deve ser de ordem de grandeza inferior ao grama.

Os métodos higrométricos podem ser utilizados com vantagem em pinturas, onde os métodos gravimétricos apresentam uma baixa fiabilidade. Este método consiste em avaliar a massa de água do material através da medição da variação de humidade relativa do ar, contido num recipiente estanque, onde é injectada uma quantidade de vapor conhecida. Um exemplo da aplicação deste método pode ser visto em Goossens (2003).

4.3.2 Materiais

Os ensaios de determinação de curvas higroscópicas, realizados no âmbito desta Tese, procuraram caracterizar provetes de gesso cartonado, gesso projectado e reboco de gesso e cal. A opção por estes materiais deveu-se ao facto de os dois primeiros serem, actualmente, materiais de acabamento interior muito comuns em Portugal. A realização de ensaios sobre uma recriação do reboco de gesso e cal, designado frequentemente por estuque, justificou-se pelo interesse em avaliar as características de um reboco que existe ainda em edifícios de construção menos recente. Essa avaliação possibilita uma comparação entre a construção actual e antiga, bem como a aferição do interesse em desenvolver estratégias de reabilitação deste tipo de reboco, que permitam manter a sua capacidade de armazenamento de humidade em regime transitório.

Os provetes de gesso cartonado, testados no âmbito deste trabalho, foram cortados de placas para utilização em sistemas de divisórias. O gesso cartonado é já um elemento composto, pois é formado por cartão e gesso, mas optou-se por encarar este conjunto como um material único. As dimensões adoptadas para estes provetes, nos ensaios de determinação da curva higroscópica, foram (60×60×12,5) mm^3.

Os provetes de gesso projectado foram produzidos de uma forma que tenta reproduzir a sua aplicação em obra. A amassadura foi realizada com uma relação de 1 dm^3 de água para 2 kg de produto à base de gesso e misturada mecanicamente com um berbequim, para a obtenção de uma massa homogénea. Após colocação em aros de madeira utilizados como moldes, o gesso foi apertado com uma régua e raspado com uma talocha, como numa aplicação normal em parede. As dimensões adoptadas para estes provetes foram (60×60×7) mm^3. Os provetes foram desmoldados após 24 h e

deixados a secar ao ar. Algumas imagens deste trabalho podem ser vistas na Figura 34. Juntamente com estes provetes foram também realizados outros, de maiores dimensões, destinados aos ensaios de permeabilidade, descritos na subsecção seguinte.

Figura 34 – Sequência de preparação dos provetes de gesso projectado

Os provetes de reboco de gesso e cal foram produzidos a partir de uma mistura de 50 % de gesso, destinado a este tipo de reboco, e 50 % de cal apagada. A adição de água fez-se primeiro com a cal, numa proporção de 2 dm^3 para 3 kg de cal, homogeneizando com um berbequim. Em seguida, foram adicionados mais 2 dm^3 de água e polvilhados 3 kg de gesso, seguindo-se nova homogeneização. Esta pasta, ao contrário da anterior, é mais fluida, mas a presa processa-se mais rapidamente, dada a inexistência de retardadores de presa. Após a homogeneização, a pasta foi colocada nos aros e alisada com uma talocha, não sofrendo mais acções, dado o rápido endurecimento. Os provetes foram, por fim, desmoldados e secos ao ar. As dimensões adoptadas para estes provetes foram (60×60×6,5) mm^3. Na Tabela 6 apresenta-se um

resumo das características dos provetes submetidos a ensaios de determinação da curva higroscópica.

Tabela 6 – Características dos provetes utilizados nos ensaios de determinação da curva higroscópica

Provetes	Constituição	Dimensões (mm)
GC	Gesso cartonado	60×60×12,5
GP	Gesso projectado	60×60×7,0
GT	Reboco de gesso e cal	60×60×6,5

4.3.3 Procedimento de ensaio

A determinação de curvas higroscópicas, efectuada no âmbito deste trabalho, seguiu as disposições da norma ISO 12571 (ISO, 2000), com algumas adaptações.

De acordo com esta norma, a curva de adsorção é determinada colocando os provetes do material a testar em sucessivos pontos de equilíbrio com ambiências a humidade relativa crescente e temperatura constante. Na fase inicial do ensaio o provete deve estar seco, sendo o teor de humidade determinado por pesagem, para cada ambiência testada, até o valor da massa ser constante. O ensaio deve incluir um mínimo de quatro ambiências.

A curva de desadsorção, ainda de acordo com a mesma norma, deve ser determinada colocando o provete em ambiências de temperatura constante e humidade relativa decrescente, tomando como ponto inicial um valor mínimo de 95 %. O equilíbrio com esta ambiência pode ser alcançado por adsorção após secagem. Na fase final, a massa do provete deve ser avaliada após nova secagem. Em cada ambiência, a massa do provete é avaliada por pesagem até se obter um valor constante. Este ensaio deve também incluir um mínimo de quatro ambiências.

Os princípios enunciados acima foram tidos em conta nos ensaios realizados. No entanto, para acelerar estes ensaios, que podem ter uma duração muito elevada, optou-se por colocar diferentes conjuntos de amostras directamente em cada uma das ambiências seleccionadas para a fase de adsorção. Essas amostras, após equilíbrio na respectiva ambiência, foram submetidas ao processo de desadsorção, passando cada conjunto por equilíbrios sucessivos com as ambiências de menor humidade relativa.

Este procedimento permite, além da economia de tempo, a determinação de curvas de transição em zonas intermédias do intervalo de humidade relativa considerado. Como exemplos da aplicação deste procedimento, podem ser referidos os exercícios comuns de determinação de propriedades, levados a cabo por vários laboratórios, no âmbito dos projectos de investigação internacionais "HAMSTAD" (Roels *et al.*, 2003) e "Annex 41: Moist-Eng" (Roels, 2004) contando este último com a participação do autor desta Tese.

Definiram-se quatro ambiências para estes ensaios, com temperatura constante de (23 ± 2) ºC garantida pela climatização do laboratório ou por uma câmara climática, e as humidades relativas, referidas na Tabela 7, garantidas por soluções salinas colocadas em dissecadores ou pela própria câmara climática. Os valores reais da humidade relativa, condicionada pelas soluções salinas, foram controlados regularmente ao longo dos ensaios.

Tabela 7 – Ambiências adoptadas nos ensaios de adsorção/desadsorção

HR (%)	**Câmara climática / Solução salina**
33	Câmara climática
50	Câmara climática
75	Câmara climática
77	NH_4Cl
84	KCl
91	KNO_3

A secagem dos provetes não foi efectuada com o processo mais corrente, onde se recorre a uma estabilização numa estufa a temperatura elevada. De acordo com Wilkes *et al.* (2004), os produtos à base de gesso, durante a secagem inicial para determinação das suas curvas higroscópicas, devem ser submetidos a condições que permitam retirar a água retida por higroscopicidade, mas que não afectem a água ligada quimicamente, sob pena de alterar as características do próprio material que se pretende testar. Este autor recomenda, por isso, como processo mais adequado, a secagem por um período de 30 dias, a temperatura ambiente, dentro de um dissecador com humidade relativa inferior a 0,5 %, imposta por um produto adequado.

Pelo exposto, optou-se neste trabalho pela secagem dos provetes, utilizados na caracterização das curvas higroscópicas, num dissecador contendo Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$), onde a humidade relativa apresentou valores inferiores a 0,5 %.

Para cada material testado e cada humidade relativa foram utilizados 5 provetes, sendo por isso testados 20 provetes de cada material.

Todos os provetes foram submetidos ao processo de secagem descrito acima e em seguida colocados nas ambiências seleccionadas. De acordo com a norma ISO 12571, admite-se que um provete está em equilíbrio com a humidade relativa de uma ambiência se a variação da sua massa, em três pesagens sucessivas espaçadas no mínimo de 24 h, for inferior a 0,1 % da massa total. Os valores representativos do equilíbrio entre o teor de humidade, u, com cada humidade relativa, foram por isso fixados após a verificação desta condição, sendo calculados de acordo com a seguinte expressão:

$$u = \frac{m_w - m_0}{m_0} \tag{70}$$

onde m_w representa a massa do provete em equilíbrio com a ambiência e m_0 a massa do provete seco.

Após a obtenção dos valores do teor de humidade em adsorção procedeu-se ao processo de desadsorção, fixando os valores do teor de humidade correspondentes, pelo mesmo processo de estabilização.

Cada conjunto de provetes foi, por fim, submetido ao processo de secagem já descrito, após ter sido fixado o seu teor de humidade em equilíbrio com a ambiência de 33 % HR em desadsorção.

4.3.4 Resultados

Os resultados dos ensaios de determinação de curvas higroscópicas podem ser tratados a diferentes níveis. No primeiro, o resultado básico dos ensaios consiste num conjunto de pontos que podem, eventualmente, ser ligados por troços lineares e, assim, ter uma definição inicial das curvas higroscópicas. Um segundo nível de tratamento dos resultados obtidos consiste na adaptação de uma curva teórica aos resultados obtidos. A obtenção desta curva permite ainda um novo nível de análise, onde se determina a capacidade higroscópica específica, ξ_u, por derivação daquela curva.

Na Figura 35, Figura 36, e Figura 37 apresentam-se os pontos determinados nos ensaios realizados. A descrição detalhada dos ensaios que deram origem a estes valores encontra-se nas fichas de ensaio LFC-FEUP NR_CH1 a LFC-FEUP NR_CH3, apresentadas no Anexo A.

A aplicação do processo de ensaio, descrito na subsecção anterior, permitiu obter resultados coerentes para os provetes GC e GP. No caso dos provetes GT, pelo contrário, esse processo não permitiu obter valores satisfatórios. Verificou-se desde logo que no processo de desadsorção, a partir de valores elevados da humidade relativa como 84 % e 91 %, o teor de humidade se mantinha elevado mesmo após secagem no dissecador. Concluiu-se por isso que este material, pelas suas características, não podia ser avaliado com base na primeira curva de adsorção determinada, por não corresponder ainda a uma estrutura porosa estável. Apresenta-se por isso, para este material, a curva higroscópica correspondente ao segundo processo de adsorção realizado.

Relativamente aos provetes GC e GP, foi detectada histerese entre a curva de adsorção e a curva de desadsorção que tomou como ponto de partida o equilíbrio com a humidade relativa de 91 %. Foi também possível observar histerese nas curvas de transição definidas a partir do equilíbrio com as humidades relativas de 77 % e 84 % para GC e GP respectivamente.

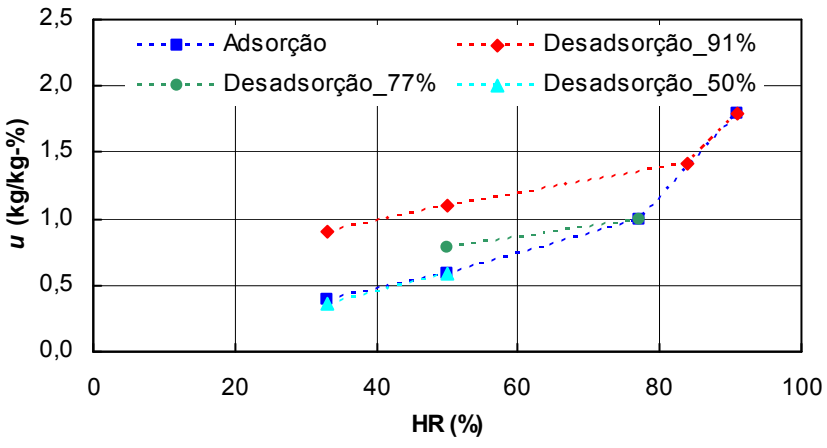


Figura 35 – Resultados do ensaio de determinação da Curva Higroscópica do Gesso Cartonado (GC)

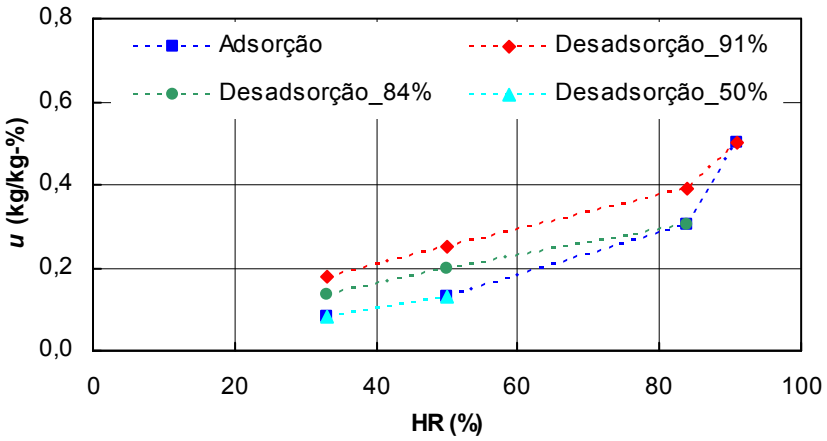


Figura 36 – Resultados do ensaio de determinação da Curva Higroscópica do Gesso Projectado (GP)

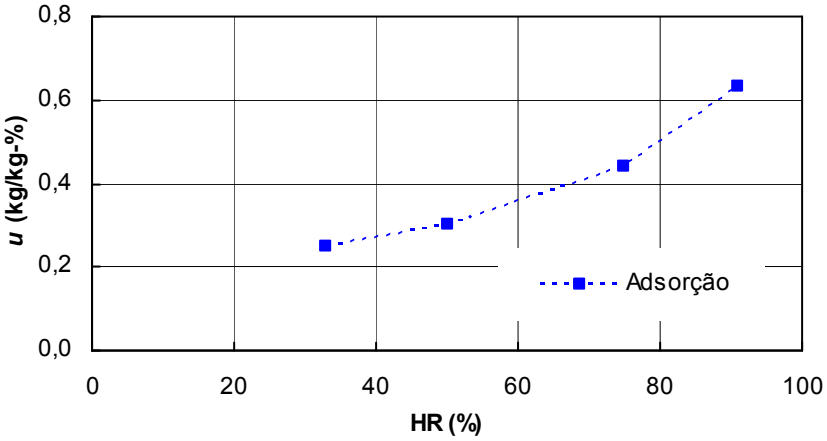


Figura 37 – Resultados do ensaio de determinação da Curva Higroscópica do Reboco de Gesso e Cal (GT)

Procedeu-se, em seguida, ao ajuste de uma função matemática aos valores obtidos nos ensaios. A função utilizada neste ajuste é traduzida pela expressão:

$$u = u_h \cdot \left(1 - \frac{\ln \phi}{A_1}\right)^{-1/n} \tag{71}$$

Esta expressão foi utilizada na elaboração de alguns catálogos de propriedades higrotérmicas de materiais de construção (Hansen, 1996, Janssens, 1996), que se tornaram referências correntes na área da Física das Construções. Os parâmetros que a constituem têm, em princípio, um significado próprio: u_h representa o teor de humidade crítico, A_1 é uma relação entre esse valor e o teor de humidade não evaporável e n é

um expoente fixado empiricamente. Mas a estratégia mais comum de obtenção destes parâmetros consiste num ajuste numérico aos dados obtidos experimentalmente, não sendo possível assegurar que os parâmetros assumam de facto o seu significado físico.

A aplicação dessa estratégia aos resultados experimentais obtidos para os provetes GC, GP e GT, conduziu aos valores dos parâmetros de ajuste, apresentados na Tabela 8. Foram definidas funções para as curvas de adsorção e de desadsorção a partir de 91 % de humidade relativa. Na Figura 38 podem observar-se os gráficos com as curvas higroscópicas determinadas e pontos representando os resultados dos ensaios utilizados no ajuste.

Tabela 8 – Parâmetros de ajuste da função que descreve a curva higroscópica

Material	$u = u_h \cdot \left(1 - \frac{\ln \phi}{A_1}\right)^{-1/n}$		
	u_h	A_1	n
GC_adsorção	0,071029	0,011731	1,6029
GC_desadsorção	0,028079	0,024419	3,3835
GP_adsorção	1,0376	$6{,}11\times10^{-5}$	1,3726
GP_desadsorção	1,0362	$8{,}17\times10^{-8}$	2,6158
GT_adsorção	0,0072	0,693	0,8136

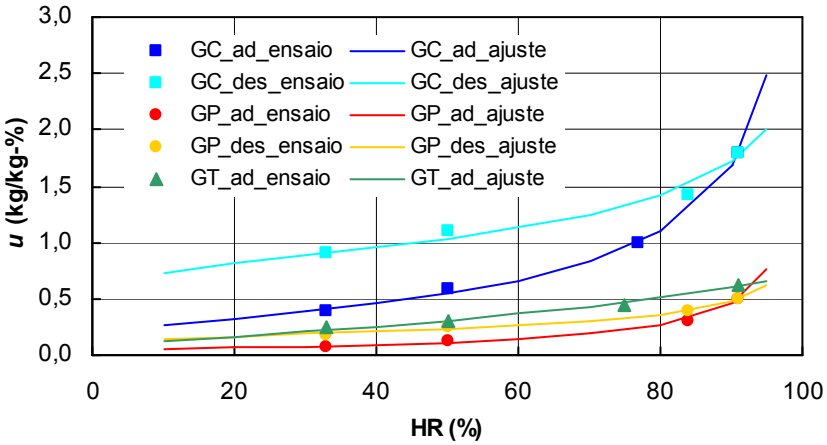


Figura 38 – Curvas resultantes do ajuste de funções matemáticas aos resultados obtidos nos ensaios

Deve notar-se que, apesar de a determinação de curvas higroscópicas ser efectuada com um conjunto de procedimentos relativamente simples, a comparação de resultados obtidos por diferentes laboratórios pode ser surpreendente. Na Figura 39 pode observar-se a comparação dos resultados obtidos neste trabalho, com outros citados na bibliografia, para o gesso cartonado. Como se verifica, foi possível encontrar alguns autores com resultados muito semelhantes como Wilkes *et al.* (2004) e Richards *et al.* citado em Kumaran (1996). Nesta última citação foi possível encontrar, também, valores para a curva higroscópica substancialmente diferentes dos restantes (KUL-1991) como se vê no gráfico.

Estas diferenças podem ter diversas origens, sendo a mais óbvia as diferenças existentes em materiais que têm constituições distintas mas designações idênticas. No caso de materiais à base de gesso é também fundamental a adopção de um protocolo de secagem inicial adequado, como já se referiu anteriormente. A diversidade de aplicação dos procedimentos de ensaio, por parte de cada operador, pode ser também responsável pelas diferenças encontradas.

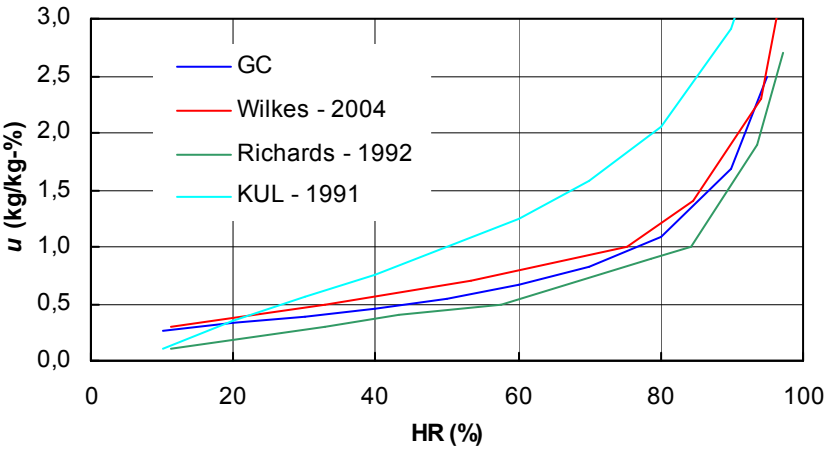


Figura 39 – Comparação de curvas higroscópicas de adsorção do gesso cartonado

A parametrização das curvas higroscópicas dos materiais permite ainda a determinação da capacidade higroscópica específica em massa, ξ_u, de cada material. Para esse efeito é possível determinar a derivada da expressão (71), de onde resulta a expressão:

$$\xi_u = \frac{\partial u}{\partial \phi} = \frac{u_h \cdot \left(1 - \frac{\ln \phi}{A_1}\right)^{-\frac{1}{n}-1}}{\phi \cdot n \cdot A_1} \tag{72}$$

A variação da capacidade higroscópica específica com a humidade relativa pode ser observada na Figura 40, onde se apresentam os gráficos correspondentes à aplicação da expressão (72) a cada material estudado. Os gráficos permitem verificar com alguma facilidade que o gesso cartonado apresenta valores de ξ_u mais elevados. A curva de variação de ξ_u para o reboco de gesso e cal apresenta um andamento pouco verosímil, para valores elevados da humidade relativa. Isto deve-se, essencialmente, ao desenvolvimento do ensaio deste material, descrito atrás.

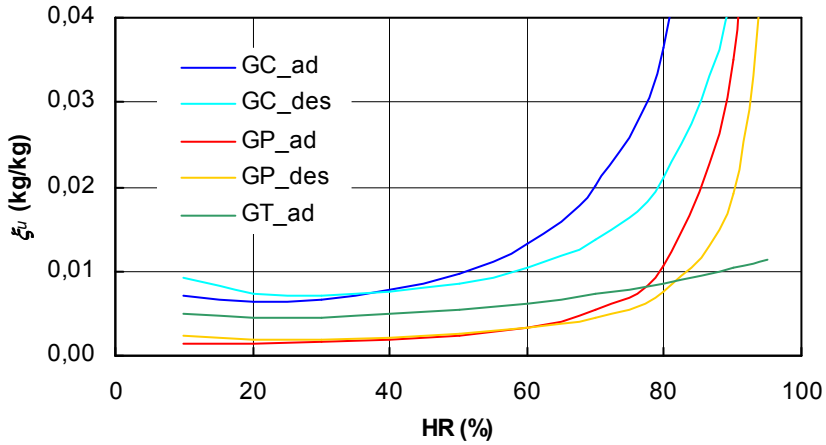


Figura 40 – Curvas de variação da capacidade higroscópica específica dos materiais ensaiados

4.4 Caracterização da Permeabilidade ao Vapor

4.4.1 Enquadramento

A permeabilidade ao vapor de materiais, ou elementos compostos, pode ser determinada com recurso a diferentes técnicas experimentais. A mais comum consiste em selar o provete a ensaiar na face aberta de uma tina de ensaio, contendo um dessecante (tina seca) ou uma solução salina saturada (tina húmida). O conjunto é colocado em seguida numa câmara climática, onde se impõe uma humidade relativa diferente da que vigora no interior da tina de ensaio. Devido ao gradiente de pressão parcial de

vapor, que se estabelece entre a tina e a câmara, desenvolve-se um fluxo de vapor através do provete.

A pesagem periódica do conjunto permite determinar a taxa de transmissão de vapor em regime permanente. A aplicação deste procedimento implica o estabelecimento de um regime permanente para a determinação da permeabilidade ao vapor.

Este método foi já tratado em diferentes normas, umas com um âmbito geral e outras adaptadas a materiais específicos. Neste trabalho, tomou-se como referência a EN ISO 12572 (CEN, 2001a), por ter como âmbito os materiais e elementos de construção e ser frequentemente citada em trabalhos de referência (Roels, 2004, Roels *et al.*, 2003).

O método das tinas é muito utilizado, sendo frequente a sua aplicação com diversas variantes que procuram contornar dificuldades inerentes aos tipos de materiais a ensaiar (Svennberg e Wadso, 2003). Refira-se ainda, como exemplo de uma variação a este método, a utilização de um dispositivo que permite realizar este ensaio a baixa pressão, reduzindo a sua duração e fornecendo informação adicional relativa à separação entre transporte na fase vapor e fase líquida (Galbraith *et al.*, 2003).

Este método de ensaio é, dada a sua configuração, realizado em condições isotérmicas. Apesar de já vários autores terem tentado explorar métodos de ensaio onde fosse possível recriar situações não isotérmicas de transferência de vapor, Peukhuri (2003) por exemplo, os resultados não foram totalmente conclusivos e não existe ainda um método normalizado que permita avaliar correctamente este comportamento. Em geral os modelos de cálculo optam, por isso, por utilizar os dados de permeabilidade ao vapor obtidos em ensaios isotérmicos na generalidade das simulações, admitindo que a influência da variação de temperatura nos coeficientes de transporte é negligenciável.

4.4.2 Configurações testadas

Os ensaios de determinação das propriedades de transmissão de vapor foram realizados sobre provetes dos materiais objecto da determinação de curvas higroscópicas, ou seja, gesso cartonado (GC), gesso projectado (GP) e reboco de gesso e cal (GT). Este ensaio incidiu, não apenas nos materiais simples mas, também, em configurações desses materiais revestidos com esquemas de pintura tipicamente utilizados no interior dos edifícios portugueses.

Na Tabela 9 apresenta-se um resumo das configurações preparadas para este ensaio, com os materiais de base e as tintas seleccionadas.

Tabela 9– Configurações utilizadas nos ensaios de permeabilidade ao vapor

Config.	Base	Primário	Tinta
GC	12,5 mm GC	—	—
GC2	12,5 mm GC	—	Vinílica – 50 μm (2 demãos)
GC2A	12,5 mm GC	25 μm (1 demão)	Vinílica – 50 μm (2 demãos)
GC3	12,5 mm GC	—	Acrílica 1 – 50 μm (2 demãos)
GC3A	12,5 mm GC	25 μm (1 demão)	Acrílica 1 – 50 μm (2 demãos)
GP	11 mm GP	—	—
GP2	11 mm GP	—	Vinílica – 50 μm (2 demãos)
GP2A	11 mm GP	25 μm (1 demão)	Vinílica – 50 μm (2 demãos)
GP3	11 mm GP	—	Acrílica 1 – 50 μm (2 demãos)
GP3A	11 mm GP	25 μm (1 demão)	Acrílica 1 – 50 μm (2 demãos)
GT	10 mm GT	—	—
GT2	10 mm GT	—	Vinílica – 50 μm (2 demãos)
GT2A	10 mm GT	25 μm (1 demão)	Vinílica – 50 μm (2 demãos)
GT3	10 mm GT	—	Acrílica 2 – 50 μm (2 demãos)
GT3A	10 mm GT	25 μm (1 demão)	Acrílica 2 – 50 μm (2 demãos)
GC_41	12,5 mm GC_41		
GC3A_41	12,5 mm GC_41	1 demão	Acrílica 3 (2 demãos)
GC4A_41	12,5 mm GC_41	1 demão	Látex (2 demãos)

A produção dos provetes compreendeu a preparação dos elementos com os materiais base, segundo os procedimentos já referidos em 4.3.2, e a aplicação dos esquemas de pintura. Tendo em conta as dimensões das tinas de ensaio, os provetes foram preparados com uma área de (210×210) mm^2 e uma espessura de 12,5 mm no caso do gesso cartonado, 11 mm no caso do gesso projectado e 10 mm para o reboco de gesso e cal.

Para revestir os provetes, foram seleccionados três tipos de tinta de acabamento e um primário, acrílico aquoso, adaptado a utilização em interiores, sobre rebocos de gesso ou gesso cartonado. Foram utilizadas tintas de acabamento vinílicas ou acrílicas.

Paralelamente a estes ensaios, foram ainda testadas outras configurações no âmbito da Tarefa 2 do projecto de investigação "IEA ECBCS Annex 41", definida

como “Análise experimental de armazenamento de vapor”. Nesta tarefa, onde o autor foi um dos participantes, foi realizado um exercício comum de comparação inter-laboratorial de medição de propriedades de armazenamento de vapor do gesso cartonado (Roels, 2004). As configurações testadas nesse exercício corresponderam a gesso cartonado simples ou pintado com primário e dois tipos diferentes de tintas de acabamento: acrílica e látex. Estes provetes de gesso cartonado foram cortados de placas para utilização em sistemas de divisórias de uma marca diferente da utilizada nos provetes GC, e por isso identificados com o sufixo “41”.

4.4.3 Procedimento de ensaio

A determinação das características da transmissão de vapor das configurações seleccionadas baseou-se em ensaios de tina seca e tina húmida, realizados de acordo com a EN ISO 12572.

As condições dos ensaios descrevem-se na Tabela 10, onde se pode observar os valores de temperatura e humidade relativa impostos e a forma de os obter. As tinas de ensaio foram colocadas no interior de uma câmara climática, que assegurou uma das ambiências necessárias e o controlo da temperatura do conjunto.

Tabela 10 – Condições dos ensaios de transmissão de vapor

Ensaio	**Condições normalizadas ºC – %HR**	**Temperatura efectiva ºC**	**Humidade relativa efectiva (%)**	
			Câmara climática	**Tinas de ensaio**
A: Tina seca	23 – 0/50	23 ± 0,3	50 ± 3	0 ($CaCl_2$)
B: Tina húmida	23 – 50/93	23 ± 0,3	50 ± 3	94±0,6 (Sol. KNO_3)
C: Tina húmida	23 – 85/93	23 ± 0,3	85 ± 3	94±0,6 (Sol. KNO_3)

A preparação dos ensaios A e B implicou uma estabilização inicial dos provetes a 23 ºC e 50 % de humidade relativa, colocando-os no interior da câmara climática por um período suficiente para que, em três pesagens sucessivas, a sua variação de massa fosse inferior a 5 %. O ensaio C seguiu um procedimento semelhante sendo, no entanto, a humidade relativa da câmara climática regulada para 85 %.

Os provetes foram colocados nas tinas com a face frontal, pintada ou preparada para receber uma pintura, exposta à câmara climática e selados com parafina.

A configuração das tinas de ensaio é apresentada na Figura 41 e, na Figura 42, pode ser vista uma imagem do conjunto preparado para o ensaio. Tendo em conta as dimensões das tinas de ensaio, a área exposta dos provetes é de 0,039 m^2, superior ao valor de 0,02 m^2 indicado na norma e permitindo, por isso, limitar a 3 o número de provetes testados para cada configuração.

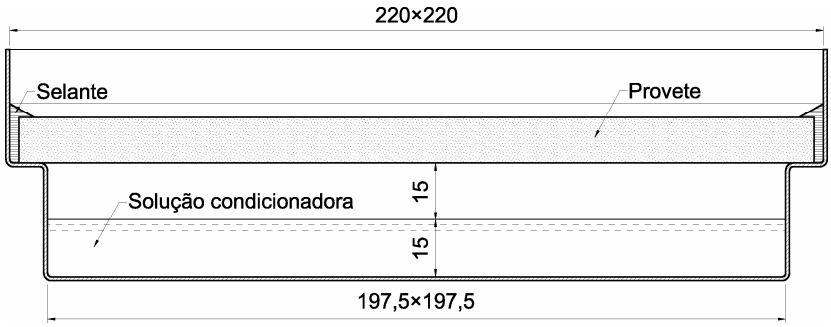


Figura 41 – Representação esquemática da tina de ensaio

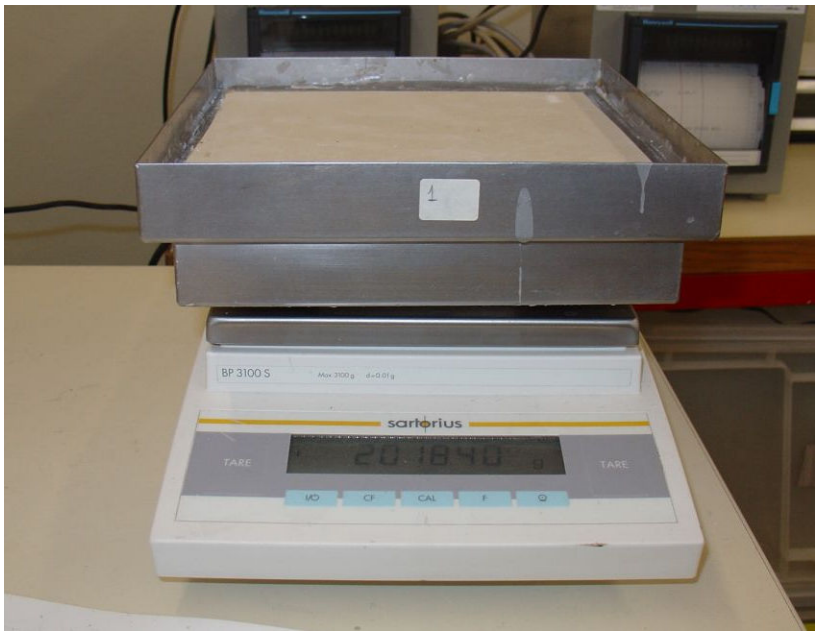


Figura 42 – Conjunto tina/provete durante pesagem

A realização dos ensaios, após a selagem dos provetes nas tinas, implica a pesagem regular de cada conjunto até que cinco valores da variação de massa por intervalo de tempo sejam constantes, com uma tolerância de ± 5 % da média desses valores. Após o cumprimento deste critério é possível, então, determinar os valores que caracterizam as propriedades de transmissão de vapor de cada provete. Tendo em conta que se testaram elementos bastante permeáveis, os intervalos de tempo adoptados entre

pesagens variaram de 24 h a 72 h. A temperatura e humidade relativa da câmara climática foram registadas regularmente, para controlo das condições de ensaio.

Os ensaios de tina húmida apresentaram algumas dificuldades na sua boa execução. A pequena distância entre a solução salina e a face inferior dos provetes aliada ao manuseamento manual das tinas no processo de pesagem levou, em alguns casos, ao contacto dos dois elementos, perturbando os resultados. Nos casos onde se verificou este problema os resultados correspondentes foram ignorados. Os resultados de ensaios de transmissão de vapor podem ser expressos por um conjunto de grandezas, relacionáveis, e cuja utilidade depende do contexto onde se aplicam esses resultados. A determinação destas grandezas implica, ainda, a inserção de algumas correcções, originadas pela configuração dos ensaios e descritas na EN ISO 12572.

A obtenção dos resultados, a partir das pesagens, inicia-se com o cálculo de uma regressão linear entre massa e tempo, excluindo a fase inicial do ensaio com comportamento não linear. A inclinação desta linha corresponde ao fluxo de humidade, G, em kg/s. A partir deste valor é possível definir a densidade de fluxo, g, em kg/(m^2·s), a partir do fluxo de humidade e da área exposta do provete (média aritmética da área da superfície livre superior e da superfície livre inferior), A, em m^2.

$$g = \frac{G}{A} \tag{73}$$

O cálculo da densidade de fluxo deve incluir, segundo a norma, uma correcção devida ao efeito de "lado escondido", c_{le}, que se pode estimar de acordo com a seguinte expressão:

$$c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1 + \exp\left(-2 \cdot \pi \cdot bl / d\right)} \right) \tag{74}$$

Onde

g_{le}	Densidade de fluxo de humidade medida	kg/(m^2·s)
g	Densidade de fluxo de humidade	kg/(m^2·s)
d	Espessura do provete	m
bl	Largura de apoio no bordo	m
S	Diâmetro hidráulico (quatro vezes a área de ensaio dividida pelo perímetro)	m

Tendo em conta a configuração das tinas e dos provetes, a aplicação desta expressão aos ensaios realizados definiu um valor de g / g_{le} igual ou inferior a 1,05.

A permeância ao vapor do elemento testado, W em kg/(m^2·s·Pa), calcula-se com a expressão seguinte, incluindo a correcção definida pela expressão (74):

$$W = \frac{G}{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v} \tag{75}$$

Onde Δp_v representa o gradiente de pressão de vapor, em Pa, entre as duas faces do provete. Como alguns dos elementos testados apresentavam uma permeabilidade elevada, foi aplicada uma correcção a W para ter em conta o efeito da resistência da camada de ar sobre a superfície do provete, definida a partir da expressão (68), e entre o provete e a solução salina, de acordo com a seguinte expressão:

$$W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67 + 90 \cdot vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}} \tag{76}$$

Onde

d_a	Espessura da camada de ar subjacente ao provete	m
δ_a	Permeabilidade ao vapor do ar	kg/(m·s·Pa)
vv	Velocidade do ar sobre o provete	m/s

A permeabilidade ao vapor do ar pode ser definida pela fórmula de Schrimer.

$$\delta_a = \frac{26{,}1 \times 10^{-6}}{R_v \cdot (T + 273{,}15)} \tag{77}$$

A partir da permeância pode definir-se a resistência ao vapor, Z, em m^2·s·Pa/kg:

$$Z = \frac{1}{W} \tag{78}$$

E tendo em conta a espessura do provete, d, define-se a permeabilidade ao vapor, δ_p, em kg/(m·s·Pa), de acordo com:

$$\delta_p = W \cdot d \tag{79}$$

O factor de resistência ao vapor, μ, define-se por:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \tag{80}$$

Por fim, é possível definir a espessura da camada de ar de difusão equivalente, s_d em m, através de:

$$s_d = \mu \cdot d \tag{81}$$

Ou

$$s_d = \delta_a \cdot Z \tag{82}$$

4.4.4 Resultados

Os resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor, realizados sobre cada provete, podem observar-se da Figura 43 à Figura 48. A descrição detalhada dos ensaios que deram origem a estes valores encontra-se nas fichas de ensaio LFC-FEUP NR_PV1 a LFC-FEUP NR_PV52, apresentadas no Anexo B. Optou-se por utilizar a espessura da camada de ar de difusão equivalente, s_d, como parâmetro de caracterização, para facilitar a análise dos resultados. Agruparam-se, em cada gráfico, os resultados de provetes dispondo de esquemas de pintura equivalentes. Os valores da humidade relativa média no interior do provete, durante o ensaio, foram usados como abcissa para a representação dos resultados no gráfico

Os resultados apresentados na Figura 43 referem-se ao ensaio de provetes constituídos por materiais de revestimento sem pintura e por isso homogéneos ou encarados como elementos homogéneos, no caso do gesso cartonado.

Como se pode verificar, os valores de s_d apurados para estes provetes são reduzidos, e como a sua espessura não é desprezável, os materiais de base utilizados neste trabalho apresentam uma elevada permeabilidade ao vapor. Observa-se também uma diminuição de s_d com a humidade relativa média no interior do provete, o que corresponde ao comportamento típico dos materiais porosos (Freitas e Pinto, 1998). O reboco de gesso e cal apresentou uma permeabilidade, em geral, mais elevada que os outros dois materiais, especialmente no ensaio de tina seca. Os dois tipos de gesso cartonado apresentaram resultados muito semelhantes.

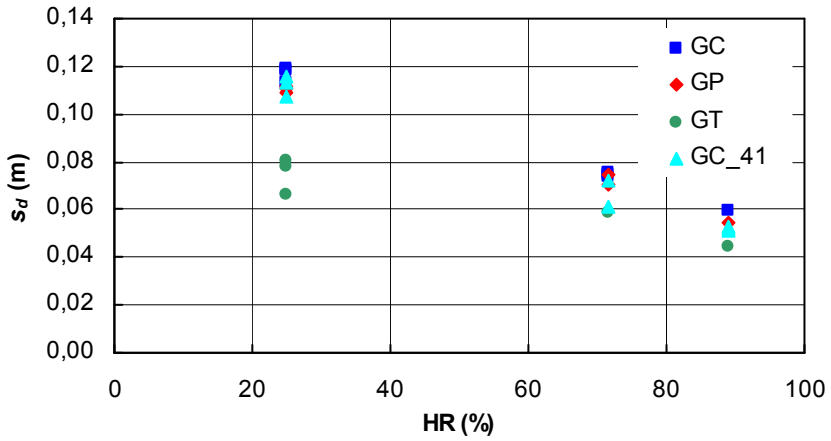


Figura 43 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes sem pintura

A variabilidade dos resultados observados foi, em geral, reduzida. Note-se que o controlo da incerteza associado a esta metodologia só é garantido pela EN ISO 12572 a elementos com valores de s_d inferiores a 0,1 m. Os valores obtidos nos ensaios de provetes não pintados estariam, por isso, fora do âmbito da norma. Dada a pequena variabilidade dos resultados obtidos e o facto de os valores estarem próximos do limite de aplicabilidade da norma, optou-se pela sua aceitação como sendo representativos dos materiais testados.

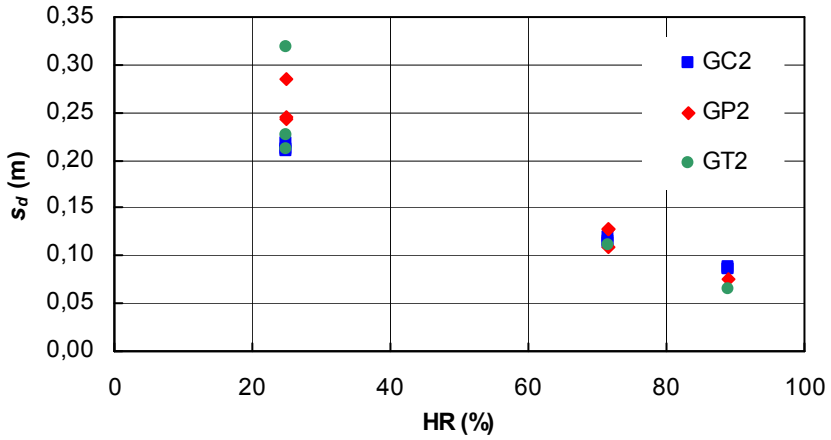


Figura 44 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes pintados com tinta vinílica

Nos resultados dos ensaios em provetes pintados com tinta vinílica, apresentados na Figura 44, os valores de s_d apurados foram bastante mais elevados do que no caso

dos provetes sem pintura. Foi possível observar, novamente, a diminuição do valor de s_d com a humidade relativa média no interior do provete. A variabilidade dos resultados foi, em geral, maior do que nos provetes sem pintura, o que se pode ficar a dever ao facto de pequenas diferenças da espessura de aplicação da pintura implicarem variações significativas da permeância dessa camada (Goossens, 2003).

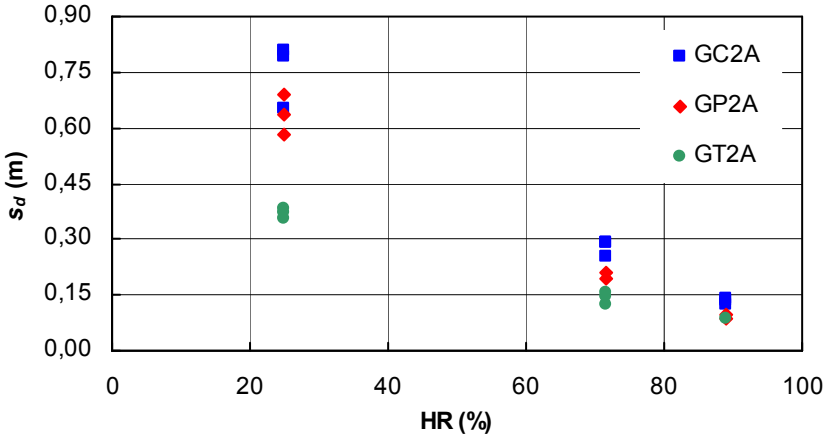


Figura 45 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes pintados com primário e tinta vinílica

Os comentários sugeridos pelo gráfico da Figura 44 podem estender-se aos resultados obtidos com os restantes esquemas de pintura, apresentados nos gráficos da Figura 45 à Figura 48. Também se pode verificar que a resistência ao vapor adicional, introduzida pelos esquemas de pintura utilizados, varia com o material de base.

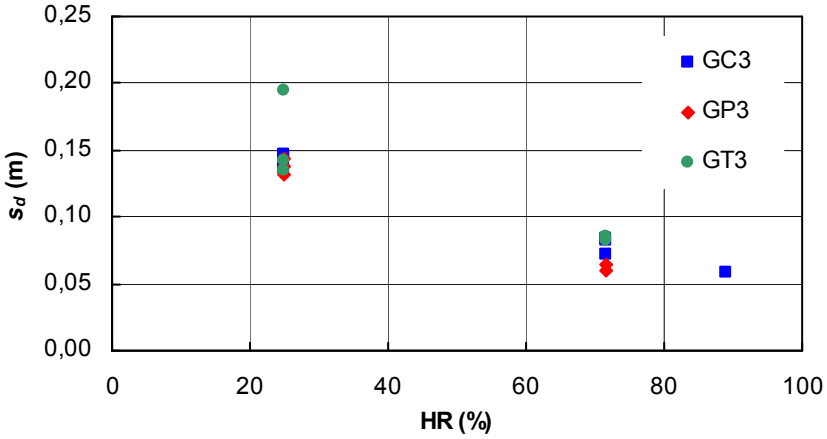


Figura 46 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes pintados com tinta acrílica

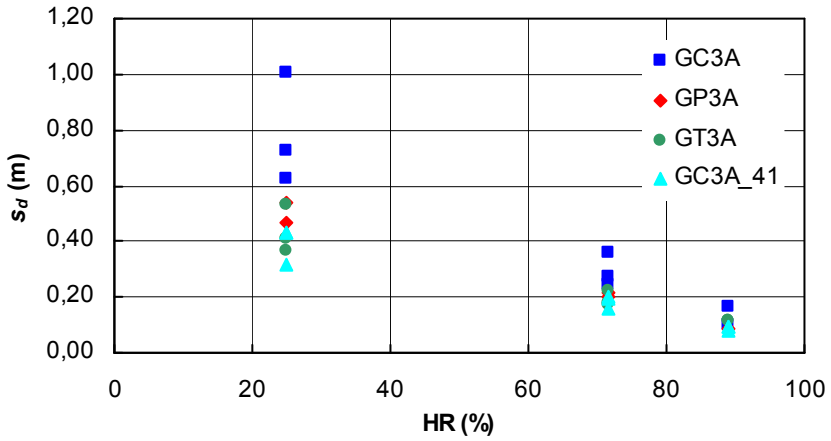


Figura 47 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes pintados com primário e tinta acrílica

A comparação dos resultados obtidos em provetes pintados, com e sem aplicação prévia de primário, permite concluir que este introduz a parcela mais elevada da resistência ao vapor adicional do esquema de pintura. No caso do acabamento com tinta acrílica esse efeito é especialmente notório, uma vez que, sem primário, a resistência adicional do esquema de pintura é muito reduzida.

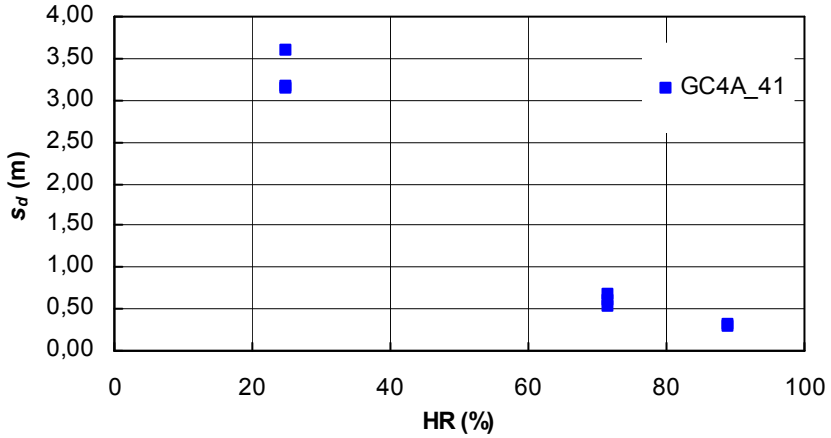


Figura 48 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor em provetes pintados com primário e tinta de látex

Na Tabela 11 é possível observar os resultados obtidos para a espessura de ar equivalente, s_d, resultantes dos ensaios realizados, sendo apresentados o valor médio e o desvio padrão para todas as configurações testadas. Como se pode verificar, para alguns resultados não se apresenta o desvio padrão. Esses casos correspondem a

ensaios onde apenas se adoptou o resultado de um dos provetes testados. Como já foi referido, os ensaios onde a tina contém uma solução aquosa podem ser perturbados pelo contacto desta com os provetes. No caso do ensaio C, tendo sido o último a ser efectuado para cada configuração, não só foi iniciado com menos provetes devido à destruição de alguns deles no ensaio precedente de tina húmida, como também aí se verificou o mesmo tipo de perturbação. Os resultados do ensaio C têm, por isso, uma incerteza associada que não é negligenciável. Estes resultados destinam-se a fornecer um parâmetro de ajuste, para definição da função matemática de permeabilidade ao vapor de cada configuração, e a sua variabilidade afecta relativamente pouco essa função no intervalo mais significativo, para as simulações numéricas a efectuar, situado entre 30 % e 80 % de humidade relativa. Optou-se, por isso, pela não repetição destes ensaios, aceitando os valores obtidos, uma vez que a construção de novos provetes e subsequente repetição implicava uma perda de tempo considerável para a sucessão de tarefas prevista.

Tabela 11 – Resumo dos resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor

Config.	**A – Tina Seca**		**B – Tina Húmida**		**C – Tina Húmida**	
	$s_{d,med}$	$s_{d,dp}$	$s_{d,med}$	$s_{d,dp}$	$s_{d,med}$	$s_{d,dp}$
GC	0,12	0,003	0,075	0,001	0,059	—
GC2	0,21	0,004	0,12	0,004	0,087	0,001
GC2A	0,75	0,087	0,28	0,023	0,13	0,008
GC3	0,14	0,006	0,079	0,007	0,059	—
GC3A	0,79	0,197	0,29	0,061	0,13	0,046
GP	0,11	0,001	0,072	0,003	0,055	—
GP2	0,26	0,024	0,12	0,010	0,076	—
GP2A	0,64	0,052	0,20	0,013	0,091	0,010
GP3	0,14	0,006	0,062	0,002	—	—
GP3A	0,50	0,053	0,21	0,007	0,085	—
GT	0,075	0,008	0,059	—	0,045	—
GT2	0,25	0,058	0,11	—	0,065	—
GT2A	0,37	0,013	0,14	0,019	0,085	—
GT3	0,16	0,033	0,084	0,003	—	—
GT3A	0,44	0,085	0,19	0,028	0,11	0,000
GC_41	0,11	0,004	0,066	0,007	0,052	0,001
GC3A_41	0,39	0,066	0,19	0,022	0,088	0,007
GC4A_41	3,30	0,265	0,59	0,078	0,30	0,020

Uma pequena comparação com valores referidos por outros autores permitiu verificar que os valores obtidos para os materiais base são plausíveis. Os valores referidos em Kumaran (1996) e Roels e Carmeliet (2005) para o gesso cartonado e em Adan (1994) para o gesso projectado estão próximos dos valores encontrados neste trabalho. Em Veiga (2003) é possível encontrar valores para rebocos de cal aérea próximos do reboco de gesso e cal testado.

Em relação ao efeito dos esquemas de pintura não foram encontrados valores directamente comparáveis com estes, excepto para os provetes associados ao exercício comum do "IEA ECBCS Annex41". Neste caso os resultados obtidos pelo autor mostraram uma boa concordância com os dos restantes participantes.

Importa ainda realçar que a diminuição substancial da permeabilidade ao vapor, observada nas configurações pintadas com primário e tinta de acabamento final, não se observava em soluções de acabamento tradicionais para paredes interiores. Os resultados apresentados em Veiga e Tavares (2002) demonstraram que é possível ter acabamentos sobre rebocos antigos, à base de cal, onde a diminuição de permeabilidade é negligenciável.

Após a obtenção dos resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor das várias configurações testadas, procurou-se aprofundar a informação aí obtida. Esse estudo, apresentado a seguir, consistiu na separação da componente correspondente à pintura, dos valores de s_d obtidos para os provetes pintados, e na definição de curvas de variação dos parâmetros por ajuste aos pontos obtidos.

4.4.5 Análise dos Resultados

O ajuste de funções aos resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor permite uma análise mais profunda do comportamento dos elementos em estudo. É, também, um passo necessário para concretizar a simulação numérica da transferência de humidade nesses elementos.

Vários autores apresentaram já metodologias para o ajuste de funções a resultados de ensaios de permeabilidade ao vapor, bem como as expressões daí resultantes para alguns materiais de construção comuns, podendo citar-se como exemplo os artigos Burch *et al.* (1995 e 1992). Um grupo de investigadores da "Glasgow Caledonian University" aprofundou este assunto (Galbraith *et al.*, 1999 e 1998), com uma análise sistemática do ajuste de funções matemáticas a resultados de ensaios da permeabili-

dade ao vapor. Apresenta-se em seguida, de forma sucinta, a metodologia sugerida por esses investigadores.

Num ensaio de permeabilidade ao vapor, em condições isotérmicas, admite-se que a densidade de fluxo de humidade através do elemento em estudo se pode determinar a partir do gradiente de pressão de vapor, de acordo com a lei de difusão de Fick, pela seguinte expressão:

$$g = -\delta_p \frac{dp_v}{dx} \tag{83}$$

Nesta expressão, a densidade de fluxo de vapor é directamente proporcional ao gradiente de vapor. No entanto, é consensual que o fluxo de vapor apresenta também uma dependência face à humidade relativa, pelo que é possível escrever:

$$\delta_p = \delta_p(\phi) \tag{84}$$

A integração da equação (83), resulta em:

$$\int_{x_1}^{x_2} g \cdot dx = -\int_{p_{v1}}^{p_{v2}} \delta_p(\phi) \cdot dp_v = -\int_{\phi_1}^{\phi_2} \delta_p(\phi) \cdot p_{sat} \cdot d\phi \tag{85}$$

Com a introdução do conceito de permeabilidade média, $\overline{\delta_p}$, relacionada com os valores fronteira da humidade relativa, ϕ_1 e ϕ_2, impostos através da espessura L do material testado, pode escrever-se:

$$g = -\frac{\overline{\delta_p} \cdot (p_{v2} - p_{v1})}{L} = -\frac{\overline{\delta_p} \cdot p_{sat} \cdot (\phi_2 - \phi_1)}{L} \tag{86}$$

Onde $\overline{\delta_p}$ e $\delta_p(\phi)$ se relacionam por:

$$\overline{\delta_p} = \frac{1}{\phi_2 - \phi_1} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \delta_p(\phi) \cdot d\phi \tag{87}$$

Esta relação, estabelecida para limites definidos da humidade relativa, pode ser observada no gráfico da Figura 49. Note-se que o valor da permeabilidade média, $\overline{\delta_p}$, directamente medido no ensaio de um provete, onde se verificavam os valores de humidade relativa ϕ_1 e ϕ_2, não coincide com o valor $\delta_p((\phi_2 + \phi_1)/2)$, apesar de ser normalmente próximo desse valor.

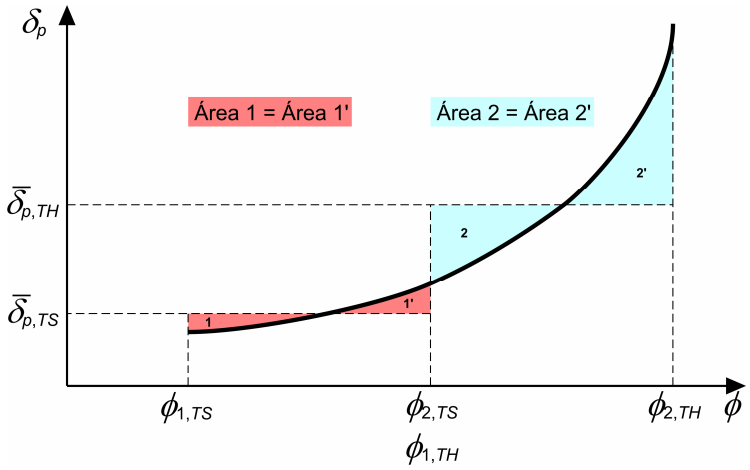


Figura 49 – Relação da permeabilidade variável com a humidade relativa e a permeabilidade média

Estas considerações permitem concluir que é possível obter a função matemática, que descreve a permeabilidade ao vapor de um dado material, a partir de um conjunto de valores da permeabilidade média obtidos em ensaios laboratoriais.

No trabalho citado, em conjunto com estas considerações, foi ainda utilizado um ajuste estatístico de várias funções matemáticas a dados laboratoriais. Das várias funções testadas, concluiu-se que a função do tipo

$$\delta_p(\phi) = A_1 + A_2 \cdot \phi^{A_3} \tag{88}$$

é a que melhor se ajusta aos valores encontrados para os diferentes materiais de construção analisados.

Esta metodologia foi aplicada aos resultados apresentados na subsecção anterior. A expressão (88) foi adoptada como função descritora da permeabilidade ao vapor dos materiais testados. Numa primeira fase foi realizado o ajuste aos resultados obtidos para os provetes sem pintura. Com o conhecimento das funções permeabilidade dos materiais base foi, depois, possível definir o valor das propriedades de transferência de humidade referentes apenas ao efeito da pintura. Consecutivamente, foi possível obter o ajuste para esses valores.

O esquema da Figura 50 permite observar o perfil de humidade relativa admitido para os provetes pintados, durante os ensaios de permeabilidade, de acordo com os princípios enunciados.

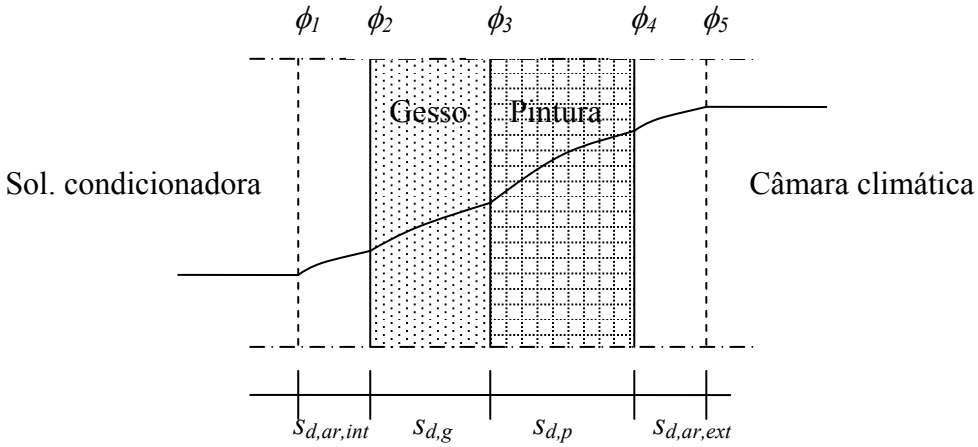


Figura 50 – Perfil de humidade dos provetes durante os ensaios de permeabilidade ao vapor

A concretização da metodologia de definição da função permeabilidade, dos materiais testados neste trabalho, pode ser sistematizada num procedimento de cálculo que se descreve em seguida.

A definição da função permeabilidade $\delta_p(\phi)$, de acordo com a expressão (88), e a sua aplicação na expressão (87), permite escrever para uma camada homogénea a cujas extremidades se associam os valores de humidade relativa ϕ_i e ϕ_{i+1}:

$$\overline{\delta_p} = \frac{1}{\phi_{i+1} - \phi_i} \int_{\phi_i}^{\phi_{i+1}} \left(A_1 + A_2 \cdot \phi^{A_3} \right) \cdot d\phi \tag{89}$$

Realizando a integração da expressão (89), obtém-se:

$$A_1 \cdot (\phi_{i+1} - \phi_i) + \frac{A_2}{A_3 + 1} \left(\phi_{i+1}^{A_3+1} - \phi_i^{A_3+1} \right) - \overline{\delta}_p \cdot (\phi_{i+1} - \phi_i) = 0 \tag{90}$$

O conhecimento de pelo menos três conjuntos de valores $\overline{\delta}_p, \phi_{i+1}, \phi_i$, referentes a um determinado material, obtidos em três ensaios de permeabilidade em zonas distintas do espectro de humidade relativa, e a sucessiva aplicação da expressão (90), permite constituir um sistema de três equações a três incógnitas. A resolução desse sistema fornece os valores dos parâmetros A_1, A_2 e A_3, e a consequente definição da função $\delta_p(\phi)$ do material em causa.

Como se trata de sistemas de equações não lineares, que podem não ter uma solução exacta, foi utilizado na sua resolução um método de análise do tipo método dos mínimos quadrados. Mais concretamente foi aplicado o algoritmo "Levenberg-Marquardt", também aplicado pelos autores já citados (Galbraith *et al.*, 1998, Goossens, 2003). No caso deste trabalho, a sua aplicação foi realizada através do módulo de optimização do MATLAB. Este método pode ser aplicado em situações onde existe um número redundante de ensaios realizados, que podem melhorar o nível de confiança na curva obtida.

A determinação da função $\delta_p(\phi)$, através desta metodologia, necessitou ainda da adopção de condições fronteira, que foram desde logo assumidas na expressão (76), relativas aos valores $s_{d,ar,i}$ e $s_{d,ar,e}$. A adopção destes valores permite estabelecer os valores da humidade relativa nas superfícies do material em análise, a partir das condições definidas para cada ensaio. Na Tabela 12 apresenta-se o valor dos parâmetros, obtidos por este processo, para as funções de variação da permeabilidade ao vapor com a humidade relativa dos materiais de base.

Tabela 12 – Parâmetros de ajuste da função permeabilidade ao vapor

Material	$\delta_p(\phi) = A_1 + A_2 \cdot \phi^{A_3}$		
	A_1	A_2	A_3
GC	$1{,}7229\times10^{-11}$	$2{,}8554\times10^{-11}$	1,8724
GP	$1{,}8290\times10^{-11}$	$2{,}9086\times10^{-11}$	3,2098
GT	$2{,}6433\times10^{-11}$	$2{,}2962\times10^{-11}$	3,1905
GC_41	$1{,}7356\times10^{-11}$	$3{,}5731\times10^{-11}$	1,8287

A representação gráfica das funções obtidas pode ser observada na Figura 51. É visível que a forma típica de desenvolvimento deste tipo de função se adapta aos valores correspondentes aos resultados dos ensaios, representados por pontos no gráfico. Note-se que esta representação pode conduzir a um erro de interpretação. De acordo com a metodologia seguida, e pelas razões já referidas, não é inteiramente correcto associar os resultados, obtidos nos ensaios, ao valor médio da humidade relativa no interior da camada de material estudado. Usou-se essa opção apenas para facilitar a visualização simultânea da função $\delta_p(\phi)$ e dos valores $\overline{\delta_p}$.

No caso destes materiais, dada a pequena variação da permeabilidade com a humidade relativa, esta discussão parece demasiado académica. Uma técnica de ajuste mais simples teria resultado em funções quase coincidentes com as obtidas pelo processo referido, tomando como os três pontos necessários os pares de valores permeabilidade medida e valor médio da humidade relativa no interior do material. No entanto, o tratamento dos resultados dos provetes pintados, que se apresenta em seguida, justifica o recurso a esse método para todos os resultados analisados.

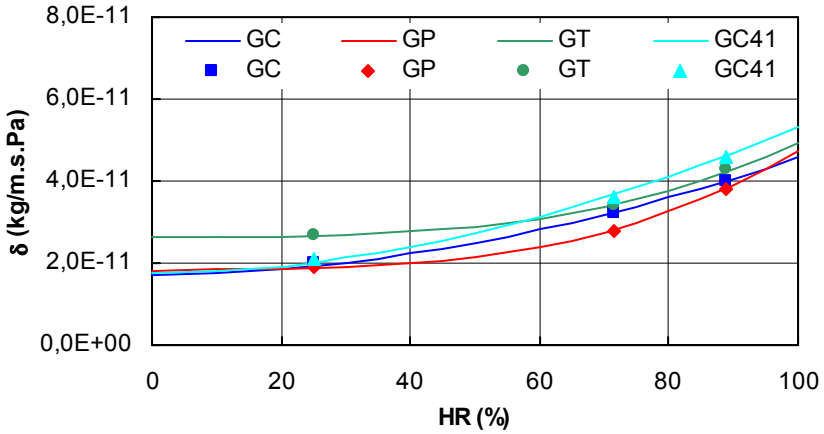


Figura 51 – Variação da permeabilidade ao vapor com a humidade relativa para os materiais base

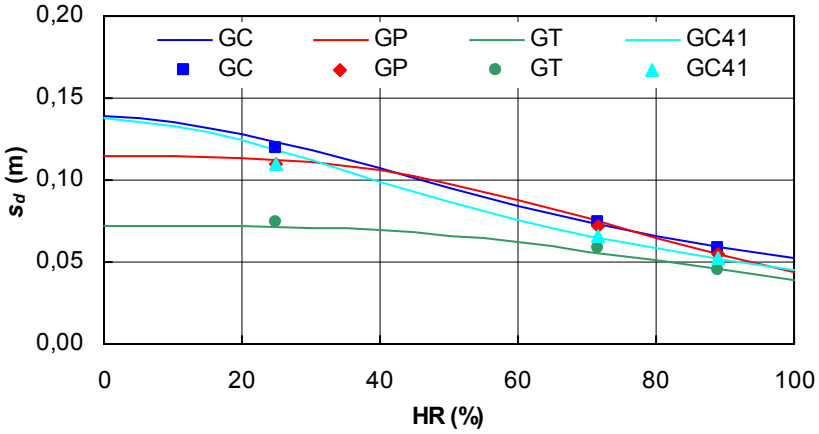


Figura 52 – Variação da espessura da camada equivalente de ar com a humidade relativa para os materiais base

A Figura 52 permite visualizar as mesmas funções mas agora aplicadas aos valores da espessura da camada de ar de difusão equivalente, s_d, que podem ser obtidos a

partir da permeabilidade ao vapor pela expressão (91), tendo em conta a espessura *d* da camada em causa.

$$s_d = \frac{\delta_a \cdot d}{\delta_p} \tag{91}$$

Após a definição da função permeabilidade para os materiais base, foi possível retirar o valor da espessura da camada de ar de difusão equivalente para os esquemas de pintura aplicados sobre os diferentes materiais. Com base no esquema da Figura 50 é possível estabelecer um sistema de equações para levantar as incógnitas do problema. Estas são o valor da humidade relativa na interface entre o material base e a pintura, ϕ_3, e os valores da espessura média da camada de ar de difusão equivalente para o material base, $\overline{s}_{d,g}$, e a pintura, $\overline{s}_{d,p}$, em cada ensaio.

A partir do valor determinado em cada ensaio, para a espessura da camada de ar equivalente do material base e pintura, $\overline{s}_{d,g+p}$, é possível escrever a equação:

$$\overline{s}_{d,g+p} = \overline{s}_{d,g} + \overline{s}_{d,p} \tag{92}$$

A continuidade da densidade de fluxo de vapor entre o material base e a pintura permite escrever:

$$\frac{\delta_a}{\overline{s}_{d,g}}(\phi_2 - \phi_3) = \frac{\delta_a}{\overline{s}_{d,p}}(\phi_3 - \phi_4) \tag{93}$$

Por fim, a aplicação da expressão (89) novamente à camada de gesso, mas agora com o conhecimento dos parâmetros da função, definidos a partir dos ensaios dos materiais base sem pintura, resulta em:

$$\frac{\delta_a \cdot d}{\overline{s}_{d,g}}(\phi_3 - \phi_2) = A_1 \cdot (\phi_3 - \phi_2) + \frac{A_2}{A_3 + 1}\left(\phi_3^{A_3+1} - \phi_2^{A_3+1}\right) \tag{94}$$

A aplicação sistemática do sistema constituído pelas equações (92), (93) e (94) permitiu retirar dos resultados dos ensaios os valores correspondentes aos vários esquemas de pintura. Como se tratou novamente de um sistema de equações não lineares, a sua resolução foi efectuada no módulo de optimização do MATLAB. Na Tabela 13 resumem-se os resultados obtidos. Optou-se por não analisar a influência do esquema de pintura tipo 3 dada a pequena resistência que introduz nos provetes.

Tabela 13 – Espessura da camada de ar de difusão equivalente dos esquemas de pintura e humidade relativa média da camada de pintura

Config.	A − Tina Seca		B − Tina Húmida		C − Tina Húmida	
	$\bar{s}_{d,p}$ (m)	$(\phi_4+\phi_3)/2$ (-)	$\bar{s}_{d,p}$ (m)	$(\phi_4+\phi_3)/2$ (-)	$\bar{s}_{d,p}$ (m)	$(\phi_4+\phi_3)/2$ (-)
GC2	0,081	0,398	0,052	0,601	0,031	0,866
GC2A	0,61	0,297	0,22	0,666	0,072	0,873
GC3A	0,65	0,295	0,23	0,667	0,072	0,873
GP2	0,15	0,359	0,054	0,603	0,022	0,865
GP2A	0,53	0,296	0,14	0,650	0,037	0,868
GP3A	0,39	0,309	0,15	0,653	0,031	0,867
GT2	0,18	0,424	0,059	0,620	0,020	0,866
GT2A	0,30	0,301	0,091	0,639	0,041	0,870
GT3A	0,37	0,293	0,14	0,659	0,036	0,874
GC3A_41	0,26	0,336	0,14	0,651	0,039	0,869
GC4A_41	3,2	0,261	0,54	0,694	0,25	0,883

A aplicação a estes resultados do procedimento de definição da função permeabilidade permite obter a função $\delta_p(\phi)$, para cada esquema de pintura sobre cada material base. Neste caso, e tendo em conta o tipo de aplicação destes resultados que é feito no trabalho de simulação referido nos capítulos subsequentes, optou-se por apresentar a função $s_d(\phi)$. A relação desta com a função permeabilidade estabelece-se por aplicação da expressão (91), podendo escrever-se então:

$$s_d = \frac{\delta_a \cdot d}{A_1 + A_2 \cdot \phi^{A_3}} \tag{95}$$

Os parâmetros obtidos para as funções de variação da espessura equivalente da camada de ar, com a humidade relativa, dos esquemas de pintura sobre cada material base, são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros de ajuste da função espessura equivalente da camada de ar

Config.	$s_d = \frac{\delta_a \cdot d}{A_1 + A_2 \cdot \phi^{A_3}}$			
	A_1	A_2	A_3	d (m)
GC2	$6{,}79\times10^{-14}$	$3{,}19\times10^{-13}$	2,025	$5{,}0\times10^{-5}$
GC2A	$2{,}25\times10^{-14}$	$4{,}12\times10^{-13}$	6,222	$7{,}5\times10^{-5}$
GC3A	$2{,}16\times10^{-14}$	$6{,}17\times10^{-13}$	7,749	$7{,}5\times10^{-5}$
GP2	$3{,}01\times10^{-14}$	$6{,}24\times10^{-13}$	2,907	$5{,}0\times10^{-5}$
GP2A	$2{,}51\times10^{-14}$	$8{,}44\times10^{-13}$	6,031	$7{,}5\times10^{-5}$
GP3A	$3{,}67\times10^{-14}$	$1{,}42\times10^{-12}$	8,471	$7{,}5\times10^{-5}$
GT2	$1{,}41\times10^{-14}$	$7{,}66\times10^{-13}$	3,525	$5{,}0\times10^{-5}$
GT2A	$3{,}23\times10^{-14}$	$5{,}00\times10^{-13}$	3,197	$7{,}5\times10^{-5}$
GT3A	$3{,}82\times10^{-14}$	$9{,}67\times10^{-13}$	7,354	$7{,}5\times10^{-5}$
GC3A_41	$5{,}48\times10^{-14}$	$8{,}75\times10^{-13}$	7,344	$7{,}5\times10^{-5}$
GC4A_41	$3{,}53\times10^{-15}$	$8{,}94\times10^{-14}$	4,118	$7{,}5\times10^{-5}$

A representação gráfica das funções obtidas pode ser observada da Figura 53 à Figura 56. Note-se que, mais uma vez, se associou os resultados obtidos nos ensaios ao valor médio da humidade relativa no interior da pintura.

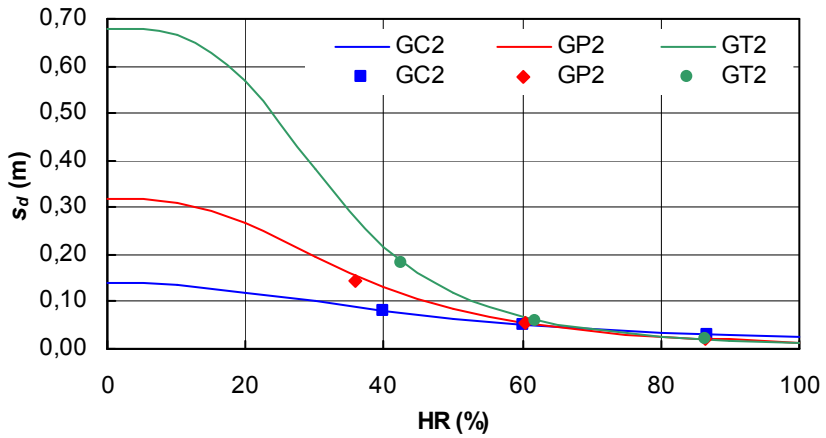


Figura 53 – Variação da espessura da camada equivalente de ar com a humidade relativa para esquemas de pintura do tipo 2

Uma primeira análise dos resultados referentes ao esquema de pintura 2 aplicado sobre reboco de gesso e cal gera algumas reservas ao tipo de ajuste realizado. A curva obtida parece pouco plausível para valores da humidade relativa inferiores a 30 %.

Neste caso específico, uma função matemática de tipo diferente poderia ser mais adequada para o ajuste a estes resultados. Dada a pouca relevância dos valores da permeabilidade ao vapor para valores reduzidos da humidade relativa, optou-se por não testar outros ajustes. Em todos os outros ajustes realizados, este tipo de resultado não foi notório.

Os resultados da Figura 53 permitem confirmar a observação de diferenças dos valores das propriedades de transmissão de vapor de um determinado esquema de pintura, dependentes do tipo de material base de aplicação desse esquema. Essas diferenças assumem proporções mais significativas para valores da humidade relativa mais reduzidos. A observação dos resultados correspondentes aos outros esquemas de pintura analisados não permite, no entanto, detectar um padrão para essas diferenças.

A pintura do tipo 2, vinílica sem aplicação prévia de primário, apresenta os valores s_d mais elevados se aplicada sobre reboco de gesso e cal e mais reduzidos se o material base for gesso cartonado. Os valores intermédios surgem para a aplicação sobre o gesso projectado.

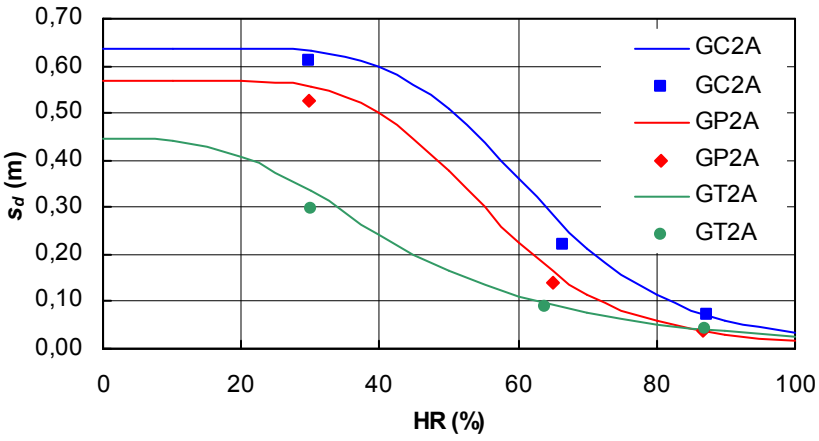


Figura 54 – Variação da espessura da camada equivalente de ar com a humidade relativa para esquemas de pintura do tipo 2A

Os resultados obtidos para o esquema do tipo 2A, pintura vinílica com aplicação prévia de primário, vão no sentido inverso aos anteriores. Aqui é a aplicação sobre gesso cartonado que evidencia valores s_d mais elevados e a aplicação em reboco de gesso e cal origina os valores mais reduzidos. Nota-se também um maior afastamento, entre as várias curvas associadas à aplicação sobre cada material base, ao longo de todo o espectro de humidade relativa.

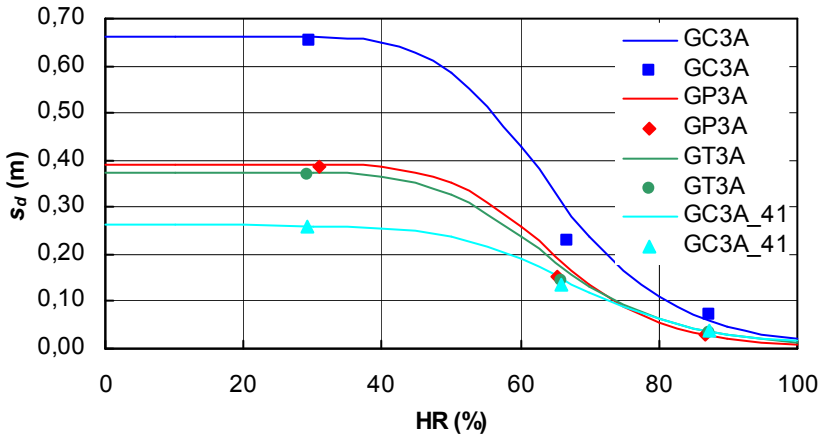


Figura 55 – Variação da espessura da camada equivalente de ar com a humidade relativa para esquemas de pintura do tipo 3A

A Figura 55 mostra os resultados obtidos para o esquema de pintura 3A, correspondente a uma pintura acrílica aplicada sobre primário. Os valores de s_d mais elevados verificam-se novamente para a aplicação sobre gesso cartonado. Mas neste caso a aplicação sobre gesso projectado e reboco de gesso e cal origina valores praticamente coincidentes.

É também interessante comparar os resultados obtidos para GC3A e GC3A_41, duas configurações aparentemente coincidentes, correspondentes à aplicação sobre gesso cartonado de primário e pintura acrílica. A origem diferente de todos os componentes destes elementos originou valores s_d muito distintos. Esta observação impõe novas limitações à generalização da aplicação em simulações numéricas das funções obtidas, baseada em descrições dos elementos construtivos que refiram de forma genérica os seus componentes.

A Figura 56 apresenta os valores obtidos para a aplicação de primário e pintura de látex sobre gesso cartonado. É possível constatar o elevado valor de s_d que uma pintura de interiores pode exibir.

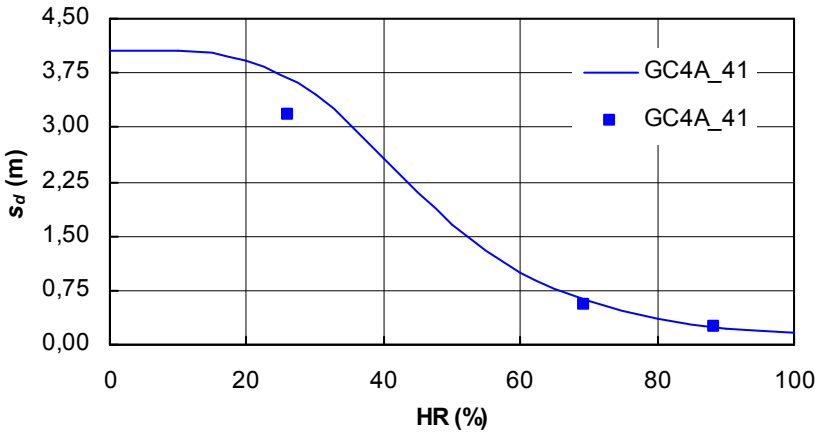


Figura 56 – Variação da espessura da camada equivalente de ar com a humidade relativa para o esquema de pintura do tipo 4A

O ajuste de funções que permitem descrever, com precisão, as propriedades de transmissão de vapor de materiais de construção, é um passo fundamental para o trabalho numérico desenvolvido no Capítulo 6. Em conjunto com as curvas higroscópicas definidas para os materiais de revestimento estudados no presente Capítulo, é possível estudar numericamente o comportamento higrotérmico de elementos de construção que incluem um revestimento base e uma pintura, muito comuns na construção nacional.

4.5 Determinação Experimental do MBV

4.5.1 Introdução

A curva higroscópica dos materiais de construção e a sua permeabilidade ao vapor são propriedades importantes para a definição da capacidade de armazenamento de humidade dos elementos construtivos. Mas seria interessante dispor de uma propriedade determinada experimentalmente que, só por si, indique claramente qual é a capacidade de armazenamento de humidade de um elemento construtivo exposto ao ar de um compartimento.

A indústria de materiais de construção também tem mostrado interesse em promover os seus produtos com a indicação da sua eventual capacidade de moderação das variações de humidade do ambiente. A existência de uma propriedade única, com

significado físico mas de fácil compreensão, que permitisse a classificação de materiais de construção, seria por isso bem recebida pela indústria.

Nos últimos dez anos é possível encontrar trabalhos de vários autores onde se procura não só demonstrar a importância da capacidade de armazenamento de humidade dos materiais mas, simultaneamente, definir uma propriedade caracterizadora desse comportamento.

O parâmetro "água disponível", A_w, proposto por Padfield (1998) e já referido na subsecção 2.5.5, corresponde a uma dessas tentativas. Um dos seus defeitos prende-se com o facto de caracterizar um material e não um elemento composto. Num revestimento pintado, este pormenor é obviamente muito relevante.

Um método para caracterizar a capacidade de armazenamento de humidade em madeira foi desenvolvido por Time (1998 e 2002). Esta autora obteve relações lineares entre um parâmetro relacionado com a variação de massa de um provete e a raiz quadrada do tempo, em ensaios de provetes de madeira em regime dinâmico de variação da humidade relativa.

Uma função de resposta à humidade foi desenvolvida por investigadores da Universidade de Essen (Reick e Setzer, 1998), combinando as propriedades de difusão e adsorção. O objectivo principal do desenvolvimento destas funções seria a determinação de fluxos de vapor material-ar de forma simplificada.

No trabalho de Mitamura *et al.* (2001) foram determinadas regressões lineares de variação da massa dos materiais ensaiados com as variações de humidade relativa de células de ensaio, onde os materiais presentes tinham uma área suficientemente grande para condicionar essas variações. A inclinação das rectas obtidas por regressão poderia ser um indicador da capacidade de armazenamento de humidade dos materiais. Este autor não conseguiu, no entanto, obter regressões suficientemente boas para apoiar a teoria testada.

A necessidade de uma propriedade simples para caracterizar a capacidade de armazenamento de humidade dos materiais de construção levou a que, no Japão, fosse elaborada a norma JIS A 1470-1 (JIS, 2002), designada na versão em inglês por: "Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity – Part 1: Response method of humidity". Esta norma estabelece dois procedimentos de ensaio para determinação da eficiência de materiais de construção em processos de adsorção/desadsorção. Um dos ensaios consiste em estabilizar um

provete a uma determinada humidade relativa, colocá-lo em seguida numa ambiência com humidade relativa superior durante um período de 24h e durante o período seguinte de 24h recolocar o provete na ambiência original. O outro ensaio implica a exposição de um provete a um ciclo igual ao anterior, com 4 repetições. Este ensaio é de simples realização e permite obter valores numéricos em g/m^2 correspondentes à máxima adsorção e desadsorção em cada ciclo.

Um grupo de investigadores nórdicos desenvolveu um procedimento de ensaio de materiais ou elementos de construção também destinado a definir a sua capacidade de armazenamento de humidade. Este projecto de investigação, realizado no âmbito da NORDTEST (http://www.nordicinnovation.net/nordtest.cfm), teve como objectivo definir a propriedade a determinar experimentalmente, bem como o procedimento de ensaio associado. O conceito de *MBV*, "Moisture Buffer Value", foi desenvolvido em resultado deste trabalho, juntamente com o protocolo de ensaio a adoptar na sua determinação.

O conceito de *MBV* é explicitado nas subsecções seguintes e referem-se os resultados obtidos, com a aplicação do respectivo protocolo de ensaio, aos elementos constituídos pelos materiais caracterizados neste Capítulo.

4.5.2 Definição do conceito

A definição do conceito de *MBV* é apresentada com recurso a um breve resumo dos principais conceitos teóricos, expostos no relatório final do projecto NORDTEST (Rode *et al.*, 2005), referido na subsecção anterior.

A primeira questão a abordar prende-se com a distinção dos vários níveis a que a capacidade de armazenamento de humidade pode ser tratada. Pode admitir-se uma divisão em três níveis: material de construção, elemento construtivo e compartimento.

No primeiro nível, correspondente a um material de construção visto de forma isolada, a sua capacidade de armazenamento de humidade pode ser determinada com recurso a propriedades como a capacidade higroscópica específica e a permeabilidade ao vapor.

Num segundo nível caracteriza-se um elemento construtivo que pode ser formado por um ou mais materiais. As resistências superficiais são tidas em conta mesmo num elemento homogéneo, o que implica desde logo uma diferença face ao primeiro nível

de análise. A capacidade de armazenamento de humidade de um elemento dependerá não só das propriedades dos materiais que o constituem, mas também da velocidade do ar sobre a sua superfície e da espessura de cada camada constituinte.

O desempenho do armazenamento de humidade de um compartimento é tratado, no último nível, como sendo a capacidade dos materiais, em contacto com o ar, de moderarem as variações de humidade desse compartimento. Este nível pode ser relacionado com o conceito de inércia higroscópica desenvolvido nesta Tese.

A descrição teórica da capacidade de armazenamento de humidade, ao nível dos materiais, baseia-se numa analogia entre os processos de transferência de humidade e de calor. A efusividade térmica, b, é utilizada para representar a taxa de transferência de calor através da superfície de um material, devida a uma alteração da temperatura superficial. Pode ser determinada pela seguinte expressão, em função da massa volúmica, ρ_s, do calor específico, c_p, e da condutibilidade térmica, λ, do material (Hagentoft, 2001).

$$b = \sqrt{\rho_s \cdot c_p \cdot \lambda} \tag{96}$$

Por analogia com este conceito é, então, possível definir efusividade hígrica, b_m, de acordo com a expressão:

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \rho_s \cdot \xi_u}{p_{sat}}} \tag{97}$$

A efusividade hígrica é um instrumento teórico que permite expressar a taxa de adsorção de vapor de um material submetido a uma variação da sua humidade superficial. Num cenário ideal, esta propriedade poderia traduzir também o efeito observado quando o aumento de humidade se dá na ambiência em que o material está inserido. Para isso seria necessário supor que o coeficiente de transferência de vapor ar-superfície tenderia para infinito.

Com a definição de efusividade hígrica é possível encontrar uma característica dos materiais que traduza a sua capacidade de armazenamento de humidade em ciclos diários. Essa característica depende do tipo de ciclo que se considere. Supondo uma alternância cíclica entre um valor elevado da humidade, durante 8h, e um valor reduzido da humidade superficial, durante 16h, por aplicação de análise de Fourier é

possível prever a variação da densidade de fluxo de vapor em função do tempo, *g(t)*, e a respectiva quantidade total de vapor acumulada, *Δm(t)*:

$$\frac{\Delta m(t)}{A} = \int_0^t g(t) \cdot dt = b_m \cdot \Delta p \cdot h(A_1) \cdot \sqrt{\frac{t_p}{\pi}} \tag{98}$$

Onde:

$$h(A_1) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2(n \cdot \pi \cdot A_1)}{n^{3/2}} \approx 2.252(A_1(1 - A_1))^{0.535} \tag{99}$$

Como A_1 representa a fracção do período diário em que o nível de humidade é elevado, tem-se A_1=1/3, donde:

$$\frac{\Delta m(t)}{A} \approx 0{,}568 \cdot b_m \cdot \Delta p \cdot \sqrt{t_p} \tag{100}$$

A definição do *MBV* teórico para um material, MBV_{ideal}, que representa a sua capacidade de armazenamento de humidade face ao ciclo diário escolhido, será então proporcional à efusividade hígrica de acordo com:

$$MBV_{ideal} = \frac{\Delta m(t)}{A \cdot \Delta HR} \approx 0{,}00568 \cdot p_{sat} \cdot b_m \cdot \sqrt{t_p} \tag{101}$$

A organização de um sistema de classificação de materiais e elementos de construção impôs a definição de um procedimento de ensaio que permitisse determinar experimentalmente o *MBV*. Este, como forma de distinção, foi designado $MBV_{prático}$. Serve como indicador da quantidade de humidade transportada de, ou para, um material ou elemento de construção, durante um período de tempo e por unidade de área exposta a uma ambiência com variações cíclicas de humidade.

Note-se que existem importantes diferenças entre o MBV_{ideal} e o $MBV_{prático}$. Estes valores só serão comparáveis se um material a ensaiar for homogéneo, com uma espessura superior à espessura de penetração associada ao ciclo em causa e se a resistência superficial às trocas de vapor por convecção for negligenciável. Se estas condições não se verificarem ou se o ensaio for realizado sobre um elemento construtivo constituído por vários materiais, a comparação dos dois valores deixa de fazer sentido.

4.5.3 Procedimento de ensaio

O projecto NORDTEST "Moisture Buffering of Building Materials" (Rode *et al.*, 2005), prevê a aplicação do ensaio de determinação do *MBV* a materiais homogéneos, ou elementos compostos, que podem ser produtos da construção ou não, devendo no entanto ser previsível a sua utilização em contacto com o ar interior. Este ensaio foi aplicado, nesta Tese, à caracterização dos elementos construtivos formados por produtos à base de gesso, pintados com diferentes esquemas de pintura (Tabela 15). As espessuras adoptadas tentaram reflectir a aplicação usual dos materiais que constituem cada camada.

Tabela 15 – Provetes de produtos da construção testados em ensaios *MBV*

Config.	**Base**	**Primário**	**Tinta**
GC	12,5 mm GC	—	—
GC2	12,5 mm GC	—	Vinílica – 50 μm
GC2A	12,5 mm GC	25 μm	Vinílica – 50 μm
GC3	12,5 mm GC	—	Acrílica 1 – 50 μm
GC3A	12,5 mm GC	25 μm	Acrílica 1 – 50 μm
GP	21 mm GP	—	—
GP2	21 mm GP	—	Vinílica – 50 μm
GP2A	21 mm GP	25 μm	Vinílica – 50 μm
GP3	21 mm GP	—	Acrílica 1 – 50 μm
GP3A	21 mm GP	25 μm	Acrílica 1 – 50 μm
GP_1cm	10 mm GP	—	—
GP3A_1cm	10 mm GP	25 μm	Acrílica 1 – 50 μm
GT	10 mm GT	—	—
GT2	10 mm GT	—	Vinílica – 50 μm
GT2A	10 mm GT	25 μm	Vinílica – 50 μm
GT3	10 mm GT	—	Acrílica 2 – 50 μm
GT3A	10 mm GT	25 μm	Acrílica 2 – 50 μm

O ensaio de determinação do *MBV* foi também aplicado a elementos normalmente encontrados no interior dos edifícios, mas que não são produtos da construção, referidos na Tabela 16.

Tabela 16 – Elementos adicionais testados em ensaios *MBV*

Config.	Descrição
¼ resma	Um quarto de resma de papel branco A4 de fotocópia com 80 g/m^2
½ resma	Meia resma de papel branco A4 de fotocópia com 80 g/m^2
1 resma	Uma resma de papel branco A4 de fotocópia com 80 g/m^2
Casaco	Casaco de malha de algodão

O protocolo de ensaio prevê a utilização de uma câmara climática que produza uma variação cíclica de humidade relativa a que o provete a ensaiar é submetido. Na Figura 57 apresenta-se uma representação esquemática das condições de ensaio.

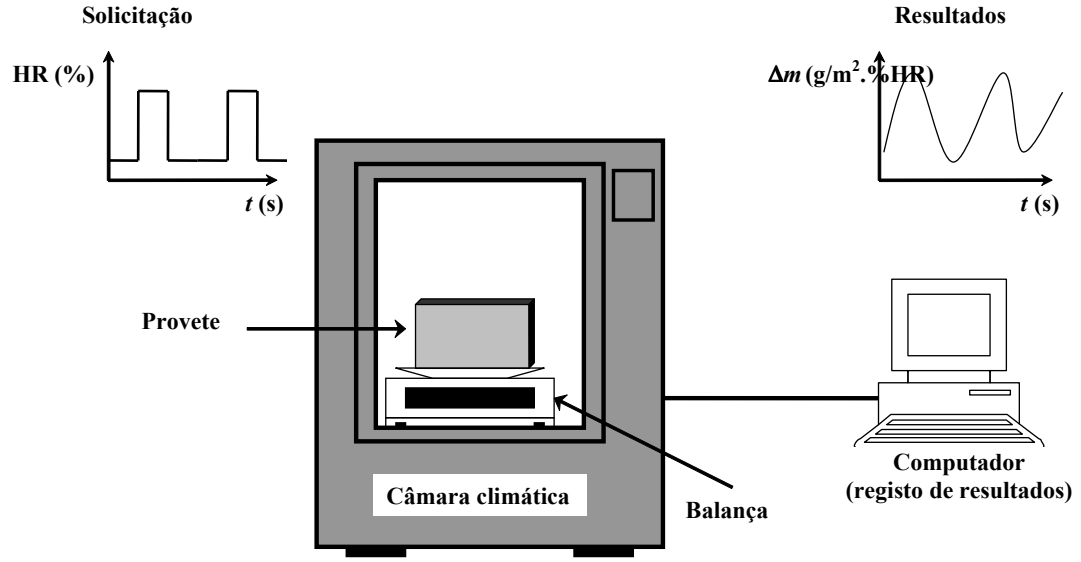


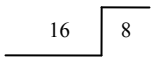
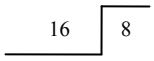
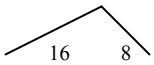
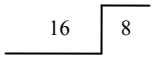
Figura 57 – Representação esquemática do ensaio de determinação do *MBV*

O ciclo diário de variação da humidade relativa prevê a alternância entre dois períodos de condições constantes: um período de 8 h para o valor maior de humidade relativa e outro de 16 h para o valor menor. A definição deste ciclo obedeceu a dois critérios. O primeiro por verosimilhança com os ciclos diários, que se podem observar em quartos ou escritórios, onde a produção de vapor tem normalmente uma duração de 8 h. O segundo por questões práticas, relacionadas com a possibilidade de o ensaio ser realizado em câmaras climáticas não programáveis, onde a mudança do valor da humidade relativa seja manual.

Nos ensaios realizados, foi adoptado 33 % para o valor menor da humidade relativa e 75 % para o valor maior. A temperatura foi mantida constante a 23 ºC. Estes valores correspondem aos previstos no protocolo de ensaio e têm alguma correspondência com os valores encontrados no interior dos edifícios.

Além dos ensaios de determinação do *MBV* foram realizadas ainda três variantes, sobre alguns provetes, que se descrevem sucintamente na Tabela 17.

Tabela 17 – Ensaios em regime transitório de ciclo diário de variação de humidade

Ensaio	T (ºC)	HRmax (%)	HRmin (%)	Ciclo teórico (h)
1 (*MBV*)	23	75	33	
2	23	90	48	
3	23	75	33	
4	15	75	33	

Na Figura 58 pode observar-se a comparação entre o diagrama teórico de humidade relativa previsto e o diagrama real, obtido na câmara climática, para o ensaio *MBV*. As diferenças entre os dois diagramas são pequenas, sendo o maior afastamento observado na duração da passagem do valor maior da humidade relativa para o menor.

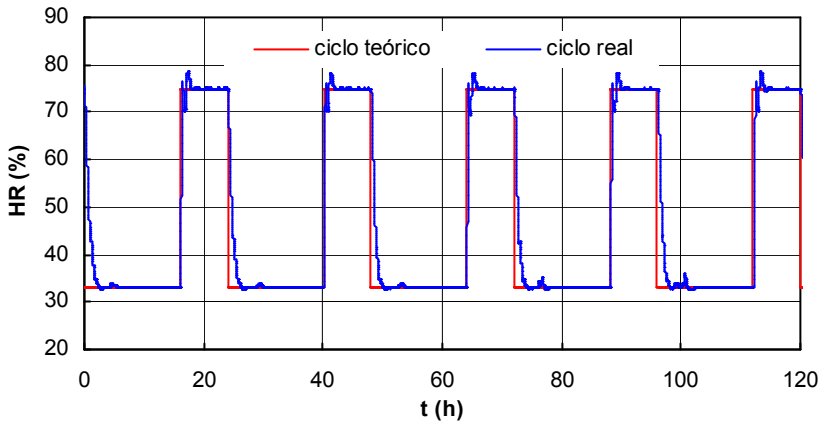


Figura 58 – Diagrama de humidade relativa teórico *vs.* real no ensaio *MBV*

Os provetes de elementos construtivos foram testados com apenas uma das faces de maior área aberta, sendo a face oposta pintada com uma tinta com base em resina de epoxi e as faces de menor área seladas com fita de alumínio. O sistema de selagem foi testado previamente, apresentando um desempenho plenamente satisfatório.

O resultado das pesagens foi transmitido automaticamente pela balança a um computador, sendo os registos efectuados com intervalos de 5 minutos numa folha de cálculo, onde foi possível observar a evolução das pesagens num gráfico.

Para critério de paragem do ensaio foi adoptada a confirmação de pelo menos uma repetição do ciclo estável, onde a massa de humidade adsorvida em 8 h é igual à desadsorvida em 16 h.

Para reduzir o tempo total consumido com estes ensaios, todos os provetes foram colocados simultaneamente na câmara climática, sendo posicionados sucessivamente sobre a balança quando fosse previsível já terem atingido um ciclo estável.

4.5.4 Resultados obtidos

A descrição detalhada dos ensaios *MBV* realizados pode ser observada nas fichas de ensaio LFC-FEUP NR_MBV1 a LFC-FEUP NR_MBV15, apresentadas no Anexo C. Nesta subsecção apresenta-se um pequeno resumo dos principais resultados obtidos nesses ensaios e nos ensaios complementares em regime transitório, referidos na Tabela 17.

Da Figura 59 à Figura 61 pode observar-se o ciclo estável obtido para os provetes representativos de elementos construtivos, para as condições de ensaio do Tipo 1 (*MBV*). Por facilidade de representação seleccionou-se apenas um provete de cada tipo, apesar de terem sido testados três de cada. Mas a consulta das fichas de ensaio permite verificar que, em geral, a variabilidade dos resultados foi reduzida.

A simples observação destas curvas permite desde logo avaliar o efeito que os esquemas de pintura tiveram em cada material. E, à semelhança do que já se verificou nos ensaios de permeabilidade ao vapor, o efeito de cada esquema pode ser diferente em suportes diferentes.

A influência da espessura é também visível através dos gráficos apresentados. No caso dos provetes de reboco de gesso e cal, e com reduzida resistência superficial, é notório que se atinge rapidamente um valor da variação da massa próximo do valor

de equilíbrio. Uma maior espessura destes provetes iria por isso traduzir-se num aumento substancial da variação de massa desses provetes durante o ensaio.

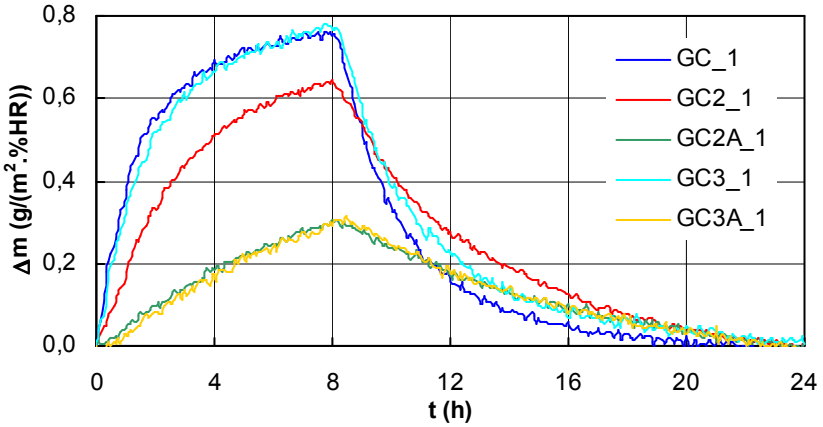


Figura 59 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GC em ensaios *MBV*

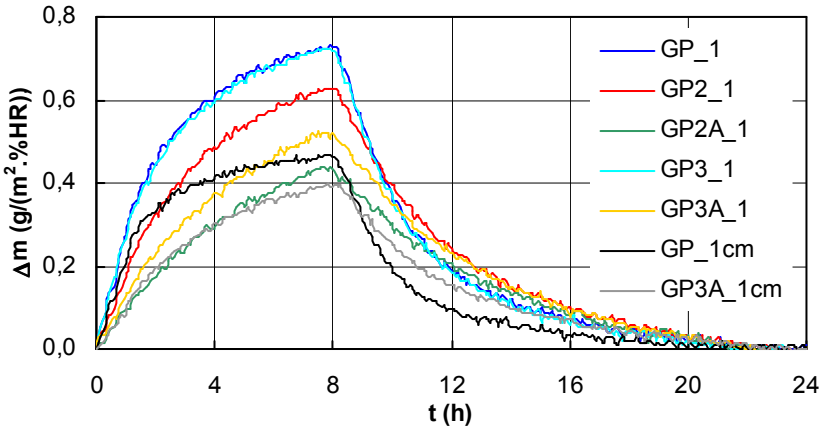


Figura 60 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GP em ensaios *MBV*

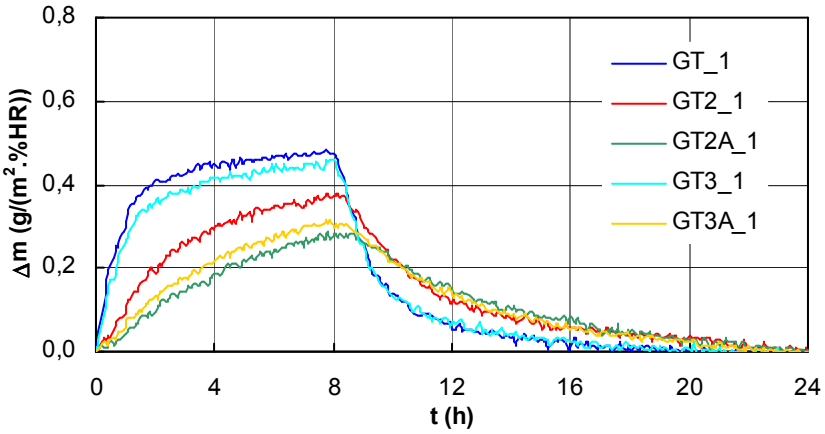


Figura 61 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GT em ensaios *MBV*

Na Figura 62 apresenta-se os valores de *MBV* resultantes dos ensaios. Cada um destes valores corresponde à média dos valores máximos de variação da massa, no ciclo estável, de três provetes de constituição igual. A Figura 62 ilustra também a facilidade com que se comparam soluções de revestimento com base neste parâmetro.

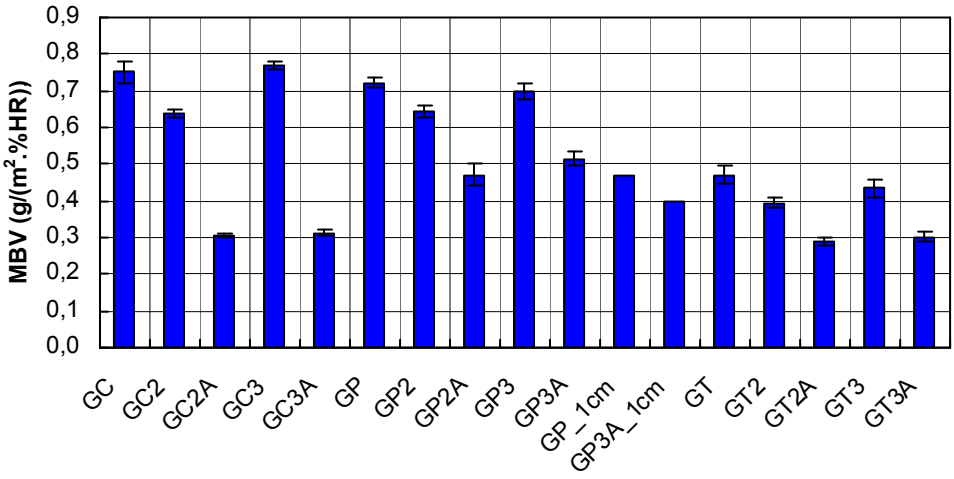


Figura 62 – Valores de *MBV* determinados para os elementos construtivos testados e respectivos valores do desvio padrão

A aplicação do ensaio *MBV* a elementos que não são produtos da construção resultou nos gráficos apresentados na Figura 63. O desenvolvimento da variação de massa observado para estes elementos foi bastante semelhante ao dos elementos construtivos analisados atrás.

O teste com o casaco de algodão apresenta, no entanto, alguns aspectos peculiares, sendo o mais visível a variação brusca de massa que se pode observar no início e no fim do ciclo, por comparação com a evolução no resto do ensaio.

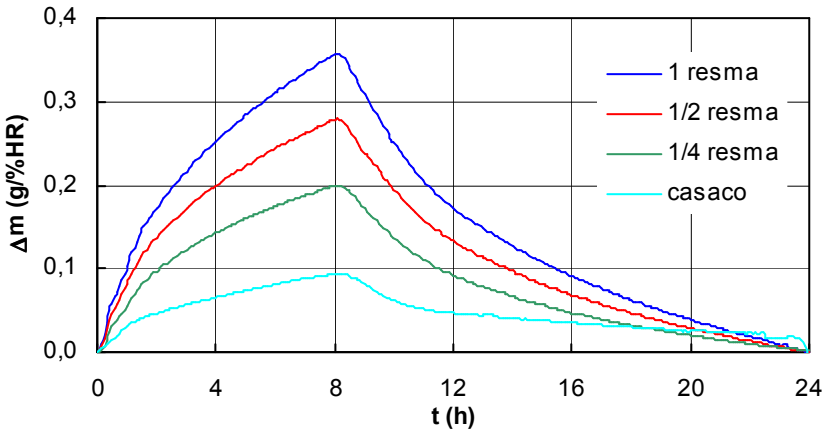
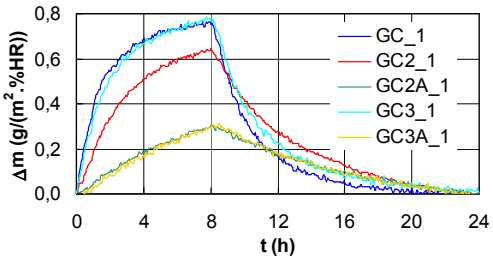
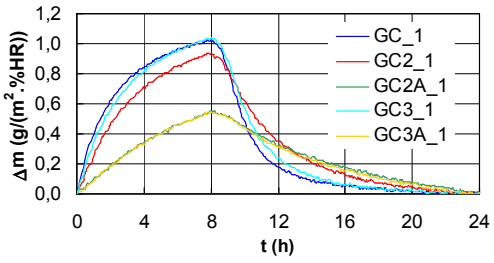


Figura 63 – Ciclo estável de variação da massa, de elementos que não são produtos da construção, em ensaios *MBV*

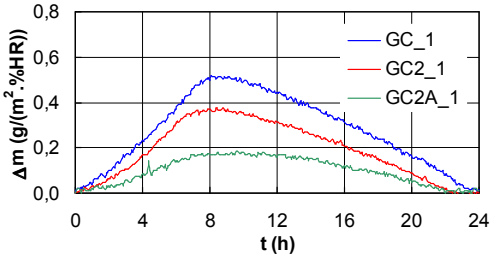
Os resultados obtidos no ensaio *MBV* de elementos de construção são comparados com os que resultaram das variantes 2 a 4, definidas na Tabela 17, nos gráficos na Figura 64 à Figura 66. Nas variantes utilizou-se apenas um provete de cada tipo e não três.



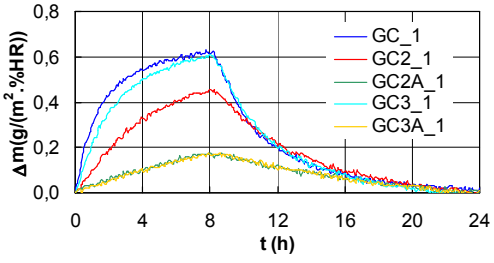
Ensaio 1 (*MBV*)



Ensaio 2

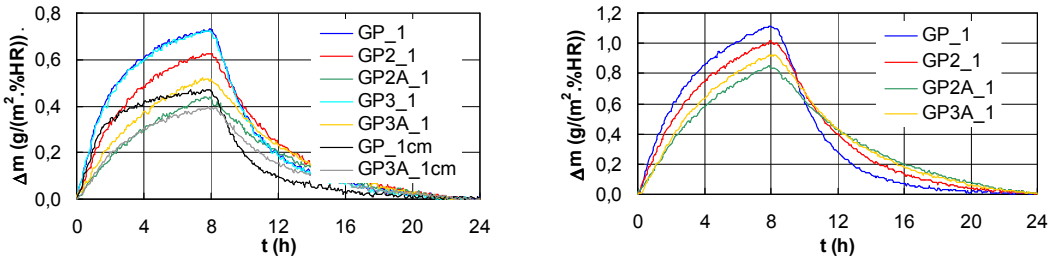


Ensaio 3



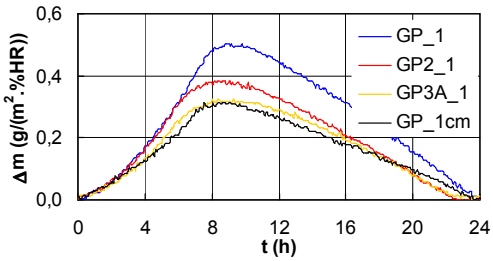
Ensaio 4

Figura 64 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GC em ensaios em regime transitório

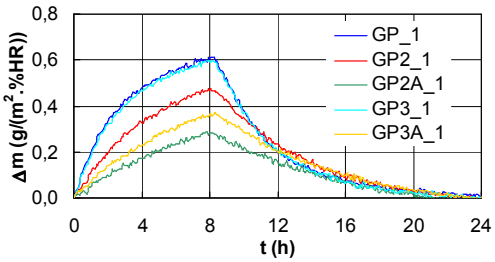


Ensaio 1 (*MBV*)

Ensaio 2

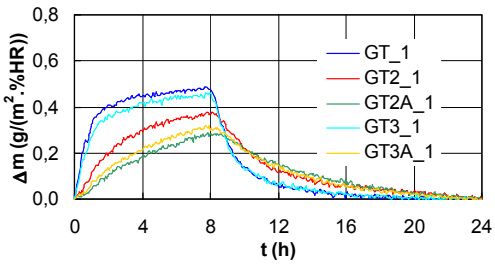


Ensaio 3

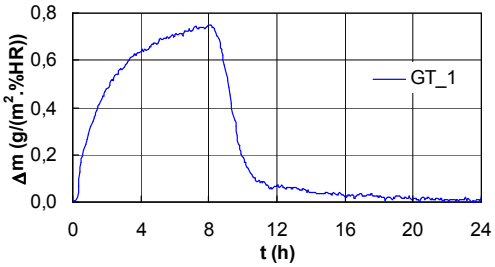


Ensaio 4

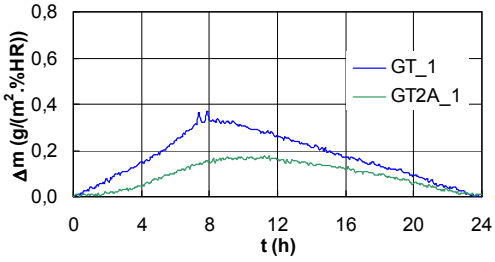
Figura 65 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GP em ensaios em regime transitório



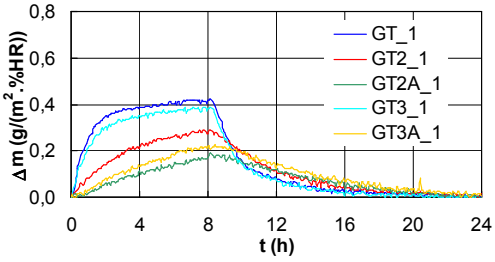
Ensaio 1 (*MBV*)



Ensaio 2



Ensaio 3



Ensaio 4

Figura 66 – Ciclo estável de variação da massa dos provetes de material base GT em ensaios em regime transitório

A comparação dos resultados obtidos nos diferentes ensaios dinâmicos realizados permite reunir o seguinte conjunto de observações:

— O gráfico de variação da massa no ensaio Tipo 2 é em geral semelhante ao Tipo 1, atingindo um valor mais elevado ao fim de 8 h apesar de a dife-

rença de potencial ser idêntica. Isto deve-se ao facto de este ensaio decorrer num intervalo de humidade relativa onde as propriedades ξ_u e δ_p, dos vários materiais, assumem valores mais elevados e, por isso, de acordo com as expressões (97) e (98), a variação máxima de massa é também mais elevada;

— O gráfico de variação da massa no ensaio Tipo 4 também é em geral semelhante ao Tipo 1, atingindo um valor mais baixo ao fim de 8 h por estar sujeito a uma diferença de pressão de vapor mais reduzida;

— A utilização de uma variação triangular da humidade relativa, no ensaio Tipo 3, originou curvas de variação da massa diferentes da variação observada nos ensaios *MBV*.

Na Tabela 18 apresentam-se os valores da variação de massa dos provetes de produtos da construção testados em ensaios dinâmicos.

Tabela 18 – Resultados dos ensaios em regime transitório de produtos da construção

Config.	**Máximo Δm (g/(m²·%HR))**			
	1 (*MBV*)	**2**	**3**	**4**
GC	0,75	1,03	0,52	0,63
GC2	0,64	0,94	0,38	0,46
GC2A	0,30	0,56	0,19	0,18
GC3	0,77	1,04	—	0,61
GC3A	0,31	0,54	—	0,18
GP	0,72	1,11	0,50	0,61
GP2	0,64	1,02	0,38	0,48
GP2A	0,47	0,85	—	0,29
GP3	0,70	—	—	0,59
GP3A	0,51	0,92	0,32	0,37
GP_1cm	0,47	—	0,31	—
GP3A_1cm	0,40	—	—	—
GT	0,47	0,75	0,37	0,42
GT2	0,39	—	—	0,29
GT2A	0,29	—	0,18	0,19
GT3	0,43	—	—	0,39
GT3A	0,30	—	—	0,23

4.5.5 Análise dos resultados

De acordo com (Rode, 2005), os resultados dos ensaios *MBV* podem ser tratados de forma a fornecer informação adicional sobre os elementos testados.

Uma forma evidente de tratar os resultados obtidos consiste na classificação dos elementos testados, com base no valor *MBV* obtido. Uma análise dos valores determinados para vários materiais testados em ensaios realizados no âmbito do projecto NORDTEST, conjugada com o impacto relativo que os materiais de acabamento podem ter face a outros parâmetros higrotérmicos como a ventilação e a produção de vapor, foi avançada uma primeira classificação de elementos construtivos baseada no conceito de *MBV*. Essa classificação é apresentada no gráfico da Figura 67.

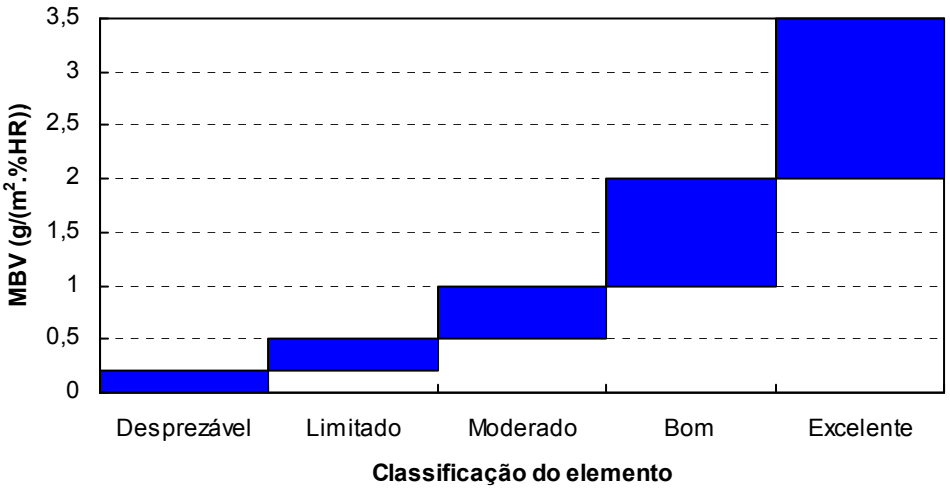


Figura 67 – Classificação de elementos quanto à sua capacidade de armazenamento de humidade com base em ensaios *MBV* (Rode *et al.*, 2005)

De acordo com esta classificação, todos os elementos construtivos testados nesta Tese teriam uma classificação Moderada ou Limitada da sua capacidade de armazenamento de humidade. Mas a apreciação do desempenho dos elementos construtivos representativos das soluções normalmente utilizadas em revestimentos interiores de edifícios Portugueses ainda é menos animadora. Os provetes de gesso cartonado e gesso projectado com esquemas de pintura à base de primário e tinta de acabamento (GC2A, GC3A, GP2A e GP3A), apresentaram valores *MBV* inferiores a 0,5 g/(m^2·%HR), o que os colocaria na classificação "Limitado".

Note-se que esta classificação foi avançada numa fase embrionária do estudo desta temática, sendo desde logo salvaguardada pelos seus autores a adequação dos limites propostos para cada classe. No Capítulo 6 este assunto volta a ser abordado.

Outro ponto de análise interessante prende-se com a comparação entre os valores *MBV* resultantes dos ensaios, correspondente ao valor $MBV_{prático}$, e os valores resultantes da aplicação da expressão (101), definidora do conceito de MBV_{ideal} com base na efusividade hígrica, determinada pela expressão (97). Na Tabela 19 apresentam-se os valores resultantes dessa análise para os elementos homogéneos testados, correspondentes aos provetes GC, GP e GT. Os valores das propriedades necessárias ao cálculo da efusividade hígrica, b_m, foram obtidos por aplicação das expressões deduzidas para essas propriedades e para os materiais respectivos nas subsecções 4.3 e 4.4. Dada a sua dependência face à humidade relativa admitiu-se um valor de 54 %, intermédio do intervalo 33 %-75 % das condições de ensaio utilizadas.

Tabela 19 – Comparação MBV_{ideal} *vs.* $MBV_{prático}$

Propriedades	**GC**	**GP**	**GT**
δ_p [ϕ = 0,54] (kg/(m·s·Pa))	$2{,}62\times10^{-11}$	$2{,}23\times10^{-11}$	$2{,}96\times10^{-11}$
$\xi_{u,ad}$ [ϕ = 0,54] (kg/kg)	0,0109	0,00275	0,00573
p_{sat} [T = 23ºC] (Pa)	2813	2813	2813
ρ_s (kg/m^3)	730	1200	900
b_m (kg/(m^2·Pa·s$^{1/2}$))	$2{,}72\times10^{-7}$	$1{,}62\times10^{-7}$	$2{,}33\times10^{-7}$
t_p (s)	86400	86400	86400
MBV_{ideal} (g/(m^2·%RH))	1,28	0,76	1,09
$MBV_{prático}$ (g/(m^2·%RH))	0,75	0,72	0,47

Esta comparação de valores permite verificar que os valores de MBV_{ideal} e $MBV_{prático}$ são bastante próximos no caso do gesso projectado mas divergentes no caso do gesso cartonado e do reboco de gesso e cal. Os resultados divergentes podem ter várias origens, como a influência da histerese, que implicaria um valor da capacidade higroscópica específica a adoptar mais reduzido.

Outra razão relevante para o afastamento entre os valores obtidos experimentalmente e numericamente é o facto de, no caso do gesso cartonado e do reboco de gesso e cal, a espessura dos provetes ser menor que a espessura de penetração associada ao ciclo diário utilizado.

Não é possível efectuar a dedução do valor da efusividade hígrica de um material homogéneo a partir de ensaios de determinação de *MBV*. O processo de adsorção de vapor por um material, em equilíbrio com um valor da humidade relativa e colocado em seguida numa ambiência de humidade relativa superior, pode ser descrito por uma relação linear entre a variação de massa e a raiz quadrada do tempo. Mas essa relação linear só é encontrada se o material tiver ao longo da sua espessura um teor de humidade inicial uniforme, o que não é necessariamente o caso em ensaios em regime transitório.

A análise dos resultados de ensaios de elementos compostos encontra algumas limitações, se for tomada por base apenas a relação entre *MBV* e efusividade hígrica.

4.6 Síntese Crítica do Capítulo 4

O Capítulo 4 apresenta a caracterização experimental de propriedades relevantes para a definição da capacidade de armazenamento de humidade de alguns materiais e elementos de construção.

Os equipamentos disponíveis no LFC-FEUP permitiram a execução de ensaios de determinação da curva higroscópica de materiais de revestimento através da norma ISO 12571:2000, a determinação das propriedades de transferência de vapor desses materiais, com ou sem aplicação de pinturas, de acordo com a norma EN ISO 12572:2001 e a determinação do *MBV* – "Moisture Buffer Value", de elementos de revestimento formados pelos materiais caracterizados, de acordo com um procedimento da NORDTEST.

Os materiais seleccionados para esta caracterização pretenderam representar soluções de acabamento de paredes e tectos normalmente encontradas nos edifícios portugueses. As curvas higroscópicas de gesso cartonado, gesso projectado e de reboco de gesso e cal foram definidas a partir dos ensaios realizados. Definiram-se também as curvas de permeabilidade ao vapor desses materiais e dos esquemas de pintura aplicados sobre eles.

A capacidade higroscópica específica dos materiais à base de gesso testados é mais elevada para o gesso cartonado e menos para o gesso projectado. O reboco de gesso e cal exibiu valores intermédios.

A resistência ao vapor das pinturas varia fortemente com a humidade relativa. Esquemas de pintura idênticos aplicados sobre materiais base diferentes apresentam valores da resistência ao vapor diferentes. A aplicação de um primário antes das pinturas de acabamento implica uma resistência ao vapor bastante elevada.

A conjugação dos materiais base testados, aplicados com espessuras previstas pelos fabricantes, com esquemas de pintura comuns em acabamentos de interior, originou elementos de revestimento de paredes e tectos com uma capacidade de armazenamento de humidade limitada, em ciclos diários. Esta conclusão é sustentada pelos resultados obtidos para o *MBV* dos elementos testados. Esta propriedade pode ser particularmente útil como meio de comparação de soluções de acabamento quanto à sua contribuição para a inércia higroscópica de um compartimento. Esta hipótese é analisada nos Capítulos seguintes.

Os resultados obtidos indicaram, também, que o contributo para a inércia higroscópica da aplicação de rebocos de gesso e cal, do tipo tradicional, depende muito da espessura com que esses rebocos são aplicados e do tipo de pintura utilizada. O acabamento tradicional deste tipo de reboco era efectuado com pinturas de cal, com resistência ao vapor negligenciável, o que contribuiria de forma decisiva para um aumento da capacidade de armazenamento de vapor.

Capítulo 5

Análise Experimental do Efeito da Inércia Higroscópica na Variação da Humidade Relativa

5.1 Introdução

Uma das tarefas fundamentais desta Tese correspondeu à avaliação experimental do efeito da inércia higroscópica na variação da humidade relativa interior. Essa avaliação é importante por si própria e por gerar elementos para validação da modelação numérica do comportamento higrotérmico de compartimentos.

A análise de trabalhos anteriores, efectuada na secção 2.5, permitiu verificar que existe uma grande variedade de abordagens a ensaios do efeito da inércia higroscópica. A própria dimensão dos dispositivos de ensaio pode ser diversa. A câmara de fluxo de Padfield (1998) tem um volume próximo de 0,5 m^3, a câmara de ensaio da universidade de Tohoku (Yoshino *et al.*, 2005) um volume de 4,72 m^3 e o dispositivo de ensaio da universidade de Concordia (Fazio *et al.*, 2004) inclui dois compartimentos em tamanho real, sobrepostos e interligados. O nível de controlo dos parâmetros de ensaio em cada caso é também diverso, afectando a versatilidade de cada infra-estrutura na adequação a testes diferentes.

Nesta Tese optou-se pelo desenvolvimento de uma infra-estrutura laboratorial versátil e com capacidade para realizar ensaios de ciclos sucessivos, que se descreve detalhadamente nas subsecções seguintes. Trata-se essencialmente de uma câmara de fluxo representando um compartimento a escala reduzida, inspirada no conceito da câmara desenvolvida por Padfield. Mas o nível de controlo dos parâmetros de teste, a facilidade de modificação da configuração do ensaio e a possibilidade de repetição ilimitada definem claramente a infra-estrutura concebida para esta Tese como um equipamento inovador e decisivo para o estudo da inércia higroscópica.

5.2 Descrição da Infra-estrutura de Ensaio

5.2.1 Conceito

A câmara de fluxo construída no âmbito desta Tese pretende reproduzir o comportamento hígrico de um compartimento e permitir a avaliação do efeito de diferentes revestimentos sobre a humidade relativa. O controlo dos balanços de calor, ar e humidade dessa câmara é, por isso, fundamental. Na Figura 68 apresenta-se, de forma esquemática, a ideia base para a infra-estrutura de ensaio.

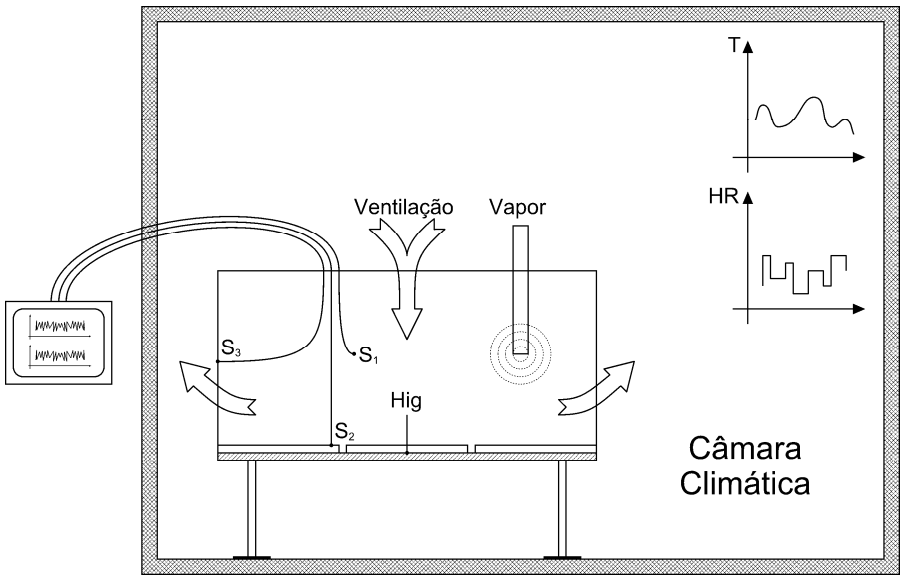


Figura 68 – Ideia base para a infra-estrutura de ensaio

A definição de um conjunto de princípios, de acordo com a ideia base, norteou o desenvolvimento desse equipamento.

- O elemento base é uma câmara de pequenas dimensões com controlo do balanço de ar e humidade;
- A relação entre o volume da câmara e a área de colocação de provetes de revestimento deve corresponder ao quociente entre o volume de um compartimento e a área ocupada pelos revestimentos higroscopicamente activos;
- A produção de vapor é efectuada de forma contínua e dentro de uma gama de valores adaptados aos testes pretendidos;
- A câmara dispõe de um sistema de ventilação que permite o estabelecimento de um número de renovações horárias corrente em edifícios;

— O conjunto é controlado termicamente;

— A monitorização das condições de temperatura e humidade relativa da câmara é efectuada em contínuo.

5.2.2 Câmara climática envolvente

A existência, no LFC-FEUP, de duas câmaras climáticas de grandes dimensões, tipo "walk-in" (Figura 69), garantiu a concretização de algumas componentes relevantes da infra-estrutura pretendida.

Cada uma destas câmaras permite um controlo da temperatura, entre 15 ºC e 35 ºC, e da humidade relativa, entre 30 % e 90 %. A variação da temperatura e humidade relativa é definida por um dispositivo programável. O valor dos parâmetros da câmara é registado num computador pessoal, podendo ser visualizados em tempo real ou exportados para outros programas (Figura 70).

Figura 69 – Aspecto exterior da câmara climática "walk-in" e do painel de controlo

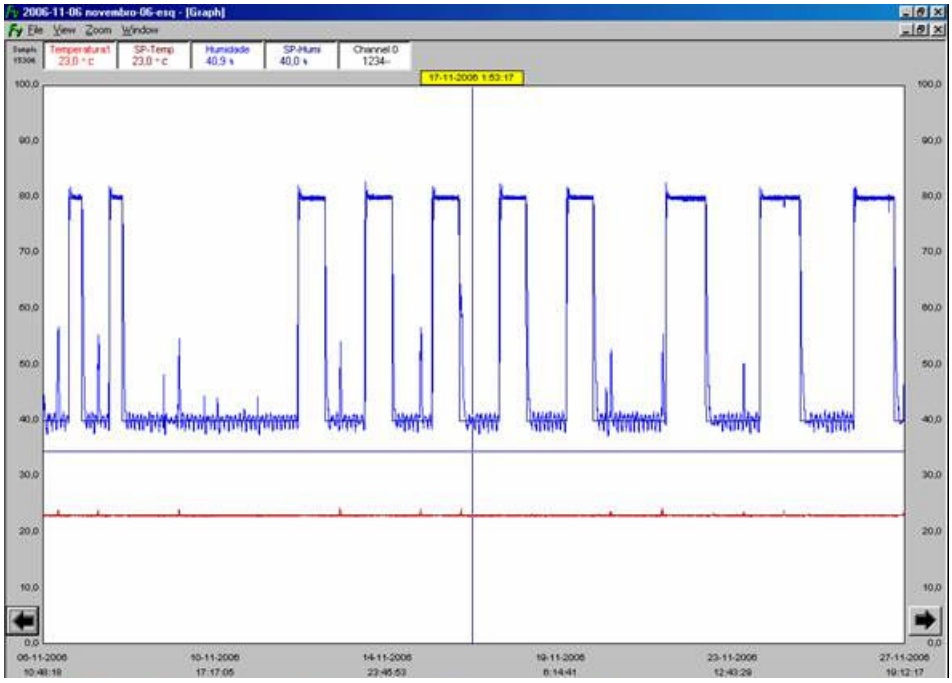


Figura 70 – Interface do programa Fitoview para visualização de dados das câmaras climáticas

Tendo em conta as possibilidades oferecidas por estas câmaras climáticas, optou-se por instalar a câmara de fluxo no interior de uma delas. Esta opção permitiu controlar a temperatura de todo o conjunto, assim como as características do ar que é introduzido na câmara de fluxo.

A adopção de uma das câmaras existentes como envolvente à câmara de fluxo implicou, no entanto, restrições importantes para as dimensões desta. Cada câmara "walk-in" tem um volume de (1,62×1,21×1,94) m^3 e a porta de entrada tem uma área livre de (1,82×0,58) m^2.

5.2.3 Concepção da câmara de fluxo

A conjugação dos princípios de desenvolvimento deste equipamento, enunciados na subsecção 5.2.1, com as restrições dimensionais impostas pela câmara climática "walk-in", conduziu à definição detalhada da câmara de fluxo.

As dimensões da câmara de fluxo foram fixadas em (1500×524×584) mm^3. A relação numérica entre as dimensões da câmara e de um quarto de uma habitação podem ser expressas como factores de escala. Tomando como exemplo um quarto com (3×4×2,7) m^3, o factor de escala do volume corresponde aproximadamente a

1/70. Ainda nesse exemplo, a relação entre o volume de ar e a área de paredes e tecto com possibilidade de revestimento, corresponde a aproximadamente 0,7. O preenchimento da base da câmara, com (1500×524) mm^2, com um elemento a ensaiar produz para a mesma relação um valor próximo de 0,6.

O controlo das trocas de ar, entre a câmara de fluxo e a câmara climática, é garantido por um sistema de ventilação que efectua a extracção mecânica de ar do interior da câmara de fluxo. A admissão de ar é efectuada através de um orifício e resulta da compensação imposta pelo caudal de ar extraído. Este esquema de ventilação garante que o ar admitido na câmara de fluxo corresponde exactamente ao ar controlado pela câmara climática, sem alteração de humidade ou temperatura. O número de renovações horárias deveria ser regulável entre 0 h^{-1} e 10 h^{-1}, para poder reproduzir uma gama de cenários entre ventilação nula e ventilação equivalente à abertura de janelas num compartimento. Tendo em conta o sistema de controlo adoptado, foi possível reproduzir uma gama de variação ente 0,26 h^{-1} e 17 h^{-1}, além do fecho total do sistema, garantindo uma ventilação nula.

O sistema de produção de vapor constituiu o maior desafio à construção da infraestrutura de ensaio. A consideração de uma produção de vapor de 120 g/h num compartimento, associada a um factor de escala do volume de 1/70, implicaria uma produção de vapor na câmara de 1,7 g/h. Pretendia-se também ter a possibilidade de gerar grandes quantidades de vapor em curtos espaços de tempo, de forma semelhante ao que se passa numa cozinha ou wc. Fixou-se por isso, como exigência para o sistema, a capacidade de produzir vapor de uma forma contínua numa gama de 1−20 g/h.

Além de um sistema base, que pode assegurar a produção de vapor pretendida, considerou-se desde logo, como alternativa, a exploração das capacidades da câmara climática envolvente, em conjugação com o caudal de ventilação adoptado, para a obtenção de resultados semelhantes aos do sistema base.

A expressão (42), que descreve o balanço de humidade de um compartimento, pode ser aplicada à câmara de fluxo. Admita-se que se pretende testar um cenário caracterizado por um número de renovações horárias constante, N, e uma produção de vapor, M_{ganhos}, que ocorre entre o momento t_1 e o momento t_2 com um valor constante, em regime isotérmico. Se a câmara envolvente garantir uma pressão de vapor

constante, $p_{v,ar,ext1}$, a contribuição para o balanço de humidade da parcela correspondente à ventilação, M_{vent1}, pode escrever-se de acordo com a expressão (41):

$$M_{vent1} = 6{,}21\times10^{-6}\cdot\rho_{ar}\cdot V\cdot\frac{N}{3600}\cdot\left(p_{v,ar,ext1}-p_{v,ar,\mathrm{int}}\right) \tag{102}$$

A Figura 71 mostra um esquema de variação da humidade que pode ser implementado na câmara climática envolvente.

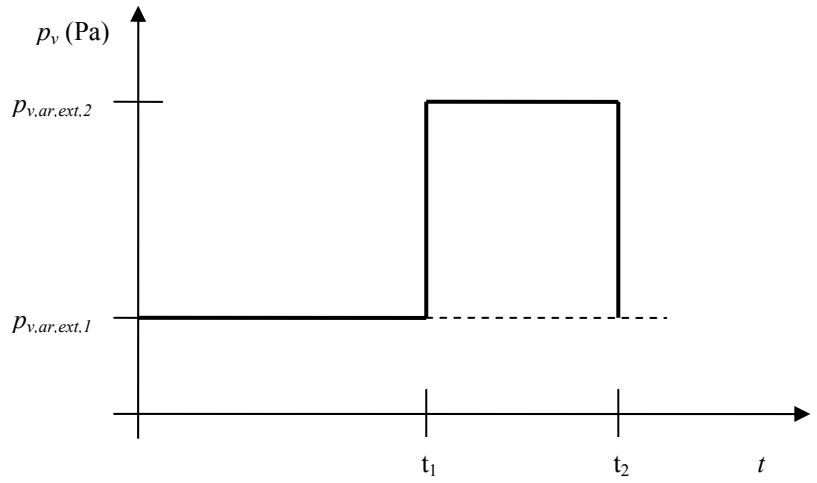


Figura 71 – Esquema de variação da humidade na câmara climática envolvente

Neste caso, a contribuição da ventilação para o balanço de humidade entre os momentos t_1 e t_2 escreve-se:

$$M_{vent2} = 6{,}21\times10^{-6}\cdot\rho_{ar}\cdot V\cdot\frac{N}{3600}\cdot\left(p_{v,ar,ext2}-p_{v,ar,\mathrm{int}}\right) \tag{103}$$

Para reproduzir o cenário pretendido utilizando apenas variações da pressão de vapor exterior, terá de se fixar $p_{v,ar,ext2}$, de tal forma que:

$$M_{vent2} = M_{vent1} + M_{ganhos} \tag{104}$$

Daqui resulta uma diferença de pressão de vapor dada por:

$$p_{v,ar,ext2} - p_{v,ar,ext1} = \frac{M_{ganhos}}{6{,}21\times10^{-6}\cdot\rho_{ar}\cdot V\cdot\frac{N}{3600}} \tag{105}$$

Tendo em conta o volume da câmara de fluxo, um valor de aproximadamente 1,2 kg/m^3 para a massa volúmica do ar, e para M_{ganhos} = 1 g/h, a diferença entre os dois regimes de pressão de vapor será aproximadamente:

$$p_{v,ar,ext2} - p_{v,ar,ext1} = \frac{292}{N} \tag{106}$$

Tome-se como exemplo um cenário onde a temperatura do sistema seja 23 ºC. A pressão de saturação calculada pela expressão (3) será 2813 Pa. Para N=1 h^{-1} a adopção de um acréscimo de humidade relativa de 10 % HR na câmara envolvente, no intervalo t_1-t_2, corresponderá na câmara de fluxo ao efeito de uma produção de vapor de 1 g/h. Na subsecção seguinte apresenta-se uma descrição detalhada dos dispositivos que materializam a câmara de fluxo.

5.2.4 Descrição da câmara de fluxo

O esquema da Figura 72 permite uma visão global da câmara de fluxo.

Legenda:

1 – Caixa em acrílico
2 – Apoios metálicos
3 – Aberturas circulares
4 – Abertura longitudinal
5 – Orifício de admissão de ar
6 – Orifícios de extracção de ar
7 – Tubo de ligação à bomba de ar
8 – Bomba de ar
9 – Rotâmetros
10 – Bomba peristáltica
11 – Sistema de dispersão de humidade
12 – Sondas
13 – Registador de dados
14 – Computador

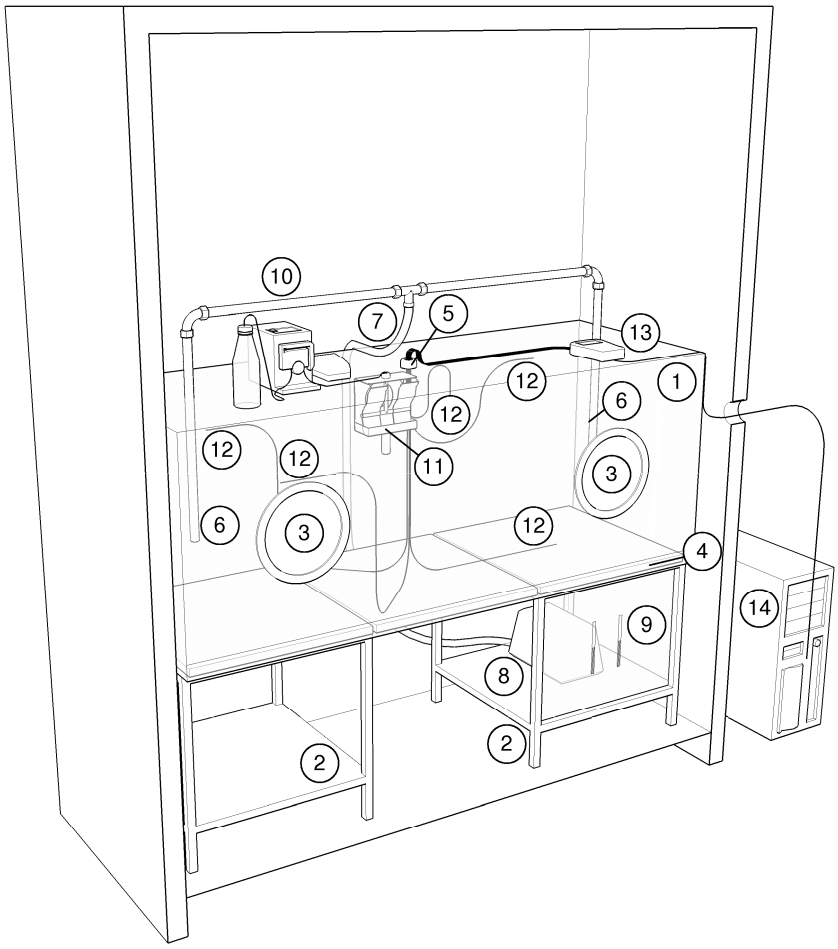


Figura 72 – Esquema da câmara de fluxo

A câmara de fluxo foi materializada através de uma caixa em acrílico com dimensões interiores (1500×524×584) mm^3, posicionada sobre dois apoios metálicos independentes. Na Figura 73 pode observar-se a câmara de fluxo colocada no interior de uma câmara climática "walk-in". A câmara dispõe de três aberturas, que permitem a introdução de elementos para ensaio e o acesso a todos os pontos do seu interior, que se podem observar na Figura 74. Os dispositivos de fecho dessas aberturas garantem um bom nível de estanquidade ao ar.

Figura 73 – Imagem da câmara de fluxo colocada no interior de uma câmara climática "walk-in"

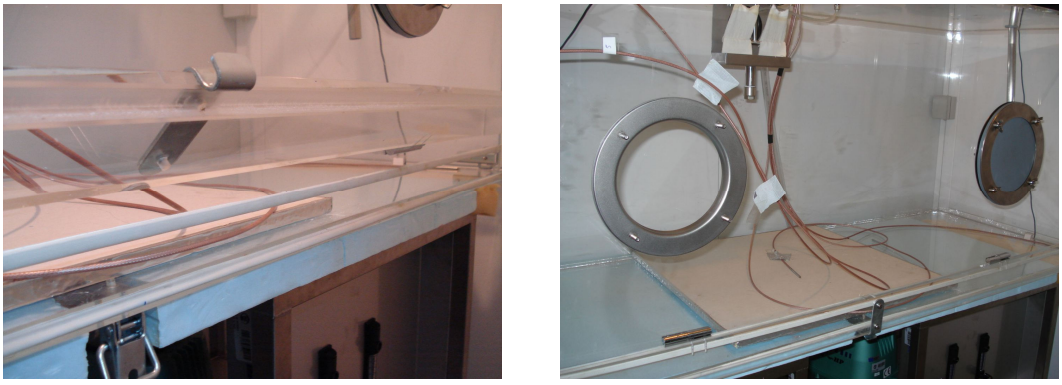
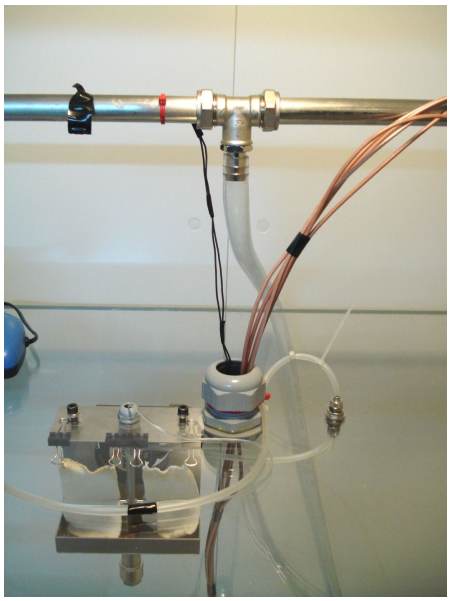


Figura 74 – Pormenores das aberturas de acesso ao interior da câmara de fluxo

a)



b)

c)

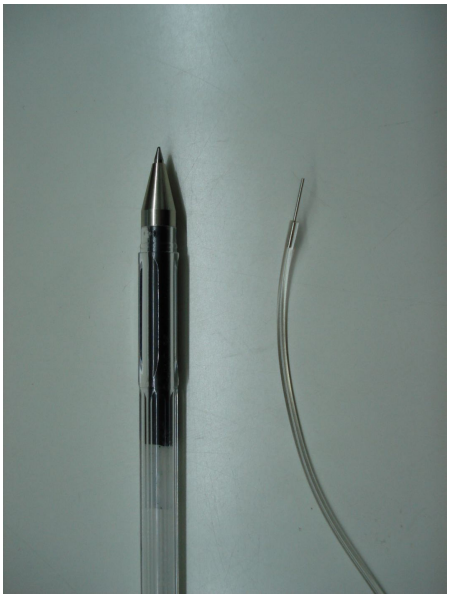
Figura 75 – Pormenores do sistema de ventilação da câmara de fluxo, incluindo os orifícios de admissão (a) e extracção (b) de ar e a bomba de ar controlada por rotâmetros (c)

O sistema de ventilação adoptado para controlo do fluxo de ar é constituído por uma bomba que extrai ar em dois pontos do interior da câmara através de tubos com cerca de 2 cm de diâmetro, e por um orifício de admissão localizado na face superior com 3,5 cm de diâmetro. Na Figura 75 é possível observar alguns pormenores deste sistema.

O caudal de ar é controlado por dois rotâmetros, com níveis de precisão diferentes, que permitem uma regulação de caudal entre 2 l/min e 130 l/min. Cada rotâmetro dispõe de um flutuador de esfera de controlo manual, trabalhando um deles na gama de 2 l/min a 30 l/min e o outro na gama de 10 l/min a 100 l/min. Tendo em conta o volume da câmara, o número de renovações horárias permitido pelo sistema de ventilação pode variar entre 0,26 h^{-1} e 17 h^{-1}.

O sistema base que assegura as exigências de produção de vapor pode dividir-se em dois componentes. O primeiro corresponde ao dispositivo de dosagem de água, onde foi seleccionada uma bomba peristáltica com capacidade para debitar 0,004 ml/min a 0,37 ml/min através de um capilar com 0,19 mm de diâmetro. Estes valores permitem por isso a dosagem contínua de caudais de água entre 0,24 g/h e 22,2 g/h. Este sistema pode ser visualizado na Figura 76.

O segundo componente corresponde ao dispositivo de transformação da água líquida doseada em vapor (Figura 77 e Figura 78). Pretendeu-se adoptar um sistema que perturbasse o menos possível o desempenho higrotérmico da câmara. A solução para o problema consiste num dispositivo em aço inox onde a água líquida é recebida e transmitida a torcidas de dissipação. Uma pequena ventoinha eléctrica aumenta a convecção através das torcidas. Este conjunto garante por si só a dissipação de até 2,5 g/h de vapor. Como complemento foi adicionada uma bomba de aquário que possibilita a passagem à fase vapor de quantidades de água introduzidas em caudais superiores.



a)

b)

c)

Figura 76 – Pormenores do sistema de dosagem de água, incluindo: a) capilar de transporte de água, b) vista do painel de controlo da bomba peristáltica e c) vista global do conjunto

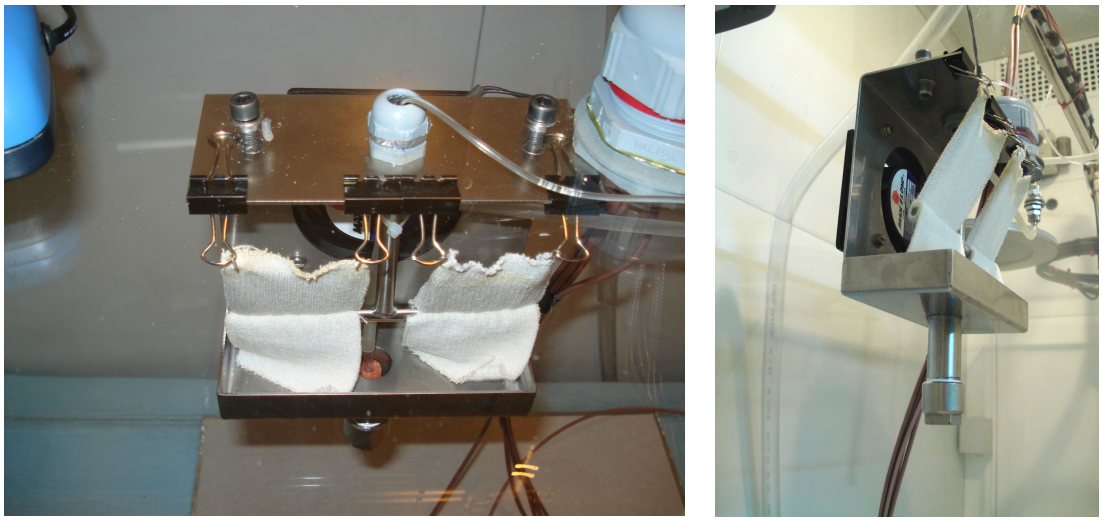


Figura 77 – Sistema de dissipação de humidade

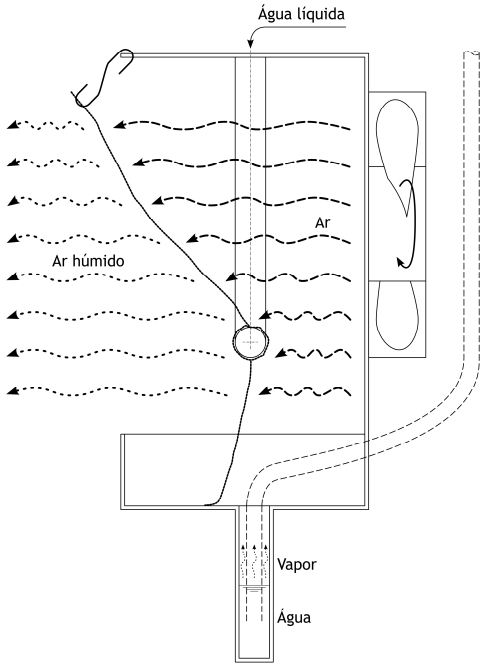


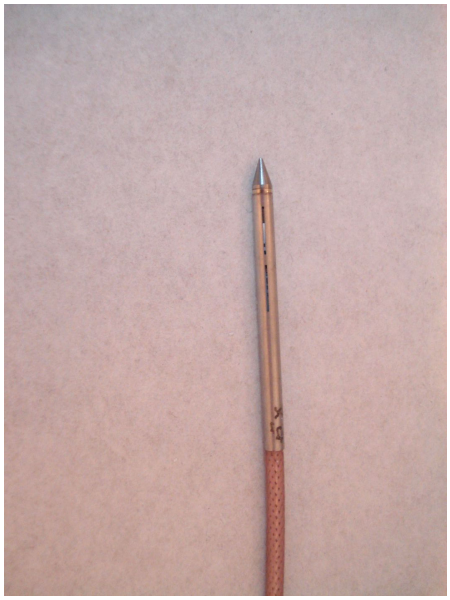
Figura 78 – Esquema de funcionamento do sistema base de produção de vapor

5.2.5 Sistema de monitorização

O sistema de monitorização do interior da câmara de fluxo é assegurado por um conjunto de cinco sondas de temperatura e humidade relativa modelo HygroClip SC04 (Figura 79 a)), dispondo de uma precisão de ±1,5 % HR e ± 0,3 ºC. Um registador de dados modelo HygroLog NT (Figura 79 b)) completa o sistema e estabelece a ligação a um computador pessoal onde é possível avaliar, em tempo real, a evolução dos

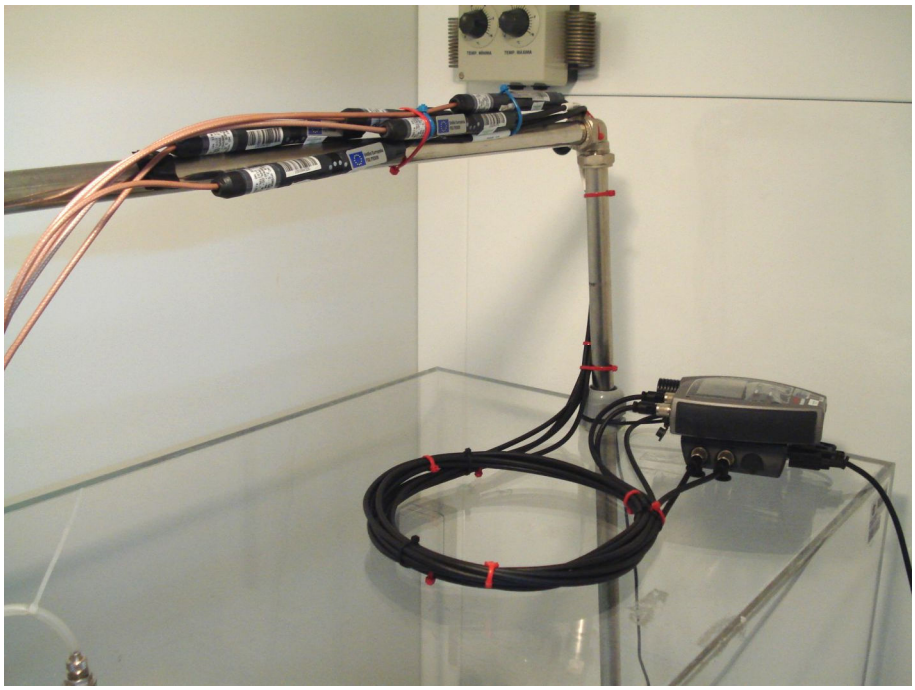
parâmetros em análise através do programa HW4. Todos os componentes do sistema são produzidos pela ROTRONIC AG.

Os valores medidos são registados com intervalos de tempo adequados, em geral 5 minutos, e armazenados em ficheiros compatíveis com folhas de cálculo automático tipo EXCEL.



a)

b)



c)

Figura 79 – Pormenores do sistema de monitorização incluindo: a) sonda HygroClip SC04, b) registador de dados modelo HygroLog NT e c) visão global do sistema

5.3 Descrição Geral dos Ensaios

A infra-estrutura descrita na secção anterior permite a realização de ensaios muito diversificados, caracterizados por diferentes combinações dos seus parâmetros definidores. A maior parte dos ensaios que se pondere realizar implicam, normalmente, um dispêndio de tempo considerável. Não só pela duração do ciclo adoptado mas pelas várias repetições desse ciclo que é necessário realizar até obter um padrão do comportamento que se pretende avaliar.

Considerou-se prioritária a análise do efeito de diferentes combinações de materiais porosos, introduzindo diferentes níveis de inércia higroscópica, na variação da humidade relativa interior da câmara de fluxo. Os restantes parâmetros foram fixados de acordo com esta opção.

A reprodução de um ciclo diário, isotérmico, com temperatura fixada nos 23 ºC, balizou o conjunto principal de ensaios. Como se discutiu no Capítulo 2, considera-se que a inércia higroscópica diária pode ser um processo relevante no comportamento higrotérmico dos edifícios e, por isso, esse aspecto foi explorado prioritariamente. O regime isotérmico permite focar a análise no comportamento hígrico. A adopção de 23 ºC elimina a discussão sobre a variabilidade com a temperatura das propriedades dos materiais testados, dado que esta foi a temperatura de referência utilizada nos ensaios descritos no Capítulo 4.

Cada ciclo diário implementado é composto por um período com produção de vapor e outro onde esse efeito é suprimido. Foi escolhido um cenário de 8 h de produção de vapor constante seguida de 16 h sem esse efeito, por verosimilhança com o que se passa num quarto durante a noite, como já se adoptara de resto em 4.5.3.

A produção de vapor foi fixada, em geral, com o valor de 2 g/h que, tendo em conta os factores de escala entre a câmara de fluxo e um quarto corrente, corresponderia a uma situação de sobre ocupação. Considerou-se que a ordem de grandeza deste parâmetro deveria ser adequada ao tipo de ciclo, mas que o seu valor exacto não era determinante para as conclusões a retirar dos ensaios.

Para a renovação de ar, a partir da câmara climática envolvente, foram utilizados valores constantes de 1 h^{-1} e 0,5 h^{-1}, identificados com cenários típicos em habitação, e que permitem obter uma comparação do efeito da inércia higroscópica face a dois

níveis distintos de ventilação. O caudal de ar necessário a estes valores da renovação horária corresponde a 8 l/min e 4 l/min respectivamente.

Tendo em conta as características destes ensaios, optou-se pela utilização do sistema alternativo de produção de vapor definido em 5.2.3. Para N=1 h^{-1} a produção de vapor correspondente a 2 g/h a uma temperatura constante de 23 ºC é obtida com a alternância da humidade relativa da câmara climática envolvente entre 50 % e 70 %. O valor de 50 % HR é fixado durante 16 h, correspondendo à fase do ciclo diário em que não há produção de vapor. O valor de 70 % HR corresponde à fase de produção de vapor e prolonga-se por 8 h. Para N=0,5 h^{-1} a mesma correspondência da produção de vapor foi obtida com uma alternância entre 40 % HR e 80 % HR.

Os provetes de elementos de revestimento testados nestes ensaios correspondem à descrição já efectuada na Tabela 15. A indicação dos elementos a testar foi efectuada com um código do tipo "0,75 m^2 GP", identificando neste exemplo 0,75 m^2 do elemento GP, que de acordo com a Tabela 15 corresponde a gesso projectado sem pintura com 21 mm de espessura.

A área de cada um dos provetes introduzido na câmara de fluxo correspondeu a (0,50×0,50) m^2. Como se pretendia que cada provete tivesse apenas uma face exposta, os provetes de gesso cartonado foram impermeabilizados com tinta epoxy numa das faces de maior dimensão e os bordos revestidos com fita de alumínio. Os provetes de gesso projectado e reboco de gesso e cal, devido à sua fragilidade, foram construídos sobre placas de vidro, que garantiram a impermeabilização da contraface. Os bordos foram também revestidos com fita de alumínio. Também se realizaram ensaios com papel de fotocópia nas unidades "1 resma" e "¼ de resma". Na Figura 80 apresentam-se imagens dos provetes utilizados.

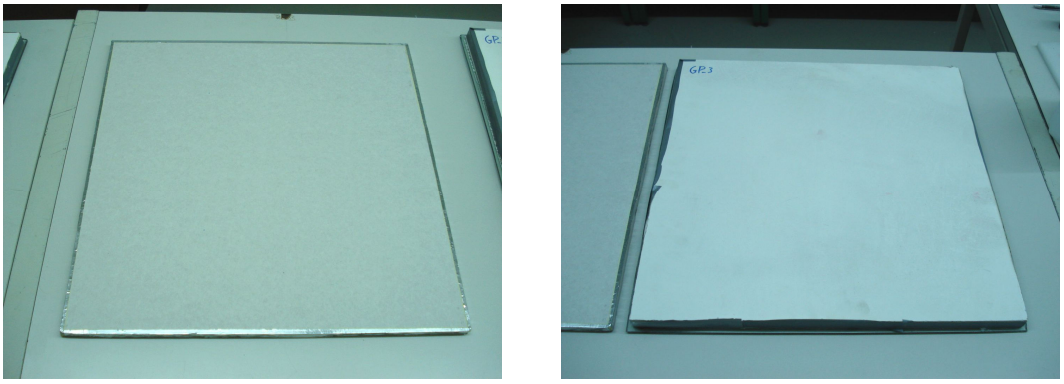


Figura 80 – Imagens dos provetes utilizados em ensaios na câmara de fluxo

O resultado dos ensaios de ciclo diário obtém-se após a definição do ciclo estável de variação da humidade relativa para a configuração adoptada. O ciclo estável é definido após a obtenção de pelo menos dois ciclos diários sucessivos com desenvolvimento coincidente.

5.4 Avaliação da Infra-estrutura de Ensaio

5.4.1 Avaliação do sistema de monitorização

O desempenho do sistema de monitorização foi avaliado por comparação com os registos da câmara climática envolvente. Adoptou-se uma numeração para os registos obtidos, onde S1 designa a sonda de temperatura e humidade relativa incorporada no registador de dados, S2 a S6 é a numeração das sondas HygroClip e CC identifica os registos da câmara climática envolvente.

Na Figura 81 apresenta-se os registos de temperatura obtidos com as várias sondas e na Figura 82 os registos correspondentes de humidade relativa, obtidos ao longo de um período de 50 horas, com todos os elementos situados no interior da câmara climática envolvente e ainda não colocados no interior da câmara de fluxo. Impôs-se um valor de temperatura constante a 23 ºC e "set points" sucessivos de humidade relativa com o valor de 80 %, 65 %, 50 % e 40 %.

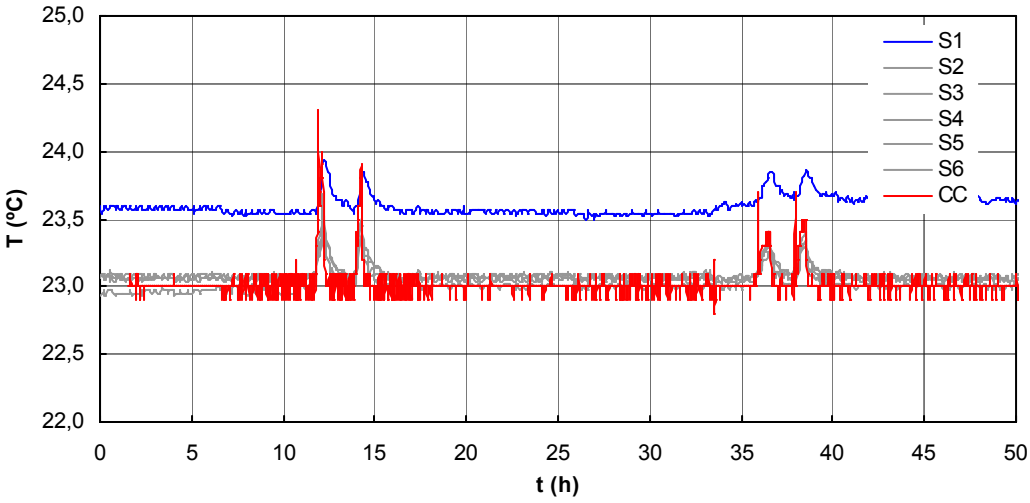


Figura 81 – Variação da temperatura registada pelas várias sondas colocadas na câmara climática

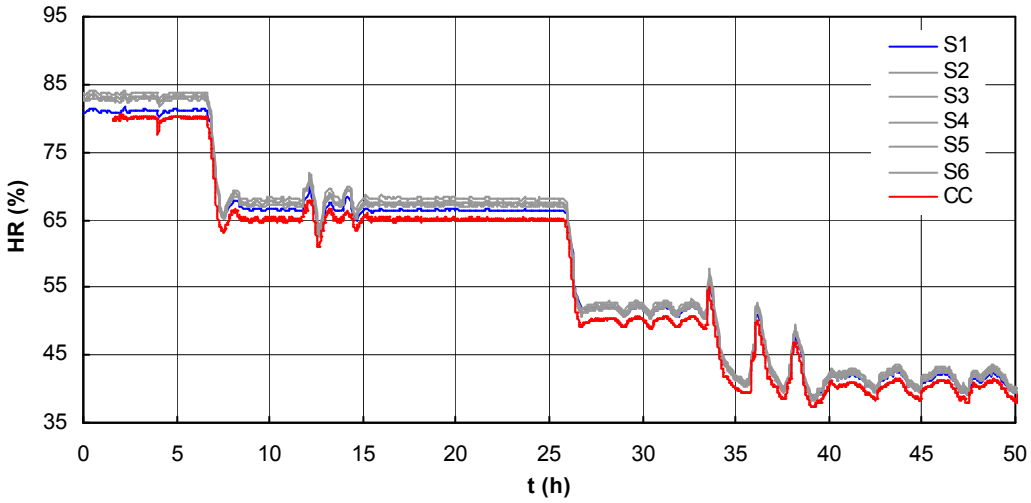


Figura 82 – Variação da humidade relativa registada pelas várias sondas colocadas na câmara climática

A observação destes gráficos permite detectar alguns desvios entre os registos da câmara climática, CC, da sonda S1 e do grupo de sondas S2 a S6. Na Tabela 20 apresentam-se os valores médios obtidos para a temperatura e humidade relativa nos períodos estáveis de cada patamar de humidade relativa indicados pelas sondas CC e S1, a média desses valores para as sondas S2 a S6, $\overline{S_2 : S_6}$, a diferença máxima entre este valor e os valores de cada sonda, dm_$\overline{S_2 : S_6}$, e a diferença entre os registos do sistema de monitorização e o registo da câmara climática, $\overline{S_2 : S_6}$ -CC e S1-CC.

Tabela 20 – Comparação de registos de temperatura e humidade relativa

"Set Point"	**CC**	**S1**	$\overline{S_2 : S_6}$	dm_$\overline{S_2 : S_6}$	$\overline{S_2 : S_6}$ **-CC**	**S1-CC**
80 % HR	79,97	81,04	83,15	0,54	3,18	1,07
65 % HR	65,03	66,36	67,52	0,59	2,49	1,33
50 % HR	50,07	51,59	51,95	0,47	1,88	1,52
40 % HR	40,07	41,18	41,70	0,43	1,62	1,10
23 ºC	23,00	23,59	23,05	0,06	0,05	0,59

A partir dos valores médios observados é possível salientar alguns pontos relevantes.

— A diferença entre a temperatura resultante de $\overline{S_2 : S_6}$, e o valor médio dos registos da câmara climática é da ordem de 0,05 ºC;

— A diferença máxima encontrada entre os valores médios das sondas S2 a S6 e a sua média, dm_$\overline{S_2 : S_6}$, não ultrapassou 0,6 % HR;
— O desvio entre os registos de temperatura de S1 e os restantes é bastante elevado, cerca de 0,5 ºC, pelo que os valores de temperatura provenientes de S1 não foram utilizados;
— A diferença entre os valores médios de humidade relativa do registo da câmara climática e da sonda S1 situou-se entre 1,0 % HR e 1,5 % HR para os quatro "set points" avaliados;
— A diferença entre os valores médios de humidade relativa do registo da câmara climática e da média das sondas S2 a S6 cresceu com o valor do "set point", variando entre 1,6 % HR e 3,2 % HR. O que implica a possibilidade de existir um erro, de medição, variável com o nível de humidade relativa;
— A diferença dos valores médios de humidade relativa das sondas S2 a S6, face à sua média, foi inferior a 0,6 % HR. Uma diferença de 1 % HR entre medições no interior da câmara de fluxo, asseguradas por estas sondas, pode por isso ser atribuída ao erro de medição.

A análise do sistema de monitorização demonstrou o seu bom desempenho e as principais fontes de incerteza foram detectadas.

5.4.2 Desempenho da câmara climática envolvente

A observação dos gráficos da Figura 81 e Figura 82 permite, também, detectar dois tipos de instabilidade presentes na câmara climática envolvente. O primeiro observa-se para valores baixos de humidade relativa, no caso 50 % e 40 %, e pode considerar-se como uma flutuação normal e aceitável em torno do "set point" pretendido.

Foi detectado outro tipo de instabilidade, caracterizado por desvios acentuados, de curta duração, em relação ao "set point". Esta perturbação é observável, na Figura 81 e na Figura 82, para a hora 12, 14, 36 e 38. Estes desvios foram observados ao longo de toda a campanha de testes, obedecendo a padrões semanais e sazonais. São provocados por perturbações do fornecimento de electricidade à FEUP e a sua eliminação total passaria pela instalação de equipamentos do tipo UPS para protecção das câmaras climáticas. Essa instalação representa um investimento importante que não pôde ser realizado até ao final da campanha de testes. A influência dos desvios no

desempenho é maior para valores reduzidos da humidade relativa devido às características da câmara climática. Estes desvios foram considerados em todas as análises efectuadas.

A velocidade de transição entre patamares de humidade relativa é, também, relevante tendo já sido avaliada, a propósito dos ensaios *MBV*, na subsecção 4.4.3.

O desempenho da câmara climática envolvente é globalmente satisfatório, sendo conhecidos os seus pontos fracos e dominada a sua influência nos resultados dos ensaios.

5.4.3 Higroscopicidade da câmara de fluxo

A câmara de fluxo pretendia ser um compartimento desprovido de higroscopicidade interior para que a leitura dos resultados dos ensaios aí realizados fosse o mais clara possível. No entanto, esse objectivo não pôde ser completamente atingido. Os componentes do sistema de aquisição de dados, as superfícies em acrílico e os componentes do sistema de produção de vapor, introduzem alguma higroscopicidade que não pode ser eliminada e por isso deve ser tida em conta.

A influência da inércia higroscópica do próprio dispositivo de ensaio foi avaliada através de um ensaio simples, identificado como IH19, onde se testou a transição entre dois valores de equilíbrio da humidade relativa. A Tabela 21 apresenta um resumo das características deste ensaio.

Tabela 21 – Características do ensaio IH19

Ensaio	**Períodos (h)**	**Câmara climática**		**Câmara de fluxo**	
		T (ºC)	**HR (%)**	**N (h^{-1})**	**Elementos**
IH19	0 – 7	23	50	1,0	–
	7 – 8,42	23	70	0,0	
	8,42 – 16	23	70	1,0	

A Figura 83 apresenta os resultados obtidos no ensaio e a variação teórica que seria de esperar, nesta situação, para um número de renovações horárias de 1 h^{-1} e 0,5 h^{-1}. As curvas de variação teórica foram obtidas por aplicação da expressão (30).

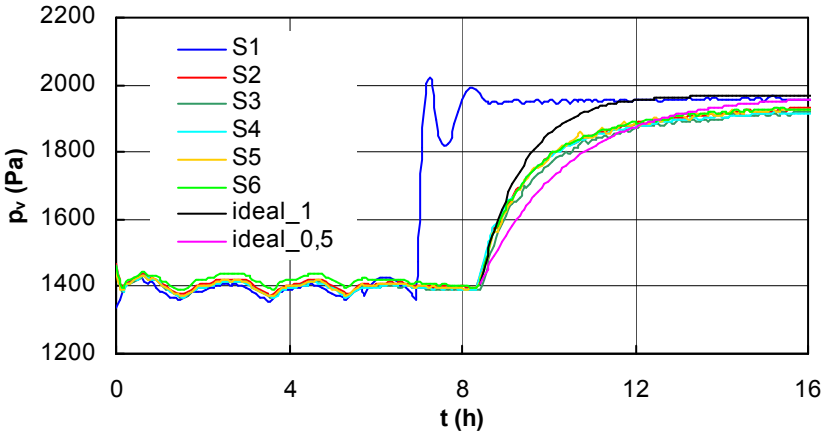


Figura 83 – Variação da pressão de vapor no ensaio IH19, registada na câmara climática envolvente (S1) e na câmara de fluxo (S2 a S6), e calculada pelo modelo teórico para N=1 h^{-1} (ideal_1) e N=0,5 h^{-1} (ideal_0,5)

A comparação dos resultados obtidos permite detectar um desvio entre a curva teórica e a evolução real da humidade relativa no interior da câmara de fluxo. Esse desvio não parece ser atribuível ao controlo de ventilação, pois a curva ideal associada a um caudal de ventilação mais baixo também não produziu resultados coincidentes com os registos experimentais. Esta questão é aprofundada com resultados de simulação numérica apresentados no Capítulo 6.

5.4.4 Processo de produção de vapor

Os dois processos de produção de vapor na câmara de fluxo, descritos em 5.2.3, foram comparados através de ensaios de ciclo diário. O ensaio IH11, também referido na subsecção 5.5.2, foi comparado com um ensaio teoricamente idêntico, designado IH20, onde se utilizou o sistema base de produção de vapor da câmara de fluxo. As características dos dois ensaios apresentam-se na Tabela 22.

Note-se que o controlo da produção de vapor em IH20 não permitiu obter de forma absolutamente exacta os 2,0 g/h pretendidos, tendo-se registado ainda assim um valor de 2,1 g/h. Este valor foi determinado por pesagem do depósito de água do sistema, no início e no final de cada período de oito horas de produção de vapor.

Os resultados obtidos nesta comparação, apresentados na Figura 84, demonstram a semelhança geral do desempenho dos dois sistemas de produção de vapor. O período de produção de vapor é aparentemente superior em IH20, o que deve ao processo

de dispersão de vapor do sistema base. Este processo prolonga-se, além das 8 horas previstas, até a água acumulada nas torcidas de dispersão ser totalmente dissipada. Este pormenor pode, por isso, afectar a comparação de resultados obtidos pelos dois processos. Os resultados apresentados na Tabela 23 permitem verificar que a diferença entre o percentil 90 da pressão de vapor e o valor médio, $p_{v,90}$ - $p_{v,m}$, foi ligeiramente inferior em IH20, com o sistema base de produção de vapor.

Tabela 22 – Características dos ensaios IH11 e IH20

Ensaio	**Períodos (h)**	**Câmara climática**		**Câmara de fluxo**		
		T (ºC)	**HR (%)**	**M_{ganhos} (g/h)**	**N (h^{-1})**	**Elementos**
IH11	0 – 8	23	80	0	0,5	0,75 m^2 GP
	8 – 24	23	40	0		
IH20	0 – 8	23	40	2,1	0,5	0,75 m^2 GP
	8 – 24	23	40	0		

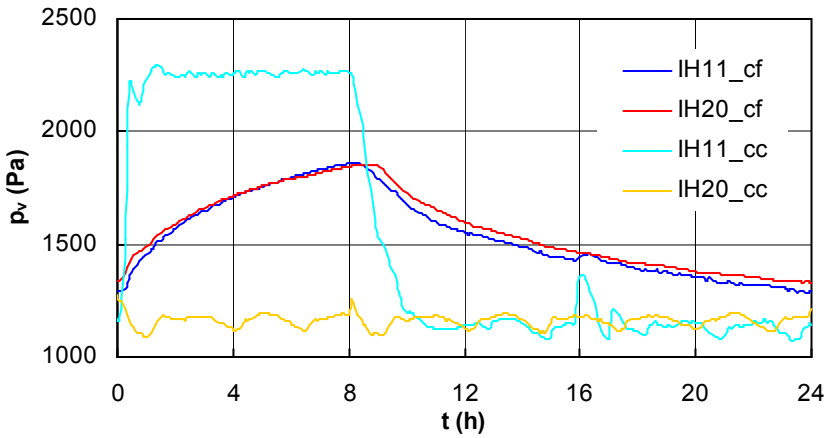


Figura 84 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc) nos ensaios IH11 e IH20

Tabela 23 – Valores característicos da variação da humidade relativa, na câmara de fluxo, nos ensaios IH11 e IH20

Ensaio	**$p_{v,m}$ (Pa)**	**$p_{v,90}$ (Pa)**	**$p_{v,90}$ - $p_{v,m}$ (Pa)**
IH11	1539	1809	270
IH20	1564	1812	248

5.4.5 Homogeneidade do ar

A estratificação da temperatura e humidade tem impacto directo na simplificação que considera uma mistura perfeita do ar, normalmente adoptada nos modelos de simulação numérica multizona, e que permite reduzir, em termos numéricos, o espaço de um compartimento a um ponto. A aplicabilidade desta simplificação à câmara de fluxo afecta directamente o trabalho de simulação discutido no Capítulo 6 e por isso aborda-se aqui com algum detalhe.

A estratificação de temperatura foi identificada em duas situações diferentes. A primeira situação verificou-se sem funcionamento da ventoinha auxiliar do sistema de dispersão de vapor e concluiu-se estar associada à transmissão de calor da bomba de ar para a base da caixa acrílica. Este efeito traduzia-se pela prevalência de um valor da temperatura 0,5 ºC mais elevado numa zona limitada da câmara de fluxo. Foi minorado com a introdução de uma placa de poliestireno extrudido sob a câmara de fluxo.

A segunda situação verifica-se com a ventoinha auxiliar do sistema de dispersão de vapor em funcionamento, que faz com que possam ser medidas temperaturas com um acréscimo variável, de até 1 ºC no interior da câmara, em relação à temperatura da câmara climática envolvente. Na Figura 85 apresenta-se os registos de temperatura obtidos antes e após a activação da ventoinha do sistema de dispersão de vapor

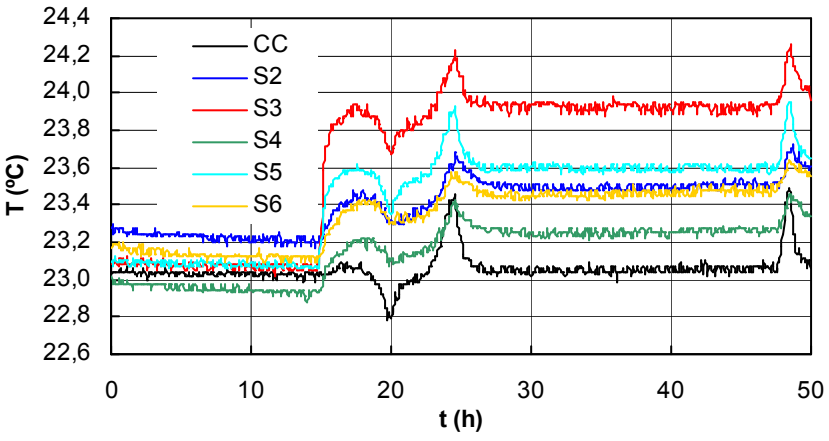


Figura 85 – Registos de temperatura na câmara climática envolvente (CC) e na câmara de fluxo (S2 a S6) antes (<15 h) e após (>15 h) a activação da ventoinha auxiliar do sistema de dispersão de vapor

A estratificação da temperatura na câmara de fluxo tem, no entanto, um impacto reduzido nos resultados dos ensaios. A utilização da pressão de vapor para caracterizar a humidade na câmara, em alternativa à humidade relativa, permite uma leitura dos resultados que não é afectada por este efeito.

A estratificação da pressão de vapor é mais relevante no âmbito deste trabalho. Foram realizados alguns ensaios, para a avaliar, que se descrevem em seguida.

O ensaio IH11 foi repetido, com ligeiras alterações ao nível da distribuição das sondas e com activação da ventoinha do sistema de dispersão de vapor. As características deste conjunto de ensaios são resumidas na Tabela 24. Pretendeu-se detectar variações nos registos de sondas, colocadas em posições diferentes, e a forma como a activação da ventoinha poderia afectar os valores de humidade na câmara.

Tabela 24 – Características dos ensaios IH11, IH21, IH22 e IH23

Ensaio	**Períodos (h)**	**Câmara climática**		**Câmara de fluxo**		
		T (ºC)	**HR (%)**	**N (h^{-1})**	**Elementos**	**Variações**
IH11	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GP	Sondas c/ distribuição tridimensional
	8 – 24	23	40			
IH21	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GP	Sondas distribuídas na base
	8 – 24	23	40			
IH22	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GP	Sondas c/ distribuição tridimensional; Ventoinha ligada
	8 – 24	23	40			
IH23	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GP	Sondas distribuídas na base; Ventoinha ligada
	8 – 24	23	40			

A Figura 86 permite observar o ciclo diário de pressão de vapor para este conjunto de ensaios, registado na câmara climática envolvente e resultante da média dos registos do interior da câmara de fluxo. A Figura 87 apresenta os registos individuais de cada sonda localizada na câmara de fluxo, em cada ensaio. Na Tabela 25 apresentam-se alguns valores característicos da variação da pressão de vapor nos ensaios em análise.

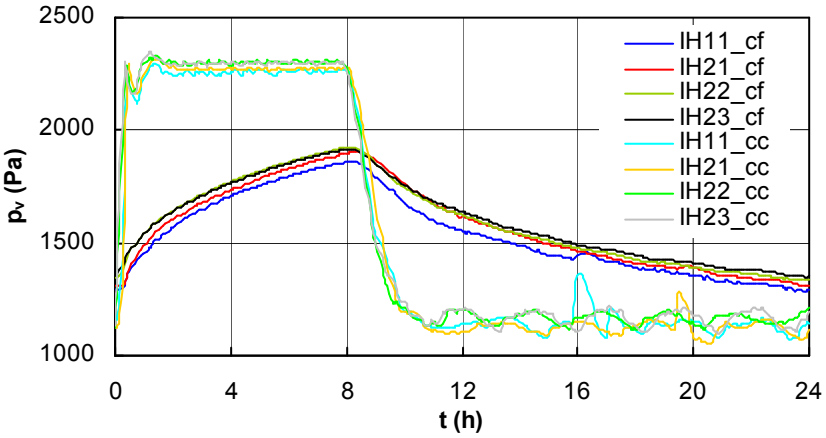


Figura 86 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor no interior da câmara de fluxo (cf), correspondente à média das sondas S2 a S6, e na câmara climática envolvente (cc) nos ensaios IH11, IH21, IH22 e IH23

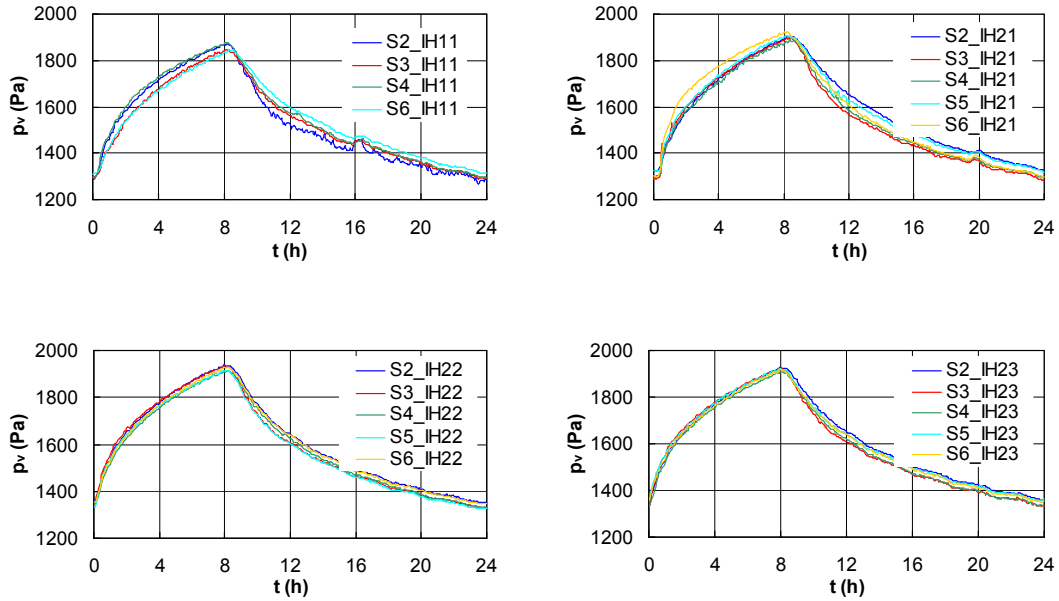


Figura 87 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor registado no interior da câmara de fluxo pelas várias sondas, nos ensaios IH11, IH21, IH22 e IH23

Tabela 25 – Valores característicos da variação da pressão de vapor na câmara de fluxo nos ensaios IH11, IH21, IH22 e IH23

Ensaio	$p_{v,cc}$ (Pa)	$p_{v,m}$ (Pa)	$p_{v,90}$ (Pa)	$p_{v,90}$ - $p_{v,m}$ (Pa)
IH11	1543	1539	1809	270
IH21	1541	1576	1853	277
IH22	1570	1594	1873	279
IH23	1571	1602	1868	266

A análise destes resultados permite concluir o seguinte

- Existe estratificação de vapor, que é mais evidente quando a ventoinha do sistema de dispersão não é activada. De acordo com os registos das várias sondas, para t=12 h encontram-se diferenças entre registos de 77 Pa para IH11, 82 Pa para IH21, 44 Pa para IH22 e 43 Pa para IH23. Estes valores correspondem, para T=23 ºC, a diferenças entre 3 % HR e 1,5 % HR;
- Estas diferenças não podem ser atribuídas apenas à incerteza do sistema de medição, o que demonstra que não existe uma mistura perfeita do ar na câmara de fluxo mesmo com a ventoinha activada;
- A posição das sondas pode implicar diferenças nos resultados obtidos a partir da média dos vários registos e influenciar as conclusões;
- Neste caso, no entanto, essas diferenças são muito pequenas, pois a diferença $p_{v,90}$ - $p_{v,m}$ teve uma variação inferior a 15 Pa no conjunto dos ensaios IH11, IH21, IH22 e IH23. Esta diferença corresponde a cerca de 0,5 % HR a 23 ºC, e este valor está contido na incerteza associada ao próprio sistema de monitorização;
- A colocação de sondas face à estratificação de vapor, nos quatro ensaios observados, teve por isso pouco significado para a interpretação dos resultados globais dos ensaios;

Esta análise incidiu sobre um tipo de ensaio onde a distribuição de materiais higroscópicos na câmara de fluxo é uniforme, preenchendo estes totalmente a sua base. Efectuou-se também um conjunto de ensaios com uma distribuição diferente. Os ensaios IH24, IH25, IH26 e IH27, resumidos na Tabela 26, consistiram na realização de ciclos diários associados a diferentes posições na câmara de fluxo de um provete do tipo GC, com 0,25 m^2. As sondas S2 a S6 foram colocadas nas posições indicadas na Figura 88. A ventoinha da câmara de fluxo não foi activada durante estes ensaios.

Tabela 26 – Características dos ensaios IH24, IH25, IH26 e IH27

Ensaio	Períodos (h)	Câmara climática		Câmara de fluxo		
		T (ºC)	HR (%)	N (h^{-1})	Elementos	Variações
IH24	0 – 8	23	80	0,5	0,25 m^2 GC	Provete horizontal centrado
	8 – 24	23	40			
IH25	0 – 8	23	80	0,5	0,25 m^2 GC	Provete horizontal à esquerda
	8 – 24	23	40			
IH26	0 – 8	23	80	0,5	0,25 m^2 GC	Provete vertical à esquerda
	8 – 24	23	40			
IH27	0 – 8	23	80	0,5	0,25 m^2 GC	Provete vertical centrado
	8 – 24	23	40			

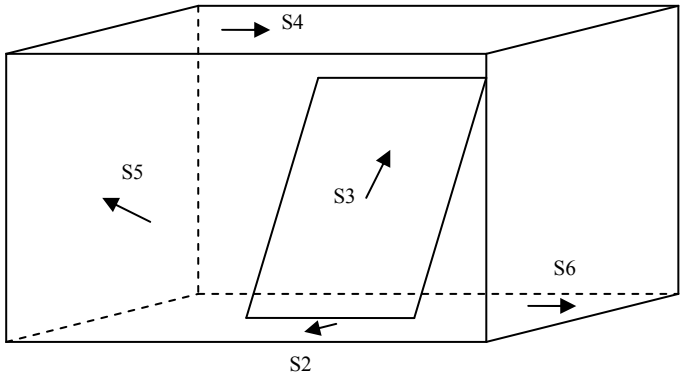


Figura 88 – Posição das sondas S2 a S6 nos ensaios IH24, IH25, IH26 e IH27

Os resultados obtidos neste conjunto de ensaios apresentam-se na Figura 89 e na Tabela 27.

Tabela 27– Valores característicos da variação da pressão de vapor na câmara de fluxo nos ensaios IH24 a IH27

Ensaio	$p_{v,cc}$ (Pa)	$p_{v,m}$ (Pa)	$p_{v,90}$ (Pa)	$p_{v,90} - p_{v,m}$ (Pa)
IH24	1580	1613	2003	390
IH25	1571	1609	2005	396
IH26	1574	1603	1993	390
IH27	1573	1598	1986	387

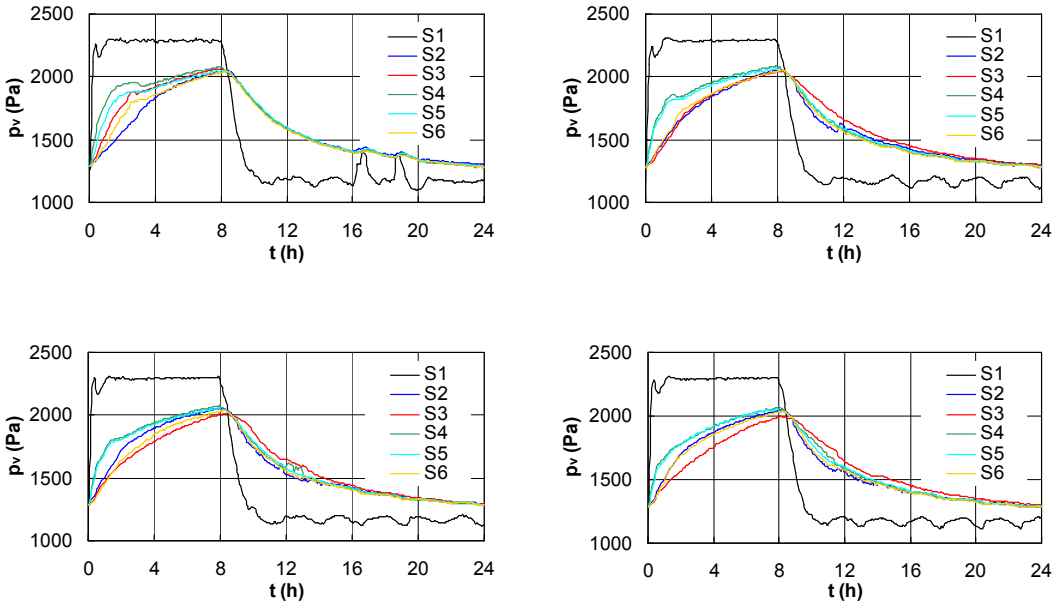


Figura 89 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor registado no interior da câmara de fluxo pelas várias sondas, nos ensaios IH24 a IH27

Estes resultados permitem mais uma vez verificar que a estratificação não tem um impacto significativo na leitura de resultados globais, tendo em conta a proximidade da diferença $p_{v,90}$ - $p_{v,m}$ apurada nestes ensaios. No entanto, os gráficos da Figura 89 permitiram encontrar uma estratificação significativa da pressão de vapor, sobretudo nas primeiras 4 horas do ciclo, onde se chegou a detectar diferenças de 400 Pa entre registos simultâneos. Esta conclusão é muito relevante para a discussão sobre os limites da validade da simplificação que admite o ar de um compartimento como perfeitamente misturado, e se retoma no Capítulo 6.

5.4.6 Duração do ciclo

A Tabela 28 resume as características dos ensaios IH28 a IH32, onde se procurou testar ciclos de duração superior a um dia. Nos ensaios IH30 e IH32 a ventoinha foi activada. A Figura 90 apresenta o ciclo diário de pressão de vapor, para este conjunto de ensaios, registado na câmara climática envolvente e resultante da média dos registos do interior da câmara de fluxo. A Figura 91 apresenta os registos individuais de cada sonda localizada na câmara de fluxo, nos ensaios IH31 e IH32. Na Tabela 29 apresentam-se alguns valores característicos da variação da pressão de vapor nos ensaios em análise.

Tabela 28 – Características dos ensaios IH28 a IH32

Ensaio	Períodos (h)	Câmara climática		Câmara de fluxo	
		T (ºC)	HR (%)	N (h^{-1})	Elementos
IH28	0 – 16	23	80	0,5	–
	16 – 48	23	40		
IH29	0 – 16	23	80	0,5	0,75 m^2 GC
	16 – 48	23	40		
IH30*	0 – 16	23	80	0,5	0,75 m^2 GP
	16 – 40	23	40		
IH31	0 – 24	23	80	0,5	0,75 m^2 GP
	24 – 56	23	40		
IH32*	0 – 24	23	80	0,5	0,75 m^2 GP
	24 – 56	23	40		

* ventoinha activada

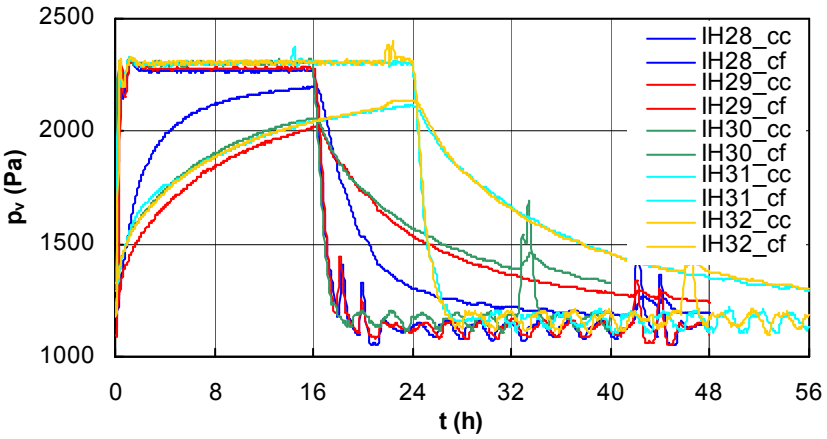


Figura 90 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc) nos ensaios IH28 a IH32

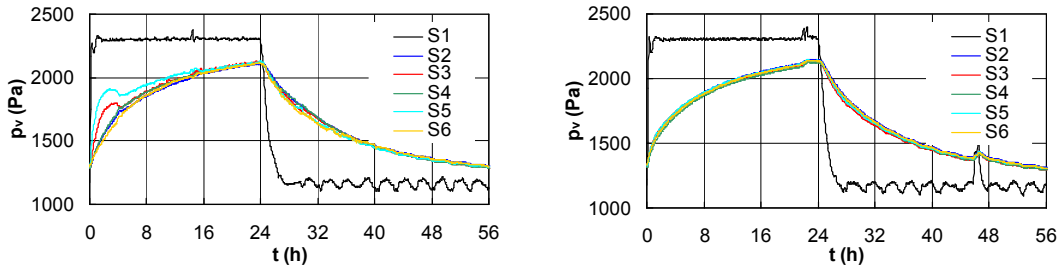


Figura 91 – Ciclo estável de variação da pressão de vapor registado no interior da câmara de fluxo pelas várias sondas, nos ensaios IH31 e IH32

Tabela 29 – Valores característicos da variação da pressão de vapor na câmara de fluxo nos ensaios IH28 a IH32

Ensaio	$p_{v,cc}$ (Pa)	$p_{v,m}$ (Pa)	$p_{v,90}$ (Pa)	$p_{v,90} - p_{v,m}$ (Pa)
IH28	1531	1555	2167	612
IH29	1530	1557	1951	394
IH30	1647	1663	2012	349
IH31	1668	1698	2074	376
IH32	1676	1701	2082	381

A partir destes resultados pode dizer-se que a obtenção de ciclos de duração superior a um dia é, também, possível com a infra-estrutura laboratorial. A estratificação da pressão de vapor foi mais uma vez observada nestes ensaios.

5.5 Ensaios na Câmara de Fluxo

5.5.1 Ciclos diários com N=1 h^{-1}

No caso dos ciclos diários com N=1 h^{-1} realizou-se um ensaio com a câmara vazia e três ensaios com introdução de placas de gesso cartonado na câmara de fluxo. A Tabela 30 apresenta um resumo das características destes ensaios.

Tabela 30 – Características dos ensaios de ciclo diário com N=1 h^{-1}

Ensaio	Períodos (h)	Câmara climática		Câmara de fluxo	
		T (ºC)	HR (%)	N (h^{-1})	Elementos
IH1	0 – 8	23	70	1,0	–
	8 – 24	23	50		
IH2	0 – 8	23	70	1,0	0,75 m^2 GC
	8 – 24	23	50		
IH3	0 – 8	23	70	1,0	0,50 m^2 GC
	8 – 24	23	50		
IH4	0 – 8	23	70	1,0	0,25 m^2 GC
	8 – 24	23	50		

Os resultados obtidos nestes ensaios apresentam-se nas figuras seguintes. O gráfico da Figura 92 apresenta, para o ciclo estável, a variação da humidade relativa na câmara climática envolvente e a média da variação da humidade relativa registada pelas sondas localizadas no interior da câmara de fluxo, nos ensaios IH1 a IH4. Na

Figura 93 apresenta-se o gráfico de frequências acumuladas, *Fa*, correspondente. A Tabela 31 contém alguns valores característicos da variação da humidade relativa nos ensaios em análise, nomeadamente a média, HR_m, o percentil 90, HR_{90}, e a diferença dos dois valores, para cada um deles.

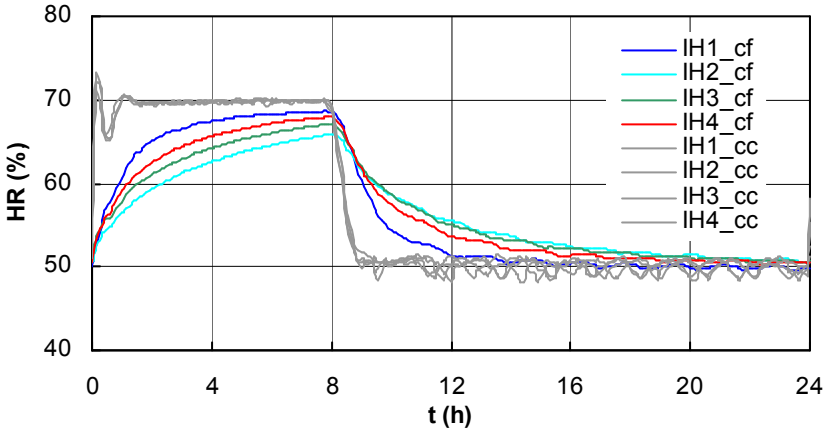


Figura 92 – Ciclo estável de variação da humidade relativa, no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc), nos ensaios com N=1 h^{-1}

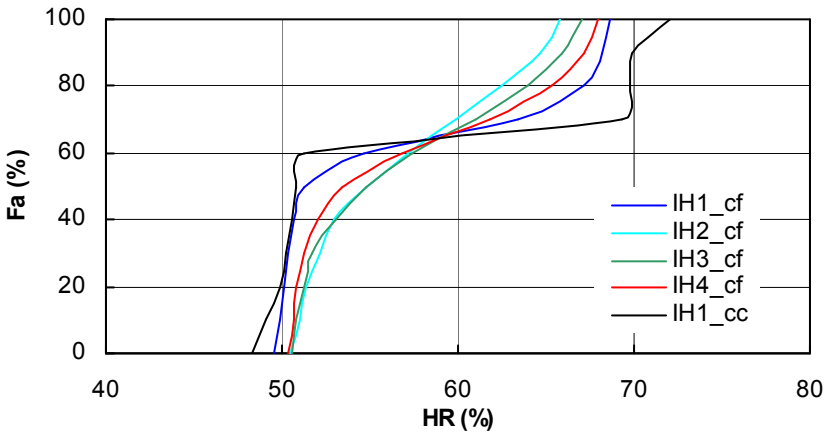


Figura 93 – Frequências acumuladas da variação da humidade relativa, no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc), nos ensaios com N=1 h^{-1}

Tabela 31 – Valores característicos da variação da humidade relativa, na câmara de fluxo, nos ensaios com N=1 h^{-1}

Ensaio	HR_m (%)	HR_{90} (%)	HR_{90} - HR_m (%)
IH1	56,5	68,2	11,7
IH2	56,5	64,6	8,1
IH3	56,9	66,0	9,1
IH4	56,8	67,1	10,3

Este primeiro conjunto de ensaios na câmara de fluxo sugere, desde logo, alguns comentários.

- A infra-estrutura de ensaio possibilita a obtenção de ciclos diários estáveis, e comparáveis, dada a sua repetibilidade;
- O efeito da inércia higroscópica diária, introduzida por diferentes áreas de gesso cartonado, pôde ser observado na variação da humidade relativa;
- A utilização de valores característicos como a média e o percentil 90 permite comparar facilmente os resultados destes ensaios;
- A média de HR, no interior da câmara de fluxo, teve variações negligenciáveis entre os quatro ensaios, inferiores a 0,4 % HR, e muito próxima da média da variação de HR na câmara climática que, nestes ensaios foi 56,9 %;
- O amortecimento dos picos de variação de HR, provocado pela inércia higroscópica, associado aqui à redução da diferença entre o valor médio e o valor do percentil 90, cresceu com o aumento da higroscopicidade presente no interior da câmara, definido neste caso pelo aumento de área exposta do material poroso testado;
- Uma duração de cada ensaio inferior a quatro dias foi suficiente para obter o ciclo estável, correspondente à repetição da variação no tempo de HR em dois ciclos consecutivos.

5.5.2 Ciclos diários com N=0,5 h^{-1}

A Tabela 32 resume as características dos ensaios de ciclo diário com N=0,5 h^{-1}. As figuras seguintes apresentam gráficos com os ciclos estáveis de variação da humidade relativa, resultantes dos ensaios realizados, comparando-se com a variação na câmara vazia, IH5, as variações obtidas em quatro conjuntos de ensaios. Refira-se

que nos casos onde a área ocupada por elementos é superior a 0,75 m^2, alguns provetes tiveram de ser colocados na vertical, encostados às faces da câmara de fluxo.

Tabela 32 – Características dos ensaios de ciclo diário com N=0,5 h^{-1}

Ensaio	Períodos (h)	Câmara climática		Câmara de fluxo	
		T (ºC)	HR (%)	N (h^{-1})	Elementos
IH5	0 – 8	23	80	0,5	–
	8 – 24	23	40		
IH6	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GC
	8 – 24	23	40		
IH7	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GC + 0,75 m^2 GC3
	8 – 24	23	40		
IH8	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GC2A
	8 – 24	23	40		
IH9	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GC2A + 0,25 m^2 GC
	8 – 24	23	40		
IH10	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GC2A + 0,75 m^2 GC
	8 – 24	23	40		
IH11	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GP
	8 – 24	23	40		
IH12	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GP2A
	8 – 24	23	40		
IH13	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GT
	8 – 24	23	40		
IH14	0 – 8	23	80	0,5	0,75 m^2 GT2A
	8 – 24	23	40		
IH15	0 – 8	23	80	0,5	1 resma
	8 – 24	23	40		
IH16	0 – 8	23	80	0,5	4 x ¼ resma
	8 – 24	23	40		
IH17	0 – 8	23	80	0,5	8 x ¼ resma
	8 – 24	23	40		
IH18	0 – 8	23	80	0,5	8 x ¼ resma + 0,75 m^2 GC
	8 – 24	23	40		

Na Figura 94 podem observar-se os resultados obtidos para a variação de humidade relativa na câmara de fluxo, nos ensaios com a câmara vazia ou com o fundo preenchido por provetes dos materiais base sem acabamento.

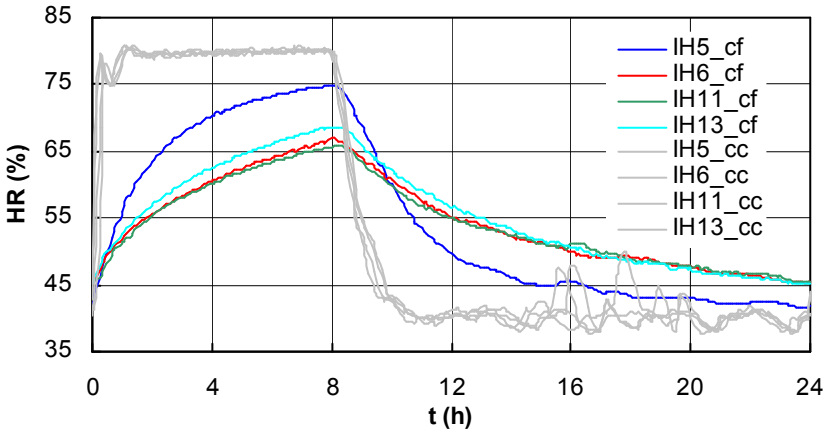


Figura 94 – Ciclo estável de variação da humidade relativa, no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc), nos ensaios IH5 (vazio), IH6 (0,75 m^2 GC), IH11 (0,75 m^2 GP) e IH13 (0,75 m^2 GT)

Na Figura 95 apresenta-se a variação de humidade relativa, na câmara de fluxo, nos ensaios com a câmara vazia ou com o fundo preenchido por provetes dos materiais base, com o mesmo acabamento à base de pintura com primário e tinta vinílica.

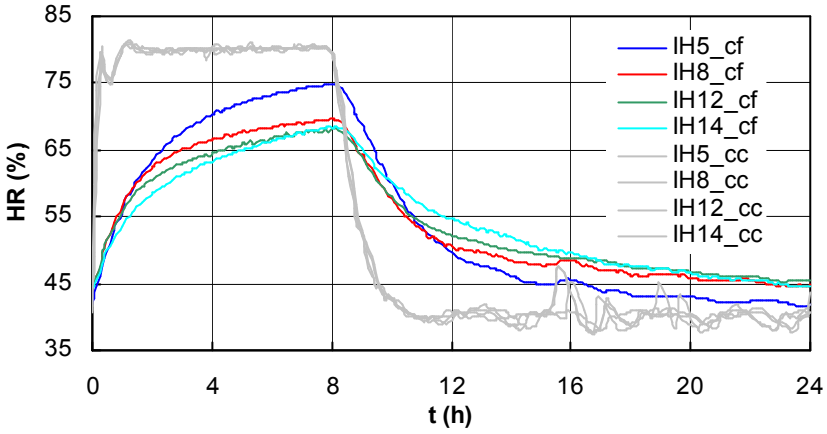


Figura 95 – Ciclo estável de variação da humidade relativa, no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc), nos ensaios IH5 (vazio), IH8 (0,75 m^2 GC2A), IH12 (0,75 m^2 GP2A) e IH14 (0,75 m^2 GT2A)

Na Figura 96 apresenta-se a variação de humidade relativa, na câmara de fluxo, nos ensaios com a câmara vazia ou com a inclusão de provetes de gesso cartonado, com e sem pintura, em diferentes combinações.

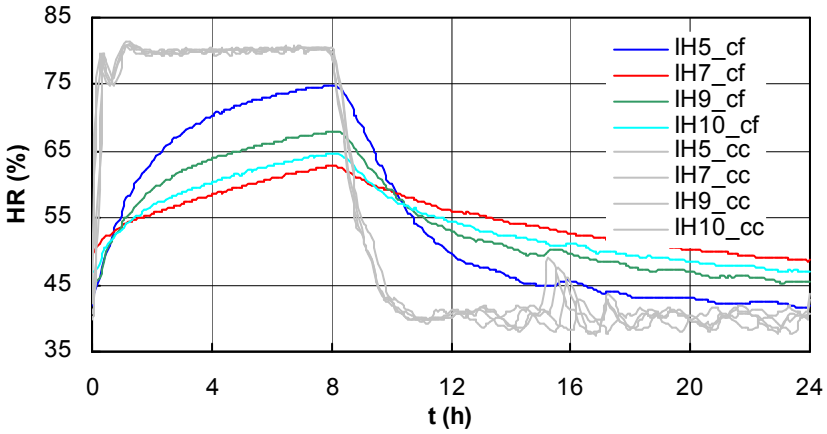


Figura 96 – Ciclo estável de variação da humidade relativa no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc) nos ensaios IH5 (vazio), IH7 (0,75 m^2 GC + 0,75 m^2 GC3), IH9 (0,75 m^2 GC2A + 0,25 m^2 GC) e IH10 (0,75 m^2 GC2A + 0,75 m^2 GC)

Na Figura 97 apresenta-se a variação de humidade relativa, na câmara de fluxo, nos ensaios com a câmara vazia ou com a inclusão de diferentes quantidades de papel ou papel e gesso cartonado sem acabamento.

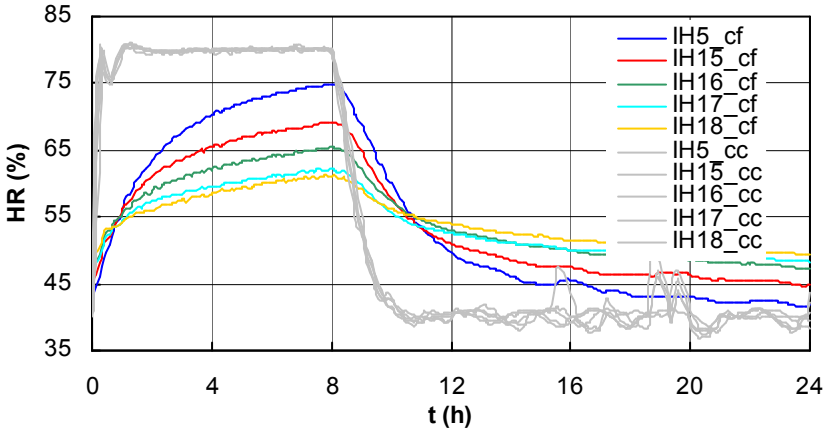


Figura 97 – Ciclo estável de variação da humidade relativa, no interior da câmara de fluxo (cf) e na câmara climática envolvente (cc), nos ensaios IH5 (vazio), IH15 (1 resma), IH16 (4 × ¼ resma), IH17 (8 × ¼ resma) e IH18 (8 × ¼ resma + 0,75 m^2 GC)

A Tabela 33 contém alguns valores característicos da variação da humidade relativa nos ensaios em análise, nomeadamente a média, HR_m, o percentil 90, HR_{90}, e a diferença dos dois valores, para cada um deles.

Tabela 33 – Valores característicos da variação da humidade relativa na câmara de fluxo nos ensaios com N=1 h^{-1}

Ensaio	HR_m (%)	HR_{90} (%)	HR_{90} - HR_m (%)
IH5	54,6	73,2	18,6
IH6	54,5	64,6	10,1
IH7	55,1	61,2	6,1
IH8	54,6	68,3	13,7
IH9	54,6	66,5	11,9
IH10	54,4	63,2	8,8
IH11	54,3	63,9	9,6
IH12	54,7	66,8	12,1
IH13	55,4	66,7	11,3
IH14	54,8	66,7	11,9
IH15	54,4	67,8	13,4
IH16	54,7	64,2	9,5
IH17	53,9	61,2	7,3
IH18	54,3	60,2	5,9

Este conjunto de ensaios sugere alguns comentários, em complemento aos já referidos na subsecção anterior:

- A obtenção de ciclos diários estáveis pretendidos foi novamente conseguida, numa campanha de ensaio que se prolongou por vários meses;
- O efeito da inércia higroscópica diária, introduzido por várias combinações de materiais porosos, pode ser comparado através de valores característicos dos resultados dos ensaios;
- O amortecimento produzido pelo preenchimento do fundo da câmara com provetes dos materiais base teve resultados semelhantes, sendo ligeiramente inferior por parte dos provetes GT, com HR_{90} - HR_m = 11,3 % em IH13 contra 9,6 % em IH11 e 10,1 % em IH6 ;
- O amortecimento produzido pelo preenchimento do fundo da câmara com provetes dos materiais base pintados todos com o mesmo esquema também foi semelhante, sendo ligeiramente inferior por parte dos provetes GC2A, com HR_{90} - HR_m = 13,7 % em IH8 contra 12,1 % em IH12 e 11,9 % em IH14. Este amortecimento foi sempre inferior ao das configurações com o mesmo material base sem pintura, como seria de esperar;

— A média de HR no interior da câmara de fluxo teve, em geral, variações negligenciáveis entre os vários ensaios e a média da variação de HR na câmara climática, que se situou em 54,5%;
— A excepção mais evidente a este aspecto verificou-se no ensaio IH13, o que significa que o ciclo estável não foi aí totalmente conseguido;
— A duração de cada ensaio, até à obtenção do ciclo estável, variou entre quatro e dez dias.

Os ensaios de referência descritos nesta secção permitiram obter um conjunto de resultados importante cuja discussão é retomada no Capítulo 6.

5.6 Síntese Crítica do Capítulo 5

O Capítulo 5 apresenta uma infra-estrutura inovadora destinada à avaliação experimental do efeito da inércia higroscópica na variação da humidade relativa interior.

Foi construída uma câmara de controlo de fluxo de ar e vapor no interior de uma câmara climática existente no LFC-FEUP. Esta solução permite controlar a temperatura de todo o conjunto. A câmara de fluxo permite reproduzir, a escala reduzida, o comportamento de um compartimento. Apesar de o conceito do ensaio em câmara de fluxo não ser inédito, a infra-estrutura desenvolvida tem características absolutamente inovadoras. Refira-se como exemplo disso os dois sistemas alternativos de produção de vapor utilizados, que permitiram solucionar a principal dificuldade do ensaio.

Esta infra-estrutura apresenta as seguintes vantagens:

— Configuração possível dos ensaios muito variada;
— Elevada capacidade de controlo dos vários parâmetros de ensaio;
— Garantia de repetição das condições de ensaio pretendidas até à obtenção de ciclos estáveis;
— Facilidade de montagem dos ensaios, incluindo a mudança de provetes.

Realizou-se um conjunto significativo de ensaios de controlo com o objectivo de validar e calibrar a infra-estrutura laboratorial. Nesses ensaios foi detectado que a câmara de fluxo dispõe de alguma higroscopicidade activa que deve ser considerada. Os dois processos de produção de vapor foram comparados, tendo sido detectadas pequenas diferenças no seu desempenho. A homogeneidade do ar na câmara de fluxo

foi avaliada em vários ensaios, tendo sido demonstrado que existe estratificação da pressão de vapor.

Foi realizada uma campanha de ensaios onde se procurou avaliar a inércia higroscópica de diferentes combinações de elementos, num ciclo diário que reflecte a utilização típica de um quarto de dormir.

A utilização de valores característicos permitiu obter meios de comparação simples dos resultados obtidos. Foi possível obter uma medida do efeito da inércia higroscópica através do amortecimento produzido por uma determinada combinação de elementos colocados na câmara de fluxo. No entanto, é evidente a necessidade de um parâmetro que possa descrever a inércia higroscópica dessa combinação de elementos, se correlacione com o amortecimento produzido e permita inclusive a sua previsão.

Capítulo 6

Análise do Impacto da Inércia Higroscópica na Variação da Humidade Relativa Interior

6.1 Introdução

Este capítulo apresenta o trabalho de simulação realizado com o programa HAM-Tools e a sua conjugação com os ensaios descritos nos Capítulos 4 e 5. Pretende-se, em primeiro lugar, validar e calibrar o modelo de cálculo aplicado e as propriedades dos materiais utilizadas na simulação. Procede-se, para isso, a uma comparação sistemática dos resultados de simulações numéricas com os resultados dos ensaios de determinação do MBV e de avaliação da inércia higroscópica.

Em segundo lugar, aplica-se o modelo à simulação de um quarto virtual. Os resultados obtidos permitem uma análise de sensibilidade ao efeito da inércia higroscópica, combinada com outros parâmetros higrotérmicos que influenciam a variação da humidade relativa interior. A influência dessa variação no risco de desenvolvimento de fungos é também abordada.

Por fim, apresenta-se uma proposta de relação teórica entre a inércia higroscópica estimada para um compartimento e o seu impacto na variação da humidade relativa.

6.2 Simulação Numérica de Ensaios MBV

6.2.1 Modelação aplicada

A modelação numérica dos ensaios MBV e das suas variantes foi realizada no programa HAM-Tools. A utilização deste programa num tipo de simulação específico, como já se referiu, implica a associação e modificação de um ou mais dos seus

módulos base. É também necessário criar um conjunto de dados, e definir condições fronteira, adaptados ao problema que se pretende simular.

O modelo, para estes ensaios, foi construído a partir do módulo de análise de um elemento construtivo. O aspecto desse modelo, em ambiente Simulink, é apresentado na Figura 98, através da interface principal com o utilizador da variante MBVsim1, destinada à análise de provetes homogéneos sem pintura.

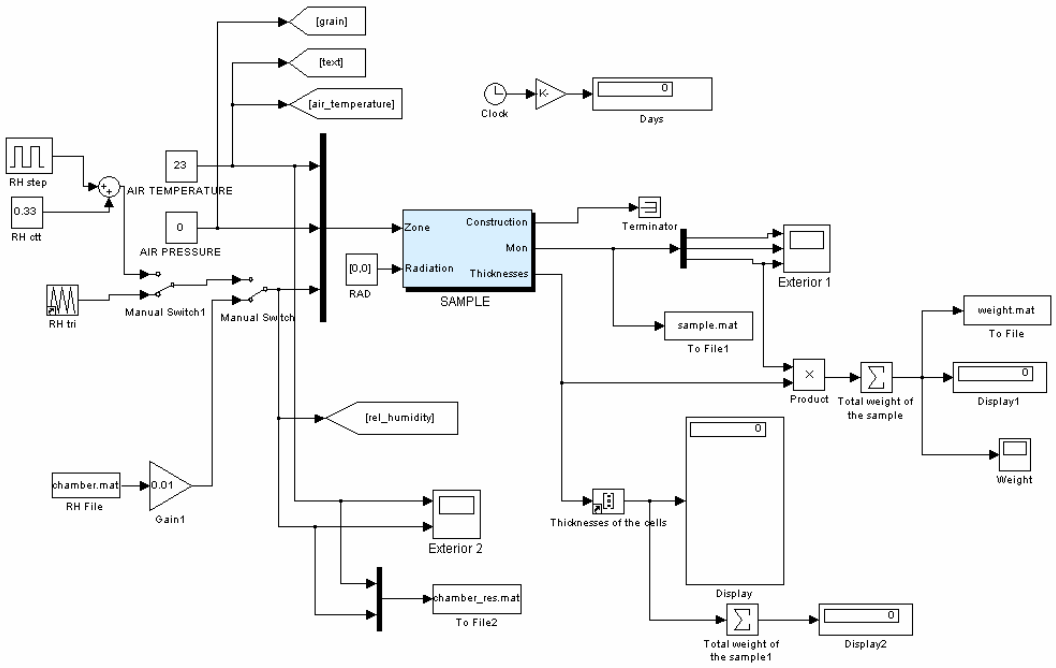


Figura 98 – O modelo MBVsim1

No modelo MBVsim1, o módulo "SAMPLE" agrega um conjunto de submódulos responsáveis pelo cálculo higrotérmico do provete. Os outros elementos visíveis na Figura 98 permitem, por um lado, introduzir os dados da temperatura e humidade relativa a que o provete é submetido e, por outro, visualizar os resultados mais relevantes ou definir a sua forma de armazenamento. O princípio de cálculo subjacente a este modelo pode ser apreendido mais facilmente através do esquema da Figura 99.

A definição das características do provete a ensaiar e dos coeficientes de transferência à superfície é efectuada através de uma caixa de diálogo de configuração do módulo "SAMPLE".

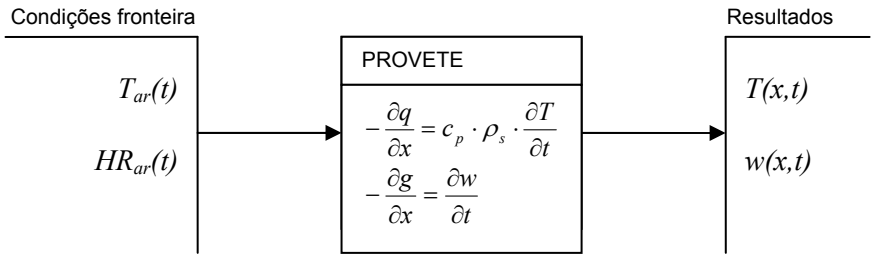


Figura 99 – Esquema de simulação do modelo MBVsim1

O módulo "SAMPLE" foi construído com uma discretização da espessura do material em oito volumes, tendo os volumes da superfície metade da espessura dos restantes. Um teste preliminar, com apenas quatro volumes, não revelou diferenças significativas nos resultados, pelo que se considerou fiável a discretização adoptada.

A adopção de um coeficiente de transferência de vapor à superfície muito reduzido, 1×10^{-50} kg/(m^2·s·Pa), permite simular o efeito da pintura epoxy na contraface dos provetes testados.

A simulação do comportamento de provetes pintados foi efectuada de três formas diferentes. Na primeira utilizou-se o modelo MBVsim1, considerando o efeito da pintura como uma diminuição do valor do coeficiente de transferência de vapor à superfície.

A segunda técnica de simulação passou pela consideração do efeito da pintura como uma resistência variável cujo valor corresponde, em cada momento de cálculo, ao valor da resistência da pintura em causa, para o valor médio da humidade relativa entre a superfície e o ar. Esta técnica foi implementada no modelo MBVsim2, que difere de MBVsim1 na substituição do módulo "SAMPLE" pelo módulo "SAMPLE_Rp". A diferença entre os dois módulos está apenas no cálculo do valor variável da resistência superficial ao vapor. Para esse cálculo ser possível é necessário introduzir na base de dados a curva (HR, s_d) de cada pintura.

A terceira forma de análise de provetes pintados utiliza o modelo MBVsim3, que se obteve a partir do modelo MBVsim1 por substituição do módulo "SAMPLE" pelo módulo "COATED SAMPLE". A diferença deste para o primeiro está no cálculo do efeito da pintura, que é modelada como um material adicional, discretizado em dois volumes. As propriedades necessárias para a sua caracterização são, neste modelo, do mesmo tipo das do material base.

6.2.2 Resultados em provetes sem pintura

A simulação de ensaios MBV, e das suas variações, em provetes sem pintura, foi efectuada com o modelo MBVsim1 e com recurso às propriedades determinadas no Capítulo 4.

A introdução da permeabilidade ao vapor não ofereceu grandes dúvidas nos três materiais base testados: gesso cartonado (GT), gesso projectado (GP) e reboco de gesso e cal (GT). A variação desta propriedade com a humidade relativa foi determinada com precisão para os três materiais. A sua influência nos resultados de simulação é relevante mas uma análise de sensibilidade permitiu verificar que só uma variação muito elevada do seu valor poderia provocar alterações nesses resultados. As curvas de permeabilidade obtidas nos ensaios foram, por isso, utilizadas directamente como dados nestas simulações.

A introdução da curva higroscópica de cada material, como dado de simulação, é mais complexa. Os ensaios para a sua determinação mostraram que a histerese pode ter algum significado nestes materiais. Como o programa HAM-Tools não simula a histerese, trabalhando com uma curva higroscópica única para cada material, foi necessário avaliar qual o impacto que esta simplificação tem nas simulações realizadas. Foi possível observar, também, que pequenas alterações dos valores da curva higroscópica afectam de forma mais evidente os resultados das simulações.

As curvas higroscópicas, utilizadas para simular os materiais base, apresentam-se na Figura 100. Como se pode verificar, foram utilizadas para os materiais GC e GP as curvas de adsorção e desadsorção principais e uma curva intermédia, associável a uma curva de transição, calibrada pelo melhor ajuste entre os resultados das simulações e dos ensaios. Para o material GT foi utilizada apenas a curva de adsorção. Apresenta-se também a curva de adsorção do gesso cartonado, gc_ecA41, utilizada em exercícios comuns de simulação realizados no âmbito do projecto “Annex 41” já referenciado em 2.5.9. Trata-se de uma curva obtida a partir de valores contidos em Kumaran (1996) e já referidos em 4.3.4.

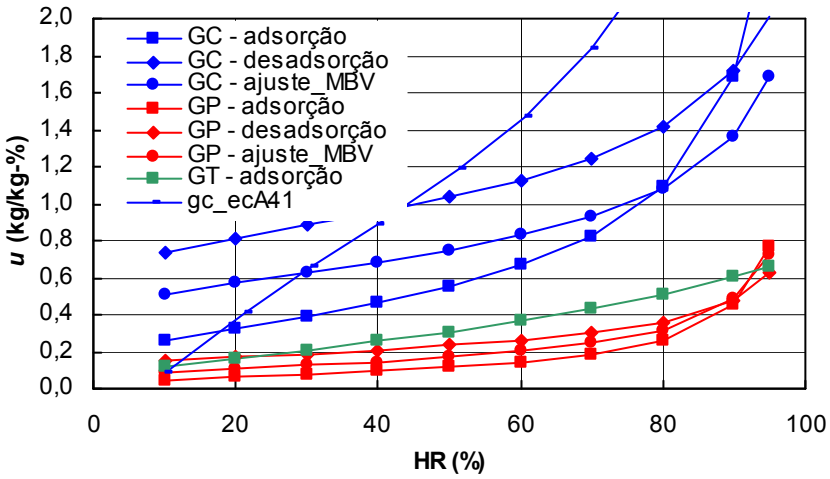


Figura 100 – Curvas higroscópicas para simulação numérica de GC, GP e GT

A solicitação climática dos provetes foi simulada com recurso a ficheiros de dados contendo ciclos reais de funcionamento da câmara climática. O valor do coeficiente β_p foi fixado em 2×10^{-8} s/m. Os tipos de simulações numéricas, de ensaios dinâmicos considerados, resumem-se na Tabela 34 e a sua conexão com os provetes não pintados resume-se na Tabela 35.

Tabela 34 – Simulações numéricas de ensaios dinâmicos de ciclo diário

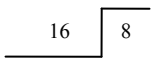
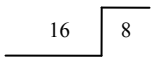
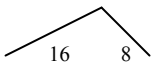
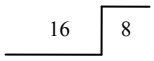
Simulação	T (ºC)	HRmax (%)	HRmin (%)	Ciclo teórico (h)
1	23	75	33	
2	23	90	48	
3	23	75	33	
4	15	75	33	

Tabela 35 – Resumo das simulações de ensaios dinâmicos de ciclo diário realizados em provetes não pintados

Provete	Material	Esp. (mm)	Sim. 1	Sim. 2	Sim. 3	Sim. 4
GC	Gesso cartonado	12,5	×	×	×	×
GP	Gesso projectado	21,0	×	×	×	×
GP_1cm	Gesso projectado	10,0	×		×	
GT	Gesso e cal	10,0	×	×	×	×
gc_ecA41	Gesso cartonado	12,5	×			

Os resultados obtidos nestas simulações apresentam-se em seguida, sendo efectuada a comparação dos valores obtidos nos ensaios laboratoriais com valores de simulação resultantes de diferentes opções utilizadas no cálculo.

As curvas obtidas em ensaios usam a notação adoptada no Capítulo 4, pelo que GC_1, por exemplo, designa o ensaio realizado sobre o provete 1 de gesso cartonado. As curvas obtidas por simulação são designadas pelo sufixo *ad*, *des* ou *aj* para a utilização da curva higroscópica de adsorção, desadsorção ou de ajuste_MBV, respectivamente.

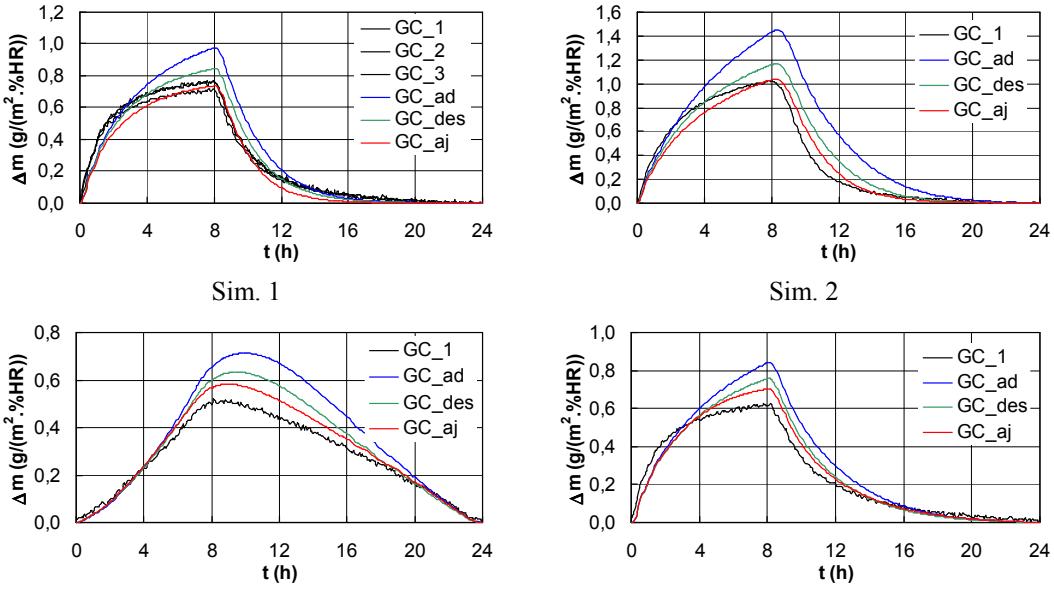


Figura 101 – Variação da massa dos provetes GC nas simulações 1 a 4

A Figura 101 apresenta os resultados obtidos para o provete GC. Nos resultados da simulação 1 é possível verificar que a utilização da curva de adsorção resulta num afastamento por excesso em relação aos ensaios, que também está presente na utili-

zação da curva de desadsorção. Só a curva ajustada aos resultados do ensaio permite ter uma aproximação melhor, mas ainda assim imperfeita.

Estes resultados são, apesar de tudo, coerentes. Num comportamento dinâmico, de adsorção e desadsorção sucessiva, os materiais seguem um ciclo histerético delimitado pelas curvas principais de adsorção e desadsorção. Quanto maior a expressão da histerese num determinado material e intervalo de humidade relativa da solicitação higrotérmica, maior será o afastamento entre ensaios e simulações com essas curvas principais. A curva higroscópica designada por ajuste_MBV está bastante próxima de uma curva de transição associada ao ciclo que varia entre 33 % e 75 % HR. Uma curva única dificilmente pode resultar numa coincidência perfeita entre simulação e ensaio, pois nunca traduzirá com a mesma exactidão a evolução em adsorção e em desadsorção.

Outra fonte de erro pode associar-se ao tipo de expressão matemática utilizada para caracterizar as curva higroscópicas. É possível melhorar o ajuste obtido com a introdução de pontos da curva higroscópica que, no limite, não correspondem exactamente ao andamento clássico dessas curvas.

As conclusões retiradas da simulação 1 são extensíveis às restantes. Como a curva higroscópica ajuste_MBV foi definida para a simulação 1, o afastamento que se verifica nas simulações 3 e 4 é também coerente com o que se disse acima.

Na Figura 102 apresenta-se novamente a comparação entre a simulação 1 e os ensaios MBV do material GC, mas com outras variações nos dados, como a utilização da curva de adsorção associada a um coeficiente β_p de 4×10^{-9} s/m e a utilização da curva higroscópica do gesso cartonado gc_ecA41.

Como se pode verificar, a redução do coeficiente β_p para permitir uma aproximação aos resultados dos ensaios implicaria a adopção de um valor inverosímil que só permite obter uma aproximação ao valor máximo e não ao desenvolvimento da curva no ciclo estável.

A utilização da curva retirada da literatura, neste exemplo, ilustra o facto de existirem dados disponíveis para simulação, de fontes fidedignas, mas que não se adaptam necessariamente aos materiais que especificamente se pretende simular. Seja por conterem erros na sua definição seja por se referirem a produtos com a mesma designação mas composição diferente.

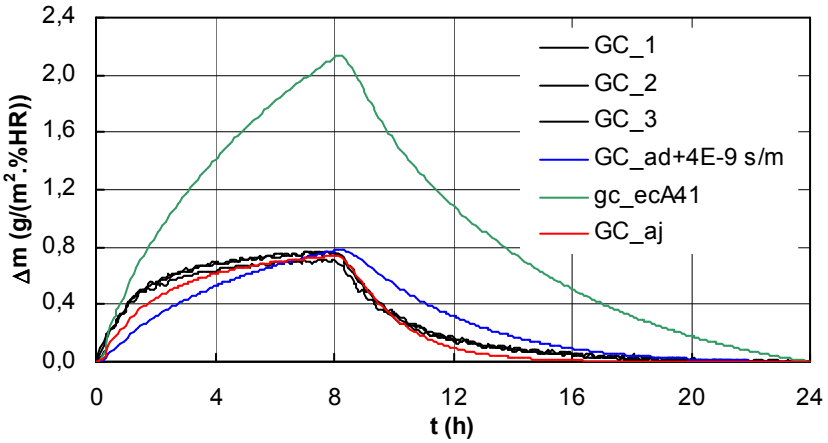
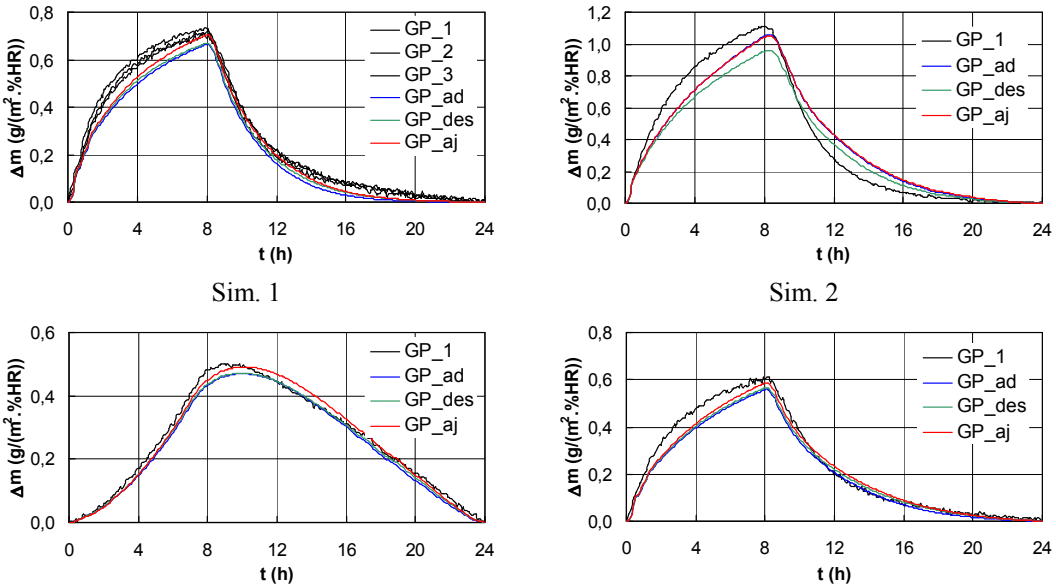


Figura 102 – Variação da massa na simulação 1 com dados alternativos

A Figura 103 apresenta os resultados obtidos para os provetes GP. Neste caso, a aproximação das simulações aos ensaios foi bastante melhor que para GC, sendo quase dispensável a consideração de uma curva higroscópica ajustada. Este resultado chega a ser surpreendente pois, dadas as características do produto, poderia ser admitida uma maior variabilidade de resultados. Os bons resultados obtidos devem-se, em grande medida, ao facto de se tratar de um material com uma capacidade higroscópica específica reduzida.

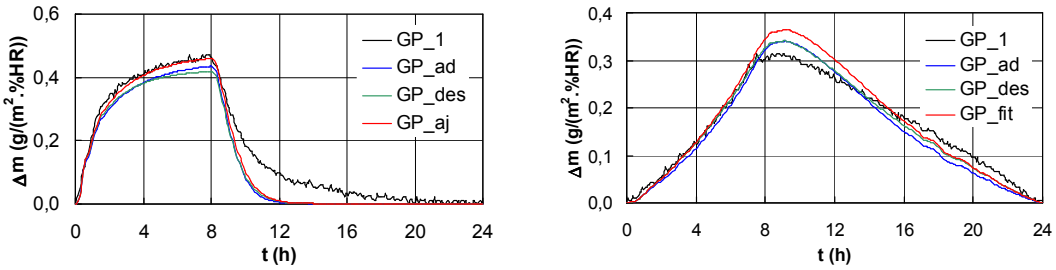


Sim. 1 Sim. 2

Sim. 3 Sim. 4

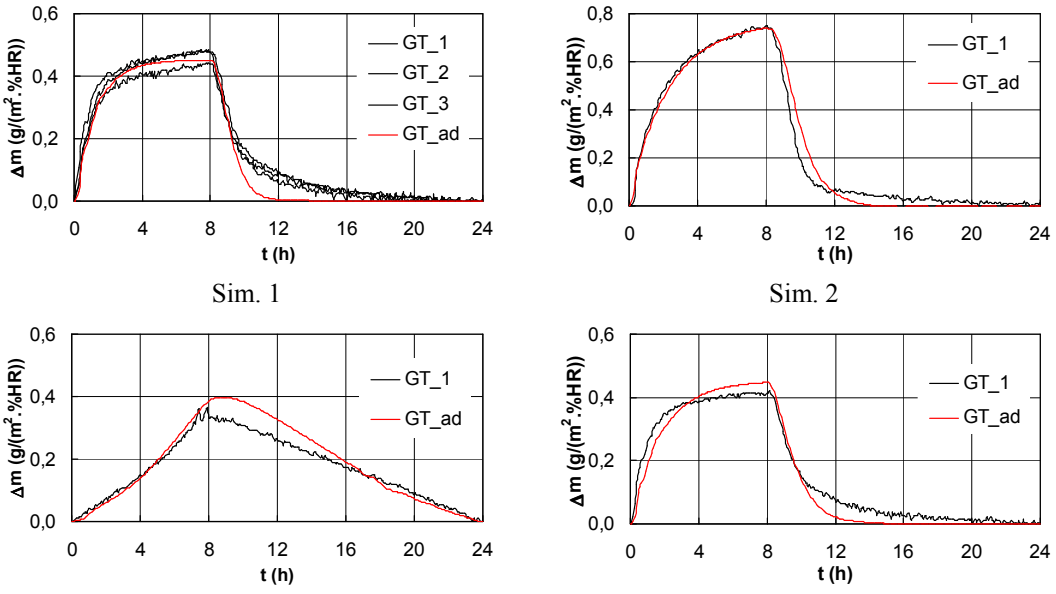
Figura 103 – Variação da massa dos provetes GP nas simulações 1 a 4

A Figura 104 apresenta os resultados obtidos para GP_1cm onde é possível observar também uma boa concordância entre simulações e ensaios. Uma boa concordância foi também encontrada nos resultados obtidos para GT, apresentados na Figura 105.



Sim. 1 Sim. 3

Figura 104 – Variação da massa dos provetes GP_1cm nas simulações 1 e 3



Sim. 1 Sim. 2

Sim. 3 Sim. 4

Figura 105 – Variação da massa dos provetes GT nas simulações 1 a 4

A utilização do programa HAM-Tools possibilita, também, a avaliação da evolução da humidade relativa nos volumes que discretizam cada provete. A Figura 106 apresenta esses resultados para os vários provetes na simulação 1. Esta análise permite verificar que, nestes materiais, a profundidade de penetração da humidade num ciclo diário pode assumir valores superiores a 10 mm. De acordo com os resultados obtidos, ao fim de 8 horas, toda a espessura testada teria praticamente atingido o valor de equilíbrio da humidade relativa com o ar.

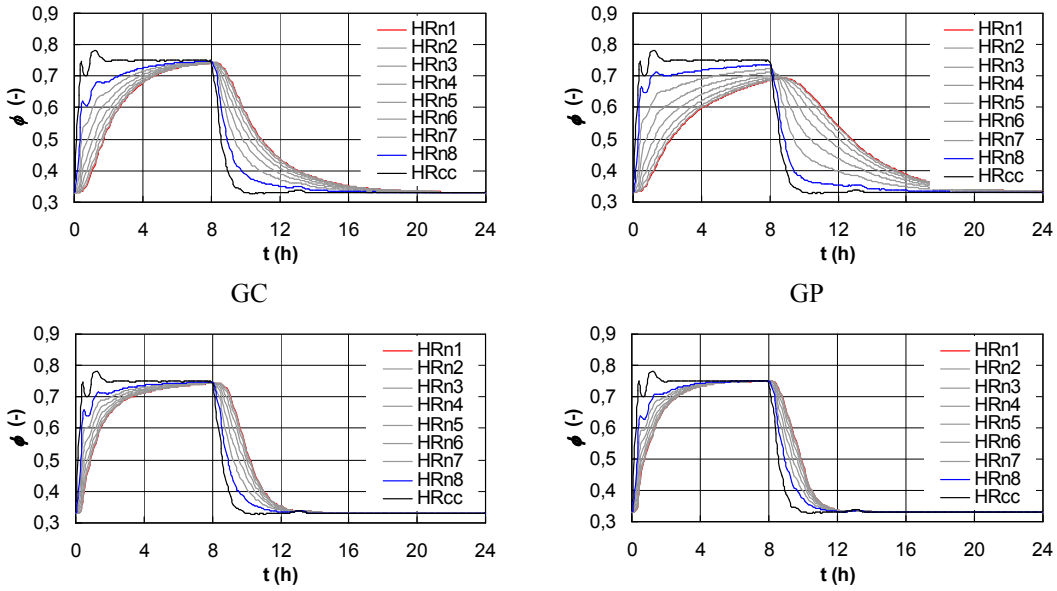


Figura 106 – Variação da humidade relativa nos volumes de cálculo dos provetes analisados na simulação 1

Na Figura 107 é possível verificar que, para a simulação 1, os ganhos de massa em função da espessura dos materiais gesso projectado e reboco de gesso e cal são já pouco significativos na passagem de 21 mm para 30 mm. As diferenças de comportamento, entre estes dois materiais, são pouco significativas se a espessura for inferior a 10 mm.

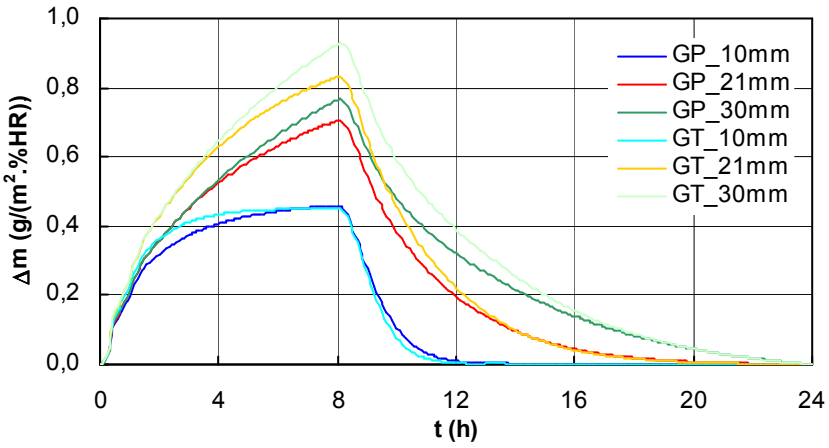


Figura 107 – Variação da massa em provetes GP e GT com diferentes espessuras, na simulação 1

6.2.3 Resultados em provetes pintados

A simulação do comportamento de provetes pintados, em ensaios MBV, foi efectuada com os modelos MBVsim1, MBVsim2 e MBVsim3. Os dados dos materiais corresponderam, essencialmente, às propriedades determinadas no Capítulo 4.

Os provetes pintados são constituídos pelo material base e pelo esquema de pintura aplicado na sua superfície. O conjunto de dados, validado na subsecção 6.2.2, foi utilizado na simulação dos materiais base, nos provetes sem pintura, incluindo as curvas higroscópicas que forneceram melhores resultados para cada material, nomeadamente GC-ajuste_MBV, GP-ajuste_MBV e GT-adsorção.

Para a simulação de cada pintura, dispõe-se apenas da variação de s_d em função da humidade relativa. Para a aplicação dos modelos MBVsim1 e MBVsim2 esta propriedade é suficiente. No caso de MBVsim1, é apenas necessário um valor intermédio do s_d, de cada pintura, que é adicionado a $s_{d,ar}$. Esse valor é condicionado pelo intervalo de variação da humidade relativa prevista para cada simulação. No modelo MBVsim2 foi utilizada a expressão que define s_d para cada pintura, com coeficientes apresentados na Tabela 14.

A aplicação do modelo MBVsim3 pressupõe o conhecimento da curva higroscópica das pinturas simuladas. Não tendo sido possível a sua avaliação laboratorial, foi utilizada uma curva higroscópica disponível na literatura. Nos estudos conduzidos por Goossens (2003) são propostas várias curvas higroscópicas para diferentes pinturas. A utilização de duas dessas curvas, apresentadas na Figura 108, foi testada nas simulações de provetes pintados, efectuadas com o modelo MBVsim3. Concluiu-se que a utilização de uma ou de outra não afectava significativamente os resultados, pelo que se utilizou em geral a curva designada por ch_pintura A.

A utilização dos resultados obtidos em ensaios de permeabilidade ao vapor como dados para a simulação de pinturas exige ainda uma reflexão adicional. A Figura 109 esquematiza a influência que a histerese pode ter na definição das propriedades de transferência de vapor de um material poroso.

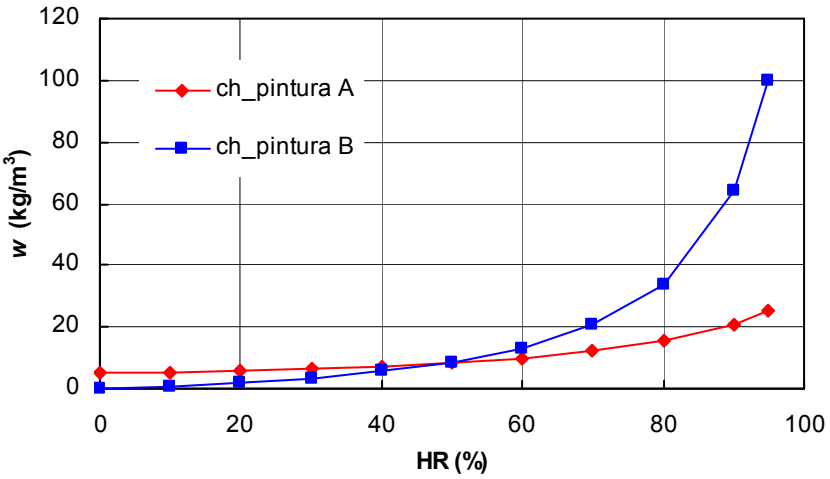


Figura 108 – Exemplo de curvas higroscópicas de pinturas definidas por (Goossens, 2003)

Admitindo que os ensaios de permeabilidade ao vapor seguem a curva de adsorção principal do material testado pode dizer-se que, a cada valor de s_d, corresponde não só um valor da humidade relativa mas, também, um valor do teor de humidade definido a partir dessa curva. Se o valor de s_d for função do teor de humidade, num material onde a histerese das curvas de adsorção seja relevante, será necessário conhecer a curva de transição seguida, de facto, pelo material, numa situação em análise, para definir correctamente esse valor.

A consequência prática deste conceito pode ser observada na Figura 109 onde se verifica que, para um determinado valor da humidade relativa de equilíbrio do material, se o seu teor de humidade estiver a ser definido por uma possível curva de transição, o s_d correspondente será menor do que o determinado pela relação (HR, s_d), obtida nos ensaios de permeabilidade ao vapor.

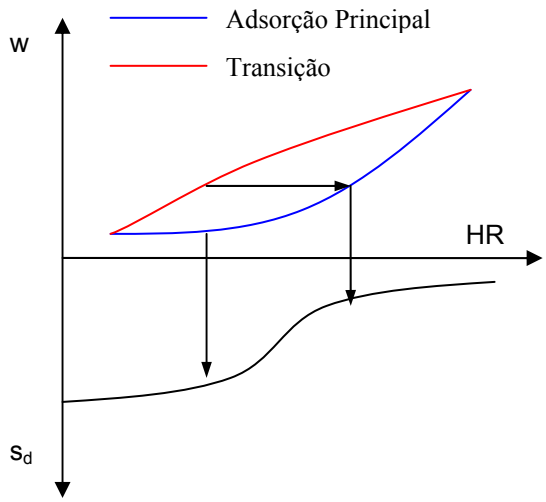


Figura 109 – Influência da histerese na definição da espessura equivalente da camada de ar de um material higroscópico

Os resultados da simulação 1, definida na Tabela 34, para provetes pintados, apresentam-se da Figura 110 à Figura 112. Optou-se por não apresentar os resultados obtidos para os outros tipos de simulações por terem conclusões redundantes. Compara-se para cada combinação de provete e esquema de pintura os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais com os resultados provenientes de simulações. A aplicação dos modelos MBVsim1, MBVsim2, MBVsim3 e MBVsim3 com a consideração da influência da histerese na relação entre as curvas higroscópicas das pinturas e a permeabilidade ao vapor, é identificada com os sufixos sim1, sim2, sim3 e sim3_hist, respectivamente.

Os resultados obtidos na simulação do esquema de pintura 2, apresentados na Figura 110, evidenciaram em geral uma boa aproximação aos resultados dos ensaios e pequenas diferenças em função do modelo de simulação da pintura adoptado. Tendo em conta a pequena variação entre 33 % e 75 % HR da resistência introduzida por esta pintura este segundo aspecto seria expectável.

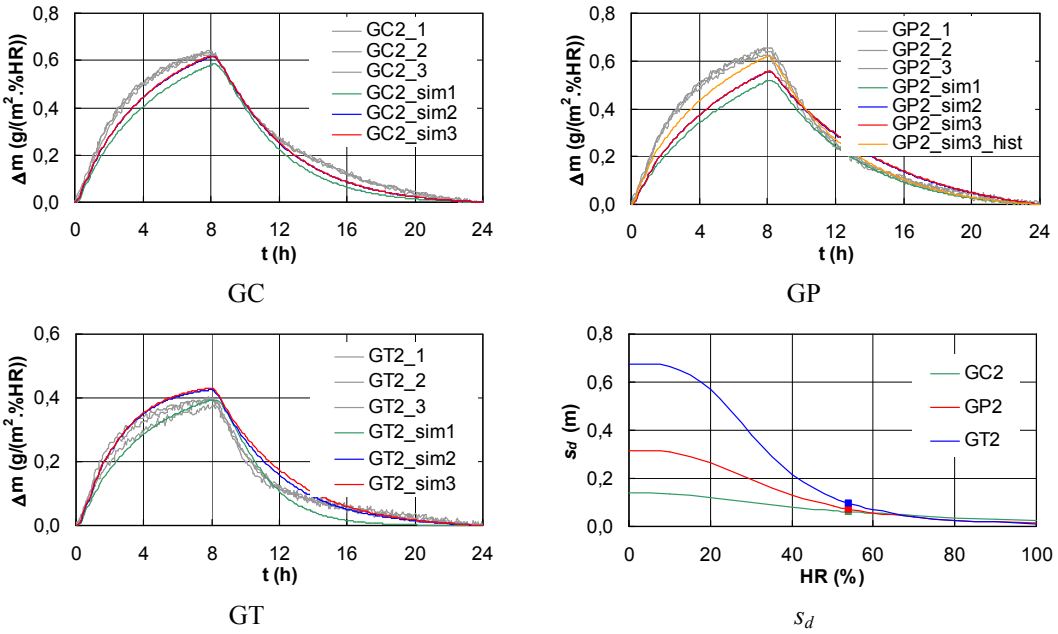


Figura 110 – Resultados obtidos para o esquema de pintura 2 sobre materiais de base GC, GP e GT e dados utilizados na simulação

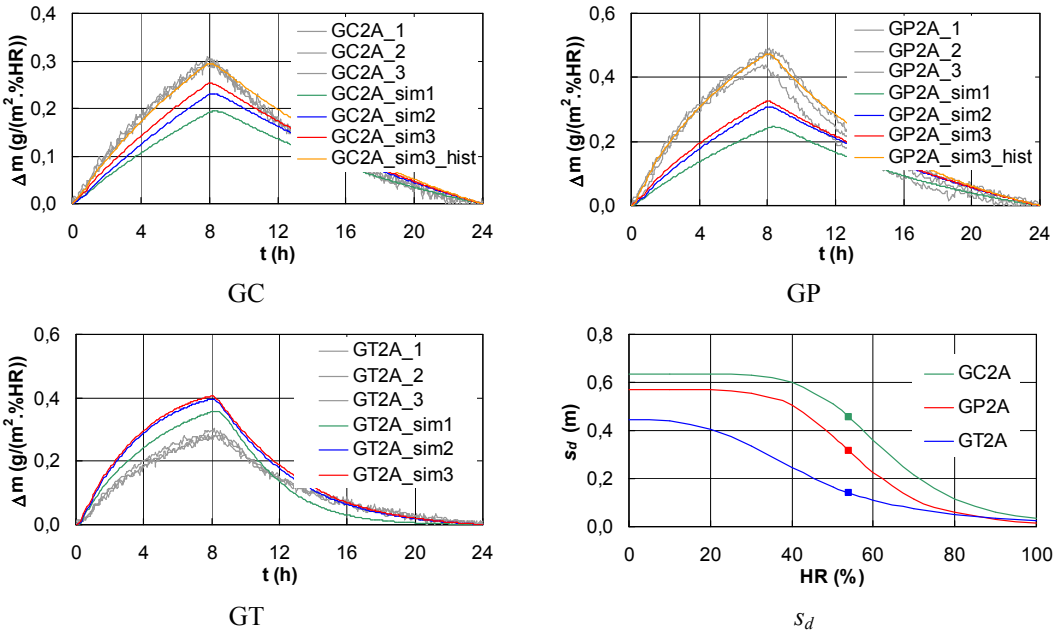


Figura 111 – Resultados obtidos para o esquema de pintura 2A sobre materiais de base GC, GP e GT e dados utilizados na simulação

Os resultados obtidos na simulação de provetes pintados com o esquema 2A, apresentados na Figura 111, evidenciam em geral uma menor concordância com os resultados dos ensaios laboratoriais.

Nos provetes GC2A foi, ainda assim, obtida uma boa aproximação, mesmo sem ter em conta a simulação que considerou o efeito da histerese. A obtenção de uma boa aproximação no caso dos provetes GP2A, pelo contrário, só é possível com a consideração de um efeito relevante da histerese. O afastamento por excesso, no caso dos provetes GT2A, só é explicável com a variabilidade da aplicação das pinturas ou erros inerentes ao processo de determinação dos valores de s_d desta pintura em particular.

A simulação do esquema 2A foi mais sensível ao modelo de simulação da pintura adoptado. A utilização de uma resistência adicional constante no modelo MBVsim1 implica um afastamento visível em relação aos valores obtidos com os modelos MBVsim2 e MBVsim3, onde a resistência adicional da pintura varia com a humidade relativa admitida para a pintura. A diferença entre os valores obtidos com esses dois modelos foi muito pequena.

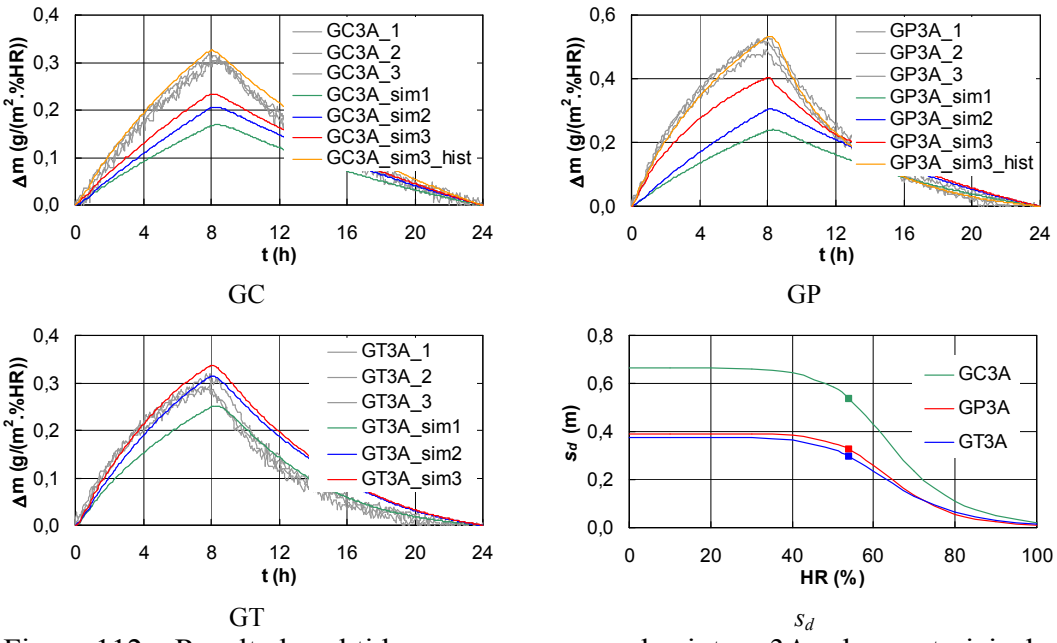


Figura 112 – Resultados obtidos para o esquema de pintura 3A sobre materiais de base GC, GP e GT e dados utilizados na simulação

Os resultados obtidos na simulação de provetes pintados com o esquema 3A, apresentados na Figura 112, revelam também algumas dificuldades em obter boas aproximações aos resultados experimentais. No caso dos provetes GT3A, no entanto, a aproximação obtida com modelos de resistência variável da pintura foi bastante aceitável.

A aplicação dos diferentes modelos de cálculo revelou, mais uma vez, o afastamento dos resultados obtidos com uma resistência adicional constante face aos que derivam de uma resistência adicional variável. Mas neste caso verificou-se ainda que, especialmente no caso dos provetes GP3A, a modelação da pintura como um material poroso, no modelo MBVsim3, produz resultados bastante melhores do que os que se obtêm com o modelo MBVsim2. A forma particular de cada curva de valores s_d é a principal responsável por essas diferenças.

A leitura de todos os resultados em conjunto pode ser feita com mais ou menos optimismo. De uma forma mais optimista, pode dizer-se que é sempre possível produzir boas simulações do efeito de uma pintura, a partir do conhecimento da sua permeabilidade ao vapor. A consideração do efeito da histerese permite, inclusive, ter sempre uma aproximação óptima e, assim, calibrar os dados para posteriores simulações.

Uma atitude mais pessimista permite verificar que, sem um processo de calibração, não é possível ter elevados níveis de confiança na simulação de elementos pintados. Por um lado, a variabilidade da aplicação de uma pintura sobre um material de revestimento é um factor a ter em conta. Por outro, a avaliação de facto da influência da histerese no comportamento das pinturas teria alguma complexidade do ponto de vista laboratorial. Não é simples, por isso, confirmar se os resultados de simulação obtidos, com a consideração do efeito da histerese, têm verdadeiro suporte físico ou se são apenas uma forma de encontrar um ajuste, com base numa manipulação numérica dos dados originais.

A aplicação dos modelos de transferência de humidade, que permitem obter bons resultados para materiais porosos inertes e rígidos, como os materiais de revestimento utilizados neste trabalho, pode não ser totalmente adequada a pinturas. Uma compreensão aprofundada dos processos de transporte de humidade em pinturas não foi ainda obtida (van der Wel e Adan, 1999). É, por isso, necessário aceitar um processo de calibração do modelo utilizado como uma forma de aumentar os níveis de confiança nas simulações produzidas.

6.3 Simulação Numérica de Ensaios na Câmara de Fluxo

6.3.1 Modelação aplicada

Os ensaios de avaliação da inércia higroscópica realizados na câmara de fluxo, descritos no Capítulo 5, foram simulados numericamente com o programa HAM-Tools, através dos modelos "CAM_FLUX1" e "CAM_FLUX2". O aspecto destes modelos, em ambiente Simulink, apresenta-se na Figura 113 e na Figura 115 através das suas interfaces principais com o utilizador.

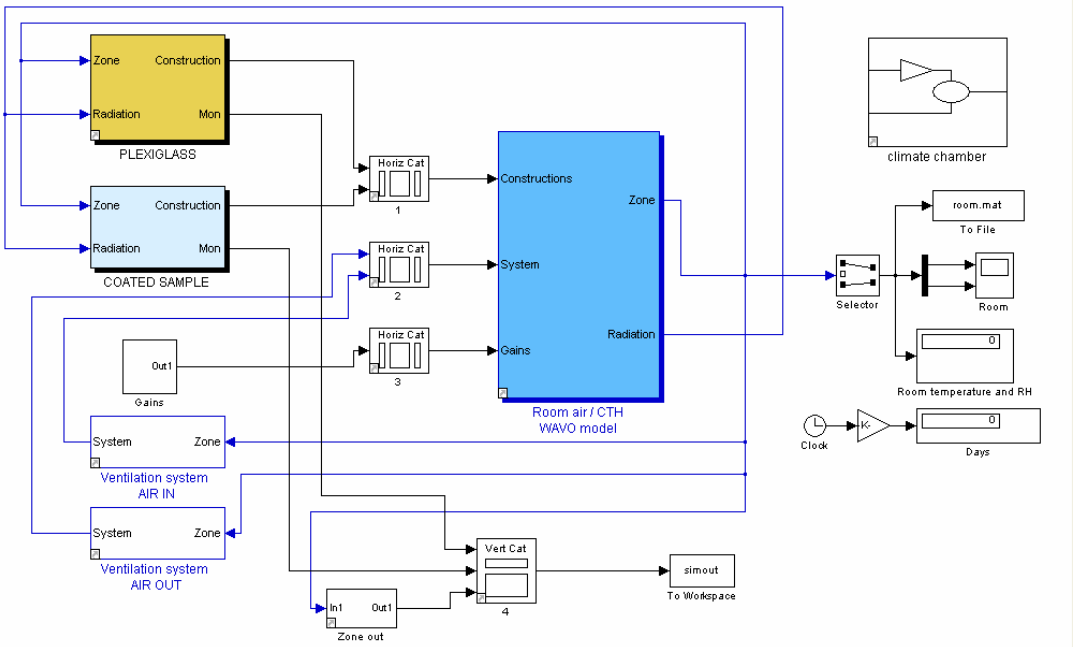


Figura 113 – O modelo CAM_FLUX1

O modelo "CAM_FLUX1" tem uma maior complexidade que os modelos utilizados na subsecção 6.2. Para avaliar a evolução das condições do ar da câmara de fluxo aplicou-se o módulo de análise do ar de um compartimento "Room air/CTH" ao qual estão conectados outros módulos, como os que simulam a ventilação, a produção de vapor e o eventual aquecimento. O módulo "PLEXIGLASS" simula alguns efeitos produzidos pelos componentes da câmara de fluxo e o módulo "COATED SAMPLE", apresentado na subsecção 6.2.1, simula a presença do elemento ensaiado. O desempenho deste módulo na simulação do comportamento higrotérmico dos provetes ensaiados, associado aos dados de materiais utilizados, foi testado para os ensaios

MBV e por isso oferece alguma confiança como componente das simulações da câmara de fluxo. O modelo dispõe, ainda, de um módulo que permite definir a importação de dados da câmara climática envolvente ou adoptar valores convencionais para a humidade relativa e temperatura. Alguns elementos adicionais permitem acompanhar a evolução da simulação, visualizar os resultados obtidos e definir a sua forma de armazenamento. O princípio de cálculo subjacente a este modelo pode ser apreendido mais facilmente através do esquema da Figura 114.

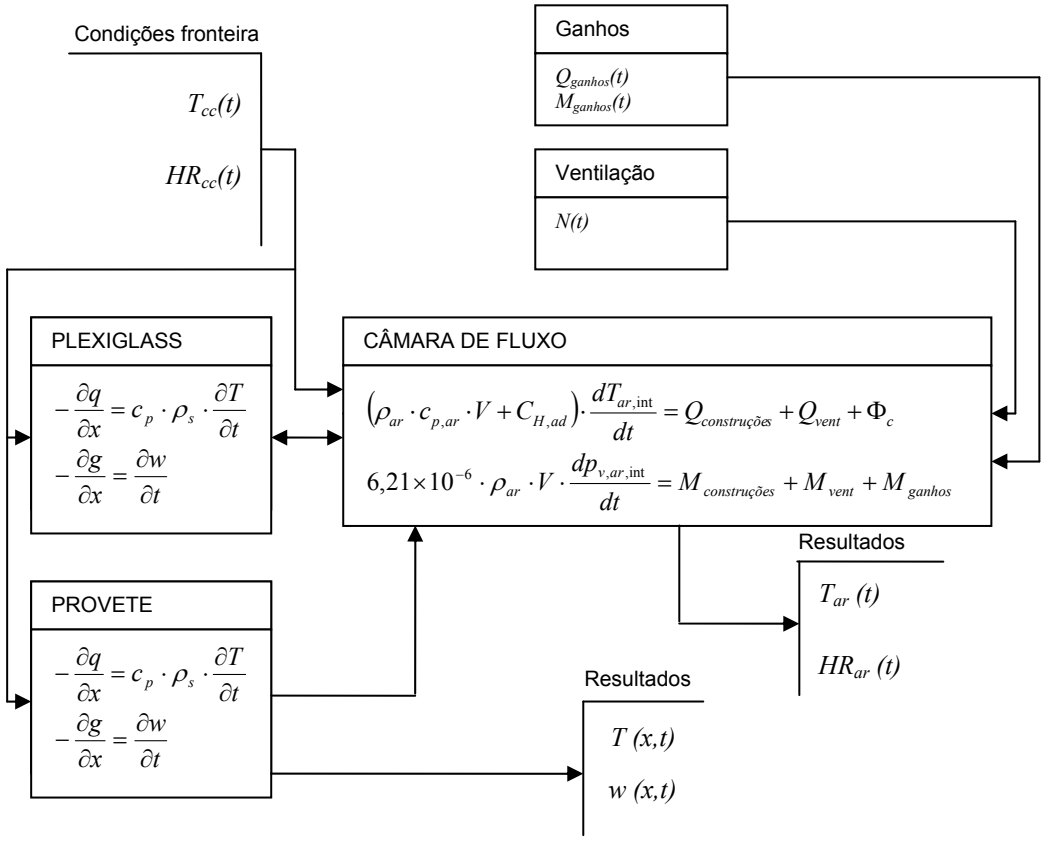


Figura 114 – Esquema de simulação do modelo CAM_FLUX1

O modelo "CAM_FLUX2" difere do anterior apenas por dispor de dois módulos de simulação de provetes, permitindo assim simular os casos em que dois elementos diferentes foram testados na câmara de fluxo. Seria possível construir modelos para a combinação de um maior número de elementos diferentes, adicionando mais módulos de simulação de provetes.

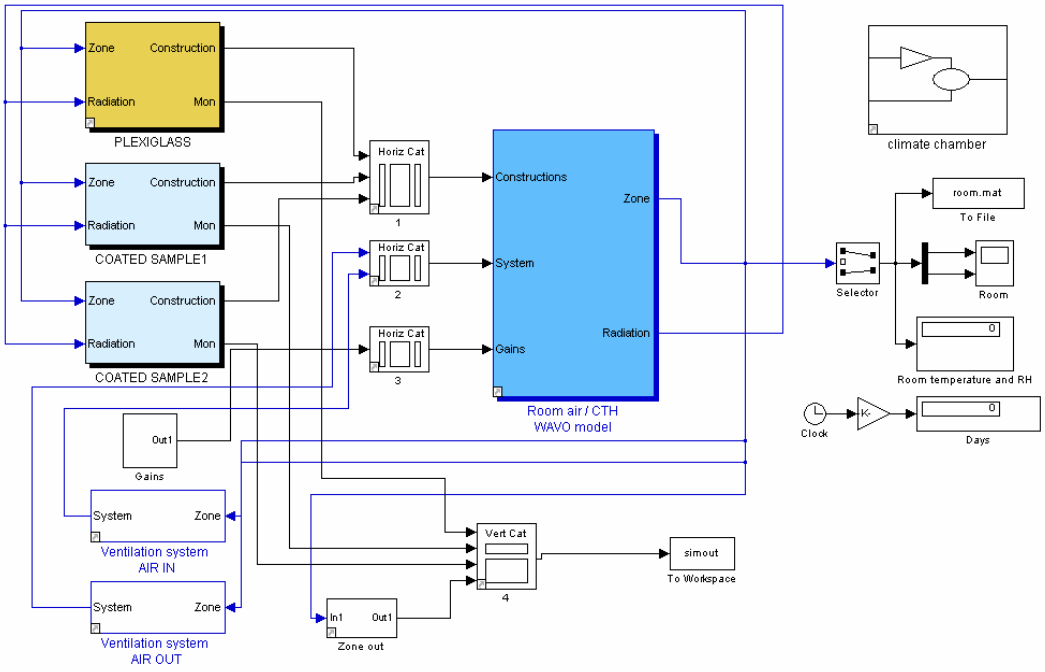


Figura 115 – O modelo CAM_FLUX2

A criação destes modelos espelha mais uma vez a grande flexibilidade do programa HAM-Tools. A associação de diferentes módulos permite simular o problema que se pretende analisar, sem utilizar componentes de cálculo desnecessários, que serviriam apenas para tornar o processo de cálculo mais longo. Deve, no entanto, ter-se sempre presente a preocupação fundamental de respeitar a estrutura de comunicação predefinida entre os módulos de cálculo.

6.3.2 Resultados obtidos

As simulações que pretendem traduzir os ensaios com a câmara de fluxo vazia foram realizadas numa primeira fase. A temperatura e humidade relativa interior, registadas na câmara climática envolvente, e o valor adoptado para caudal de ventilação constituem os dados mais relevantes para estas simulações. Esta primeira fase do processo de simulação serviu não só para uma primeira avaliação do desempenho do modelo "CAM_FLUX1" mas, também, para avaliar o nível de higroscopicidade da câmara vazia.

A Figura 116 mostra o ciclo estável de variação da humidade relativa, na câmara de fluxo vazia, em três testes diferentes. Os testes em causa correspondem aos ensaios IH1, IH5 e IH28, apresentados nas subsecções 5.5.1, 5.5.2 e 5.4.6 respecti-

vamente. Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais propriamente ditos foram designados com o sufixo “ens”. Cada um dos ensaios foi simulado numericamente com o modelo “CAM_FLUX1”. O resultado das simulações sem qualquer higroscopicidade foi identificado com o sufixo “ori” e às simulações onde se obteve um ajuste adequado aos resultados laboratoriais corresponde o sufixo “fit”.

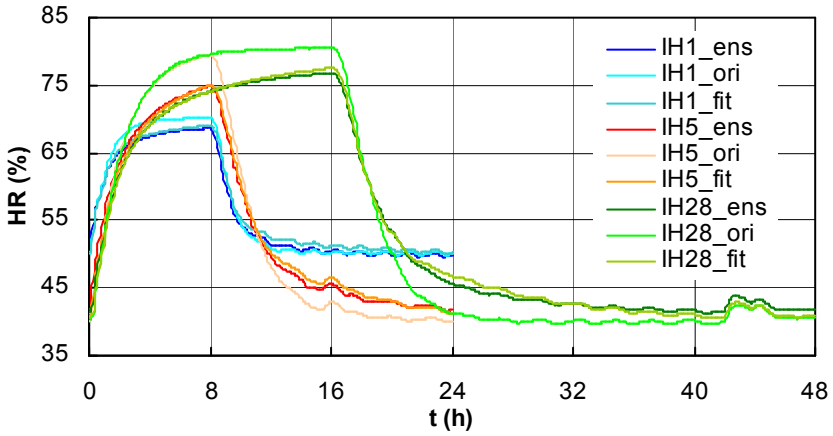


Figura 116 – Ciclo estável de variação da humidade relativa em testes na câmara vazia

A higroscopicidade residual da câmara de fluxo foi introduzida através de um elemento fictício, reproduzido no módulo de cálculo “PLEXIGLASS”, e a que corresponde um tipo de material, uma espessura e um coeficiente de transferência à superfície. A higroscopicidade determinada foi depois mantida nos cálculos subsequentes, sendo o valor determinado para os ensaios IH1 e IH5 idêntico e ligeiramente inferior ao obtido para IH28.

Verificou-se, ainda, que a introdução desta higroscopicidade residual da câmara de fluxo, já detectada na subsecção 5.4.3, é o factor de correcção adequado para o ajuste das simulações. A variação de outras condições da simulação, como o caudal de ventilação, não permitiu obter esse ajuste.

Após esta primeira fase de análise da estação piloto procedeu-se à simulação sistemática dos ensaios com elementos de revestimento. Em todas essas simulações foram obtidos resultados com consequências semelhantes: o efeito da inércia higroscópica é sobrestimado na simulação numérica. A análise de sensibilidade realizada, para alguns dos parâmetros utilizados na simulação, revelou que só a diminuição da

área dos elementos porosos permite uma boa aproximação aos resultados experimentais.

Na Figura 117 apresenta-se um exemplo onde se pode visualizar este tipo de resultados. Os ensaios IH7 e IH8, descritos na subsecção 5.5.2, foram realizados com 1.5 m^2 de provetes GC e 0,75 m^2 de provetes GC2A respectivamente. Uma comparação qualitativa dos resultados experimentais, identificados com o sufixo "ens", com os resultados da simulação que utilizou a área ensaiada, identificada com o sufixo "Ai", permite verificar que o andamento da variação da humidade relativa é globalmente semelhante mas os resultados numéricos resultam num maior amortecimento dessa variação.

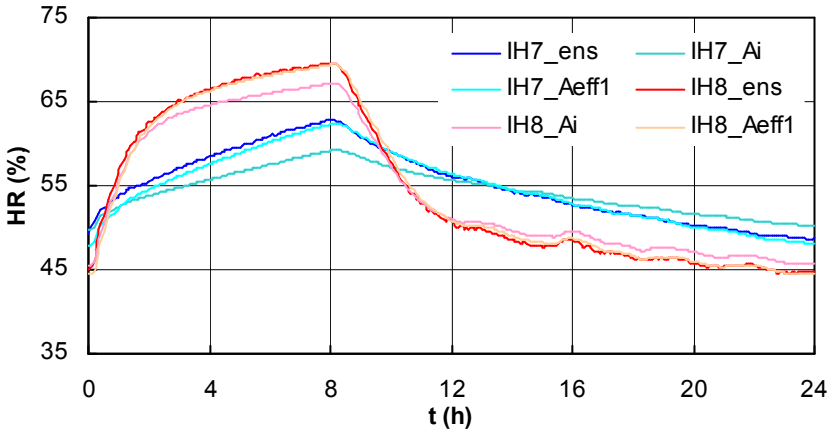


Figura 117 – Resultados experimentais e numéricos para o ciclo estável de variação da humidade relativa em IH7 e IH8

A obtenção de uma boa aproximação numérica, correspondente aos valores identificados com o sufixo "Aeff1", implicou a utilização no cálculo de uma área de 0,8 m^2 para IH7 e 0,45 m^2 para IH8. Este tipo de conclusão foi obtido sistematicamente nas várias simulações realizadas. A relação Aeff1/Ai é inferior a 1 para todos os casos analisados, oscilando normalmente entre 0,5 e 0,6, e varia com as condições do ensaio.

Apresenta-se na Tabela 36 um resumo dos resultados obtidos para as simulações dos ensaios realizados na câmara de fluxo. Utilizam-se, como indicadores, a média da variação da humidade relativa no ciclo diário, HR_m, e a diferença entre este valor e o do percentil 90 de cada variação, $HR_{90} - HR_m$. Além dos indicadores correspondentes aos valores experimentais apresentam-se também os que correspondem a duas

simulações com áreas de cálculo dos provetes diferentes. Apresenta-se, assim, a simulação com a área real, Sim_Ai e a simulação com a área que produz uma aproximação quase perfeita, Sim_Aeff1.

Tabela 36 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados na câmara de fluxo e nas simulações correspondentes

Caso	Ensaio			Sim_Ai		Sim_Aeff1		
	m^2_provete	HR_m	$HR_{90} - HR_m$	HR_m	$HR_{90} - HR_m$	m^2_provete	HR_m	$HR_{90} - HR_m$
IH1	-	56,51	11,70	57,11	12,88	-	57,11	11,37
IH2	0,75 GC	56,46	8,14	57,13	5,40	0,35 GC	57,13	7,83
IH3	0,50 GC	56,88	9,09	57,10	6,73	0,23 GC	57,09	8,78
IH4	0,25 GC	56,85	10,30	57,09	8,62	0,12 GC	57,09	9,99
IH5	-	54,59	18,62	54,69	23,25	-	54,69	18,52
IH6	0,75 GC	54,51	10,06	54,85	6,19	0,35 GC	54,88	9,65
IH7	1,50 GC	55,06	6,16	54,39	3,76	0,80 GC	54,72	6,14
IH8	0,75 GC2A	54,64	13,65	54,50	11,57	0,45 GC2A	54,67	13,52
IH9	0,75 GC2A + 0,25 GC	54,65	11,82	54,90	8,61	0,35 GC2A + 0,12 GC	54,92	11,83
IH10	0,75 GC2A + 0,75 GC	54,44	8,76	54,64	5,62	0,35 GC2A + 0,40 GC	54,69	8,46
IH11	0,75 GP	54,31	9,58	54,71	6,69	0,40 GP	54,74	9,51
IH12	0,75 GP2A	54,69	12,12	54,55	8,97	0,35 GP2A	54,63	12,26
IH13	0,75 GT	55,42	11,27	54,54	7,74	0,40 GT	54,54	11,13
IH14	0,75 GT2A	54,83	11,91	54,69	9,12	0,40 GT2A	54,70	11,94
IH20	0,75 GP	53,71	8,52	53,74	6,79	0,50 GP	53,46	8,58
IH24	0,25 GC	57,05	13,82	56,12	11,14	0,13 GC	56,11	13,80
IH27	0,25 GC	56,51	13,56	55,92	11,40	0,15 GC	55,92	13,54
IH28	-	54,31	21,50	54,30	25,98	-	54,30	21,91
IH29	0,75 GC	54,36	13,90	54,26	10,62	0,45 GC	54,25	13,83
IH30	0,75 GP	57,21	11,96	57,01	8,30	0,40 GP	57,35	11,58
IH31	0,75 GP	60,15	13,23	59,46	10,43	0,45 GP	59,45	13,17

6.3.3 Discussão dos resultados

As implicações destes resultados para as conclusões desta Tese são muito relevantes, pelo que se impôs uma análise aprofundada das razões para o desacordo entre resultados numéricos e experimentais.

Algumas das eventuais fontes de erro que poderiam produzir estes resultados foram excluídas com bastante segurança. A possibilidade de existir um erro associado a um mau controlo do caudal de ventilação, por exemplo, pode ser facilmente

eliminada com base nos resultados obtidos para os ensaios com a câmara de fluxo vazia. O próprio modelo produziu resultados coerentes para esses casos.

Um eventual erro associado à modelação do comportamento higroscópico dos elementos de revestimento também foi excluído, tendo em conta a validação do modelo e da base de dados efectuada na secção 6.2.

Os dados referentes à solicitação higrotérmica corresponderam, sempre, aos registos das características da câmara climática envolvente, obtidos para cada ciclo estável. A variação isolada do coeficiente β_p mostrou ser insuficiente para melhorar os resultados numéricos.

A influência dos erros inerentes ao próprio sistema de monitorização também foi ponderada. Este tipo de erros pode influenciar os resultados se houver um erro diferencial no sistema de medição de humidade relativa. Ou seja, se o erro de medida for variável com a humidade relativa. A possibilidade de este erro diferencial existir foi analisada na subsecção 5.4.1, tendo sido verificado que a diferença entre os valores medidos, pelos sistemas de monitorização da câmara de fluxo e da câmara climática envolvente, cresce com a humidade relativa. Pode, por isso, considerar-se que existe alguma incerteza associada à diferença ente HR_{90} e HR_m determinada experimentalmente. Essa incerteza não é, no entanto, suficientemente elevada para explicar as diferenças entre simulações e ensaios. E a gama de variação da humidade relativa da câmara de fluxo, na maior parte dos ensaios, é reduzida o que, por sua vez, reduz a influência dos eventuais erros diferenciais do sistema de monitorização.

A explicação mais plausível para as diferenças entre simulações e ensaios na câmara de fluxo pode associar-se à estratificação da pressão de vapor já exposta na subsecção 5.4.5. A heterogeneidade da distribuição da pressão de vapor, no ar da câmara de fluxo, afecta a validade da mistura perfeita do ar da zona em análise, que está subjacente ao modelo de cálculo do programa HAM-Tools.

Como verificação adicional deste efeito foi produzida, a pedido do autor, uma simulação do comportamento do ar na câmara de fluxo, no programa de CFD, Fluent. O campo de velocidades do ar, obtido nessa simulação, é apresentado na Figura 118. Como se pode verificar, a imagem sugere a existência de zonas mortas no interior da câmara de fluxo, evidenciando as razões para a dispersão de medidas verificada nas primeiras horas do ciclo diário em exemplos como os da Figura 89.

Como nota refira-se que a não simetria do campo de velocidades se deve a erros numéricos, normais na simulação com CFD.

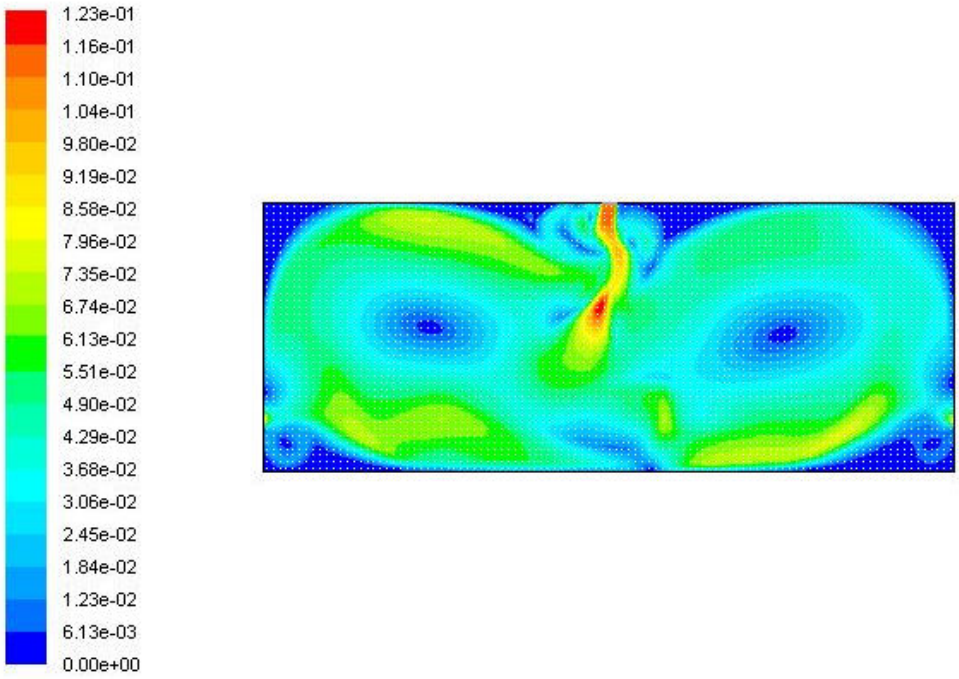


Figura 118 – Campo de velocidades do ar na câmara de fluxo produzido no programa Fluent por Angela Sasic Kalagasidis a pedido do autor

Na simulação do ensaio IH20, que se apresenta na Figura 119, o afastamento da simulação, face aos resultados experimentais, foi menor do que a observada em IH11. Nestes dois casos, o elemento testado foi o mesmo, 0,75 m^2 de provete GP, para uma solicitação semelhante. Mas o processo de produção de vapor utilizado em IH20 foi o sistema base da câmara de fluxo enquanto que, para IH11, se utilizou o sistema alternativo, que recorre à variação da humidade relativa da câmara climática envolvente. A simulação ideal de IH20 foi conseguida com 0,50 m^2 GP enquanto que a de IH11 foi conseguida com 0,40 m^2 GP. Este facto mostra a influência do sistema de produção de vapor nos resultados obtidos, reforçando os indícios sobre o efeito produzido pela heterogeneidade do ar na câmara de fluxo.

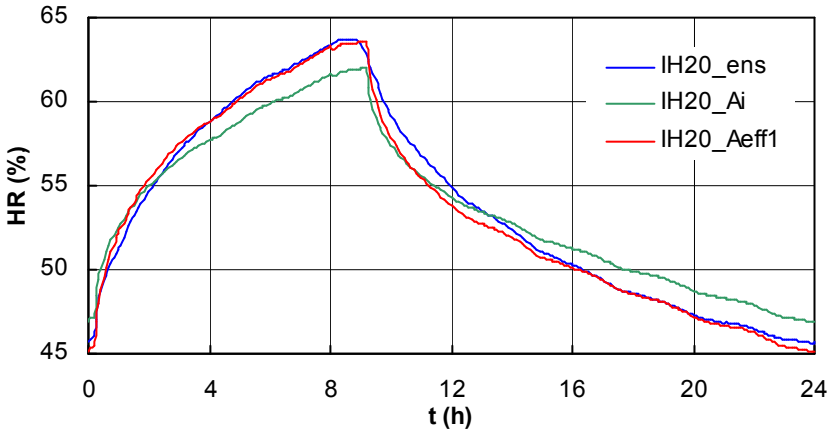


Figura 119 – Resultados experimentais e numéricos para o ciclo estável de variação da humidade relativa em IH20

Os resultados da Tabela 36 evidenciaram, também, que a redução de área de provete, necessária para uma boa aproximação entre simulações e ensaios, é menor nos ciclos de maior duração, correspondentes aos casos IH29, IH30 e IH31. O que é coerente com uma diminuição da influência da heterogeneidade do ar nesses ciclos de maior duração.

A aceitação desta justificação, para as diferenças entre simulações e ensaios na câmara de fluxo, tem repercussões importantes. A consideração de uma mistura ideal do ar de um compartimento em simulações higrotérmicas de regimes variáveis deve ser, no mínimo, cautelosa.

Outros estudos, como em Rodrigues *et al.* (2001), haviam já apontado alguns factores, como a eficiência da ventilação, que influenciam a mistura de ar num compartimentos. Diversos autores têm explorado a aplicação de modelos de CFD ao comportamento higrotérmico de edifícios (Steeman *et al.*, 2006). Mas ainda não é fácil obter simulações fiáveis da interacção entre o ar e os elementos higroscópicos, com esses modelos.

As conclusões obtidas com esta comparação têm um impacto óbvio na utilização do modelo adoptado e na leitura de resultados da câmara de fluxo.

O modelo numérico não é posto em causa por estes resultados. No entanto, é importante ter em conta uma incerteza adicional associada à provável avaliação em excesso do efeito da higroscopicidade dos elementos de um compartimento, no amortecimento das variações da humidade relativa. Essa incerteza pode não ser

assim tão relevante quando se imagina a diferença entre um quarto mobilado, com uma utilização normal, e as abstracções numéricas efectivamente calculadas.

Não é possível, também, extrair uma relação directa entre a câmara de fluxo e um compartimento real. A relação entre o volume de ar influenciado pelo efeito de canto, por exemplo, e o volume total de ar do compartimento é necessariamente diferente. Essa relação pode ser encontrada, eventualmente, com mais progressos nas análises de CFD e resultados de medições "in situ".

O interesse da câmara de fluxo como dispositivo de ensaio laboratorial do efeito da inércia higroscópica, no entanto, mantém-se. Os resultados obtidos foram coerentes entre si, o que garante a comparabilidade de ensaios realizados com diferentes elementos. A relação entre os resultados laboratoriais e resultados ideais, correspondentes a uma mistura homogénea do ar, pode ser estabelecida matematicamente. Este assunto é retomado à frente neste capítulo, em conjunto com a discussão final sobre a relação entre inércia higroscópica e a variação da humidade relativa interior.

6.4 Simulação Numérica do Comportamento Higrotérmico Global de Um Compartimento

6.4.1 Modelação aplicada

Uma parte importante deste texto incidiu sobre a determinação da capacidade de armazenamento de humidade de elementos presentes no ambiente anterior. A quantificação da influência dessa capacidade de armazenamento na variação da humidade relativa interior foi também já aflorada com base nos ensaios na câmara de fluxo.

O passo lógico seguinte corresponde à avaliação do comportamento higrotérmico global de um compartimento, conjugando a inércia higroscópica com os restantes factores que definem esse comportamento. A estratégia adoptada para essa análise correspondeu à execução de um conjunto alargado de simulações numéricas de um quarto virtual, que suportam uma análise de sensibilidade sobre os parâmetros higrotérmicos mais relevantes. O modelo utilizado na simulação higrotérmica global de um compartimento com o programa HAM-Tools, designado por "QUARTO", apresenta-se na Figura 120 através da sua interface principal com o utilizador. O princípio de cálculo, subjacente a este modelo, pode ser apreendido mais facilmente através do esquema da Figura 121.

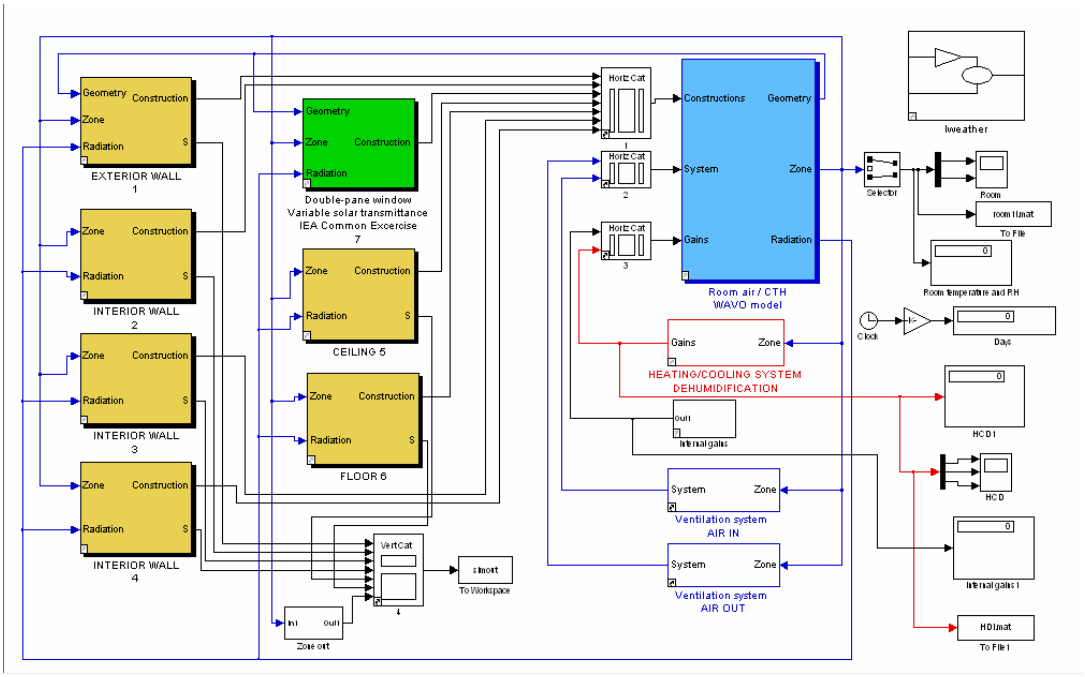


Figura 120 – O modelo QUARTO adaptado a partir do modelo SC_CE1_Case600_open

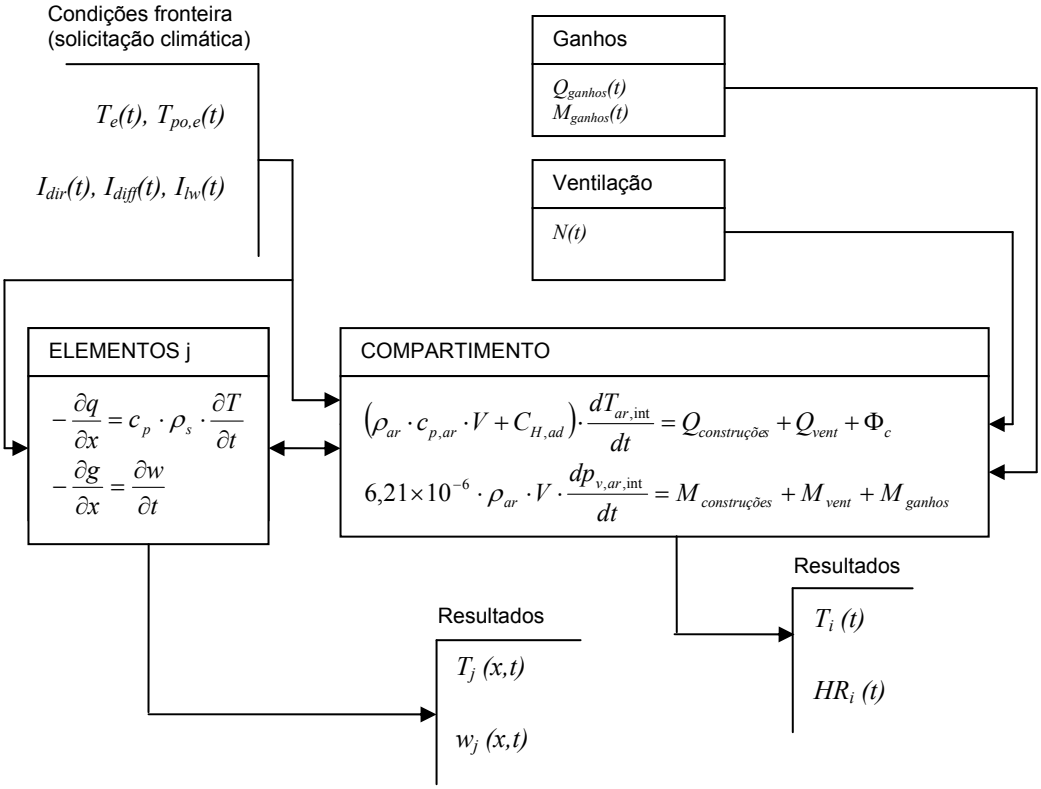


Figura 121 – Esquema de simulação do modelo QUARTO

O modelo "QUARTO" consiste numa adaptação do modelo disponibilizado em www.IBPT.org pela autora do programa HAM-Tools, para a realização de um dos exercícios comuns de simulação no âmbito do projecto "Annex 41". Esse exercício foi desenvolvido com base no edifício virtual utilizado no teste de simulações de comportamento térmico BESTEST (Judkoff e Neymark, 1995).

O modelo "QUARTO" permite simular o comportamento higrotérmico de um compartimento paralelipipédico, que em princípio dispõe de uma parede exterior e de uma janela, contactando os restantes elementos com compartimentos de igual configuração. Apesar de este modelo partir de uma base existente contém diversas alterações, que incluem a modelação adoptada para os elementos construtivos e a reformulação das suas condições fronteira.

As simulações efectuadas procuraram definir o comportamento para um ano completo, sendo o cálculo repetido até à obtenção de um ciclo anual estável. O tempo de cálculo necessário à obtenção desse ciclo estável pode ser superior a 12 horas, dependendo da modelação aplicada aos elementos construtivos e ao número de repetições necessárias para obtenção do ciclo estável.

Tendo em conta o tempo total para a realização de todas as simulações, necessárias à análise de sensibilidade pretendida, este trabalho numérico foi iniciado antes da conclusão do trabalho laboratorial de medição de propriedades de materiais de revestimento, apresentado no Capítulo 4. Os dados de materiais utilizados em grande parte destas simulações foi por isso retirado de Kumaran (1996).

6.4.2 Descrição dos cenários de simulação

O compartimento virtual, que serviu de base a este conjunto de simulações numéricas, corresponde a um quarto com uma área em planta de (3,5×3,5) m^2 e um pé direito livre de 2,5 m. Considera-se que apenas uma das paredes é do tipo exterior, dispõe de uma janela de vidro duplo com uma área de 1 m^2 e está orientada a Sul. As restantes superfícies materializam a separação, do compartimento em estudo, de outros compartimentos com iguais características. Esta última imposição permite desenvolver um cenário de simulação verosímil sem recurso à simulação simultânea de compartimentos adicionais.

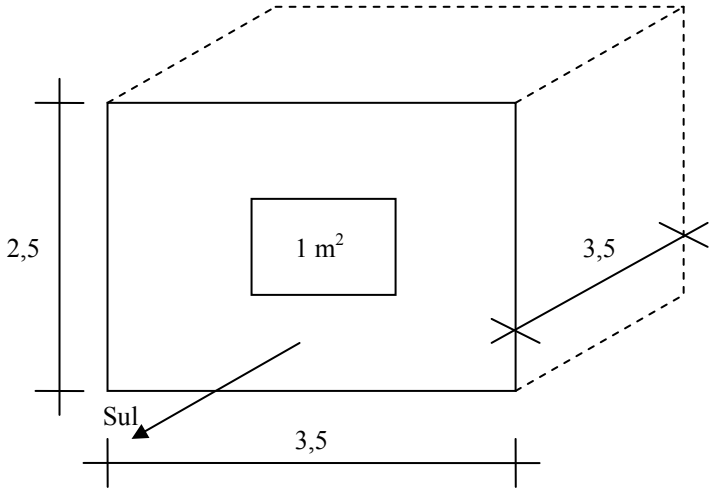


Figura 122 – Esquema do quarto virtual

A constituição dos elementos construtivos, apresentada na Figura 123, pretendeu reflectir algumas características típicas das construções portuguesas, nomeadamente a utilização de elementos massivos com um núcleo de alvenaria ou betão, revestidos superficialmente com materiais aplicados em espessuras reduzidas. Além dos princípios gerais de constituição de cada elemento, indica-se também a espessura, em cm, de cada camada.

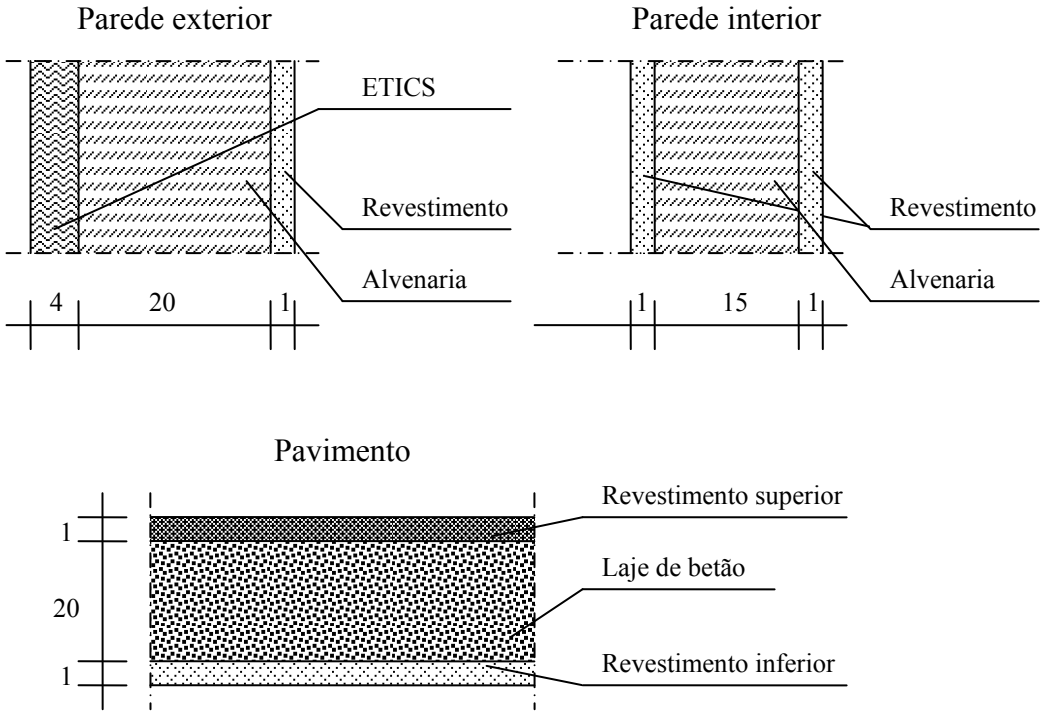


Figura 123 – Composição dos elementos construtivos do quarto virtual

As propriedades higrotérmicas atribuídas a cada camada considerada foram retiradas de Kumaran (1996). Assim, de acordo com a nomenclatura dessa base de dados, a camada "ETICS" utiliza as propriedades aí atribuídas a "expanded polystyrene insulation", a camada "alvenaria" utiliza as propriedades de "concrete", as camadas "revestimento" em paredes e "revestimento inferior" em pavimentos utiliza as propriedades de "gypsum board", o "revestimento superior" corresponde a "spruce". As características da janela dotam-na de um coeficiente de transmissão de calor equivalente a 3,0 $W/m^2.K$.

A escolha destas propriedades pretendeu reproduzir um comportamento higrotérmico verosímil e coerente com o cenário pretendido. A leitura dos resultados obtidos deve, no entanto, ser cuidadosa. As propriedades de "gypsum board" dotam este material de um nível de higroscopicidade muito superior ao que foi observado em provetes de gesso cartonado, no trabalho experimental desenvolvido no âmbito desta Tese. Esta questão específica enquadra-se num âmbito mais geral de previsão da capacidade real de armazenamento de humidade pelos materiais de construção e é discutida em 6.5.

A ventilação do quarto virtual supõe-se ocorrer apenas por troca com o exterior e é caracterizada por um caudal constante.

Admite-se a existência de um sistema de controlo de temperatura e humidade relativa, com capacidade infinita, que garante a flutuação livre da temperatura interior num intervalo definido e a não ultrapassagem de 90 % HR para a humidade relativa. A produção de vapor foi definida com um valor constante durante períodos de 8 horas. O clima exterior correspondeu, em geral, ao ano climático de Lisboa mas o ano climático do Porto também foi utilizado, tendo sido ambos já apresentados na subsecção 3.3.4.

A partir da definição base do quarto virtual, desenvolveu-se um conjunto de cenários de simulação, cujas características se referem nas tabelas seguintes. Nesses cenários foram aplicadas dez variantes do nível de higroscopicidade interior, resumidas na Tabela 37.

Tabela 37 – Configuração de superfícies interiores

Conf.	Paredes		Tecto		Pavimento	
	Área (m^2)	β_p (s/m)	Área (m^2)	β_p (s/m)	Área (m^2)	β_p (s/m)
C1	34	2×10^{-12}	12,25	2×10^{-12}	12,25	2×10^{-12}
C2	34	2×10^{-8}	12,25	2×10^{-8}	12,25	2×10^{-12}
C3	34	2×10^{-9}	12,25	2×10^{-9}	12,25	2×10^{-12}
C4	34	2×10^{-10}	12,25	2×10^{-10}	12,25	2×10^{-12}
C5	17,5 (16,5)	2×10^{-8} (2×10^{-12})	12,25	2×10^{-12}	12,25	2×10^{-12}
C6	34	2×10^{-8}	12,25	2×10^{-8}	12,25	2×10^{-8}
C7	26,25 (7,75)	2×10^{-8} (2×10^{-12})	12,25	2×10^{-12}	12,25	2×10^{-12}
C8	8,75 (25,25)	2×10^{-8} (2×10^{-12})	12,25	2×10^{-12}	12,25	2×10^{-12}
C9	34	2×10^{-12}	12,25	2×10^{-12}	12,25	2×10^{-8}
C10	34	2×10^{-12}	12,25	2×10^{-8}	12,25	2×10^{-8}

A variação do nível de higroscopicidade do compartimento foi efectuada através da alteração do coeficiente de transferência β_p, associado a cada elemento construtivo. Assim, para β_p=2×10^{-12} s/m, o elemento torna-se higroscopicamente inactivo, pelo que a configuração C1 corresponde a uma inércia higroscópica nula. A adopção de β_p=2×10^{-8} s/m traduz o comportamento do elemento sem tratamento superficial e os valores 2×10^{-9} s/m e 2×10^{-10} s/m correspondem a diferentes níveis teóricos de tratamento superficial desses elementos.

Na Figura 124 apresenta-se a variação de massa que este tipo de revestimentos exibiria num ensaio de determinação do MBV. Estes valores foram obtidos por simulação numérica, de acordo com o método já usado em 6.2, e ilustram o comportamento higroscópico associado a cada revestimento utilizado nas simulações do quarto virtual.

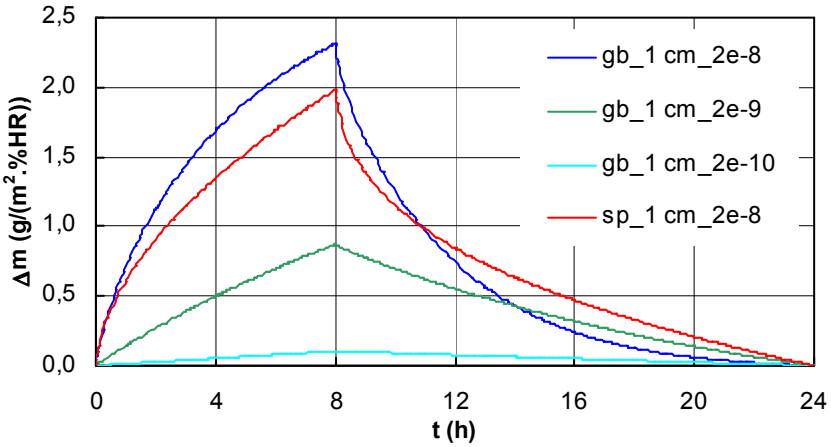


Figura 124 – Ciclo estável de variação de massa das amostras virtuais com 1 cm de espessura: "gb_1 cm_2e-8" ("gypsum board" com β_p=2×10^{-8} s/m), "gb_1 cm_2E-9" ("gypsum board" com β_p=2×10^{-9} s/m), "gb_1 cm_2e-10" ("gypsum board" com β_p=2×10^{-10} s/m), "sp_1 cm_2e-8" ("spruce" com β_p=2×10^{-8} s/m)

A Tabela 38 resume as características das simulações no quarto virtual. Os cenários de simulação utilizados podem agrupar-se em conjuntos que permitem a avaliação do efeito da variação de diferente parâmetros.

O conjunto SG1-SG10 caracteriza-se pelos parâmetros Tmin=18 ºC, Tmax=28 ºC, G=100 g/h e N=1 h^{-1}. A simulação SG1, desprovida de inércia higroscópica pela consideração da configuração interior C1, funciona como cenário de referência, apresentando as simulações SG2-SG10 diferentes níveis de higroscopicidade interior.

Os conjuntos restantes caracterizam-se em geral pela variação de apenas um parâmetro higrotérmico relativamente a SG1. No conjunto SG11-SG14, G aumenta para 150 g/h. Em SG15-SG18, Tmin diminui para 15 ºC e, em SG19-SG22, aumenta para 21 ºC. No conjunto SG23-SG26, N diminui para 0,67 h^{-1} e, em SG27-SG30, para 0,33 h^{-1}. Em SG31-SG34, G anula-se. As simulações SG35-SG37 utilizam o clima do Porto, em SG38 a fachada tem orientação Norte e, em SG39-SG42, a área da janela é reduzida para 0,10 m^2. A primeira simulação de cada conjunto utiliza a configuração interior C1, não dispondo por isso de inércia higroscópica. As restantes simulações de cada conjunto consideram níveis decrescentes de higroscopicidade interior.

Tabela 38 – Resumo das características das simulações no quarto virtual

Sim.	Conf. interior	Tmin (ºC)	Tmax (ºC)	G (g/h)	N (h^{-1})	Outras variações
SG1	C1	18	28	100	1	
SG2	C2	18	28	100	1	
SG3	C3	18	28	100	1	
SG4	C4	18	28	100	1	
SG5	C5	18	28	100	1	
SG6	C6	18	28	100	1	
SG7	C7	18	28	100	1	
SG8	C8	18	28	100	1	
SG9	C9	18	28	100	1	
SG10	C10	18	28	100	1	
SG11	C1	18	28	150	1	
SG12	C2	18	28	150	1	
SG13	C5	18	28	150	1	
SG14	C4	18	28	150	1	
SG15	C1	15	28	100	1	
SG16	C2	15	28	100	1	
SG17	C5	15	28	100	1	
SG18	C4	15	28	100	1	
SG19	C1	21	28	100	1	
SG20	C2	21	28	100	1	
SG21	C5	21	28	100	1	
SG22	C4	21	28	100	1	
SG23	C1	18	28	100	0,67	
SG24	C2	18	28	100	0,67	
SG25	C5	18	28	100	0,67	
SG26	C4	18	28	100	0,67	
SG27	C1	18	28	100	0,33	
SG28	C2	18	28	100	0,33	
SG29	C5	18	28	100	0,33	
SG30	C4	18	28	100	0,33	
SG31	C1	18	28	0	1	
SG32	C2	18	28	0	1	
SG33	C5	18	28	0	1	
SG34	C4	18	28	0	1	
SG35	C1	18	28	100	1	Clima Porto
SG36	C2	18	28	100	1	
SG37	C5	18	28	100	1	
SG38	C1	18	28	100	1	Or. Norte
SG39	C1	18	28	100	1	Área da janela 0,10 m^2
SG40	C2	18	28	100	1	
SG41	C5	18	28	100	1	
SG42	C4	18	28	100	1	

6.4.3 Resultados obtidos

A simulação de cada cenário, do comportamento higrotérmico do quarto virtual, originou um conjunto de resultados de que se destaca a variação, no ciclo anual, da temperatura e humidade relativa do ar interior e os perfis de temperatura, humidade relativa e teor de humidade de cada elemento construtivo, também em função do tempo.

A leitura dos resultados obtidos, dada a sua extensão, requer uma abordagem que permita comparações sistemáticas como suporte da análise de sensibilidade pretendida. Optou-se, por isso, pela realização de análises quantitativas dos resultados, baseadas em indicadores numéricos, completadas com observações qualitativas dos gráficos de variação no tempo das características do ar interior.

Apesar de se dispor de resultados referentes a um ano completo, concentrou-se a análise na metade mais fria do ano. Optou-se assim por analisar os meses de Outubro a Março, uma vez que é o período onde a humidade relativa interior mais afecta o desempenho dos edifícios portugueses.

Tomando como exemplo as simulações SG1 e SG2, apresentam-se alguns gráficos ilustrativos do tipo de resultados obtidos. A comparação destas duas simulações permite também uma comparação entre o comportamento do quarto virtual para uma situação sem inércia higroscópica, SG1, e outra com elementos porosos activos, SG2.

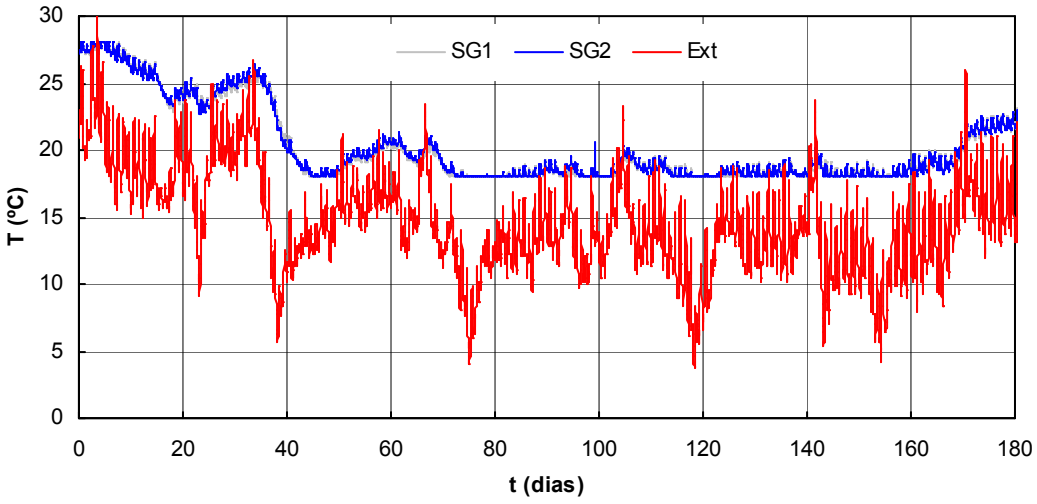


Figura 125 – Variação da temperatura interior do quarto virtual, nas simulações SG1 e SG2, e da temperatura exterior correspondente ao clima de Lisboa, no período Outubro – Março

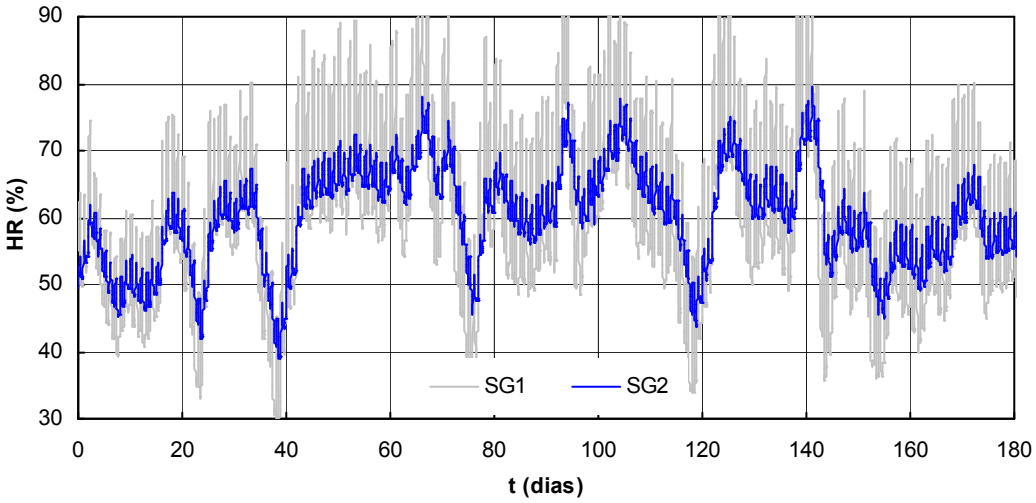


Figura 126 – Variação da humidade relativa interior do quarto virtual, nas simulações SG1 e SG2, no período Outubro – Março

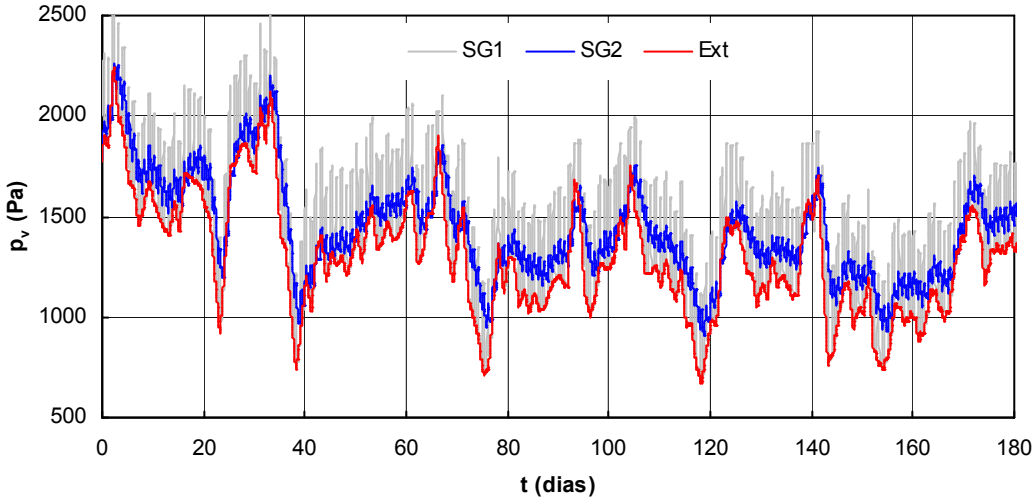


Figura 127 – Variação da pressão de vapor interior do quarto virtual, nas simulações SG1 e SG2, e da pressão de vapor exterior correspondente ao clima de Lisboa, no período Outubro – Março

Estes gráficos suportam algumas observações comuns a todas as simulações realizadas para o comportamento do quarto virtual. Desde logo é possível verificar que o programa HAM-Tools permite o trabalho numérico necessário a este tipo de análise.

A variação da temperatura interior, apresentada na Figura 125, não apresentou diferenças substanciais nas duas simulações. Este resultado, que se verificou também nas outras simulações, permitiu verificar que a influência da inércia higroscópica na

evolução da temperatura interior, no período observado, foi em geral muito reduzida. O que significa que a influência do calor latente no balanço térmico do compartimento foi muito reduzida nas situações testadas.

A variação da humidade relativa, pelo contrário, pode ser visivelmente alterada pelo efeito da inércia higroscópica, como se verifica na Figura 126. Os picos de humidade relativa reduziram-se claramente na simulação SG2. Esta observação é extensível à variação da pressão de vapor, apresentada na Figura 127.

A utilização de valores médios de algumas grandezas, como um primeiro indicador retirado dos resultados obtidos, permite observar um desenvolvimento já esperado para a humidade interior. Assim, e utilizando os resultados das simulações SG1 e SG2 para ilustrar o que se passou, em geral, nas simulações onde se utilizou o clima exterior de Lisboa, apresenta-se na Figura 128 a evolução da média mensal da humidade relativa interior e as médias dos dois semestres considerados e de todo o ciclo anual.

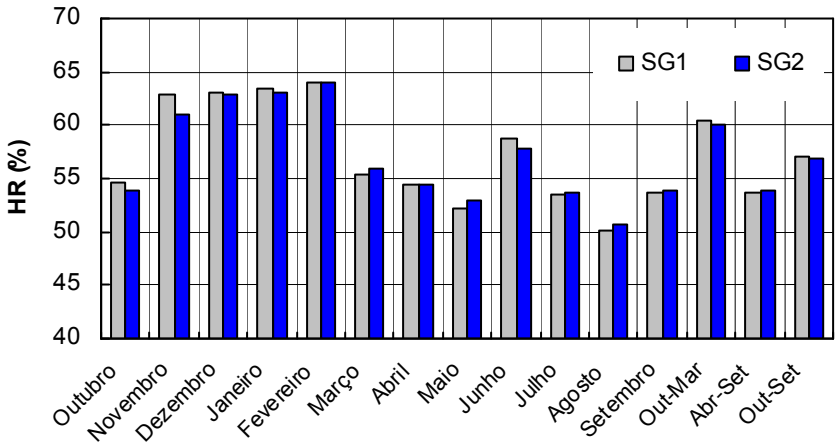


Figura 128 – Valores médios mensais, semestrais e anuais da humidade relativa interior nas simulações SG1 e SG2

Verifica-se que em ambas as simulações, SG1 e SG2, os valores médios mais elevados da humidade relativa interior se concentram nos meses mais frios. Também se verifica que, em geral, a humidade relativa média mensal foi pouco afectada pela introdução de inércia higroscópica. Esta diferença é praticamente nula no período semestral e anual.

A análise da Figura 129, onde se apresentam valores médios da pressão de vapor, permite comentários complementares. A sinusóide que corresponde aproximadamente ao desenvolvimento das médias mensais no exterior é acompanhada no interior com um excesso de pressão correspondente neste caso a uma classe de higrometria fraca, de acordo com a classificação de (Freitas, 1998).

A verificação de que a humidade relativa interior é mais elevada em meses de pressão de vapor mais baixa evidencia a importância do aquecimento, como factor de controlo daquele parâmetro.

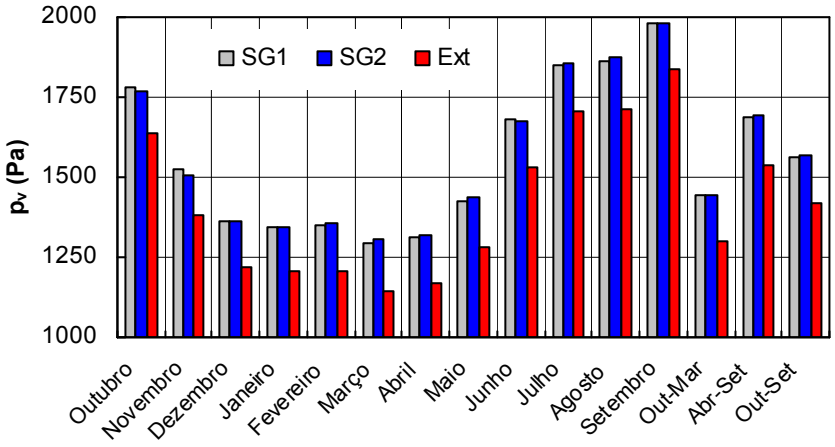


Figura 129 – Valores médios mensais, semestrais e anuais da pressão de vapor interior e exterior nas simulações SG1 e SG2

Outra observação interessante corresponde à verificação da histerese da evolução do excesso de pressão de vapor médio mensal, em função da temperatura média exterior, provocado pela inércia higroscópica, vindo de encontro ao princípio já referido na subsecção 2.5.9. Na Figura 130, esse efeito é evidenciado pela diminuição da média mensal do excesso de vapor nos meses de Outubro e Novembro causada pela inércia higroscópica na simulação SG2 face a SG1. Essa diminuição explica-se pelo início do processo de adsorção sazonal da envolvente que provoca um atraso temporal no aumento da pressão de vapor interior média e, por conseguinte, na humidade relativa média. Já no mês de Março, correspondente ao início do processo de desadsorção sazonal, verifica-se um atraso temporal na diminuição dos dois parâmetros. Medições num edifício real, efectuadas por Freitas e Abrantes (1989), evidenciaram também este efeito.

Este efeito sazonal foi vantajoso no cenário de simulação subjacente a SG1 e SG2. A redução da média mensal da humidade relativa interior verificou-se em meses onde esse parâmetro é tendencialmente mais elevado. O efeito de acréscimo, pelo contrário, verificou-se num mês onde, tendencialmente, a humidade relativa é mais baixa.

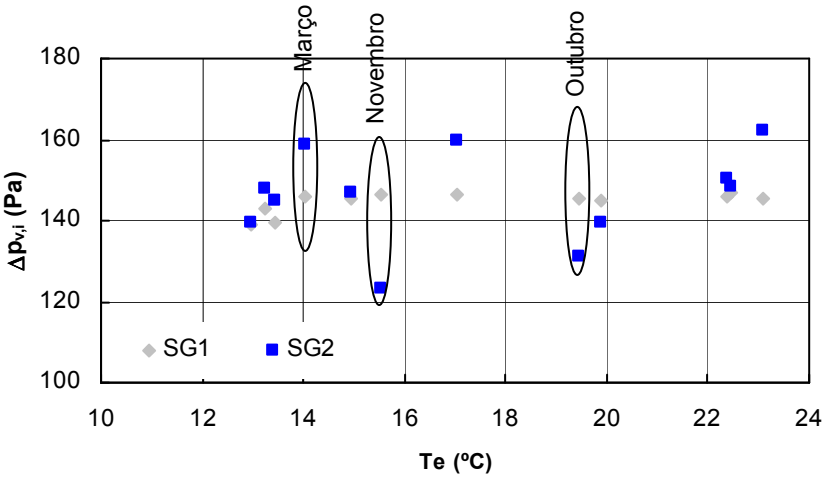


Figura 130 – Valores médios mensais do excesso de pressão de vapor interior, nas simulações SG1 e SG2, em função da temperatura média mensal exterior

A relação obtida entre o excesso de pressão de vapor interior e a temperatura exterior não poderia ser comparada com as classes de higrometria interior, resultantes da aplicação da metodologia da EN ISO 13788. Essas classes, cujos limites variam com a temperatura exterior, reflectem o comportamento de edifícios reais onde a ventilação não é um parâmetro constante, como aconteceu neste exercício de simulação.

Outra forma de olhar para os resultados das simulações consiste na representação de curvas de frequência acumulada da humidade relativa, ou da pressão de vapor, referentes a um determinado período em análise. Como se verifica na Figura 131, esta representação permite desde logo visualizar o efeito da inércia higroscópica no amortecimento dos picos da variação da humidade relativa interior.

Este efeito também é visível na Figura 132, onde se pode observar como a pressão de vapor exterior limitou inferiormente, nestas simulações, os valores inferiores da pressão interior no cenário sem inércia higroscópica e os valores superiores da pressão interior no cenário que dispõe de inércia higroscópica.

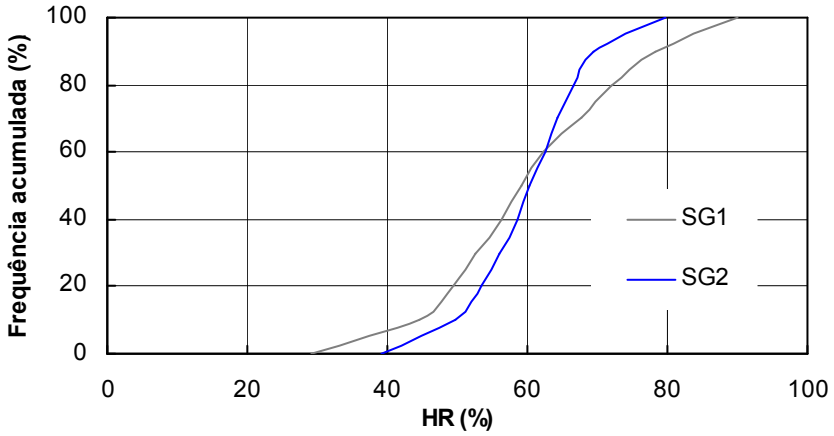


Figura 131 – Curva de frequência acumulada da humidade relativa interior nas simulações SG1 e SG2, referente ao período Outubro – Março

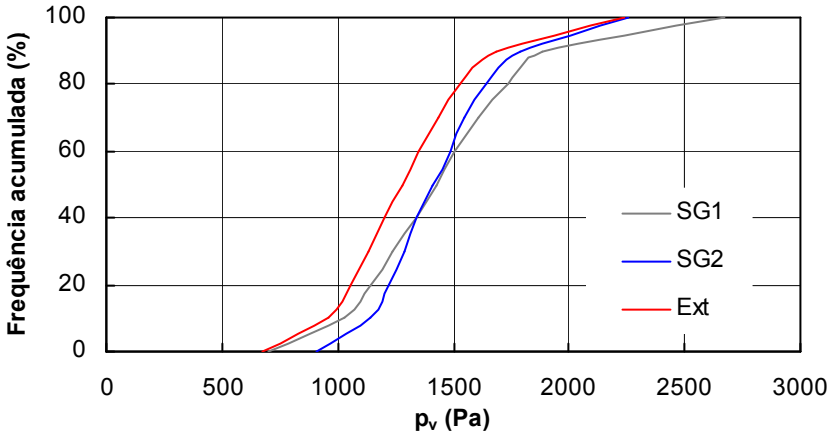


Figura 132 – Curva de frequência acumulada da pressão de vapor nas simulações SG1 e SG2, referente ao período Outubro – Março

Vários parâmetros numéricos podem ser obtidos a partir da descrição estatística da variação das grandezas em análise. Para cada simulação, no período Outubro – Março, foram calculados os seguintes parâmetros caracterizadores do ambiente interior.

- T_m: valor médio da temperatura interior;
- HR_m: valor médio da humidade relativa interior;
- $p_{v,m}$: valor médio da pressão de vapor interior;
- $\Delta p_{v,m}$: valor médio do excesso de pressão de vapor interior;
- HR_{90}: valor da humidade relativa interior associada ao percentil 90;

— $\overline{HR_{90}}$: valor médio diário do percentil 90 da variação de humidade relativa interior;

A partir de $\overline{HR_{90}}$ e de HR_m foi ainda calculado um parâmetro representativo da amplitude média diária relativa dessa variação, *AMDR*, de acordo com a expressão:

$$AMDR = \frac{\left(\overline{HR_{90}} - HR_m\right)_{sim}}{\left(\overline{HR_{90}} - HR_m\right)_{ref}} \tag{107}$$

Como se pode verificar, este parâmetro procura traduzir a redução da amplitude diária de variação da humidade relativa de um determinado cenário em relação a um cenário de configuração equivalente, mas de inércia higroscópica nula, que é tomado como referência.

As tabelas seguintes apresentam um resumo dos parâmetros numéricos de caracterização, calculados para as simulações do comportamento higrotérmico do quarto virtual. Na Tabela 39 apresentam-se valores médios das grandezas para o período de Outubro a Março. Na Tabela 40 apresenta-se o conjunto de parâmetros orientado para a caracterização de picos de humidade relativa.

Tabela 39 – Resumo dos parâmetros de caracterização dos resultados das simulações no quarto virtual, referentes ao período Outubro-Março – 1ª parte

Sim.	T_m (ºC)	HR_m (%)	$p_{v,m}$ (Pa)	$\Delta p_{v,m}$ (Pa)
SG1	20,3	60,5	1443	143
SG2	20,3	60,1	1441	141
SG3	20,3	60,2	1442	142
SG4	20,3	60,3	1441	141
SG5	20,3	60,3	1443	143
SG6	20,3	60,0	1441	141
SG7	20,3	60,1	1441	141
SG8	20,3	60,4	1444	144
SG9	20,3	60,5	1446	146
SG10	20,3	60,5	1446	143
SG11	20,3	63,0	1504	203
SG12	20,3	63,1	1513	213
SG13	20,3	63,3	1515	214
SG14	20,3	63,0	1506	206
SG15	19,7	62,7	1439	138
SG16	19,7	62,3	1440	140
SG17	19,7	62,6	1442	142
SG18	19,7	62,4	1436	136
SG19	22,1	54,1	1446	146
SG20	22,1	53,9	1445	145
SG21	22,1	54,0	1446	145
SG22	22,1	54,0	1445	145
SG23	21,0	60,5	1510	210
SG24	21,1	59,9	1507	206
SG25	21,1	60,4	1513	213
SG26	21,1	60,1	1506	206
SG27	22,6	61,6	1689	389
SG28	22,7	62,3	1721	421
SG29	22,6	63,0	1733	433
SG30	22,6	62,0	1708	408
SG31	20,3	54,3	1301	0
SG32	20,3	53,9	1298	-2
SG33	20,3	54,1	1298	-2
SG34	20,3	54,0	1297	-3
SG35	19,0	56,8	1256	146
SG36	19,0	56,7	1257	146
SG37	19,0	56,7	1257	146
SG38	18,9	65,4	1439	139
SG39	18,8	65,7	1439	139
SG40	18,9	65,8	1444	144
SG41	18,9	65,6	1443	143
SG42	18,9	65,7	1440	140

Tabela 40 – Resumo dos parâmetros de caracterização dos resultados das simulações no quarto virtual, referentes ao período Outubro-Março – 2ª parte

Sim.	**HR_{90} (%)**	**$\overline{HR_{90}}$ (%)**	**Simulação referência**	***AMDR* (%)**
SG1	78,2	73,6	SG1	100
SG2	69,4	63,1	SG1	23
SG3	71,6	66,5	SG1	48
SG4	76,0	72,0	SG1	89
SG5	72,1	66,3	SG1	46
SG6	68,9	62,6	SG1	20
SG7	70,7	64,8	SG1	36
SG8	74,2	68,8	SG1	64
SG9	73,5	67,9	SG1	56
SG10	71,9	65,3	SG1	37
SG11	87,5	81,5	SG11	100
SG12	73,2	67,5	SG11	24
SG13	76,7	72,0	SG11	47
SG14	84,6	79,7	SG11	90
SG15	81,7	76,2	SG15	100
SG16	73,1	65,6	SG15	24
SG17	75,6	68,9	SG15	47
SG18	79,1	74,5	SG15	90
SG19	69,6	65,6	SG19	100
SG20	62,9	56,6	SG19	23
SG21	64,8	59,4	SG19	47
SG22	67,8	64,1	SG19	88
SG23	82,3	77,8	SG23	100
SG24	69,0	63,0	SG23	18
SG25	72,2	66,7	SG23	36
SG26	78,8	75,0	SG23	86
SG27	90,0	84,7	SG27	100
SG28	69,8	65,1	SG27	12
SG29	74,1	69,4	SG27	28
SG30	85,5	82,1	SG27	87
SG31	67,1	56,6	SG31	100
SG32	63,1	55,2	SG31	57
SG33	65,3	55,7	SG31	70
SG34	65,3	56,1	SG31	91
SG35	73,2	70,1	SG35	100
SG36	64,2	59,7	SG35	23
SG37	66,4	62,6	SG35	44
SG38	83,8	78,4	SG38	100
SG39	84,3	78,6	SG39	100
SG40	75,3	68,5	SG39	21
SG41	78,2	71,5	SG39	46
SG42	82,1	77,3	SG39	90

6.4.4 Risco de desenvolvimento de fungos associado aos resultados obtidos

Procurou abordar-se, com base nas simulações realizadas, uma avaliação do risco de desenvolvimento de fungos. Foi possível constatar, na subsecção 2.3.3, que a análise desse risco se reveste de uma grande complexidade. Procurou-se, ainda assim, definir indicadores do risco de desenvolvimento de fungos, com o objectivo de estabelecer comparações entre simulações, mas sem pretensão de produzir a sua avaliação de modo absoluto.

Uma abordagem possível corresponde à avaliação da ocorrência de condensações superficiais. Este efeito é particularmente gravoso porque a formação de água líquida constitui um comportamento não linear em termos de balanço de humidade superficial. Ou seja, após a formação de água líquida sobre uma superfície, que se dá num curto espaço de tempo, a sua restituição por convecção para o ar interior será muito mais lenta, levando a uma manutenção das condições de desenvolvimento de fungos durante períodos longos.

De acordo com esta abordagem é possível avaliar dois tipos de parâmetros. O primeiro define-se a partir do valor do factor de temperatura superficial, f_{Rsi}, definido pela expressão seguinte.

$$f_{Rsi} = \frac{T_{spf,i} - T_e}{T_i - T_e} \tag{108}$$

Procedeu-se, de forma simplificada, ao cálculo de um valor mínimo horário de f_{Rsi}, impondo $T_{spf,i}$ igual à temperatura de ponto de orvalho horária em cada simulação. A partir dos valores obtidos retirou-se o valor correspondente ao percentil 90, $f_{Rsi,90}$, utilizado como valor de comparação entre as várias simulações.

O segundo tipo de parâmetros corresponde à identificação do número de dias em que se espera haver condições para um risco elevado de desenvolvimento de fungos. O conceito "*time of wetness*", *TOW*, definido por Adan (1994) e já citado na subsecção 2.3.3, permite estabelecer um acréscimo do risco de desenvolvimento de fungos para *TOW* superior a 0,5. Ou seja, se em mais de metade da duração de um ciclo diário se verificar que a humidade relativa superficial é superior a 80 %.

A partir deste conceito definiu-se um indicador numérico, a calcular para cada simulação, correspondente ao número de dias em que se verifica *TOW* superior a 0,5,

$nd_{TOW>0,5}$. O interesse deste indicador seria acrescido, se reflectisse o efeito de eventuais pontes térmicas na definição da humidade relativa superficial mais desfavorável que se poderia encontrar no compartimento em análise.

A análise adicional de cenários de simulação com pontes térmicas teria acrescentado complexidade ao conjunto de cálculos efectuados. Optou-se, por isso, por uma estratégia de análise simplificada desta questão. Sem alterar os valores da temperatura e humidade interior obtidos em cada simulação, avaliou-se $nd_{TOW>0,5}$ para dois cenários distintos, um com uma boa qualidade da envolvente e outro com qualidade reduzida.

A utilização do conceito de factor de temperatura superficial, f_{Rsi}, permite o desenvolvimento desses cenários de forma simples. Considerou-se f_{Rsi}=0,8 para o cenário de boa qualidade da envolvente e f_{Rsi}=0,5 para o cenário de qualidade reduzida, de acordo com Corvacho (1999). Obteve-se a temperatura superficial, $T_{spf,i}$, a partir dos valores horários da temperatura interior, T_i, e da temperatura exterior, T_e. Os valores horários da humidade relativa superficial foram obtidos em seguida, em função de $T_{spf,i}$, considerando a pressão de vapor à superfície idêntica à do interior do compartimento. Na Figura 133 pode observar-se o resultado desta análise para a simulação SG1, mostrada como exemplo. Como se pode verificar, neste cenário, uma má qualidade da envolvente daria origem a 7 dias com *TOW* superior a 0,5, enquanto que para uma melhor qualidade da envolvente esse número seria nulo.

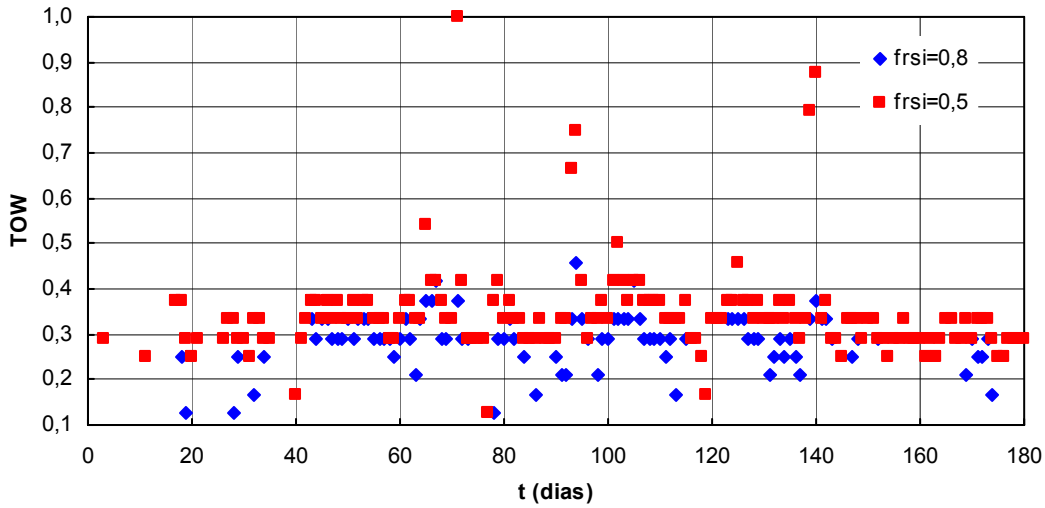


Figura 133 – Valores de TOW diário, na simulação SG1, no período de Outubro a Março, para dois níveis de qualidade da envolvente

Tendo em conta o efeito não linear da formação de condensações superficiais, discutido acima, considerou-se relevante calcular também o número de dias em que ocorreriam condensações superficiais, nd_{cond}.

A tabela seguinte apresenta um resumo dos parâmetros obtidos na avaliação de risco de desenvolvimento de fungos, associado aos resultados obtidos nas simulações do comportamento higrotérmico do quarto virtual.

Tabela 41 – Resumo dos parâmetros de avaliação de risco de desenvolvimento de fungos nas simulações no quarto virtual, referentes ao período Outubro-Março

Sim.	$f_{Rsi,90}$	nd_{cond} / $nd_{TOW>0,5}$	
		f_{Rsi} **= 0,8**	f_{Rsi} **= 0,5**
SG1	0,352	0 / 0	30 / 7
SG2	0,064	0 / 0	0 / 8
SG3	0,150	0 / 0	0 / 3
SG4	0,306	0 / 0	14 / 4
SG5	0,124	0 / 0	0 / 9
SG6	0,063	0 / 0	0 / 8
SG7	0,085	0 / 0	0 / 7
SG8	0,200	0 / 1	2 / 11
SG9	0,169	0 / 0	0 / 10
SG10	0,099	0 / 0	0 / 11
SG11	0,606	0 / 0	131 / 6
SG12	0,193	0 / 0	1 / 28
SG13	0,309	0 / 2	13 / 20
SG14	0,556	0 / 0	116 / 3
SG15	0,407	0 / 6	37 / 15
SG16	0,080	0 / 0	0 / 19
SG17	0,147	0 / 5	0 / 23
SG18	0,353	0 / 0	21 / 11
SG19	0,254	0 / 0	3 / 0
SG20	0,047	0 / 0	0 / 0
SG21	0,099	0 / 0	0 / 0
SG22	0,226	0 / 0	0 / 0
SG23	0,547	0 / 0	112 / 5
SG24	0,159	0 / 0	1 / 17
SG25	0,217	0 / 0	1 / 17
SG26	0,470	0 / 0	68 / 2
SG27	0,755	65 / 0	176 / 6
SG28	0,357	0 / 0	10 / 76
SG29	0,420	0 / 3	52 / 67
SG30	0,702	31 / 0	151 / 3
SG31	0,000	0 / 0	0 / 4
SG32	0,000	0 / 0	0 / 0
SG33	0,000	0 / 0	0 / 1
SG34	0,000	0 / 0	0 / 1
SG35	0,439	0 / 0	32 / 1
SG36	0,189	0 / 0	0 / 1
SG37	0,246	0 / 0	0 / 1
SG38	0,604	0 / 4	36 / 12
SG39	0,604	0 / 4	37 / 13
SG40	0,336	0 / 1	0 / 19
SG41	0,323	0 / 3	0 / 26
SG42	0,601	0 / 1	21 / 6

6.4.5 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos nas simulações do quarto virtual permitem iniciar uma discussão sobre o papel que determinados parâmetros podem desempenhar no comportamento higrotérmico global de um compartimento.

Pode extrair-se um conjunto de conclusões, analisando apenas os valores médios do período do ano considerado. Essa análise pode restringir-se às simulações de referência, onde a inércia higroscópica é nula. Os valores médios da temperatura interior, da humidade relativa interior e do excesso de pressão interior não sofreram, em geral, alterações sensíveis nas simulações que incluíram inércia higroscópica, como se pode verificar pelos resultados da Tabela 39.

A Figura 134 apresenta os valores médios da temperatura interior nas simulações de referência. O valor mais elevado deste conjunto verificou-se para a simulação SG27, que apresentou como particularidade um caudal de ventilação mais reduzido. Os valores mais baixos verificaram-se para a utilização do clima do Porto (SG35), como seria de esperar face a simulações com o clima de Lisboa, e também para as simulações SG38 e SG39, onde se reduziu os ganhos solares por mudança da orientação solar ou por redução da área de envidraçado.

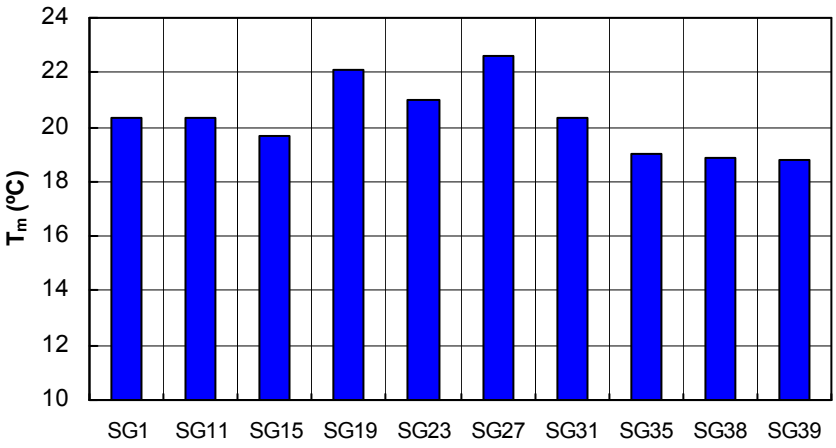


Figura 134 – Valores da temperatura média interior, nas simulações de referência, para o período Outubro – Março

O excesso de pressão de vapor interior foi condicionado essencialmente pelo nível de produção de vapor e pelo caudal de ventilação admitido. Como se verifica na Figura 135, e recorrendo novamente à classificação da higrometria sugerida por Freitas e

Pinto (1998), a generalidade das simulações efectuadas apresentou um excesso de pressão médio correspondente a uma higrometria fraca. O aumento da produção de vapor em 50 % em SG11 ou a redução da ventilação para 0,66 h^{-1} em SG23 elevou a classificação para higrometria média. A redução da ventilação para 0,33 h^{-1} em SG27 também elevou a classificação para higrometria média mas com um valor claramente destacado relativamente às restantes simulações.

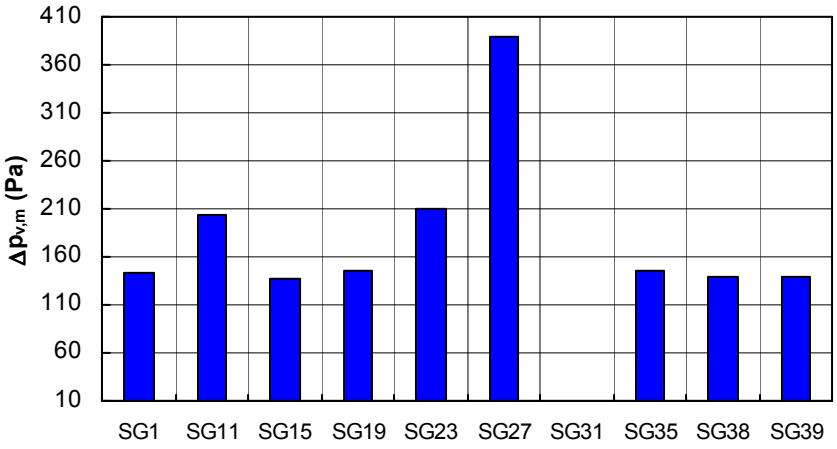


Figura 135 – Valores médios do excesso de pressão de vapor verificados nas simulações de referência para o período Outubro – Março

A humidade relativa interior registada nas simulações de referência representa-se, na Figura 136, através dos valores médios e dos valores associados ao percentil 90. É possível observar a forma como as condições de temperatura interior e de pressão de vapor se conjugam para a definição da humidade relativa.

Pode observar-se, por exemplo, que nas simulações SG19 e SG39, onde se registou um excesso de pressão médio semelhante, se verifica uma grande diferença na humidade relativa apenas por acção da temperatura. As variações da temperatura podem ser atribuídas a diferentes causas. A comparação das simulações SG1 e SG38 mostra como a mudança de orientação de Sul para Norte provocou um aumento da humidade de 5 % HR.

Nas situações onde já se detectara uma higrometria superior detectou-se também uma maior diferença entre o percentil 90 e a média.

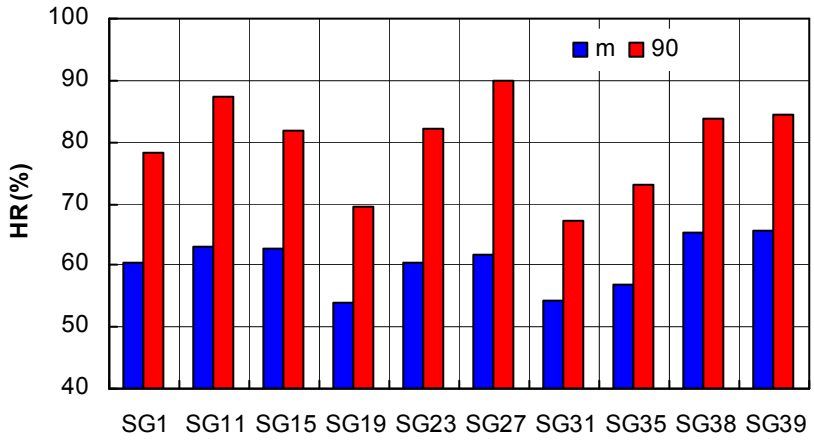


Figura 136 – Valores da média e do percentil 90 da humidade relativa, calculados nas simulações de referência, para o período Outubro – Março

O cálculo de $f_{Rsi,90}$ permite uma avaliação das exigências de qualidade da envolvente, para controlo dos riscos de desenvolvimento de fungos, face a um determinado perfil de variação da temperatura e humidade interior. A comparação dos valores obtidos para esse parâmetro nas simulações de referência, apresentada na Figura 137, evidencia uma relação próxima com os valores obtidos para HR_{90}.

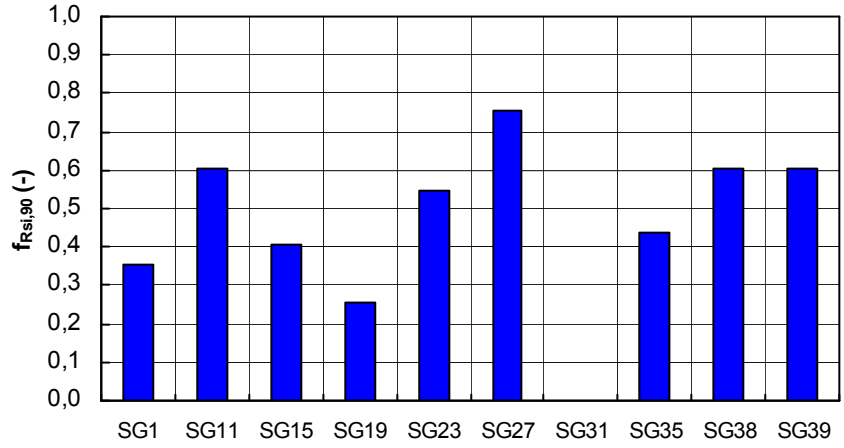


Figura 137 – Valores de $f_{Rsi,90}$ nas simulações de referência para o período Outubro – Março

A comparação dos valores de $f_{Rsi,90}$ obtidos nas simulações SG1 e SG35, que diferem entre si apenas no clima exterior, nomeadamente Lisboa e Porto, evidencia as limitações a uma análise baseada apenas na humidade relativa interior. Apesar de a humi-

dade relativa média e do percentil 90 apresentarem um valor mais elevado para SG1, $f_{Rsi,90}$ é maior em SG35, indicando uma maior exigência para a qualidade térmica da envolvente. Este resultado deve-se essencialmente ao clima mais frio do Porto. Esta comparação realça a importância de uma visão integrada do comportamento higrotérmico de um edifício, como suporte a análises de risco de desenvolvimento de patologias relacionadas com a humidade.

A Figura 138 apresenta os valores nd_{cond} para f_{Rsi}=0,5. A utilização do parâmetro nd_{cond} permite evidenciar o elevado risco de ocorrência de condensações superficiais num cenário de má qualidade da envolvente, associado a valores crescentes da higrometria. A adopção de um valor mínimo da temperatura interior elevado, como sucede na simulação SG19, surge como uma forma eficaz de redução desse risco.

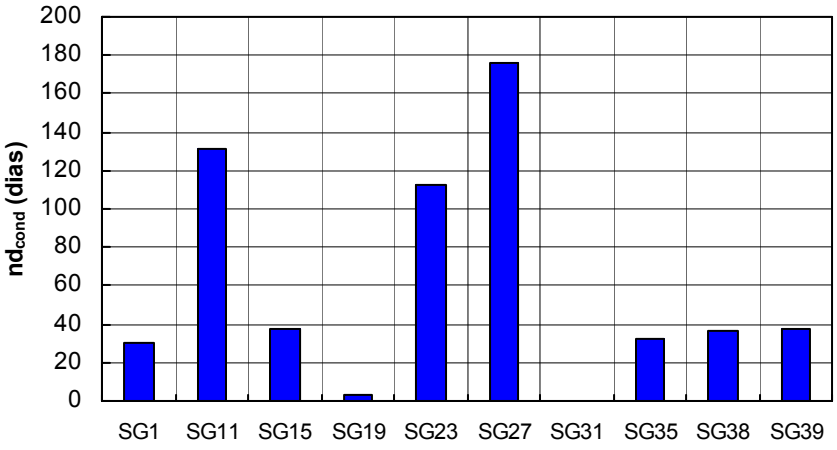


Figura 138 – Valores de nd_{cond} nas simulações de referência para o período Outubro – Março, admitindo f_{Rsi}=0,5 numa ponte térmica da envolvente

A discussão sobre o efeito da inércia higroscópica é o passo lógico que surge no seguimento da comparação das simulações de referência. Nesta subsecção inicia-se essa discussão, comparando os resultados das simulações de referência com os resultados das simulações equivalentes, onde se alterou a configuração interior para C2, correspondente ao nível de inércia higroscópica mais elevado utilizado nestes cálculos.

O valor obtido para o percentil 90 da humidade relativa nas simulações de referência, face às simulações com inércia higroscópica, que se apresenta na Figura 139, mostra a redução produzida pelo mesmo nível de higroscopicidade em diferentes

cenários higrotérmicos. A redução dos picos de humidade relativa foi significativa em todos esses cenários mas o nível de redução produzido foi diferente para cada caso. A redução absoluta produzida pela inércia higroscópica cresceu com a higrometria.

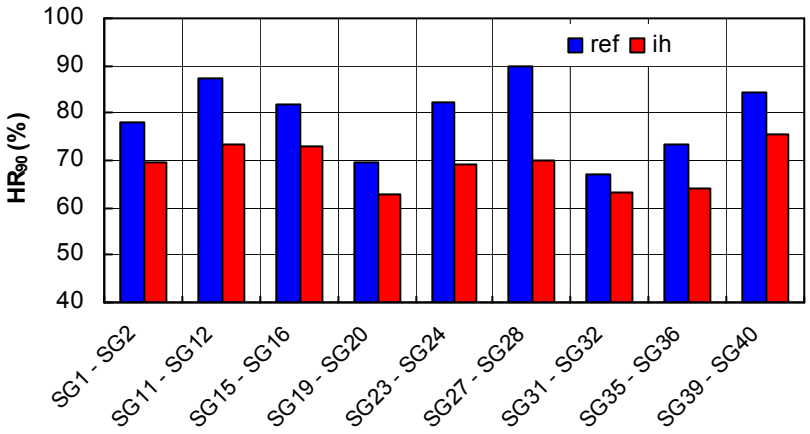


Figura 139 – Valores do percentil 90 da humidade relativa, calculados nas simulações de referência e em simulações com inércia higroscópica, para o período Outubro – Março

A comparação dos valores $f_{Rsi,90}$, que se apresenta na Figura 140, mostra a redução de preocupações com a envolvente, tendo em conta a ocorrência de condensações superficiais, de que se pode beneficiar com o efeito da inércia higroscópica.

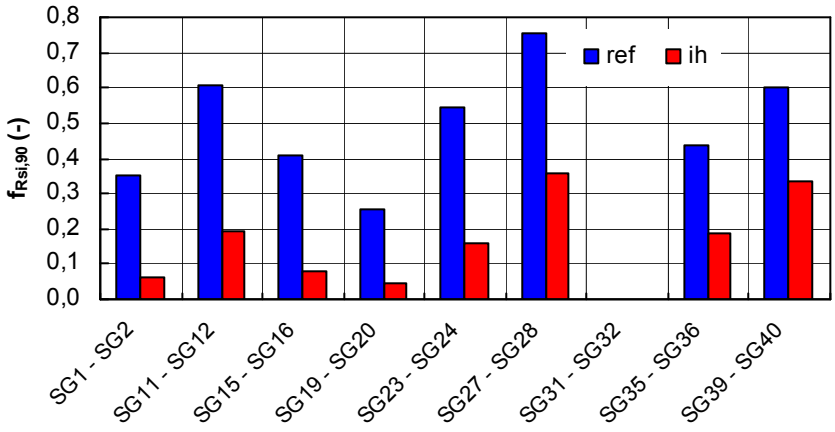


Figura 140 – Valores de $f_{Rsi,90}$ calculados nas simulações de referência e em simulações com inércia higroscópica para o período Outubro – Março

Apresenta-se, na Figura 141, uma comparação entre as simulações de referência e as correspondentes simulações com inércia higroscópica usando o máximo dos valores $nd_{TOW>0,5}$ e nd_{cond} para a hipótese de uma envolvente de qualidade térmica reduzida. Nos termos da comparação efectuada, a presença de inércia higroscópica continuaria a ser vantajosa. Mas é notório que a conjugação de valores crescentes de higrometria, associados a envolventes de má qualidade térmica e a uma inércia higroscópica elevada, podem também potenciar o desenvolvimento de fungos por originarem números de dias com $TOW > 0,5$. E isto pode suceder mesmo sem a ocorrência de condensações superficiais.

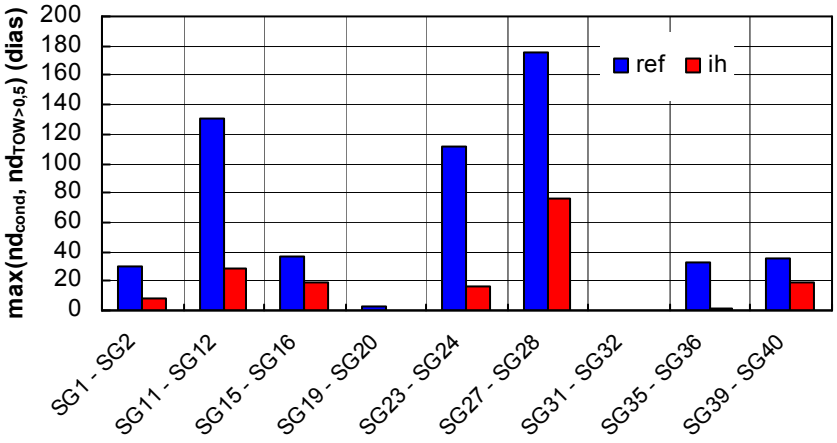


Figura 141 – Máximos dos pares de valores $nd_{TOW>0,5}$ e nd_{cond}, admitindo f_{Rsi}=0,5, calculados nas simulações de referência e em simulações com inércia higroscópica para o período Outubro – Março

6.5 Avaliação da Relação Entre Inércia Higroscópica e Variação da Humidade Relativa Interior

6.5.1 Proposta de estratégia de avaliação

Os resultados obtidos em diferentes etapas deste trabalho demonstraram, de forma inequívoca, que a inércia higroscópica amortece as variações da humidade relativa interior de um compartimento. Os ensaios na câmara de fluxo permitiram medir, experimentalmente, esse amortecimento. As simulações numéricas do comportamento higrotérmico de um quarto mostraram que, a combinação da inércia higroscópica

com diferentes valores dos restantes parâmetros definidores desse comportamento, provocou sempre uma redução dos picos de humidade relativa.

Os resultados obtidos demonstraram, também, que o amortecimento da variação da humidade relativa é proporcional ao nível de higroscopicidade. Seria interessante, por isso, dispor de uma forma de quantificar o nível de inércia higroscópica de um compartimento e relacioná-lo com o amortecimento potencial da sua variação de humidade relativa.

Alguns autores tentaram já realizar esse tipo de análise, podendo citar-se como exemplos recentes Hokoi (2005) e Hens (2005). A metodologia seguida nesses trabalhos consistiu em adoptar cenários higrotérmicos com simplificações suficientes para a obtenção de expressões matemáticas exactas, nos limites dessas simplificações, e traduzindo o amortecimento da variação de humidade relativa em função de parâmetros que traduzem a higroscopicidade do compartimento. A definição desses parâmetros é realizada a partir da curva higroscópica e da permeabilidade ao vapor, simplificadas, de um único material que se supõe semi-infinito e cuja resistência à transferência de vapor à superfície é desprezável.

Esta aproximação ao problema permite demonstrar o efeito teórico da inércia higroscópica. No entanto, dada a extensão das simplificações necessárias à sua aplicação, é difícil utilizá-la sistematicamente como ferramenta de análise de cenários higrotérmicos realistas, combinados com uma inércia higroscópica resultante de diferentes elementos construtivos, constituídos por materiais aplicados com espessuras diversas.

Optou-se por isso, neste trabalho, por uma aproximação alternativa a esta questão. Procurou-se uma relação empírica entre a inércia higroscópica de um compartimento e o amortecimento da variação de humidade relativa resultante da combinação dos restantes parâmetros higrotérmicos. Essa relação foi estudada com base nos resultados experimentais e numéricos produzidos. O âmbito desta análise foi restringido ao efeito da inércia higroscópica em ciclos diários.

A aplicação do modelo "CAM_FLUX1" permitiu gerar um conjunto de simulações simples, desenvolvidas para iniciar a análise pretendida. Estas simulações são em tudo semelhantes às já realizadas para comparação com os ensaios da câmara de fluxo, mas a utilização de uma solicitação higrotérmica teórica, sem as perturbações

observadas nos ensaios, permite uma análise de sensibilidade afectada por menos graus de incerteza.

Tabela 42 – Características das simulações da câmara de fluxo virtual

Simulação	TG (h)	N (h^{-1})	Elemento activo	S (m^2)
SCF1	8	1	1,25 cm GC	0,0
SCF2	8	1	1,25 cm GC	0,3
SCF3	8	1	1,25 cm GC	0,7
SCF4	8	1	1,25 cm GC	1,5
SCF5	8	1	1,25 cm GC	6,0
SCF6	8	0,5	1,25 cm GC	0,0
SCF7	8	0,5	1,25 cm GC	0,15
SCF8	8	0,5	1,25 cm GC	0,35
SCF9	8	0,5	1,25 cm GC	0,75
SCF10	8	0,5	1,25 cm GC	3,0
SCF11	8	0,25	1,25 cm GC	0,0
SCF12	8	0,25	1,25 cm GC	0,075
SCF13	8	0,25	1,25 cm GC	0,175
SCF14	8	0,25	1,25 cm GC	0,375
SCF15	8	0,25	1,25 cm GC	1,5
SCF16	10	1	1,25 cm GC	0,0
SCF17	10	1	1,25 cm GC	0,3
SCF18	10	1	1,25 cm GC	0,7
SCF19	10	1	1,25 cm GC	1,5
SCF20	10	1	1,25 cm GC	6,0
SCF21	12	1	1,25 cm GC	0,0
SCF22	12	1	1,25 cm GC	0,3
SCF23	12	1	1,25 cm GC	0,7
SCF24	12	1	1,25 cm GC	1,5
SCF25	12	1	1,25 cm GC	6,0
SCF26	8	1	1,0 cm GT	0,3
SCF27	8	1	1,0 cm GT	1,5

Este conjunto de simulações considerou para um compartimento virtual, correspondente à câmara de fluxo, um cenário de temperatura constante a 23 ºC, humidade relativa exterior constante a 30 %, uma produção de vapor constante de 2 g/h durante um período, TG, do ciclo diário e um número de renovações horárias constante, N. Além do tipo de elemento higroscopicamente activo, caracterizado pela sua espessu-

ra e pelo material base, foi também variada a área, S, preenchida com esse elemento. Na Tabela 42 apresenta-se um resumo das características complementares de cada simulação. Os elementos higroscópicos foram simulados com recurso aos dados já utilizados na secção 6.3.

A partir de cada uma destas simulações procurou-se obter um par de valores onde, um deles traduz o amortecimento da variação diária de humidade relativa no ciclo diário estável e o outro traduz o nível de inércia higroscópica diária. O parâmetro *AMDR* foi utilizado para representar o amortecimento introduzido na secção anterior. A tradução do nível de inércia higroscópica utilizou um parâmetro que é função do MBV dos elementos higroscopicamente activos.

O MBV de um elemento, com potencial higroscópico, foi assim escolhido como ponto de partida para a caracterização da inércia higroscópica diária de um compartimento. O MBV representa, num único valor numérico, o resultado da conjugação das propriedades de transferência de vapor dos diferentes materiais de um elemento composto, submetido a uma solicitação hígrica transitória, assimilável ao ciclo diário típico dos quartos dos edifícios de habitação.

Na Figura 142 apresenta-se uma primeira representação da relação entre *AMDR* e o produto da área de aplicação de um elemento higroscópico, S, pelo correspondente MBV que, tendo em conta as definições adoptadas, correspondem exactamente aos valores obtidos na secção 4.5.

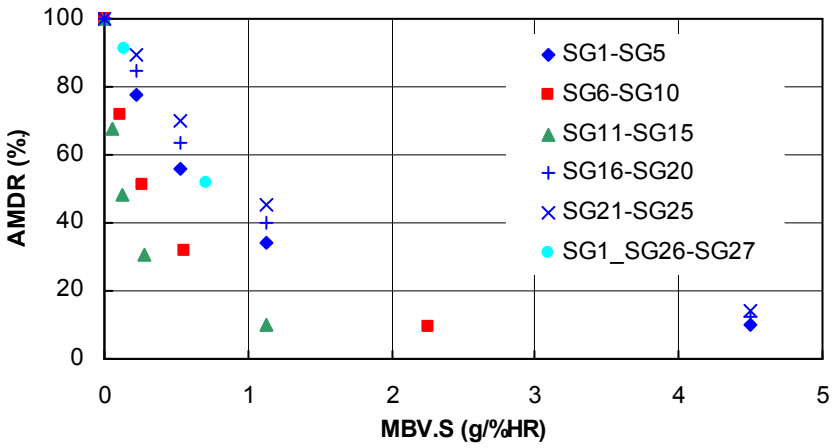


Figura 142 – Representação gráfica da relação (MBV.S, *AMDR*) correspondente a cada simulação SCF

Como se pode verificar, *AMDR* decresce de forma consistente com o produto MBV.S, segundo uma lei de tipo logarítmico, para cada conjunto de simulações com características semelhantes à excepção do nível de higroscopicidade. Verifica-se, no entanto, que a variação de cada parâmetro introduziu um factor de dispersão nos resultados globais.

Procurou-se, por isso, um parâmetro que eliminasse parte da dispersão encontrada. Obteve-se assim uma primeira versão do índice de inércia higroscópica diária, $I_{h,d}$, de acordo com a expressão seguinte.

$$I_{h,d} = \frac{MBV \cdot S}{N \cdot V \cdot TG} \rightarrow \left[\frac{g}{m^3 \cdot \%HR}\right] \tag{109}$$

Os resultados apresentados na Figura 142 representam-se novamente na Figura 143, relacionando-se desta vez *AMDR* com $I_{h,d}$.

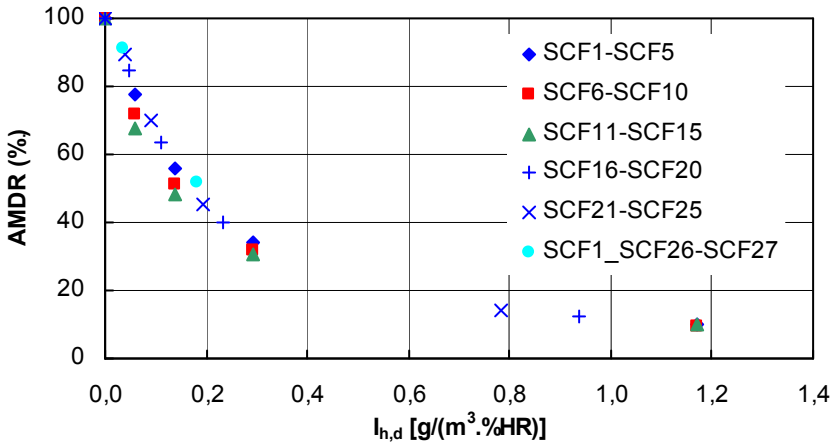


Figura 143 – Representação gráfica da relação ($I_{h,d}$, *AMDR*) correspondente a cada simulação SCF

A nova relação permitiu, neste conjunto de casos, diminuir a dispersão de resultados. No entanto, é possível verificar que a curva que relaciona $I_{h,d}$ com *AMDR* será ligeiramente diferente, sobretudo no seu troço inicial, de acordo com o caudal de ventilação correspondente. Também é possível verificar alguma dispersão provocada pelo tipo de elemento utilizado. Estes resultados foram, ainda assim, bastante interessantes, pelo que se estendeu esta análise aos resultados experimentais da câmara de fluxo e aos resultados numéricos das simulações do quarto virtual.

6.5.2 Aplicação aos resultados disponíveis

A representação dos resultados obtidos na câmara de fluxo é apresentada na Figura 144, num gráfico ($I_{h,d}$, *AMDR*), de acordo com a metodologia exposta na subsecção anterior. Os valores numéricos necessários a essa representação estão resumidos na Tabela 43. A extensão desta análise a situações onde a inércia higroscópica pode depender de vários elementos construtivos eventualmente combinados com outros elementos, normalmente presentes no interior dos edifícios, obrigou a uma primeira adaptação da definição de $I_{h,d}$.

A expressão seguinte apresenta essa nova definição. O produto MBV·S, utilizado na expressão (109), é substituído por uma soma dos produtos MBV·S, referentes a cada elemento construtivo diferente, e das quantidades MBV_{obj}, referentes aos objectos com capacidade higroscópica a contabilizar para o compartimento em análise.

$$I_{h,d} = \frac{\sum_{i}^{n} MBV_i \cdot S_i + \sum_{j}^{m} MBV_{obj,j}}{N \cdot V \cdot TG} \rightarrow \left[\frac{g}{m^3 \cdot \%HR} \right] \tag{110}$$

A aplicação do processo de análise do efeito da inércia higroscópica, aos resultados específicos dos ensaios e simulações correspondentes na câmara de fluxo, exigiu ainda algumas considerações adicionais. Os casos de referência utilizados para o cálculo de *AMDR*, em cada ensaio, corresponderam às simulações da câmara de ensaio vazia, dado que os casos sem provetes ensaiados dispunham da higroscopicidade inerente ao próprio dispositivo de ensaio. O cálculo de $I_{h,d}$ contabilizou uma parcela correspondente a essa higroscopicidade.

Como se pode observar na Figura 144, a estratégia proposta para avaliação da influência da inércia higroscópica manteve a sua aplicabilidade para os casos analisados na câmara de fluxo. No entanto, a dispersão de resultados foi bastante maior. Para cada série de dados pode observar-se que valores de $I_{h,d}$ iguais originaram valores correspondentes de *AMDR* diferentes. Estas diferenças são normais, tendo em conta a base do método e a variabilidade associada ao próprio processo experimental.

Tabela 43– Resumo dos valores ($I_{h,d}$, *AMDR*) referentes à análise do efeito da inércia higroscópica realizada com base nos ensaios na câmara de fluxo

Caso	Provetes		Caso de referência	*AMDR* (%)	
	Composição	$I_{h,d}\left[\frac{g}{m^3 \cdot \%HR}\right]$		Ensaio	Simulação Sim_Ai
IH1	-	0,018* / 0,0	IH1_Sim_Ai	90,8	100
IH2	0,75 GC	0,164	IH1_Sim_Ai	63,2	41,9
IH3	0,50 GC	0,115	IH1_Sim_Ai	70,6	52,3
IH4	0,25 GC	0,066	IH1_Sim_Ai	80,0	66,9
IH5	-	0,035* / 0,0	IH5_Sim_Ai	80,1	100
IH6	0,75 GC	0,328	IH5_Sim_Ai	43,3	26,6
IH7	1,50 GC	0,621	IH5_Sim_Ai	26,5	16,2
IH8	0,75 GC2A	0,152	IH5_Sim_Ai	58,7	49,8
IH9	0,75 GC2A + 0,25 GC	0,250	IH5_Sim_Ai	50,8	37,0
IH10	0,75 GC2A + 0,75 GC	0,445	IH5_Sim_Ai	37,7	24,2
IH11	0,75 GP	0,316	IH5_Sim_Ai	41,2	28,8
IH12	0,75 GP2A	0,219	IH5_Sim_Ai	52,1	38,6
IH13	0,75 GT	0,219	IH5_Sim_Ai	48,5	33,3
IH14	0,75 GT2A	0,148	IH5_Sim_Ai	51,2	39,2
IH15	1 resma	0,221	IH5_Sim_Ai	57,6	nd
IH16	4 x ¼ resma	0,452	IH5_Sim_Ai	40,9	nd
IH17	8 x ¼ resma	0,868	IH5_Sim_Ai	31,4	nd
IH18	8 x ¼ resma + 0,75 m^2 GC	1,161	IH5_Sim_Ai	25,4	nd

***** - Valor de $I_{h,d}$ tendo em conta higroscopicidade estimada para a câmara de fluxo vazia

Um aspecto complementar desta análise diz respeito à comparação que, desde logo, se pode estabelecer entre os resultados experimentais e simulações na câmara de fluxo. A representação conjunta de todos os resultados permite observar a forma como o comportamento real do ar da câmara impôs uma diminuição do efeito da inércia higroscópica, representado pela série de sufixo "ens", face ao comportamento teórico expectável se a mistura do ar fosse perfeita, representado pela série de sufixo "sim_Ai".

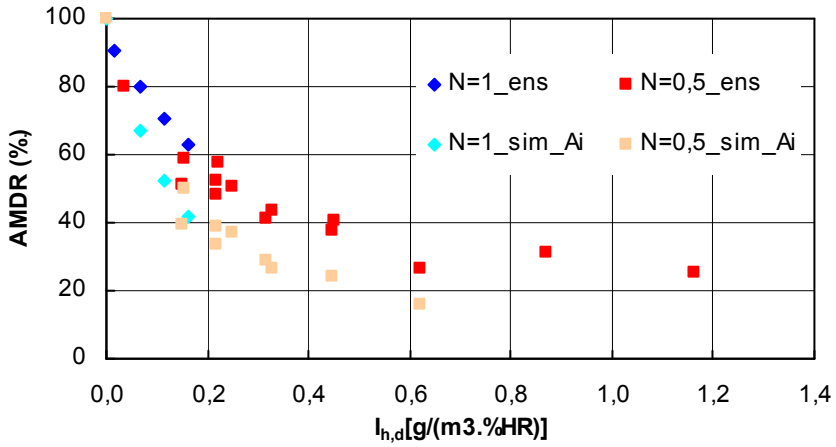


Figura 144 – Gráfico obtido para a representação da relação ($I_{h,d}$, *AMDR*) correspondente a cada caso analisado na câmara de fluxo

A análise dos resultados obtidos nas simulações do quarto virtual permite testar a aplicabilidade da estratégia de avaliação proposta a cenários onde os parâmetros higrotérmicos assumem variações mais complexas. Na Tabela 44 apresenta-se um resumo dos ($I_{h,d}$, *AMDR*) necessários a essa análise e, na Figura 145, apresenta-se a sua representação gráfica.

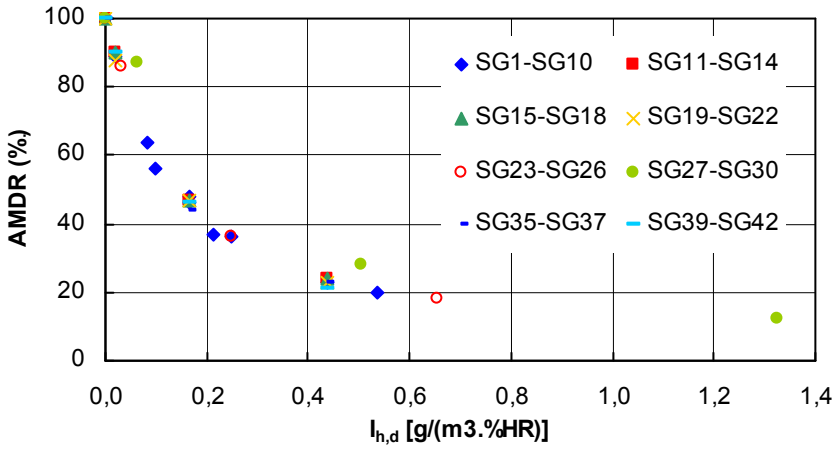


Figura 145 – Gráfico obtido para a representação da relação ($I_{h,d}$, *AMDR*) correspondente a cada caso analisado nas simulações do quarto virtual

Tabela 44– Resumo dos valores ($I_{h,d}$, *AMDR*) referentes à análise do efeito da inércia higroscópica realizada com base nas simulações do quarto virtual

Sim.	$I_{h,d}\left[\frac{g}{m^3 \cdot \%HR}\right]$	***AMDR* (%)**
SG1	0,000	100
SG2	0,438	23
SG3	0,164	48
SG4	0,021	89
SG5	0,164	46
SG6	0,536	20
SG7	0,247	36
SG8	0,083	64
SG9	0,098	56
SG10	0,214	37
SG11	0,000	100
SG12	0,438	24
SG13	0,167	47
SG14	0,021	90
SG15	0,000	100
SG16	0,438	24
SG17	0,167	47
SG18	0,021	90
SG19	0,000	100
SG20	0,438	23
SG21	0,167	47
SG22	0,021	88
SG23	0,000	100
SG24	0,653	18
SG25	0,249	36
SG26	0,031	86
SG27	0,000	100
SG28	1,326	12
SG29	0,505	28
SG30	0,063	87
SG31	0,000	100
SG32	0,438	57
SG33	0,167	70
SG34	0,021	91
SG35	0,000	100
SG36	0,438	23
SG37	0,167	44
SG38	0,000	100
SG39	0,000	100
SG40	0,438	21
SG41	0,167	46
SG42	0,021	90

A observação da Figura 145 permite verificar, mais uma vez, uma boa aplicabilidade da estratégia de avaliação proposta. Neste caso chega a ser surpreendente a pequena dispersão que se observa entre as diferentes séries de resultados.

A única série que apresenta algum afastamento em relação às restantes, correspondente a SG27-SG30, contém os resultados das simulações onde o número de renovações horárias era mais baixo, com o valor de 0,33 h^{-1}. De acordo com os resultados da Figura 143, seria de esperar que esta série apresentasse um desenvolvimento no gráfico ligeiramente inferior em relação às restantes, o que não acontece. Isso pode suceder porque, neste caso, face à variação do clima exterior, a inércia higroscópica associada a períodos de maior duração pode ter um efeito que não é negligenciável.

6.5.3 Correlação matemática dos resultados

O ajuste de expressões matemáticas e a determinação da sua correlação com os valores ($I_{h,d}$, *AMDR*), apresentados anteriormente, permitiu concluir que a expressão do tipo:

$$AMDR = \frac{1}{a + b \cdot I_{h,d}^{c}} \tag{111}$$

garante em geral um bom ajuste aos conjuntos de resultados disponíveis. Na Figura 146 apresenta-se o ajuste deste tipo de curva aos valores ($I_{h,d}$, *AMDR*) seleccionados para esta análise. Esta selecção pretendeu abranger os diferentes exercícios realizados.

A Tabela 45 resume os parâmetros resultantes do ajuste da expressão (111) aos conjuntos de resultados seleccionados.

Como se pode verificar pelos valores do coeficiente de correlação obtido para o ajuste a cada série de resultados, a expressão utilizada reflecte de forma correcta a relação ($I_{h,d}$, *AMDR*) obtida em cada exercício. No entanto, a decisão sobre a curva ideal a utilizar depende muito das condições em que cada exercício se realizou e a generalização não é simples.

A partir desta análise foi escolhida a curva de ajuste à série "SCF1-SCF5" para a discussão subsequente, por não ser afectada por tantos factores variáveis como o aju-

ste às séries "SG1-SG10" e "IH1-IH14_sim_Ai", reflectindo apesar de tudo com bastante aproximação esses resultados.

O ajuste às séries resultantes de ensaios serve essencialmente para concluir que o nível de incerteza provocado pela simplificação "mistura perfeita do ar" atingiu 16 % *AMDR*.

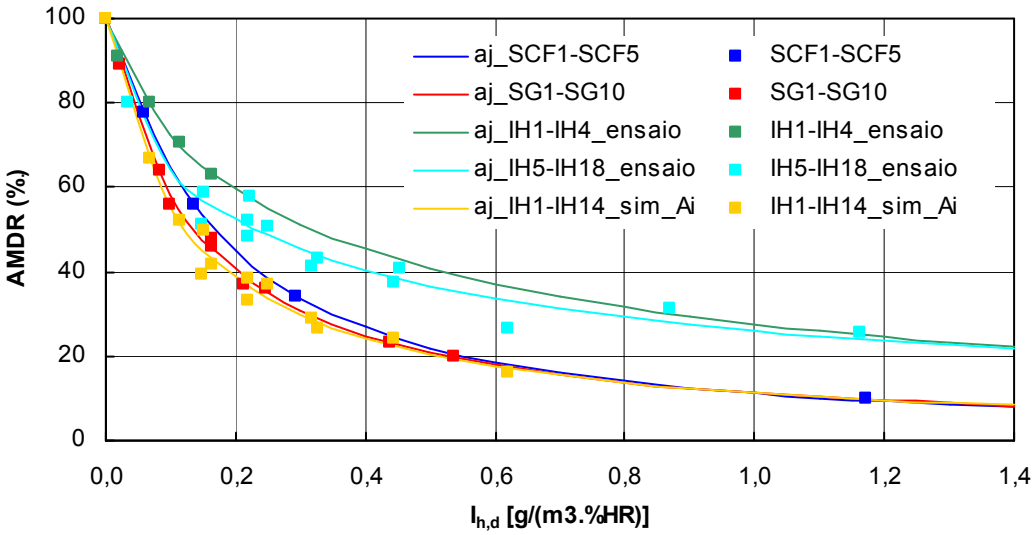


Figura 146– Gráfico obtido para a representação da relação ($I_{h,d}$, *AMDR*) e das curvas ajustadas dos conjuntos de resultados seleccionados

Tabela 45– Parâmetros das curvas de ajuste

Série	a	b	c	Coeficiente de correlação
SCF1-SCF5	0,00998	0,0793	1,16	0,9999
SG1-SG10	0,00996	0,0785	1,04	0,9983
IH1-IH4 (ensaio)	0,01003	0,0262	0,849	0,9988
IH5-IH18 (ensaio)	0,00998	0,0282	0,704	0,9832
IH1-IH14 (sim_Ai)	0,00998	0,0777	0,986	0,9908

6.5.4 Classes de inércia higroscópica diária

A estratégia de avaliação apresentada nas subsecções anteriores permite uma abordagem simples do conceito de inércia higroscópica diária, baseada num sistema de classes a que correspondem níveis potenciais de amortecimento da variação da humidade relativa interior. Com recurso à curva de relação ($I_{h,d}$, $AMDR$), seleccionada na subsecção anterior, à qual corresponde a expressão seguinte, traçou-se o gráfico da Figura 147, onde se propõe uma divisão em quatro classes. A delimitação dessas classes apresenta-se na Tabela 46.

$$AMDR = \frac{1}{0{,}00998 + 0{,}0793 \cdot I_{h,d}^{1{,}16}}\,\% \tag{112}$$

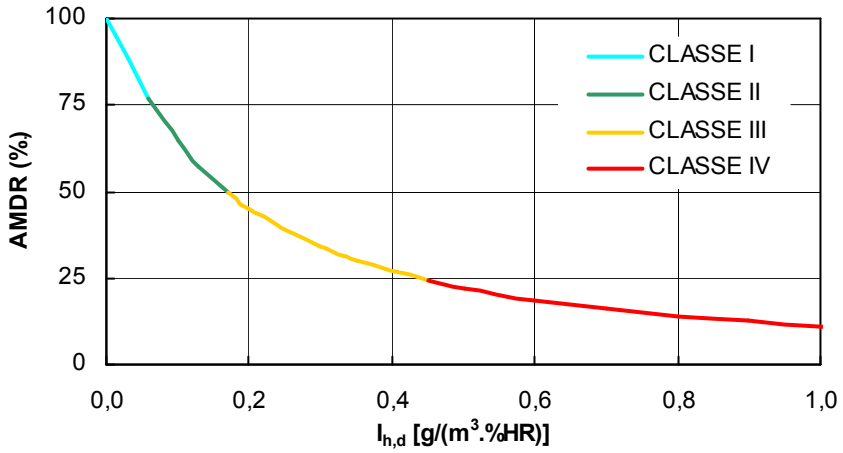


Figura 147 – Gráfico da relação ($I_{h,d}$, $AMDR$) com delimitação das classes de inércia higroscópica diária propostas

Tabela 46 – Classes de inércia higroscópica diária

CLASSE I	$0 \leq I_{h,d} < 0{,}06$	$100\% \geq AMDR > \sim 75\%$
CLASSE II	$0{,}06 \leq I_{h,d} < 0{,}17$	$\sim 75\% \geq AMDR > \sim 50\%$
CLASSE III	$0{,}17 \leq I_{h,d} < 0{,}45$	$\sim 50\% \geq AMDR > \sim 25\%$
CLASSE IV	$0{,}45 \leq I_{h,d}$	$\sim 25\% \geq AMDR$

A possibilidade de classificar um compartimento quanto à sua inércia higroscópica diária, de uma forma simples, oferece diversas vantagens. Uma delas consiste na possibilidade de definir, de forma exigencial, os revestimentos interiores de um determinado compartimento, fixando uma classe mínima de inércia higroscópica diária para esse compartimento.

Em relação com esta questão é também possível rever a classificação dos elementos de revestimento com base no seu MBV, referida na Figura 67. Sugere-se uma determinação de intervalos de MBV com base no valor resultante de $I_{h,d}$ da aplicação do revestimento correspondente em paredes e tectos de um compartimento de referência.

Tomando para esse compartimento a relação entre o seu volume e a área de aplicação de revestimentos de paredes e tectos de 0,7, um caudal de ventilação correspondente a uma renovação horária e um período de produção de vapor de 8 horas, obtém-se a classificação de elementos ilustrada pela Figura 148. Para MBV inferior a 0,34 g/(m^2·%HR) a capacidade de armazenamento é limitada, no intervalo 0,34 – 0,95 g/(m^2·%HR) a capacidade é moderada, no intervalo 0,95 – 2,5 g/(m^2·%HR) a capacidade é boa e acima de 2,5 g/(m^2·%HR) a capacidade é excelente.

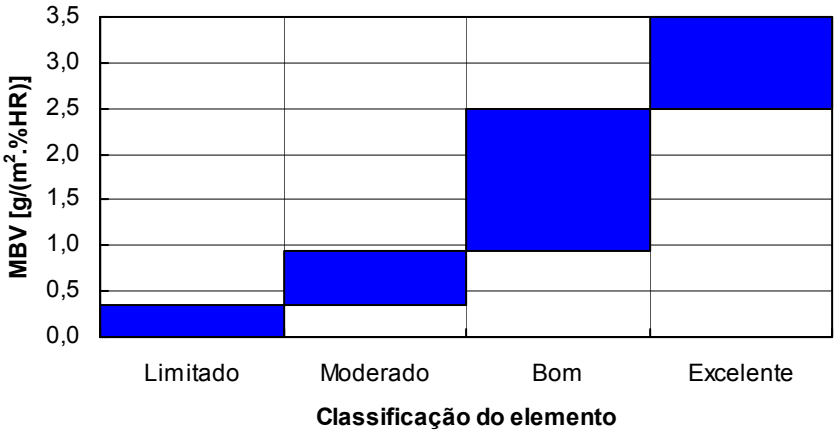


Figura 148 – Nova classificação de elementos quanto à sua capacidade de armazenamento de humidade com base em ensaios MBV

A aplicação das classes de inércia higroscópica, a qualquer tipo de previsão da humidade relativa interior, deverá ter sempre em conta o afastamento do comportamento do ar de um compartimento face a modelos que consideram uma mistura perfeita do ar.

Na prática, essa ponderação pode ser efectuada através de uma nova variante da definição de $I_{h,d}$, de acordo com a expressão seguinte, onde os coeficientes de redução C_r assumem valores inferiores a 1. Note-se que a aplicação deste raciocínio aos

resultados obtidos na câmara de fluxo implicaria a utilização de coeficientes C_r com um valor de aproximadamente 0,5.

$$I_{h,d} = \frac{\sum_{i}^{n} C_{r,i} \cdot MBV_i \cdot S_i + \sum_{j}^{m} C_{r,j} \cdot MBV_{obj,j}}{N \cdot V \cdot TG} \rightarrow \left[\frac{g}{m^3 \cdot \%HR} \right] \tag{113}$$

6.6 Síntese Crítica do Capítulo 6

O Capítulo 6 sintetiza grande parte da informação produzida nos capítulos anteriores e, em conjunto com a análise realizada com base em simulações numéricas, desenvolve-se um conjunto de considerações que permitem avaliar o impacto da inércia higroscópica na variação da humidade relativa interior.

O trabalho de simulação numérica visou, numa fase inicial, a avaliação da capacidade do programa HAM-Tools para simular correctamente a variação de massa de elementos de revestimento. Essa avaliação foi positiva quando conjugada com uma interpretação adequada dos resultados obtidos para as propriedades dos materiais testados.

A análise do comportamento de elementos homogéneos revelou o papel preponderante desempenhado pelas curvas higroscópicas dos materiais. A selecção de uma curva higroscópica única para um material, que evidencie histerese, deve ser calibrada por comparação de simulações com ensaios representativos do comportamento que se pretende analisar. A utilização de dados provenientes da literatura deve ser cuidadosa.

A simulação de elementos compostos por um material de base e um esquema de pintura exigiu considerações adicionais que permitiram obter uma boa concordância com os resultados dos ensaios de comparação.

O trabalho inicial deste capítulo permitiu, assim, obter um modelo de simulação dos elementos higroscópicos e uma base de dados fiável para os elementos em estudo e para as conclusões pretendidas.

A simulação numérica dos ensaios realizados na câmara de fluxo revelou uma influência determinante da simplificação que admite uma mistura perfeita do ar de

um compartimento, na avaliação da influência da inércia higroscópica. No entanto, foi possível contornar numericamente este problema, de uma forma coerente para este conjunto de simulações, e obter uma boa aproximação aos resultados dos ensaios.

A análise do comportamento higrotérmico de um quarto virtual, com base numa quantidade elevada de simulações numéricas relativas ao seu ciclo anual, permitiu avaliar a influência de diferentes parâmetros na variação da humidade relativa interior. A temperatura exterior, a humidade relativa exterior, a produção de vapor, a ventilação, a temperatura mínima interior e os ganhos solares formam o grupo de parâmetros cujo efeito da variação foi analisado em conjugação com diferentes níveis de inércia higroscópica interior.

A adopção de indicadores numéricos de base estatística permitiu estabelecer comparações entre as várias simulações realizadas. Entre as várias conclusões, retiradas da análise de sensibilidade realizada, destaca-se que o efeito da inércia higroscópica é benéfico para o comportamento higrotérmico dos edifícios. Note-se, no entanto, que esta afirmação deve ser avaliada para estratégias de ventilação diferentes da adopção de caudais tendencialmente constantes

A proposta de uma estratégia de avaliação da relação entre a inércia higroscópica diária e a variação da humidade relativa interior permitiu desenvolver um sistema de classificação de compartimentos. Esse sistema apoia-se na relação empírica entre os parâmetros $I_{h,d}$ e *AMDR* encontrada. Esta relação permite uma percepção imediata do impacto dos revestimentos interiores na variação da humidade relativa interior.

Capítulo 7
Conclusões

7.1 Conclusões Principais

O trabalho desenvolvido nesta Tese confirmou as hipóteses definidas inicialmente. A inércia higroscópica existe, é relevante para o comportamento higrotérmico dos edifícios e pode ser expressa por uma metodologia simples e com aplicabilidade prática.

A demonstração dessas hipóteses não esgotou os benefícios do trabalho realizado. Os objectivos parciais, estabelecidos no início deste texto, foram sucessivamente alcançados, podendo extrair-se desse percurso algumas das principais conclusões desta Tese.

A elaboração do estado da arte sobre a humidade nas construções e o clima interior permitiu estabelecer o seguinte:

— É possível encontrar, na Física das Construções, formulações matemáticas que permitem estudar a transferência conjunta de calor, ar e humidade em meios porosos;

— A tendência actual, para a definição do fluxo de humidade num meio poroso, aponta para a utilização de uma formulação onde o fluxo de vapor e o fluxo de água líquida são avaliados separadamente, apesar de fisicamente essa separação não ser real;

— A humidade relativa do ar interior pode afectar significativamente o conforto térmico, a percepção da qualidade do ar, a saúde dos utilizadores, a durabilidade dos materiais de construção e o consumo de energia dos edifícios;

— A definição de limites ideais para a humidade relativa interior é complexa, tendo em conta não apenas as implicações desses limites para as várias exigências dos utilizadores, mas também o seu próprio regime,

permanente ou variável, que pode implicar diferenças nos limites admissíveis;

- Em regime permanente é possível estabelecer como limite inferior 30 % HR e 50 % a 60 % para o limite superior;
- Em regime variável o estabelecimento de limites torna-se mais complexo, sendo necessário avaliar, para situações concretas, as implicações da adopção desses limites;
- O conceito de *time-of-wettness*, *TOW*, pode ser útil para o estudo desses limites, associando a variação de humidade relativa ao risco de desenvolvimento de fungos em elementos construtivos;
- A influência dos materiais porosos na variação da humidade relativa interior tem sido estudada por diversos investigadores;
- Foi demonstrado que a inércia higroscópica tem um efeito de curto prazo de amortecimento das variações diárias da pressão de vapor interior;
- Foi também demonstrado que, a inércia higroscópica, pode ter um efeito de longo prazo, traduzido por alterações de médias mensais nos meses de início e fim de ciclos sazonais de variação da humidade relativa;
- A média de longo prazo da humidade relativa interior não é alterada pela inércia higroscópica.

A selecção de um programa de cálculo adequado à análise do comportamento higrotérmico de edifícios, e sua subsequente avaliação, levou às seguintes conclusões:

- O programa HAM-Tools foi seleccionado como ferramenta de simulação deste trabalho devido à sua adequação ao tipo de análise pretendida, à sua fiabilidade, ao acesso ao código fonte e à sua modularidade e flexibilidade;
- Apesar de este modelo permitir um cálculo de fluxos de humidade em meios porosos com separação de componentes vapor e líquida, optou-se por uma simplificação do modelo, efectuando um cálculo global do fluxo com base na lei de Fick e coeficientes de transporte globais coincidentes com os resultados obtidos nos ensaios normalizados de permeabilidade ao vapor;
- Adoptou-se para o coeficiente de transferência de vapor ar-superfície, β_p, relevante para este trabalho, o valor de referência $2{,}0\times10^{-8}$ s/m;

— Os dados climáticos relevantes para as simulações realizadas, nomeadamente, temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho, radiação global em superfície horizontal, radiação difusa em superfície horizontal, radiação directa em superfície normal e radiação incidente de grande comprimento de onda, foram determinados para Lisboa e Porto através do programa METEONORM.

A determinação laboratorial da curva higroscópica de três materiais de revestimento interior à base de gesso e da permeabilidade ao vapor desses materiais, com diferentes esquemas de pintura aplicados na sua superfície, levou aos seguintes resultados:

— A determinação das curvas higroscópicas, de tipos específicos de gesso cartonado, gesso projectado e reboco de gesso e cal, foi efectuada de acordo com a norma ISO 12571:2000, com sucesso;

— A determinação da permeabilidade ao vapor dos três materiais referidos e desses materiais pintados com esquemas de pintura normalmente usados em acabamentos interiores foi bem sucedido, seguindo a norma EN ISO 12572:2001;

— Os resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor foram tratados matematicamente, obtendo-se a variação das propriedades de transmissão ao vapor dos materiais base e das pinturas em função da humidade relativa;

— A resistência ao vapor das pinturas varia fortemente com a humidade relativa. Esquemas de pintura idênticos, aplicados sobre materiais base diferentes, apresentam valores da resistência ao vapor diferentes. A aplicação de um primário antes das pinturas de acabamento implica uma resistência ao vapor bastante elevada;

— A aplicação de pinturas comuns em Portugal, acrílicas ou vinílicas, sobre primário, corresponderam a valores de s_d máximos de cerca de 0,6 m, que equivalem ao efeito de um coeficiente β_p ar-superfície do material base da ordem de $2{,}0\times10^{-10}$ s/m.

A análise laboratorial da capacidade de armazenamento de humidade em regime dinâmico suportou as seguintes observações:

— O parâmetro *MBV*, *Moisture Buffer Value*, definido em ensaios laboratoriais, permite a comparação de elementos de construção quanto à sua capacidade de armazenamento de humidade em regime dinâmico;
— Os ensaios *MBV* permitem comparações do desempenho de revestimentos. Refere-se, como exemplo, a variação observada em revestimentos à base de gesso cartonado onde, sem pintura, se obteve valores da ordem de 0,75 g/(m^2·%HR), contra valores da ordem de 0,30 g/(m^2·%HR) após aplicação de primário e acabamento acrílico ou vinílico.

O desenvolvimento de um dispositivo experimental para avaliação do efeito da inércia higroscópica, que permite replicar vários aspectos do comportamento higrotérmico de um compartimento, apresentou os seguintes resultados:

— A câmara de fluxo, com um volume de 0,459 m^3, construída no interior de uma câmara climática existente, permite o controlo da temperatura entre 15 ºC e 35 ºC, da taxa de renovação horária entre 0,26 h^{-1} e 17 h^{-1} e da produção de vapor entre 0,24 g/h e 22,2 g/h;
— Esta infra-estrutura apresenta como vantagens: uma configuração de ensaios muito variada, uma elevada capacidade de controlo dos parâmetros de ensaio, a garantia de repetição das condições de ensaio pretendidas até à obtenção de ciclos estáveis e a facilidade de montagem dos ensaios;
— Foi detectada uma importante estratificação da pressão de vapor em determinados momentos do ciclo diário de variação da humidade.

A medição experimental da variação da humidade relativa interior, no dispositivo de ensaio desenvolvido, evidenciou os seguintes pontos:

— A variação da humidade relativa interior, para ciclos diários com condições higrotérmicas idênticas, é afectada pela variação do nível de inércia higroscópica interior. O aumento de área de um determinado material colocado no interior da câmara implicou sempre um amortecimento dessa variação;
— A utilização da diferença entre a média e o percentil 90, $HR_{90} - HR_m$, de cada variação diária, permitiu comparar com facilidade esse amortecimento. A título de exemplo, a comparação dos valores encontrados num ciclo com gesso cartonado sem pintura e com a mesma área de gesso car-

tonado pintado com primário e tinta vinílica produziu valores de $HR_{90} - HR_m$ de 10,1 % HR e 13,7 % HR, respectivamente.

A validação do modelo de cálculo adoptado, utilizando as propriedades determinadas para os materiais, recorrendo aos ensaios dinâmicos de avaliação da capacidade de armazenamento de humidade e aos ensaios de avaliação do efeito da inércia higroscópica, permitiu concluir o seguinte:

— A simulação numérica dos ensaios dinâmicos de avaliação da capacidade de armazenamento de humidade de elementos evidenciou um bom desempenho do programa HAM-Tools;

— A obtenção de um bom ajuste entre os ciclos numéricos e experimentais obrigou a uma interpretação cuidadosa das propriedades medidas em ensaios, conduzindo à adopção de curvas higroscópicas de transição em alternativa à curva de adsorção e à consideração do efeito da histerese, para justificar a redução da resistência superficial de algumas pinturas;

— A simulação numérica dos ensaios na câmara de fluxo evidenciou dificuldades na reprodução exacta dos valores obtidos em laboratório. Concluiu-se que a simplificação que admite uma mistura perfeita do ar de um compartimento sobrestima a contribuição das trocas entre os materiais e o ar, para o balanço de humidade de um compartimento.

A simulação numérica do comportamento higrotérmico de um compartimento realçou os pontos seguintes:

— O programa HAM-Tools suporta simulações globais de compartimentos com composições complexas, expostos a condições climáticas realistas, fornecendo como resultados a temperatura do ar, a humidade relativa do ar e os perfis de temperatura e humidade dos elementos construtivos, ao longo do tempo, correspondentes ao ciclo anual estável;

— As médias de longo prazo da humidade relativa e pressão de vapor não foram afectadas pela variação da inércia higroscópica do compartimento, apenas os valores de pico dos ciclos diários são sensíveis a essa influência;

— A análise dos resultados beneficiou com a definição de parâmetros numéricos, baseados em descritores estatísticos das variações observadas;

— O parâmetro *AMDR*, representativo da amplitude média diária relativa da variação de HR, permitiu quantificar o amortecimento produzido pelos revestimentos interiores em diferentes cenários higrotérmicos;
— A determinação de parâmetros associados ao risco de desenvolvimento de fungos identificou um efeito benéfico da inércia higroscópica, em linha com o efeito de amortecimento dos picos diários de humidade relativa;
— Um controlo adequado da temperatura interior, da ventilação e da temperatura superficial da envolvente, é o passo decisivo para evitar o desenvolvimento de fungos. A inércia higroscópica será sempre um complemento a esse primeiro esforço;

A construção da metodologia de aplicação prática do conceito de inércia higroscópica conduziu a um avanço do conhecimento e a uma proposta de utilização simples e universal, que pode sintetizar-se da seguinte forma:

— Definiu-se o índice de inércia higroscópica diária, $I_{h,d}$, a partir do *MBV* dos revestimentos interiores, da superfície que ocupam, do caudal de ventilação e da duração do período de produção de vapor,
— O ajuste de uma curva matemática aos pontos ($I_{h,d}$, *AMDR*), obtidos em ensaios e simulações realizados nesta Tese, revelou um bom coeficiente de correlação, evidenciando a validade desta estratégia;
— A partir da curva matemática seleccionada para ($I_{h,d}$, *AMDR*) foi possível definir quatro classes de inércia higroscópica diária, que permitem uma análise simples, mas sustentada, dos revestimentos a adoptar em edifícios.

7.2 Desenvolvimentos Futuros

Os resultados obtidos nesta Tese permitem estabelecer diferentes vias para a continuidade do trabalho desenvolvido:

— Estudo laboratorial de materiais diferentes, procurando a definição de revestimentos que podem ser uma mais valia para o condicionamento do ambiente interior;
— Estudo do efeito do mobiliário e têxteis;
— Criação de uma base de dados de MBV para diferentes elementos;

— Extensão da metodologia de aplicação da inércia higroscópica diária à inércia higroscópica sazonal;
— Desenvolvimento de um programa de cálculo de utilização amigável;
— Desenvolvimento de módulos adicionais que ampliem as capacidades de análise do programa HAM-Tools;
— Realização de uma campanha de medição das condições higrotérmicas interiores numa amostra significativa de edifícios portugueses, utilizando os dispositivos de medição de temperatura e humidade relativa mais recentes, fiáveis e economicamente acessíveis;
— Validação da modelação higrotérmica a partir das medidas em edifícios reais;
— Desenvolvimento de uma metodologia de análise de risco associado à humidade em edifícios;
— Avaliação de distribuições estatísticas dos parâmetros que condicionam a variação da humidade em edifícios, para suporte de análises de risco.

Bibliografia

ADAN, O. (1994) On the fungal defacement of interior finishes, PhD Thesis, Eindhoven University of Technology.

ANSI/ASHRAE (1992) ANSI/ASHRAE-55: Thermal environmental conditions for human occupancy, Atlanta, ASHRAE.

ANSI/ASHRAE (2004) ANSI/ASHRAE-62: Ventilation for acceptable indoor air quality.

AOKI-KRAMER, M., KARAGIOZIS, A. (2004) A new look at residential interior environmental loads, Buildings IX - Performance of exterior envelopes of whole buildings, Clearwater, Florida, USA.

ARLIAN, L., NEAL, J., MORGAN, M., (2001) Reducing relative humidity is a practical way to control dust mites and their allergens in homes in temperate climates, The journal of allergy and clinical immunology, 107, pg 99-104.

ASHRAE (1997) Fundamentals handbook, Atlanta, ASHRAE.

BONNEAU, D., RONGÈRE, F., COVALET, D., GAUTHIER, B. (1993) CLIM2000: modular software for energy simulation in buildings, IBPSA 93, Adelaide, Australia.

BORNEHAG, C.-G. BLOMQUIST, G., GYNTELBERG, F. (2001) Dampness in buildings and health - Nordic inter-disciplinary review of the scientific evi-dence on associations between expo-sure to "dampness" in buildings and health effects (NORDDAMP), Indoor Air, 11, 72-86.

BRE (1993) BREEZE 6.0d user manual, Building Reserach Establishment.

BSI (1991) BS5925: Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation. London, BRITISH STANDARDS INSTITUTION.

BURCH, D., DESJARLAIS, A. (1995) Water-vapour measurements of low-slope roofing materials, NISTIR 5681, Oak Ridge, Tennessee, Oak Ridge Natinal Laboratory.

BURCH, D., THOMAS, W., FANNEY, A. (1992) Water vapour permeabil-ity measurements of common building materials, ASHRAE Transactions, 98 (Part 2), 486-94.

CEN (2001a) EN ISO 12572: Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties.

CEN (2001b) EN ISO 13788: Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface hu-midity and interstitial condensation - Calculation methods.

CEN (2004) prEN 15026: Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements - Assessment of Moisture Transfer by Numerical Simulation. Draft.

CEN (2005) prEN ISO 15927-4: Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data forassessing the annual energy use for heating and cooling.

CONCANNON, P. (2002) Technical note AIVC 57 - Residential ventilation, Brussels, Belgium, AIVC.

CORVACHO, M. (1999) LFC - NIT 003: Catálogo de pontes térmicas, FEUP, Porto, Portugal.

COUASNET, Y. (1989) Contribution à l'Étude du Transfert de Vapeur d'Eau en Régime Permanent et Non Stationnaire dans les Matériaux Poreux Hygroscopiques. Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment, Cahier 2349.

CUNNINGHAM, M. (1996) Controlling dust mites psychrometrically - a review for building scientists and engineers, Indoor Air, 6, 249-258.

DALICIEUX, P., BOIA, H., BONNET, E. (1989) L'humidité relative a l'intérieur d'un logement, Moret-sur-Loing, EDF.

DUFORESTEL, T. (1994) Etude sur la modélisation de l'inertie hygroscopique des locaux, Moret-sur-Loing, CSTB-EDF.

EUROPEAN COMISSION (1994) The PASSYS test cells, a common european outdoor test facility for thermal and solar building research, Commission of the

European Communities Directorate-General XII for Science, Research and Development.

FANG, L., CLAUSEN, G., FANGER, P. (1998) Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality, Indoor Air, 8, 80-90.

FANGER, P. (1970) Thermal Comfort, Danish Technical Press.

FAUCONNIER, R., MARTINON, M., DALICIEUX, P. (1989), Modélisation des échanges d'humidité avec les parois et le mobilier d'une piece d'habitation - Aproche de validation expérimentale, Moret-sur-Loing, EDF.

FAZIO, P., GE, H., RAO, J. (2004) Design of the test setup for validation of whole building HAM simulation models, IEA Annex 41 meeting, Glasgow, UK.

FRANÇA, N. (2002) Humidade superficial crítica - Critérios de projecto para a envolvente dos edifiicos portugueses, Tese de Mestrado, DEC-FEUP, Porto.

FREITAS, V., ABRANTES, V. (1989) Étude expérimentale de l'humidité de l'air dans l'intérieur des bâtiments - Influence du comportement hygroscopique des matériaux, Healthy Buildings '88, Stockholm, Sweden.

FREITAS, V. (1992) Transferência de Humidade em Paredes de Edifícios - Análi-se do Fenómeno de interface, Tese de Doutoramento, DEC-FEUP, Porto, Portugal.

FREITAS, V. P., PINTO, P. (1998) LFC - NIT 002: Permeabilidade ao vapor de materiais de construção - Condensações internas, FEUP, Porto, Portugal.

GALBRAITH, G., KELLY, D., MCLEAN, R. (2003) Alternative methods for measuring moisture transfer coefficients of building materials, Second international building physics conference - research in building physics, Leuven, Belgium.

GALBRAITH, G., KELLY, D., MCLEAN, R., MPHIL, C. (2001) An alternative experimental approach to the measurement of sorption isotherms, CIB W40 Meeting, Wellington, New Zealand.

GALBRAITH, G., MCLEAN, R., GUO, J., KELLY, D., LEE, C. (1999) The use of differential permeability in moisture transport modelling, Proceedings of Building Simulation '99.

GALBRAITH, G., MCLEAN, R., GUO, J. (1998) Moisture permeability data presented as a mathematical relationship, Building Research & Information, 26, 157-168.

GOOSSENS, E. (2003) Moisture transfer properties of coated gypsum. PhD Thesis, Faculty of Arquitecture, Building and Planning, Eindhoven University of Technology.

GREEN, G. (1985) Indoor relative humidities in winter and the related absenteeism, ASHRAE Transactions, 91, 643-653.

HAGENTOFT, C.-E. (2001) Introduction to Building Physics, Studentlitteratur, Lund, Sweden.

HAGENTOFT, C.-E. (2002) HAMSTAD WP2 Modelling, Department of Building Physics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden,

HANNELORE, D. (2006) Role of textiles and paper for stabilizing the indoor environment.MSc Thesis, Katholic University of Leuven, Leuven, Belgium.

HANSEN, K. (1996) Sorption Isotherms - A cathalogue, DTU, Lyngby, Denmark.

HENRIQUES, F. (1994) Humidade em paredes, Colecção edifícios, LNEC, Lisboa, Portugal.

HENS, H. (1991) Modelling: hygric aspects, IEA Annex XIV "Condensation and En-ergy" - Sourcebook.

HENS, H. (1996) IEA ANNEX 24 - Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (Hamtie) - TASK 1: Modelling, Leuven, Laboratorium Bouwfysica, K.U. Leuven, Belgium.

HENS, H. (2005) Impact of hygric inertia on indoor climate: simple models, IEA Annex 41 meeting, Trondheim, Norway.

HENS, H., HUNTER, C., SANDERS, C., LOMBARDI, C., REIB, J., ERHORN, H., STANDAERT, P., OLDENGARM, J., PERNOT, C., WIT, M., RAATSCHEN, W. (1991) Report Annex 14: condensation and energy - Sourcebook.

HOKOI, S. (2005) Simplified method for evaluating moisture buffering effect, IEA Annex 41 meeting, Trondheim, Norway.

HUNTER, C. (1991) Mould, IEA Annex XIV "CONDENSATION AND ENERGY".

INMG/LNEC (1988) Dados climáticos de referência para estudos em edifícios, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica / Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal.

IPQ (2002) NP1037-1: Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás, Parte 1: Edifícios de habitação, Ventilação natural, Instituto Português da Qualidade. Portugal.

ISO (1994) ISO 7730: Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, International Organization for Standards, Geneva, Switzerland.

ISO (2000) ISO 12571: Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

JANSSENS, A. (1996) IEA Annex 14: Catalogue of Material Properties, Upgraded Version, Leuven, K. U. Leuven. Belgium.

JIS (2002) JIS A 1470-1: Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity - Part 1: response method of humidity. Japanese Standards Association. Japan.

JUDKOFF, R., NEYMARK, J. (1995) International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method, NREL, IEA SHC Task12 / IEA ECBCS Annex 21.

KALAGASIDIS, A. S. (2003) Subtask 1, Common exercise 1 - Modeling details and results, IEA Annex 41 working meeting, Glasgow, UK.

KALAGASIDIS, A. S. (2004) HAM-Tools: An Integrated Simulation Tool for Heat, Air and Moisture Transfer Analyses in Building Physics, Department of Building Technology, Building Physics Division, Chalmers University of Technology, Gothemburg, Sweden.

KALAMEES, T., VINHA, J., KURNITSKI, J. (2005) Indoor temperature and humidity load in Finnish detached houses, IEA Annex 41 working meeting, Montreal, Canada.

KALAMEES, T., VINHA, J. (2004) Estonian climate analysis for selecting moisture reference years for hygrothermal calculations, Journal of thermal envelope and building science, 27, 199-220.

KARAGIOSIS, A., SALONVAARA, M., KUMARAN, K. (1994) LATENITE Hygrothermal material property database, Report T3-CA-94/03, IEA Annex 24 working meeting, Trondheim, Norway.

KUMARAN, M. K. (1996) IEA ANNEX 24: Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (Hamtie); Task 3: Material Properties, Laboratorium Bouwfysica, Departement Burgerlijke Bouwkunde, K.U. Leuven, Belgium.

KUNZEL, H., HOLM, A., SEDLBAUER, K. (2004) Experimental investigation of the hygric buffering capacity of wood based interior panelling, IEA Annex 41 working meeting, Zurich, Switzerland.

KUNZEL, H. M. (1993) Appropriate potentials for the calculation of heat, air and moisture flow in building elements, Internal report Annex 24, T1-D-93/01.

KUNZEL, H. M. (1994) Simultaneous heat and moisture transport in building components - One and two dimensional calculation using simple parameters. Stuttgart, Fraunhofer Institute of Building Physics.

LUND, H. (1991) The design refrence year. Building simulation '91. Nice, France.

MANSSON, L.-G. (1995) Evaluation and demonstration of domestic ventilation systems - state of the art, IEA Annex 27. Swedish council for building research.

MATHWORKS (2006) Simulink and Matlab Software packages. www.mathworks.com.

MATSUMOTO, M. (1994) Simultaneous heat and moisture transfer during freezing-melting in building materials, CIB-W40 Sopron meeting.

MEROUANI, L. (1987) Phénomènes de Sorption et de Transfert d'Humidité dans les Matériaux du Bâtiment - Étude Expérimentale Comparative d'un Mortier de Ciment et d'un Enduit de Façade, Institut National Polytechnique de Grenoble.

METEOTEST (2003) METEONORM - Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Climatology, Version 4.0, Switzerland.

MILLET, J., VILLENAVE, J. (2003) Assessment and description of humidity controlled system in french residential buildings. AIVC conference. Washington - USA.

MITAMURA, T., RODE, C. AND SCHULTZ, J. (2001) Full scale testing of indoor humidity and moisture buffering material,. ASHRAE Conference Indoor Air.

/P/ - Leis, decretos, etc. – RSECE (1998): Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios, Decreto-Lei 118/98 de 7 de Maio, Lisboa.

/P/ - Leis, decretos, etc. – RCCTE: Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios, Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril.

PADFIELD, T. (1998) The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity. PhD Thesis, Department of structural engineering and materials, DTU, Lyngby, Denmark.

PADFIELD, T. (1999) Humidity buffering by absorbent materials in walls, http://www.natmus.dk/cons/tp/wallbuff/wallbuff.htm.

PEUHKURI, R. (2003) Moisture dynamics in building envelopes, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, DTU, Lyngby, Denmark.

PHILIP, J. R., DE VRIES D.A. (1957) Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans. Am. Geophysical Union, 38.

PIEDADE, A., RODRIGUES, A. E RORIZ, LUIS (2000) Climatização em edifícios - Envolvente e comportamento térmico, Edições Orion.

PLATHNER, P., LITTLER, J., CRIPPS, A. (1998) Modelling water vapour conditions in dwellings, Third International Symposium on Humidity and Moisture, National Physical Laboratory, London, UK.

PLATHNER, P., WOLOSZYN, M. (2002) Interzonal air and moisture transport in a test house: experiment and modelling, Building and Environment, 37, 189-199.

RAATSCHEN, W., ERHORN, H., HERBAK, Z. (1991) Boundary conditions, IEA Annex XIV "Condensation and Energy" Sourcebook.

REIB, J., ERHORN, H. (1991) Modelling: thermal aspects - convection and radiation, IEA Annex 14 Sourcebook - Condensation and energy.

REICK, M., SETZER, M. (1998) A Combined Diffusion Sorption Model to Describe the Hygroscopic Behavior of Cement Based Plasters, Proceedings 3rd International Bolomey Workshop: Pore Solution in Hardened Cement Paste, Essen, Germany.

RODE, C. (1990) Combined heat and moisture transfer in building constructions, PhD Thesis, Thermal insulation laboratory, DTU, Lyngby, Denmark.

RODE, C., GRAU, K. (2004) Calculation tool for whole building hygrothermal analysis, IEA Annex 41 meeting, Zurich, Switzerland.

RODE, C., MITAMURA, T., SCHULTZ, J., PADFIELD, T. (2002) Test cell measurements of moisture buffer effects, 6th symposium on building physics in the Nordic countries, Trondheim, Norway.

RODE, C., PEUHKURI, R. (2005) Annex 41 - Subtask 1: Summary report for Common Exercise 1, IEA Annex 41 meeting, Montreal, Canada.

RODE, C., PEUHKURI, R., MORTENSEN, L., HANSEN, K., TIME, B., GUSTAVSEN, A., SVENNBERG, K., ARFVIDSSON, J., HARDERUP, L., OJANEN, T. AND AHONNEN, J. (2005) Moisture Buffering of Building Materials, Report BYG-DTU R-126, Department of Civil Engineering, DTU, Lyngby, Denmark.

RODRIGUES, M., PIEDADE, A., AWBI, H. (2001) Modelling water vapour diffusion in dwellings: the bathroom moisture source. CIB W40 Meeting. Wellington, New Zealand.

ROELS, S. (2004) Inter-laboratory comparison on measurement of moisture buffering properties of gypsum board - Instruction document, IEA Annex 41.

ROELS, S., CARMELIET, J. (2005) Water vapour permeability and sorption isotherm of coated gypsum board, Proceedings of the 7th symposium on building physics in the Nordic Countries, The Icelandic Building Research Institute, Reykjavic, Iceland.

ROELS, S., CARMELIET, J., HENS, H. (2003) HAMSTAD - WP1: Final report - Moisture transfer properties and materials characterisation, K. U.Leuven, Belgium.

SALONVAARA, M. (1993) Moisture potentials: numerical analysis of two differential equations, Internal report Annex 24, T1-SF-93/01.

SANDERS, C. (1996) IEA Annex 24 HAMTIE final report - Task 2: environmental conditions.

SEDLBAUER, K. (2001) Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components, PhD Thesis - report, Fraunhofer Institut for Building Physics, Germany.

SEPPANNEN, O., FISK, W. AND MENDELL, M. (1999) Association of ventilation rates and CO2 concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings, Indoor Air, 9, 226-252.

SIMONSON, C., SALONVAARA, M., OJANEN, T. (2002) The effect of structures on indoor humidity - possibility to improve comfort and perceived air quality, Indoor Air, 12, 243-251.

SIMONSON, C., SALONVAARA, M., OJANEN, T. (2004a) Heat and mass transfer between indoor air and a permeable and hygroscopic building envelope: Part I - field measurements, Jounal of thermal envelope and building science, 28, 63-101.

SIMONSON, C., SALONVAARA, M., OJANEN, T. (2004b) Heat and mass transfer between indoor air and a permeable and hygroscopic building envelope: Part II - verification and numerical studies, Jounal of thermal envelope and building science, 28, 161-185.

SIMONSON, C. J. (2000) Moisture, thermal and ventilation performance of Tapanila ecological house, IN VTT (Ed.) VTT Research notes, VTT, Espoo, Finland.

SIMONSON, C. J., SALONVAARA, M. AND OJANEN, T. (2001) Improving indoor climate and comfort with wooden structures, VTT Publications, Espoo, Finland.

STEEMAN, H., JANSSENS, A., PAEPE, M. (2005) How accurate are traditional models for air-moisture transport in a room: a comparison of CFD and lumped models, IEA Annex 41 meeting, Montreal, Canada.

STEEMAN, H., JANSSENS, A., PAEPE, M. (2006) 3D CFD analysis on the validity of the "well mixed air" assumption made in traditional HAM models, IEA Annex 41 meeting. Kyoto, Japan.

SVENNBERG, K. (2006) Moisture buffering in the indoor environment, PhD, Building Physics Department, Lund University, Sweden.

SVENNBERG, K., WADSO, L. (2003) A Modified Cup-method for Lightweight and Highly Permeable Materials, IN CARMELIET, H. V. (Ed.) 2nd International Building Physics Conference, Swets & Zeitlinger, Leuven, Belgium.

SVENNBERG, K., WADSO, L. (2005) House dust mites in beds and bedrooms - a literature survey, The house dust mite project, Lund University, Sweden.

TALUKDAR, P., OSANYINTOLA, O., SIMONSON, C. (2004) Experimental and numerical studies of transient heat and moisture transfer within spruce plywood, IEA Annex 41 meeting, Trondheim, Norway.

TIME, B. (1998) Hygroscopic Moisture Transport in Wood. Department of Building and Construction Engineering, Trondheim, NTNU.

TIME, B. (2002) Studies on hygroscopic moisture transport in Norway spruce (Picea abies), Part 1:Sorption measurements of spruce exposed to cyclic step changes in relative humidity, Holz als Roh und Werkstoff, 60, 271-276.

TOFTUM, J., JORGENSEN, A., FANGER, P. (1998a) Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin, Energy and Buildings, 28, 1-13.

TOFTUM, J., JORGENSEN, A., FANGER, P.O. (1998b) Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort, Energy and Buildings, 28, 15-23.

VAN DER LAAN, M. J. (1992) Moisture transfer in capillary porous media: choosing the driving potentials, Internal report Annex 24, T1-D-93/01.

VAN DER WEL, G., ADAN, O. (1999) Moisture in organic coatings - a review, Progress in Organic Coatings, 37, 1-14.

VEIGA, R. (2003) Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos, Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes, Actas do 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, , LNEC, Lisboa, Portugal.

VEIGA, R., TAVARES, M. (2002) Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura, Actas do Encontro "A indústria das tintas no início do século XXI", APTETI, Lisboa, Portugal.

WARGOCKI, P., WYON, D., BAIK, Y., CLAUSEN, G. AND FANGER, P. (1999) Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Porductivity in an Office with Two Different Pollution Loads, Indoor Air, 9, 165-179.

WILKES, K., ATCHLEY, J., CHILDS, P. (2004) Effect of Drying Protocols on Measurement of Sorption Isotherms of Gypsum Building Materials, Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference, Clearwater, USA.

WIT, M. H. D. (2004) WaVo - A model for the simulation of the thermal and hygric performance of building and systems, Eindhoven, Netherlands.

WOLOSZYN, M. (1999) Modelisation Hygro-Thermo-Aeraulique des batiments multizones. Ecole Doctorale: Génie Civi,. INSA Lyon, France.

WORCH, A. (2004) The behaviour of vapour transfer on building material surfaces: the vapour transfer resistance, Journal of thermal envelope and building science, 28, 187-200.

YOSHINO, H., MITAMURA, T., HASEGAWA, K., MATSUMOTO, S., ADACHI, M. (2005) Experiment for synthetic evaluation of moisture buffering effect in a room, IEA Annex 41 meeting, Trondheim, Norway.

Anexos

Anexo A Fichas de Ensaio de Determinação da Curva Higroscópica

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_CH1

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação da Curva Higroscópica de Gesso Cartonado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12571 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination hygroscopic sorption properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Placas de gesso cartonado

Método de Preparação dos Provetes:

Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente;

Dimensões dos Provetes: (0,06X0,06X0,0125) m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 730 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC ≤ T ≤ 180 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 10 % ≤ HR ≤ 98 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Dissecadores de vidro

Balança:

- Marca/Modelo: KERN 824
- Precisão: 0,001 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 08-06-2005 – 18-05-2006

Secagem dos provetes:

Estabilização dos provetes, a uma temperatura de 23 ± 0,5 ºC, em dissecador contendo Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$), previamente seco a 200-220 ºC.

Procedimento de ensaio:

Curva de Adsorção:

- Estabilização de grupos de cinco provetes, previamente secos, em quatro ambiências de humidade relativa diferente, compreendida entre 33 % e 95 %.

Curva de Desadsorção e Curvas de Transição:

- Estabilização sucessiva de cada grupo de cinco provetes nas ambiências de humidade relativa inferior à estabelecida no processo de definição da curva de adsorção.

Condições do Ensaio:

Temperatura: 23 ± 0,5 ºC

Humidade Relativa:

HR	33 %	50 %	77 %	84 %	91 %
Sol. salina	Cam. Clim.	Cam. Clim.	NH_4Cl	KCl	KNO_3

RESULTADOS

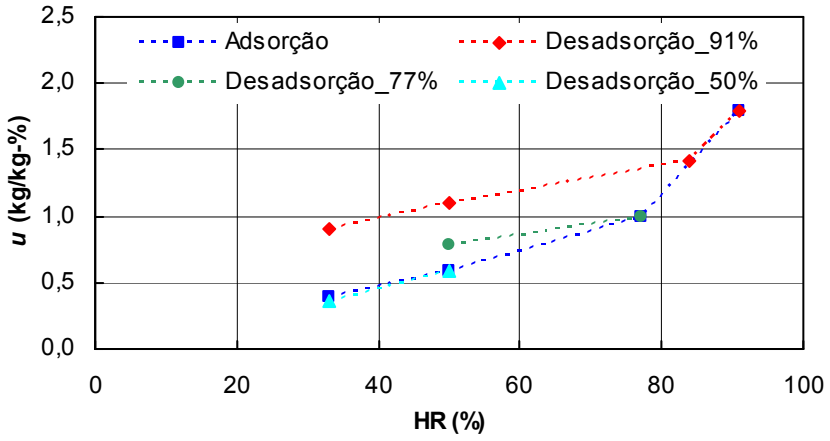
Massa em equilíbrio – m_w (g)

	HR adsorção (%)					HR desadsorção (%)		
Provete	0	33	50	77	91	84	50	33
1	33,808	33,992			34,414	34,295	34,181	34,118
2	33,709	33,887			34,336	34,230	34,116	34,055
3	33,159	33,251			33,823	33,700	33,598	33,535
4	31,715	31,819			32,247	32,107	31,994	31,935
5	33,616	33,712			34,175	34,040	33,938	33,874
6	33,162		33,367					33,253
7	32,651		32,840					32,745
8	34,031		34,221					34,181
9	32,214		32,403					32,372
10	34,547		34,740					34,645
11	*							
12	*							
13	*							
14	*							
15	*							
16	33,218			33,548			33,471	
17	34,207			34,627			34,475	
18	32,953			33,273			33,240	
19	32,857			33,188			33,083	
20	33,969			34,225			34,233	

Teor de humidade em equilíbrio – $u = \dfrac{m_w - m_0}{m_0}$ (kg/kg)

HR	Adsorção	Desadsorção 50 %	Desadsorção 77 %	Desadsorção 91 %
33 %	0,39 %	0,36 %		0,91 %
50 %	0,58 %	0,58 %	0,78 %	1,09 %
77 %	0,99 %		0,99 %	
84 %				1,42 %
91 %	1,80 %			1,80 %

Gráfico da Curva Higroscópica



* - Provetes destruídos durante a realização dos ensaios

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_CH2

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação da Curva Higroscópica de Gesso Projectado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12571 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination hygroscopic sorption properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de reboco de gesso projectado

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento.

Dimensões dos Provetes: (0,06X0,06X0,007) m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 1200 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % – flutuação no tempo < ± 3%

Dissecadores de vidro

Balança:

- Marca/Modelo: KERN 824
- Precisão: 0,001 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 29-08-2005 – 18-05-2006

Secagem dos provetes:

Estabilização dos provetes, a uma temperatura de 23 ± 0,5 ºC, em dissecador contendo Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$), previamente seco a 200-220 ºC.

Procedimento de ensaio:

Curva de Adsorção:

- Estabilização de grupos de cinco provetes, previamente secos, em quatro ambiências de humidade relativa diferente, compreendida entre 33 % e 95 %.

Curva de Desadsorção e Curvas de Transição:

- Estabilização sucessiva de cada grupo de cinco provetes nas ambiências de humidade relativa inferior à estabelecida no processo de definição da curva de adsorção.

Condições do Ensaio:

Temperatura: 23 ± 0,5 ºC

Humidade Relativa:

HR	33 %	50 %	84 %	91 %
Sol. salina	Cam. Clim.	Cam. Clim.	KCl	KNO_3

RESULTADOS

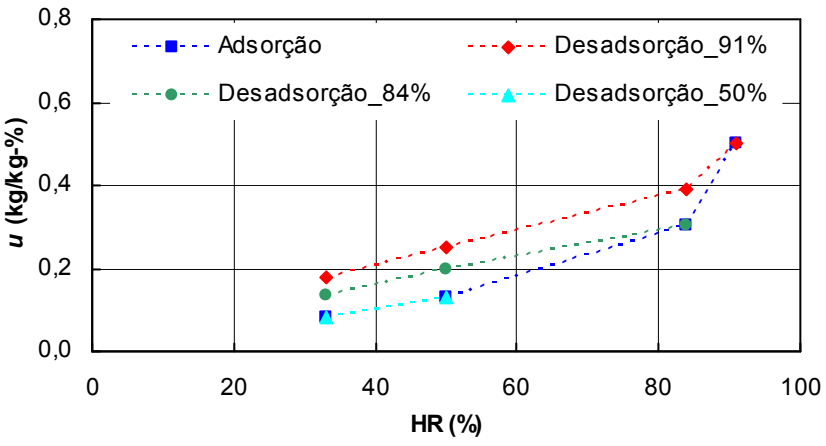
Massa em equilíbrio – m_w (g)

	HR adsorção (%)					HR desadsorção (%)		
Provete	0	33	50	84	91	84	50	33
1	29,458	29,472						
2	31,693	31,724						
3	30,811	30,836						
4	30,702	30,729						
5	30,003	30,028						
6	30,506		30,540					30,527
7	30,705		30,757					30,742
8	29,62		29,663					29,64
9	29,697		29,729					29,717
10	29,516		29,550					29,542
11	28,778			28,868			28,830	28,814
12	31,170			31,264			31,236	31,216
13	30,152			30,253			30,224	30,202
14	30,833			30,920			30,885	30,869
15	30,018			30,105			30,071	30,055
16	29,778				29,940	29,891	29,848	29,827
17	31,735				31,900	31,868	31,827	31,779
18	28,076				28,216	28,179	28,146	28,125
19	30,703				30,841	30,818	30,776	30,754
20	30,257				30,410	30,378	30,333	30,310

Teor de humidade em equilíbrio – $u = \dfrac{m_w - m_0}{m_0}$ (kg/kg)

HR	Adsorção	Desadsorção 50 %	Desadsorção 84 %	Desadsorção 91 %
33 %	0,08 %	0,08 %	0,14 %	0,18 %
50 %	0,13 %	0,13 %	0,20 %	0,25 %
84 %	0,30 %		0,30 %	0,39 %
91 %	0,50 %			0,50 %

Gráfico da Curva Higroscópica



FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_CH3

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação da Curva Higroscópica de Reboco de Gesso e Cal

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12571 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination hygroscopic sorption properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de reboco de gesso e cal

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento.

Dimensões dos Provetes: (0,06X0,06X0,0065) m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 900 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % – flutuação no tempo < ± 3%

Dissecadores de vidro

Balança:

- Marca/Modelo: KERN 824
- Precisão: 0,001 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 04-11-2005 – 15-12-2006

Secagem dos provetes:

Estabilização dos provetes, a uma temperatura de 23 ± 0,5 ºC, em dissecador contendo Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$), previamente seco a 200-220 ºC.

Procedimento de ensaio:

Curva de Adsorção:

Estabilização de um grupo de dez provetes, em quatro ambiências de humidade relativa diferente, compreendida entre 33 % e 91 %.
Todos os provetes são colocados sucessivamente em cada uma das ambiências até se atingir o equilíbrio. Todos os provetes foram colocados previamente em equilíbrio com a ambiência de 91 % e depois secos novamente na ambiência condicionada por $CaCl_2$.

Condições do Ensaio:

Temperatura: 23 ± 0,5 ºC

Humidade Relativa:

HR	33 %	50 %	75 %	91 %
Sol. salina	Cam. Clim.	Cam. Clim.	Cam. Clim.	Cam. Clim.

RESULTADOS

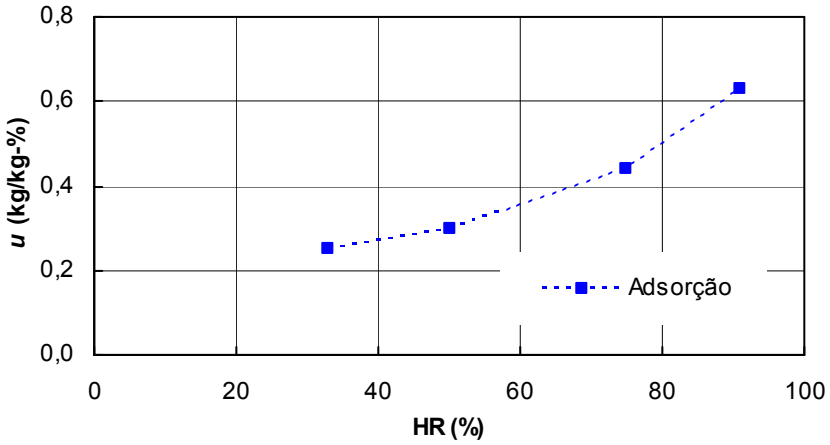
Massa em equilíbrio – m_w (g)

	HR adsorção (%)				
Provete	0	33	50	75	91
1	21,186	21,235	21,246	21,277	21,311
2	22,468	22,526	22,537	22,567	22,615
3	20,485	20,530	20,546	20,573	20,611
4	20,962	21,017	21,022	21,060	21,097
5	20,897	20,95	20,968	20,987	21,036
6	21,803	21,864	21,877	21,907	21,936
7	18,968	19,003	19,034	19,057	19,097
8	20,311	20,361	20,379	20,399	20,438
9	20,836	20,896	20,910	20,931	20,964
10	21,706	21,765	21,729	21,788	21,836

Teor de humidade em equilíbrio – $u = \frac{m_w - m_0}{m_0}$ (kg/kg)

HR	Adsorção			
33 %	0,25 %			
50 %	0,30 %			
75 %	0,44 %			
91 %	0,63 %			

Gráfico da Curva Higroscópica



Anexo B Fichas de Ensaios de Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV1	**GC_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

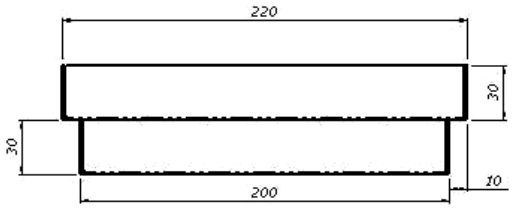
Câmara climática:

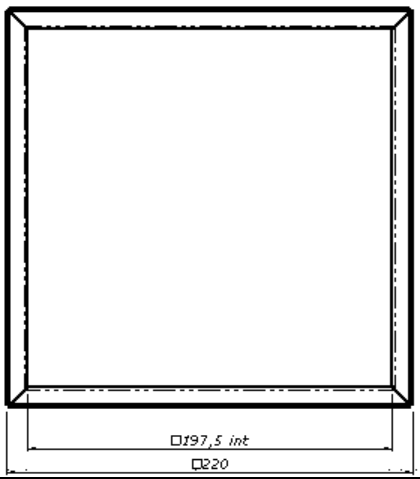
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

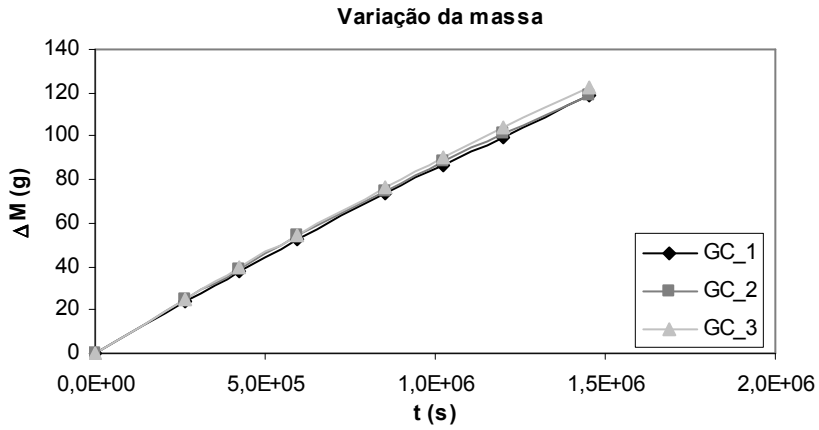
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC_1	GC_2	GC_3
01-07-05	18:00	0		1783,16	1739,88	1817,56
04-07-05	19:00	262800	262800	1807,44	1764,95	1842,59
06-07-05	15:10	421800	159000	1821,23	1779,01	1856,82
08-07-05	15:25	595500	173700	1835,77	1793,77	1871,94
11-07-05	15:05	853500	258000	1856,56	1814,85	1893,93
13-07-05	14:25	1023900	170400	1869,8	1828,16	1907,84
15-07-05	14:50	1198200	174300	1883,08	1841,16	1921,47
18-07-05	14:15	1455300	257100	1901,72	1858,77	1940,38



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC_1**	**GC_2**	**GC_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	8,08E-08	8,15E-08	8,45E-08	8,2E-08	2,0E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,90E-06	1,92E-06	1,99E-06	1,9E-06	4,6E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,60E-09	1,62E-09	1,69E-09	1,6E-09	4,6E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,00E-11	2,02E-11	2,11E-11	2,0E-11	5,8E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	9,55	9,44	9,05	9,3	0,26
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,119	0,118	0,113	0,12	0,003

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))} \; ; \; p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV2	**GC2_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com duas demãos de tinta vinílica Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

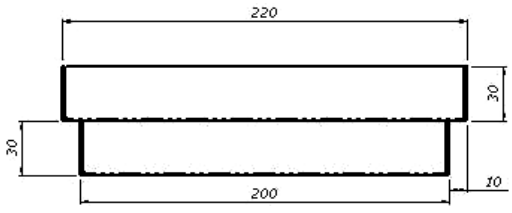
Câmara climática:

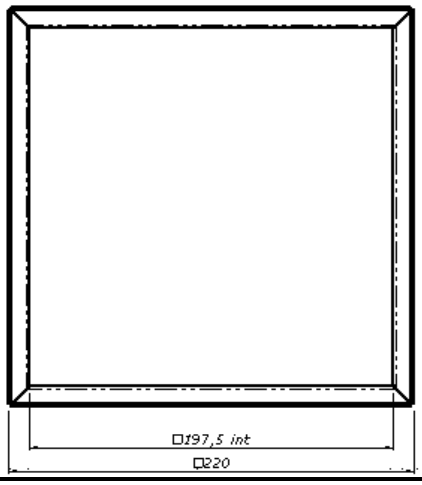
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

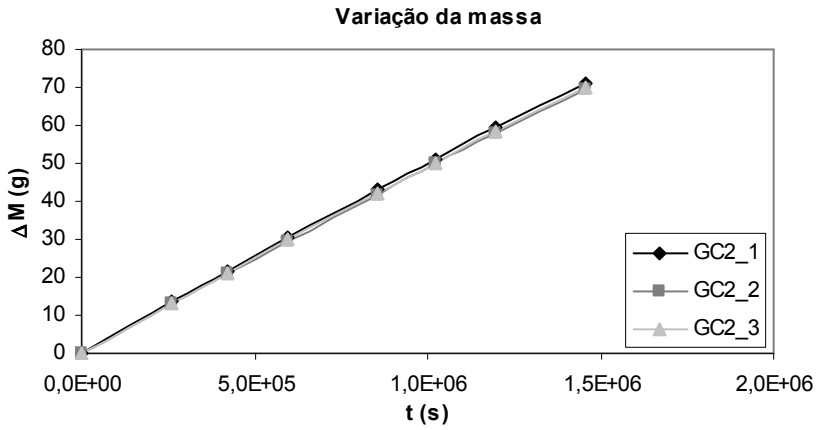
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC2_1	GC2_2	GC2_3
01-07-05	18:00	0		1810,93	1812,55	1814,78
04-07-05	19:00	262800	262800	1824,55	1825,66	1828,02
06-07-05	15:10	421800	159000	1832,68	1833,49	1835,99
08-07-05	15:25	595500	173700	1841,5	1842,04	1844,62
11-07-05	15:05	853500	258000	1854,07	1854,34	1856,97
13-07-05	14:25	1023900	170400	1862,17	1862,39	1864,99
15-07-05	14:50	1198200	174300	1870,2	1870,35	1873,07
18-07-05	14:15	1455300	257100	1881,95	1881,89	1884,55



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC2_1**	**GC2_2**	**GC2_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	5,00E-08	4,87E-08	4,90E-08	4,9E-08	7,2E-10
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,15E-06	1,12E-06	1,15E-06	1,1E-06	2,0E-08
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	9,02E-10	8,74E-10	9,07E-10	9,0E-10	1,8E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,13E-11	1,09E-11	1,13E-11	1,1E-11	2,2E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	16,94	17,48	16,85	17,1	0,34
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,212	0,218	0,211	0,21	0,004

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV3	**GC2A_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

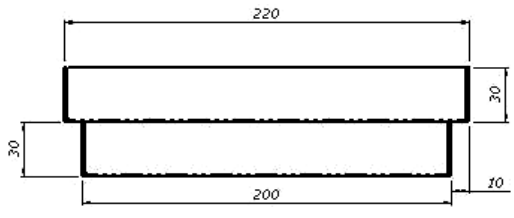
Câmara climática:

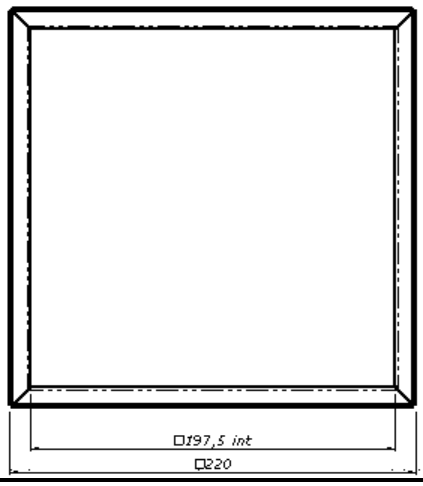
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

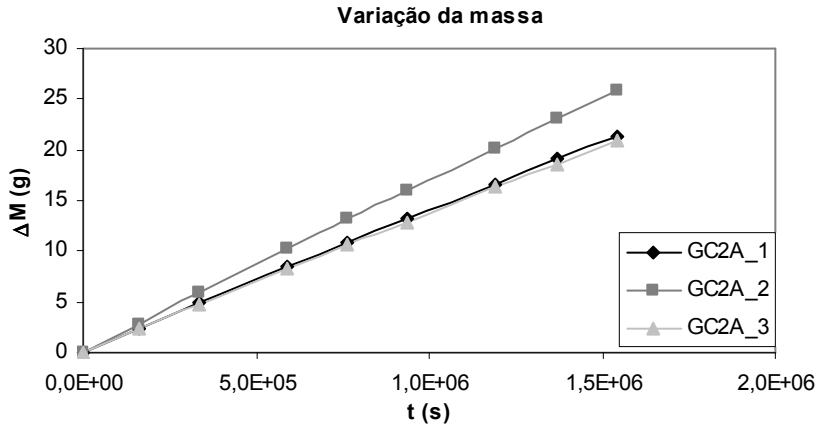
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC2A_1	GC2A_2	GC2A_3
04-07-05	19:00	0		1739,12	1696,36	1728,14
06-07-05	15:10	159000	159000	1741,46	1699,21	1730,42
08-07-05	15:25	332700	173700	1744,04	1702,3	1732,87
11-07-05	15:05	590700	258000	1747,58	1706,6	1736,39
13-07-05	14:25	761100	170400	1749,97	1709,54	1738,77
15-07-05	14:50	935400	174300	1752,31	1712,33	1740,99
18-07-05	14:15	1192500	257100	1755,78	1716,55	1744,48
20-07-05	14:45	1367100	174600	1758,17	1719,43	1746,74
22-07-05	15:30	1542600	175500	1760,52	1722,15	1748,99



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC2A_1**	**GC2A_2**	**GC2A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	1,36E-08	1,65E-08	1,34E-08	1,5E-08	1,7E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	3,29E-07	3,99E-07	3,23E-07	3,5E-07	4,2E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	2,41E-10	2,94E-10	2,37E-10	2,6E-10	3,2E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	3,01E-12	3,67E-12	2,96E-12	3,2E-12	4,0E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	63,41	52,00	64,57	60,0	6,94
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,793	0,650	0,807	0,75	0,087
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV4	**GC3_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com duas demãos de tinta acrílica Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

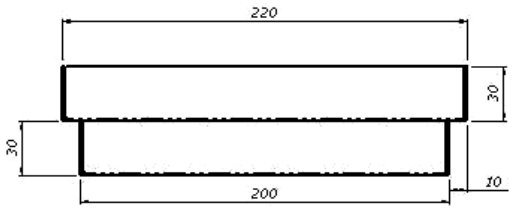
Câmara climática:

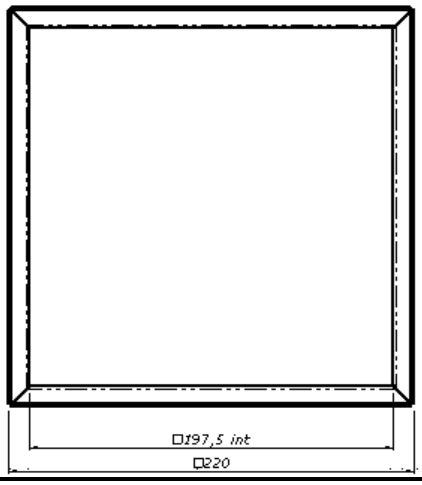
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

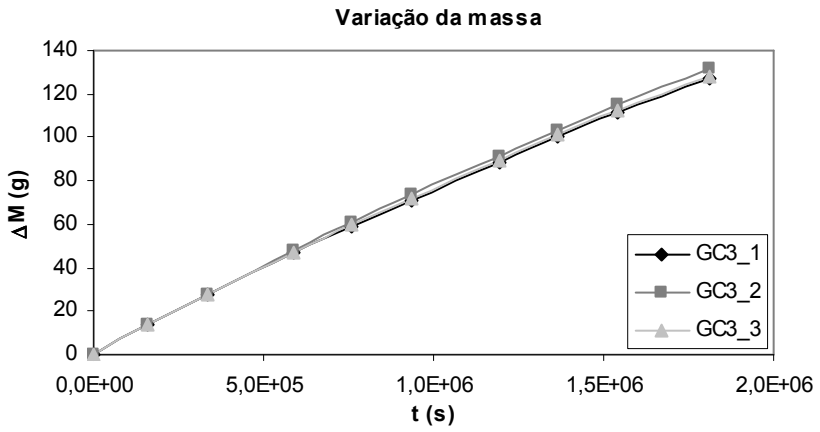
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC3_1	GC3_2	GC3_3
04-07-05	19:00	0		1692,04	1730,82	1700,02
06-07-05	15:10	159000	159000	1705,44	1744,52	1713,4
08-07-05	15:25	332700	173700	1719,36	1758,76	1727,4
11-07-05	15:05	590700	258000	1738,93	1779,05	1747,09
13-07-05	14:25	761100	170400	1751,1	1791,68	1759,45
15-07-05	14:50	935400	174300	1763,2	1804,2	1771,71
18-07-05	14:15	1192500	257100	1780,77	1822,26	1789,44
20-07-05	14:45	1367100	174600	1792,14	1834,26	1801,07
22-07-05	15:30	1542600	175500	1803,13	1845,97	1812,27
25-07-05	18:30	1812600	270000	1818,88	1862,95	1828,3



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC3_1**	**GC3_2**	**GC3_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	6,76E-08	7,03E-08	6,85E-08	6,9E-08	1,4E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,59E-06	1,70E-06	1,61E-06	1,6E-06	5,6E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,30E-09	1,40E-09	1,32E-09	1,3E-09	5,3E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,62E-11	1,75E-11	1,65E-11	1,7E-11	6,6E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	11,75	10,91	11,56	11,4	0,44
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,147	0,136	0,144	0,14	0,006

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV5	**GC3A_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

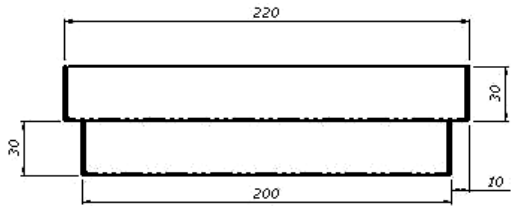
Câmara climática:

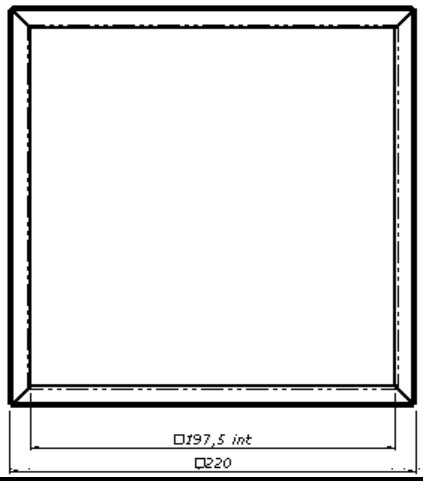
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

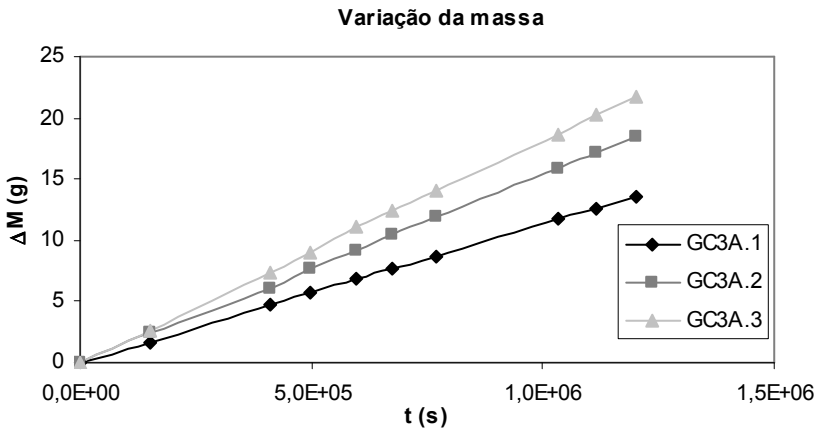
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC3A_1	GC3A_2	GC3A_3
25-01-06	16:50	0		1590,3	1582,3	1540,9
27-01-06	10:30	150000	150000	1591,9	1584,7	1543,5
30-01-06	10:20	408600	258600	1595,0	1588,4	1548,3
31-01-06	10:20	495000	86400	1596,0	1589,9	1549,9
01-02-06	14:35	596700	101700	1597,1	1591,5	1552,0
02-02-06	12:35	675900	79200	1598,0	1592,7	1553,3
03-02-06	14:45	770100	94200	1599,0	1594,2	1554,9
06-02-06	15:35	1032300	262200	1602,0	1598,2	1559,6
07-02-06	14:45	1115700	83400	1602,9	1599,4	1561,2
08-02-06	14:30	1201200	85500	1603,8	1600,8	1562,7



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC3A_1**	**GC3A_2**	**GC3A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5%	1,12E-08	1,53E-08	1,78E-08	1,5E-08	3,3E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	2,61E-07	3,58E-07	4,16E-07	3,5E-07	7,8E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,90E-10	2,63E-10	3,07E-10	2,5E-10	5,9E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,38E-12	3,28E-12	3,83E-12	3,2E-12	7,4E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	80,40	58,18	49,84	62,8	15,80
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	1,005	0,727	0,623	0,79	0,197
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV6	**GC_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

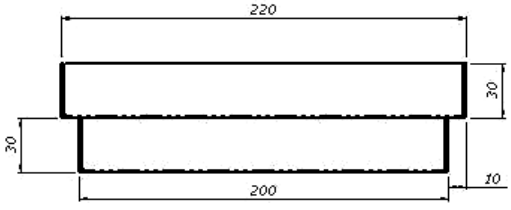
Câmara climática:

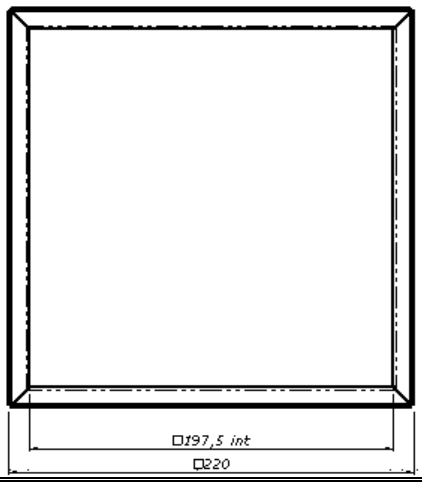
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

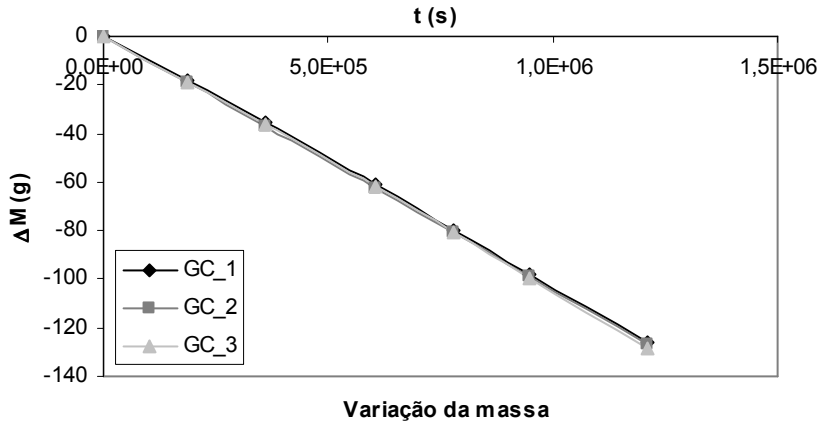
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC_1	GC_2	GC_3
22-08-05	10:15	0		1919,1	1968,25	1906,43
24-08-05	13:50	185700	185700	1900,87	1949	1887,88
26-08-05	13:50	358500	172800	1883,7	1931,02	1870,3
29-08-05	10:20	605100	246600	1857,9	1905,35	1844,38
31-08-05	10:45	779400	174300	1839,55	1887,22	1825,66
02-09-05	09:50	948900	169500	1821,23	1869,4	1807,02
05-09-05	10:00	1208700	259800	1793,32	1841,61	1777,64



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC_1**	**GC_2**	**GC_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	1,03E-07	1,04E-07	1,05E-07	1,0E-07	7,7E-10
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	2,43E-06	2,45E-06	2,47E-06	2,4E-06	1,8E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	2,53E-09	2,56E-09	2,58E-09	2,6E-09	2,5E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	3,17E-11	3,20E-11	3,23E-11	3,2E-11	3,1E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	6,03	5,96	5,92	6,0	0,06
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,0754	0,0745	0,0740	0,075	0,001

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV7	**GC2_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Placas de gesso cartonado pintado com tinta vinílica

Método de Preparação dos Provetes:

Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente;
Pintura com duas demãos de tinta vinílica;
Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.

Dimensões dos Provetes:

(0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

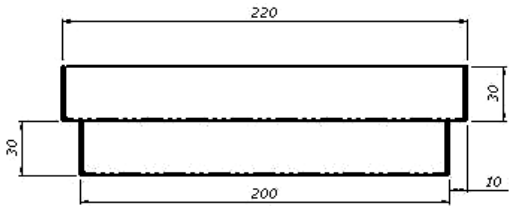
Câmara climática:

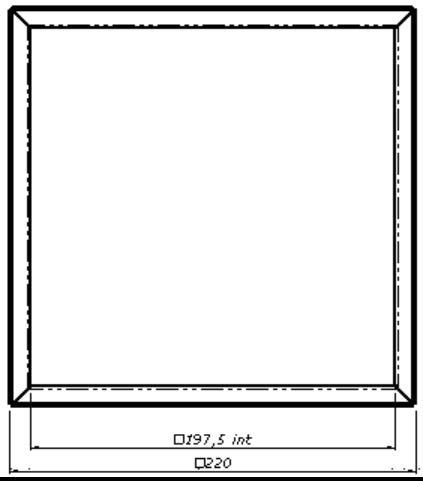
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

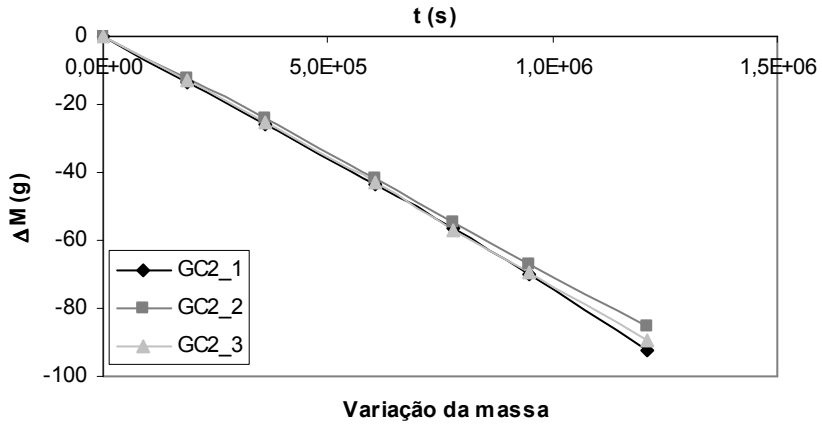
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC2_1	GC2_2	GC2_3
22-08-05	10:15	0		2034,63	1986,41	2029,57
24-08-05	13:50	185700	185700	2021,37	1973,87	2016,37
26-08-05	13:50	358500	172800	2009,01	1962,00	2004,07
29-08-05	10:20	605100	246600	1991,2	1944,46	1986,42
31-08-05	10:45	779400	174300	1978,28	1931,87	1972,79
02-09-05	09:50	948900	169500	1964,74	1919,5	1960,02
05-09-05	10:00	1208700	259800	1942,49	1901,04	1940,36



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC2_1**	**GC2_2**	**GC2_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	7,33E-08	7,06E-08	7,45E-08	7,3E-08	2,0E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,72E-06	1,66E-06	1,75E-06	1,7E-06	4,7E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,66E-09	1,59E-09	1,69E-09	1,6E-09	5,3E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,07E-11	1,98E-11	2,11E-11	2,1E-11	6,7E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	9,21	9,62	9,03	9,3	0,30
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,115	0,120	0,113	0,12	0,004

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV8	**GC2A_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

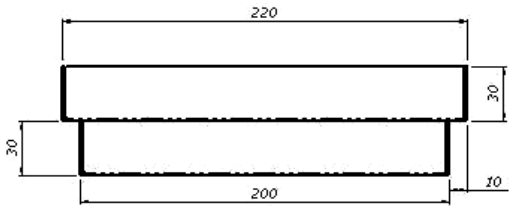
Câmara climática:

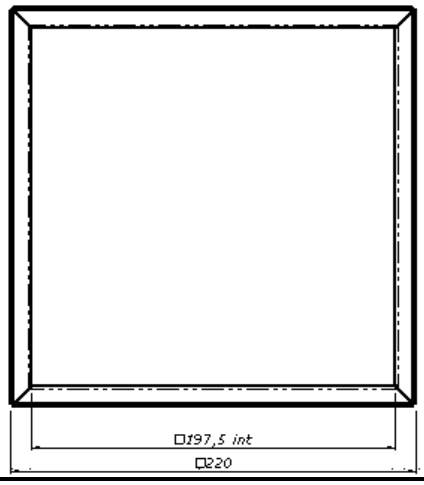
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

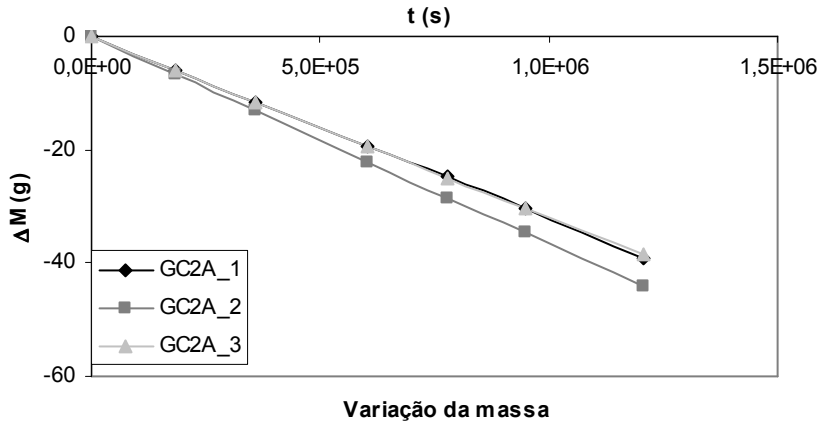
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC2A_1	GC2A_2	GC2A_3
22-08-05	10:15	0		2025,94	1975,22	2038,38
24-08-05	13:50	185700	185700	2019,92	1968,38	2032,31
26-08-05	13:50	358500	172800	2014,4	1962,05	2026,73
29-08-05	10:20	605100	246600	2006,63	1953,1	2018,95
31-08-05	10:45	779400	174300	2001,07	1946,75	2013,41
02-09-05	09:50	948900	169500	1995,51	1940,6	2008,12
05-09-05	10:00	1208700	259800	1986,82	1931,18	2000,02



Variação da massa

PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC2A_1**	**GC2A_2**	**GC2A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	3,20E-08	3,65E-08	3,19E-08	3,3E-08	2,6E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	7,52E-07	8,58E-07	7,50E-07	7,9E-07	6,2E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	6,54E-10	7,54E-10	6,52E-10	6,9E-10	5,8E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	8,17E-12	9,43E-12	8,15E-12	8,6E-12	7,3E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	23,37	20,26	23,44	22,4	1,81
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,292	0,253	0,293	0,28	0,023

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV9	**GC3_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Placas de gesso cartonado pintado com tinta acrílica

Método de Preparação dos Provetes:

Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente;
Pintura com duas demãos de tinta acrílica;
Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.

Dimensões dos Provetes:

(0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

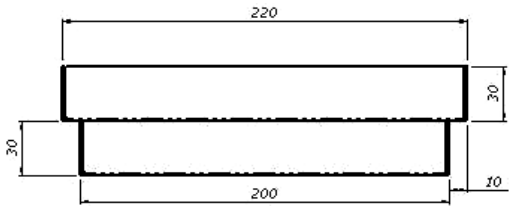
Câmara climática:

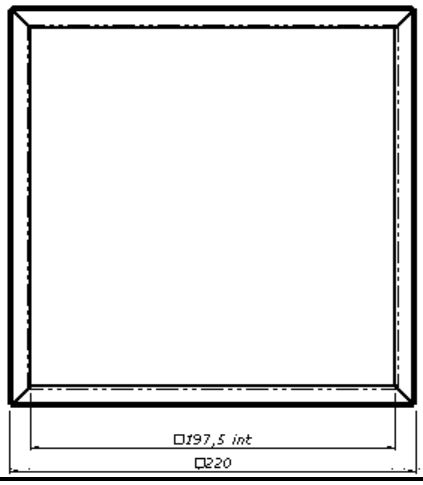
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

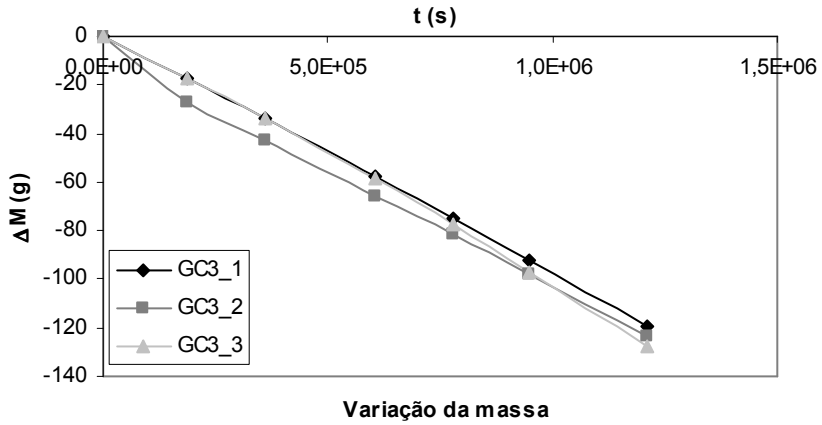
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC3_1	GC3_2	GC3_3
22-08-05	10:15	0		1949,00	1926,51	1996,11
24-08-05	13:50	185700	185700	1932,05	1899,68	1978,58
26-08-05	13:50	358500	172800	1915,56	1883,94	1962,05
29-08-05	10:20	605100	246600	1891,46	1861,03	1937,52
31-08-05	10:45	779400	174300	1874,41	1844,65	1918,81
02-09-05	09:50	948900	169500	1857,13	1828,42	1899,1
05-09-05	10:00	1208700	259800	1829,31	1802,89	1868,1



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC3_1**	**GC3_2**	**GC3_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	9,69E-08	9,45E-08	1,08E-07	1,0E-07	7,0E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	2,28E-06	2,22E-06	2,53E-06	2,3E-06	1,7E-07
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	2,34E-09	2,26E-09	2,68E-09	2,4E-09	2,2E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,92E-11	2,83E-11	3,35E-11	3,0E-11	2,8E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	6,54	6,75	5,71	6,3	0,55
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,0817	0,0844	0,0714	0,079	0,007
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV10	**GC3A_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

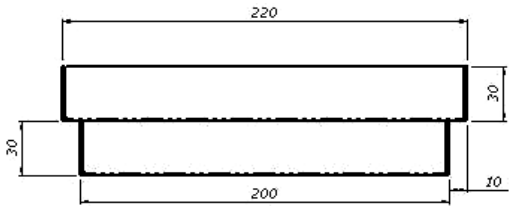
Câmara climática:

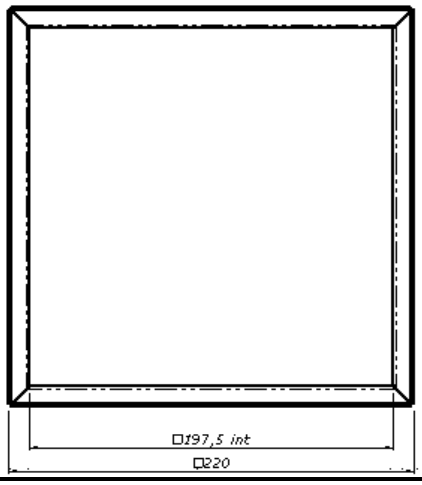
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

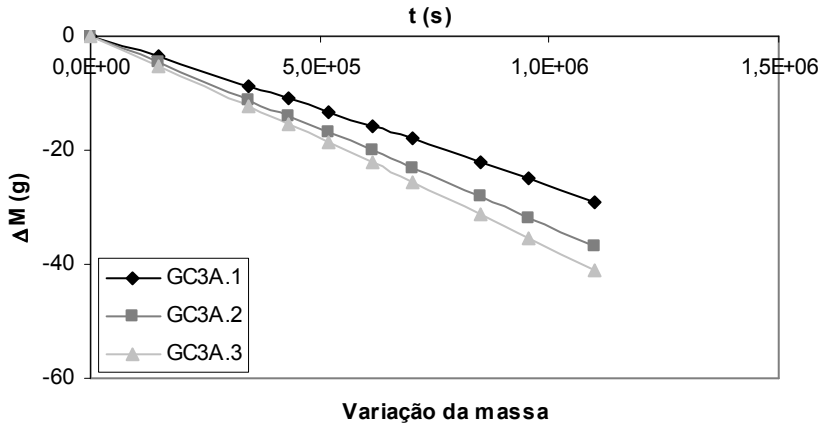
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC3A_1	GC3A_2	GC3A_3
16-02-06	16:30	0		1932,5	1925,9	1938,0
18-02-06	10:00	149400	149400	1929,0	1921,3	1932,9
20-02-06	16:30	345600	196200	1923,9	1914,7	1925,7
21-02-06	16:30	432000	86400	1921,7	1912,0	1922,6
22-02-06	16:45	519300	87300	1919,3	1909,0	1919,3
23-02-06	18:45	612900	93600	1916,8	1905,8	1915,9
24-02-06	19:10	700800	87900	1914,5	1902,8	1912,4
26-02-06	12:10	848400	147600	1910,5	1897,8	1906,8
27-02-06	17:50	955200	106800	1907,6	1894,0	1902,7



Variação da massa

PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC3A_1**	**GC3A_2**	**GC3A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	2,64E-08	3,43E-08	3,81E-08	3,3E-08	6,0E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	6,16E-07	8,01E-07	8,89E-07	7,7E-07	1,4E-07
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	5,28E-10	7,00E-10	7,84E-10	6,7E-10	1,3E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	6,60E-12	8,75E-12	9,80E-12	8,4E-12	1,6E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	28,93	21,82	19,49	23,4	4,92
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,362	0,273	0,244	0,29	0,061

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV11	**GC_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

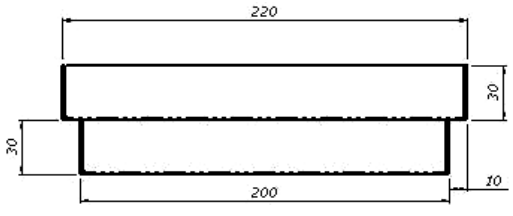
Câmara climática:

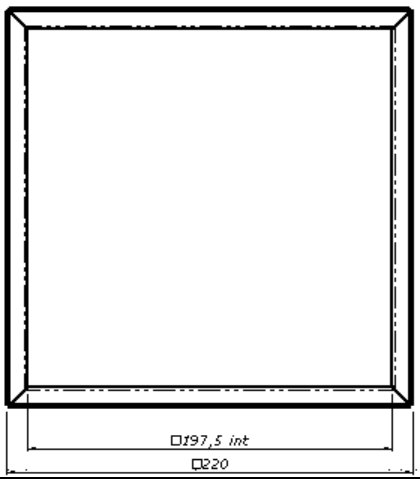
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

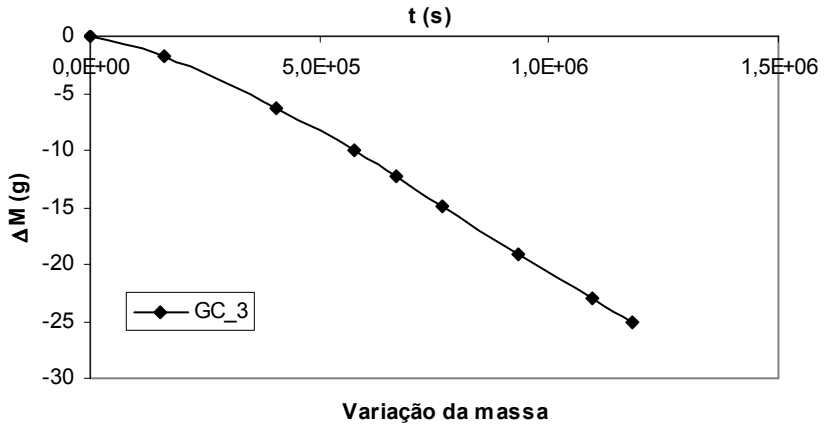
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC_1	GC_2	GC_3
19-04-06	17:30	0				1985,5
21-04-06	14:30	162000	162000			1983,7
24-04-06	09:35	403500	241500			1979,1
26-04-06	09:55	577500	174000			1975,5
27-04-06	11:15	668700	91200			1973,2
28-04-06	15:00	768600	99900			1970,6
30-04-06	13:15	935100	166500			1966,3
02-05-06	09:55	1095900	160800			1962,6
03-05-06	10:15	1183500	87600			1960,5



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC_1**	**GC_2**	**GC_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %			2,25E-08	2,2E-08	
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$			5,29E-07	5,3E-07	
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$			3,22E-09	3,2E-09	
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$			4,02E-11	4,0E-11	
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$			4,75	4,8	
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$			0,0594	0,059	
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$ **Expressões auxiliares:** $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV12	**GC2_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com duas demãos de tinta vinílica; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

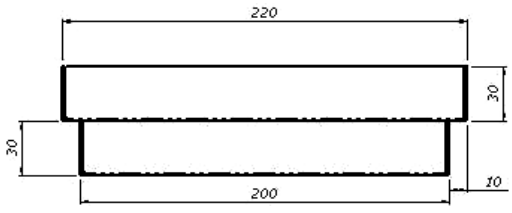
Câmara climática:

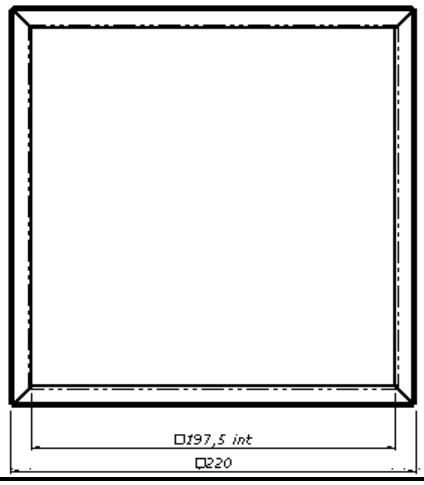
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

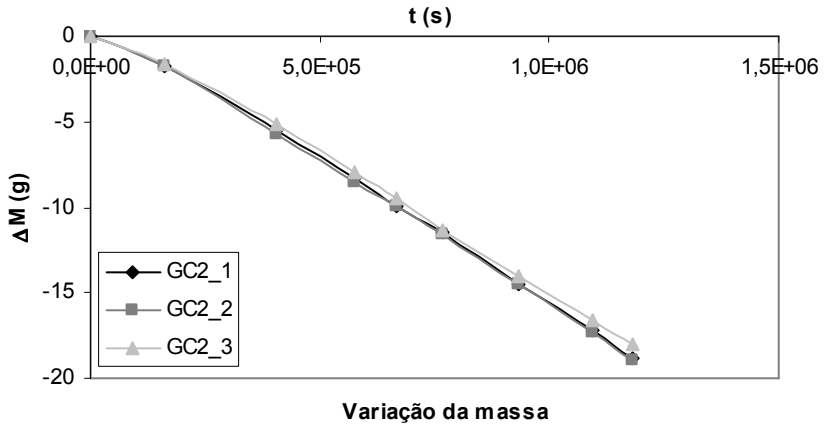
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC2_1	GC2_2	GC2_3
19-04-06	17:30	0		1949,0	1963,7	1960,4
21-04-06	14:30	162000	162000	1947,3	1962,0	1958,8
24-04-06	09:35	403500	241500	1943,5	1958,0	1955,2
26-04-06	09:55	577500	174000	1940,7	1955,2	1952,5
27-04-06	11:15	668700	91200	1939,1	1953,8	1950,9
28-04-06	15:00	768600	99900	1937,5	1952,1	1949,1
30-04-06	13:15	935100	166500	1934,5	1949,2	1946,4
02-05-06	09:55	1095900	160800	1931,8	1946,4	1943,8
03-05-06	10:15	1183500	87600	1930,2	1944,8	1942,4



Variação da massa

PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC2_1**	**GC2_2**	**GC2_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	1,70E-08	1,68E-08	1,66E-08	1,7E-08	1,9E-10
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	4,00E-07	3,95E-07	3,91E-07	4,0E-07	4,5E-09
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	2,23E-09	2,20E-09	2,17E-09	2,2E-09	3,1E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,79E-11	2,75E-11	2,71E-11	2,7E-11	3,9E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	6,85	6,95	7,04	6,9	0,10
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,086	0,087	0,088	0,087	0,001

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV13	**GC2A_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

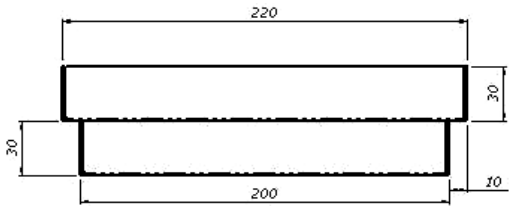
Câmara climática:

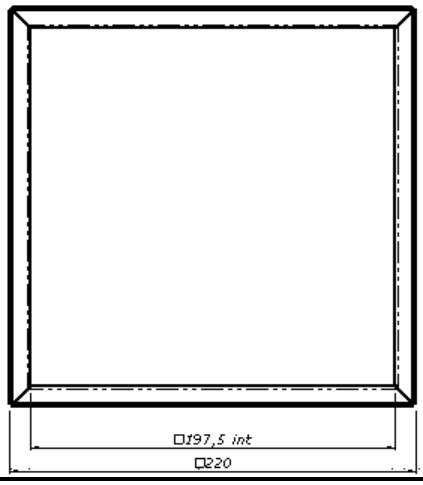
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

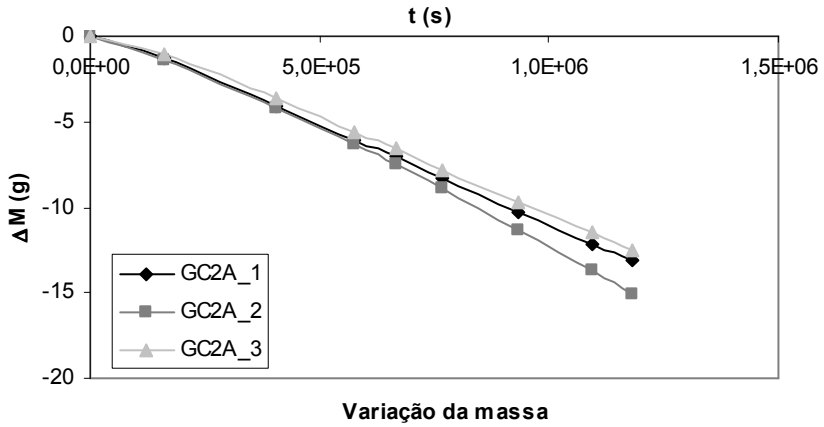
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC2A_1	GC2A_2	GC2A_3
19-04-06	17:30	0		1963,6	1965,4	1922,1
21-04-06	14:30	162000	162000	1962,3	1964,0	1921,0
24-04-06	09:35	403500	241500	1959,5	1961,2	1918,5
26-04-06	09:55	577500	174000	1957,5	1959,1	1916,5
27-04-06	11:15	668700	91200	1956,6	1957,9	1915,5
28-04-06	15:00	768600	99900	1955,3	1956,5	1914,3
30-04-06	13:15	935100	166500	1953,3	1954,1	1912,4
02-05-06	09:55	1095900	160800	1951,4	1951,7	1910,6
03-05-06	10:15	1183500	87600	1950,5	1950,3	1909,6



Variação da massa

PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC2A_1**	**GC2A_2**	**GC2A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	1,17E-08	1,27E-08	1,14E-08	1,2E-08	6,8E-10
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	2,76E-07	3,00E-07	2,69E-07	2,8E-07	1,6E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,43E-09	1,57E-09	1,39E-09	1,5E-09	9,8E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,79E-11	1,97E-11	1,73E-11	1,8E-11	1,2E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	10,68	9,71	11,02	10,5	0,68
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,133	0,121	0,138	0,13	0,008
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV14	**GC3_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com duas demãos de tinta acrílica; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

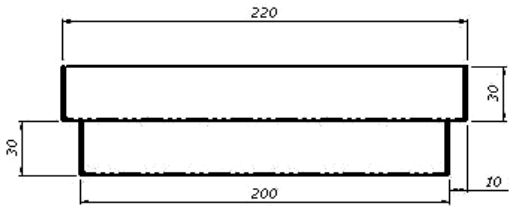
Câmara climática:

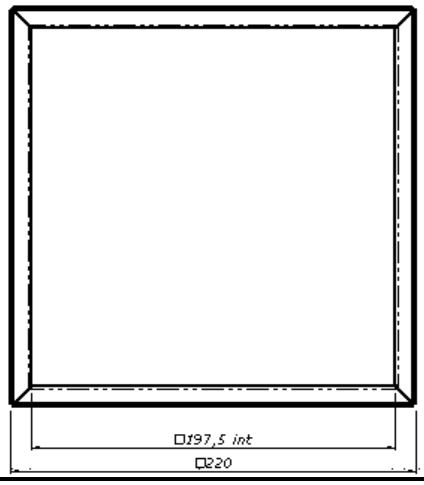
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

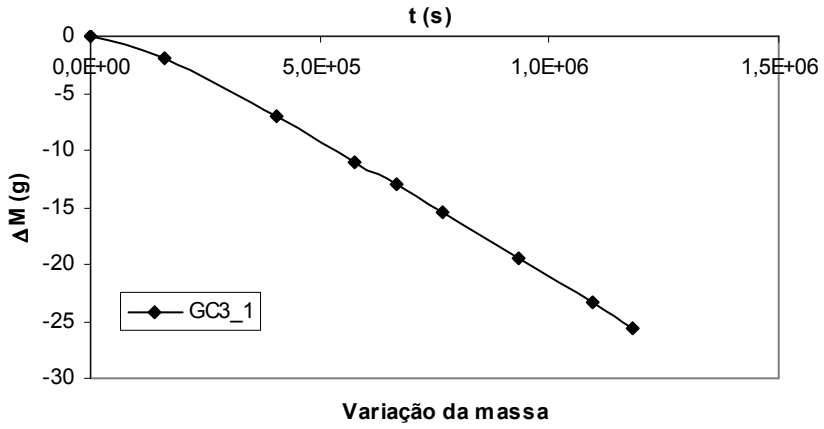
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC3_1		
19-04-06	17:30	0		1965,1		
21-04-06	14:30	162000	162000	1963,2		
24-04-06	09:35	403500	241500	1958		
26-04-06	09:55	577500	174000	1954,1		
27-04-06	11:15	668700	91200	1952,1		
28-04-06	15:00	768600	99900	1949,7		
30-04-06	13:15	935100	166500	1945,7		
02-05-06	09:55	1095900	160800	1941,7		
03-05-06	10:15	1183500	87600	1939,5		



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC3_1**			**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	2,26E-08			2,3E-08	
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	5,31E-07			5,3E-07	
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	3,24E-09			3,2E-09	
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	4,05E-11			4,0E-11	
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	4,72			4,7	
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,059			0,059	
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV15	**GC3A_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

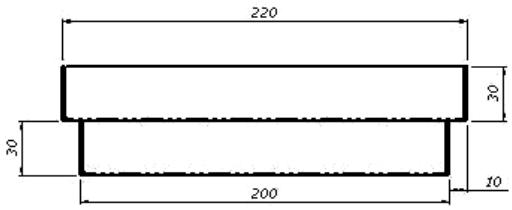
Câmara climática:

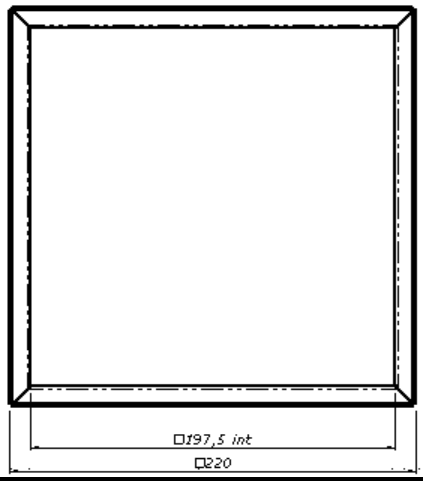
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

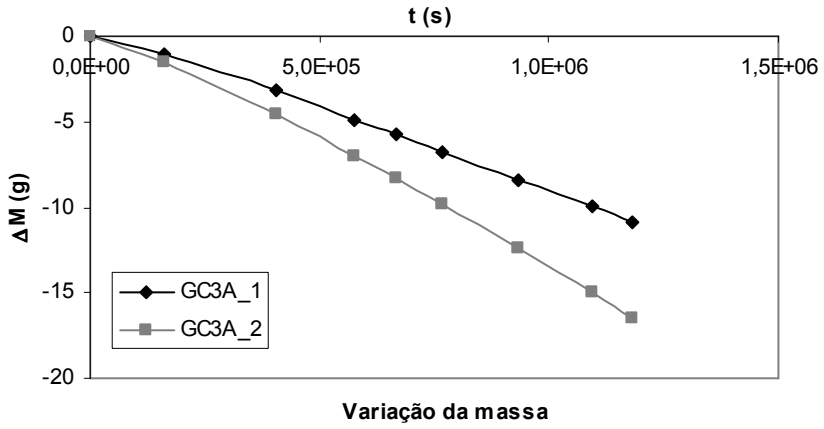
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC3A_1	GC3A_2	
19-04-06	17:30	0		1949,5	1887,3	
21-04-06	14:30	162000	162000	1948,5	1885,8	
24-04-06	09:35	403500	241500	1946,4	1882,7	
26-04-06	09:55	577500	174000	1944,6	1880,3	
27-04-06	11:15	668700	91200	1943,8	1879,0	
28-04-06	15:00	768600	99900	1942,7	1877,5	
30-04-06	13:15	935100	166500	1941,1	1874,9	
02-05-06	09:55	1095900	160800	1939,6	1872,3	
03-05-06	10:15	1183500	87600	1938,6	1870,8	



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC3A_1**	**GC3A_2**	**GC3A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	9,83E-09	1,51E-08		1,2E-08	3,7E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	2,31E-07	3,54E-07		2,9E-07	8,7E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,17E-09	1,92E-09		1,6E-09	5,3E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,46E-11	2,40E-11		1,9E-11	6,7E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	13,09	7,95		10,5	3,64
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,164	0,099		0,13	0,046
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV16	**GP_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado
Método de Preparação dos Provetes:
Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento.
Dimensões dos Provetes:
(0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

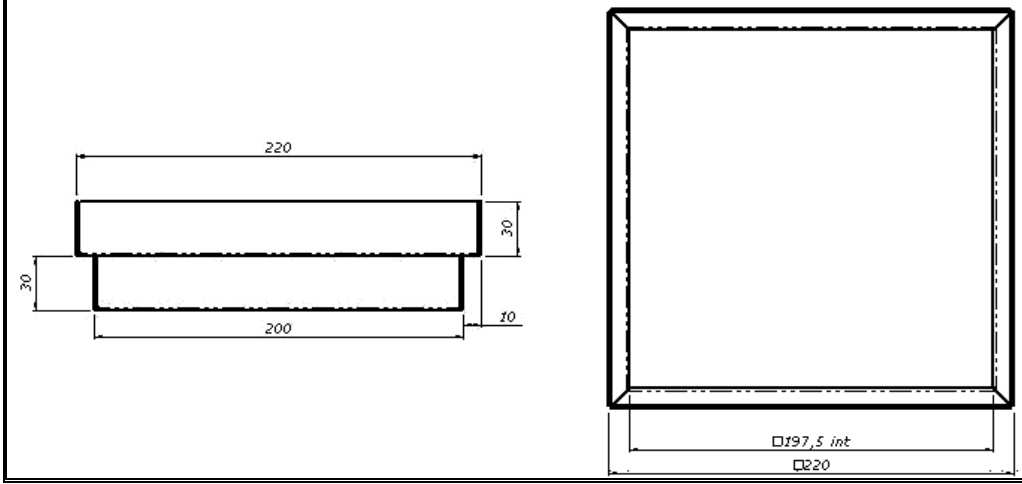
Câmara climática:

- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

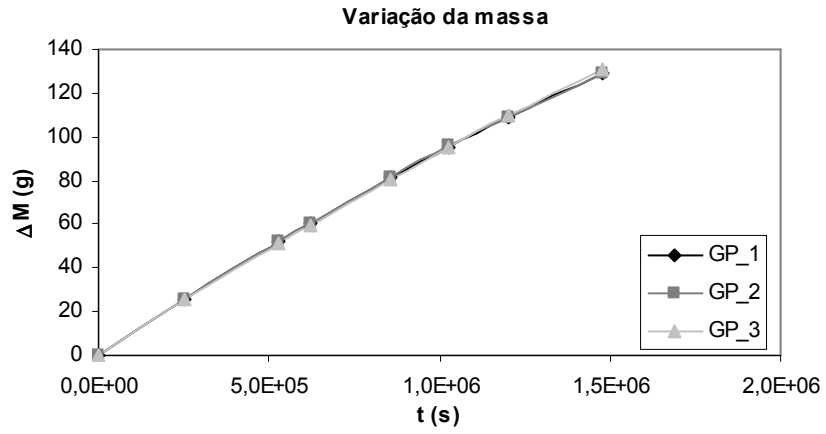
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GP_1	GP_2	GP_3
30-09-05	12:00	0		1779,33	1755,83	1835,29
03-10-05	10:00	252000	252000	1805,33	1781,83	1860,67
06-10-05	14:10	526200	274200	1831,38	1807,86	1886,44
07-10-05	16:50	622200	96000	1840,00	1816,53	1895,00
10-10-05	9:40	855600	233400	1860,62	1837,23	1915,70
12-10-05	9:40	1028400	172800	1874,88	1851,63	1930,63
14-10-05	9:40	1201200	172800	1888,12	1865,01	1944,85
17-10-05	14:50	1479000	277800	1908,08	1885,13	1966,39



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GP_1**	**GP_2**	**GP_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	8,73E-08	8,77E-08	8,86E-08	8,8E-08	6,9E-10
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	2,02E-06	2,03E-06	2,05E-06	2,0E-06	1,6E-08
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,72E-09	1,73E-09	1,75E-09	1,7E-09	1,6E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,89E-11	1,79E-11	1,88E-11	1,9E-11	6,0E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	10,08	10,70	10,14	10,3	0,34
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,111	0,111	0,109	0,11	0,001

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV17	**GP2_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado pintados com tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com duas demãos de tinta vinílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

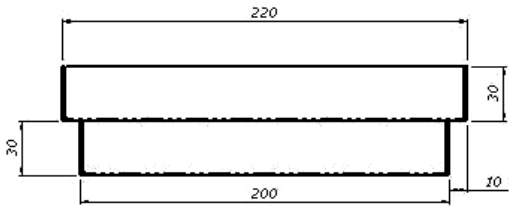
Câmara climática:

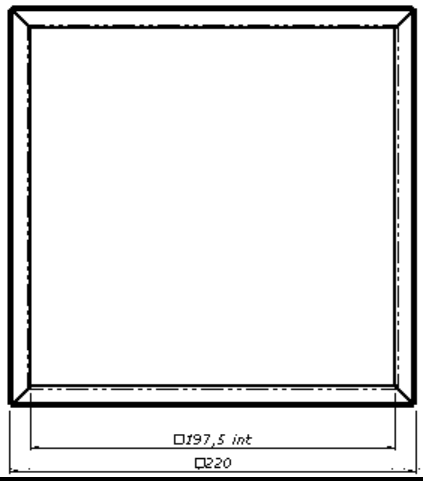
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

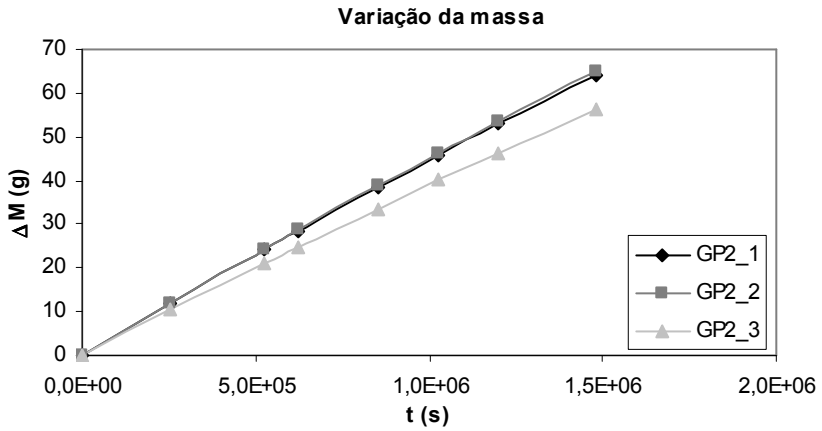
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GP2_1	GP2_2	GP2_3
30-09-05	12:00	0		1817,76	1806,12	1769,62
03-10-05	10:00	252000	252000	1829,64	1818,12	1780,05
06-10-05	14:10	526200	274200	1841,95	1830,56	1790,76
07-10-05	16:50	622200	96000	1846,05	1834,75	1794,32
10-10-05	9:40	855600	233400	1856,28	1845,04	1803,22
12-10-05	9:40	1028400	172800	1863,68	1852,47	1809,67
14-10-05	9:40	1201200	172800	1870,84	1859,74	1815,97
17-10-05	14:50	1479000	277800	1882,00	1871,11	1825,78



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GP2_1**	**GP2_2**	**GP2_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	4,34E-08	4,38E-08	3,78E-08	4,2E-08	3,4E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,00E-06	1,01E-06	8,74E-07	1,0E-06	7,7E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	7,78E-10	7,86E-10	6,70E-10	7,4E-10	6,5E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	8,61E-12	8,52E-12	7,49E-12	8,2E-12	6,2E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	22,18	22,43	25,52	23,4	1,86
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,245	0,243	0,285	0,26	0,024

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV18	**GP2A_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado pintados com primário e tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento. Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

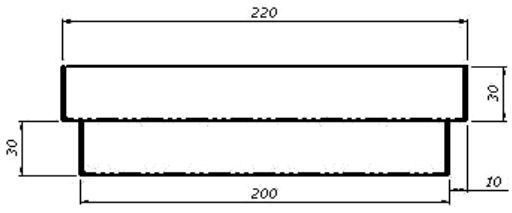
Câmara climática:

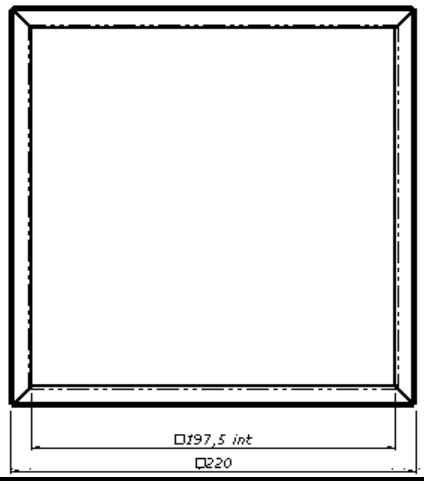
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

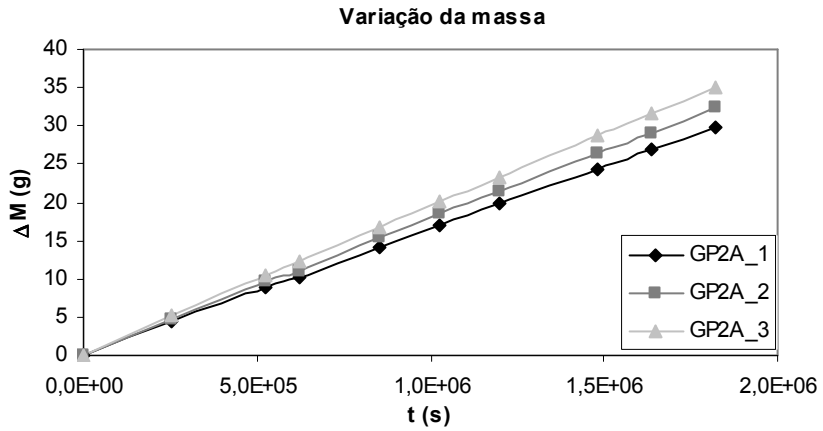
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GP2A_1	GP2A_2	GP2A_3
30-09-05	12:00	0		1749,05	1770,29	1799,55
03-10-05	10:00	252000	252000	1753,38	1774,97	1804,68
06-10-05	14:10	526200	274200	1757,92	1779,84	1810,01
07-10-05	16:50	622200	96000	1759,32	1781,37	1811,71
10-10-05	9:40	855600	233400	1763,25	1785,61	1816,31
12-10-05	9:40	1028400	172800	1766,15	1788,73	1819,69
14-10-05	9:40	1201200	172800	1768,90	1791,72	1822,94
17-10-05	14:50	1479000	277800	1773,42	1796,59	1828,25
19-10-05	10:10	1635000	156000	1775,93	1799,31	1831,16
21-10-05	14:20	1822800	187800	1778,96	1802,58	1834,70



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GP2A_1**	**GP2A_2**	**GP2A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	1,64E-08	1,77E-08	1,92E-08	1,8E-08	1,4E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	3,78E-07	4,08E-07	4,43E-07	4,1E-07	3,3E-08
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	2,78E-10	3,01E-10	3,28E-10	3,0E-10	2,5E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,86E-12	3,18E-12	3,60E-12	3,2E-12	3,7E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	66,73	60,07	53,02	59,9	6,86
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,687	0,635	0,583	0,64	0,052

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV19	**GP3_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado Pintado com Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado pintados com tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento. Pintura com duas demãos de tinta acrílica
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

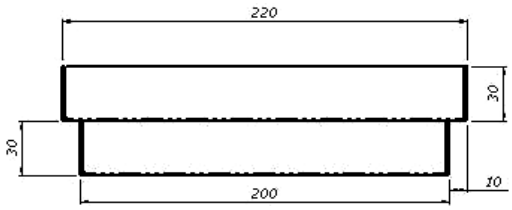
Câmara climática:

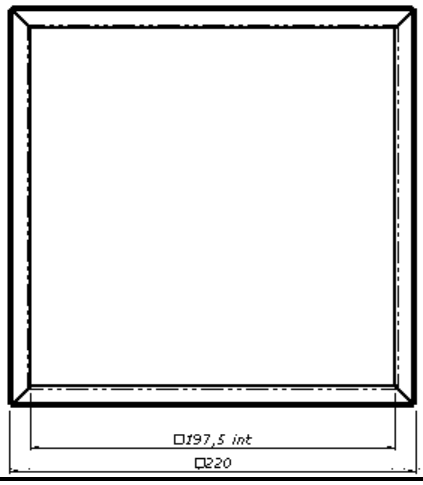
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

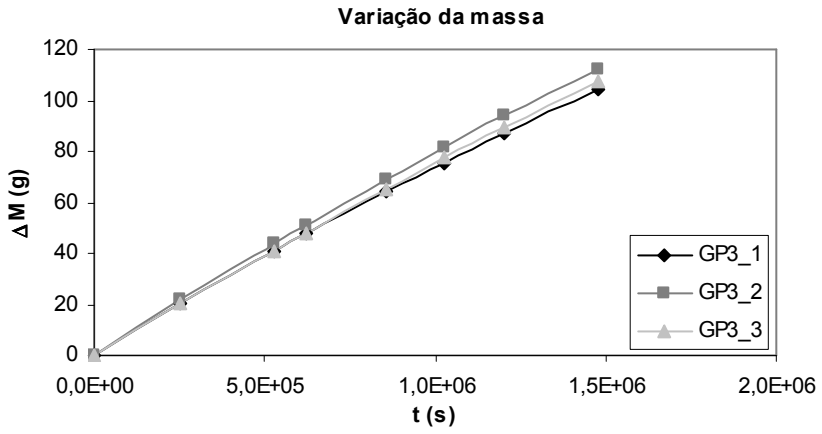
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GP3_1	GP3_2	GP3_3
30-09-05	12:00	0		1787,86	1849,62	1847,39
03-10-05	10:00	252000	252000	1808,32	1871,53	1867,67
06-10-05	14:10	526200	274200	1828,77	1893,49	1888,56
07-10-05	16:50	622200	96000	1835,51	1900,77	1895,52
10-10-05	9:40	855600	233400	1851,84	1918,44	1912,51
12-10-05	9:40	1028400	172800	1863,54	1931,27	1924,87
14-10-05	9:40	1201200	172800	1874,66	1943,35	1936,65
17-10-05	14:50	1479000	277800	1891,96	1961,74	1954,93



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GP3_1**	**GP3_2**	**GP3_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	6,98E-08	7,56E-08	7,27E-08	7,3E-08	2,9E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,61E-06	1,75E-06	1,68E-06	1,7E-06	6,7E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,32E-09	1,45E-09	1,38E-09	1,4E-09	6,4E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,42E-11	1,60E-11	1,49E-11	1,5E-11	8,7E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	13,41	11,97	12,81	12,7	0,73
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,144	0,132	0,138	0,14	0,006

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV20	**GP3A_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso projectado pintado com primário e tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

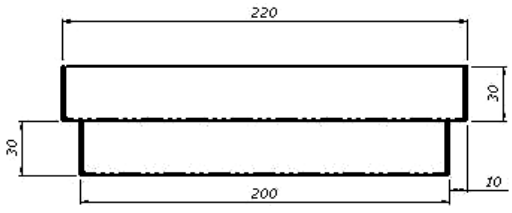
Câmara climática:

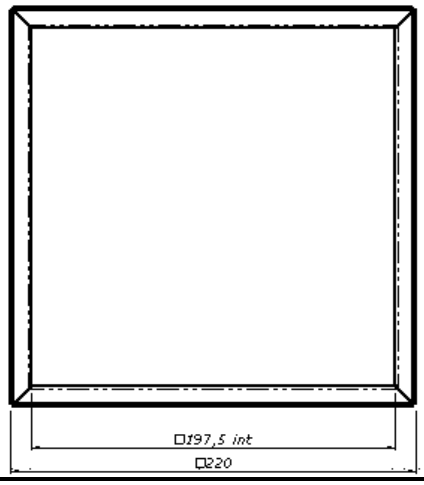
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

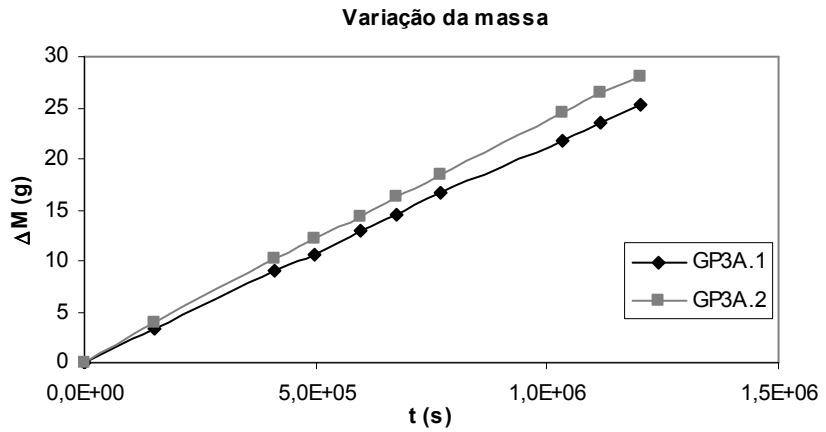
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GP3A_1	GP3A_2	
25-01-06	16:50	0		1739,4	1711,2	
27-01-06	10:30	150000	150000	1742,8	1715,1	
30-01-06	10:20	408600	258600	1748,5	1721,3	
31-01-06	10:20	495000	86400	1750,0	1723,3	
01-02-06	14:35	596700	101700	1752,3	1725,6	
02-02-06	12:35	675900	79200	1754,0	1727,5	
03-02-06	14:45	770100	94200	1756,0	1729,7	
06-02-06	15:35	1032300	262200	1761,1	1735,7	
07-02-06	14:45	1115700	83400	1763,0	1737,6	
08-02-06	14:30	1201200	85500	1764,7	1739,3	



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GP3A_1**	**GP3A_2**	**-**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	2,04E-08	2,35E-08	-	2,2E-08	2,2E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	4,76E-07	5,49E-07	-	5,1E-07	5,1E-08
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	3,53E-10	4,09E-10	-	3,8E-10	4,0E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	3,92E-12	4,34E-12	-	4,1E-12	3,0E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	48,79	44,05	-	46,4	3,35
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,542	0,467	-	0,50	0,053

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV21	**GP_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

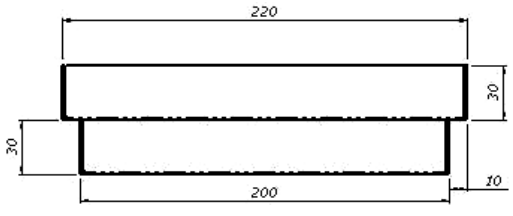
Câmara climática:

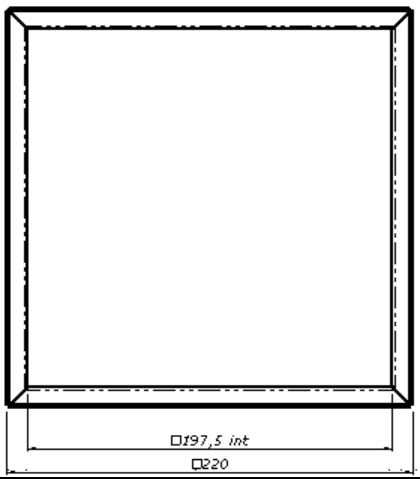
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

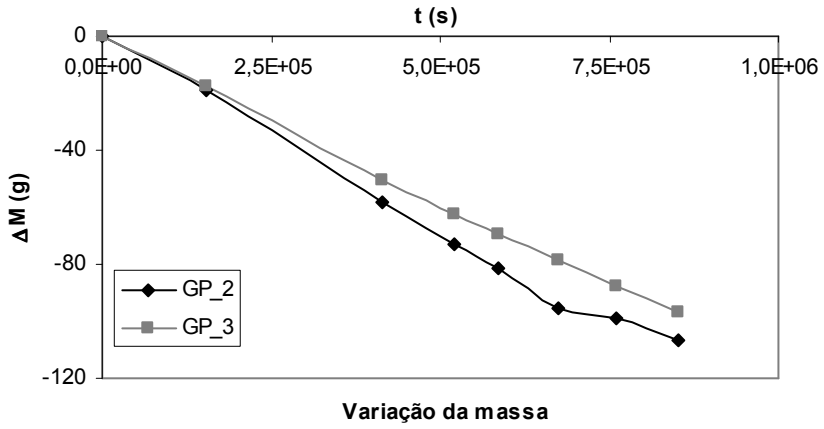
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				-	GP_2	GP_3
07-12-05	13:10	0		-	2179,5	2185,1
09-12-05	08:10	154800	154800	-	2160,8	2167,7
12-12-05	08:15	414300	259500	-	2121,3	2134,6
13-12-05	13:45	520500	106200	-	2106,2	2122,9
14-12-05	08:10	586800	66300	-	2098,3	2115,9
15-12-05	08:10	673200	86400	-	2084,4	2106,7
16-12-05	09:40	759600	86400	-	2080,9	2097,6
17-12-05	11:10	851400	91800	-	2072,8	2088,2



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**-**	**GP_2**	**GP_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	-	1,11E-07	1,06E-07	1,1E-07	3,5E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	-	2,57E-06	2,45E-06	2,5E-06	8,2E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	-	2,72E-09	2,56E-09	2,6E-09	1,1E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	-	2,81E-11	2,76E-11	2,8E-11	3,7E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	-	6,79	6,92	6,9	0,09
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	-	0,070	0,074	0,072	0,003
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV22	**GP2_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado pintados com tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com duas demãos de tinta vinílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

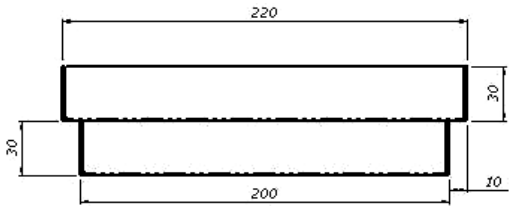
Câmara climática:

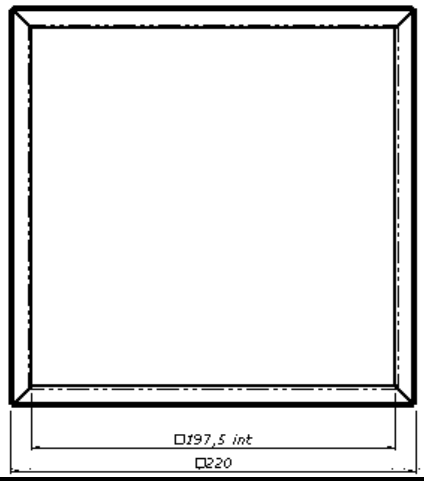
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

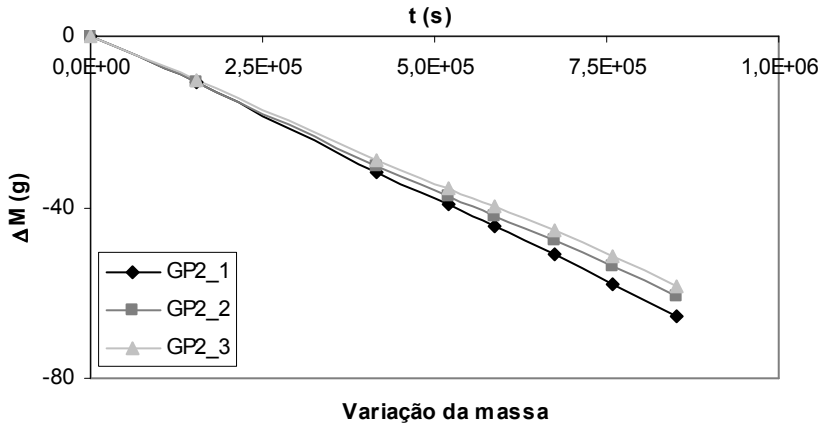
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GP2_1	GP2_2	GP2_3
07-12-05	13:10	0		2158,6	2124,3	2150,9
09-12-05	08:10	154800	154800	2147,7	2113,4	2140,7
12-12-05	08:15	414300	259500	2126,8	2093,8	2122,1
13-12-05	13:45	520500	106200	2119,1	2086,8	2115,2
14-12-05	08:10	586800	66300	2114,2	2082,3	2111
15-12-05	08:10	673200	86400	2107,5	2076,6	2105,3
16-12-05	09:40	759600	86400	2100,4	2070,4	2099,3
17-12-05	11:10	851400	91800	2093	2063,7	2092,3



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GP2_1**	**GP2_2**	**GP2_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	7,76E-08	6,87E-08	6,81E-08	7,1E-08	5,3E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,79E-06	1,59E-06	1,57E-06	1,7E-06	1,2E-07
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,74E-09	1,51E-09	1,49E-09	1,6E-09	1,4E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,92E-11	1,63E-11	1,66E-11	1,7E-11	1,6E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	9,92	11,71	11,49	11,0	0,97
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,110	0,127	0,128	0,12	0,010

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV23	**GP2A_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado pintados com primário e tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

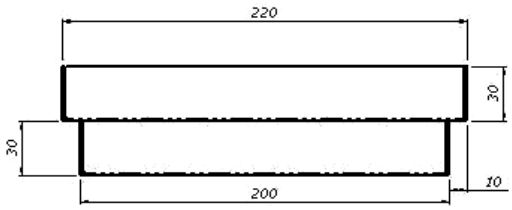
Câmara climática:

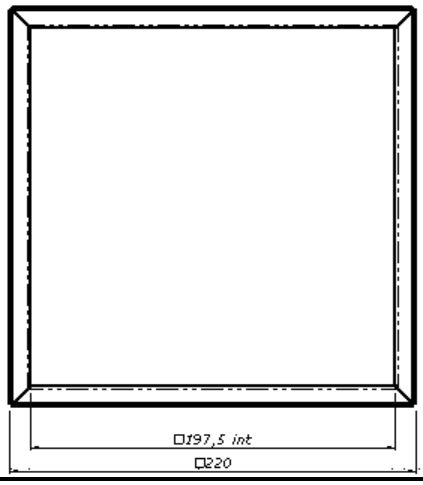
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

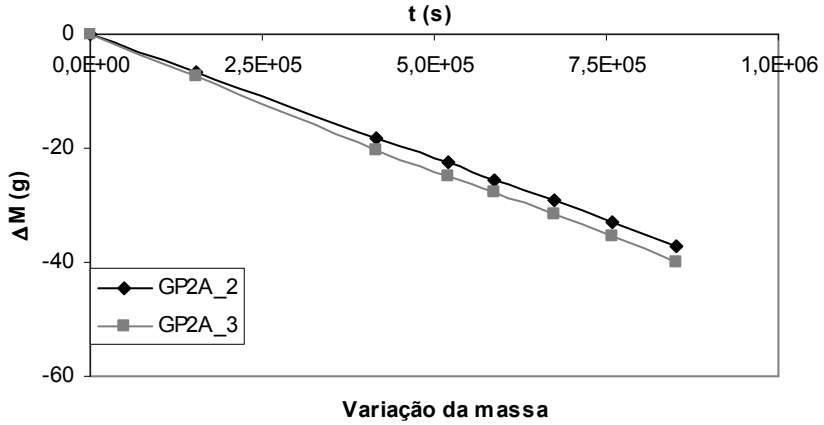
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

				Massa (g)		
Data	**Hora**	**t (s)**	**Δt (s)**	**-**	**GP2A_2**	**GP2A_3**
07-12-05	13:10	0		-	2125,9	2133,4
09-12-05	08:10	154800	154800	-	2119,4	2126,2
12-12-05	08:15	414300	259500	-	2107,6	2113,2
13-12-05	13:45	520500	106200	-	2103,3	2108,5
14-12-05	08:10	586800	66300	-	2100,4	2105,7
15-12-05	08:10	673200	86400	-	2096,7	2101,9
16-12-05	09:40	759600	86400	-	2092,9	2097,9
17-12-05	11:10	851400	91800	-	2088,8	2093,3



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**-**	**GP2A_2**	**GP2A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	-	4,36E-08	4,72E-08	4,5E-08	2,6E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	-	1,01E-06	1,09E-06	1,0E-06	5,9E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	-	8,99E-10	9,82E-10	9,4E-10	5,9E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	-	9,49E-12	1,08E-11	1,0E-11	9,2E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	-	20,12	17,68	18,9	1,72
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	-	0,213	0,195	0,20	0,013

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV24	**GP3_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado Pintado com Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado pintados com tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com duas demãos de tinta acrílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

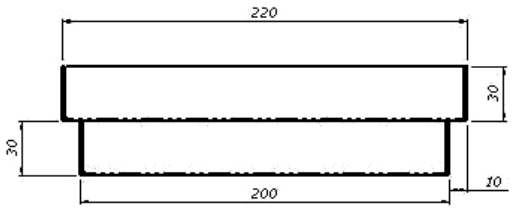
Câmara climática:

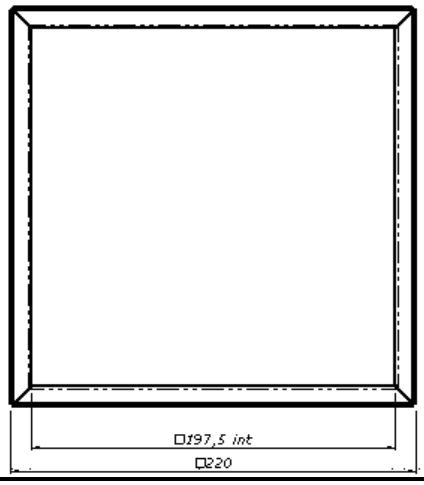
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

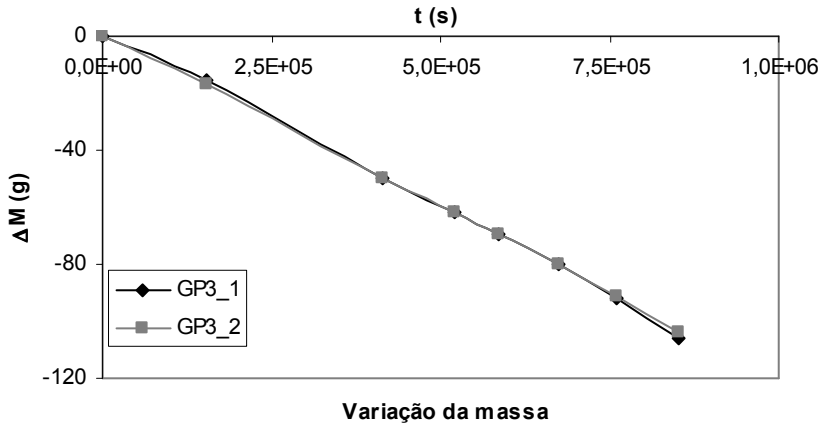
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

				Massa (g)		
Data	**Hora**	**t (s)**	**Δt (s)**	**GP3_1**	**GP3_2**	**-**
07-12-05	13:10	0		2117,0	2149,1	-
09-12-05	08:10	154800	154800	2101,3	2132,4	-
12-12-05	08:15	414300	259500	2067,5	2099,4	-
13-12-05	13:45	520500	106200	2055,4	2087,3	-
14-12-05	08:10	586800	66300	2047,8	2079,8	-
15-12-05	08:10	673200	86400	2037,1	2069,4	-
16-12-05	09:40	759600	86400	2025,3	2057,9	-
17-12-05	11:10	851400	91800	2011,3	2045,3	-



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GP3_1**	**GP3_2**	**-**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	1,24E-07	1,20E-07	-	1,2E-07	3,3E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	2,87E-06	2,76E-06	-	2,8E-06	7,7E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	3,16E-09	3,00E-09	-	3,1E-09	1,1E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	3,40E-11	3,30E-11	-	3,4E-11	7,3E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	5,61	5,79	-	5,7	0,12
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,0604	0,0637	-	0,062	0,002

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV25	**GP3A_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado pintado com primário e tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

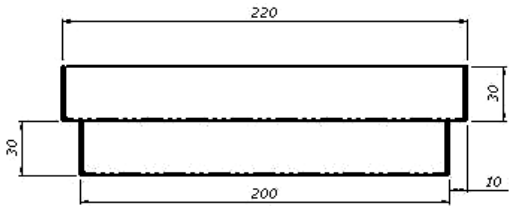
Câmara climática:

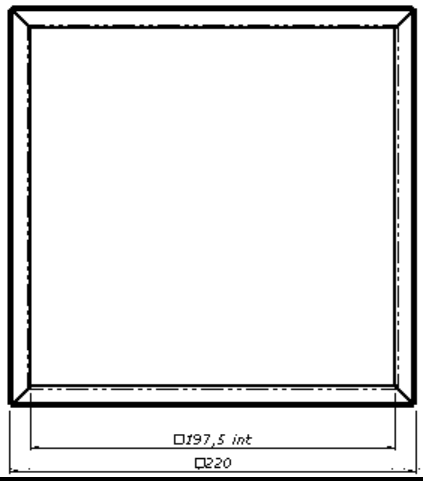
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

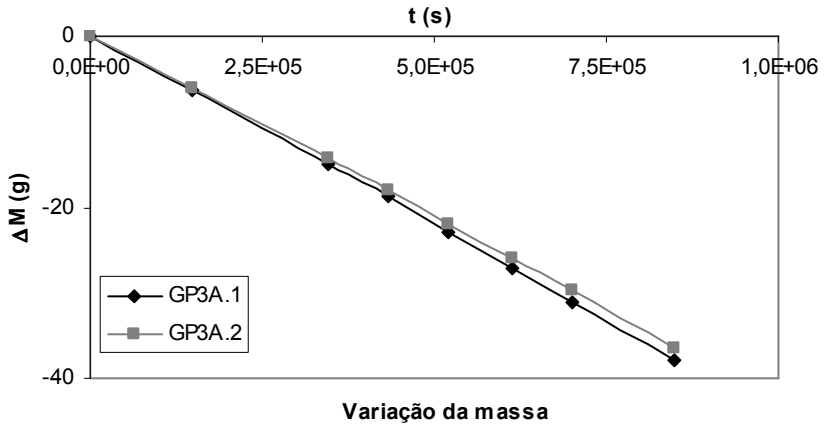
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

				Massa (g)		
Data	**Hora**	**t (s)**	**Δt (s)**	**GP3A_1**	**GP3A_2**	**-**
16-02-06	16:30	0		2060,0	2051,2	-
18-02-06	10:00	149400	149400	2053,6	2045,1	-
20-02-06	16:30	345600	196200	2045,1	2036,9	-
21-02-06	16:30	432000	86400	2041,2	2033,3	-
22-02-06	16:45	519300	87300	2037,1	2029,3	-
23-02-06	18:45	612900	93600	2032,9	2025,3	-
24-02-06	19:10	700800	87900	2028,9	2021,4	-
26-02-06	12:10	848400	147600	2022,1	2014,6	-



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GP3A_1**	**GP3A_2**	**-**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	4,49E-08	4,30E-08	-	4,4E-08	1,3E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,05E-06	1,01E-06	-	1,0E-06	3,1E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	9,40E-10	8,97E-10	-	9,2E-10	3,1E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,04E-11	9,51E-12	-	1,0E-11	6,6E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	18,30	20,09	-	19,2	1,27
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,203	0,213	-	0,21	0,007

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}\,;\; p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV26	**GP_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado
Método de Preparação dos Provetes:
Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento.
Dimensões dos Provetes:
(0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

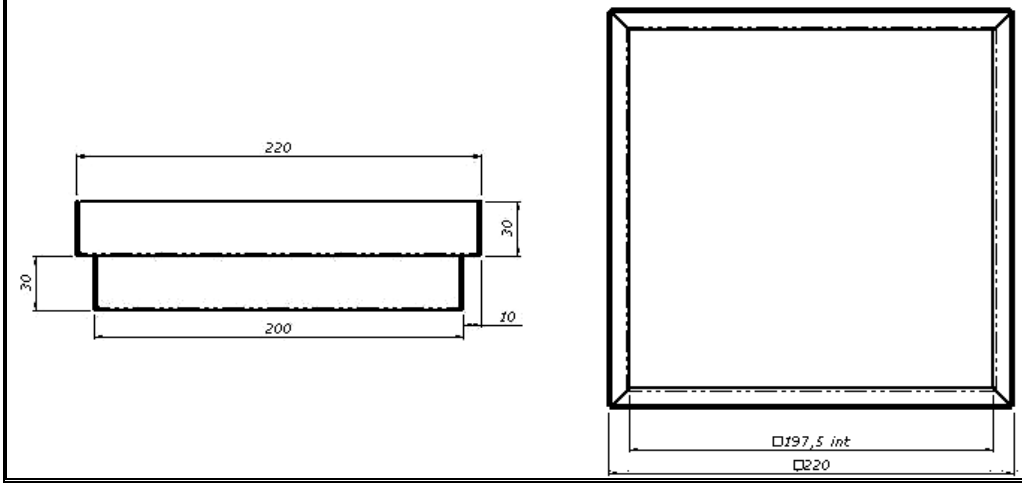
Câmara climática:

- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

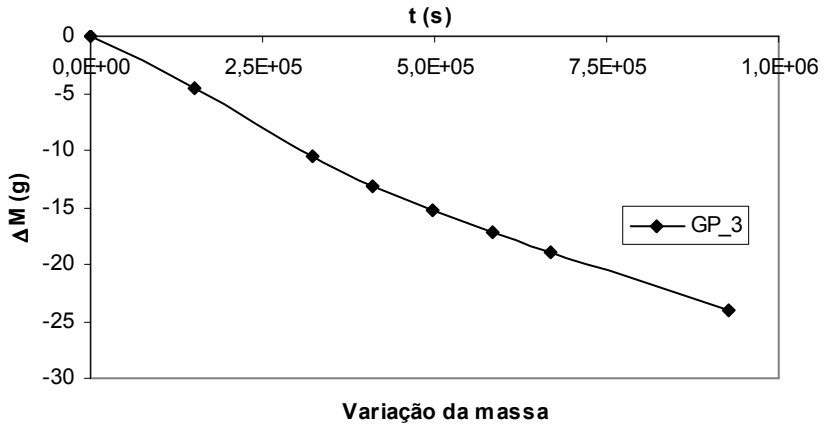
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

				Massa (g)		
Data	**Hora**	**t (s)**	**Δt (s)**	**-**	**-**	**GP_3**
04-05-06	16:45	0				2232,3
06-05-06	10:30	150300	150300			2227,8
08-05-06	10:05	321600	171300			2221,7
09-05-06	10:25	409200	87600			2219,1
10-05-06	10:30	495900	86700			2217
11-05-06	11:15	585000	89100			2215,1
12-05-06	10:30	668700	83700			2213,3
15-05-06	10:35	928200	259500			2208,2



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**-**	**-**	**GP_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	-	-	2,43E-08	2,4E-08	-
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	-	-	5,62E-07	5,6E-07	-
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	-	-	3,50E-09	3,5E-09	-
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	-	-	3,84E-11	3,8E-11	-
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	-	-	4,97	5,0	-
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	-	-	0,055	0,055	-

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV27	**GP2_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado pintados com tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com duas demãos de tinta vinílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

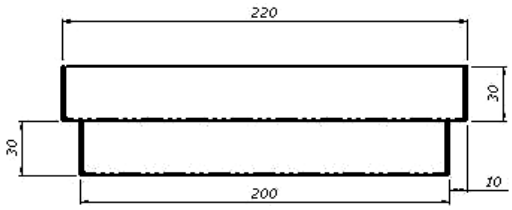
Câmara climática:

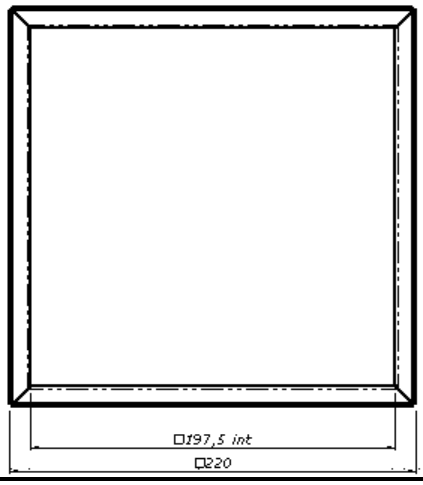
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

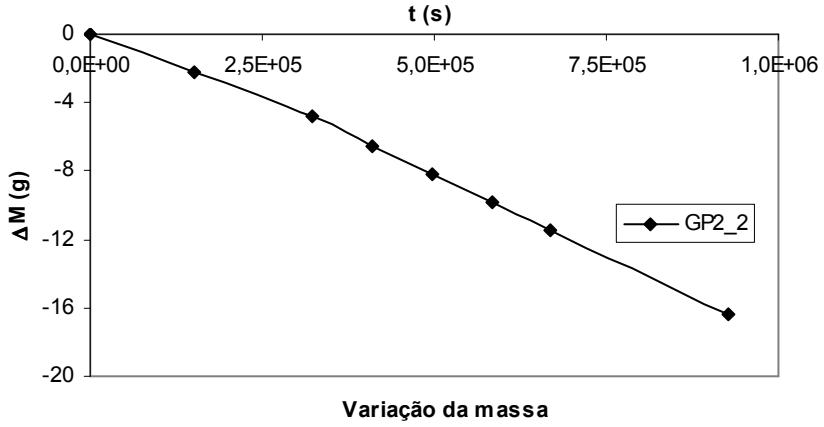
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
					GP2_2	
04-05-06	16:45	0			2203,3	
06-05-06	10:30	150300	150300		2201,0	
08-05-06	10:05	321600	171300		2198,5	
09-05-06	10:25	409200	87600		2196,7	
10-05-06	10:30	495900	86700		2195,2	
11-05-06	11:15	585000	89100		2193,5	
12-05-06	10:30	668700	83700		2191,9	
15-05-06	10:35	928200	259500		2186,9	



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**-**	**GP2_2**	**-**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %		1,89E-08		1,9E-08	
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$		4,38E-07		4,4E-07	
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$		2,50E-09		2,5E-09	
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$		2,75E-11		2,8E-11	
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$		6,93		6,9	
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$		0,076		0,076	
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV28	**GP2A_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado pintados com primário e tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

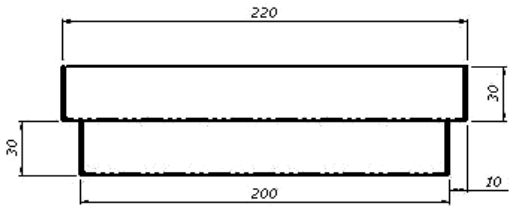
Câmara climática:

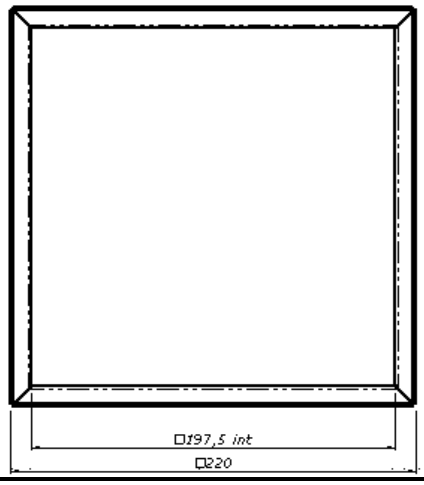
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

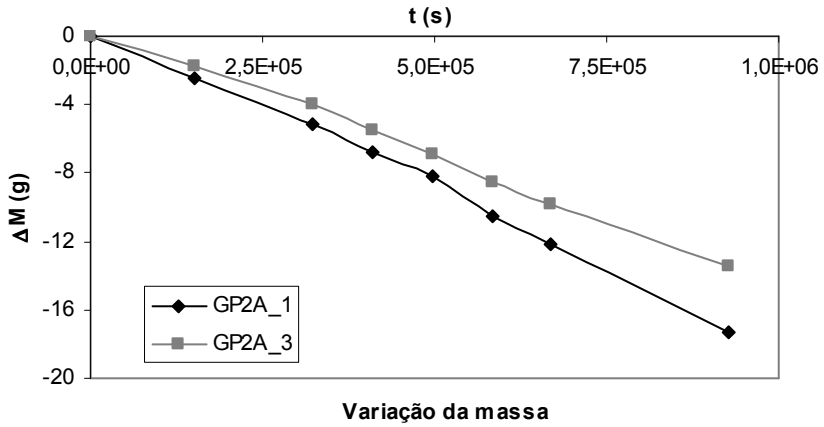
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

				Massa (g)		
Data	**Hora**	**t (s)**	**Δt (s)**	**GP2A_1**	**-**	**GP2A_3**
04-05-06	16:45	0		2207,5		2204,7
06-05-06	10:30	150300	150300	2205,1		2202,9
08-05-06	10:05	321600	171300	2202,3		2200,7
09-05-06	10:25	409200	87600	2200,7		2199,2
10-05-06	10:30	495900	86700	2199,3		2197,8
11-05-06	11:15	585000	89100	2197,0		2196,2
12-05-06	10:30	668700	83700	2195,3		2194,9
15-05-06	10:35	928200	259500	2190,1		2191,3



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GP2A_1**	**-**	**GP2A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	1,75E-08	-	1,55E-08	1,6E-08	1,4E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	4,04E-07	-	3,58E-07	4,0E-07	3,3E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90 \times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	2,26E-09	-	1,95E-09	2,1E-09	2,3E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,49E-11	-	2,14E-11	2,3E-11	2,5E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	7,67	-	8,92	8,3	0,89
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,0843	-	0,0981	0,091	0,010

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61 \times 10^{-5}}{(461.4 \times (T + 273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T + 273{,}15 - 37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV29	**GP3A_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Projectado Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de gesso projectado pintado com primário e tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,011) m^3

Equipamento Utilizado:

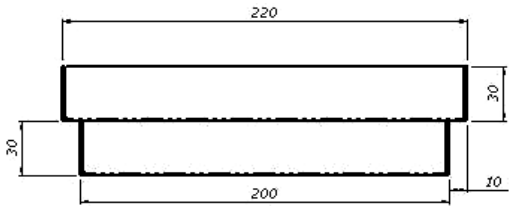
Câmara climática:

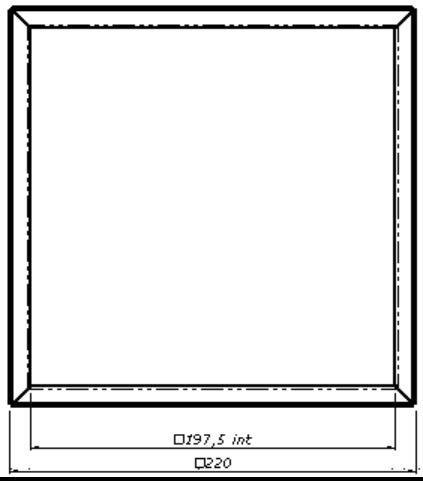
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

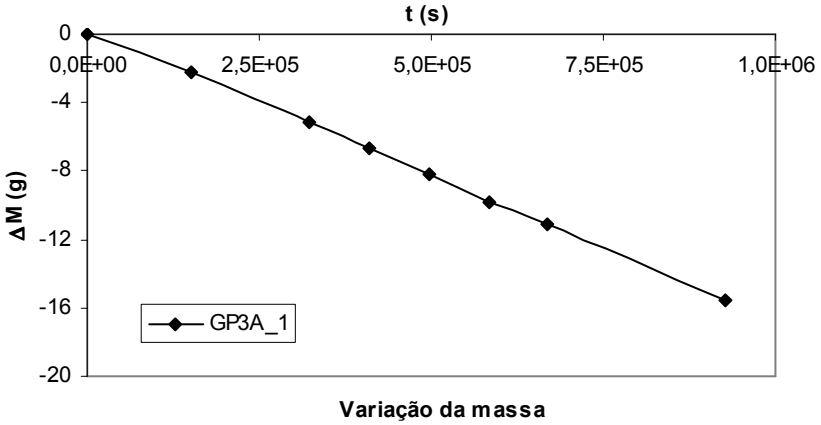
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

				Massa (g)		
Data	**Hora**	**t (s)**	**Δt (s)**	**GP3A_1**		
04-05-06	16:45	0		2124,9		
06-05-06	10:30	150300	150300	2122,7		
08-05-06	10:05	321600	171300	2119,8		
09-05-06	10:25	409200	87600	2118,2		
10-05-06	10:30	495900	86700	2116,7		
11-05-06	11:15	585000	89100	2115,1		
12-05-06	10:30	668700	83700	2113,8		
15-05-06	10:35	928200	259500	2109,4		



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GP3A_1**	**-**	**-**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	1,73E-08			1,7E-08	
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	4,00E-07			4,0E-07	
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	2,24E-09			2,2E-09	
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,46E-11			2,5E-11	
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	7,77			7,8	
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,085			0,085	

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV30	**GT_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

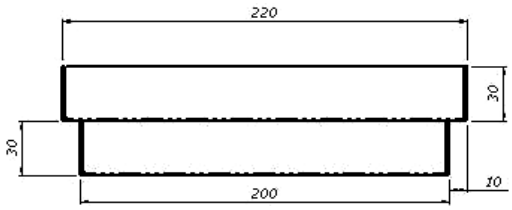
Câmara climática:

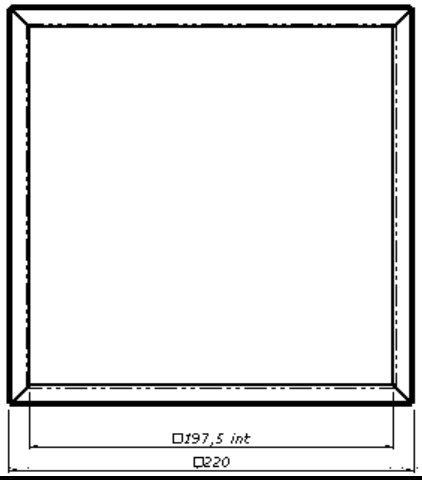
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

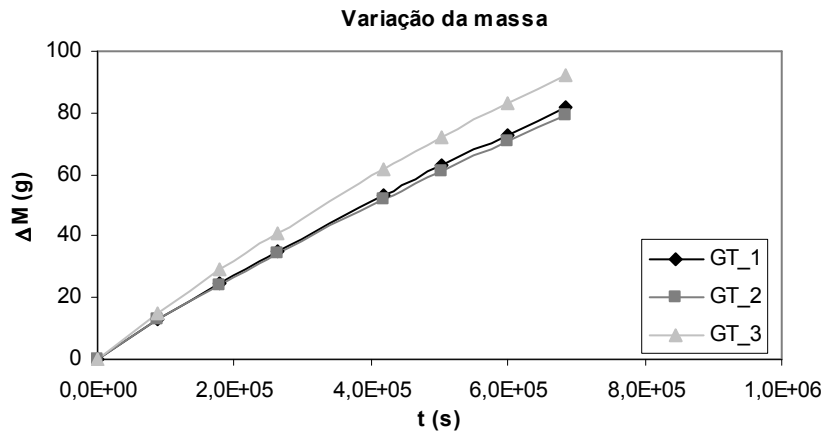
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GT_1	GT_2	GT_3
08-11-05	18:00	0		1603,8	1638,3	1532,3
09-11-05	18:00	86400	86400	1616,9	1651,0	1547,4
10-11-05	19:30	178200	91800	1628,7	1662,4	1561,2
11-11-05	18:45	261900	83700	1639,1	1672,4	1573,1
13-11-05	14:10	418200	156300	1657,2	1690,2	1593,9
14-11-05	13:45	503100	84900	1666,7	1699,5	1604,3
15-11-05	16:35	599700	96600	1676,7	1709,4	1615,3
16-11-05	16:15	684900	85200	1685,3	1717,8	1624,4



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GT_1**	**GT_2**	**GT_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	1,17E-07	1,14E-07	1,32E-07	1,2E-07	1,0E-08
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	2,69E-06	2,63E-06	3,06E-06	2,8E-06	2,3E-07
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	2,45E-09	2,38E-09	2,90E-09	2,6E-09	2,8E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,48E-11	2,45E-11	3,04E-11	2,7E-11	3,3E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	7,70	7,78	6,28	7,3	0,85
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,0778	0,0802	0,0659	0,075	0,008
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV31	**GT2_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintados com tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com duas demãos de tinta vinílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

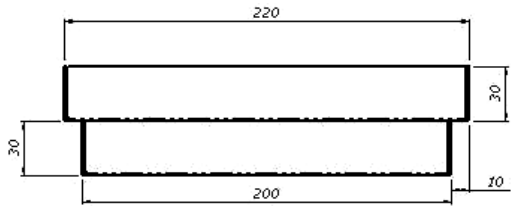
Câmara climática:

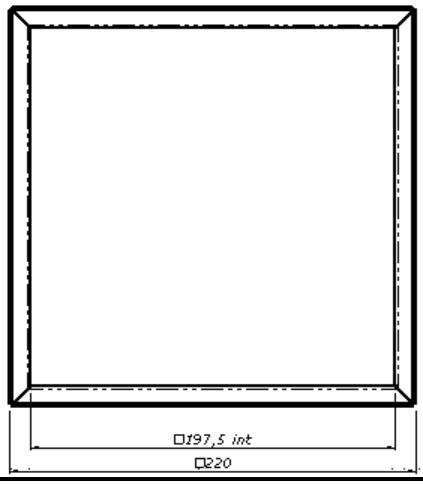
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

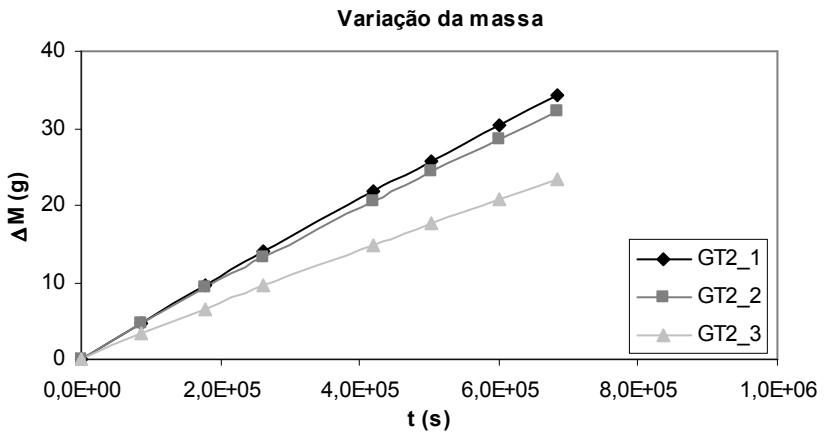
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GT2_1	GT2_2	GT2_3
08-11-05	18:00	0		1664,2	1753,7	1585,4
09-11-05	18:00	86400	86400	1669,0	1758,4	1588,7
10-11-05	19:30	178200	91800	1673,9	1763,0	1592,0
11-11-05	18:45	261900	83700	1678,2	1766,9	1594,9
13-11-05	14:10	418200	156300	1685,9	1774,2	1600,2
14-11-05	13:45	503100	84900	1690,0	1778,1	1603,1
15-11-05	16:35	599700	96600	1694,6	1782,4	1606,2
16-11-05	16:15	684900	85200	1698,5	1786,0	1608,9



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GT2_1**	**GT2_2**	**GT2_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	4,97E-08	4,67E-08	3,41E-08	4,4E-08	8,3E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,15E-06	1,08E-06	7,88E-07	1,0E-06	1,9E-07
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	9,03E-10	8,42E-10	6,00E-10	7,8E-10	1,6E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	9,03E-12	8,76E-12	6,18E-12	8,0E-12	1,6E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	21,15	21,82	30,93	24,6	5,46
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,212	0,227	0,319	0,25	0,058
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV32	**GT2A_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintados com primário e tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

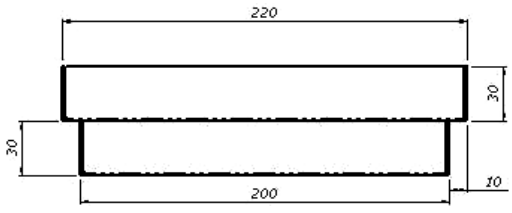
Câmara climática:

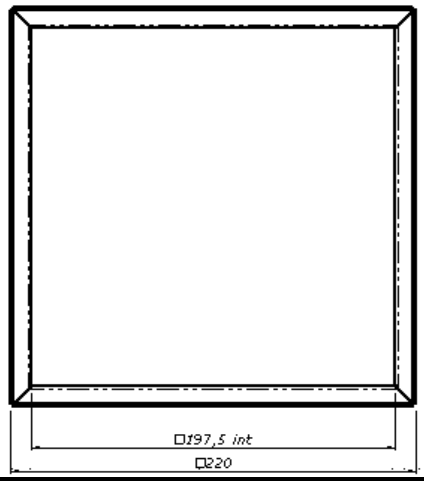
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: 23 ± 0,5 ºC

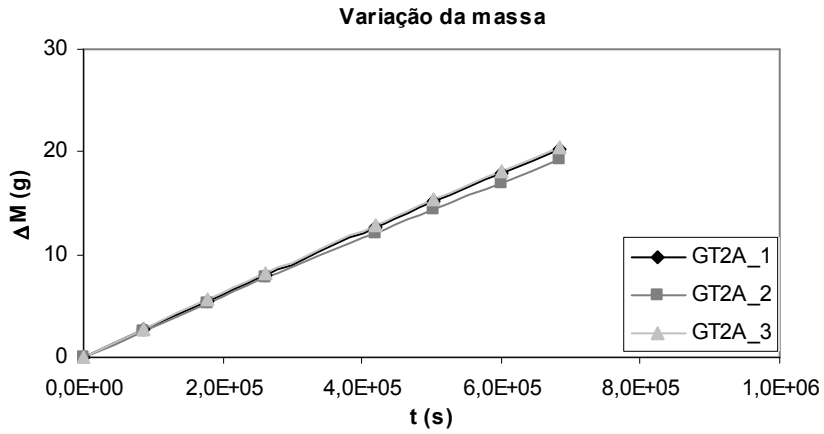
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3)%

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GT2A_1	GT2A_2	GT2A_3
08-11-05	18:00	0		1536,8	1560,9	1520,4
09-11-05	18:00	86400	86400	1539,6	1563,5	1523,2
10-11-05	19:30	178200	91800	1542,3	1566,2	1526,0
11-11-05	18:45	261900	83700	1544,8	1568,6	1528,6
13-11-05	14:10	418200	156300	1549,4	1573,0	1533,3
14-11-05	13:45	503100	84900	1551,9	1575,3	1535,8
15-11-05	16:35	599700	96600	1554,7	1577,9	1538,5
16-11-05	16:15	684900	85200	1557,0	1580,2	1540,9



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GT2A_1**	**GT2A_2**	**GT2A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	2,95E-08	2,86E-08	3,05E-08	3,0E-08	9,8E-10
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	6,81E-07	6,61E-07	7,06E-07	6,8E-07	2,3E-08
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	5,13E-10	4,97E-10	5,33E-10	5,1E-10	1,8E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	5,13E-12	5,17E-12	5,28E-12	5,0E-12	7,7E-14
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	37,22	36,93	36,18	36,8	0,54
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,372	0,384	0,358	0,37	0,013

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV33	**GT3_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintados com tinta acrílica

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento;
Pintura com duas demãos de tinta acrílica.

Dimensões dos Provetes:

(0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

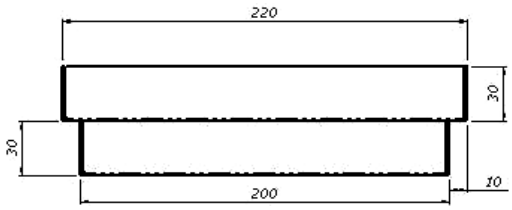
Câmara climática:

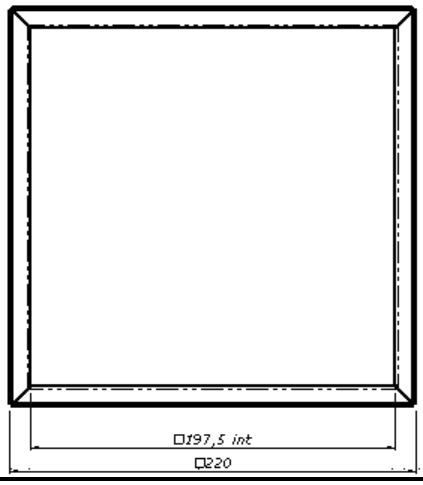
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

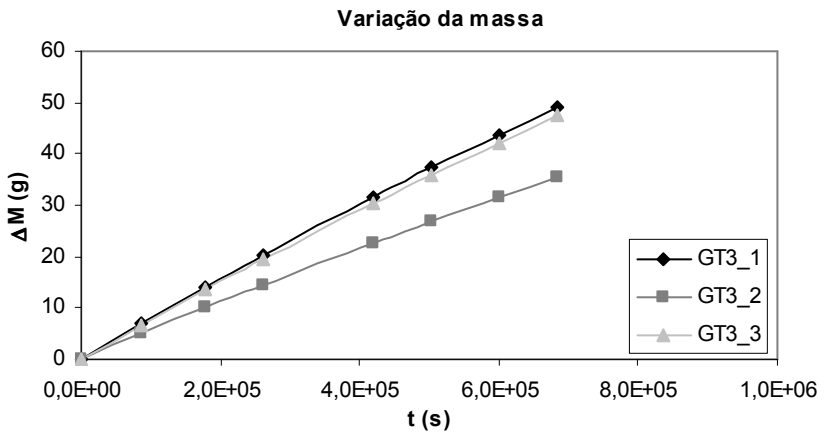
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GT3_1	GT3_2	GT3_3
08-11-05	18:00	0		1547,3	1704,7	1705,6
09-11-05	18:00	86400	86400	1554,3	1709,7	1712,4
10-11-05	19:30	178200	91800	1561,4	1714,9	1719,3
11-11-05	18:45	261900	83700	1567,7	1719,3	1725,2
13-11-05	14:10	418200	156300	1578,8	1727,4	1735,9
14-11-05	13:45	503100	84900	1584,7	1731,7	1741,5
15-11-05	16:35	599700	96600	1590,9	1736,4	1747,7
16-11-05	16:15	684900	85200	1596,3	1740,3	1753,2



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GT3_1**	**GT3_2**	**GT3_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	7,41E-08	5,35E-08	7,10E-08	6,6E-08	1,1E-08
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,71E-06	1,24E-06	1,64E-06	1,5E-06	2,6E-07
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,42E-09	9,78E-10	1,35E-09	1,2E-09	2,4E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,42E-11	1,02E-11	1,36E-11	1,3E-11	2,2E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	13,49	18,78	14,02	15,4	2,91
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,135	0,195	0,142	0,16	0,033
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV34	**GT3A_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintados com primário e tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

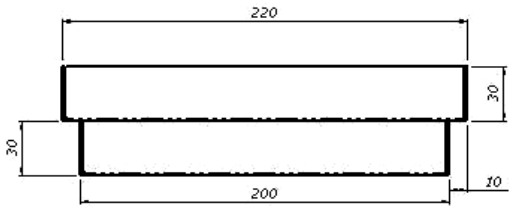
Câmara climática:

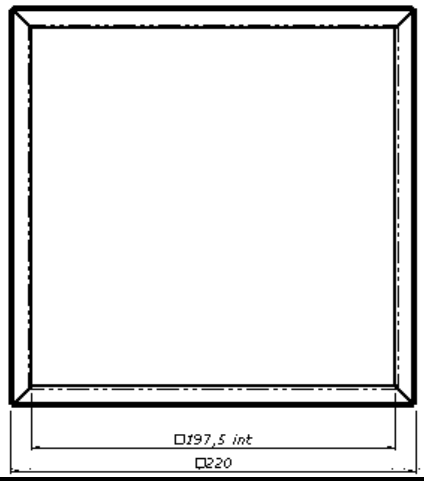
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

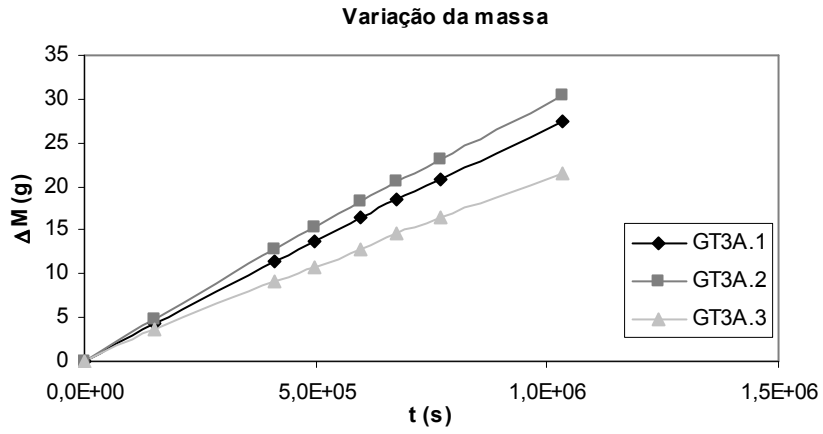
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GT3A_1	GT3A_2	GT3A_3
25-01-06	16:50	0		1566,7	1569,4	1591,7
27-01-06	10:30	150000	150000	1571,1	1574,3	1595,3
30-01-06	10:20	408600	258600	1578,2	1582,1	1600,8
31-01-06	10:20	495000	86400	1580,5	1584,7	1602,5
01-02-06	14:35	596700	101700	1583,1	1587,6	1604,6
02-02-06	12:35	675900	79200	1585,2	1589,9	1606,3
03-02-06	14:45	770100	94200	1587,6	1592,6	1608,2
06-02-06	15:35	1032300	262200	1594,1	1599,8	1613,3



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GT3A_1**	**GT3A_2**	**GT3A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	2,66E-08	2,95E-08	2,08E-08	2,6E-08	4,4E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	6,21E-07	6,89E-07	4,86E-07	6,0E-07	1,0E-07
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	4,66E-10	5,20E-10	3,60E-10	4,5E-10	8,1E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	5,10E-12	5,36E-12	3,88E-12	4,8E-12	7,9E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	37,43	35,66	49,27	40,8	7,40
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,410	0,367	0,530	0,44	0,085

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV35	**GT_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

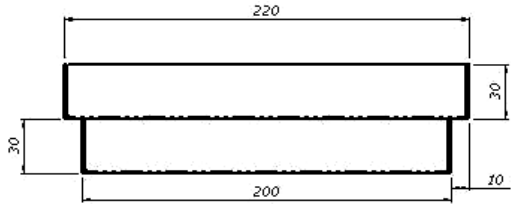
Câmara climática:

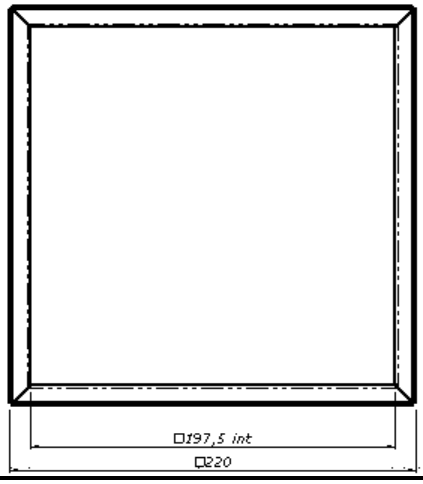
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

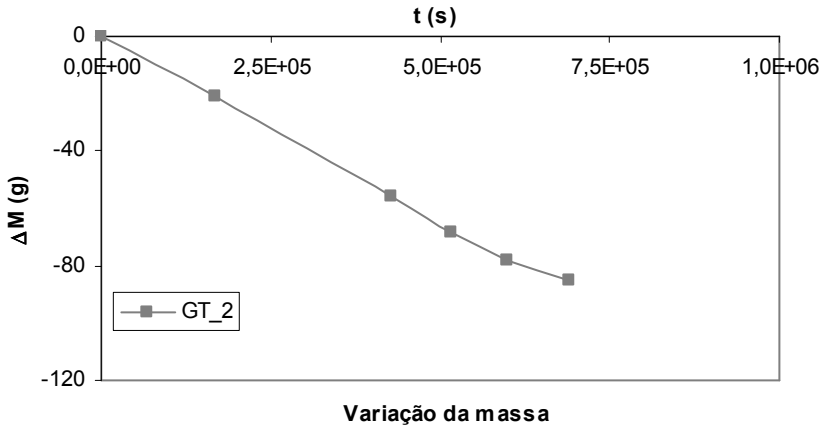
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				-	GT_2	-
04-01-06	16:00	0			1988,6	
06-01-06	15:00	169200	169200		1967,4	
09-01-06	15:00	428400	259200		1932,6	
10-01-06	15:00	514800	86400		1920,4	
11-01-06	14:30	599400	84600		1910,5	
12-01-06	15:45	690300	90900		1903,6	



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**-**	**GT_2**	**-**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %		1,27E-07		1,3E-07	
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$		2,94E-06		2,9E-06	
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$		3,26E-09		3,3E-09	
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$		3,36E-11		3,4E-11	
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$		5,68		5,7	
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$		0,059		0,059	

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV36	**GT2_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintado com tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com duas demãos de tinta vinílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

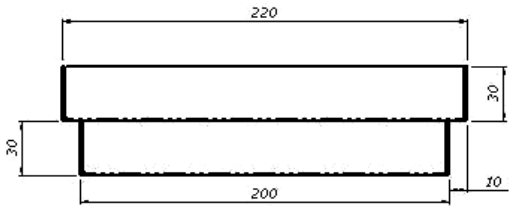
Câmara climática:

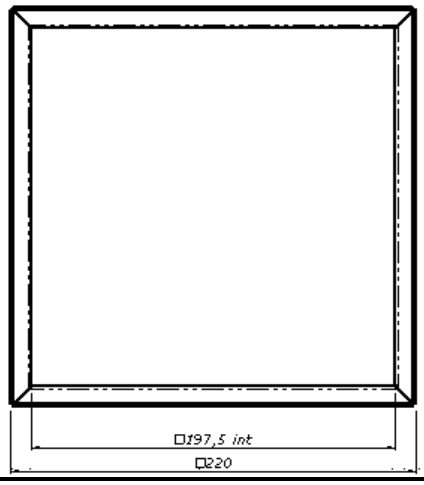
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

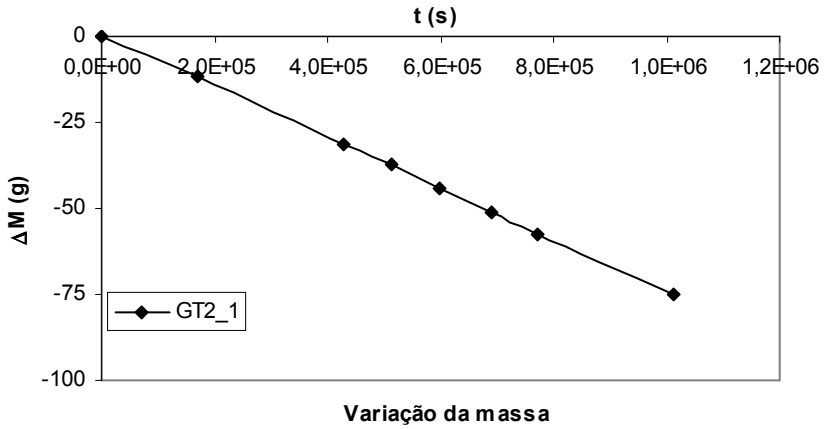
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

				Massa (g)		
Data	**Hora**	**t (s)**	**Δt (s)**	**GT2_1**	**-**	**-**
04-01-06	16:00	0		1987,3		
06-01-06	15:00	169200	169200	1975,6		
09-01-06	15:00	428400	259200	1956,0		
10-01-06	15:00	514800	86400	1949,8		
11-01-06	14:30	599400	84600	1943,2		
12-01-06	15:45	690300	90900	1935,9		
13-01-06	14:30	772200	81900	1929,5		
16-01-06	09:40	1014000	241800	1912,4		



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GT2_1**	**-**	**-**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	7,63E-08	-	-	7,6E-08	-
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,76E-06	-	-	1,8E-06	-
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,71E-09	-	-	1,7E-09	-
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,71E-11	-	-	1,7E-11	-
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	11,20	-	-	11,2	-
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,112	-	-	0,11	-

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV37	**GT2A_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintado com primário e tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

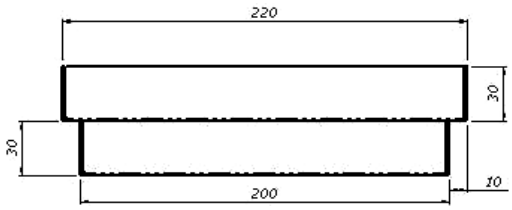
Câmara climática:

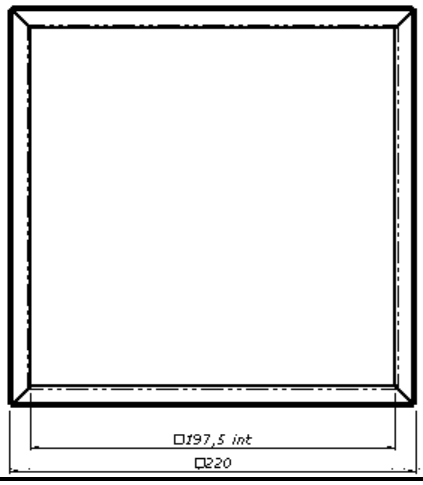
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

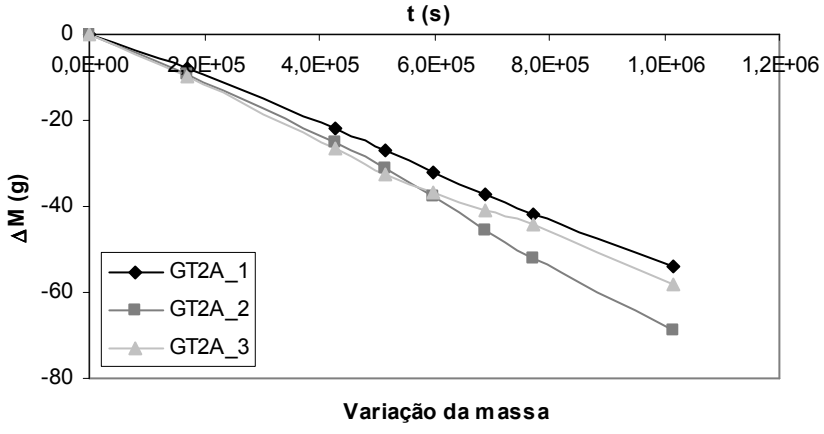
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GT2A_1	GT2A_2	GT2A_3
04-01-06	16:00	0		1960,1	1945,9	1970,7
06-01-06	15:00	169200	169200	1952,3	1936,8	1961
09-01-06	15:00	428400	259200	1938,2	1920,6	1944,2
10-01-06	15:00	514800	86400	1933,2	1914,8	1938,1
11-01-06	14:30	599400	84600	1928,2	1908	1933,8
12-01-06	15:45	690300	90900	1922,8	1900,4	1929,9
13-01-06	14:30	772200	81900	1918,1	1893,8	1926,7
16-01-06	09:40	1014000	241800	1906,1	1877,1	1912,5



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GT2A_1**	**GT2A_2**	**GT2A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	5,69E-08	7,14E-08	6,09E-08	6,3E-08	7,5E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,31E-06	1,65E-06	1,41E-06	1,5E-06	1,7E-07
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,21E-09	1,57E-09	1,31E-09	1,4E-09	1,9E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,21E-11	1,64E-11	1,30E-11	1,4E-11	2,3E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	15,78	11,67	14,73	14,1	2,14
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,158	0,121	0,146	0,14	0,019
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV38	GT3_TH

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintado tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com duas demãos de tinta acrílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

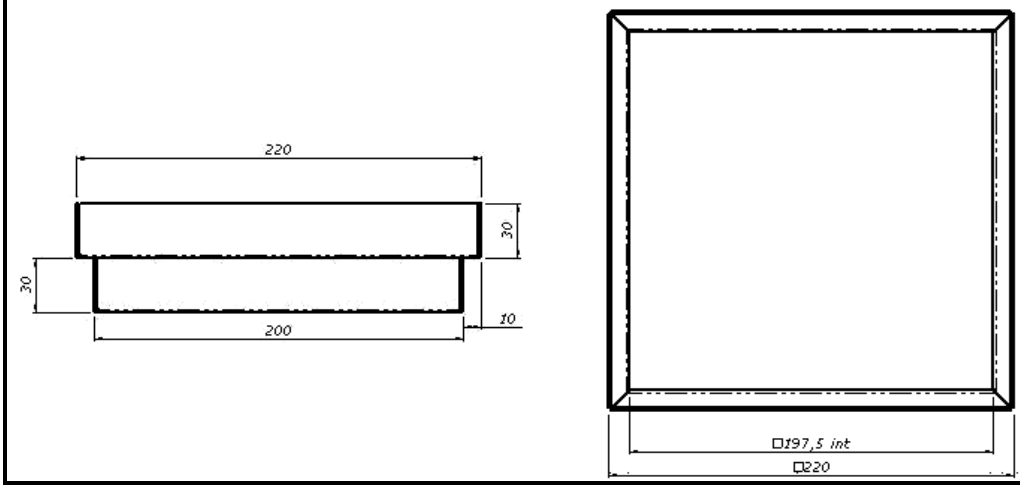
Câmara climática:

- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

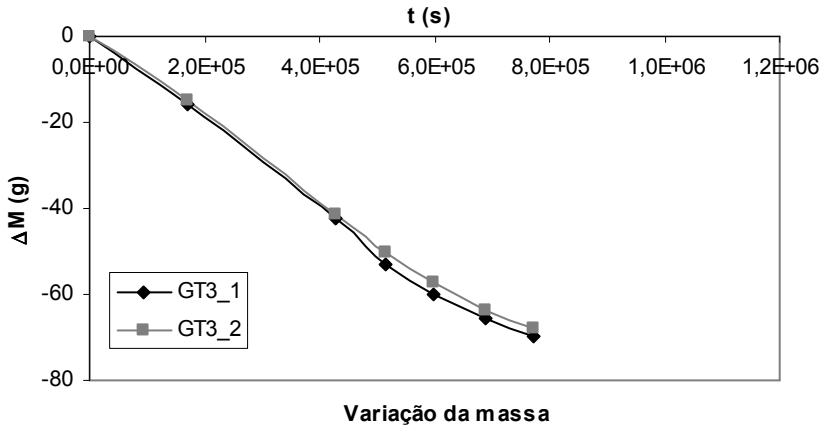
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GT3_1	GT3_2	
04-01-06	16:00	0		1974,8	1992,4	
06-01-06	15:00	169200	169200	1959,1	1977,6	
09-01-06	15:00	428400	259200	1932,3	1950,8	
10-01-06	15:00	514800	86400	1922,0	1942,3	
11-01-06	14:30	599400	84600	1915,0	1935,0	
12-01-06	15:45	690300	90900	1909,2	1928,9	
13-01-06	14:30	772200	81900	1904,9	1924,5	



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GT3_1**	**GT3_2**	**-**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	9,83E-08	9,48E-08	-	9,7E-08	2,4E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	2,27E-06	2,19E-06	-	2,2E-06	5,6E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	2,33E-09	2,22E-09	-	2,3E-09	7,2E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,33E-11	2,31E-11	-	2,3E-11	9,5E-14
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	8,21	8,26	-	8,2	0,03
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,0821	0,0859	-	0,084	0,003

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV39	**GT3A_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintado com primário e tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

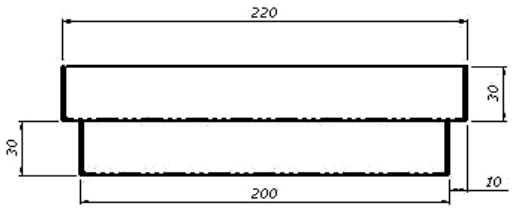
Câmara climática:

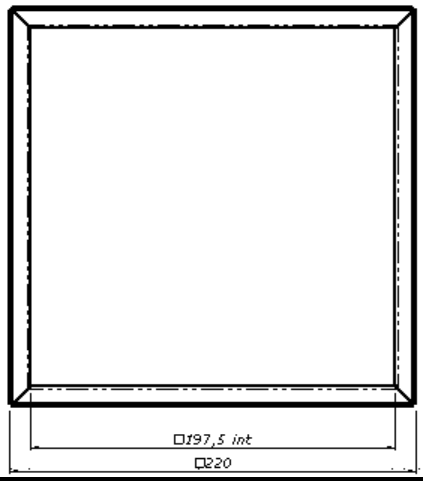
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

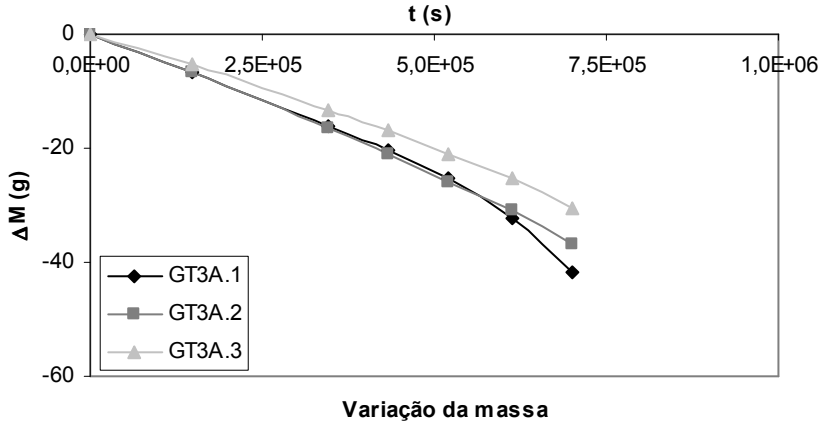
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GT3A_1	GT3A_2	GT3A_3
16-02-06	16:30	0		1916,8	1897,2	1895,5
18-02-06	10:00	149400	149400	1910	1890,5	1890,1
20-02-06	16:30	345600	196200	1900,6	1880,7	1882,2
21-02-06	16:30	432000	86400	1896,3	1876,2	1878,5
22-02-06	16:45	519300	87300	1891,6	1871,3	1874,6
23-02-06	18:45	612900	93600	1884,6	1866,3	1870,4
24-02-06	19:10	700800	87900	1875	1860,4	1864,8



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GT3A_1**	**GT3A_2**	**GT3A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	5,12E-08	5,06E-08	4,10E-08	4,8E-08	5,7E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,20E-06	1,18E-06	9,58E-07	1,1E-06	1,3E-07
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,09E-09	1,07E-09	8,50E-10	1,0E-09	1,3E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,19E-11	1,11E-11	9,15E-12	1,1E-11	1,4E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	16,04	17,28	20,87	18,1	2,51
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,176	0,178	0,225	0,19	0,028
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV40	**GT_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

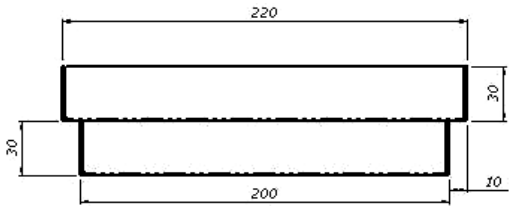
Câmara climática:

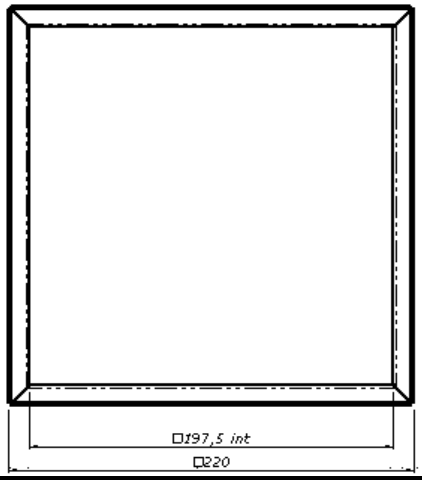
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

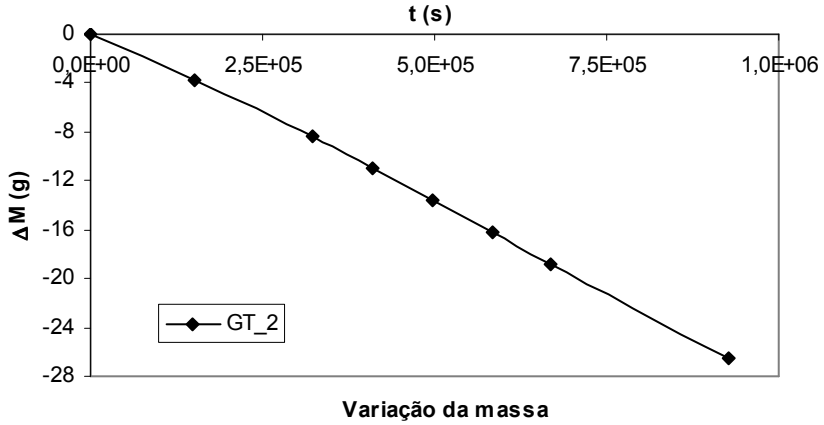
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

				Massa (g)		
Data	**Hora**	**t (s)**	**Δt (s)**	**-**	**GT_2**	**-**
04-05-06	16:45	0			2093	
06-05-06	10:30	150300	150300		2089,2	
08-05-06	10:05	321600	171300		2084,6	
09-05-06	10:25	409200	87600		2082,0	
10-05-06	10:30	495900	86700		2079,4	
11-05-06	11:15	585000	89100		2076,7	
12-05-06	10:30	668700	83700		2074,2	
15-05-06	10:35	928200	259500		2066,4	



Variação da massa

PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**-**	**GT_2**	**-**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %		2,79E-08		2,8E-08	
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$		6,45E-07		6,4E-07	
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$		4,26E-09		4,3E-09	
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$		4,26E-11		4,3E-11	
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$		4,48		4,5	
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$		0,045		0,045	

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV41	**GT2_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintado com tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com duas demãos de tinta vinílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

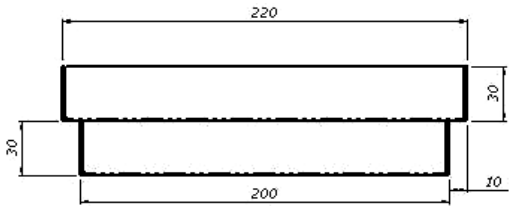
Câmara climática:

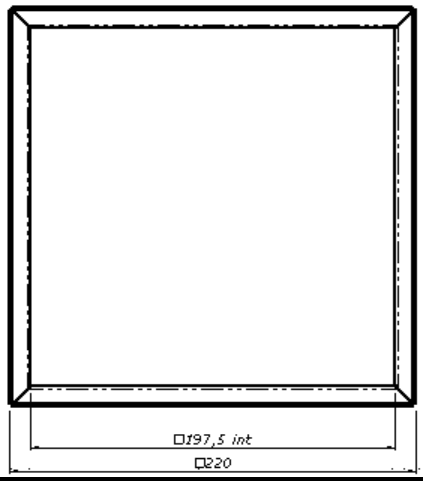
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

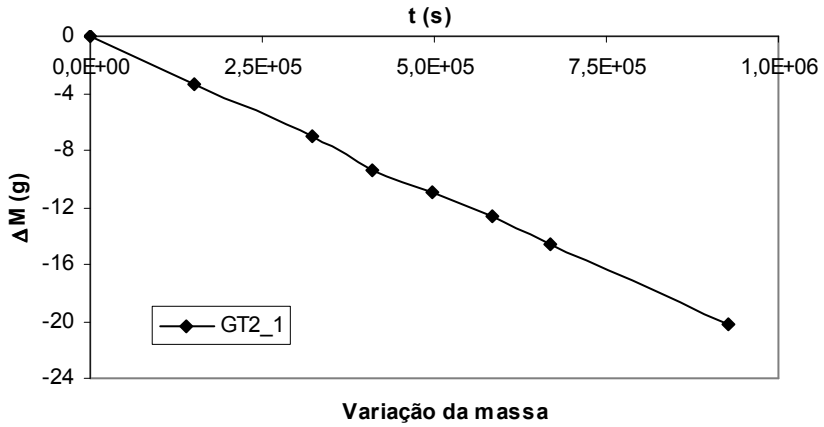
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

				Massa (g)		
Data	**Hora**	**t (s)**	**Δt (s)**	**GT2_1**	**-**	**-**
04-05-06	16:45	0		2117,1		
06-05-06	10:30	150300	150300	2113,8		
08-05-06	10:05	321600	171300	2110,0		
09-05-06	10:25	409200	87600	2107,7		
10-05-06	10:30	495900	86700	2106,2		
11-05-06	11:15	585000	89100	2104,4		
12-05-06	10:30	668700	83700	2102,6		
15-05-06	10:35	928200	259500	2096,9		



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GT2_1**	**-**	**-**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	2,14E-08			2,1E-08	-
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	4,94E-07			4,9E-07	-
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	2,94E-09			2,9E-09	-
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,94E-11			2,9E-11	-
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	6,50			6,5	-
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,065			0,065	-

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV42	**GT2A_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintado com primário e tinta vinílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

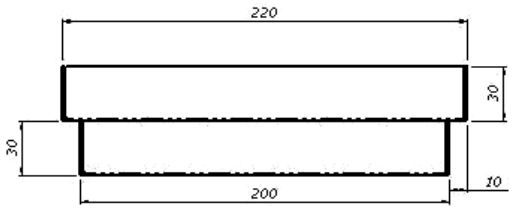
Câmara climática:

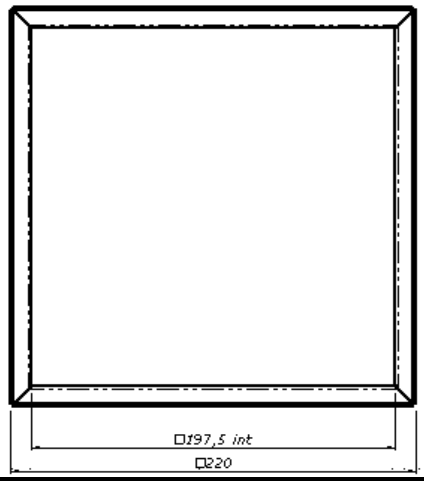
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

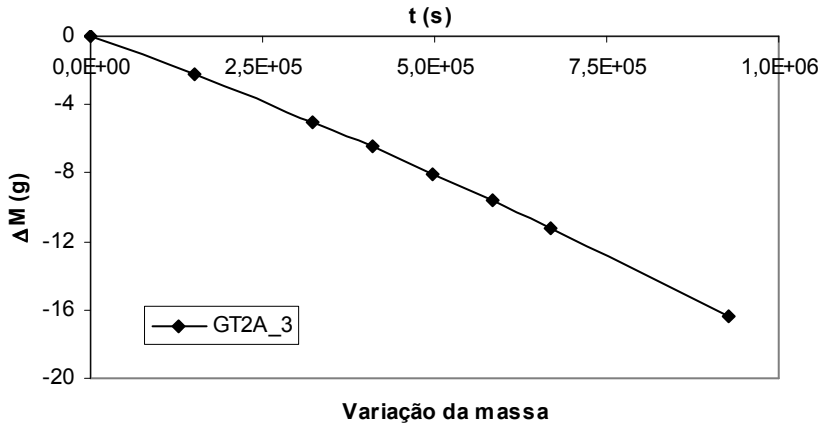
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
						GT2A_3
04-05-06	16:45	0				2109,3
06-05-06	10:30	150300	150300			2107,0
08-05-06	10:05	321600	171300			2104,3
09-05-06	10:25	409200	87600			2102,8
10-05-06	10:30	495900	86700			2101,3
11-05-06	11:15	585000	89100			2099,7
12-05-06	10:30	668700	83700			2098,1
15-05-06	10:35	928200	259500			2092,9



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA			**GT2A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %			1,73E-08	1,7E-08	
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$			4,01E-07	4,0E-07	
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$			2,24E-09	2,2E-09	
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$			2,46E-11	2,5E-11	
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$			7,75	7,8	
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$			0,085	0,085	

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV43	**GT3A_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintado com primário e tinta acrílica
Método de Preparação dos Provetes: Preparação da amassadura; Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Equipamento Utilizado:

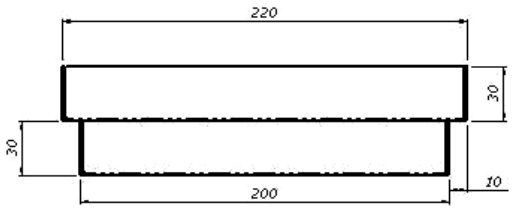
Câmara climática:

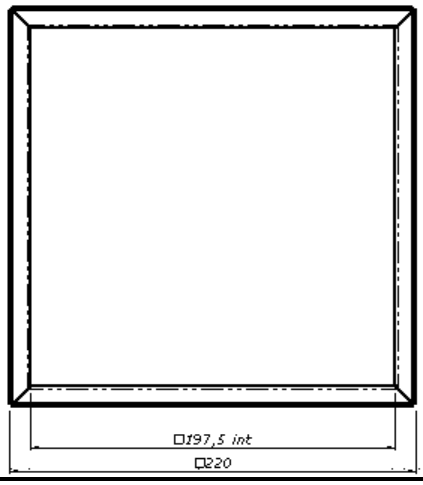
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

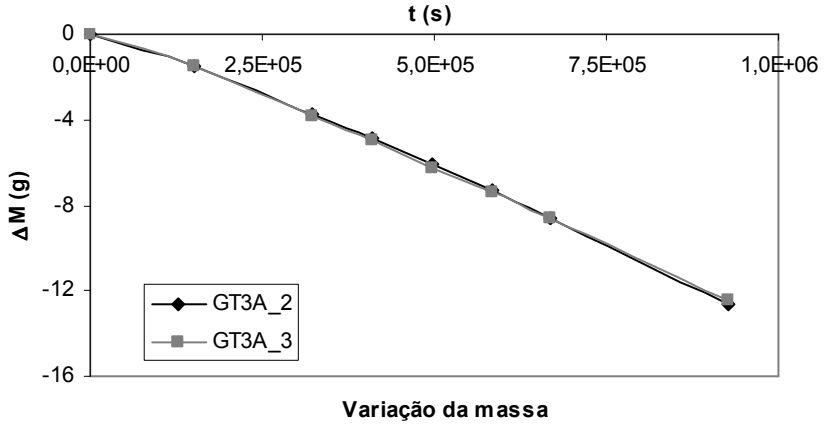
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
					GT3A_2	GT3A_3
04-05-06	16:45	0			1967,4	1991,1
06-05-06	10:30	150300	150300		1965,9	1989,6
08-05-06	10:05	321600	171300		1963,7	1987,3
09-05-06	10:25	409200	87600		1962,5	1986,1
10-05-06	10:30	495900	86700		1961,3	1984,8
11-05-06	11:15	585000	89100		1960,1	1983,7
12-05-06	10:30	668700	83700		1958,8	1982,5
15-05-06	10:35	928200	259500		1954,8	1978,7



Variação da massa

PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA		**GT3A_2**	**GT3A_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %		1,36E-08	1,37E-08	1,4E-08	4,7E-11
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$		3,15E-07	3,17E-07	3,2E-07	1,1E-09
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67 + 90 \times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$		1,67E-09	1,68E-09	1,7E-09	6,8E-12
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$		1,67E-11	1,68E-11	1,7E-11	6,8E-14
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$		11,43	11,37	11,4	0,05
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$		0,114	0,114	0,11	0,000

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1 + \exp(-2 \cdot \pi \cdot bl / d)}\right) = 1{,}04$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61 \times 10^{-5}}{(461.4 \times (T + 273.16))} ; \; p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T + 273{,}15 - 37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV44	**GC_41_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado – exercício comum "Annex 41"
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

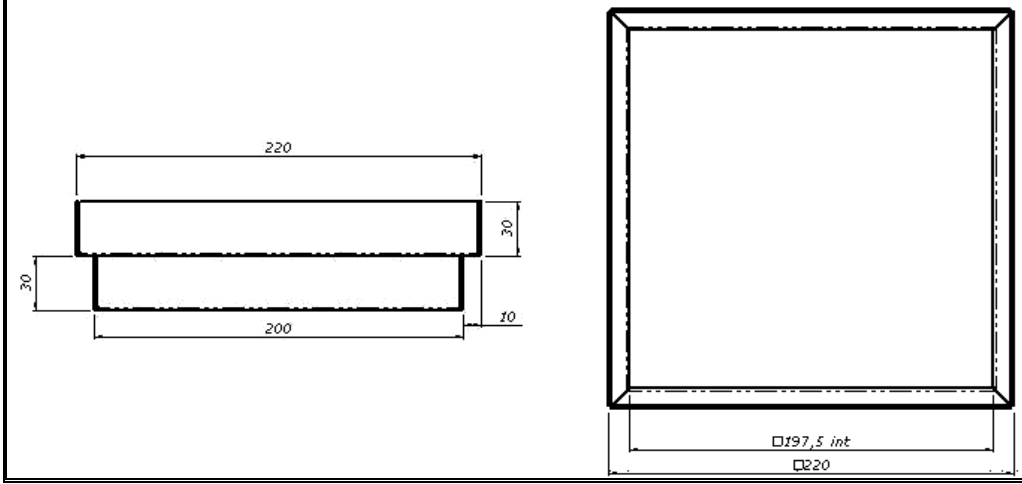
Câmara climática:

- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

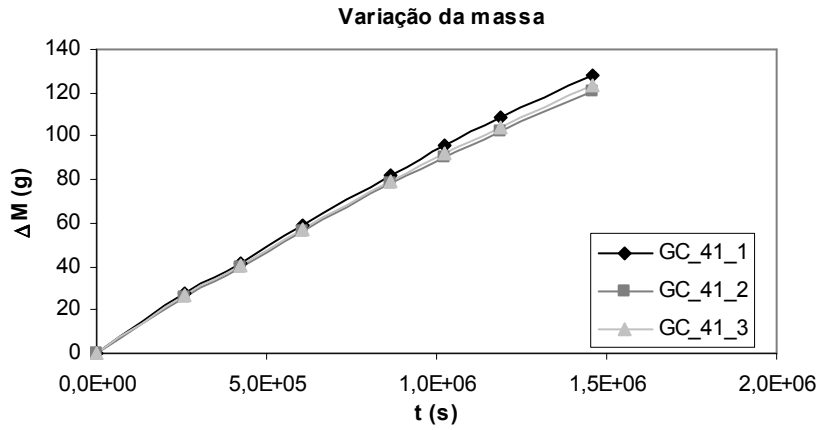
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC_41_1	GC_41_2	GC_41_3
17-12-04	18:00	0		1784,01	1735,65	1738,27
20-12-04	18:00	259200	259200	1811,20	1761,42	1764,61
22-12-04	15:30	423000	163800	1825,84	1775,56	1779,03
24-12-04	18:00	604800	181800	1842,53	1791,65	1795,36
27-12-04	18:45	866700	261900	1866,13	1813,66	1817,91
29-12-04	14:45	1025100	158400	1879,45	1826,00	1830,52
31-12-04	12:00	1188000	162900	1892,37	1837,98	1842,70
03-01-05	14:30	1456200	268200	1912,29	1856,36	1861,56



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC_41 _1**	**GC_41 _2**	**GC_41 _3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	8,80E-08	8,29E-08	8,46E-08	8,5E-08	2,6E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	2,07E-06	1,95E-06	1,99E-06	2,0E-06	6,1E-08
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,77E-09	1,65E-09	1,69E-09	1,7E-09	6,2E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,22E-11	2,06E-11	2,11E-11	2,1E-11	7,8E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	8,62	9,25	9,03	9,0	0,32
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,108	0,116	0,113	0,11	0,004

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV45	**GC3A_41_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta acrílica – exercício comum "Annex 41"
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

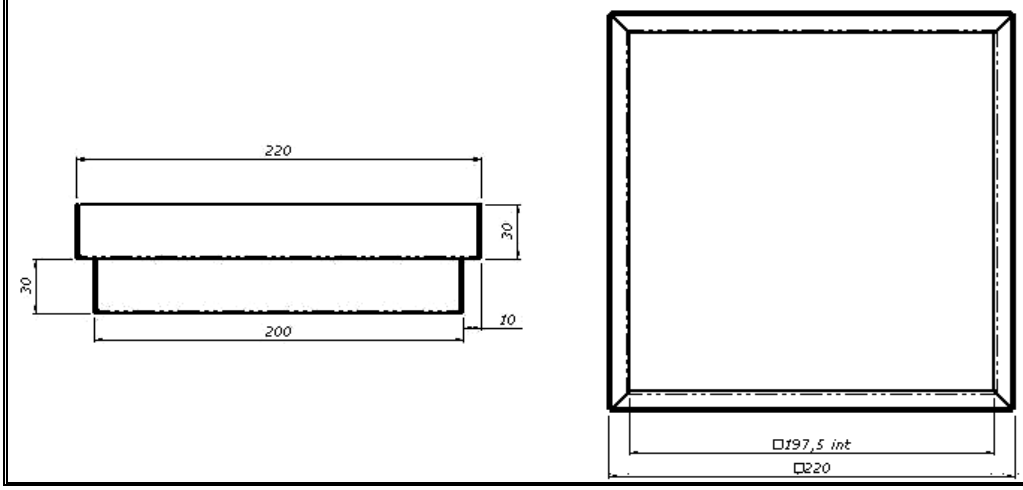
Câmara climática:

- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

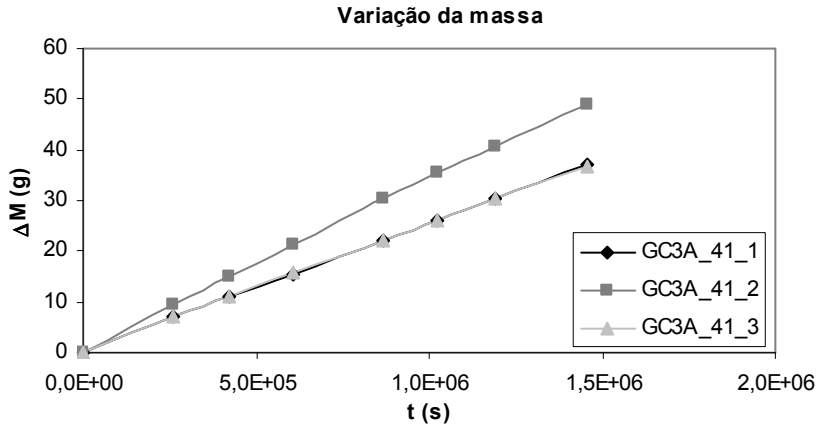
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC3A_41_1	GC3A_41_2	GC3A_41_3
17-12-04	18:00	0		1746,12	1736,83	1770,77
20-12-04	18:00	259200	259200	1753,04	1746,34	1777,73
22-12-04	15:30	423000	163800	1757,05	1751,96	1781,74
24-12-04	18:00	604800	181800	1761,64	1758,33	1786,38
27-12-04	18:45	866700	261900	1768,41	1767,3	1793,04
29-12-04	14:45	1025100	158400	1772,31	1772,42	1796,99
31-12-04	12:00	1188000	162900	1776,44	1777,56	1801,00
03-01-05	14:30	1456200	268200	1783,05	1785,92	1807,57



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC3A _41_1**	**GC3A _41_2**	**GC3A _41_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	2,53E-08	3,38E-08	2,52E-08	2,8E-08	4,9E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	5,95E-07	7,94E-07	5,92E-07	6,6E-07	1,2E-07
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	4,45E-10	6,05E-10	4,43E-10	5,0E-10	9,3E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	5,56E-12	7,56E-12	5,54E-12	6,2E-12	1,2E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	34,34	25,27	34,51	31,4	5,29
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,429	0,316	0,431	0,39	0,066

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV46	**GC4A_41_TS**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta de Latex

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta de latex – exercício comum "Annex 41"

Método de Preparação dos Provetes:

Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente;
Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta de latex
Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.

Dimensões dos Provetes:

(0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

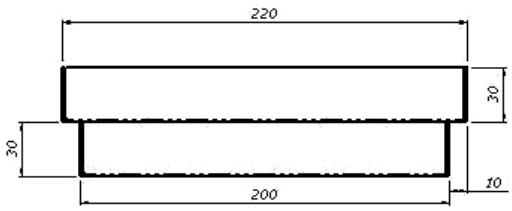
Câmara climática:

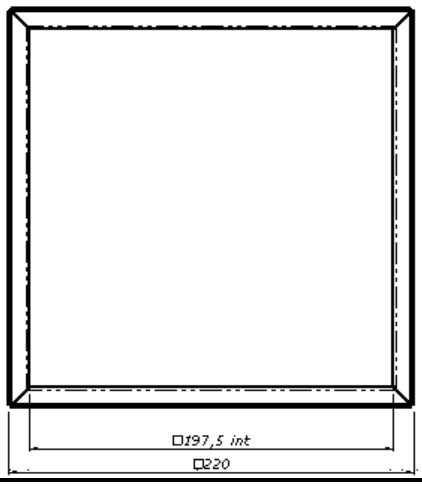
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < ± 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cálcio Cloreto dihidrato ($CaCl_2$);
- O $CaCl_2$ é seco a 200-220 ºC e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (0 + 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

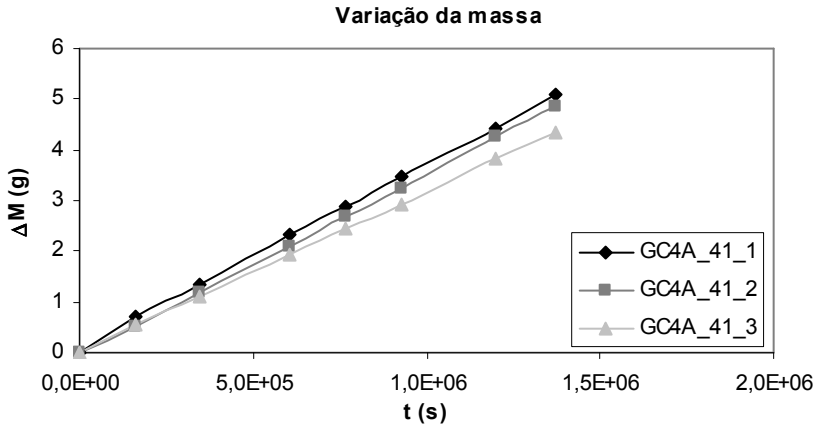
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC4A_41_1	GC4A_41_2	GC4A_41_3
20-12-04	18:00	0		1807,68	1865,19	1827,95
22-12-04	15:30	163800	163800	1808,38	1865,70	1828,50
24-12-04	18:00	345600	181800	1809,02	1866,37	1829,07
27-12-04	18:45	607500	261900	1810,00	1867,30	1829,90
29-12-04	14:45	765900	158400	1810,55	1867,87	1830,40
31-12-04	12:00	928800	162900	1811,14	1868,41	1830,88
03-01-05	14:30	1197000	268200	1812,10	1869,44	1831,76
05-01-05	15:00	1369800	172800	1812,77	1870,05	1832,31



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC4A _41_1**	**GC4A _41_2**	**GC4A _41_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	3,61E-09	3,59E-09	3,14E-09	3,4E-09	2,6E-10
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	8,49E-08	8,45E-08	7,40E-08	8,1E-08	6,2E-09
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	6,09E-11	6,06E-11	5,30E-11	5,8E-11	4,5E-12
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	7,61E-13	7,58E-13	6,63E-13	7,3E-13	5,6E-14
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	250,99	252,06	288,19	263,7	21,17
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	3,137	3,151	3,602	3,30	0,265

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}\,;\; p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV47	**GC_41_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado – exercício comum "Annex 41"
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

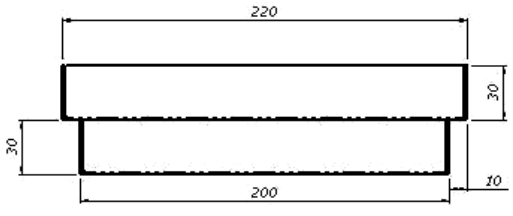
Câmara climática:

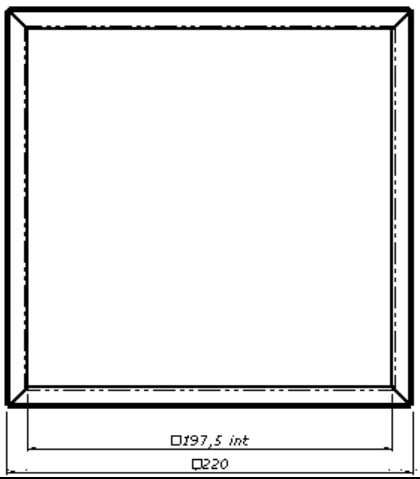
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

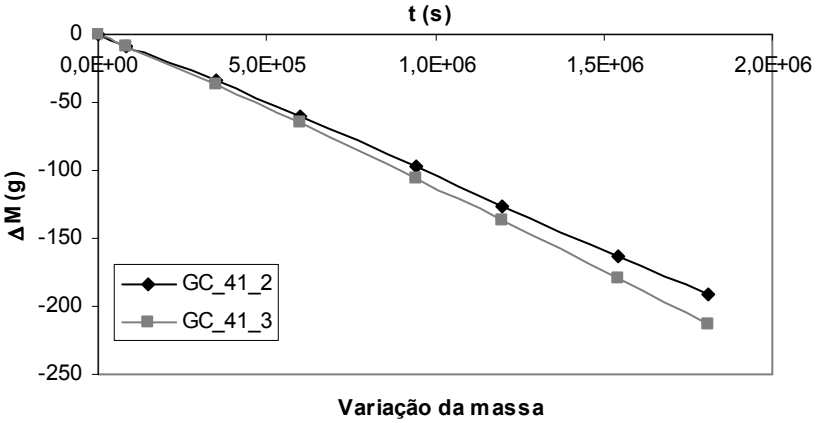
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)		Massa (g) GC_41_2	Massa (g) GC_41_3
16-09-04	18:15	0			1994,54	1984,12
17-09-04	18:05	85800	85800		1986,22	1975,37
20-09-04	18:45	347400	261600		1960,07	1947,53
23-09-04	16:15	597600	250200		1933,72	1919,84
27-09-04	17:10	946500	348900		1896,85	1878,03
30-09-04	15:00	1197900	251400		1867,90	1847,62
04-10-04	15:15	1544400	346500		1831,52	1804,27
07-10-04	17:30	1811700	267300		1803,66	1771,03
11-10-04	16:30	2153700	342000		1767,48	1724,31



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA		**GC_41_2**	**GC_41_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %		1,07E-07	1,21E-07	1,1E-07	9,7E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$		2,52E-06	2,85E-06	2,7E-06	2,3E-07
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$		2,66E-09	3,12E-09	2,9E-09	3,3E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$		3,33E-11	3,91E-11	3,6E-11	4,1E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$		5,74	4,89	5,3	0,60
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$		0,0717	0,0611	0,066	0,007

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV48	GC3A_41_TH

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintadas com primário e tinta acrílica – exercício comum "Annex 41"
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

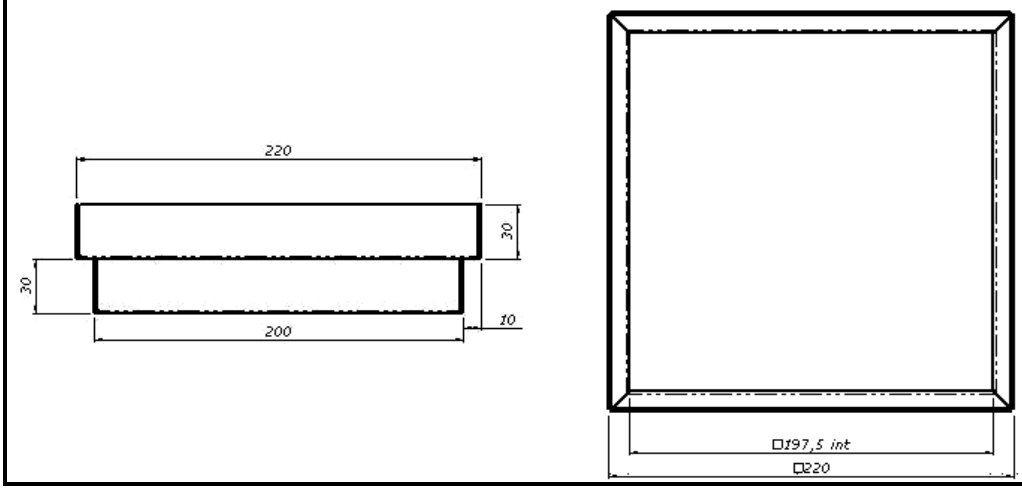
Câmara climática:

- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

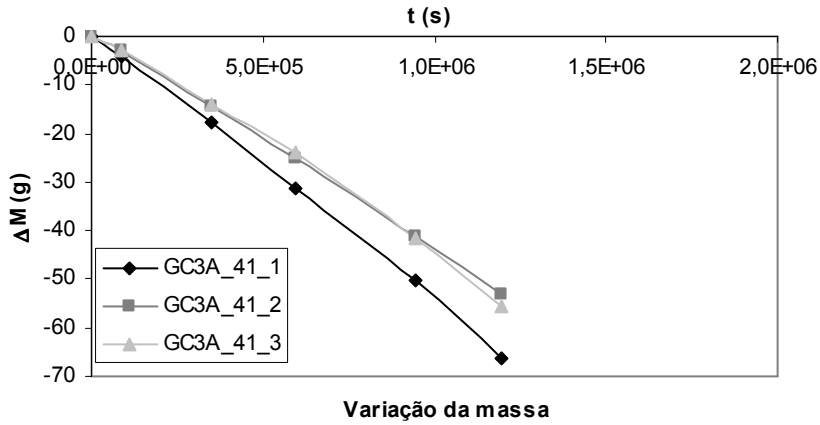
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC3A_41_1	GC3A_41_2	GC3A_41_3
16-09-04	18:15	0		1965,37	2007,52	1977,08
17-09-04	18:05	85800	85800	1961,29	2004,58	1974,11
20-09-04	18:45	347400	261600	1947,51	1993,16	1963,13
23-09-04	16:15	597600	250200	1934,22	1982,49	1953,14
27-09-04	17:10	946500	348900	1915,13	1966,35	1935,65
30-09-04	15:00	1197900	251400	1899,27	1954,27	1921,3
04-10-04	15:15	1544400	346500	1874,9	1935,18	1898,62



Variação da massa

PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC3A _41_1**	**GC3A _41_2**	**GC3A _41_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	5,48E-08	4,45E-08	4,61E-08	4,8E-08	5,5E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,29E-06	1,05E-06	1,09E-06	1,1E-06	1,3E-07
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	1,18E-09	9,39E-10	9,76E-10	1,0E-09	1,3E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,48E-11	1,17E-11	1,22E-11	1,3E-11	1,7E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	12,90	16,27	15,66	14,9	1,80
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,161	0,203	0,196	0,19	0,022

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}\,;\; p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV49	**GC4A_41_TH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta de Latex

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Placas de gesso cartonado pintadas com primário e tinta de latex – exercício comum "Annex 41"

Método de Preparação dos Provetes:

Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente;
Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta de latex;
Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.

Dimensões dos Provetes:

(0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

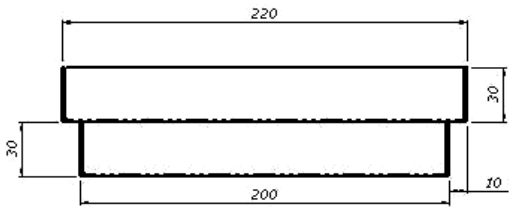
Câmara climática:

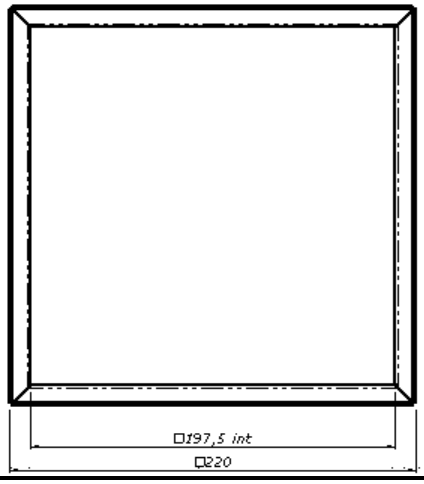
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (50 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

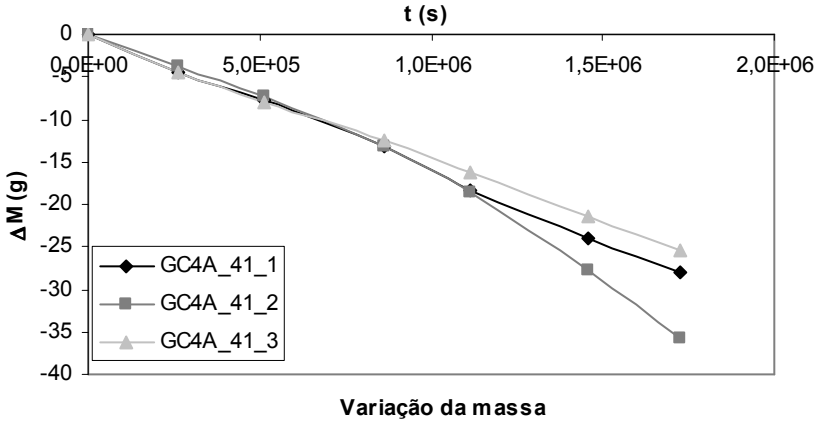
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (50 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC4A_41_1	GC4A_41_2	GC4A_41_3
17-09-04	18:05	0		1981,15	1992,67	2039,00
20-09-04	18:45	261600	261600	1976,77	1988,83	2034,53
23-09-04	16:15	511800	250200	1973,45	1985,31	2031,10
27-09-04	17:10	860700	348900	1968,06	1979,59	2026,43
30-09-04	15:00	1112100	251400	1962,76	1974,12	2022,83
04-10-04	15:15	1458600	346500	1957,16	1964,96	2017,59
07-10-04	17:30	1725900	267300	1953,23	1956,79	2013,67



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC4A _41_1**	**GC4A _41_2**	**GC4A _41_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	1,64E-08	1,86E-08	1,44E-08	1,6E-08	2,1E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	3,87E-07	4,37E-07	3,39E-07	3,9E-07	4,9E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	3,24E-10	3,68E-10	2,83E-10	3,3E-10	4,3E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	4,06E-12	4,61E-12	3,54E-12	4,1E-12	5,3E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	47,10	41,47	54,00	47,5	6,28
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,589	0,518	0,675	0,59	0,078
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV50	**GC_41_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado – exercício comum "Annex 41"
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

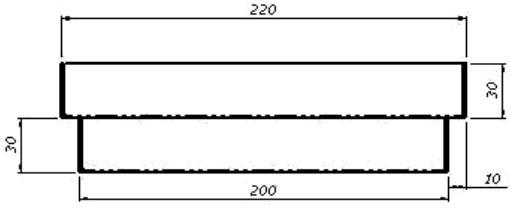
Câmara climática:

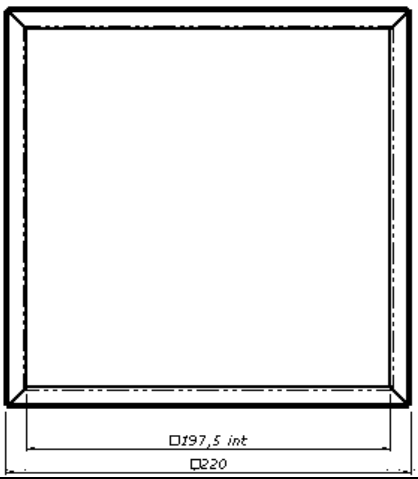
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

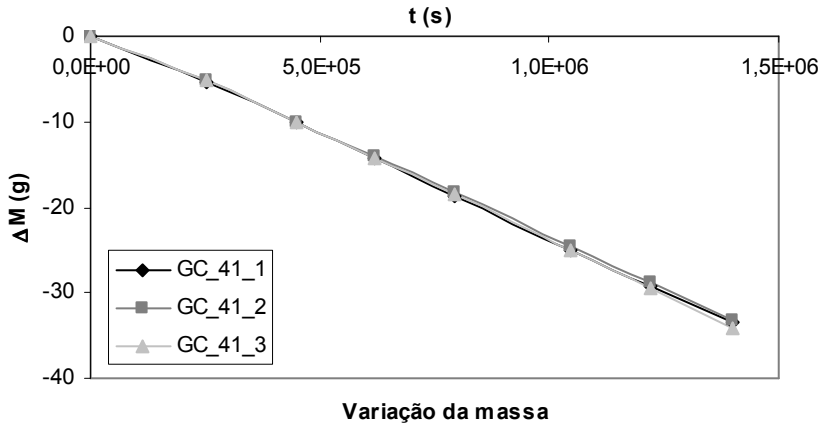
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC_41_1	GC_41_2	GC_41_3
23-02-05	11:30	0		2074,11	2046,67	2070,06
26-02-05	10:20	255000	255000	2068,77	2041,52	2064,81
28-02-05	16:00	448200	193200	2064,03	2036,72	2060,07
02-03-05	15:30	619200	171000	2059,85	2032,67	2055,83
04-03-05	15:30	792000	172800	2055,48	2028,37	2051,56
07-03-05	14:30	1047600	255600	2049,11	2022,08	2044,94
09-03-05	15:00	1222200	174600	2044,79	2017,84	2040,63
11-03-05	15:45	1397700	175500	2040,77	2013,55	2035,84



Variação da massa

PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC_41 _1**	**GC_41 _2**	**GC_41 _3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	2,48E-08	2,45E-08	2,51E-08	2,0E-08	3,0E-10
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	5,84E-07	5,76E-07	5,90E-07	6,0E-07	7,0E-09
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	3,70E-09	3,62E-09	3,75E-09	3,7E-09	6,2E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	4,62E-11	4,53E-11	4,68E-11	4,6E-11	7,8E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	4,13	4,22	4,08	4,1	0,07
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,0517	0,0527	0,0510	0,052	0,001

Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$

Expressões auxiliares:

$$\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))};\ p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$$

Simbologia adicional:

A	m²	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV51	**GC3A_41_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta acrílica – exercício comum "Annex 41"
Método de Preparação dos Provetes: Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

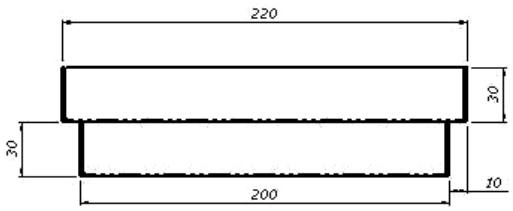
Câmara climática:

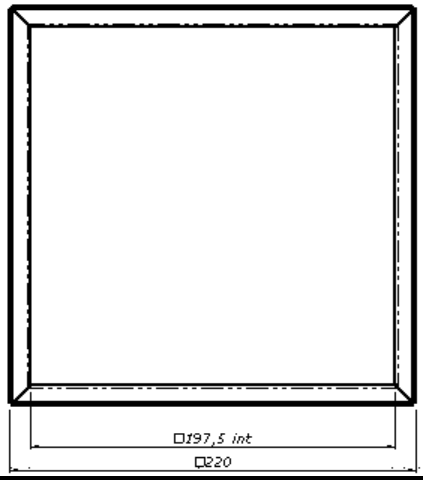
- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox





PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

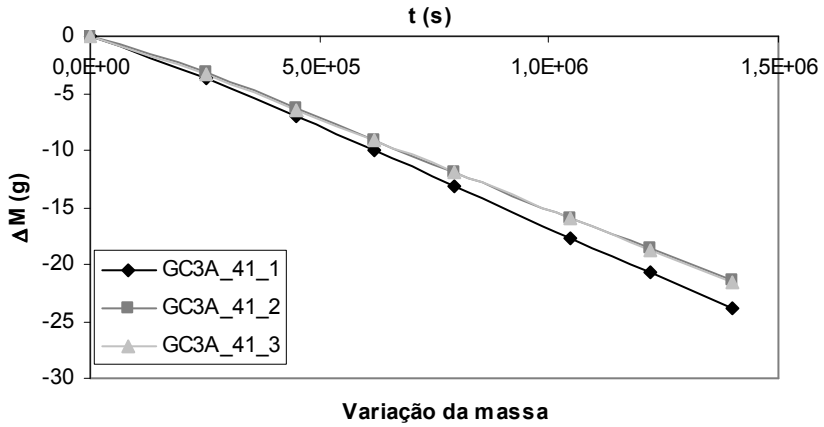
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC3A_41_1	GC3A_41_2	GC3A_41_3
23-02-05	11:30	0		2082,93	2076,86	2087,11
26-02-05	10:20	255000	255000	2079,33	2073,63	2083,84
28-02-05	16:00	448200	193200	2075,92	2070,52	2080,7
02-03-05	15:30	619200	171000	2072,95	2067,82	2078,05
04-03-05	15:30	792000	172800	2069,81	2065	2075,2
07-03-05	14:30	1047600	255600	2065,28	2060,96	2071,1
09-03-05	15:00	1222200	174600	2062,15	2058,2	2068,3
11-03-05	15:45	1397700	175500	2058,99	2055,4	2065,5



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC3A _41_1**	**GC3A _41_2**	**GC3A _41_3**	**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	1,78E-08	1,60E-08	1,61E-08	1,7E-08	1,0E-09
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	4,18E-07	3,76E-07	3,78E-07	3,9E-07	2,4E-08
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	2,36E-09	2,06E-09	2,08E-09	2,2E-09	1,7E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	2,95E-11	2,58E-11	2,60E-11	2,7E-11	2,1E-12
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	6,47	7,40	7,34	7,1	0,52
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,0808	0,0925	0,0917	0,088	0,007
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_PV52	**GC4A_41_TMH**

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO
Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água de Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta de Latex

REFERÊNCIAS NORMATIVAS
Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO
Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta de latex – exercício comum "Annex 41"
Método de Preparação dos Provetes:
Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente; Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta de latex; Protecção das faces de menor dimensão com fita adesiva.
Dimensões dos Provetes:
(0,21X0,21X0,0125) m^3

Equipamento Utilizado:

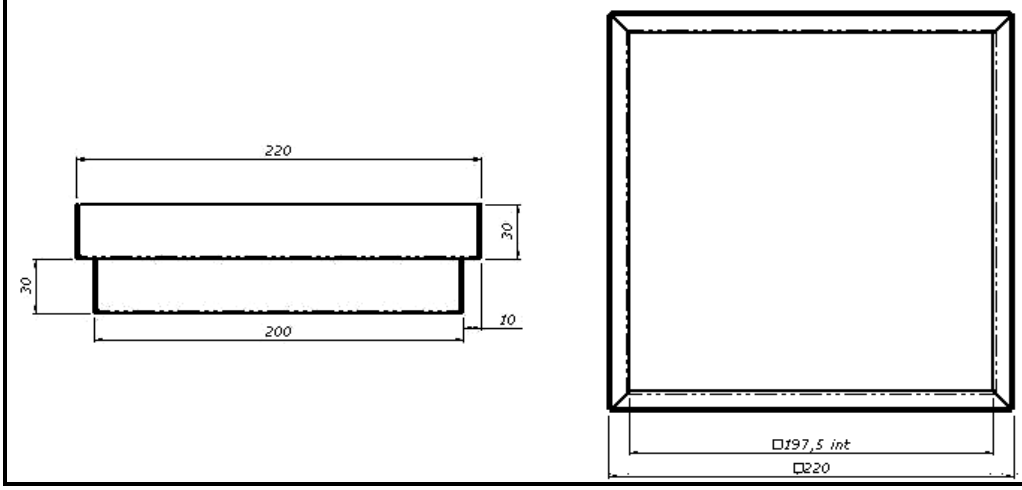
Câmara climática:

- Marca/Modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: -40 ºC $\leq$ T $\leq$ 180 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0,3 ºC
- Controle de humidade: 10 % $\leq$ HR $\leq$ 98 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa: (85 ± 3) %

Critério de paragem: 3 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do Ensaio:

Temperatura no Interior da Tina: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa no Interior da Tina: (94 ± 3) %

Temperatura no Interior da Câmara: (23 ± 0,5) ºC

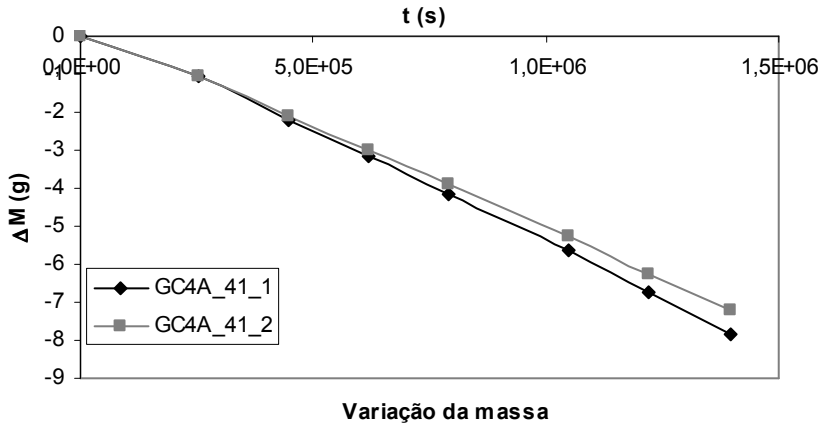
Humidade Relativa no Interior da Câmara: (85 ± 3) %

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				GC4A_41_1	GC4A_41_2	
23-02-05	11:30	0		2084,04	2043,54	
26-02-05	10:20	255000	255000	2083,01	2042,49	
28-02-05	16:00	448200	193200	2081,85	2041,45	
02-03-05	15:30	619200	171000	2080,88	2040,55	
04-03-05	15:30	792000	172800	2079,88	2039,62	
07-03-05	14:30	1047600	255600	2078,39	2038,27	
09-03-05	15:00	1222200	174600	2077,29	2037,26	
11-03-05	15:45	1397700	175500	2076,18	2036,32	



Variação da massa

PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	**GC4A _41_1**	**GC4A _41_2**		**Média**	**Desvio Padrão**
Fluxo de vapor G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5 %	5,87E-09	5,38E-09		5,6E-09	3,5E-10
Densidade de fluxo de vapor g [kg/(m^2.s)] $g = \frac{G}{A} \cdot \frac{1}{c_{le}}$	1,38E-07	1,27E-07		1,3E-07	8,2E-09
Permeância W [kg/(m^2.s.Pa)] $W = \frac{1}{\frac{A \cdot c_{le} \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{1/(67+90\times vv)}{\delta_a} - \frac{d_a}{\delta_a}}$	6,62E-10	6,02E-10		6,3E-10	4,2E-11
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	8,27E-12	7,53E-12		7,9E-12	5,3E-13
Factor de resistência ao vapor μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	23,09	25,38		24,2	1,61
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,289	0,317		0,30	0,020
Correcção "lado escondido": $c_{le} = \frac{g_{le}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln\left(\frac{2}{1+\exp(-2 \cdot \pi \cdot bl/d)}\right) = 1{,}05$					
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2.61\times10^{-5}}{(461.4\times(T+273.16))}$; $p_{v,sat} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042{,}9}{T+273{,}15-37{,}58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m^2	Área do provete
bl	m	Largura do "efeito do lado escondido"
d	m	Espessura média da amostra
S	m	Diâmetro hidráulico da amostra
T	ºC	Temperatura
vv	m/s	Velocidade do ar sobre a amostra
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

Anexo C Fichas de Ensaios de Determinação do MBV

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV1

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" do Gesso Cartonado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Placas de gesso cartonado

Método de Preparação dos Provetes:

Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,22X0,22X0,0125) m^3

Massa volúmica seca: 730 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < $\pm$ 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 14-11-05 – 24-11-05

Execução do ensaio:

A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.

Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.

Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.

A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.

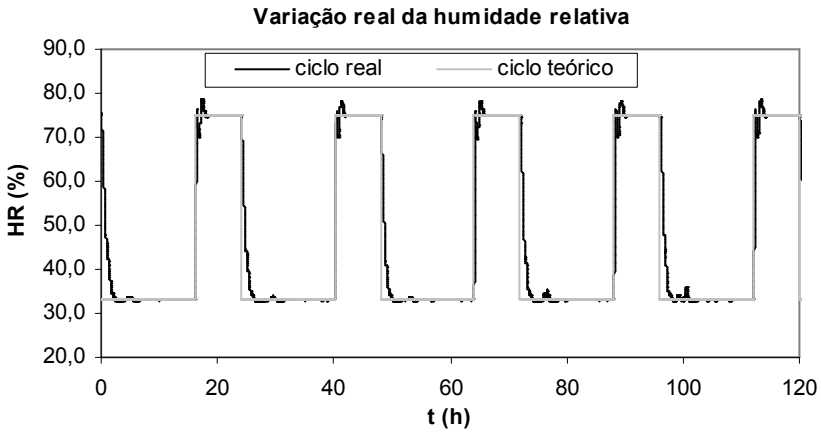
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

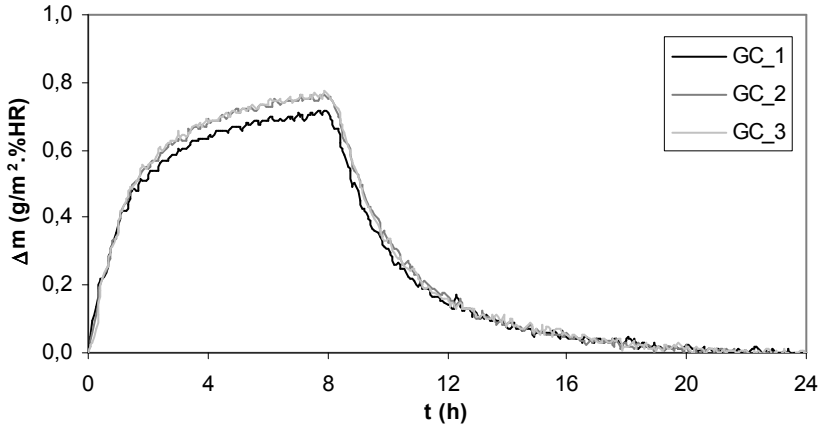
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{·\%HR)]}$$

	GC_1	GC_2	GC_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,718	0,762	0,772	0,75	0,029

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV2

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" do Gesso Cartonado Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Placas de gesso cartonado pintado com tinta vinílica

Método de Preparação dos Provetes:

Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente;
Pintura com duas demãos de tinta vinílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,22X0,22X0,0125) m^3

Massa volúmica seca: 730 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < $\pm$ 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 27-12-05 – 04-01-06

Execução do ensaio:

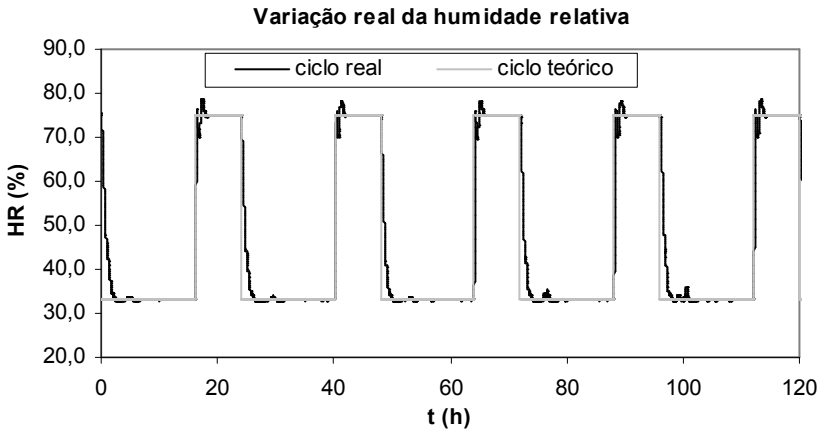
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

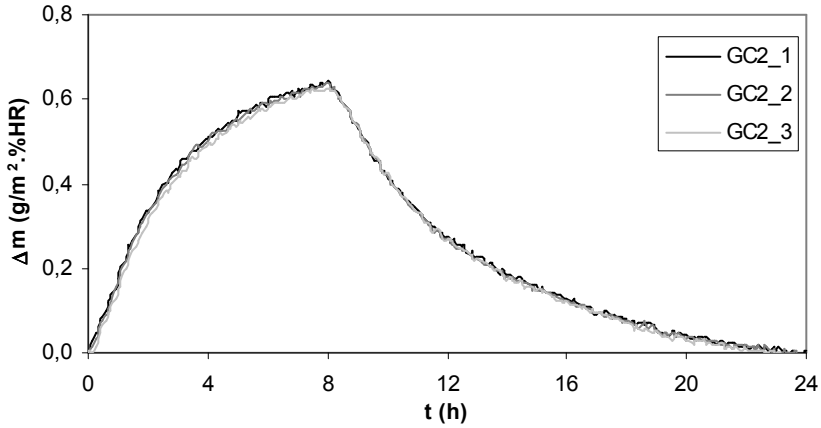
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR}$$ [g/(m²·%HR)]

	GC2_1	GC2_2	GC2_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,644	0,640	0,625	0,64	0,010

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV3

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" do Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta vinílica

Método de Preparação dos Provetes:

Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente;
Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,22X0,22X0,0125) m^3

Massa volúmica seca: 730 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < $\pm$ 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 04-01-06 – 13-01-06

Execução do ensaio:

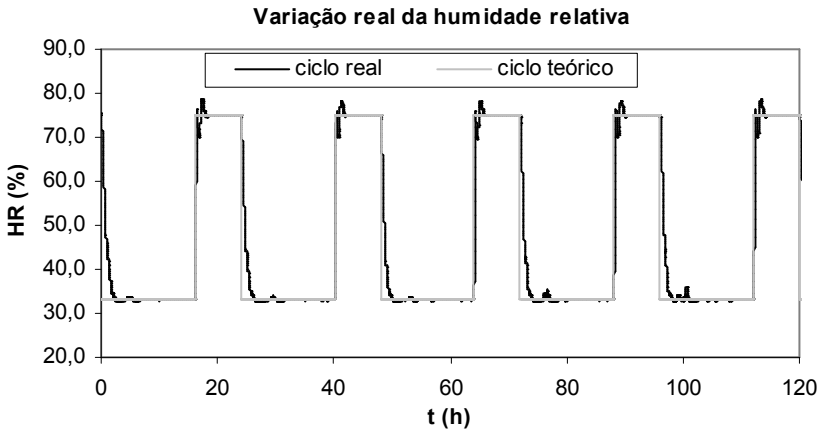
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

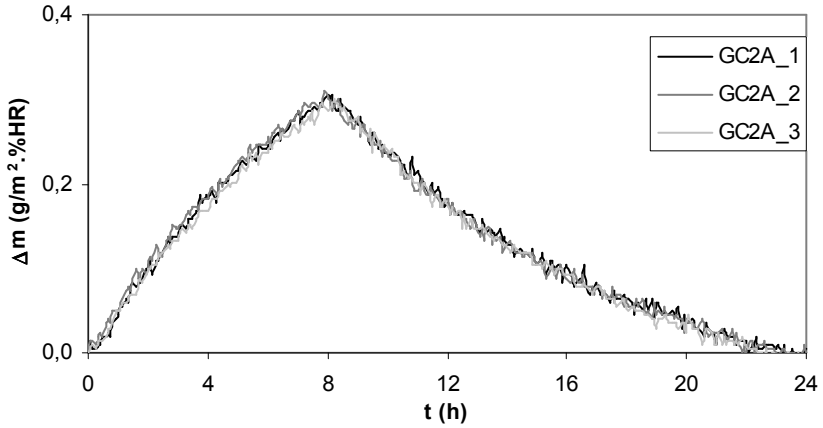
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{·\%HR)]}$$

	GC2A_1	GC2A_2	GC2A_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,305	0,310	0,300	0,30	0,005

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV4

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" do Gesso Cartonado Pintado com Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta acrílica

Método de Preparação dos Provetes:

Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente;
Pintura com duas demãos de tinta acrílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,22X0,22X0,0125) m^3

Massa volúmica seca: 730 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < $\pm$ 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < $\pm$ 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 24-11-05 – 02-12-05

Execução do ensaio:

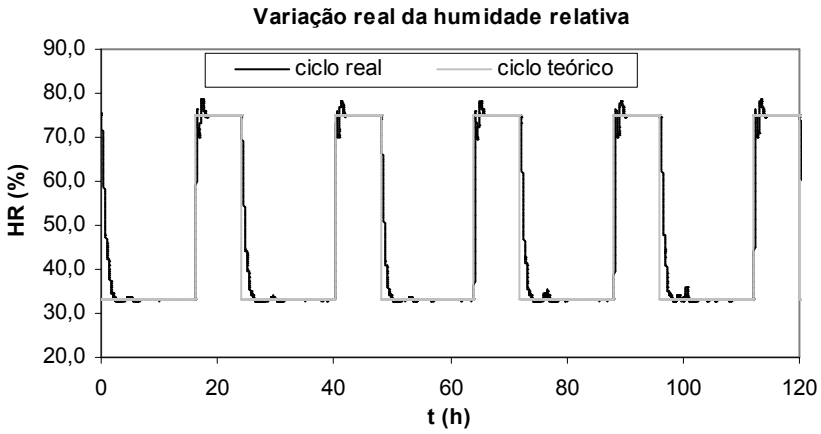
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

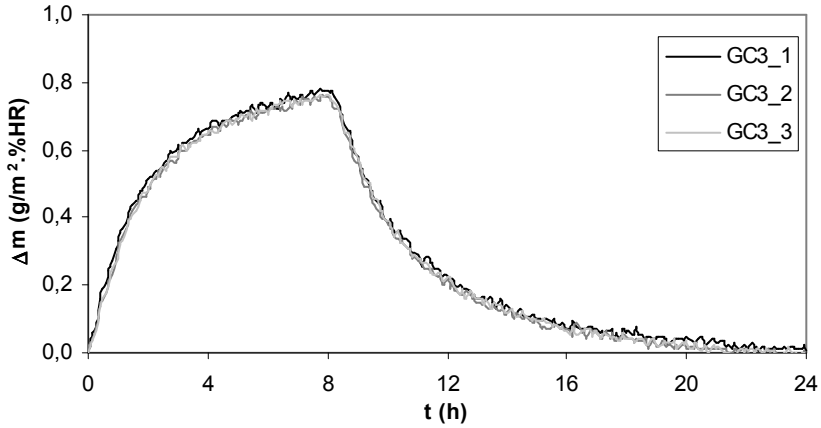
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{·\%HR)]}$$

	GC3_1	GC3_2	GC3_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,782	0,762	0,762	0,77	0,011

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV5

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" do Gesso Cartonado Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Placas de gesso cartonado pintado com primário e tinta acrílica

Método de Preparação dos Provetes:

Corte dos provetes a partir de placas disponíveis comercialmente;
Pintura com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,22X0,22X0,0125) m^3

Massa volúmica seca: 730 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 12-12-05 – 17-12-05

Execução do ensaio:

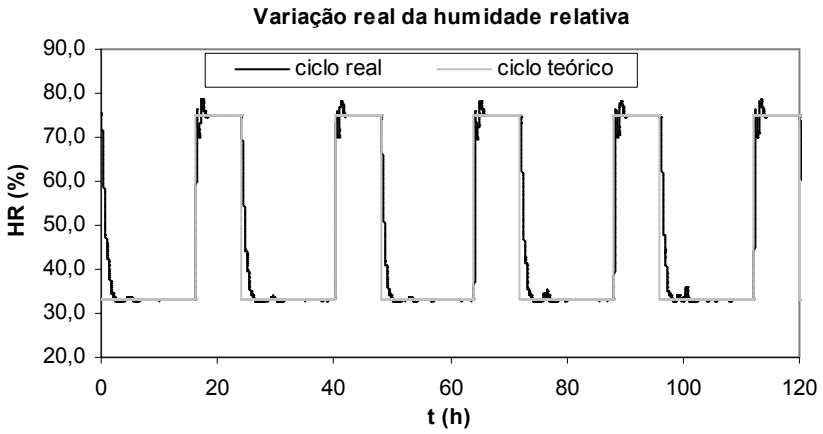
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

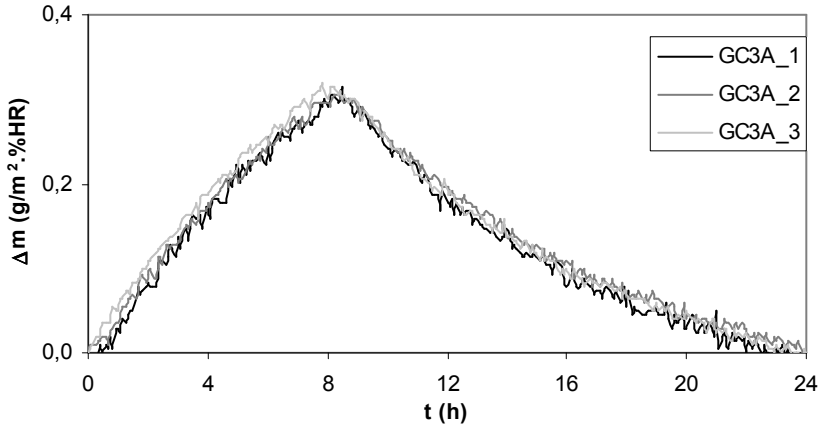
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{·\%HR)]}$$

	GC3A_1	GC3A_2	GC3A_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,315	0,305	0,320	0,31	0,008

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV6

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" do Gesso Projectado

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de gesso projectado

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,021) m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 1200 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 20-01-06 – 27-01-06

Execução do ensaio:

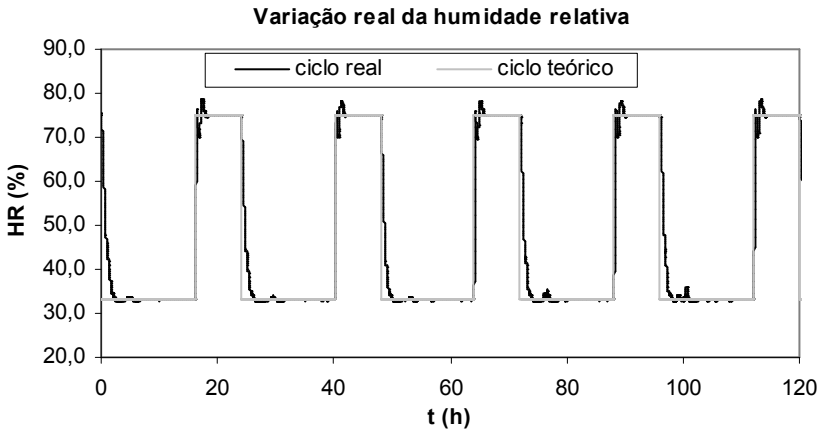
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

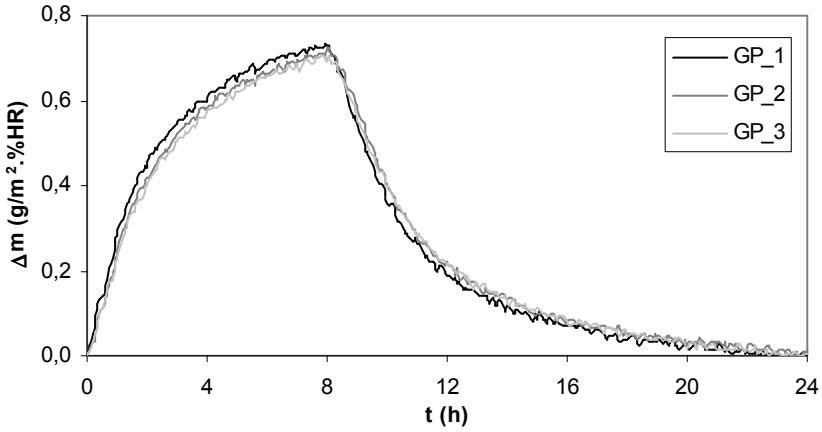
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{·\%HR)]}$$

	GP_1	GP_2	GP_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,734	0,723	0,707	0,72	0,014

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV7

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" de Gesso Projectado Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de gesso projectado pintado com tinta vinílica

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento;
Pintura de uma das faces maiores com duas demãos de tinta vinílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,021) m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 1200 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 10-02-06 – 17-02-06

Execução do ensaio:

A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.

Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.

Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.

A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.

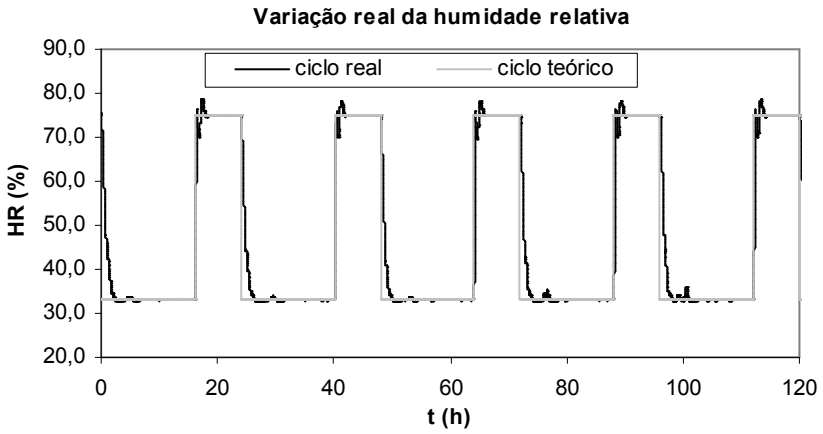
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

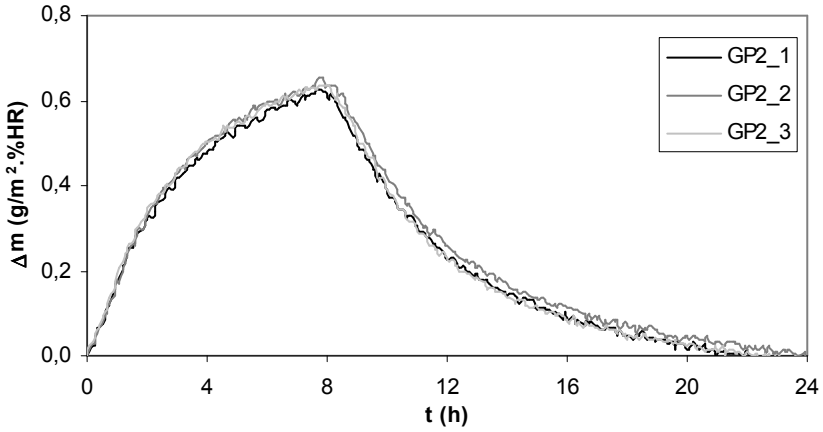
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR}$$ [g/(m²·%HR)]

	GP2_1	GP2_2	GP2_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,626	0,653	0,653	0,64	0,016

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV8

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" de Gesso Projectado Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de gesso projectado pintado com primário e tinta vinílica

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento;
Pintura de uma das faces maiores com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,021) m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 1200 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 17-02-06 – 24-02-06

Execução do ensaio:

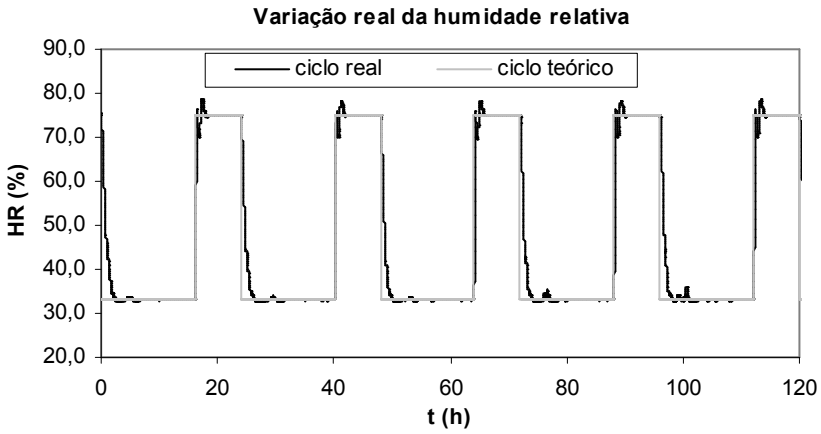
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

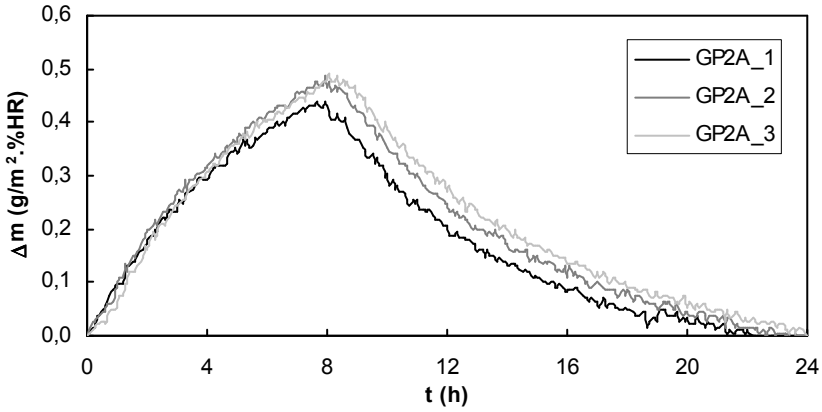
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{·\%HR)]}$$

	GP2A_1	GP2A_2	GP2A_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,437	0,486	0,491	0,47	0,030

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV9

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" de Gesso Projectado Pintado com Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de gesso projectado pintado com tinta acrílica

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento;
Pintura de uma das faces maiores com duas demãos de tinta acrílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,021) m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 1200 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 27-01-06 – 03-02-06

Execução do ensaio:

A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.

Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.

Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.

A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.

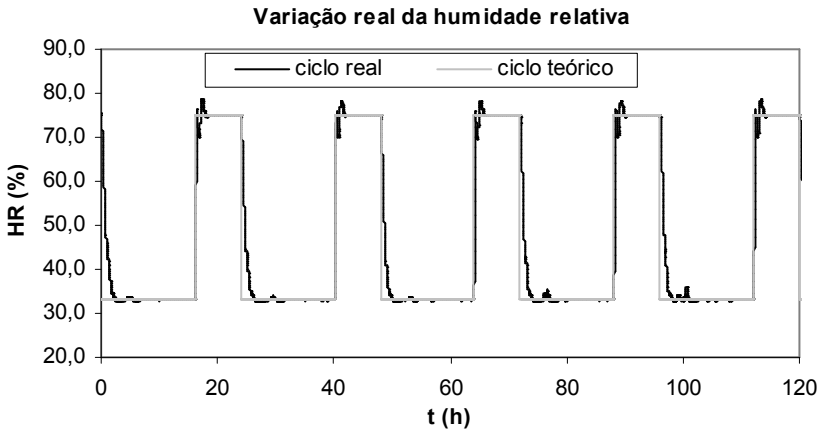
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

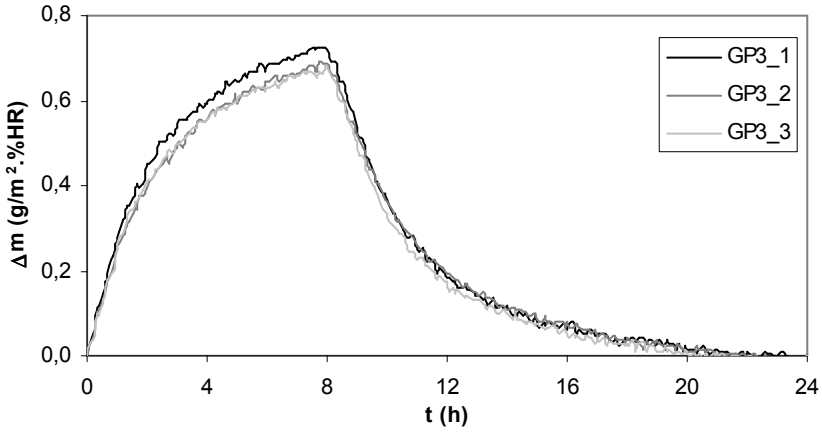
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR}$$ [g/(m²·%HR)]

	GP3_1	GP3_2	GP3_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,723	0,691	0,680	0,70	0,022

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV10

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" de Gesso Projectado Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de gesso projectado pintado com primário e tinta acrílica

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura com recurso a mistura mecânica;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento;
Pintura de uma das faces maiores com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: 0,21X0,21X0,021 m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 1200 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU - Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % - flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 24-02-06 – 03-03-06

Execução do ensaio:

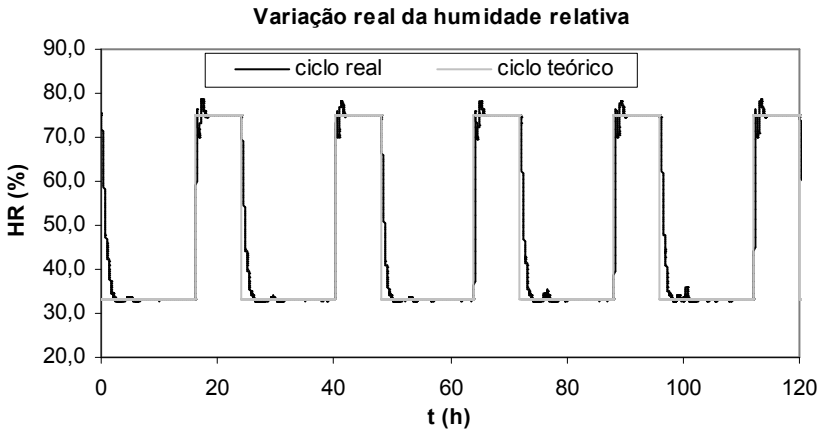
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

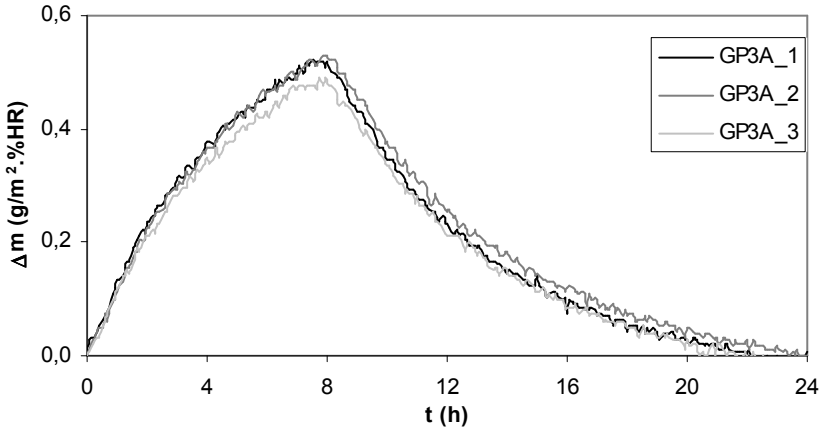
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR}$$ [g/(m²·%HR)]

	GP3A_1	GP3A_2	GP3A_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,524	0,529	0,491	0,51	0,020

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV11

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" de Reboco de Gesso e Cal

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de reboco de gesso e cal

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Massa volúmica seca: 900 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 13-01-06 – 20-01-06

Execução do ensaio:

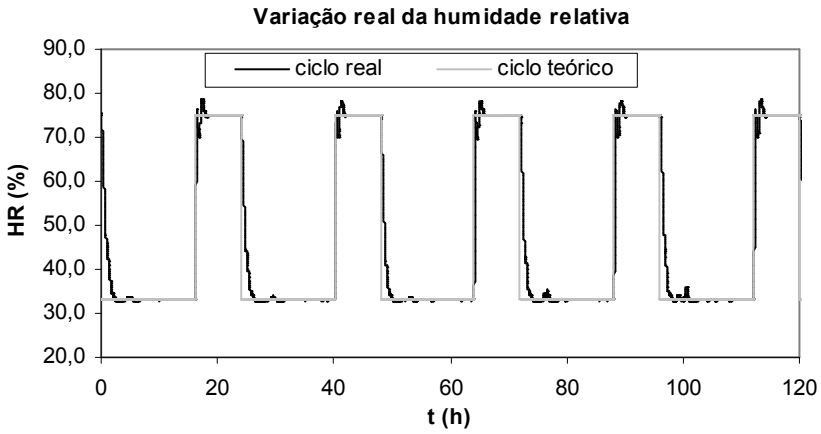
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

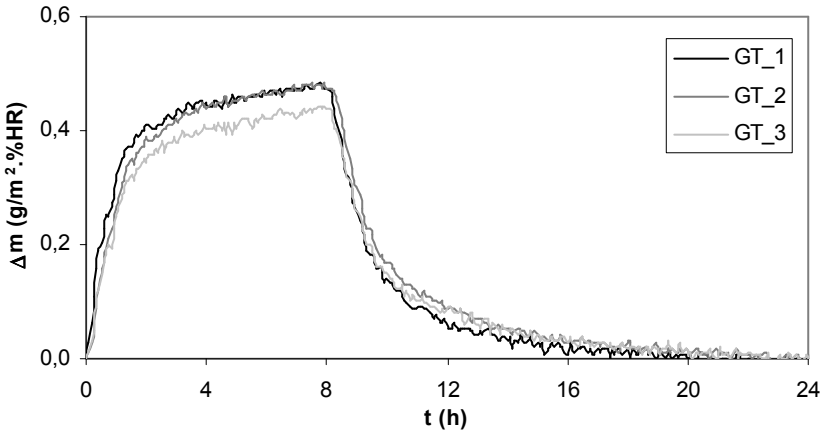
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{·\%HR)]}$$

	GT_1	GT_2	GT_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,486	0,486	0,443	0,47	0,025

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV12

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintado com tinta vinílica

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento;
Pintura de uma das faces maiores com duas demãos de tinta vinílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 900 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 03-03-06 – 10-03-06

Execução do ensaio:

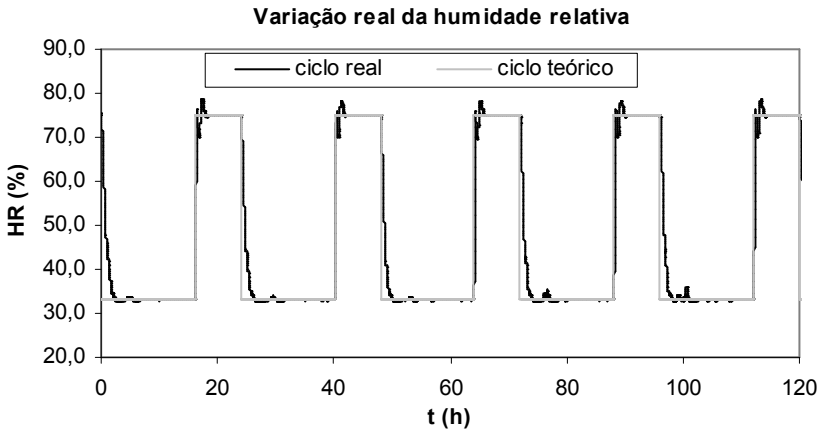
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

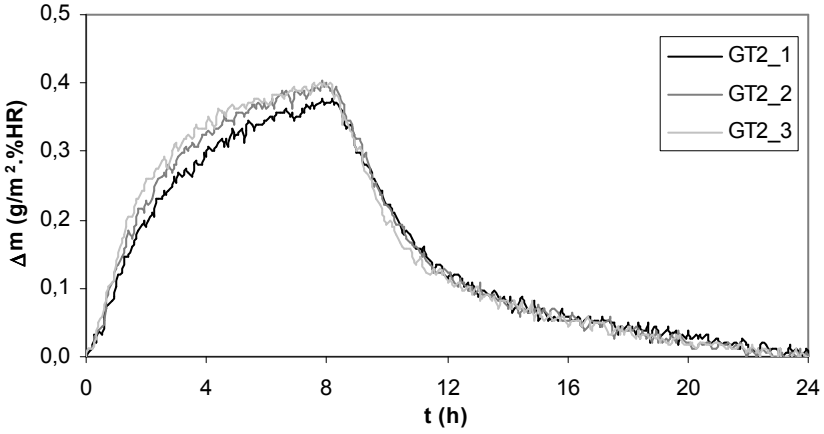
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{·\%HR)]}$$

	GT2_1	GT2_2	GT2_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,378	0,405	0,400	0,39	0,014

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV13

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Primário e Tinta Vinílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintado com primário e tinta vinílica

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento;
Pintura de uma das faces maiores com uma demão de primário e duas demãos de tinta vinílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 900 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 10-03-06 – 18-03-06

Execução do ensaio:

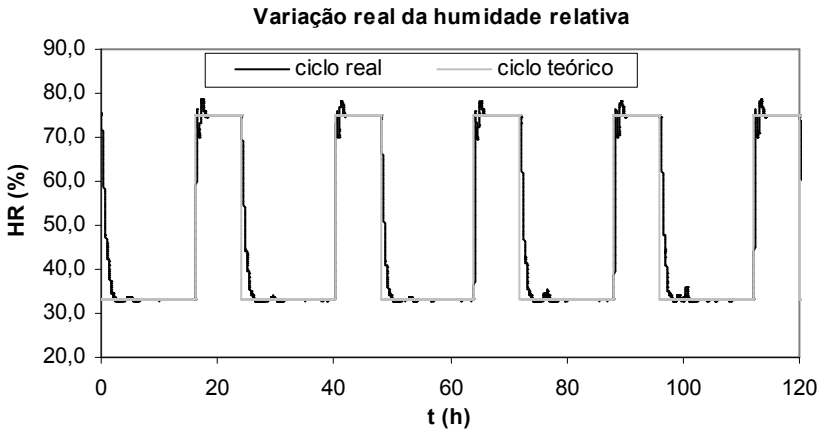
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

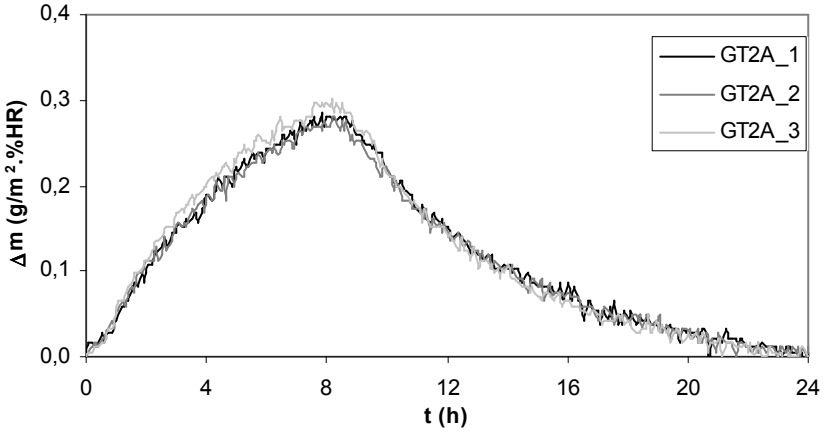
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{·\%HR)]}$$

	GT2A_1	GT2A_2	GT2A_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,286	0,281	0,302	0,29	0,011

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV14

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintado com tinta acrílica

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento;
Pintura de uma das faces maiores com duas demãos de tinta acrílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 900 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 03-02-06 – 10-02-06

Execução do ensaio:

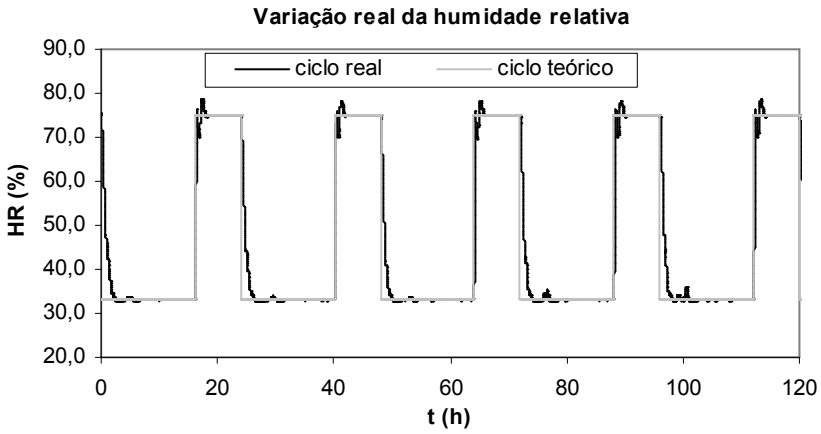
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

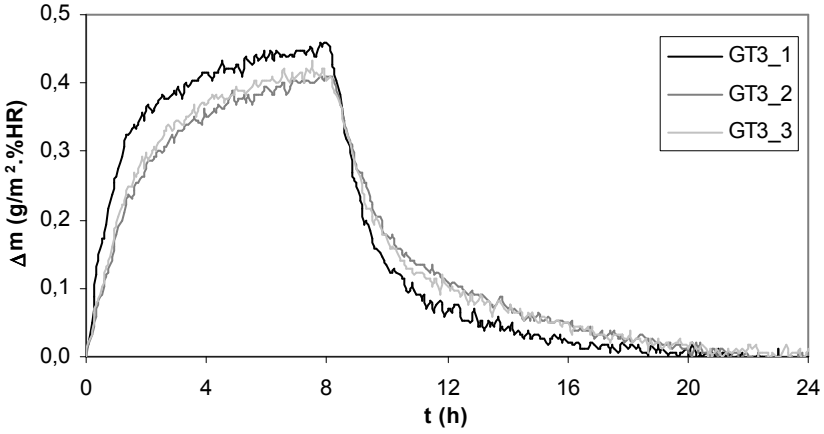
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{·\%HR)]}$$

	GT3_1	GT3_2	GT3_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,459	0,410	0,432	0,43	0,024

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP NR_MBV15

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – "Moisture Buffer Value" de Reboco de Gesso e Cal Pintado com Primário e Tinta Acrílica

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: "Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air"

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Provetes de reboco de gesso e cal pintado com primário e tinta acrílica

Método de Preparação dos Provetes:

Preparação da amassadura;
Colocação em moldes e posterior desmoldagem após endurecimento;
Pintura de uma das faces maiores com uma demão de primário e duas demãos de tinta acrílica;
Pintura da face posterior de maiores dimensões com tinta com base em resina de epoxi;
Selagem das faces de menores dimensões com fita de alumínio.

Dimensões dos Provetes: (0,21X0,21X0,010) m^3

Massa volúmica seca (valor nominal): 900 kg/m^3

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/Modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplus V
- Controle de temperatura: 15 ºC $\leq$ T $\leq$ 35 ºC – flutuação no tempo < ± 0.3 ºC
- Controle de humidade: 30 % $\leq$ HR $\leq$ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/Modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 18-03-06 – 27-03-06

Execução do ensaio:

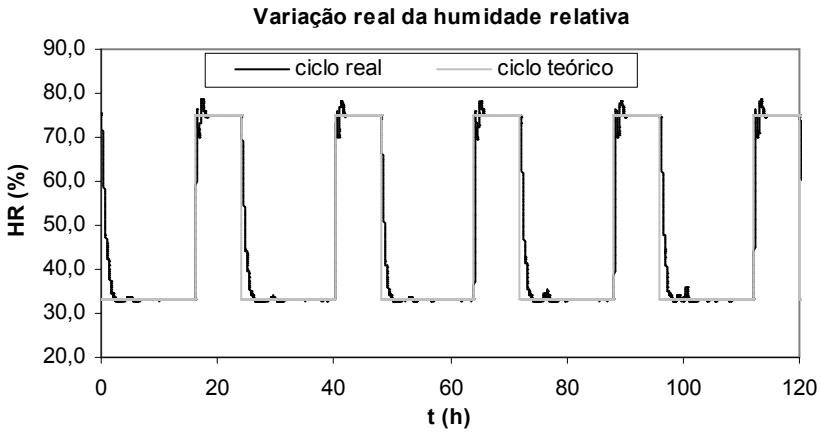
A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.
Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.
Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.
A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efectuado automaticamente num computador pessoal.
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do Ensaio:

Temperatura: (23 ± 0,5) ºC

Humidade Relativa:

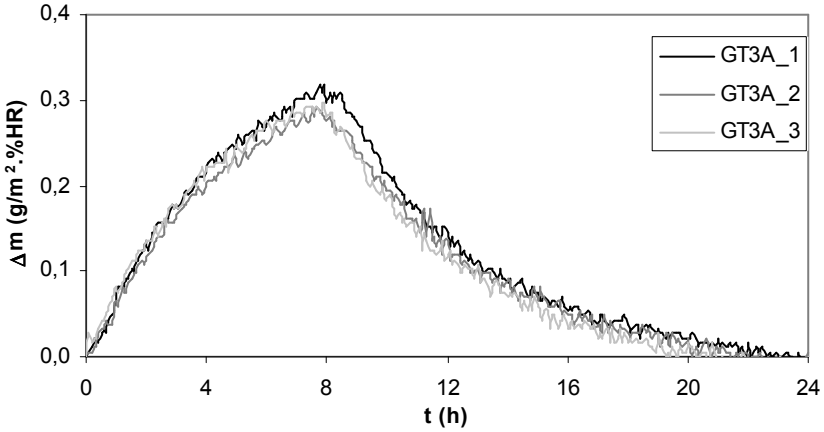
HR (%)	33	75
t (h)	16	8



Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS

Gráficos do ciclo estável



$$MBV = \frac{\max \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{·\%HR)]}$$

	GT3A_1	GT3A_2	GT3A_3	Média	Desv. Padrão
MBV	0,319	0,292	0,297	0,30	0,014