

AVALIAÇÃO DA HUMIDIFICAÇÃO E SECAGEM DA SUPERFÍCIE EXTERIOR DOS SISTEMAS DO TIPO ETICS

ANA RITA NETO MARTINS

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

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Co-Orientador: Doutor João Manuel do Paço Quesado Delgado

JULHO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.*

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

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

Aos meus Pais, Irmãos e Namorado

"Há dois tipos de pessoas: as que fazem as coisas e as que ficam com os louros. Procure ficar no primeiro grupo: há menos competição lá!"

Indira Gandhi

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração e apoio prestados por algumas pessoas, a quem faço questão de deixar presente o meu grande e sincero agradecimento.

À Professora Eva Barreira, minha orientadora, por todo o apoio, por todo o tempo dedicado a este trabalho, pela passagem de conhecimentos e disponibilização de material de estudo. Agradeço ainda pelo acompanhamento na realização de todos os ensaios em laboratório, desde o fornecimento e tratamento das amostras até à resolução de todos os problemas e, finalmente, pela revisão final de todo o texto.

Ao Doutor João Delgado, co-orientador, pelos seus conhecimentos, por toda a colaboração prestada quer ao nível de realização de texto, quer na análise e interpretação dos resultados dos ensaios laboratoriais, e igualmente, pela revisão do trabalho final.

Ao Engenheiro Pedro Pereira, e demais elementos do Laboratório de Física das Construções, pela disponibilidade na abertura do laboratório e ajuda no manuseamento dos equipamentos.

Ao LFC (Laboratório de Física das Construções), pelo espaço e equipamentos disponibilizados.

Aos meus colegas de curso, por todo o companheirismo e entreajuda, pelos momentos passados a trabalhar em grupo, incluindo longas noites, e pela força transmitida nos momentos mais desanimados e desgastados. Em especial ao Ricardo pela ajuda na remoção das amostras das fachadas.

À Professora Manuela Dias, pela ajuda essencial na tradução do Resumo.

Por último, mas não menos importante, à minha família e namorado, por todo o apoio e incentivo prestados durante a realização de todo este trabalho. Agradeço ao meu pai por toda a serenidade transmitida, à minha mãe por todas as palavras quase mágicas de motivação e força, aos meus irmãos pela vontade de querer sermos maiores e melhores, ao meu namorado por toda a paciência e incentivo e aos meus avós e tios pela preocupação. A todos um obrigado pelo carinho, atenção e compreensão, não só durante a fase de realização desta dissertação, mas durante toda a minha vida.

RESUMO

Os ciclos de molhagem / secagem são um dos maiores problemas na construção. Contribuem para a degradação e alteração do aspecto dos edifícios, diminuindo a durabilidade e a qualidade dos mesmos.

Este trabalho incidiu sobretudo no processo de secagem. No entanto, foi também efectuada uma breve análise do processo de humidificação dos materiais porosos. Descreveram-se algumas propriedades dos materiais de construção porosos, no se que refere ao seu comportamento à humidade, bem como as principais formas de manifestação de humidade e mecanismos de transferência em materiais de construção. O processo de transferência de massa nos materiais porosos, quer por movimento da água líquida, quer por difusão de vapor, está também descrito de forma sintética. Os factores climáticos mais associados a este fenómeno são a temperatura, a humidade relativa do ar e a chuva em actuação conjunta com o vento.

Quanto à secagem, descreve-se o processo de secagem de materiais porosos e a cinética de secagem. O processo de secagem de materiais de construção porosos é estudado com base na realização de ensaios laboratoriais de secagem, realizados em quatro amostras de ETICS, previamente envelhecidas de forma natural, com exposição aos quatro pontos cardeais. Os ensaios foram realizados no interior de uma câmara climática, com condições ambientais constantes, e basearam-se no humedecimento controlado da amostra e posterior secagem sobre uma balança de precisão ligada a um computador, que registou a variação da massa das amostras. Realizaram-se ensaios com as quatro amostras expostas à mesma temperatura e humidade relativa, e posteriormente, seleccionou-se uma amostra e realizaram-se mais três ensaios, fazendo variar a temperatura e a humidade relativa. Analisou-se, assim, a influência da orientação e das condições ambientais no tempo de secagem das amostras.

A cinética de secagem foi estudada recorrendo-se a modelos desenvolvidos pela comunidade científica. Determinou-se o que melhor se ajustava ao processo de secagem do material em estudo, o ETICS, tendo em conta o tempo de secagem das amostras em cada ensaio. Seleccionaram-se cinco modelos e, com base na percentagem de erro entre os valores experimentais e os teóricos, determinou-se o mais adaptado ao ETICS. O modelo Logarítmico e o modelo de Midilli *et al.* foram os que originaram uma maior aproximação aos resultados experimentais, tendo-se escolhido o primeiro para a análise. Com base na constante do modelo de secagem, k , determinou-se o tempo de secagem, t_c , e analisou-se a influência das orientações, da temperatura e da humidade relativa no tempo de secagem. Analisou-se também a influência da temperatura no coeficiente de difusividade do vapor de água e a energia de activação de Arrhenius.

PALAVRAS-CHAVE: Humidificação, Secagem, Cinética de secagem, Ensaios laboratoriais, Comportamento higrotérmico.

ABSTRACT

The cycles of wetting / drying are one of the biggest problems in construction. They contribute to the degradation and to the changes of the appearance of the buildings, reducing their durability and quality.

This work is mainly focused on the drying process. However, a brief analysis of the process of wetting of porous materials was also made. A few properties of porous building materials were described, the way they react to moisture, as well as the main forms of expression of moisture and mechanisms of transfer in building materials. The process of mass transfer in porous materials, either by movement of liquid water, or by vapor diffusion, was also set forth in summary form. The climatic factors most associated with this phenomenon are temperature, the relative humidity of air and the rain in joint action with the wind.

As for drying, the process of drying of porous materials and the drying kinetics was described. The drying process of porous building materials was studied based on laboratory testing of drying, carried out in four samples of ETICS, previously aged in a natural way, with exposure to the four cardinal points. The tests were conducted inside a climate chamber with constant environmental conditions, and they were based on the controlled wetting of the sample and subsequent drying on a precision scale attached to a computer, which recorded the change in mass of the samples. Tests were performed with the four samples exposed to the same temperature and relative humidity, and afterwards a sample was selected and three other tests were performed by varying the temperature and the relative humidity. Thus, the influence of orientation and the environmental conditions in the drying time of the samples were analyzed.

The drying kinetics was studied by using the models developed by the scientific community. The best fitting model of the drying process of the material under study was determined, the ETICS and the drying time of the samples in each test was taken into account. Five models were selected and, based on the percentage error between the experimental and theoretical values, the most appropriate model to the ETICS was determined. The Logarithmic model and the Midilli *et al.* model were those that originated a closer approach to the experimental results. The first one was chosen for analysis. Based on the model drying constant, k , the drying time, t_c , was determined and the influence of the orientation, the temperature and the relative humidity in the drying time were analyzed. The influence of temperature on the diffusion coefficient of water vapor and the activation energy of Arrhenius were also analyzed.

KEYWORDS: Humidification, Drying, Drying kinetics, Laboratory testing, Hygrothermal behavior.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. INTERESSE E OBJECTIVOS DO TRABALHO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO	2
2. HUMIDADE NA CONSTRUÇÃO	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.1.1. GENERALIDADES.....	5
2.1.2. PROPRIEDADES HÍDRICAS DOS MATERIAIS	5
2.1.3. PROPRIEDADES DA HUMIDADE DO AR	7
2.2. FORMAS DE MANIFESTAÇÃO DE HUMIDADE	9
2.2.1. INTRODUÇÃO	9
2.2.2. HUMIDADE NA CONSTRUÇÃO	9
2.2.3. HUMIDADE ASCENSIONAL	10
2.2.4. HUMIDADE POR PRECIPITAÇÃO	10
2.2.5. HUMIDADE POR HIGROSCOPICIDADE	11
2.2.6. HUMIDADE POR CONDENSAÇÕES.....	11
2.2.6.1. Generalidades	11
2.2.6.2. Condensações Superficiais.....	11
2.2.6.3. Condensações Internas	12
2.2.7. HUMIDADE POR CAUSAS FORTUITAS.....	13
2.3. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	14
2.3.1. INTRODUÇÃO	14
2.3.2. HIGROSCOPICIDADE.....	14
2.3.3. CONDENSAÇÃO INTERNA – MODELO DE GLASER	15
2.3.4. CAPILARIDADE	16

2.4. SOLICITAÇÃO CLIMÁTICA	17
2.4.1. GENERALIDADES	17
2.4.2. INFLUÊNCIA DO CLIMA NO COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS	18
2.4.2.1. Chuva e Vento	18
2.4.2.2. Temperatura	19
2.4.2.3. Outros Agentes.....	19
2.5. CICLOS MOLHAGEM / SECAGEM.....	19
2.6. TRANSFERÊNCIA DE MASSA NOS MATERIAIS POROSOS	20
2.6.1. MOVIMENTO DA ÁGUA LÍQUIDA.....	20
2.6.2. DIFUSÃO DE VAPOR	24
2.6.2.1. Transferência Ar-Sólido	24
2.6.2.2. Transferência em Materiais Porosos.....	25
 3. SECAGEM	 27
3.1. INTRODUÇÃO	27
3.2. PROCESSO DE SECAGEM DE MATERIAIS POROSOS	27
3.3. CINÉTICA DE SECAGEM	30
3.3.1. GENERALIDADES	30
3.3.2. MODELOS DA CINÉTICA DE SECAGEM.....	36
3.3.3. ESTIMATIVA DA DIFUSIVIDADE DO VAPOR DE ÁGUA E DA ENERGIA DE ACTIVAÇÃO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	38
3.4. ESTUDOS DESENVOLVIDOS.....	41
 4. ENSAIOS LABORATORIAIS.....	 43
4.1. INTRODUÇÃO	43
4.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO.....	43
4.2.1. MATERIAIS NECESSÁRIOS.....	43
4.2.2. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS	43
4.2.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	44
4.2.4. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	45
4.3. DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS	50
4.3.1. PROPRIEDADES DAS AMOSTRAS UTILIZADAS	50
4.3.2. ETICS – EXTERNAL THERMAL INSULATION COMPOSITE SYSTEMS.....	50

5. RESULTADOS	53
5.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS	53
5.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
5.3. ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM	55
5.3.1. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS ENSAIOS	55
5.3.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE EFECTIVO	62
5.3.3. DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE ACTIVAÇÃO DE ARRHENIUS	68
6. CONCLUSÕES	69
6.1. CONCLUSÕES FINAIS	69
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	70
BIBLIOGRAFIA	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Descrição convencional dos teores de humidade de referência de um material poroso [1]	7
Fig.2.2 – Exemplo de um Diagrama Psicrométrico [18].....	8
Fig.2.3 – Sentido da água da chuva sobre uma parede, sem e com acção do vento [15].....	13
Fig.2.4 – Variação do teor de humidade em função da humidade relativa [15]	14
Fig.2.5 – Fixação de água por adsorção [18].....	15
Fig.2.6 – Zona de ocorrência de condensações internas (método de <i>Glaser</i>) [17].....	16
Fig.2.7 – Mecanismo de capilaridade [15]	16
Fig.2.8 – Curva de pressão capilar [15]	17
Fig.2.9 – Acção do vento sobre as gotas de chuva [3]	18
Fig.2.10 – Organigrama do processo de definição das diferentes situações de classificação de períodos meteorológicos (12 horas) [7]	20
Fig.2.11 – Pressão capilar dentro de um poro capilar [16]	21
Fig.2.12 – Representação do ângulo de contacto em materiais sobre uma superfície plana [16]	22
Fig.2.13 – Variação da sucção capilar com o teor de humidade [10]	22
Fig.2.14 – Quantificação dos fluxos de água no instante “ t ” e “ $t+\Delta t$ ” [10]	23
Fig.3.1 – Evolução do fluxo de secagem em função do tempo [10]	28
Fig.3.2 – Curvas características de secagem de diferentes materiais [1]	29
Fig.3.3 – Curva típica de secagem de materiais de estrutura porosa [16]	29
Fig.3.4 – Esquema representativo da transferência de massa na camada limite [11]	38
Fig.4.1 – Amostra	44
Fig.4.2 – Envelhecimento das amostras	45
Fig.4.3 – Instalação do anemómetro e da balança	45
Fig.4.4 – Computador ligado à balança no interior da câmara climática para registo de dados e <i>Datalogger</i>	46
Fig.4.5 – Colocação da água no tabuleiro	47
Fig.4.6 – Colocação da amostra a humedecer	47
Fig.4.7 – Remoção do excesso de água da superfície da amostra.....	48
Fig.4.8 – Colocação da amostra na balança para o início da secagem	48
Fig.4.9 – Esquema elucidativo do critério de paragem do processo de secagem	49
Fig.4.10 – Composição esquemática do ETICS [21]	51
Fig.5.1 – Curva dos dados experimentais do ensaio 1 e curva teórica do modelo Logarítmico	57
Fig.5.2 – Curva dos dados experimentais do ensaio 2 e curva teórica do modelo Logarítmico	58

Fig.5.3 – Curva dos dados experimentais do ensaio 3 e curva teórica do modelo Logarítmico.....	58
Fig.5.4 – Curva dos dados experimentais do ensaio 4 e curva teórica do modelo Logarítmico.....	59
Fig.5.5 – Curva dos dados experimentais do ensaio I e curva teórica do modelo Logarítmico.....	59
Fig.5.6 – Curva dos dados experimentais do ensaio II e curva teórica do modelo Logarítmico.....	60
Fig.5.7 – Curva dos dados experimentais do ensaio III e curva teórica do modelo Logarítmico.....	60
Fig.5.8 – Relação entre MR experimental e o teórico dado pela equação (5.9.) – ensaio 1	63
Fig.5.9 – Relação entre MR experimental e o teórico dado pela equação (5.9.) – ensaio I	64
Fig.5.10 – Relação entre MR experimental e o teórico dado pela equação (5.9.) – ensaio II	64
Fig.5.11 – Representação gráfica da razão da humidade (MR) em função do tempo, para a fase inicial do processo de secagem – ensaio 1.....	65
Fig.5.12 – Representação gráfica da razão da humidade (MR) em função do tempo, para a fase inicial do processo de secagem – ensaio I.....	65
Fig.5.13 – Representação gráfica da razão da humidade (MR) em função do tempo, para a fase inicial do processo de secagem – ensaio II.....	66
Fig.5.14 – Representação gráfica da variação do coeficiente de difusividade efectivo com a temperatura	67
Fig.5.15 – Representação gráfica dos coeficientes de difusividade efectivo e da constante empírica do modelo de secagem em função da temperatura.....	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Descrição das amostras.....	44
Tabela 4.2 – Descrição das condições de ensaio.....	49
Tabela 4.3 – Propriedades dos produtos	50
Tabela 5.1 – Resultados gerais dos ensaios de embebição / secagem.....	53
Tabela 5.2 – Percentagem de erro associado a cada um dos modelos testados	56
Tabela 5.3 – Valores do coeficiente k	61
Tabela 5.4 – Valores do tempo de secagem	61
Tabela 5.5 – Valores do coeficiente de difusividade efectivo do vapor de água em ETICS a diferentes temperaturas	66
Tabela 5.6 – Quadro resumo de D_{eff} e k	67

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	– área da secção do material poroso [m^2]
a_w	– coeficiente de actividade da água [-]
a_{wr}	– coeficiente de referência de actividade da água [-]
A_0	– constante de Arrhenius [m^2/s]
a, b, c, n	– constantes empíricas do modelo de secagem [-]
C	– concentração de vapor de água [kg/m^3]
C'_a	– concentração de vapor de água na ambiência [kg/m^3]
C'_s	– concentração de vapor de água à superfície [kg/m^3]
c_0, c_1, c_2 e c_3	– constantes empíricas ajustáveis [-]
D_{eff}	– coeficiente de difusividade efectivo [m^2/s]
dp/dx	– gradiente de pressão de vapor de água [Pa/m]
dT/dx	– gradiente de temperatura na secção, variação da temperatura com a distância [$^\circ\text{C}/\text{h}$]
D_w	– coeficiente de difusibilidade hídrica [m^2/s]
dX/dt	– taxa de secagem [-]
E_a	– energia de activação [kJ/mol]
F_w	– fluxo [$\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$]
$f(W)$	– teor de água do provete em função do tempo [%]
g	– densidade do fluxo de difusão de vapor de água [$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$]
g_v	– fluxo de humidade [$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$]
HR	– humidade relativa [%]
i	– gradiente hidráulico [-]
K	– coeficiente de permeabilidade do material poroso [cm/s]
k	– coeficiente empírico do modelo de secagem [h^{-1}]
L	– espessura da amostra [m]
m	– quantidade de água [kg/m]
m_a	– massa de ar seco [kg]
m_e	– massa de água [kg]
MR	– razão da humidade [-]
m_s	– massa do material no estado seco [kg]
m_v	– massa de vapor de água [kg]
m_{vs}	– massa de vapor de água de saturação [kg]

n – número de constantes [-]
 N – número de pontos experimentais [-]
 p – número de parâmetros estimados [-]
 P – pressão parcial de vapor de água [Pa, mmHg]
 P_c – pressão capilar [N/m^2]
 P_s – pressão de vapor de água à superfície [Pa]
 P_{sat} – pressão de saturação [Pa, mmHg]
 P_v – pressão de vapor de água no ar [Pa]
 q – fluxo de calor por condução [kcal/h]
 Q – variação de volume ao longo do tempo [cm^3/s]
 R – constante universal dos gases ideais [kJ/mol.K]
 r – raio do capilar [m]
 R^2 – coeficiente de regressão [-]
 R_{si} – resistência superficial interior [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$]
 T – temperatura [$^\circ\text{C}$]
 t – tempo de secagem [h]
 t_c – constante do tempo de secagem [h]
 t_i – tempo total do ensaio [h]
 T_r – temperatura de referência [$^\circ\text{C}$]
 U – coeficiente de transmissão térmica [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]
 U – teor de humidade do ar [kg/kg]
 u – teor de humidade em massa por unidade de volume [kg/m^3]
 u – velocidade do ar [m/s]
 u_r – velocidade de referência do ar [m/s]
 V – volume de ar húmido [m^3]
 V_e – volume de água contido no material [m^3]
 V_s – volume aparente do material no estado seco [m^3]
 W – humidade absoluta do ar [kg/m^3]
 w – teor de humidade [kg/kg]
 W_{cr} – teor de humidade crítico [kg/kg]
 W_h – teor de humidade higroscópico [kg/kg]
 W_{max} – teor de humidade máximo [kg/kg]
 W_{sat} – teor de humidade de saturação [kg/kg]

W_0 – teor de água inicial [%]

x – coordenada cartesiana [m]

X – humidade contida no material ao longo do tempo [kg/kg]

X_e – valor de equilíbrio do teor de humidade no material [kg/kg]

$X(t)$ – massa da amostra em função do tempo [kg]

X_0 – massa da amostra no início da secagem [kg]

X^* - valor teórico da humidade contido no material [kg/kg]

β, β' – coeficiente de transferência superficial de humidade [s/m, m/s²]

ψ – sucção capilar [mH₂O]

π – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material poroso [kg/(m.s.Pa)]

ρ – massa volúmica da água [kg/m³]

ρ_0 – massa volúmica do material seco [kg/m³]

θ – ângulo de contacto da água com o material [°]

θ – teor de humidade volúmico [m³/m³]

θ_e – temperatura do ar exterior [°C]

θ_i – temperatura do ar interior [°C]

θ_{si} – temperatura superficial interior [°C]

σ – tensão superficial entre a água e o ar [N/m]

EPS – Poliestireno Expandido

ETICS – External Thermal Insulation Composite Systems

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Fig. – Figura

MR – Moisture Ratio

PE – Percent Errors

RMSE – Root Mean Square Error

RPE – Revestimento Plástico Espesso

SEE – Sum Square Errors

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Normalmente, na construção civil, recorre-se a materiais porosos, ou seja, materiais que não são constituídos na sua totalidade por parte sólida. Esta característica dos materiais permite que se fixe humidade no seu interior, o que provoca alteração do teor de humidade do material.

A humidade é um dos maiores problemas das construções, degradando os edifícios e alterando o seu aspecto visual. Por acção da humidade, os materiais sofrem alterações das suas propriedades, diminuindo a sua qualidade e durabilidade. A presença de água, em qualquer dos seus estados físicos, no interior de materiais de construção, provoca alterações físicas e químicas.

Os fenómenos de humidade estão directamente relacionados com os factores climáticos: a temperatura, a humidade relativa do ar e a chuva em actuação conjunta com o vento.

O fenómeno de transferência de humidade, na forma de líquido ou de vapor, do interior do material para o ambiente denomina-se por secagem. A secagem ocorre quando há energia necessária para evaporar as partículas de vapor de água, ou de água no estado líquido, do interior do material poroso para o ambiente.

Os ciclos de molhagem / secagem são um dos maiores problemas na construção, contribuindo para a degradação e alteração do aspecto dos edifícios, diminuindo a durabilidade e a qualidade dos mesmos. Um elemento construtivo em contacto com água, faz o seu embebimento e seca quando a exposição ao ambiente húmido termina. Quando se encontra novamente em contacto com a água, o tempo para fazer o mesmo embebimento é menor. Deste modo, um elemento construtivo, à medida que vai sofrendo mais ciclos de molhagem / secagem, vai-se tornando mais vulnerável pela alteração das suas propriedades, devido à presença de humidade. Sendo este fenómeno variável conforme o tipo de material.

Neste trabalho será abordado o fenómeno da humidade na construção, embora o seu objectivo principal seja a avaliação do processo de secagem. Para tal, foram realizados ensaios para analisar a influência de alguns aspectos no tempo de secagem de um material de construção poroso. Realizou-se uma análise da cinética de secagem, recorrendo-se a modelos já desenvolvidos e estudados noutros materiais. Até à data conhecem-se poucos estudos de cinética de secagem de materiais de construção, sendo mais frequentemente realizados em produtos alimentares. O material poroso estudado foi um sistema de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS - External Thermal Insulation Composite Systems.

1.2. INTERESSE E OBJECTIVOS DO TRABALHO

O objectivo principal do trabalho desenvolvido foi avaliar a secagem de um material de construção poroso, tendo sido escolhido, para tal, um sistema do tipo ETICS. Para concretização desse objectivo estabeleceu-se um conjunto de tarefas ou objectivos singulares:

- Conhecimento dos factores e formas da manifestação de humidade na construção;
- Compreensão dos processos de transferência de humidade nos materiais de construção porosos;
- Compreensão dos efeitos dos ciclos molhagem / secagem no desempenho e aparência de materiais de construção;
- Compreensão do processo de secagem de materiais porosos;
- Levantamento dos modelos de cinética de secagem existentes na bibliografia e dos trabalhos realizados sobre este tema;
- Selecção de um modelo de cinética de secagem ajustado à secagem de amostras de ETICS;
- Análise da influência da orientação no tempo de secagem de amostras de ETICS;
- Análise da influência das condições ambientais (temperatura e humidade relativa) no tempo de secagem de sistemas do tipo ETICS;
- Análise da influência da temperatura no coeficiente de difusividade efectivo do vapor de água do ETICS;
- Determinação da energia de activação de Arrhenius.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução – contém uma breve introdução sobre os assuntos abordados no trabalho, enquadrando a importância dos estudos sobre a humidade e a secagem nos materiais de construção. Apresenta os principais interesses e objectivos a atingir com a realização do trabalho.
- Capítulo 2: Humidade na Construção – é um capítulo essencialmente teórico, que aborda as propriedades dos materiais porosos e as formas de manifestação e mecanismos de transferência de humidade em materiais de construção. Descreve, ainda, a transferência de massa nos materiais porosos, por movimento de água líquida e por difusão de vapor.
- Capítulo 3: Secagem – é o segundo capítulo teórico, descrevendo as três fases distintas do processo de secagem de um material poroso e a cinética de secagem. Inclui informação sobre o modo de determinação da razão da humidade em materiais, do coeficiente de difusividade efectivo do vapor de água e da energia de activação de Arrhenius.
- Capítulo 4: Ensaaios Laboratoriais – este capítulo descreve os procedimentos dos ensaios fundamentais para este estudo, apresentando uma breve descrição das amostras utilizadas. Caracteriza de forma sintética o material estudado, o ETICS.
- Capítulo 5: Resultados – neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados, bem como uma análise dos mesmos. Apresenta uma análise de alguns modelos da cinética de secagem, a influência no tempo de secagem da orientação das amostras durante o envelhecimento natural e da temperatura e humidade relativa do ambiente durante a secagem. Apresenta, ainda, um estudo da influência da temperatura no coeficiente da difusividade efectivo do vapor de água e a determinação da energia de activação de Arrhenius.

- Capítulo 6: Conclusões – neste último capítulo sintetizam-se os resultados dos estudos realizados e apresentam-se as principais conclusões da dissertação. Termina com sugestões para desenvolvimentos futuros neste domínio de investigação.

2

HUMIDADE NA CONSTRUÇÃO

2.1. INTRODUÇÃO

2.1.1. GENERALIDADES

A humidade é um dos maiores problemas das construções, que contribui para a degradação dos edifícios, a alteração do seu aspecto e das propriedades dos materiais, diminuindo a durabilidade e a qualidade dos mesmos.

A humidade no interior dos materiais, na forma de água líquida ou vapor, pode provocar alteração das propriedades químicas e físicas dos materiais, degradação por acção do gelo/degelo, migração de sais do interior para a superfície causando eflorescências (cristalização superficial de sais) e criptoflorescências (cristalização sob os revestimentos de parede). Estas alterações podem ser identificadas pelo aparecimento de microrganismos, fissuras, empolamento e destacamento dos revestimentos e cristalização de sais à superfície.

2.1.2. PROPRIEDADES HÍDRICAS DOS MATERIAIS

Os materiais porosos são aqueles que não são na sua totalidade constituídos por parte sólida, sendo uma parte deles formada por intervalos, abertos para o exterior, que podem ou não comunicar entre si [30].

Podemos definir dois tipos de porosidade, consoante a natureza, a importância e a disposição dos poros [17]:

- Porosidade fechada – o material permanece impermeável, uma vez que os vazios não comunicam entre si;
- Porosidade aberta – os vazios comunicam entre si, o que permite a circulação de fluidos no interior.

Na construção civil recorre-se normalmente a materiais porosos, com os poros total ou quase totalmente interligados (porosidade aberta), o que permite a fixação de humidade, alterando assim as características físicas devido à alteração do teor de humidade. Esta quantidade de humidade que se acumula nos materiais porosos deve-se essencialmente a quatro factores [18]:

- Natureza dos constituintes da fase sólida;
- Forma, dimensões, massa volúmica e modo de organização dos poros;
- Condições termodinâmicas, como pressões e temperaturas;
- Interações físico-químicas entre as diferentes fases: sólida, líquida e gasosa.

A capacidade de um material poroso ser atravessado por um fluido, quando submetido a um gradiente de pressão é denominada por permeabilidade. A permeabilidade ao vapor é bastante dependente da humidade relativa, aumentando consideravelmente com o aumento da humidade relativa do ambiente, em materiais higroscópicos, isto é, materiais em que a quantidade de vapor de água que conseguem adsorver é relativamente importante. Em materiais pouco ou nada higroscópicos, a permeabilidade é praticamente independente da humidade relativa.

A temperatura, a permeabilidade ao ar e as propriedades dos materiais relativas à transferência de humidade, são também factores que influenciam a permeabilidade ao vapor de água [17].

A água pode ser armazenada no interior dos materiais porosos em três estados distintos, em simultâneo ou não:

- Líquido, na forma de água, livre e absorvida;
- Sólido, na forma de gelo, ligada à estrutura do material;
- Gasoso, na forma de vapor contido nos poros.

Segundo a NIT 002 – LFC [17], a quantificação do Teor de Humidade é de extrema importância, uma vez que tem grande influência nas propriedades dos materiais, como a condutibilidade térmica e a permeabilidade ao vapor de água.

Define-se assim o Teor de Humidade (w) a partir da quantidade de água contida num material, sendo a relação entre a massa de água (m_e) e a massa do material no estado seco (m_s), expresso em kg/kg:

$$w = \frac{m_e}{m_s} \quad (2.1.)$$

Pode ainda falar-se em Teor de Humidade em Massa por Unidade de Volume (u) [kg/m³], que corresponde à razão entre a massa de água (m_e) e o volume aparente do material no estado seco (V_s):

$$u = \frac{m_e}{V_s} \quad (2.2.)$$

Quando se relacionam volumes, podemos definir Teor de Humidade Volúmico (θ) [m³/m³], que depende do volume de água contido no material (V_e) e do volume aparente do material no estado seco (V_s) da seguinte forma:

$$\theta = \frac{V_e}{V_s} \quad (2.3.)$$

Os materiais de construção porosos podem apresentar teores de humidade a variar entre o zero absoluto e o teor de humidade máximo, sendo estes valores extremos dificilmente obtidos em condições naturais. A Fig. 2.1 representa a descrição convencional dos diferentes teores de humidade que podem ser apresentados por um material.

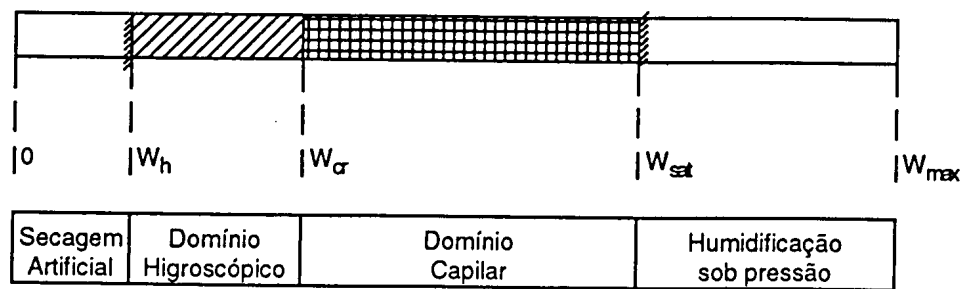


Fig.2.1 – Descrição convencional dos teores de umidade de referência de um material poroso [1]

O teor de umidade higroscópico (W_h) corresponde à quantidade de água que um material contém quando em equilíbrio com um ambiente com determinada umidade relativa. Pode variar entre o zero absoluto, se o material estiver em contacto com uma ambiência de umidade relativa nula, e o teor de umidade crítico.

O teor de umidade crítico (W_{cr}) diz respeito ao teor de umidade que um material apresenta quando em contacto com um ambiente saturado. Abaixo do teor de umidade crítico o transporte de água por capilaridade é praticamente impossível, ocorrendo apenas transporte na fase de vapor. É um parâmetro importante nos fenómenos de secagem e nas condensações internas em/entre camadas capilares.

O teor de umidade de saturação (W_{sat}) define-se como sendo a quantidade de água que um material contém quando em contacto com água durante um determinado período. Este teor de umidade é considerado uma vez que dificilmente se atingirá o teor de umidade máximo, devido à existência de ar dentro do material. Acima do teor de umidade de saturação, a circulação de ar deixa de ser possível.

O teor de umidade máximo (W_{max}) corresponde ao teor de umidade do material quando todo o volume não ocupado pela estrutura sólida do material poroso está preenchido com água, sendo o teor de umidade em volume igual à porosidade aberta, ou seja, todos os poros abertos encontram-se preenchidos com água, situação que só se atinge através da imersão em vácuo [1, 20].

2.1.3. PROPRIEDADES DA HUMIDADE DO AR

Segundo a NIT 002 – LFC [17], a Humidade do Ar é definida a partir da quantidade de vapor contida no “ar húmido”, em volume ou em massa. Sendo o “ar húmido” uma mistura de ar seco e vapor de água.

Quando se aborda a humidade do ar em volume, falamos de Humidade Absoluta do Ar (W), e relaciona a massa de vapor de água (m_v) e o volume de “ar húmido” (V), sendo expressa em kg/m^3 :

$$W = \frac{m_v}{V} \quad (2.4.)$$

Quando se trata em massa, denomina-se por Teor de Humidade do Ar (U) [kg/kg], e relaciona a massa de vapor de água (m_v) e a massa de ar seco (m_a):

$$U = \frac{m_v}{m_a} \quad (2.5.)$$

A psicrometria permite tratar as propriedades termodinâmicas do “ar húmido”. O Diagrama Psicrométrico, permite relacionar essas propriedades entre si. Este diagrama é sempre relativo a uma dada pressão atmosférica, geralmente a pressão atmosférica de referência, pelo que se deve proceder a correcções se a pressão atmosférica for diferente da que corresponde o diagrama (Fig. 2.2).

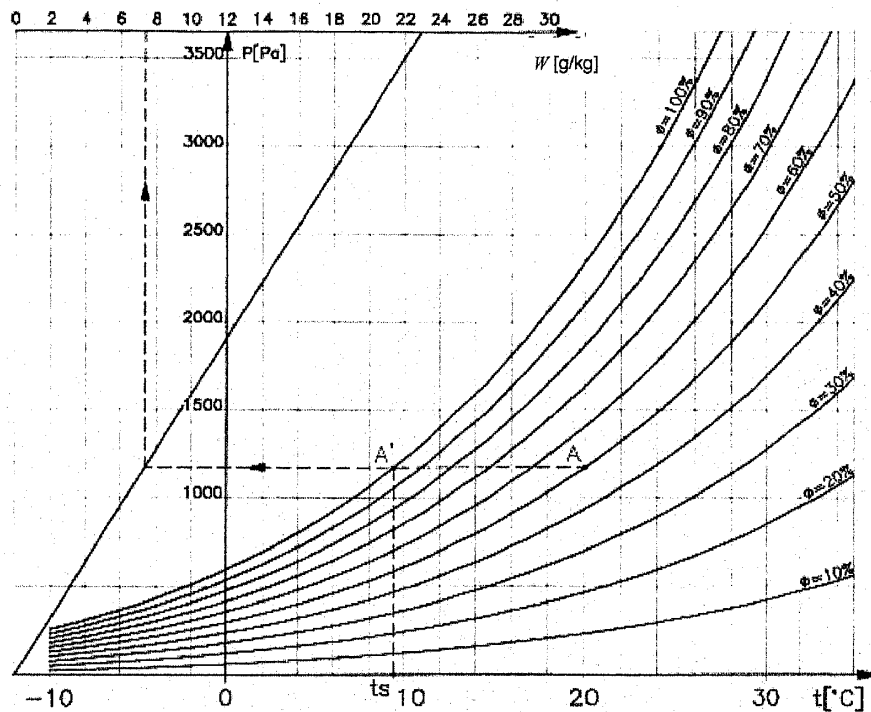


Fig.2.2 – Exemplo de um Diagrama Psicrométrico [18]

A Humidade Relativa é apresentada normalmente em percentagem e, segundo a NIT 002 – LFC [17], representa a razão entre a massa de vapor de água contida no ar (m_v) e a quantidade máxima de vapor que o ar pode conter – massa de vapor de água de saturação (m_{vs}), a uma dada temperatura:

$$HR = \frac{m_v}{m_{vs}} \times 100 \quad (2.6.)$$

Tendo em conta a hipótese do ar ser um gás perfeito, a humidade relativa também pode ser obtida relacionando-se a pressão parcial de vapor de água (P) e a pressão de saturação (P_{sat}):

$$HR = \frac{P}{P_{sat}} \times 100 \quad (2.7.)$$

2.2. FORMAS DE MANIFESTAÇÃO DE HUMIDADE

2.2.1. INTRODUÇÃO

É necessário conhecer-se a causa da humidade para melhor compreender a degradação dos materiais de construção. De forma genérica e simplificada, existem seis causas para a humidade:

- Humidade na construção;
- Humidade ascensional;
- Humidade por precipitação;
- Humidade por higroscopicidade;
- Humidade por condensações;
- Humidade por causas fortuitas.

Apenas conhecendo a causa se poderá actuar correctamente de forma a eliminar a manifestação da humidade nos elementos de construção. As causas acima citadas não aparecerão obrigatoriamente de forma isolada, poderão surgir manifestações de dois ou mais tipos de fenómenos associados, até porque uns podem ser consequência de outros.

Apesar deste estudo incidir no processo de secagem por transferência de vapor, considera-se importante uma breve referência de cada uma das causas de manifestação de humidade.

2.2.2. HUMIDADE NA CONSTRUÇÃO

Refere-se à introdução de água no processo de fabrico ou colocação dos materiais. Alguma dessa água evapora num curto período de tempo, mas uma parte significativa demora muito tempo a ser extraída dos materiais. Os períodos de secagem dos materiais porosos devem ser respeitados, havendo três fases no processo de secagem:

- Evaporação da água superficial, que ocorre de forma rápida;
- Evaporação da água existente nos poros de maiores dimensões dos materiais, mais demorada, uma vez que a maior quantidade de água se encontra no interior dos materiais, tendo, por isso, que atravessar todos os poros até à superfície, na forma líquida ou em forma de vapor;
- Evaporação da água existente nos poros de menores dimensões, processo extremamente lento, demorando mesmo vários anos.

As anomalias que normalmente são associadas a este tipo de humidade são os descasques ou expansões de alguns materiais devido à evaporação da água; as condensações devido à diminuição da temperatura superficial ou ao facto da condutibilidade térmica variar em função do teor de água presente nos materiais; e as manchas de humidade devido à presença de um teor de água superior ao normal nos materiais [13].

2.2.3. HUMIDADE ASCENSIONAL

Verifica-se em paredes em contacto com a água do solo, o que pode ocorrer nas seguintes situações:

- Fundações das paredes situadas abaixo do nível freático;
- Fundações das paredes situadas acima do nível freático em zonas de terreno com grande capilaridade, provocando a ascensão da água que exista a uma cota inferior;
- Paredes implantadas em terrenos pouco permeáveis ou com pendentes viradas para as paredes, fazendo com que a água deslize sobre o terreno e entre em contacto com as paredes.

Tratando-se de um fenómeno de capilaridade, quanto menor for a porosidade maior é a altura de ascensão. Altura esta que se considera ser até ao nível em que a quantidade de água que evapora pela parede compense a que é absorvida do solo por capilaridade. Diminuindo-se as condições de evaporação de uma parede, com recurso a um revestimento impermeável por exemplo, a altura atingida pela água tendencialmente aumenta até se estabelecer novo equilíbrio.

A espessura da parede é um factor que também influencia na altura de ascensão da água, sendo que para condições ambientais constantes e para uma mesma constituição, quanto mais espesso for o elemento construtivo maior é a altura atingida pela água. A orientação da fachada é outro factor que influencia a altura da água na parede, sendo as paredes orientadas a Norte mais afectadas do que as paredes com orientação Sul. O teor de água das paredes diminui com o aumento da altura acima do nível do solo, mantendo-se aproximadamente constante a partir de uma determinada altura, ao longo da espessura da parede.

As anomalias provenientes da humidade ascensional caracterizam-se pelo aparecimento de manchas de humidade nas zonas inferiores das paredes, junto ao solo, podendo apresentar zonas erodidas na parte superior dessas manchas. A formação de eflorescências ou criptoflorescências, manchas de bolor ou vegetação parasitária são também manifestações possíveis, com especial destaque em zonas pouco ventiladas [13].

2.2.4. HUMIDADE POR PRECIPITAÇÃO

Humidade devida à água da chuva (fenómeno capilar) e à falta de estanquidade nos elementos das fachadas. A água da chuva apenas afecta os elementos de construção exteriores quando acompanhada por vento, sendo função da sua intensidade e direcção. Sem vento a chuva teria uma trajectória vertical que pouco interferiria com as fachadas dos edifícios. Essa trajectória é alterada consoante a intensidade do vento que, quanto maior for, mais horizontal torna a trajectória das gotas de chuva. Surge assim o risco de humedecimento dos paramentos interiores e dos materiais de isolamento térmico diminuindo a resistência térmica dos elementos construtivos.

A deficiente concepção e a fissuração são exemplos de factores que permitem a ocorrência de anomalias devidas aos fenómenos de penetração de água da chuva quando actua em simultâneo com o vento. Tal não se verificaria se os elementos fossem concebidos de forma a resistirem a tais acções. A localização e a orientação são aspectos essenciais a ter em atenção no estudo dos riscos de molhagem pela chuva incidente para a correcta concepção das fachadas.

As principais anomalias associadas à precipitação são as manchas de humidade de diversas dimensões nos paramentos interiores das paredes exteriores, que tendem a desaparecer com tempo seco. A formação de eflorescências, criptoflorescências e bolores são também sintomas frequentes [13].

2.2.5. HUMIDADE POR HIGROSCOPICIDADE

Humidade associada às propriedades dos materiais, mais concretamente à capacidade dos mesmos em adsorver água. Os materiais de construção podem ser classificados como higroscópicos ou não higroscópicos. Designam-se por higroscópicos quando a quantidade de água que se fixa por adsorção é relativamente importante, como é o caso da madeira, o betão celular e o gesso. Os materiais cuja massa se mantém praticamente constante independentemente da humidade relativa do ambiente onde se inserem são denominados por não higroscópicos, como por exemplo o barro vermelho [1].

Muitos materiais de construção têm na sua constituição sais solúveis em água. Se as paredes construídas com esses materiais forem sujeitas à humidificação, os sais dissolvidos migrarão com a água até às superfícies e aí cristalizarão sob a forma de eflorescências e criptoflorescências. Quando esses sais são higroscópicos, sofrem ciclos de dissolução-cristalização, consoante o aumento e diminuição da humidade relativa do ar, humedecendo e degradando as superfícies em que se encontram.

As anomalias causadas por fenómenos de higroscopicidade caracterizam-se pelas manchas de humidade, nos locais com grandes concentrações de sais, e pelas degradações dos revestimentos das paredes [13].

2.2.6. HUMIDADE POR CONDENSAÇÕES

2.2.6.1. Generalidades

A humidade por condensações está relacionada com as condições higrotérmicas dos ambientes interiores e exteriores, e com as propriedades dos materiais.

2.2.6.2. Condenações Superficiais

O ar apenas pode conter uma quantidade de vapor de água igual ao limite de saturação, para uma dada temperatura. Acima desse valor ocorrem condensações do vapor de água. As condensações que ocorrem na superfície dos elementos de construção, directamente observáveis, denominam-se por condensações superficiais. Este fenómeno é frequente no Inverno, quando a temperatura superficial interior dos elementos construtivos é inferior à temperatura de ponto de orvalho da camada de ar que contacta com as paredes. Segundo a NIT 002 – LFC [17], temperatura de ponto de orvalho é a temperatura abaixo da qual ocorre condensação do vapor de água contido no ar. Para uma dada quantidade de vapor de água no ar, a temperatura de ponto de orvalho é a temperatura correspondente a 100 % de humidade relativa. A temperatura superficial interior pode ser determinada com recurso à seguinte equação [15]:

$$\theta_{si} = \theta_i - U \times R_{si} (\theta_i - \theta_e) \quad (2.8.)$$

onde: θ_{si} – temperatura superficial interior [°C]

θ_i – temperatura do ar interior [°C]

θ_e – temperatura do ar exterior [°C]

U – coeficiente de transmissão térmica [W/m².°C]

R_{si} – resistência superficial interior [m².°C/W]

Relacionando estes parâmetros, é possível observar que quanto maior for a espessura do isolamento térmico do elemento construtivo, maior será a temperatura superficial interior, sendo menor o risco de ocorrência de condensações. Assim como, quanto menor for a resistência térmica do elemento e menor for a temperatura exterior, mais provável é a ocorrência de condensações superficiais.

Há três condições fundamentais para se evitar a ocorrência de condensações superficiais:

- Melhoria do isolamento térmico – aumentando o isolamento térmico aumenta a temperatura superficial interior;
- Melhoria da ventilação – aumentando os caudais de ventilação, a humidade relativa do ar diminui;
- Controlo da produção de água no interior – diminuindo a quantidade de vapor de água no ar.

Em edifícios com inércia térmica muito forte, ou em edifícios correntes mas em dias de humidade elevada em que o ar exterior sofra um aumento repentino da temperatura, as condensações poderão ocorrer na Primavera / Verão. A temperatura interior em edifícios com inércia térmica muito forte é menor que a temperatura exterior. Quando a temperatura exterior começa a aumentar, a temperatura interior não acompanha esse aumento, atingindo valores baixos nas zonas de contacto com as paredes, que apresentam uma temperatura inferior à do ar. Juntamente com a diminuição da temperatura há um aumento da humidade relativa, atingindo-se mais facilmente o limite de saturação e originando condensações [13].

As condensações são caracterizadas pelo aparecimento de bolores, algas, manchas de humidade e pela existência de água escorrendo ao longo da superfície das paredes.

2.2.6.3. Condensações Internas

As condensações internas são as condensações que ocorrem no interior dos elementos construtivos. Estas condensações ocorrem quando a pressão parcial do vapor de água que atravessa a parede por difusão iguala a pressão de saturação correspondente à temperatura num determinado ponto.

Se tivermos, por exemplo, uma parede exterior com uma camada impermeável ao vapor na face exterior, sujeita a condições interiores iguais às exteriores, isto é, temperaturas exterior e interior iguais e humidades relativas exterior e interior também iguais, não haverá risco de condensações internas, uma vez que as pressões instaladas e de saturação também serão iguais no interior e no exterior. Se a mesma parede estiver exposta a condições exterior e interior diferentes, haverá um gradiente de temperaturas e será necessário determinar-se a curva de pressões de saturação em função da temperatura instalada e compará-la com a curva de pressões instaladas. Se as duas curvas tiverem pontos coincidentes então haverá ocorrência de condensações internas. Este fenómeno pode ser observado na Fig. 2.3 [1].

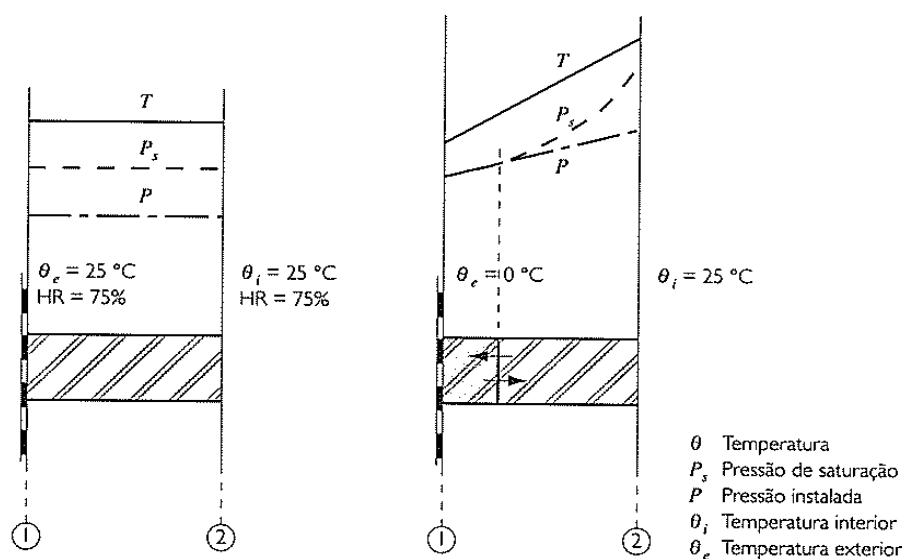


Fig.2.3 – Sentido da água da chuva sobre uma parede, sem e com acção do vento [15]

As condensações internas dependem das características higrotérmicas do ar interior e exterior e da própria constituição do elemento [17]. Há dois tipos de factores que influenciam as condensações internas [13]:

- A permeabilidade ao vapor de água – condiciona as variações de pressão parcial de vapor ao longo do elemento construtivo;
- O isolamento térmico dos materiais que constituem os elementos construtivos – condiciona a temperatura interior e os valores de pressão de saturação.

As condensações internas geralmente não são visíveis, mas podem contribuir para um agravamento das condensações superficiais, através do aumento do teor de água nos materiais do elemento construtivo, que origina uma diminuição da resistência térmica dos mesmos. Podem ainda danificar materiais orgânicos, originar descasques de materiais, etc.

2.2.7. HUMIDADE POR CAUSAS FORTUITAS

Acidentes vários, rupturas, defeitos de construção, falhas de equipamentos e deficiente manutenção são apenas exemplos de causas fortuitas que originam o aparecimento de humidade nas construções. São caracterizados por serem pontuais.

Apesar da variedade de causas fortuitas que originam humidade, podem-se destacar as seguintes características típicas [13]:

- Natureza localizada das anomalias;
- Permanente e grave em casos de rotura de canalizações, eventualmente sazonal se forem de águas pluviais;
- Associado a períodos de precipitação quando se refere a infiltrações de água das chuvas de maior gravidade do que a que resultaria em casos normais dessas infiltrações;
- Migração da humidade para locais afastados da origem das anomalias, quando actuam mecanismos de capilaridade.

2.3. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE HUMIDADE EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

2.3.1. INTRODUÇÃO

Quanto à fixação da humidade nos materiais de construção, podem ser considerados três mecanismos físicos:

- Adsorção/desadsorção ou Higroscopicidade;
- Condensação;
- Capilaridade.

Na maioria dos casos, estes mecanismos explicam a variação do teor de humidade no interior dos materiais de construção em estruturas porosas. No entanto, estes mecanismos podem não actuar de forma singular, podendo a eles juntar-se a acção da gravidade e das pressões exteriores geradas pelo vento, tornando muito complexo o estudo e a modelização do movimento global da água no interior dos materiais [15].

2.3.2. HIGROSCOPICIDADE

Os diversos materiais de construção podem apresentar diferentes graus de higroscopicidade, podendo ser higroscópicos ou não higroscópicos. No §2.2.5 já foi descrita a diferença entre estes materiais. O fenómeno de higroscopicidade, ou adsorção/desadsorção, deve-se às forças intermoleculares ou de *Van Der Waals* que actuam na interface sólido-fluido, no interior dos poros, e pode ser representado graficamente pela Fig. 2.4 [1].

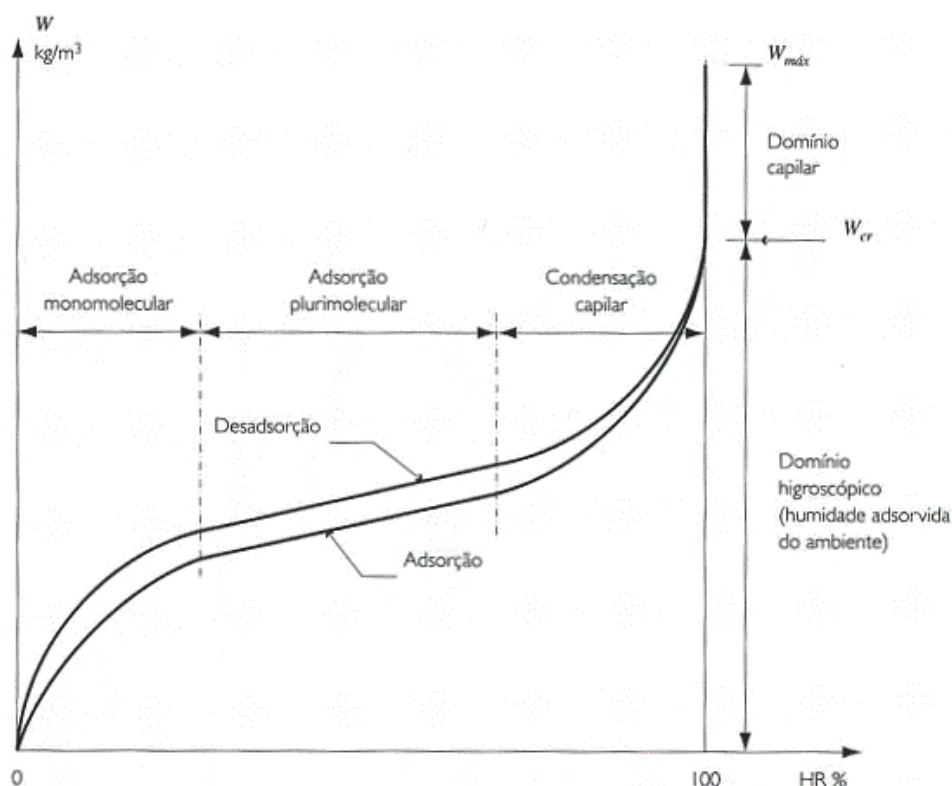


Fig.2.4 – Variação do teor de humidade em função da humidade relativa [15]

Como é possível verificar na Fig. 2.4, a fixação de água por adsorção ocorre em três fases. A primeira fase designa-se por adsorção monomolecular, e corresponde à fixação de uma camada de moléculas de água na superfície interior do poro. Esta será tanto maior quanto maior for a porosidade do material e menores forem os poros [20]. Segue-se a segunda fase, denominada por adsorção plurimolecular, quando ocorre a deposição de várias camadas de moléculas de água sobre a primeira camada adsorvida. O domínio higroscópico termina com a condensação capilar, a terceira fase, que ocorre quando se dá a união das camadas plurimoleculares, se o diâmetro dos poros é suficientemente pequeno. Este fenómeno é descrito pela teoria de *Kelvin* [1]. A Fig. 2.5 ilustra a fixação de água por adsorção em cada uma das fases.

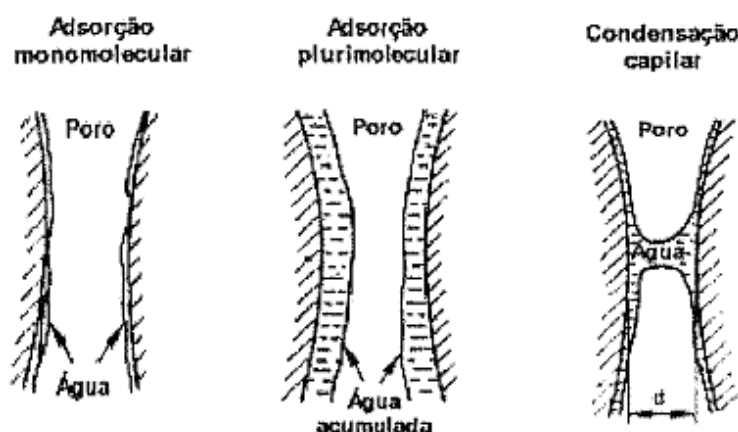


Fig.2.5 – Fixação de água por adsorção [18]

As curvas higroscópicas de adsorção e desadsorção de água, características de cada material, não são coincidentes, tal como se pode observar na Fig. 2.4, sendo que a curva de desadsorção apresenta, para a mesma humidade relativa, valores mais elevados de teor de humidade. A este fenómeno dá-se o nome de *histeresis*, e questões relacionadas com o mesmo, assim como com a influência da temperatura, não estão ainda completamente estudadas [1].

2.3.3. CONDENSAÇÃO INTERNA – MODELO DE GLASER

Em qualquer ponto do interior de um material de construção, a pressão de vapor (P) nunca deverá ser superior à pressão de saturação (P_s), segundo a teoria da difusão de vapor de *Glaser*. Sempre que as pressões se igualem ocorre o fenómeno de condensações, em que o transporte de água em fase de vapor origina o aparecimento de uma fase líquida.

Através do diagrama psicrométrico é possível determinar-se a curva de pressões de saturação, conhecendo a curva de distribuição de temperatura no interior de um elemento construtivo. Comparando-se essa curva de pressões de saturação com a curva das pressões instaladas verifica-se a possibilidade de ocorrência de condensações, sendo que se houver pontos coincidentes haverá risco de ocorrer em condensações internas. A Fig. 2.6 representa graficamente o método de *Glaser*, em função da pressão (P) e da resistência à difusão de vapor de água (Rd) de cada camada do elemento construtivo.

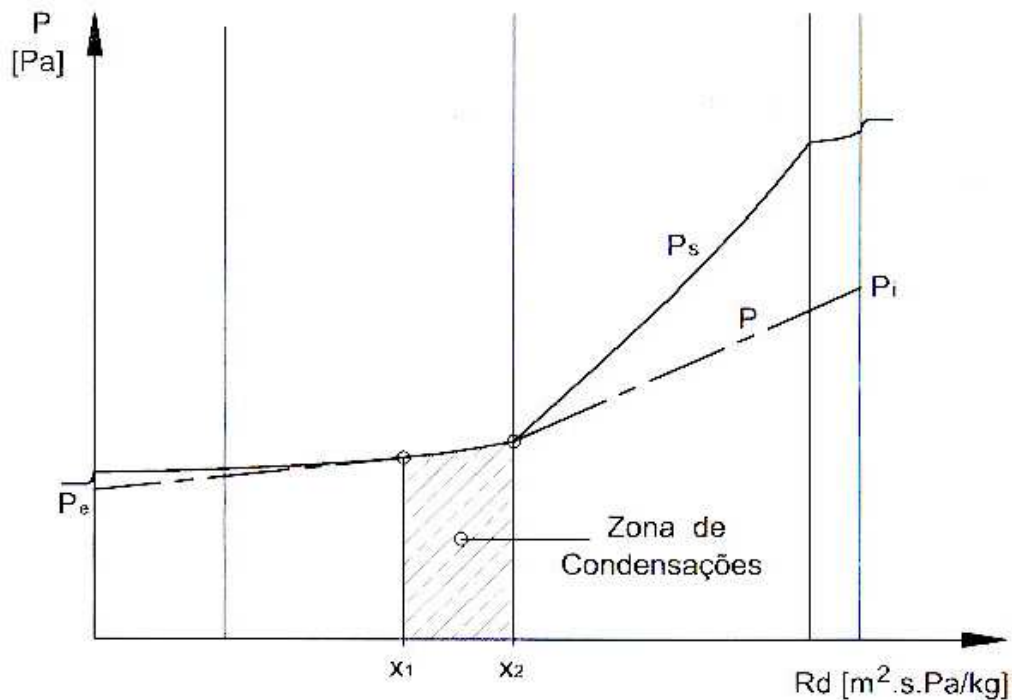


Fig.2.6 – Zona de ocorrência de condensações internas (método de Glaser) [17]

O aumento do fluxo condensado pode surgir do vapor contido inicialmente nesse domínio, ou, maioritariamente, do fluxo que se desloca da zona quente para a zona fria dos elementos construtivos. Se a condensação originar teores de humidade elevados, os fluxos de humidade em fase líquida passarão a ser no sentido contrário ao fluxo de vapor [1].

2.3.4. CAPILARIDADE

Quando um material é exposto à água em fase líquida ocorre o mecanismo de capilaridade, ilustrado na Fig. 2.7.

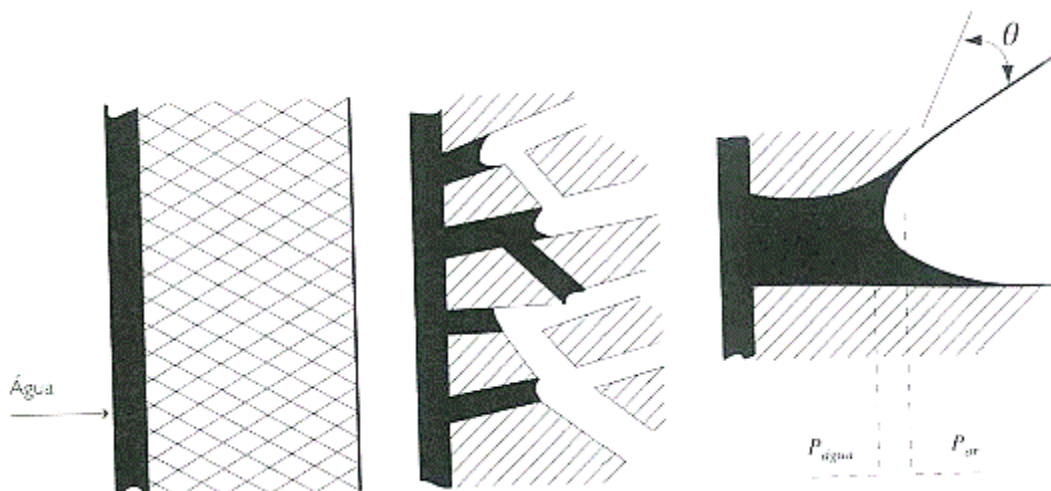


Fig.2.7 – Mecanismo de capilaridade [15]

O contacto entre a água e a superfície dos poros do material estabelece um gradiente de pressão, designado por pressão capilar (P_c), que corresponde à diferença entre a pressão do ar (P_{ar}) e a pressão da água ($P_{água}$), e origina um fluxo de água que tende a preencher por completo os poros [20].

A pressão capilar é função da temperatura e humidade do material e da distribuição do raio dos poros e da sua variação. Diminui quando aumenta o teor de humidade e é nula quando o teor de humidade é igual ao teor de humidade máximo, como se verifica na Fig. 2.8.

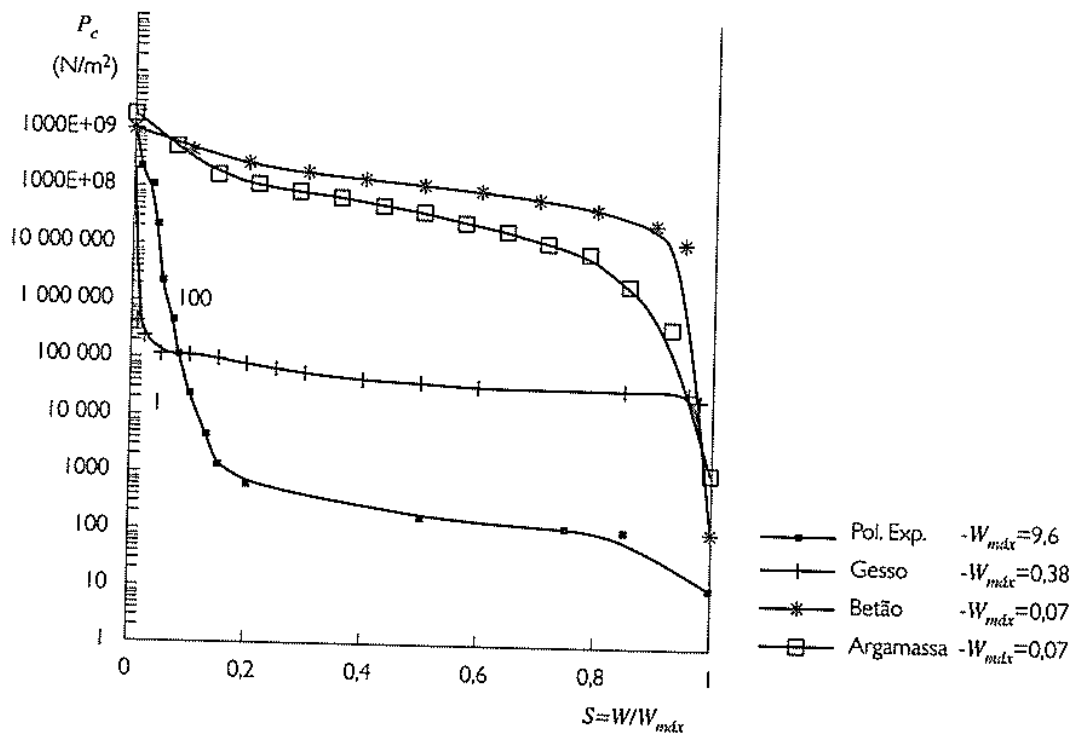


Fig.2.8 – Curva de pressão capilar [15]

O fenómeno da capilaridade, tal como o da higroscopicidade, pode ocorrer em condições termodinâmicas de equilíbrio no meio do material e apresenta um efeito de *histeresis* entre a embebição e a secagem.

2.4. SOLICITAÇÃO CLIMÁTICA

2.4.1. GENERALIDADES

As fachadas dos edifícios estão directamente expostas aos agentes atmosféricos, estando sujeitas a diversas acções. Segundo J. P. Flori [3], as principais solicitações climáticas responsáveis pelos fluxos de humidade são a chuva incidente, o vento e a radiação solar. Podendo considerar-se ainda a humidade do ar e os diferenciais de temperatura.

2.4.2. INFLUÊNCIA DO CLIMA NO COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

O clima influencia o comportamento dos materiais, nomeadamente quando a humidade é a base das suas manifestações, comportando-se como agente perturbador da eficiência funcional dos elementos construtivos.

No entanto, esta influência do clima está ainda pouco aprofundada, referindo-se sobretudo à análise estatística da ocorrência simultânea dos diversos factores climáticos, quando da conjugação resultam os efeitos mais desfavoráveis para os edifícios. A humidade relativa e pressão de vapor, a temperatura, a precipitação, o regime de ventos e a insolação são os factores climáticos que mais influenciam os edifícios [4].

2.4.2.1. Chuva e Vento

A água da chuva é responsável por variadíssimos fenómenos que surgem nos elementos construtivos, tais como o aumento e diminuição de volume por secagem, os ciclos gelo/degelo e o aparecimento de fungos. No entanto, a chuva não é por si só uma acção especialmente gravosa para as fachadas dos edifícios. Os riscos começam a ter especial significado quando, para uma dada quantidade de precipitação, a intensidade do vento numa dada direcção vai aumentando. A quantidade de água incidente nos elementos verticais é função do conjunto das intensidades de precipitação e vento [6].

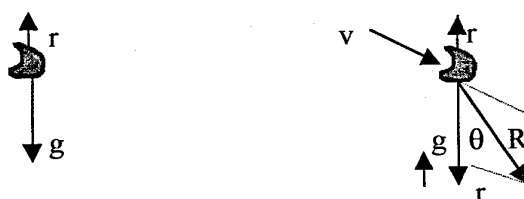


Fig.2.9 – Acção do vento sobre as gotas de chuva [3]

Em que: v – acção do vento

g – acção da gravidade

r – resistência do ar

R – resultante das solicitações

θ – ângulo entre a parede vertical e a direcção final da gota de água

Os materiais de construção absorvem a água da chuva em função da sua porosidade, sendo que quanto mais poroso for o material mais água absorve. Outro meio de penetração da água é através das fissuras resultantes, por exemplo, da retracção dos materiais.

A água no estado líquido ou sobre a forma de vapor, juntamente com o oxigénio do ar e dióxido de carbono, provoca a formação de manchas nas superfícies [7]. Na ausência de chuva, o vento origina uma diminuição da temperatura superficial exterior, promovendo os fluxos de humidade do interior para o exterior [5].

2.4.2.2. Temperatura

As dilatações e contracções dos materiais de construção são provocadas pelas diferenças de temperatura. Em elementos de pequenas dimensões pode dar-se a rotura ou a desagregação de alguns materiais porosos saturados quando, para valores negativos da temperatura, a água contida nos poros congela aumentando de volume [4].

2.4.2.3. Outros Agentes

A humidade do ar e a influência da luz são factores importantes no processo de degradação dos elementos exteriores dos edifícios. A humidade do ar condiciona o humedecimento e a secagem dos materiais, em especial devido à ocorrência de condensações [4], e a influência da luz interfere na conservação dos elementos sintéticos e na sua durabilidade [7].

A incidência dos raios ultra violeta, o factor químico do ambiente exterior, a localização e a orientação em relação aos pontos cardeais são outros factores que influenciam a durabilidade e o funcionamento dos elementos construtivos exteriores.

2.5. CICLOS MOLHAGEM / SECAGEM

Os ciclos molhagem / secagem, ou vice-versa, são um factor com grande impacto no comportamento dos materiais de revestimento de elementos exteriores. Como já foi referido, os factores climáticos mais associados aos ciclos secagem / molhagem são a temperatura, a humidade do ar, a chuva e o vento. Porém, outros factores poderão ter influência no humedecimento e secagem dos materiais, de forma mais indirecta. A acção conjunta destes factores, interfere no transporte de água nos materiais, não só na fase líquida como também na fase de vapor.

Segundo Beguin [8], as combinações de factores podem originar três situações distintas: período de molhagem, período neutro e período de secagem (Fig. 2.10) [7]:

- Período de molhagem: a quantidade de água sobre a fachada é função da chuva “empurrada” pelo vento, e depende das alturas de precipitação, do tempo e da velocidade média do vento;
- Período neutro: ocorre em situações de chuva sem vento, nevoeiro, fraca precipitação ou períodos de tempo instável, não sendo possível uma conclusão relativa ao movimento instantâneo da água na superfície da fachada;
- Período de secagem: é possível uma diminuição da quantidade de água na fachada quando há uma acção do vento e humidade relativa do ar baixa, durante um certo tempo.

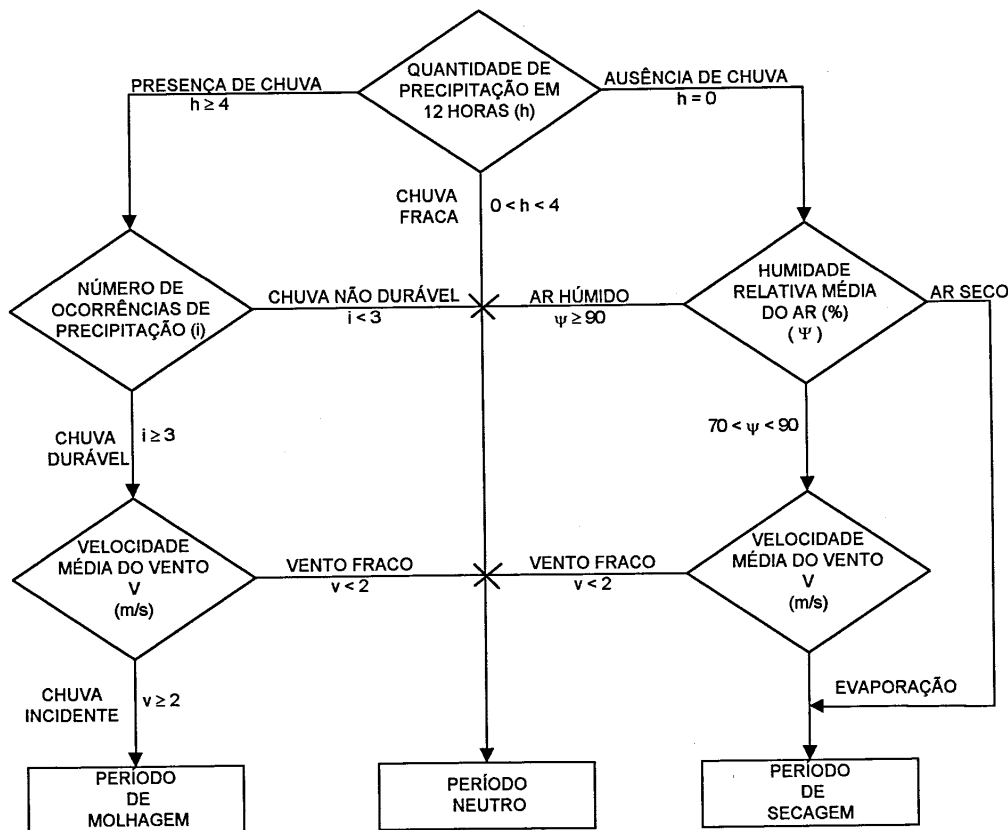


Fig.2.10 – Organograma do processo de definição das diferentes situações de classificação de períodos meteorológicos (12 horas) [7]

Quando se analisa o ciclo molhagem / secagem, uma das dúvidas que surgem é como evoluem os perfis do teor de humidade. Freitas [1] realizou um conjunto de ensaios que permitiram concluir que o processo de secagem é mais lento que o de molhagem, provocando acumulação de humidade quando as durações de embebição e secagem são iguais.

2.6. TRANSFERÊNCIA DE MASSA NOS MATERIAIS POROSOS

2.6.1. MOVIMENTO DA ÁGUA LÍQUIDA

O movimento da água líquida nos materiais porosos é feito essencialmente por capilaridade. São as forças de tracção resultantes da tensão superficial do líquido nos poros que originam a movimentação da água líquida dentro dos materiais porosos.

Durante o processo de secagem há um deslocamento progressivo da água dos poros mais grossos para os mais finos, fazendo aumentar a tensão superficial e aspirar o líquido dos poros vizinhos de maiores dimensões. A este último fenómeno dá-se o nome de sucção capilar [10]:

$$\psi = -\frac{P_c}{\rho \times g} \quad (2.9.)$$

em que: ψ – sucção capilar [m H₂O]
 P_c – pressão capilar [N/m²]
 ρ – massa volúmica da água [kg/m³]
 g – aceleração da gravidade [m/s²]

A pressão capilar refere-se à diferença de pressão que é gerada na interface entre as fases líquida e gasosa. É a pressão que faz com que o líquido suba num tubo capilar vertical, até ao equilíbrio. O peso da coluna de água em cada momento opõe-se a essa ascensão e o equilíbrio ocorre quando as forças que originam a ascensão são equilibradas pelo peso da coluna de água [16].

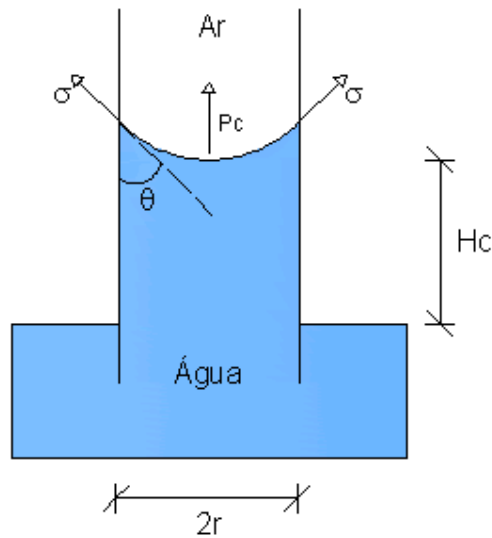


Fig.2.11 – Pressão capilar dentro de um poro capilar [16]

A pressão capilar pode ser determinada pela seguinte equação [16]:

$$P_c = \frac{2 \times \sigma \times \cos \theta}{r} \quad (2.10.)$$

em que: σ – tensão superficial entre a água e o ar [N.m⁻¹]
 θ – ângulo de contacto da água com o material [°]
 r – raio do capilar [m]

O ângulo de contacto é o ângulo entre as superfícies do material sólido e do líquido, e resulta do equilíbrio de tensões nas interfaces sólido-líquido, sólido-ar e líquido-ar. O ângulo de contacto é distinto para materiais hidrófilos e hidrófugos. Para um material hidrófilo, o ângulo de contacto é inferior a 90° e forma um menisco côncavo, num capilar. Para um material hidrófugo, verifica-se o inverso, ou seja, o ângulo de contacto é superior a 90° e corresponde, num capilar, à formação de um menisco convexo.

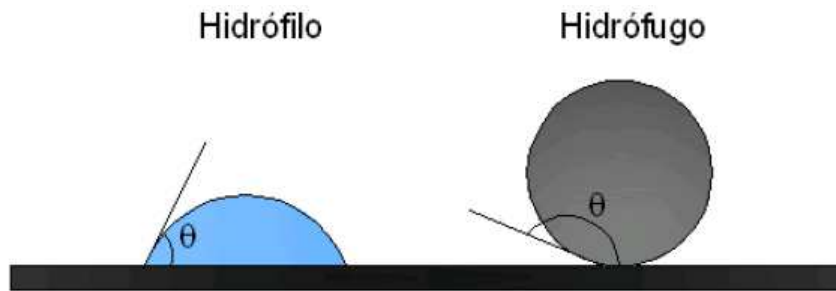


Fig.2.12 – Representação do ângulo de contacto em materiais sobre uma superfície plana [16]

A sucção capilar tem um desenvolvimento inverso ao teor de humidade, diminuindo com o aumento do teor de humidade. É nula quando o teor de humidade do material iguala ao seu teor de humidade máximo e é máxima quando o teor de humidade é nulo, tal como se pode verificar na Fig. 2.13 [10].

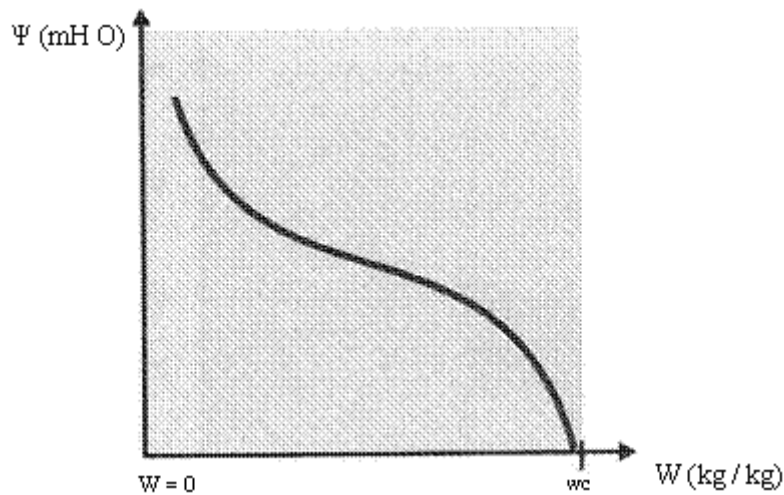


Fig.2.13 – Variação da sucção capilar com o teor de humidade [10]

Em condições isotérmicas, a quantidade de água que atravessa uma determinada secção de um material de estrutura porosa, num dado intervalo de tempo, pode ser obtido pela seguinte equação [10]:

$$m = A \times \rho_0 \times \int W_{t+dt}(X) - W_t(X) dx \quad (2.11.)$$

onde:

- m – quantidade de água [kg/m]
- A – área da secção do material poroso [m²]
- ρ_0 – massa volúmica do material seco [kg/m³]
- W – teor de humidade do material [kg/kg]

A quantidade de água que atravessa um material poroso pode ser determinada também com recurso a perfis do teor de humidade do material, como demonstra a figura seguinte:

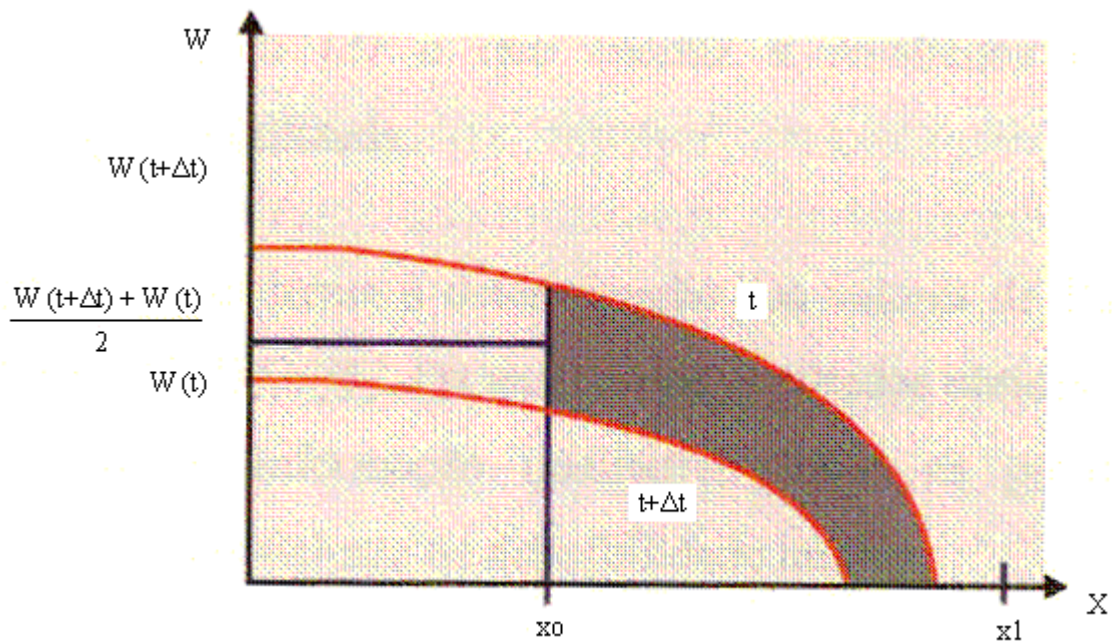


Fig.2.14 – Quantificação dos fluxos de água no instante “t” e “t+Δt” [10]

A área mais sombreada representa a quantidade de água que atravessa a secção com abcissa x_0 , no intervalo de tempo Δt .

Pode também falar-se em fluxo de humidade que atravessa uma secção de um material de estrutura porosa. O fluxo médio é determinado através da seguinte equação [10]:

$$F_w = D_w \times \rho_0 \times \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.12.)$$

em que: F_w – fluxo [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]

D_w – coeficiente de difusibilidade hídrica [m^2/s]

ρ_0 – massa volúmica do material seco [kg/m^3]

W – teor de humidade do material [kg/kg]

O coeficiente de difusibilidade hídrica (D_w) é um parâmetro que depende do tipo de estrutura porosa do material e do gradiente de humidade e pode ser determinado com recurso a diversas técnicas. De uma análise feita com base em resultados obtidos de diferentes autores, podemos concluir o seguinte [10]:

- O coeficiente de difusibilidade hídrica (D_w) aumenta com os teores de humidade no domínio higroscópico;
- Teores de humidade de saturação correspondem a um máximo do coeficiente de difusibilidade hídrica;
- Pode aproximar-se o comportamento deste coeficiente em função do teor de humidade a uma função exponencial, na zona de teores de humidade elevados;
- É quase impossível verificar experimentalmente a influência da variação da temperatura no coeficiente de difusibilidade hídrica.

2.6.2. DIFUSÃO DE VAPOR

2.6.2.1. Transferência Ar-Sólido

De forma a simplificar o processo de transferência de humidade ar-sólido, é considerada uma camada de ar, de pequena espessura, adjacente à superfície que funciona como fronteira. Deste modo consegue-se uma aproximação ao fenómeno real da transferência de vapor entre camadas do mesmo elemento construtivo.

A transferência de vapor de água da superfície para o ar, ou vice-versa, assim como a transferência de calor, está associada a uma resistência, que provém da influência de uma lâmina de ar estagnado adjacente à superfície, que o vapor tem que atravessar por difusão. Para além dessa camada, a transferência de vapor dá-se essencialmente por convecção [21].

A humidade transportada, por evaporação, da superfície material para o ambiente, segue a lei de difusão superficial de vapor, podendo ser representada pelas equações (2.13) e (2.14), respectivamente, em função das concentrações de vapor à superfície e na ambiência, ou em função das pressões de vapor de água no ar e à superfície [10, 21]:

$$g_v = \beta' \times (C'_s - C'_a) \quad (2.13.)$$

$$g_v = \beta \times (P_v - P_s) \quad (2.14.)$$

onde: g_v – fluxo de humidade [$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$]

β' – coeficiente de transferência superficial de humidade [m/s^2]

C'_s – concentração de vapor de água à superfície [kg/m^3]

C'_a – concentração de vapor de água na ambiência [kg/m^3]

β – coeficiente de transferência superficial de humidade [s/m]

P_v – pressão de vapor de água no ar [Pa]

P_s – pressão de vapor de água à superfície [Pa]

Analisando as equações, é possível afirmar que enquanto a superfície do elemento construtivo está saturada, ou seja, com 100% de humidade relativa, o fluxo de secagem mantém-se constante (§3.2 Fig. 3.1 e 3.2, na primeira fase da secagem) [10].

O coeficiente de transferência superficial de humidade (β), que traduz a resistência da camada fronteira à difusão da massa, é de determinação complexa, dependendo dos seguintes parâmetros [1]:

- Teor de humidade do material poroso à superfície;
- Humidade relativa do meio ambiente;
- Temperatura do material e do ambiente;
- Rugosidade da superfície;
- Convecção e radiação à superfície;
- Turbulência e velocidade do ar na superfície do elemento construtivo.

Pode relacionar-se o valor de β com o coeficiente de transferência de calor por convecção, h_c , recorrendo a simplificações da fórmula de Lewis [21]:

$$\beta = 7.10^{-9} \times h_c \quad (2.15.)$$

Krischer [9] realizou ensaios que permitiram representar a variação do fluxo de vapor evaporado, por área de secção e unidade de percurso de difusão, em função da relação entre a pressão parcial de vapor da ambiência e a pressão de vapor saturada, em ambientes com diferentes pressões. Com base nesse estudo, foi possível tirar algumas conclusões sobre a secagem dos materiais de construção [10]:

- A velocidade de evaporação aumenta, de forma considerável, com a temperatura;
- Uma diminuição da pressão de vapor do ar tem maior influência a temperaturas baixas do que a temperaturas elevadas;
- Para temperaturas altas, um pequeno aumento de temperatura, permite a utilização de humidades relativas elevadas, mantendo-se a mesma velocidade de evaporação.

2.6.2.2. Transferência em Materiais Porosos

O estudo teórico da transferência de calor e humidade em meios porosos não saturados e, particularmente, em materiais e elementos de construção, tem sido alvo de grande investigação, surgindo, a partir da década de cinquenta, diversos modelos baseados na mecânica dos fluidos, utilizando as leis de difusão de massa (fase líquida – Darcy; fase vapor – Fick) e de difusão de calor (Fourier). Destacam-se os trabalhos de Glaser, Krischer-Vos, Luikov, Philip-De Vries e Whitaker [17].

Além disso, existiu um projecto europeu no âmbito do programa “Science”, com objectivo de caracterizar a microestrutura dos materiais como meio de previsão da transferência de humidade em materiais porosos. Assim como foram realizados vários estudos sobre o problema das humidades, no âmbito da comissão W40 do CIB – Heat and mass transfer [1].

Darcy foi quem começou a estudar o fluxo de humidade em meios porosos. O estudo consistiu em percolar água através de uma amostra de solo variando o seu comprimento e a área, assim como as alturas das colunas de água, a partir de dois reservatórios. Mediu a vazão de água que passava através da amostra, isto é, a variação de volume ao longo do tempo, e concluiu que a vazão era proporcional à diferença de altura da coluna de água e à área, e inversamente proporcional ao comprimento [31].

$$Q = k \times i \times A \quad (2.16.)$$

Onde: Q – variação de volume ao longo do tempo [cm^3/s]
 k – coeficiente de permeabilidade do material poroso [cm/s]
 i – gradiente hidráulico [-]
 A – área da secção transversal da amostra [cm^2]

Esta lei foi validada por diversos autores. No entanto, para fluxos líquidos a velocidades altas e para fluxos de gás a velocidades baixas ou muito altas, a lei de Darcy torna-se inválida [31].

Existem vários modelos de transferência de um gás por difusão, dos quais se destaca o de Fick. Este modelo considera a ausência de forças de transporte, como fluxo de líquido, fluxo de gás e gradiente de temperatura. Fick considera que o vapor de água é uma concentração de gás que se aproxima de um gás ideal e que a velocidade de difusão é constante através de um material homogéneo [17].

Considerando um material poroso, indeformável, homogéneo, não higroscópico, com faces planas e paralelas, estanque ao ar, em equilíbrio térmico, sem produção interna de fluxos e submetido a um regime permanente e sem transferência de água na fase líquida, pode afirmar-se que o transporte de humidade se dá exclusivamente por difusão de vapor, obedecendo a lei de Fick [20]:

$$g = -\pi(T, HR) \times \frac{dp}{dx} \quad (2.17.)$$

sendo: g – densidade do fluxo de difusão de vapor de água [$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$]
 dp/dx – gradiente de pressão de vapor de água [Pa/m]
 $\pi(T, HR)$ – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material, sob acção de um gradiente de pressão de vapor de água, em função da temperatura e da humidade relativa [$\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$]

Fourier estudou a difusão de calor, de onde concluiu que o fluxo de calor através de um material é proporcional ao gradiente negativo de temperatura. Esta lei foi desenvolvida a partir de observações de fenómenos da natureza [32].

$$q = -U \times A \times \frac{dT}{dx} \quad (2.18.)$$

Em que: q – fluxo de calor por condução [kcal/h]
 U – coeficiente de transmissão térmica [$\text{W}/\text{m}^2.\text{°K}$]
 A – área da secção [m^2]
 dT/dx – gradiente de temperatura na secção, variação da temperatura T com a distância, na direcção x do fluxo de calor [°C/h]

3

SECAGEM

3.1. INTRODUÇÃO

A secagem é um processo de transferência simultânea de calor e massa. O calor necessário para a evaporação é fornecido para as partículas do material, e o vapor de água ou água no estado líquido é retirado do material por meio de secagem. A humidade é transportada na forma de líquido ou vapor, do interior do material para o ambiente. Assim sendo, a secagem refere-se à remoção de humidade de um sólido transferindo essa humidade para o estado gasoso. Na maioria dos processos de secagem, a água é o líquido evaporado e o ar é o meio de secagem [27].

Neste capítulo descreve-se o processo de secagem de materiais de construção porosos e a cinética de secagem. Faz-se referência aos modelos da cinética de secagem, ao coeficiente de difusividade, à energia de activação e a alguns estudos realizados, nomeadamente do âmbito da cinética de secagem.

3.2. PROCESSO DE SECAGEM DE MATERIAIS POROSOS

Considera-se que um material está seco quando durante um determinado tempo pré-definido, e para determinadas condições de temperatura e humidade relativa, a sua massa não varia significativamente [7]. Denomina-se por secagem o processo de extracção de um líquido de um material. O primeiro passo é transformar a água presente no material em vapor de água e seguidamente proceder-se à evaporação do vapor de água para o ambiente [10].

Os materiais mais correntes na construção civil são higroscópicos e de estrutura porosa. A secagem de materiais desse tipo ocorre em duas fases: secagem natural, até atingir o teor de humidade de equilíbrio, e, posteriormente, secagem artificial com recurso a centrifugadora, estufa, vácuo ou outro meio.

Segundo Krischer [9] podem distinguir-se três fases no processo de secagem, quando um material de construção saturado é colocado num ambiente com humidade relativa e temperatura constantes [1, 10, 32 e 33].

Na fase inicial a água líquida do material saturado é transportada do interior para a superfície, por capilaridade, verificando-se um fluxo de secagem constante, mantendo-se também constante a quantidade de água evaporada. O transporte capilar no material de construção reduz-se com a diminuição do teor de água e a quantidade de água líquida transportada para a superfície será, num ponto definido de tempo, insuficiente para manter a velocidade inicial de secagem. Nesta primeira fase, o fluxo de secagem depende apenas das condições exteriores, as características do material de construção não têm influência. Nesta fase, a quantidade de água na forma de vapor libertada do

material é inferior à quantidade de água movimentada do interior para a superfície. Quando esta relação se inverte inicia-se a segunda fase.

A redução progressiva do transporte de água líquida do interior do material para a superfície, diminui o fluxo de secagem, que passa a depender das propriedades capilares dos materiais. Nesta segunda fase, a evaporação da água deixa de se verificar na superfície passando a ser realizada no interior do material de construção. As condições de difusão entre a superfície do material e o ambiente mantêm-se constantes. A água líquida transportada até então por capilaridade passa a ser transportada por difusão de vapor até à superfície do material, através de uma camada de material seco cada vez mais espessa. Parte do material tem um comportamento capilar e outra um comportamento higroscópico.

A terceira, e última fase, inicia-se quando todo o material se enquadra no domínio higroscópico, ou seja, quando o teor de humidade crítico for superior ao teor de humidade em todo o material. Esta fase é caracterizada por haver um equilíbrio higroscópico e o fluxo de secagem tender para zero.

A secagem total apenas se consegue atingir com uso de métodos de secagem artificial. Nas Fig. 3.1 e Fig. 3.2 estão representadas as três fases do processo de secagem.

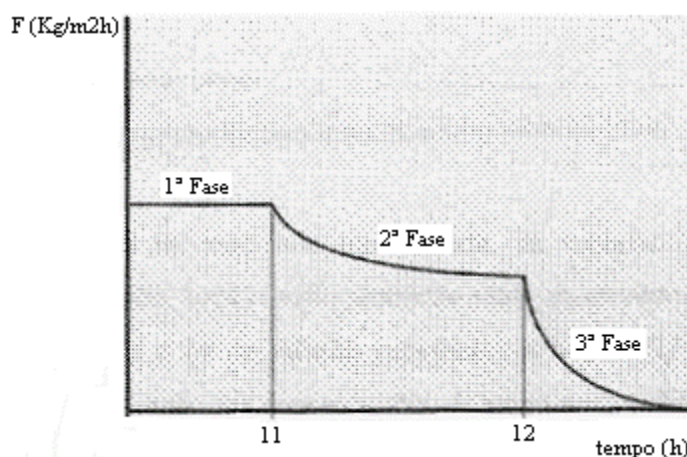


Fig.3.1 – Evolução do fluxo de secagem em função do tempo [10]

O processo de secagem é considerado um fenómeno complexo, uma vez que depende de factores externos e internos, como as condições ambientais, o teor de humidade, a distribuição da água, o teor de água crítico do material e as propriedades de transporte de água na fase líquida e de vapor. Na prática, a secagem dos materiais de construção em condições controladas pode ser analisada com recurso a curvas de secagem, que traduzem o processo de secagem diferenciado nas três fases descritas anteriormente.

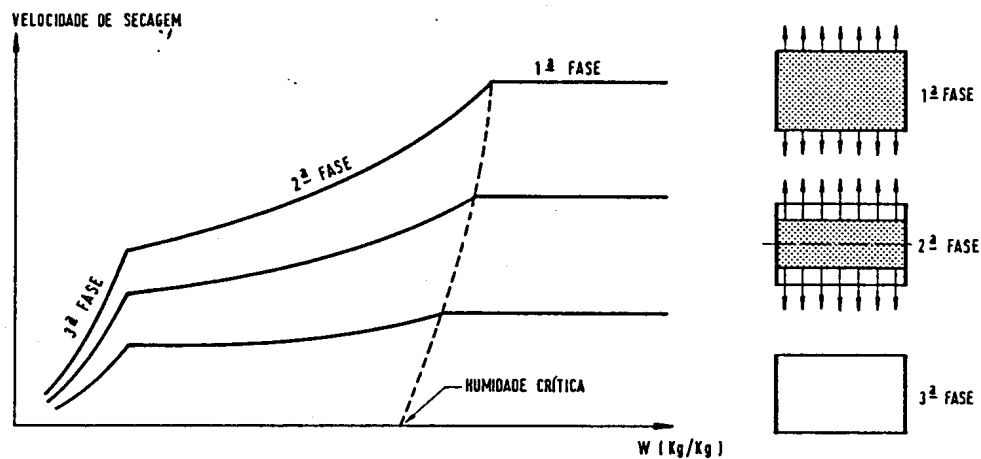


Fig.3.2 – Curvas características de secagem de diferentes materiais [1]

A curva de secagem relaciona o teor de água em percentagem ponderal da massa seca com o tempo. O declive da curva dá-nos a taxa/fluxo de secagem. A forma das curvas de secagem é dependente das propriedades de cada material, das condições ambientais, da forma das amostras, do teor de água inicial e do facto da evaporação ser uni ou multi-dimensional [16].

Analisando a Fig. 3.3, podemos então distinguir as três fases do processo de secagem e fazer uma caracterização de cada uma delas. A primeira fase traduz uma diminuição linear do teor de água que, consequentemente, origina um fluxo de secagem constante (Fig. 3.1). O teor de água crítico, identificado na figura, representa a transição para a segunda fase, onde o fluxo de secagem passa a ser decrescente. A transição para a terceira e última fase é, geralmente, indefinida.

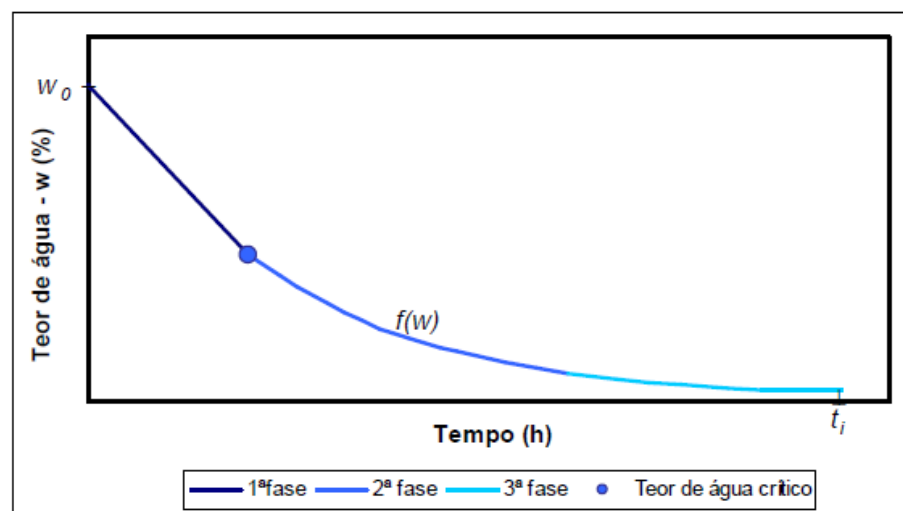


Fig.3.3 – Curva típica de secagem de materiais de estrutura porosa [16]

Materiais com diferentes porosidades e diferentes rugosidades superficiais apresentam diferentes superfícies efectivas de evaporação, originando uma taxa de secagem diferente. Assim sendo, o troço

inicial das curvas de secagem (linear) varia consoante o material, apesar das condições ambientais controlarem a secagem inicial [16].

Os resultados dos ensaios de secagem podem ser expressos de forma quantitativa recorrendo-se ao cálculo do índice de secagem (*I.S.*), através da seguinte equação [16]:

$$I.S. = \frac{\int_{t_0}^{t_i} f(W_i) \times dt}{W_0 \times t_i} \quad (3.1.)$$

Em que: $f(W)$ – teor de água do provete em função do tempo [%]

W_0 – teor de água inicial [%]

t_i – tempo total do ensaio [h]

O tempo total do ensaio corresponde ao tempo necessário para que surja uma assíntota horizontal no gráfico de evaporação (Fig. 3.3), podendo a sua determinação não ser muito rigorosa.

3.3. CINÉTICA DE SECAGEM

3.3.1. GENERALIDADES

Um dos principais factores que afectam a durabilidade dos materiais de construção é a água, em todos os seus estados. O teor de humidade de um material depende do equilíbrio higroscópico entre esse material e o meio ambiente. Assim sendo, o teor de humidade e o seu efeito na deterioração ocorre com o movimento da humidade, sendo determinado não só pela água que é absorvida pelo material, mas também pela quantidade de água que é evaporada em condições favoráveis, sendo a capilaridade e a secagem os mecanismos dominantes no transporte de humidade nos materiais de construção.

No entanto o efeito de deterioração pela humidade ocorre principalmente durante a fase de secagem e não na fase de molhagem. Torna-se assim relevante investigar a cinética de secagem dos materiais de construção para compreender o efeito das condições ambientais na humidade contida nos materiais de construção.

Têm-se realizado muitos estudos para determinar os parâmetros que afectam a secagem, assim como se tem analisado a forma como os mesmos interferem. Os principais factores ambientais que afectam a secagem são a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar, sendo esses os parâmetros essenciais na cinética de secagem, que têm sido estudados de forma parcial. O tipo de material a secar, as suas características e o tempo de secagem são também variáveis em alguns estudos. Estes parâmetros contribuem para uma optimização do processo de secagem, de forma a reduzir-se os tempos de secagem e os custos associados.

Os mecanismos que regem os processos de secagem são complexos e dependem da transferência de calor massa no interior do material. A complexidade desses mecanismos deve-se ao acoplamento destas transferências durante o processo de secagem [25].

Muitos modelos de transferência de humidade têm sido usados para descrever o processo de secagem de materiais porosos na indústria alimentar, química e até da construção. Esses modelos matemáticos, que descrevem o processo de secagem através da difusão de vapor numa camada fina de materiais

higroscópicos, podem ser agrupados em teóricos, semi-teóricos ou empíricos. Os métodos empíricos são utilizados para análise da secagem usando dados experimentais determinados em laboratório. Tais métodos baseiam-se, geralmente, nas condições externas de secagem, não fornecendo indicações sobre o transporte de energia e massa no interior do produto, muito embora forneçam informações de interesse prático.

Os modelos teóricos de secagem apenas têm em conta a transferência interna, enquanto os restantes incorporam a transferência entre o ar e a superfície do material. Os modelos teóricos consistem na resolução das equações gerais de secagem, utilizando um método analítico ou numérico. Inicialmente foram usadas algumas simplificações de resoluções analíticas da segunda lei de Fick, para vários produtos de geometria regular, como rectangulares, cilíndricas e esféricas. Com a combinação dessas soluções, Arrhenius previu com sucesso o processo de secagem de alguns produtos, nomeadamente na secagem da cortiça, utilizando soluções numéricas de transferência de massa e calor. A simulação de secagem por determinação numérica de equações é sobretudo teórica, porque a complexidade dos fenómenos é muito difícil de abordar.

Os modelos semi-teóricos, normalmente derivam da simplificação dos modelos teóricos. Como é difícil medir a variação do coeficiente de difusão durante a secagem, a aplicação dos modelos teóricos é complicada. Como simplificação, escolhe-se uma constante do coeficiente de difusão, surgindo o conceito da curva característica de secagem e expressa-se a taxa de secagem em função do teor em água do material. No entanto, essa aproximação não representa um modelo físico do fenómeno de secagem [25].

Os modelos empíricos que se utilizam são modelos semi-teóricos, baseados no modelo teórico da segunda lei de Fick, que sofrem simplificações e são acrescidos de coeficientes empíricos para melhorar o ajuste entre as curvas. Nos modelos empíricos há uma relação directa entre o teor de humidade e o tempo de secagem. Neste caso, o aspecto fundamental do processo de secagem pode ser criticado, uma vez que é necessário encontrar uma relação entre os valores experimentais e adaptá-los às curvas dos modelos propostos, para que possam traduzir o comportamento do material durante a secagem. Estes modelos foram usados e ajustados de forma satisfatória para a secagem do arroz, do feijão branco, da banana, manga, cebola, chá, cana-de-açúcar, secagem solar de tomates, ameixas, entre outros, propondo-se um modelo de secagem que pode prever o comportamento do produto quando exposto ao ar durante a secagem [53, 54].

A secagem é um processo térmico complexo, durante o qual ocorrem muitas mudanças estruturais e físico-químicas no interior dos materiais ou alimentos. A análise dos processos de secagem permite a sua compreensão e o estabelecimento de condições operacionais adequadas. Em termos de engenharia, isto é conseguido através de modelos matemáticos.

A secagem assume um papel fundamental na indústria, não só da construção civil como também no processamento de alimentos e diferentes produtos. Relativamente a estes últimos, é um dos métodos mais utilizados para conservar produtos, permitindo estender a sua vida útil pela eliminação de água, minimizando os fenómenos de deterioração devido a microrganismos, enzimas ou fermentos. Além da preservação, há mais vantagens na secagem dos produtos, como o facto de os tornar mais leves para o transporte e reduzir o espaço na armazenagem.

Os modelos de simulação ajudam na concepção de novos sistemas de secagem bem como na melhoria dos existentes. Além disso, são importantes para o controle das operações de secagem e prever o seu desempenho. Na cinética de secagem de produtos usa-se, normalmente, a constante de secagem, k . Este parâmetro combina todas as propriedades de transporte e pode ser definido pela equação de camada fina. As equações de camada fina descrevem o fenómeno de secagem de uma forma unificada,

independentemente do mecanismo de controlo, e têm sido utilizadas para estimar o tempo de secagem e as curvas de secagem para muitos produtos. Podemos encontrar uma grande variedade de equações de camada fina, de naturezas muito diferentes, mas tendo em comum a capacidade de descrever com sucesso muitos processos de secagem [28].

A constante do tempo de secagem pode ser definida pela equação de camada fina e não só depende do material e das propriedades do ambiente de secagem, mas também das propriedades dos fenómenos de transporte. Assim, supõe-se que a camada de material é fina ou a velocidade do ar é alta, para que as condições de secagem sejam constantes em todo o material. A taxa de secagem de um produto depende das características dos materiais e das condições do ambiente de secagem. Independentemente do mecanismo físico pelo qual a água é transportada do material para o exterior, na maioria dos casos, é adequado usar-se um modelo de primeira ordem para descrever a variação da taxa do tempo de secagem [22].

Num dos poucos trabalhos existentes na literatura sobre cinética de secagem com materiais de construção, Karoglou *et al.* [22] apresentou as equações empíricas de cinética de primeira ordem para descrever o processo de secagem e de ascensão capilar (modelo de Newton) em paredes. A equação apresentada para a cinética de secagem foi a seguinte [2]:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{1}{t_c} (X - X_e) \quad (3.2.)$$

onde: $\frac{dX}{dt}$ – taxa de secagem [-]

X – humidade contida no material ao longo do tempo [kg/kg]

X_e – valor de equilíbrio do teor de humidade no material [kg/kg]

t – tempo de secagem [h]

t_c – constante do tempo de secagem [h]

A constante de tempo de secagem, t_c , depende das condições do ar, ou seja, da velocidade do ar e da temperatura, da actividade da água e das características do material. Vários modelos empíricos ou semi-teóricos foram já apresentados, sendo adequado para muitos casos um modelo simples de potências, que tem em conta os efeitos das condições de secagem:

$$t_c = c_0 \left(\frac{T}{T_r} \right)^{c_1} \left(\frac{a_w}{a_{wr}} \right)^{c_2} \left(\frac{u}{u_r} \right)^{c_3} \quad (3.3.)$$

sendo: T – temperatura [°C]

u – velocidade do ar [m/s]

a_w – coeficiente de actividade da água [-]

c_0, c_1, c_2 e c_3 – constantes empíricas ajustáveis [-]

T_r – temperatura de referência [°C]

u_r – velocidade de referência do ar [m/s]

a_{wr} – coeficiente de referência de actividade da água [-]

As constantes empíricas e os valores de referência dependem das características do material. Frequentemente, em vez da constante do tempo de secagem, t_c , utiliza-se uma constante de secagem, k , tendo em conta que:

$$t_c = \frac{1}{k} \quad (3.4.)$$

O valor de equilíbrio do teor de humidade do material, X_e , depende da temperatura do ar, T , e da actividade de água, a_w . Vários modelos empíricos ou semi-empíricos têm sido propostos, mas o modelo de Oswin modificado foi o que provou ser mais adequado aos processos de secagem dos materiais de construção.

$$X_e = b_0 \exp\left(\frac{b_1}{T}\right) \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^{b_2} \quad (3.5.)$$

Em que b_0 , b_1 e b_2 são constantes empíricas ajustáveis, que dependem das características do material em estudo. Quando as condições de secagem são mantidas constantes, a equação (3.2.) poderá ser integrada da seguinte forma [22]:

$$t = t_c \ln\left(\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}\right) \quad (3.6.)$$

O tempo de secagem, t , representa o tempo necessário para alterar o valor da humidade inicial para a humidade final.

Os parâmetros envolvidos nos modelos da análise do processo de secagem são estimados através da minimização do desvio padrão [22]:

$$S = \left[\sum_{i=1}^N \frac{(X - X^*)^2}{(N - p)} \right]^{1/2} \quad (3.7.)$$

onde: X – valor experimental da humidade contida no material [kg/kg]

X^* - valor teórico da humidade contido no material [kg/kg]

N – número de pontos experimentais [-]

p – número de parâmetros estimados [-]

A principal vantagem do modelo apresentado é que todas as constantes empíricas se relacionam com as condições experimentais e as características do material. As constantes c_0 e b_0 dependem da microestrutura dos materiais, como o raio médio dos poros. Para relacionar estas constantes com o raio médio dos poros do material, utilizou-se as seguintes equações potenciais simplificadas:

$$c_0 = c_0' r^{-c_r} \quad (3.8.)$$

$$b_0 = b_0' r^{b_r} \quad (3.9.)$$

em que c_0' e b_0' são constantes.

A previsão da constante do tempo de secagem, da constante capilar e da constante de humidade de equilíbrio é baseada assim no raio médio dos poros dos materiais. Este modelo matemático simplificado permite uma antecipação das propriedades higrométricas dos materiais de construção com base no raio médio dos poros quando os dados experimentais não estão disponíveis. Além disso, permite prever a quantidade de humidade nas alvenarias, construídas por diversos materiais e em diferentes condições ambientais [2].

Neste trabalho (§5), a quantidade de humidade de um produto é designada com base no peso da água e a cinética de secagem foi monitorizada em termos de variação do teor de massa ao longo do tempo de secagem, sendo os dados expressos em termos da relação adimensional das massas, designada por razão da humidade (MR) e definida como:

$$MR = \frac{X(t) - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3.10.)$$

em que: MR – razão da humidade durante as experiencias de secagem [-]

$X(t)$ – massa da amostra em função do tempo [kg]

X_e – massa de equilíbrio da amostra (critério de paragem da secagem) [kg]

X_0 – massa da amostra no inicio da secagem [kg]

O melhor ajuste entre os modelos e os valores experimentais poderá ser determinado por três parâmetros: o maior valor de coeficiente de regressão (R^2), a menor soma dos erros quadrados entre experimental e teórico (SEE), e menor *Root Mean Square Error* – raiz quadrada do erro médio quadrático ($RMSE$), usando as seguintes equações [29]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{teo,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{teo}} - MR_{exp,i})^2} \quad (3.11.)$$

$$SEE = \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{teo,i})^2 \quad (3.12.)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_{exp,i} - M_{teo,i}) \right]^{1/2} \quad (3.13.)$$

onde: $MR_{teo,i}$ – razão da humidade teórica prevista [-]

$MR_{exp,i}$ – razão da humidade experimental [-]

N – número de pontos experimentais [-]

n – número de constantes [-]

É possível ainda seleccionar o modelo que melhor se ajusta aos resultados práticos através da conjugação do erro quadrático médio ($RMSE$), do chi square (χ^2), e do erro percentual relativo (PE) [24].

$$\chi^2 = \frac{1}{N - n} \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{teo,i})^2 \quad (3.14.)$$

$$PE(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|M_{exp,i} - M_{teo,i}|}{M_{exp,i}} \quad (3.15.)$$

Quanto mais próximo de zero forem $RMSE$, SEE e χ^2 , mais próxima é a previsão teórica dos dados experimentais. Os erros $RMSE$, SEE e χ^2 comparam as diferenças entre as razões de humidade teóricas com as experimentais, ao passo que o erro percentual relativo compara as diferenças absolutas entre os teores de humidade previstos teoricamente com os experimentais. Erros percentuais inferiores a 10% indicam um bom ajuste [24].

Neste trabalho, para a escolha do modelo que melhor se ajusta aos resultados experimentais adoptou-se como critério a menor soma das percentagens de desvio entre os dados experimentais (MR_{exp}) e os teóricos (MR_{teo}) ao longo do tempo (§5).

$$Erro(\%) = \sum (MR_{exp} - MR_{teo})^2 \quad (3.16.)$$

3.3.2. MODELOS DA CINÉTICA DE SECAGEM

Vários estudos foram já realizados sobre a cinética de secagem existindo diversos modelos matemáticos que a descrevem. O modelo inicial foi o de Newton, também conhecido por modelo de Lewis, que foram obtidos por simplificação da segunda lei de Fick. Com base nesse primeiro modelo e em diversos estudos, foram surgindo novos modelos, ajustados para determinados materiais ou produtos.

- Modelo de Newton [51, 52, 53, 54, 56, 57]:

$$MR = \exp(-kt) \quad (3.17.)$$

- Modelo de Page [50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57]:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (3.18.)$$

- Modelo modificado de Page [51, 56]:

$$MR = \exp[-(kt)^n] \quad (3.19.)$$

- Modelo de Henderson e Pabis [50, 51, 52, 53, 54, 56, 57]:

$$MR = a \exp(-kt) \quad (3.20.)$$

- Modelo modificado de Henderson e Pabis [29]:

$$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht) \quad (3.21.)$$

- Modelo de Verna *et al* [26]:

$$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_1t) \quad (3.22.)$$

- Modelo Logarítmico [50, 53, 54, 56, 57]:

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (3.23.)$$

- Modelo de Midilli *et al* [50, 53, 54, 57]:

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad (3.24.)$$

- Modelo de Dois Termos [53, 54, 57]:

$$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t) \quad (3.25.)$$

- Modelos de Aproximação da Difusão [53, 54]:

$$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt) \quad (3.26.)$$

- Modelo de Wang e Singh [54, 55, 56, 57]:

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (3.27.)$$

- Modelo de Vega e Lemus [28]:

$$MR = (a + kt)^2 \quad (3.28.)$$

- Modelo de Aghbashlo *et al* [29]:

$$MR = \exp\left(\frac{-k_1t}{1+k_2t}\right) \quad (3.29.)$$

onde: MR – razão da humidade, equação (3.10.) [-]

t – tempo de secagem [h]

k – coeficiente empírico do modelo de secagem [h^{-1}]

a, b, c, n – constantes empíricas do modelo de secagem [-]

O modelo de Page é uma modificação empírica do modelo exponencial simples que descreve com sucesso as características de secagem de vários produtos agrícolas, como a pimenta vermelha e a cenoura [27]. O modelo de Dois Termos é derivado de uma solução analítica dos dois primeiros termos da lei de Fick [26]. O modelo de Wang e Singh é um modelo polinomial de segunda ordem, que tem sido utilizado para caracterizar a cinética de secagem de cogumelos [27].

Da comparação entre a equação (3.10.) e as equações dos modelos da cinética de secagem apresentados, obtém-se o modelo que melhor se ajusta ao processo de secagem em causa. Têm surgido cada vez mais fórmulas de cinética de secagem, o objectivo da maioria dos estudos realizados não se prende unicamente com a determinação do modelo mais adequado mas sim com a escolha do modelo mais apropriado ao elemento que está a ser estudado.

Por vezes as equações dos modelos podem ser apresentadas na forma normalizada. Por exemplo, a forma da equação de Page normalizada é:

$$\ln[-\ln(MR)] = \ln(k) + N \ln(t) \quad (3.30.)$$

onde as constantes de secagem, k e N , são determinadas a partir da intersecção e inclinação das curvas de $\ln[-\ln(MR)]$ vs. $\ln(t)$, respectivamente.

A forma das equações de Newton e Henderson e Pabis normalizadas são, respectivamente:

$$\ln(MR) = -kt \quad (3.31.)$$

$$\ln(MR) = -kt + A \quad (3.32.)$$

Onde as constantes de secagem k e A são determinadas a partir da inclinação e intersecção, respectivamente, da curva $\ln(MR)$ vs. curva do tempo [24].

3.3.3. ESTIMATIVA DA DIFUSIVIDADE DO VAPOR DE ÁGUA E DA ENERGIA DE ACTIVAÇÃO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

A difusividade efectiva do vapor de água em materiais de construção representa todo o processo de transferência de humidade. Este parâmetro é normalmente determinado a partir de curvas de secagem experimental [24].

Para estimar a difusividade efectiva pode-se utilizar o modelo difusional de Fick, modelo clássico da difusão unidimensional, considerando que é constante a difusividade efectiva do vapor de água no material, que a geometria do material se aproxima de uma placa plana infinita e que a humidade inicial tem distribuição uniforme (ver Fig. 3.4) [27].

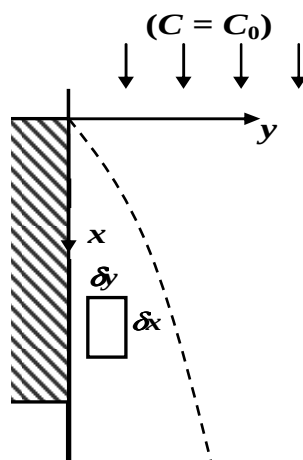


Fig.3.4 – Esquema representativo da transferência de massa na camada limite [11]

A equação diferencial que descreve o processo de transferência de vapor de água numa placa infinita é dado por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.33.)$$

em que: C – concentração de vapor de água [kg/m^3]
 t – tempo de secagem [s]
 D_{eff} – coeficiente de difusividade efectivo [m^2/s]
 x – coordenada cartesiana [m]

Para análise da difusividade é necessário [19]:

- Haver movimentação da humidade interna como principal resistência;
- Não haver alteração das dimensões do provete durante o processo de secagem;
- O efeito da transferência externa e interna do calor ser insignificante.

No presente trabalho, os dados experimentais da secagem, foram utilizados para determinar o coeficiente de difusividade efectivo do vapor de água de provetes de ETICS. Considerando uma placa de ETICS infinita e com espessura L , imersa numa atmosfera de ar húmido, com humidade relativa constante no tempo e uniforme ao longo da face da placa, e admitindo que a concentração inicial de vapor de água no interior da placa, C_0 , é uniforme, as condições iniciais e fronteira para o processo de difusão em estudo podem ser definidas como:

$$t = 0 \quad 0 < x < L \quad C = C_0 \quad (3.34a)$$

$$t > 0 \quad x = L \quad C = C_e \quad (3.34b)$$

$$t > 0 \quad x = 0 \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (3.34c)$$

A solução da equação de Fick em tais condições, para geometrias diferentes, foi apresentada por Crank [23], obtendo-se para uma placa infinita a seguinte equação [19]:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2} \right] \quad (3.35.)$$

onde: MR – razão da humidade [-]
 n – número de observações [-]
 D_{eff} – coeficiente de difusividade efectivo [m^2/s]
 t – tempo [h]
 L – espessura da amostra [m]

Para longos períodos de tempo de secagem (desprezando os termos de ordem superior, isto é, definindo $n=0$) e assumindo que $C_e=0$ (teor de humidade de equilíbrio), a equação anterior pode ser simplificada [19]:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \times \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (3.36.)$$

Pode ainda ser simplificada como uma equação linear [19]:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left[\pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2}\right] \quad (3.37.)$$

A difusividade efectiva do vapor de água pode ser determinada a partir da inclinação da parcela normalizada da razão de humidade inacabada, $\ln(MR)$ vs. tempo, utilizando a seguinte equação [24]:

$$D_{eff} = \frac{-\text{declive}(L^2)}{\pi^2} \quad (3.38.)$$

A difusividade efectiva do vapor de água para cada material é função da temperatura. A influência da temperatura na difusividade efectiva pode ser transmitida pela relação de Arrhenius:

$$D_{eff} = A_0 \times \exp\left(-\frac{E_a}{R \times T}\right) \quad (3.39.)$$

onde: D_{eff} – coeficiente de difusão efectivo [m^2/s]

A_0 – constante de Arrhenius [m^2/s]

E_a – energia de activação [kJ/mol]

R – constante universal dos gases ideais [$kJ/mol K$]

T – temperatura absoluta do ar [K]

A constante de Arrhenius é um factor pré-exponencial, que representa o coeficiente de difusividade a temperaturas infinitas. Esta equação pode ser simplificada para uma equação linear:

$$\ln(D_{eff}) = \ln(A_0) - \frac{E_a}{R \times T} \quad (3.40.)$$

A energia de activação, geralmente na forma de calor, representa a energia inicial necessária para que uma reacção aconteça, ou seja, é a energia mínima necessária para a formação de uma estrutura intermediária entre o material a secar e o meio ambiente [33].

Quanto mais elevada for a energia de activação de um processo, mais baixa será a velocidade do mesmo, uma vez que aumenta a dificuldade para que o processo ocorra. Essa energia de activação, no processo de secagem de materiais porosos, é determinada a partir do declive da recta que representa, no gráfico de Arrhenius, $\ln(D_{eff})$ vs. inverso da temperatura ($1/T$), que deverá produzir uma linha recta com uma inclinação de $-E_a/R$ [24]:

$$E_a = -\text{declive} \times R \quad (3.41.)$$

3.4. ESTUDOS DESENVOLVIDOS

Em Portugal têm sido realizados alguns estudos associados à secagem de materiais. Freitas [1] desenvolveu, no Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, um programa de cálculo automático, com base no modelo de Philip-De Vries, que permite, por simulação, obter perfis dos teores de humidade e de temperatura no interior dos materiais ou elementos de construção. Freitas [1] avaliou a influência da interface entre camadas e da existência de um espaço de ar entre camadas, no processo de embebição e secagem do betão celular e do barro vermelho.

Ainda na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no Laboratório de Computação do DEMEGI, Santos [12] estudou a evolução dos teores de humidade, temperatura e taxa de secagem de amostras de tijolo de barro vermelho, variando a espessura do provete e a temperatura exterior [10].

Castro [10] fez um estudo experimental da secagem do betão celular, determinou os teores de humidade e os fluxos durante a secagem do betão celular. Para tal recorreu a um dispositivo de medição de humidades por atenuação de raios gama, também utilizado por Freitas [1]. Guimarães *et al.* [11] fez uma análise numérica do processo de evaporação associado ao controlo da degradação de paredes em monumentos históricos.

Quanto à cinética de secagem, a maioria dos estudos foram realizados no estrangeiro, no âmbito de produtos alimentares. Vários autores aplicaram diferentes modelos da cinética a produtos hortícolas, procurando o modelo mais adequado ao produto em análise.

Em Portugal, Raquel Guiné [28] realizou, no departamento de Indústrias Alimentares da Escola Superior Agrária de Viseu, uma análise da cinética de secagem de peras S. Bartolomeu, para diferentes sistemas de secagem. Usou sete modelos para o seu estudo e os que melhor se ajustaram à secagem deste tipo de peras foram os modelos de Henderson e Pabis, Logarítmico e o de Vega e Lemus, sendo o modelo Logarítmico o que melhor descreve todas as situações analisadas.

No estrangeiro, diversos estudos foram realizados com recurso aos modelos da cinética de secagem, que se baseiam fundamentalmente na escolha do modelo mais adequado para um determinado material ou produto. De uma forma geral, os diversos autores fizeram uma selecção de alguns modelos da cinética de secagem e aplicaram-nos a um dado material ou produto, de forma a determinar qual o que melhor descrevia o processo de secagem, por comparação com os ensaios experimentais.

Estes estudos foram até agora mais aplicados a produtos alimentares. No entanto é possível encontrar alguns estudos de cinética de secagem em materiais de construção, como é o caso do estudo

denominado por “Drying Kinetics of Some Building Materials” desenvolvido por Karoglou *et al.* [22]. Neste estudo foi investigado o desempenho da secagem de quatro tipos de pedra, dois tipos de tijolos e sete tipos de rebocos. A cinética de secagem foi avaliada para quatro temperaturas do ar, seis valores de humidade relativa do ar e três velocidades do ar. Concluiu-se que o modelo de secagem utilizado previu com sucesso a secagem de vários materiais de construção.

Mais recentemente, os mesmos autores, realizaram um estudo da cinética higrométrica e da microestrutura de materiais de construção [2]. Neste estudo, os autores analisam não só a cinética de secagem mas também a cinética da ascensão capilar. Fazem ensaios para vários materiais de três categorias: tijolos, rebocos e pedras, com diferentes características microestruturais e, portanto, diferentes comportamentos higroscópicos. Quanto aos ensaios de secagem, foram realizados em condições de secagem constante, com temperatura, humidade e velocidade do ar constantes, mas com quatro temperaturas, três velocidades do ar e cinco valores da humidade relativa diferentes. Todo o estudo foi realizado em função das dimensões do raio médio dos poros dos materiais.

4

ENSAIOS LABORATORIAIS

4.1. INTRODUÇÃO

Com este trabalho pretende-se avaliar o tempo de secagem de materiais porosos em função de diferentes condições ambientais, através de ensaios laboratoriais. Foram seleccionadas quatro amostras de ETICS, sujeitas a um pré envelhecimento no exterior da cobertura de um dos edifícios da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, expostas às quatro orientações principais: Norte, Sul, Este e Oeste.

O objectivo dos ensaios é analisar a influência no tempo de secagem das amostras da orientação e das condições ambientais: temperatura e humidade relativa. O tempo de secagem foi controlado com base na massa da amostra, tendo sido registada a massa inicial e a sua variação ao longo do tempo.

4.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

4.2.1. MATERIAIS NECESSÁRIOS

Os materiais necessários para a realização dos ensaios foram os seguintes:

- Quatro amostras de ETICS com $30 \times 30 \text{ cm}^2$, com 6cm de isolamento, constituídas pela camada de isolamento e reboco;
- Fita-cola de alumínio;
- Silicone;
- Rede;
- Tabuleiro;
- Quatro suportes.

4.2.2. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

Os equipamentos necessários para a realização dos ensaios foram os seguintes:

- Câmara climática;
- Balança Sartorius – massa máxima de 3100g e precisão de 0,01g;
- Anemómetro ligada a um *Datalogger*;
- Computador.

4.2.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras escolhidas para estes ensaios são de ETICS, com aproximadamente 30 cm de lado e 6,3 cm de espessura, com um isolamento térmico de 6 cm de poliestireno expandido (EPS 100) e 0,3 cm de reboco impermeável à água líquida. Todas as faces das amostras, excepto a revestida com reboco, foram pintadas com três demãos de tinta e revestidas com fita-cola de alumínio. Para evitar que durante o ensaio houvesse entrada de água através das faces seladas com fita-cola de alumínio foi aplicado silicone na ligação da fita-cola com o reboco (Fig. 4.1 e Tabela 4.1).

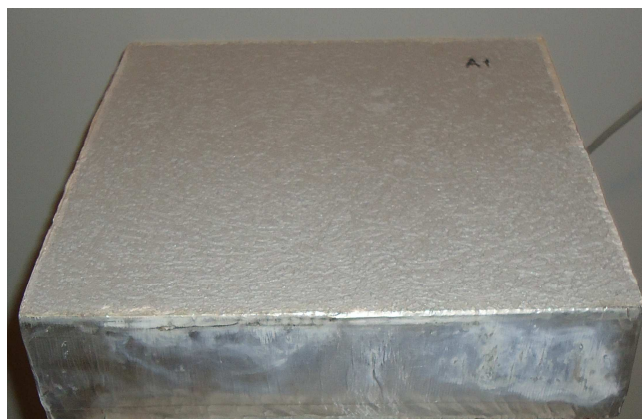


Fig.4.1 – Amostra

Tabela 4.1 – Descrição das amostras

Amostra	Dimensão (cm)	Massa antes do Envelhecimento (g)	Orientação
A1	29,5 x 29,6	571,46	Norte
A2	29,5 x 29,2	555,52	Este
A3	29,5 x 29,6	639,91	Sul
A4	29,4 x 29,6	601,36	Oeste

Antes da realização dos ensaios, tal como já foi mencionado, as amostras foram colocadas no exterior, sujeitas às condições climáticas de forma a sofrerem um envelhecimento natural. Para tal foram colocadas em suportes e devidamente fixadas a quatro fachadas, com orientações distintas, na cobertura de um dos edifícios da FEUP, durante um ano e quatro meses (Fig. 4.2 e Tabela 4.1).

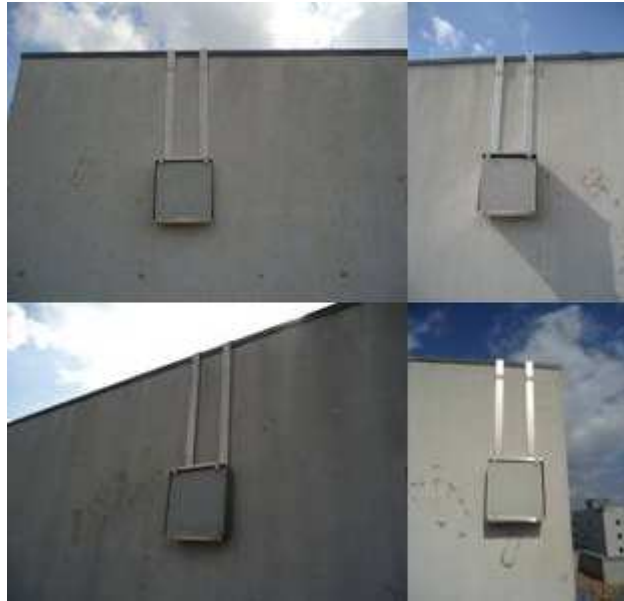


Fig.4.2 – Envelhecimento das amostras

4.2.4. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Os ensaios de secagem foram realizados no interior de uma câmara climática, com condições definidas de temperatura, humidade relativa e ventilação. Dentro da câmara climática foi colocada uma balança e um anemómetro (Fig. 4.3). A balança foi ligada a um computador que se encontrava fora da câmara, de forma a permitir o registo contínuo da variação da massa das amostras (Fig. 4.4).



Fig.4.3 – Instalação do anemómetro e da balança



Fig.4.4 – Computador ligado à balança no interior da câmara climática para registo de dados e *Datalogger*

As amostras foram colocadas no interior da câmara climática um dia antes da molhagem para estabilizarem em função das condições no interior da câmara. A aquisição de dados da pesagem foi feita automaticamente, de 5 em 5 minutos, registando-se no computador todos os valores fornecidos pela balança. Considerou-se o peso inicial da amostra o correspondente à média das pesagens da última hora antes da humidificação.

O processo de molhagem foi efectuado por imersão parcial da amostra em água, com a amostra na horizontal, da seguinte forma:

1. Colocou-se num tabuleiro, com rede na base, cerca de 400 ml de água (o nível superior de água coincidente com a face interior do reboco) – Fig.4.5;
2. Colocou-se a amostra sobre a rede do tabuleiro, com o reboco voltado para baixo e deixou-se embeber durante cerca de uma hora – Fig.4.6;
3. Retirou-se a amostra da água e deixou-se escorrer sobre um vértice durante um minuto – Fig.4.7;
4. Voltou-se o reboco para cima e colocou-se a amostra sobre a balança para o início da secagem – Fig.4.8.



Fig.4.5 – Colocação da água no tabuleiro



Fig.4.6 – Colocação da amostra a humedecer

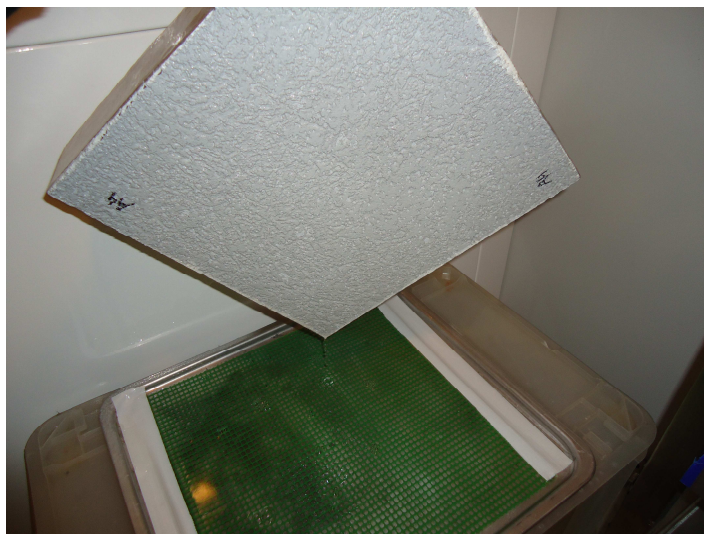


Fig.4.7 – Remoção do excesso de água da superfície da amostra

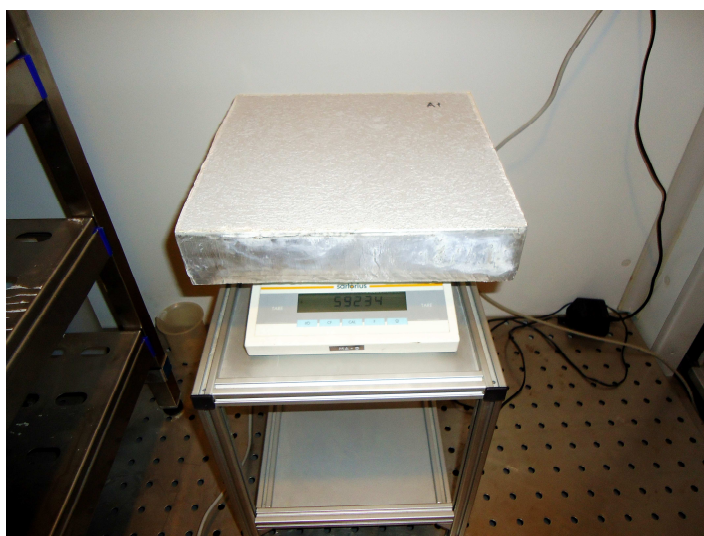


Fig.4.8 – Colocação da amostra na balança para o início da secagem

O ensaio manteve-se até estabilizar a massa de acordo com o critério de paragem estabelecido: três pesagens consecutivas, espaçadas de 24 horas, em que a massa é inferior ao somatório da massa inicial com 5% da massa de água absorvida (Fig. 4.9).

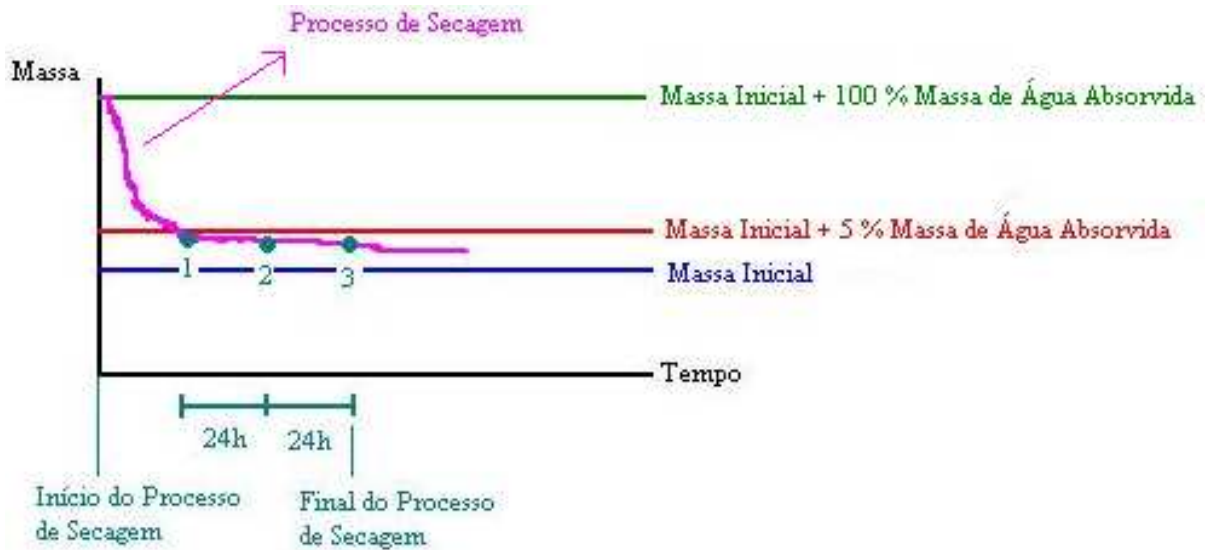


Fig.4.9 – Esquema elucidativo do critério de paragem do processo de secagem

O mesmo procedimento foi efectuado para as quatro amostras, mantendo-se constantes as condições no interior da câmara climática. As amostras foram acondicionadas no interior da câmara climática depois de cada ensaio. Após a realização deste ciclo de quatro ensaios, utilizando as quatro amostras expostas aos quatro pontos cardeais para envelhecimento natural, realizou-se um ciclo de três ensaios sobre uma mesma amostra, fazendo-se variar a temperatura e a humidade relativa dentro da câmara climática, de acordo com a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Descrição das condições de ensaio

Ensaio	Amostra	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)	Ventilação (%)
1	A1	25	50	100
2	A2	25	50	100
3	A3	25	50	100
4	A4	25	50	100
I	A1	30	50	100
II	A1	15	50	100
III	A1	25	65	100

4.3. DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS

4.3.1. PROPRIEDADES DAS AMOSTRAS UTILIZADAS

Todas as amostras foram preparadas utilizando produtos de uma única empresa. Na Tabela 4.3 indicam-se as propriedades dos produtos utilizados, retiradas de catálogos comerciais.

Tabela 4.3 – Propriedades dos produtos

Produto	Propriedades	
Isolante térmico	Peso específico	20 kg/m ³
	Calor específico	1450 J/kgK
	Condutibilidade térmica (λ)	0,038 W/m°C
	Permeabilidade ao vapor de água (μ)	30-70; 60
	Curva Higroscópica	Não é higroscópico
	Absorção de água por imersão (% volume)	< 2
Camada de base	Peso específico	1,4 a 1,7 g/cm ³
	Permeabilidade ao vapor de água (μ)	< 15
	Aderência sobre placas de EPS	> 0,15 N/mm ²
	Capilaridade	< 2 g/(dm ² min ^{1/2})
Primário	Densidade	Aprox. 1,5
	pH	Aprox. 7,5
	Solubilidade	Solúvel em água
Revestimento final	Peso específico	1,7 a 1,8 g/m ³
	Permeabilidade ao vapor de água (μ)	< 20
	Capilaridade (com primário)	< 4 g/(dm ² min ^{1/2})

4.3.2. ETICS – EXTERNAL THERMAL INSULATION COMPOSITE SYSTEMS

ETICS é a sigla representativa de External Thermal Insulation Composite Systems with rendering (Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior), que representa, de acordo com a ETAG n.º 004, os sistemas compostos por isolamento térmico prefabricado aplicado num suporte e revestido por um reboco armado realizado com uma ou mais camadas.

Normalmente, os sistemas do tipo ETICS são constituídos por placas de poliestireno expandido (EPS) revestidas com um reboco delgado, aplicado em várias camadas, armado com uma ou mais redes de fibra de vidro, com um acabamento de revestimento plástico espesso (RPE), como se pode observar no esquema na Fig. 4.10 [14].

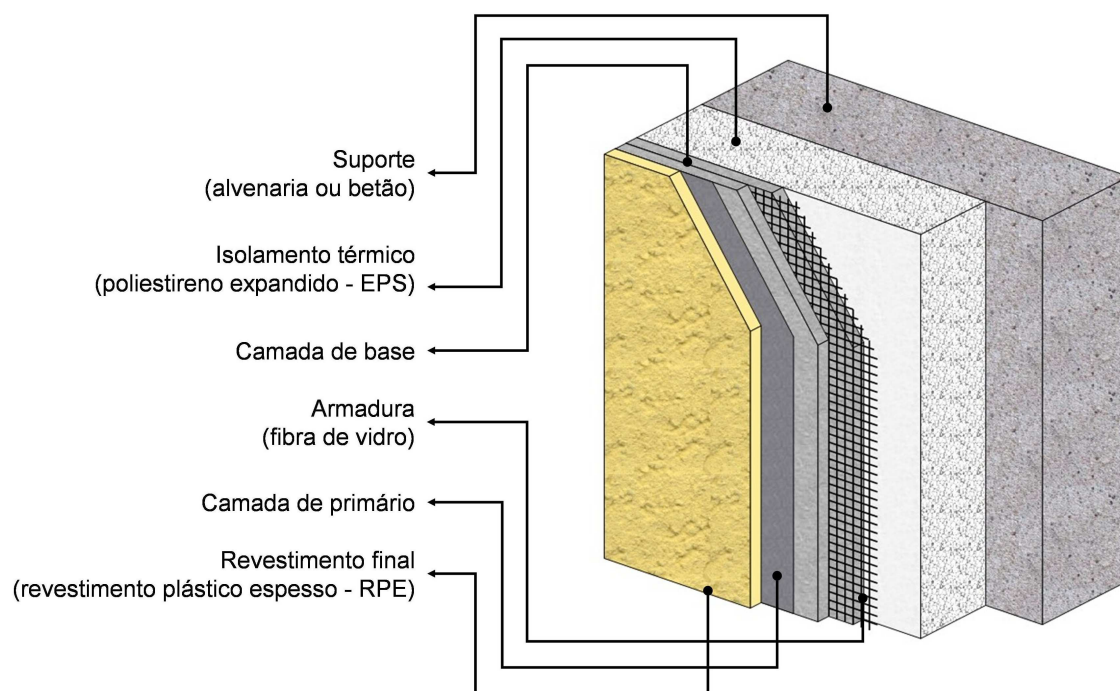


Fig.4.10 – Composição esquemática do ETICS [21]

5

RESULTADOS

5.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS

A realização dos ensaios de secagem seguiu a metodologia descrita no §4. No processo de secagem de cada amostra, a perda de massa foi registada em contínuo, de 5 em 5 minutos, através de um computador ligado à balança. O anemómetro instalado no interior da câmara climática encontrava-se ligado a um *Datalogger*, que registou a velocidade do ar, igualmente de 5 em 5 minutos. Todos os ensaios foram realizados de igual forma, com máximo cuidado e com as mesmas condições, de forma a reduzir eventuais erros quer humanos quer associados aos equipamentos utilizados.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos nos diferentes ensaios de embebição / secagem descritos nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 5.1 – Resultados gerais dos ensaios de embebição / secagem

Ensaio	Amostra	Massa inicial (g)	Tempo de embebição (min.)	Massa após embebição (g)	Massa de água absorvida (g)	Massa do critério de paragem (g)	Tempo de secagem
1	A1 (N)	585,77	60	593,02	7,25	586,13	64h55min.
2	A2 (E)	571,82	60	578,45	6,63	572,15	56h45min.
3	A3 (S)	653,37	60	660,62	7,25	653,74	49h45min.
4	A4 (O)	614,08	60	621,58	7,50	614,46	52h10min.
I	A1 (N)	585,91	60	592,75	6,84	586,25	53h30min.
II	A1 (N)	585,72	60	593,08	7,36	586,09	54h00min.
III	A1 (N)	587,04	50	594,56	7,52	587,41	55h48min.

A massa inicial de cada amostra resulta da média das pesagens da última hora imediatamente antes da embebição, considerando o período de estabilização da amostra no interior da câmara climática. O tempo de embebição foi contabilizado desde o momento em que se colocou a amostra em contacto com a água até ser retirada, não contabilizando o minuto necessário para eliminar o excesso de água da superfície. A massa após a embebição representa o peso da amostra imediatamente a seguir à embebição, ou seja, é o peso que a amostra apresenta no início do processo de secagem.

A massa de água absorvida resulta da diferença entre a massa após a embebição e a massa inicial, representando a quantidade de água que o provete absorveu. A massa do critério de paragem corresponde à soma da massa inicial com 5% da massa de água absorvida. O processo de secagem da amostra terminou quando a sua massa era inferior à massa indicada pelo critério de paragem, em três medições consecutivas espaçadas de 24 horas.

O tempo de secagem representa o tempo entre o início da secagem e o instante em que se atinge o critério de paragem, isto é, até se obter as três pesagens consecutivas espaçadas de 24 horas em que a massa é inferior à massa do critério de paragem.

A velocidade do ar no interior da câmara climática foi aproximadamente constante, sendo a média das velocidades registadas no *Datalogger* igual a 0,3 m/s. Este valor baixo de velocidade do ar apenas assegura uma boa homogeneização do ar existente na câmara climática, não influenciando o processo de secagem das amostras.

5.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisando os resultados obtidos directamente dos ensaios, verificou-se que, relativamente à massa inicial, a amostra A3, que esteve a envelhecer numa fachada orientada a Sul, é a mais pesada. Tendo as quatro amostras dimensões muito semelhantes, esta diferença pode dever-se ou a uma camada de reboco mais espessa ou a maior quantidade de pintura e fita-cola de protecção nas faces não rebocadas.

A massa inicial da amostra A1 nos ensaios 1, I, II, III é diferente, apesar dos valores serem muito próximos, uma vez que após a realização dos ensaios a amostra A1 permaneceu no interior da câmara climática a estabilizar, garantindo-se que estava em equilíbrio higroscópico com a ambiência no início de cada ensaio.

Em relação ao tempo de embebição, em todos os ensaios as amostras tiveram 60 minutos em contacto com a água, excepto no ensaio III, uma vez que em 50 minutos a amostra já tinha embebido mais água do que em todos os ensaios anteriores, tendo-se optado por diminuir o tempo de embebição para que a quantidade de água embebida não fosse muito superior.

A amostra A1, orientada a norte durante a fase de envelhecimento, quando ensaiada com as condições do ensaio I, foi a que embebeu menor quantidade de água. Ao contrário do ensaio III, que em menos tempo embebeu a maior quantidade de água. Um provete em contacto com a água faz o seu embebibimento e quando é retirado do meio húmido seca. Quando é novamente colocado em água, demora menos tempo a embeber.

Considerando os ensaios de 1 a 4, verifica-se que a amostra voltada a Oeste (A4) foi a que embebeu mais água, seguindo-se as amostras voltadas a Sul (A3) e a Norte (A1) e, finalmente, a amostra voltada a Este (A2).

De acordo com Barreira [21], que realizou ensaios nas fachadas onde foram envelhecidas as amostras, a fachada Oeste era a que apresentava maior risco de desenvolvimento biológico, e consequentemente, maior teor de humidade superficial, resultante da acção conjunta da humidificação pela chuva incidente e pelas condições superficiais. Tendo em conta o descrito anteriormente para a amostra A1, faz sentido que seja a amostra que absorveu maior quantidade de água para o mesmo período de embebição. Relativamente às amostras A3 e A1, envelhecidas voltadas a Sul e Norte respectivamente, seria de esperar que a fachada Norte apresentasse um valor superior ao da fachada Sul, porque o teor de humidade superficial na fachada Norte, segundo Barreira [21], seria sempre superior ao longo do ano. No entanto, e tendo em conta que a fachada Sul está mais exposta a ciclos de secagem e

molhagem, porque está mais exposta à chuva incidente e à respectiva secagem por acção da radiação solar directa, a absorção pode estar condicionada. Por outro lado, estando mais exposta aos raios solares, as características do reboco da amostra voltada a Sul poderão ter-se alterado durante o envelhecimento, permitindo uma maior absorção de água.

Os resultados dos ensaios correspondentes ao primeiro ciclo, 1 a 4, não são totalmente claros no que diz respeito à influência da orientação na embebição e capacidade de secagem de amostras. Por esse motivo seria fundamental repetir o mesmo ensaio, com um número de amostras mais significativo, ou amostras de outro material.

Comparando os ensaios realizados com a amostra A1, é visível que qualquer alteração às condições iniciais (temperatura de 25°C, humidade relativa de 50% e ventilação de 100%), fez diminuir o tempo de secagem da amostra. Por se tratar de uma análise que não pode ser feita de forma directa, recorreu-se às fórmulas da cinética de secagem para verificar a relação do tempo de secagem com a variação da temperatura e da humidade relativa, assim como da diferença de orientações durante a exposição para o envelhecimento.

5.3. ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM

5.3.1. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS ENSAIOS

Para a análise da cinética de secagem das amostras testadas foram seleccionados cinco dos modelos apresentados no §3: Newton (5.1), Page (5.2), Modificado de Page (5.3), Logarítmico (5.4) e Midilli *et al.* (5.5). O critério de selecção baseou-se no facto desses modelos serem os mais utilizados na literatura, apresentarem menos parâmetros de ajuste e descreverem de uma forma geral uma função logarítmica.

$$MR = e^{-k \times t} \quad (5.1.)$$

$$MR = e^{-k \times t^n} \quad (5.2.)$$

$$MR = e^{-(k \times t)^n} \quad (5.3.)$$

$$MR = a \times e^{-k \times t} + c \quad (5.4.)$$

$$MR = a \times e^{-k \times t^n} + b \times t \quad (5.5.)$$

Em que: MR – razão de humidade

t – tempo [h]

k – coeficiente empírico do modelo de secagem [h⁻¹]

a, b, c, n – constantes empíricas do modelo de secagem

Para os sete ensaios realizados determinou-se o *Moisture Ratio* (*MR*) experimental, isto é, a razão de humidade com base na seguinte equação:

$$MR = \frac{X(t) - X_e}{X_0 - X_e} \quad (5.6.)$$

onde: $X(t)$ – massa da amostra em função do tempo [kg]

X_e – massa de equilíbrio da amostra (critério de paragem da secagem) [kg]

X_0 – massa da amostra no início da secagem [kg]

De seguida aplicou-se cada um dos cinco modelos escolhidos aos sete ensaios realizados e comparou-se os resultados dos mesmos com os valores obtidos experimentalmente. Para todas as equações teóricas foi feita uma aproximação das constantes envolvidas: k , a , n , c e b . Assim sendo, determinou-se o erro associado a cada um dos modelos testados (aplicação da equação (5.7.)) e seleccionou-se a fórmula que mais se aproximou dos resultados experimentais de cada ensaio.

$$Erro(\%) = \sum (MR_{exp} - MR_{teo})^2 \quad (5.7.)$$

Tabela 5.2 – Percentagem de erro associado a cada um dos modelos testados

Amostra/ Ensaio	Orientação	HR (%)	T (°C)	Percentagem de erro (%)				
				Newton	Page	Modificado de Page	Logarítmico	Midilli <i>et al.</i>
A1	Norte	50	25	26,82	26,77	26,82	8,39	17,09
A2	Este	50	25	13,71	13,09	13,71	13,29	12,42
A3	Sul	50	25	12,32	7,29	12,32	5,51	2,06
A4	Oeste	50	25	7,66	3,65	7,66	5,89	2,73
A1 – I	Norte	50	30	12,13	11,96	12,13	11,72	9,20
A1 – II	Norte	50	15	10,78	4,37	10,78	8,40	4,29
A1 – III	Norte	65	25	13,71	9,86	13,71	11,46	9,86
Soma				97,13	77,00	97,13	64,66	57,66

Como é possível ver na Tabela 5.2, o modelo de Midilli *et al.* é o que apresenta o menor somatório dos erros entre os resultados experimentais e teóricos, para cada ensaio, com um valor de 57,66 %. Este modelo é o que obtém menor percentagem de erro em todos os ensaios, excepto no ensaio 1, e tem a mesma percentagem do modelo de Page no ensaio III.

No entanto, o modelo Logarítmico apresenta um valor muito próximo (64,66 %) e valores de erros mais próximos para os diferentes ensaios. Assim sendo, e visto que o modelo de Midilli *et al.*

apresenta um máximo dos erros (17,09 %) superior ao máximo dos erros do modelo Logarítmico (13,29 %), escolheu-se o modelo Logarítmico como sendo o mais ajustado ao processo de secagem de materiais do tipo ETICS.

Os restantes três modelos apresentam valores sensivelmente superiores, sendo que os que pior descrevem o processo de secagem do ETICS são os modelos de Newton e de Page modificado.

Após análise em separado de cada um dos diferentes ensaios, apresenta-se de seguida uma representação gráfica das curvas experimental e teórica do modelo Logarítmico, podendo-se assim verificar a aproximação entre ambas (Fig. 5.1 a 5.7). De referir que a curva experimental é obtida com os valores das massas registadas experimentalmente, aplicando-se a equação (5.6), em função do tempo de secagem, expresso em horas. A curva teórica resulta da aplicação da fórmula do modelo Logarítmico em função do tempo de secagem. Sendo assim, os gráficos que se seguem representam o teor de humidade em função do tempo, para cada um dos ensaios realizados. A curva experimental está representada com os pontos representativos de todas as leituras, a preto, e a curva teórica a traço contínuo vermelho.

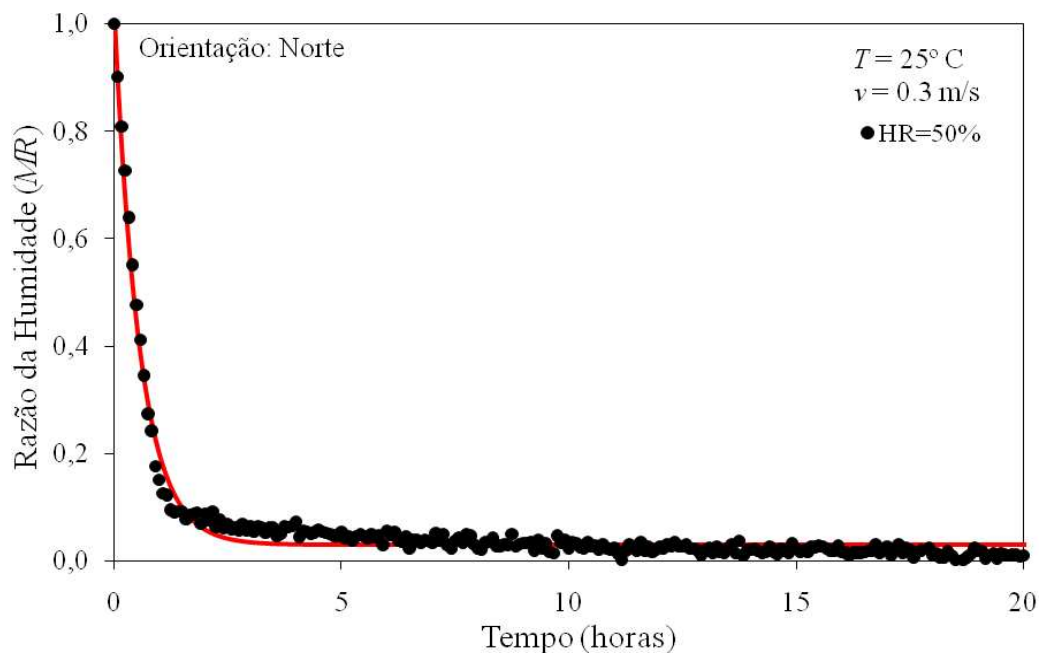


Fig.5.1 – Curva dos dados experimentais do ensaio 1 e curva teórica do modelo Logarítmico

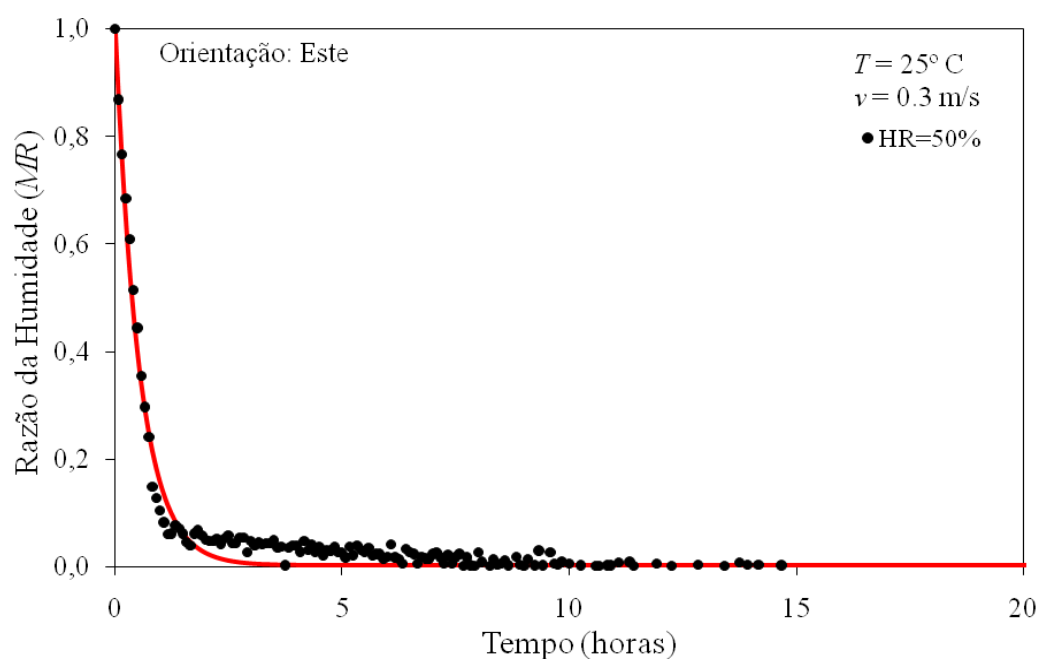


Fig.5.2 – Curva dos dados experimentais do ensaio 2 e curva teórica do modelo Logarítmico

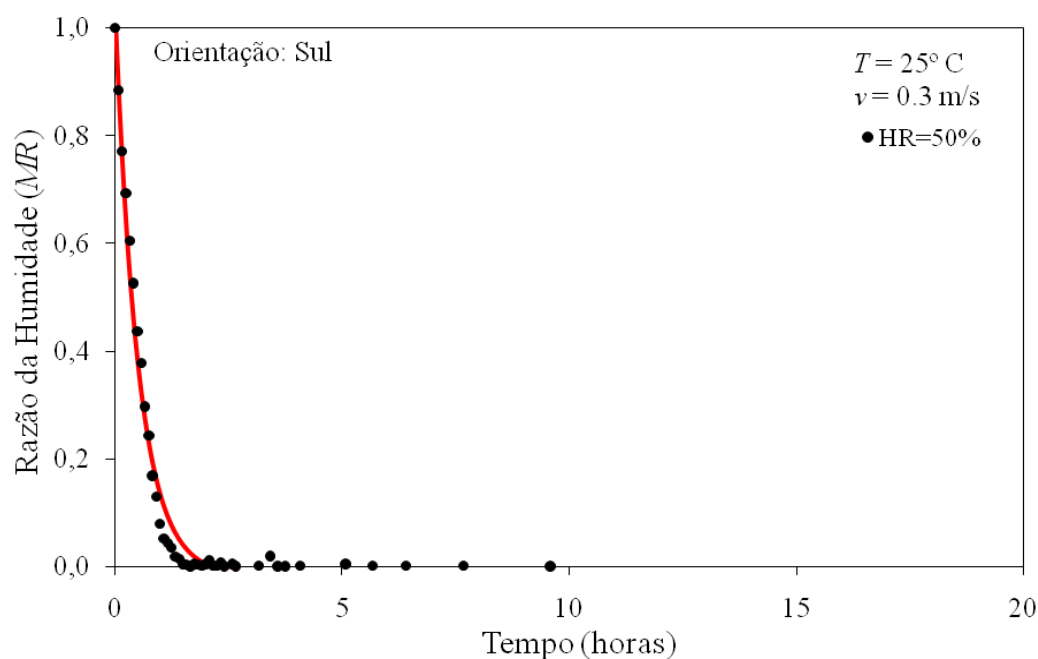


Fig.5.3 – Curva dos dados experimentais do ensaio 3 e curva teórica do modelo Logarítmico

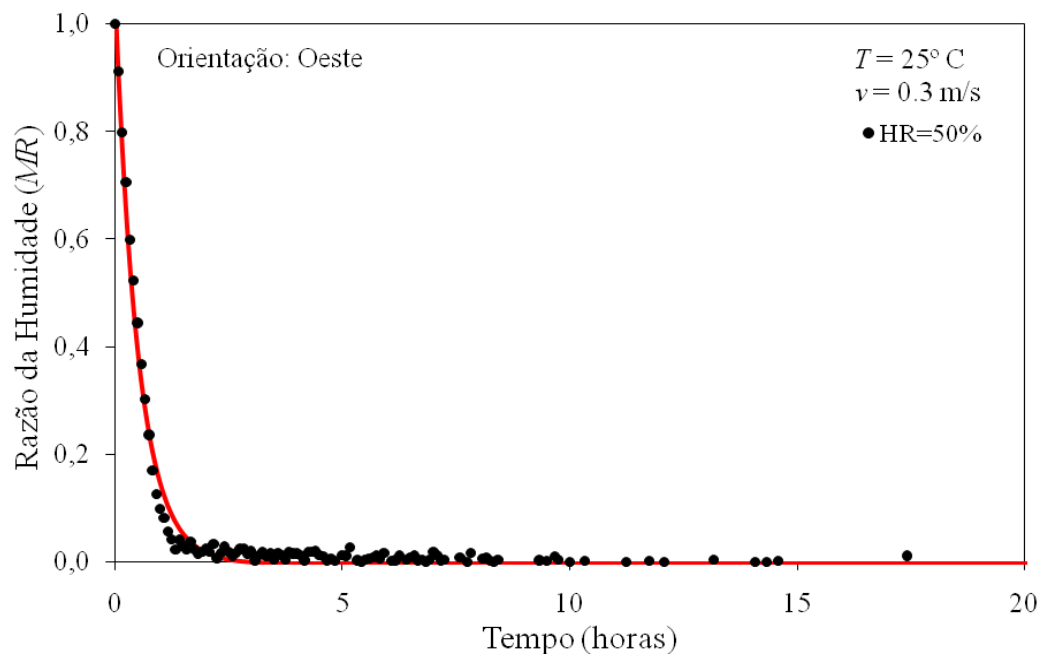


Fig.5.4 – Curva dos dados experimentais do ensaio 4 e curva teórica do modelo Logarítmico

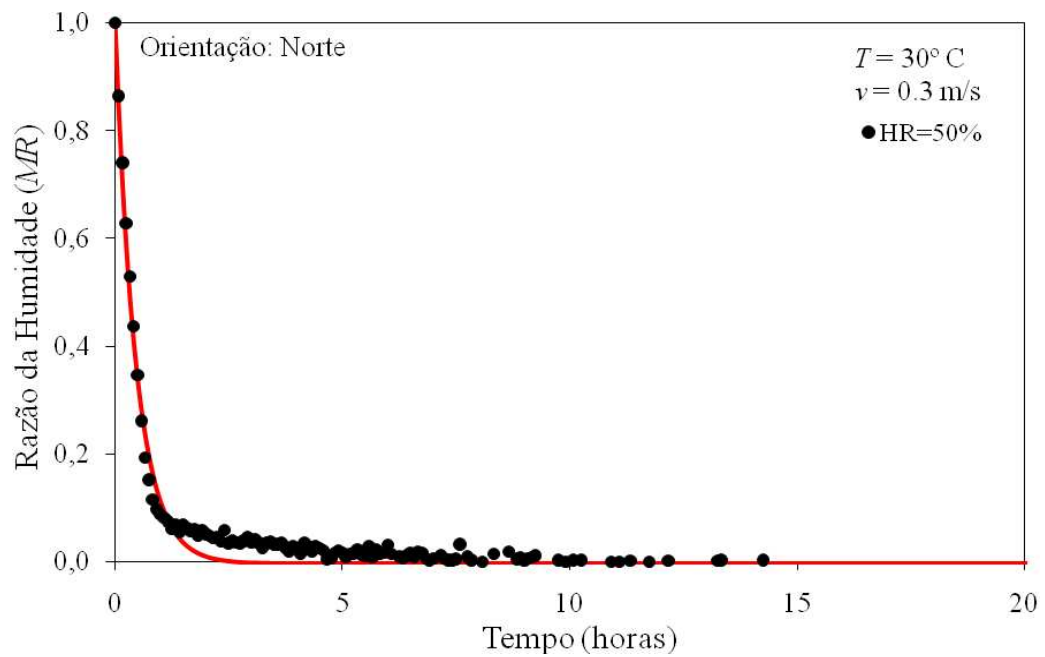


Fig.5.5 – Curva dos dados experimentais do ensaio I e curva teórica do modelo Logarítmico

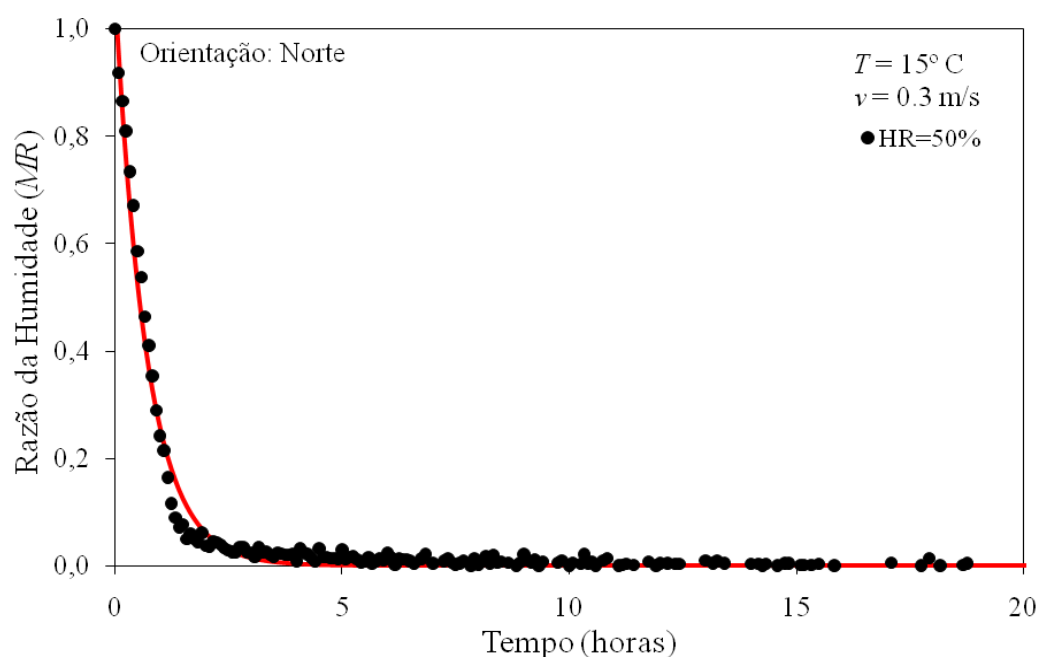


Fig.5.6 – Curva dos dados experimentais do ensaio II e curva teórica do modelo Logarítmico

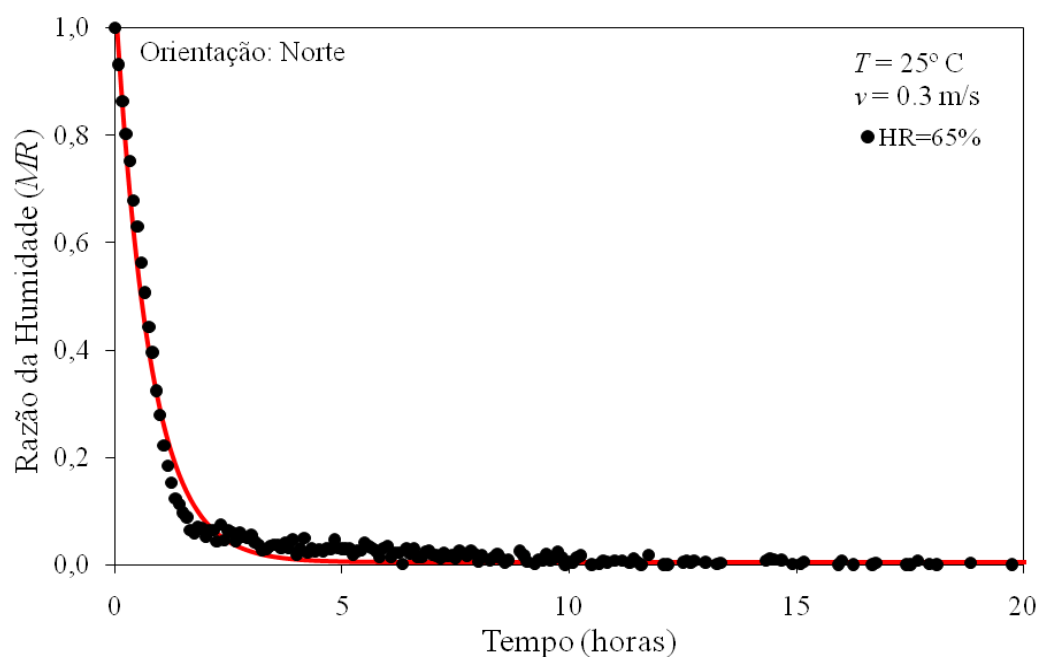


Fig.5.7 – Curva dos dados experimentais do ensaio III e curva teórica do modelo Logarítmico

Para uma análise mais detalhada do processo de secagem das amostras em estudo, é indicado na Tabela 5.3 o valor do coeficiente empírico do modelo de secagem, k , incluído em todos os modelos aplicados. Este coeficiente foi ajustado em todas as equações, para maior aproximação aos resultados experimentais.

Tabela 5.3 – Valores do coeficiente k

Amostra/ Ensaio	Orientação	HR (%)	T (°C)	$K (h^{-1})$				
				Newton	Page	Modificado de Page	Logaritmico	Midilli <i>et al.</i>
A1	Norte	50	25	1,546	1,524	1,546	1,787	1,601
A2	Este	50	25	1,813	1,937	1,813	1,897	1,929
A3	Sul	50	25	1,925	2,232	1,925	1,955	2,209
A4	Oeste	50	25	1,860	2,148	1,860	1,969	2,138
A1 – I	Norte	50	30	2,130	2,234	2,130	2,173	2,212
A1 – II	Norte	50	15	1,322	1,389	1,322	1,439	1,368
A1 – III	Norte	65	25	1,211	1,240	1,211	1,324	1,237

De relembrar que o coeficiente empírico de secagem é dado por:

$$k = \frac{1}{t_c} \quad (5.8.)$$

sendo t_c o tempo de secagem em horas.

Tal como referido anteriormente, o modelo que melhor descreve os resultados experimentais de secagem para os diferentes ensaios é o modelo Logarítmico, assim sendo, apenas para este modelo foram calculados os tempos de secagem, com base na equação (5.8.). O tempo de secagem é inversamente proporcional ao valor do coeficiente k , isto é, quanto maior for o valor de k menor é o valor de t_c (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Valores do tempo de secagem

Amostra/Ensaio	Orientação	HR (%)	T (°C)	$k (h^{-1})$	$t_c (h)$
A1	Norte	50	25	1,787	0,560
A2	Este	50	25	1,897	0,527
A3	Sul	50	25	1,955	0,511
A4	Oeste	50	25	1,969	0,508
A1 – I	Norte	50	30	2,173	0,460
A1 – II	Norte	50	15	1,439	0,695
A1 – III	Norte	65	25	1,324	0,755

Analisando as variações realizadas entre os ensaios e os valores do coeficiente empírico do modelo de secagem, k , e do tempo de secagem, t_c , podemos concluir que a amostra A1, envelhecida a Norte, apresenta o menor valor de k e, conseqüentemente o maior valor de t_c , considerando o primeiro ciclo de ensaios (1 a 4). A amostra A4 apresenta o maior coeficiente empírico do modelo de secagem e, conseqüente, o menor tempo de secagem.

Através da análise da cinética de secagem das diferentes amostras em estudo, é possível observar ligeiras diferenças com a análise efectuada no §5.2, em que se analisou o tempo decorrido até ser alcançado o critério de paragem. Assim, a amostra A3, com envelhecimento orientado a Sul, era a que apresentava menor tempo de secagem, ao passo que agora, com esta última análise, é a amostra A4, que esteve orientada a Oeste, que apresenta o menor tempo de secagem. No entanto, tanto na Tabela 5.1 como na Tabela 5.4 se verifica que estes valores são muito próximos entre si.

Relativamente à variação da temperatura, podemos analisar a sua influência no coeficiente k através dos ensaios 1, I e II, entre os quais apenas varia a temperatura ambiente no interior da câmara climática. Comparando-se então os ensaios 1 e I, conclui-se que aumentando a temperatura o coeficiente k aumenta e conseqüentemente o valor de t_c (tempo de secagem) diminui. Da mesma forma que a diminuição da temperatura no ensaio II relativamente à temperatura do ensaio 1, origina uma diminuição do coeficiente k e um aumento do tempo de secagem. Estes resultados vão de encontro aos esperados, uma vez que, mantendo-se todas as condições constantes e apenas se alterando a temperatura, quanto maior for mais rapidamente se evaporará a água na amostra.

Finalmente, a última alteração que se analisou, foi a variação da humidade relativa. A sua influência pode ser verificada comparando-se o ensaio 1 com o ensaio III, onde passa de 50% para 65%. É visível que com o aumento da humidade relativa, o valor do coeficiente k diminui, e o tempo de secagem aumenta. Quanto mais húmido estiver o ambiente em que se encontra a amostra, mais dificuldades esta terá em secar.

5.3.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE EFECTIVO

Para além das análises já efectuadas aos ensaios experimentais realizados, é, ainda, possível determinar o valor do coeficiente de difusividade efectivo de vapor de água (D_{eff}) no material e como varia em função da temperatura. Para tal considera-se a seguinte equação:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2} \right] \quad (5.9.)$$

onde: MR – razão da humidade [-]

n – número de observações [-]

D_{eff} – coeficiente de difusividade efectivo [m^2/s]

t – tempo [h]

L – espessura da amostra [m]

Os ensaios entre os quais há variação da temperatura são os ensaios 1, I e II, para a amostra A1, durante as quais, no interior da câmara climática, a humidade relativa foi de 50% e ventilação de

100%. O ensaio 1 foi realizado com uma temperatura de 25°C, o ensaio I a 30°C e o ensaio II a 15°C. Foi com base nos resultados obtidos nestes três ensaios que se procedeu à análise da influência da temperatura na difusividade do vapor de água.

Aplicando a equação (5.9) aos três ensaios, obtiveram-se os gráficos das Figuras 5.8 à 5.10, que traduzem a curva dos dados experimentais de teor de humidade em função do tempo (a pontos pretos) e a curva do teor de humidade teórico (equação (5.9.)) em função tempo (a traço continuo vermelho).

O valor do coeficiente de difusividade efectivo do vapor de água determinado para cada um dos ensaios foi o que permitiu a melhor aproximação entre os resultados experimentais e teóricos.

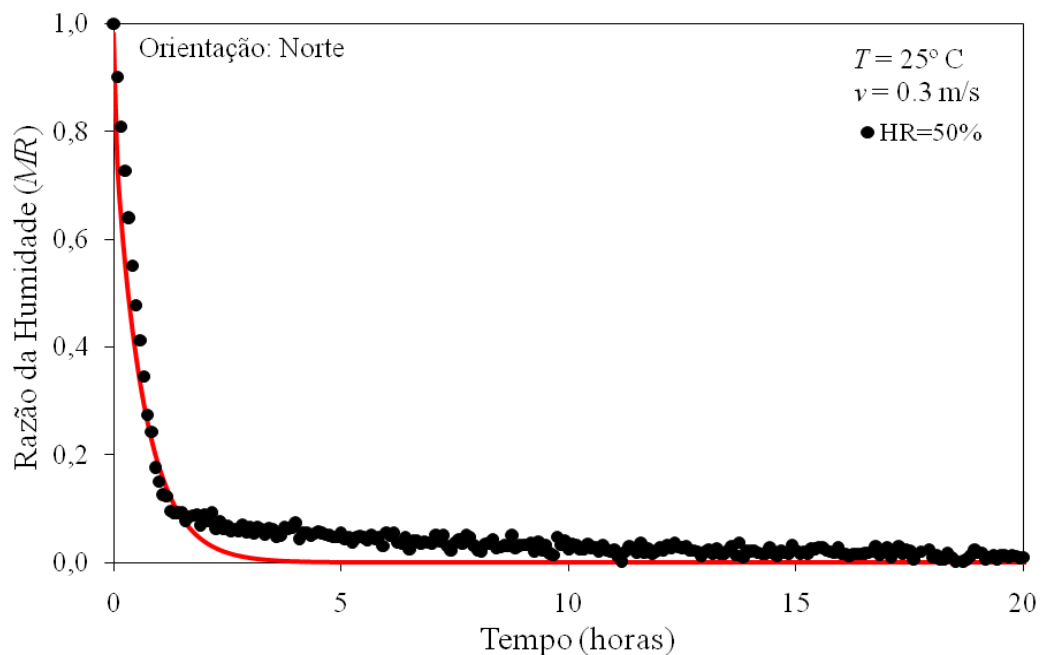


Fig.5.8 – Relação entre MR experimental e o teórico dado pela equação (5.9.) – ensaio 1

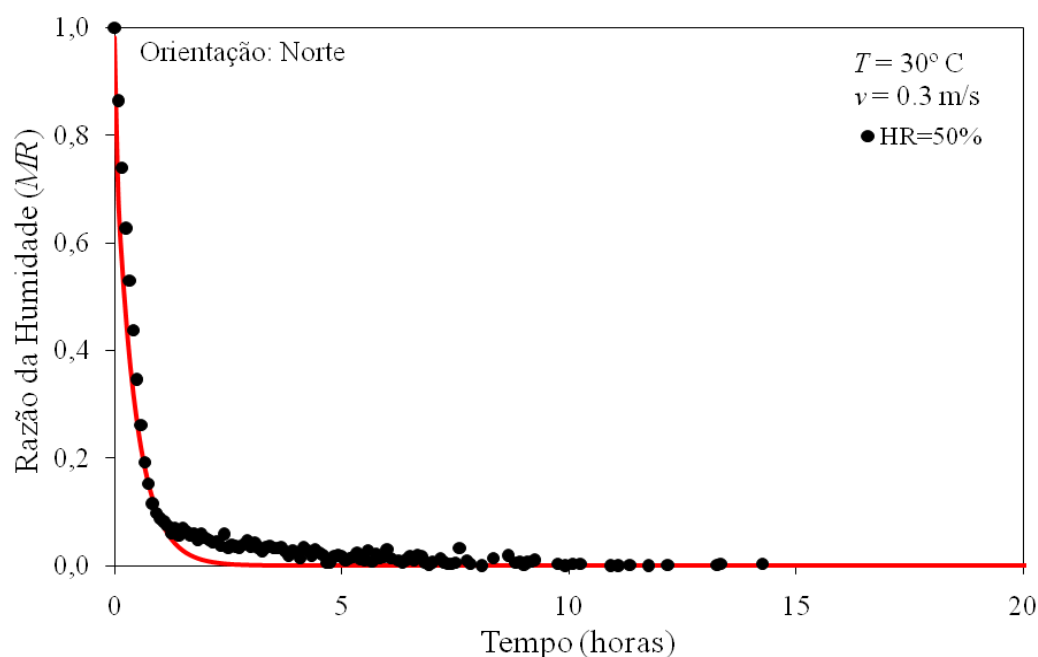


Fig.5.9 – Relação entre MR experimental e o teórico dado pela equação (5.9.) – ensaio I

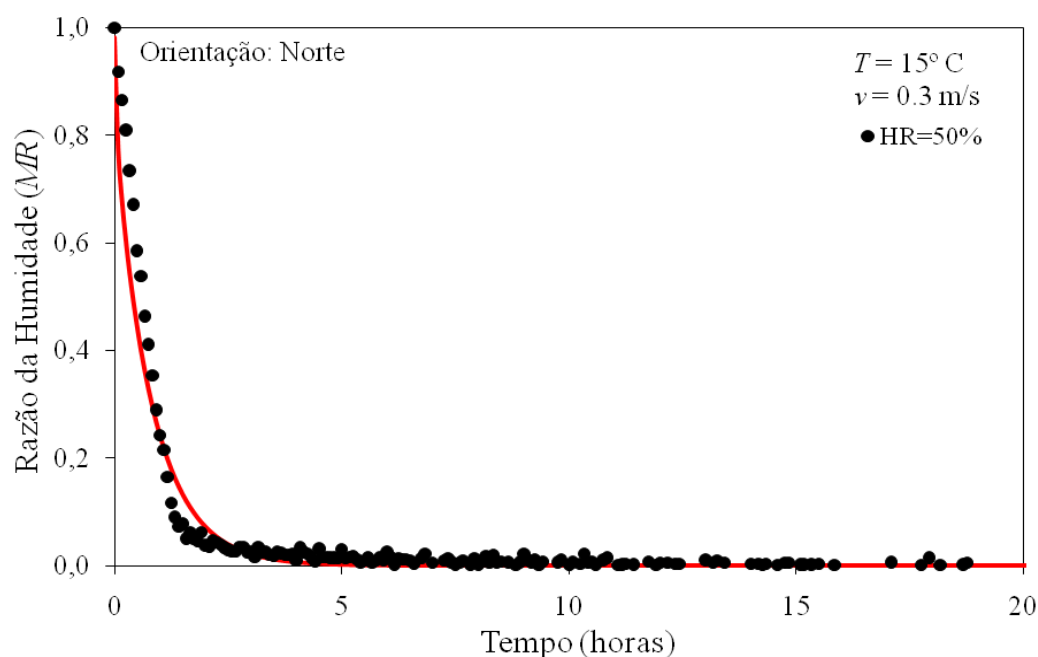


Fig.5.10 – Relação entre MR experimental e o teórico dado pela equação (5.9.) – ensaio II

Para cada um dos três ensaios utilizados no estudo da influência da temperatura na difusividade ao vapor de água, representou-se graficamente a relação entre o teor de humidade e o tempo nas primeiras horas de secagem. Nas Fig. 5.11 à 5.13 pode-se observar que para a fase inicial do processo de

secagem, os dados experimentais são ajustados perfeitamente por uma função linear com coeficientes de correlação (R^2), nos três casos, muito próximos da unidade.

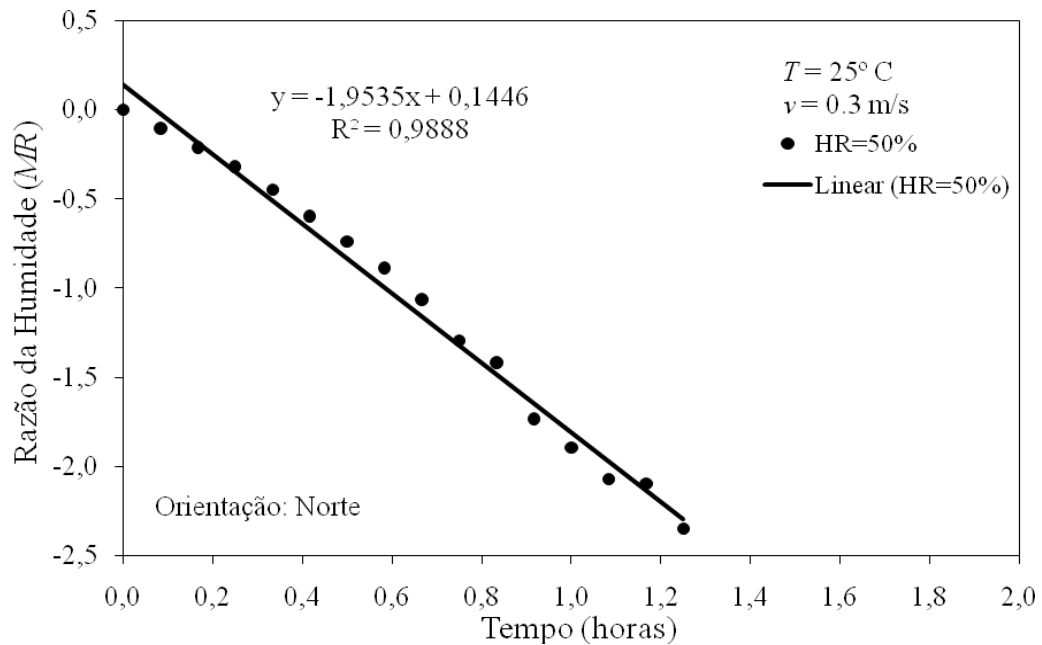


Fig.5.11 – Representação gráfica da razão da humidade (MR) em função do tempo, para a fase inicial do processo de secagem – ensaio 1

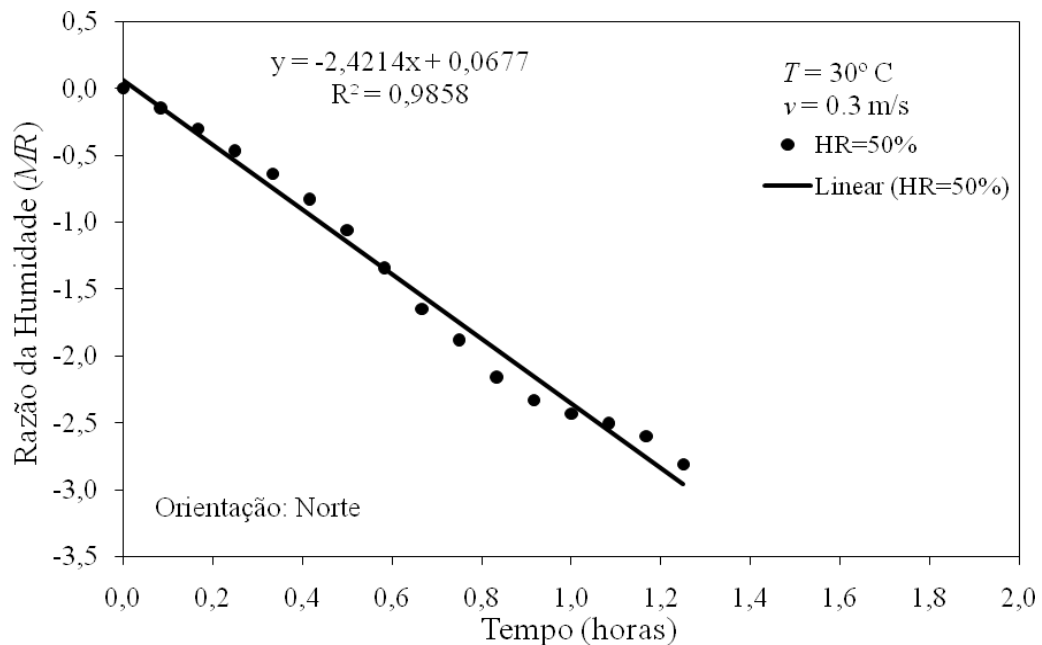


Fig.5.12 – Representação gráfica da razão da humidade (MR) em função do tempo, para a fase inicial do processo de secagem – ensaio I

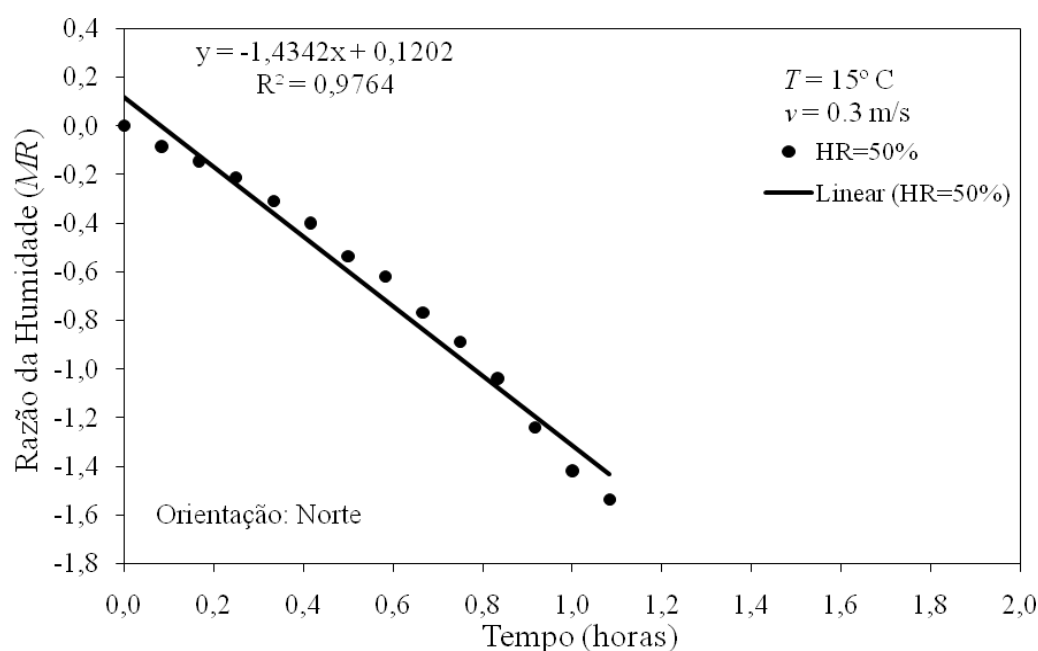


Fig.5.13 – Representação gráfica do teor de humidade (MR) em função do tempo, para a fase inicial do processo de secagem – ensaio II

Após o estudo individual de cada um dos três ensaios, que apenas diferem entre si na temperatura ambiente, analisou-se a relação existente entre eles, de forma a estudar a influência da temperatura no valor do coeficiente de difusividade ao vapor de água do material. Assim sendo, apresenta-se de seguida um quadro resumo e uma representação gráfica da relação entre os dois parâmetros em análise: temperatura e coeficiente de difusividade efectivo ao vapor de água (Tabela 5.5 e Fig. 5.14).

Tabela 5.5 – Valores do coeficiente de difusividade efectivo do vapor de água em ETICS a diferentes temperaturas

Amostra/Ensaio	T (°C)	D_{eff} (m^2/s)	1/T (K)	$\text{Ln}(D_{\text{eff}})$ (m^2/s)
A1	25	1,37E-07	3,35	-15,80
A1 – II	30	1,70E-07	3,30	-15,59
A1 – III	15	1,01E-07	3,47	-16,11

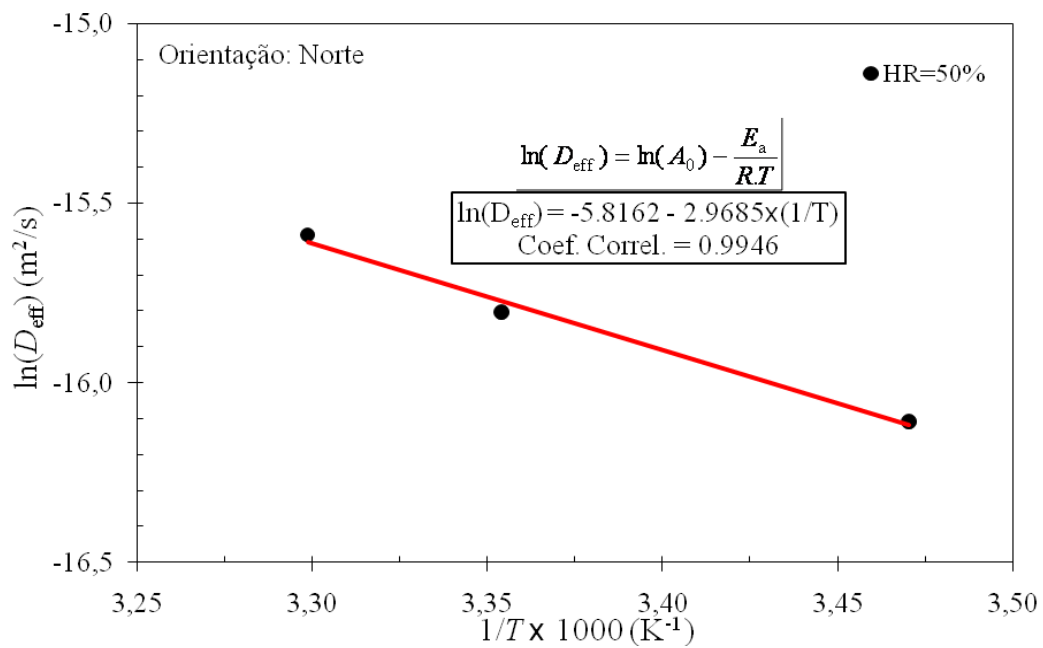


Fig.5.14 – Representação gráfica da variação do coeficiente de difusividade efectiva com a temperatura

Tal como é possível observar no gráfico da Fig. 5.14, o coeficiente de difusividade aumenta com o aumento da temperatura. Pelo coeficiente de correlação linear ($R^2 = 0,9946$), podemos concluir que o ajuste da equação da recta de tendência aos pontos obtidos pelos resultados da difusividade em função da temperatura é óptimo, uma vez que se trata de um valor muito próximo da unidade.

A Fig. 5.15 representa o efeito da temperatura no coeficiente de difusividade e na constante empírica do modelo de secagem. Tanto o coeficiente de difusividade efectiva do vapor de água do material como a constante do modelo de secagem aumentam com o aumento da temperatura, tal como também é evidenciado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Quadro resumo de D_{eff} e k

Amostra/Ensaio	T (°C)	T (K)	D_{eff} (m ² /s)	$D_{\text{eff}} \times 10^7$	K
A1	25	298,15	1,37E-07	1,37	1,601
A1 – II	30	303,15	1,70E-07	1,70	2,212
A1 – III	15	288,15	1,01E-07	1,01	1,368

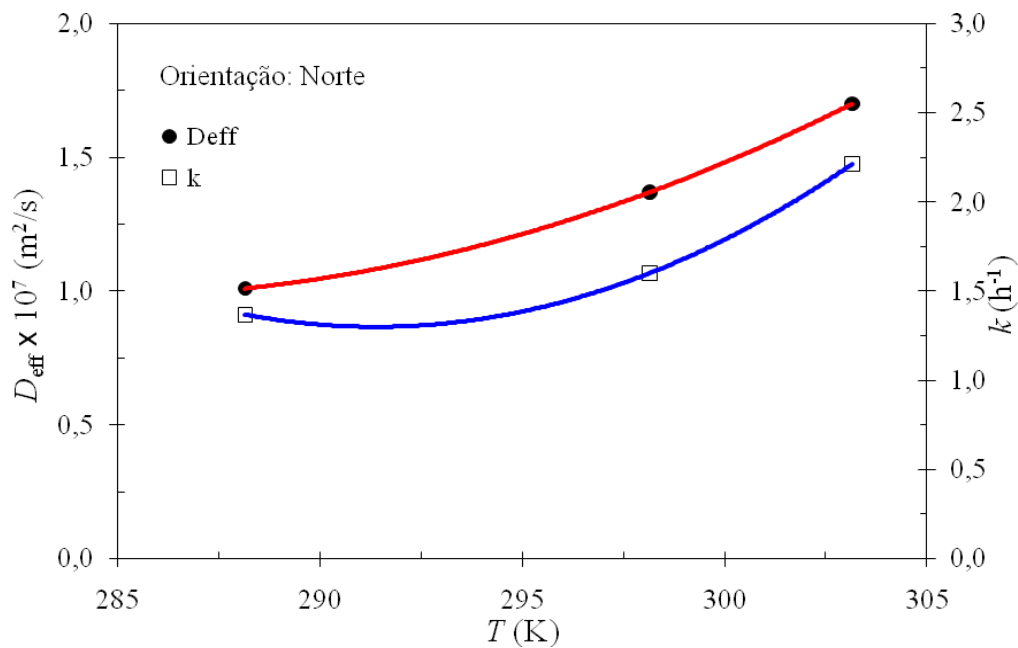


Fig.5.15 – Representação gráfica dos coeficientes de difusividade efectiva e da constante empírica do modelo de secagem em função da temperatura

5.3.3. DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE ACTIVAÇÃO DE ARRHENIUS

Com recurso à equação (5.10.) e ao gráfico apresentado na Fig. 5.14, foi possível determinar a energia de activação necessária para o processo de transferência de vapor de água.

$$E_a = -\text{declive} \times R \quad (5.10.)$$

Considerando-se R a constante universal dos gases ideais, igual a 8,31447 J/mol K e que o declive é -2,9685 (Fig. 5.14), obtém-se uma energia de activação de Arrhenius, necessária para se realizarem as trocas de vapor de água entre uma placa de ETICS e o meio ambiente, de 24,68 kJ/mol.

O valor obtido para a energia de activação de Arrhenius não pôde ser verificado por falta de informação na literatura disponível. Não foi encontrado na literatura nenhum estudo que determinasse coeficientes de difusividade ao vapor e energia de activação com o material de construção neste trabalho, ETICS.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

O principal objectivo deste trabalho foi avaliar a secagem de um material de construção de estrutura porosa. Para o alcançar foi necessário compreender os mecanismos de transferência de humidade, nomeadamente, o processo de secagem. Para atingir o objectivo principal foi também necessário conhecer os principais modelos de cinética de secagem até agora desenvolvidos, com base em estudos realizados para alguns produtos, materiais ou alimentos. Verificou-se que os modelos mais utilizados pela comunidade científica são os modelos empíricos, em função do tempo de secagem e de constantes empíricas ajustáveis. Foram também realizados diversos ensaios que permitiram:

- Seleccionar um modelo de cinética de secagem ajustado à secagem da superfície exterior dos sistemas do tipo ETICS – o modelo Logarítmico, de entre os seleccionados, é o que melhor se aproxima do processo de secagem do ETICS. O modelo de Midilli *et al.* poderia também ser considerado o que melhor se ajusta, tendo em conta os óptimos resultados que apresentou nos ensaios realizados.
- Analisar a influência da orientação das superfícies exteriores dos sistemas do tipo ETICS no tempo de secagem – analisando o tempo necessário até se atingir o critério de estabilização, verificou-se que a amostra que envelheceu na fachada orientada a Sul foi a que secou em menos tempo, tendo embebido a mesma quantidade de água que a amostra da fachada Norte, que demorou mais tempo até ser atingido o critério de paragem. Pela análise da cinética da secagem os resultados não foram exactamente os mesmos, pelo que não foi possível estabelecer uma relação entre a orientação e o tempo de secagem.
- Analisar a influência das condições ambientais (temperatura e humidade relativa) no tempo de secagem de sistemas do tipo ETICS – realizado o estudo com os modelos da cinética de secagem, foi possível concluir que o aumento da temperatura fez aumentar a constante do modelo de secagem, k , e consequentemente diminuir o tempo de secagem, t_c . Quanto à humidade relativa do ar, quanto maior for, menor é a constante k , e consequentemente, maior é o tempo de secagem.
- Analisar a influência da temperatura no coeficiente de difusividade efectivo do vapor de água de materiais de construção porosos, do tipo ETICS – concluiu-se que o aumento da temperatura originou um maior coeficiente de difusividade do vapor de água.
- Determinar a energia de activação de Arrhenius – verificou-se que a energia de activação necessária para realizar trocas de vapor de água entre uma amostra de ETICS e o meio ambiente foi de 24,68 kJ/mol. Valor este que se enquadra na média de alguns valores encontrados na literatura mas não relativos ao ETICS.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho constituem um pequeno contributo para o estado da secagem dos materiais. Este trabalho pode ser um incentivo para a realização de mais estudos no âmbito da cinética da secagem, direccionados a materiais de construção.

Como perspectivas para trabalhos futuros salienta-se:

- Analisar a influência da velocidade do ar no tempo de secagem de materiais porosos;
- Aplicar a cinética de secagem a mais materiais de construção;
- Estudar a aplicação de diferentes modelos da cinética de secagem;
- Analisar a influência da espessura do elemento construtivo no tempo de secagem;
- Estudar a variação de diferentes dimensões das amostras, verificando a influência no tempo de secagem;
- Analisar a influência no tempo da secagem, de materiais colocados a envelhecer naturalmente durante diferentes períodos de tempo e em diferentes alturas do ano.

BIBLIOGRAFIA

- [1] FREITAS, V. P., *Transferência de Humidades em Paredes de Edifícios – Análise do Fenómeno de Interface*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 1992.
- [2] KAROGLOU, M., MOROPOULOU, A., KROKIDA, M. K., MAROULIS, Z. B., *Hygrometric Kinetics and Microstructure of Building Materials*, XII DBMC - 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, 2011.
- [3] FLORI, J. P., *Le mouillage et le sechage des murs, les effects du climat*, CSTB Magazine n.º 26, 1989.
- [4] PAIVA, J. V., *Compilação dos dados climáticos directamente ligados aos problemas das humidades*, LNEC, Lisboa, 1970.
- [5] PINTO, F. M. C. A., *Influência da Pressão Exterior na Embebição de Materiais de Construção*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1998.
- [6] HENRIQUES, F. M. A., *Acção da Humidade em Paredes*. Dissertação de Doutoramento, LNEC, 1993
- [7] SOUSA, J. M. M. S., *Caracterização da Capilaridade de Revestimentos de Fachada*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1996.
- [8] BEGUIN, D., *Étude pour la France du risque de mouillage par la pluie des parois verticales des constructions*, Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Paris, 1986
- [9] KRISCHER, *Technique du Séchage*, Trad. CETIAT.
- [10] CASTRO, J. M. F., *Estudo Experimental da Secagem do Betão Celular*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1998.
- [11] GUIMARÃES, A. S., DELGADO, J. M. P. Q., FREITAS, V. P., *Degradation Control of Walls with Rising Damp Problems: Numerical and Mathematical Analysis of the Evaporative Process*, XII DBMC - 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, 2011.
- [12] SANTOS, A. M. S., *Modelos Numéricos de Transferência de Calor e de Massa com Aplicação à Secagem*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 1992.
- [13] HENRIQUES, F. M. A., *Humidade em Paredes*, LNEC, Lisboa, 2001.
- [14] FREITAS, V. P., *Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior – Reboco Delgado Armado sobre Poliestireno Expandido – ETICS*, Porto, 2002.
- [15] FREITAS, V. P., TORRES, M. I., GUIMARÃES, A. S., *Humidade Ascensional*, FEUP edições, Porto, 2008.
- [16] BRITO, V. P. S., *Influência dos Revestimentos por Pintura na Secagem do Suporte*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [17] FREITAS, V. P., PINTO, P. S., *Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção – Condensações Internas*, Nota de Informação Técnica - NIT 002, LFC, 2000.
- [18] RAMOS, N. M. M., *Modelação da Variação da Humidade Relativa no Interior dos Edifícios*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2000.

- [19] TOGRUL, H., *Suitable Drying Model for Infrared Drying of Carrot*. Journal of Food Engineering 77, 2006, p. 610-619.
- [20] PINTO, P. N. S., *Caracterização de Barreiras Pára-Vapor e sua Aplicação*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2002.
- [21] BARREIRA, E. S. B. M., *Degradação Biológica de Fachadas com Sistemas de Isolamento Térmico pelo Exterior devida ao Desempenho Higrotérmico*. Dissertação de Doutorado, FEUP, 2010.
- [22] KAROGLU, M., MOROPOULOU, A., MAROULIS, Z. B., KROKIDA, M. K., *Drying Kinetics of Some Building Materials*. Drying Technology, 23, p. 305-315, Taylor & Francis Group, 2005.
- [23] CRANK, J., *The Mathematics of Diffusion*, Oxford Science Publications, 1975.
- [24] ROBERTS, J. S., KIDD, D. R., PADILLA-ZAKOUR, O., *Drying Kinetics of Grape Seeds*. Journal of Food Engineering 89, 2008, p. 460-465.
- [25] KUITCHE, A., EDOUN, M., TAKAMTE, G., *Influence of Pre-treatment on Drying on the Drying Kinetics of A Local Okro (Hibiscus ersculentus) Variety*. World Journal of Dairy & Food Sciences 2, 2007, p. 83-88.
- [26] HII, C. L., LAW, C.L., CLOKE, M., *Modelling of Thin Layer Drying Kinetics of Cocoa Beans During Artificial and Natural Drying*. Journal of Engineering Science and Technology, 2008, p.1-10.
- [27] ATIF, S. M., *Prediction of Drying Kinetics of Different Vegetables in a Fluidized Bed Drier*. Dissertação de Bacharelato, National Institute of Technology Rourkela, 2010.
- [28] GUINÉ, R., *Analysis of the Drying Kinetics of S. Bartolomeu Pears for Different Drying Systems*. Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry, 2010, p. 1772-1783.
- [29] TAHERI-GARAVAND, A., RAFIEE, S., KEYHANI, A., *Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics of Tomato Influence of Air Dryer Conditions*, International Transaction Journal of Engineering, Management, et Applied Sciences et Technologies, 2011, p. 147-160.
- [30] http://www.imperialum.com/default.asp?s=279&sparent=85&sroot=79&cm_id=307. 11 de Maio de 2011.
- [31] <http://pt.scribd.com/doc/41568680/agua-subterranea>. 17 de Maio de 2011.
- [32] <http://www.santahelena.ueg.br/apostilas/giancarlo/2008/primeiro/2008-07-24-aula2.pdf>. 17 de Maio de 2011.
- [33] http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_de_ativa%C3%A7%C3%A3o. 3 de Junho de 2011.