

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA



**IDENTIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE
DIFUSÃO NA MADEIRA PINUS PINASTER AITON**

Carlos Manuel Garcia Esteves

Vila Real, Outubro de 2009

Dissertação apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Amadeu Duarte da Silva Borges e Co-orientação científica do Professor Doutor José Joaquim Lopes Morais, ambos do Departamento de Engenharias da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Aos meus Pais e Irmãos

“Querer é poder!”

Este foi o lema que foi sempre ouvi, desde a minha tenra idade.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer meus orientadores, os Professores Amadeu Borges e José Morais pela sua inteira disponibilidade na orientação desta Dissertação. Uma especial palavra de apreço e gratidão ao Professor Amadeu Borges, pela confiança em mim depositada e por toda a ajuda ao longo do decurso deste trabalho. Ao Professor José Morais pelas sugestões indicadas.

Gostaria de agradecer à minha Família por todo o apoio, motivação e inspiração, que foram chave do meu sucesso para conseguir aqui chegar.

Por fim agradeço à UTAD, pela disponibilização das infra-estruturas necessárias à realização deste trabalho, em especial na facilidade de acesso aos laboratórios, equipamentos e materiais.

Resumo

Com a realização deste trabalho, pretende-se contribuir para a identificação das propriedades de difusão da madeira de Pinho Marítimo (*Pinus pinaster* Ait.). O trabalho consistiu na realização de ensaios experimentais de acordo com a lei de Fick, que incluiu tanto a adsorção como a dessorção de água. Os resultados experimentais foram ajustados recorrendo ao modelo de Shen & Springer, 1976, no sentido de serem obtidos os valores do coeficiente de difusão e do teor de água no equilíbrio. As propriedades de difusão (coeficiente de difusão e do teor de água no equilíbrio), foram identificadas em diferentes condições de temperatura e humidade relativa. Além das propriedades de difusão, foram ainda identificadas as taxas de retracção e inchamento, segundo as direcções de simetria anatómica.

A avaliação dos resultados experimentais permitiu concluir que, quando apenas as faces na direcção longitudinal da madeira, estão expostas à adsorção ou à dessorção de humidade, os valores do teor de humidade de equilíbrio e coeficiente de difusão, praticamente são iguais aos obtidos para a madeira quando exposta em todas as faces de simetria anatómica. Assim, pode concluir-se que é pela direcção longitudinal que, grande parte do transporte de humidade ocorre na madeira de *Pinus pinaster*. Foi ainda verificado que, de um modo geral, a variação dimensional é cerca de duas vezes superior na direcção tangencial, quando comparada com a direcção radial e que a variação na direcção longitudinal é pouco significativa.

Abstract

With the realization of this work, intends to contribute to the identification of the properties of diffusion from the wood of Maritime Pine (*Pinus pinaster* Ait.). The work consisted in the realization of experimental tests in accordance with the Fick's law, which included both the water adsorption and desorption. The experimental results were adjusted resorting to the model of Shen and Springer, 1976, in the sense of being obtained the values of the diffusion coefficient and the equilibrium moisture content. The properties of diffusion (diffusion coefficient and the equilibrium moisture content), were identified in different conditions of temperature and relative moisture. Besides the diffusion properties, the rate of shrinkage and swelling were identified, according to the directions of anatomical symmetry.

The evaluation of the experimental results allowed to end what, when the faces in the longitudinal direction from the wood, are exposed to the moisture adsorption or desorption, the values of the equilibrium moisture content and diffusion coefficient, practically they are the same as the obtained ones for the wood, when exposed in all the faces of anatomical symmetry. Thus, it can be ended that, what is for the longitudinal direction, great part of the moisture transport takes place in the *Pinus pinaster* wood. It was checked that, in the general, the dimensional variation is around twice superior in the tangential direction, when compared with the radial direction and that the variation in the longitudinal direction is not much significant.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	xiv
Nomenclatura	xviii
1 Introdução	1
1.1 Objectivos.....	3
1.2 Conteúdo da Tese	4
2 Estrutura Anatómica da Madeira	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Estrutura macroscópica da madeira.....	9
2.3 Estrutura microscópica da madeira.....	11
2.4 Estrutura da parede celular	13
2.5 Variabilidade da madeira.....	18
3 Características Mecânicas da Madeira	19
3.1 Características físicas	19
3.1.1 Higroscopicidade.....	21
3.1.2 Retracção e inchamento.....	23
3.2 Composição química	25

3.2.1	Celulose	26
3.2.2	Hemicelulose	27
3.2.3	Lenhina e outros materiais.....	28
3.2.4	Substâncias extractáveis	28
4	Mecanismos de Transporte de Humidade na Madeira	30
4.1	Introdução.....	30
4.2	Água livre	31
4.3	Água de adesão.....	31
4.3.1	Água de Constituição	32
4.3.2	Água de adsorção superficial.....	32
4.3.3	Água de Condensação capilar.....	33
4.4	Bases de determinação do teor de água.....	34
4.5	Mecanismos de transporte de humidade na madeira.....	34
4.5.1	Estado de energia de humidade na madeira.....	34
4.5.2	Movimento de água livre (<i>free water bulk flow</i>)	36
4.5.3	Movimento de vapor de água (<i>vapor water bulk flow</i>)	36
4.5.4	Difusão na madeira.....	37
4.5.4.1	Modelo de Fick da difusão	39
4.5.4.2	Primeira lei de Fick	42
4.5.4.3	Segunda lei de Fick	42
5	Estudo Experimental Preliminar da Difusão.....	44
5.1	Procedimento experimental	44
5.2	Trabalho experimental preliminar	48
5.2.1	Procedimento experimental	49
5.3	Resultados e discussão	49
5.3.1	Adsorção em provetes não isolados.....	49
5.3.2	Dessorção em provetes não isolados	50

5.3.3	Adsorção para provetes isolados	51
5.3.4	Conclusões e considerações finais.....	52
6	Estudo experimental da difusão	53
6.1	Introdução.....	53
6.2	Protocolo experimental.....	54
6.3	Concentração de água no equilíbrio e coeficiente de difusão	55
6.4	Resultados e discussão	56
6.4.1	Adsorção.....	56
6.4.1.1	Cubos não isolados	56
6.4.1.2	Paralelepípedos não isolados	60
6.4.1.3	Cubos não isolados na direcção longitudinal	65
6.4.1.4	Paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal	68
6.4.1.5	Cubos não isolados na direcção tangencial	72
6.4.1.6	Paralelepípedos não isolados na direcção tangencial	76
6.4.2	Influência da temperatura e da humidade relativa no coeficiente de difusão na adsorção	79
6.4.3	Dessorção (secagem)	84
6.4.3.1	Cubos não isolados	85
6.4.3.2	Paralelepípedos não isolados	88
6.4.3.3	Cubos não isolados na direcção longitudinal	92
6.4.3.4	Paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal	95
6.4.3.5	Cubos não isolados na direcção tangencial	97
6.4.3.6	Paralelepípedos não isolados na direcção tangencial	101
6.4.4	Influência da temperatura e da humidade relativa no coeficiente de difusão na dessorção	105
6.5	Determinação das isotérmicas de adsorção e dessorção.....	109
6.5.1	Isotérmica de adsorção	110

6.5.2 Isotérmica de dessorção.....	114
6.6 Conclusões.....	109
7 Retração e Inchamento	121
7.1 Determinação da retração e inchamento.....	121
7.1.1 Procedimento experimental - Retracção.....	121
7.1.2 Procedimento experimental - Inchamento.....	122
7.2 Resultados e discussão	123
7.2.1 Retracção	123
7.2.2 Inchamento	126
7.3 Conclusões.....	128
8 Conclusões.....	130
8.1 Conclusões finais.....	130
8.2 Trabalho futuro	133
Referências Bibliográficas	134

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 – Madeira resinosa e folhosa.....	6
Figura 2.2 – Esquema do lenho da resinosa.	7
Figura 2.3 – Esquema do lenho da folhosa.....	7
Figura 2.4 – Principais planos e direcções de referência.....	8
Figura 2.5 – Estrutura macroscópica da madeira	9
Figura 2.6 – Secções transversais ilustrando tipos de anéis de crescimento.	10
Figura 2.7 – Estrutura microscópica do cambio vascular.....	10
Figura 2.8 – Esquema longitudinal dos traqueídeos inerentes ao lenho	12
Figura 2.9 – Estrutura microscópica dos canais de resina em <i>Pseudotsuga mensiezii</i>	12
Figura 2.10 – Modelo esquemático da parede celular da madeira.	14
Figura 2.11 – Percentagem das substâncias na parede celular.	15
Figura 2.12 – Bordos das pontuações areoladas de <i>pinus radiata</i>	17

Capítulo 3

Figura 3.1 – Isotérmica de adsorção e dessorção com o fenómeno <i>histerese</i>	21
Figura 3.2 – Fases de secagem da madeira.....	22
Figura 3.3 – Variação dimensional nas três direcções.....	24
Figura 3.4 – Curva típica de humidade contida – retracção	24
Figura 3.5 – Estrutura química da celulose	27
Figura 3.6 – Estrutura química da lenhina de uma resinosa.....	29

Capítulo 4

Figura 4.1 – Difusão de água livre e de vapor numa fibra de madeira resinosa.....	38
Figura 4.2 – Mistura binária	40
Figura 4.3 – Vector densidade de corrente.....	41
Figura 4.4 – Segunda Lei de Fick da difusão.....	43

Capítulo 5

Figura 5.1 – Vigas de madeira <i>pinus pinaster aiton</i>	45
Figura 5.2 – Recipiente higrotérmico	46
Figura 5.3 – Estufa utilizada nos ensaios de difusão.....	46
Figura 5.4 – Balança Analítica de calibração automática.	47
Figura 5.5 – Evolução do ganho de massa em provetes não isolados: T=50%.....	50
Figura 5.6 – Evolução da perda de massa em provetes não isolados: T=50°C	51
Figura 5.7 – Evolução do ganho de massa em provetes isolados: T= 50°C	52

Capítulo 6

Figura 6.1 – Histograma ilustrando os diferentes tipos de amostras.....	54
Figura 6.2 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados: T=35°C.	58
Figura 6.3 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados: T=50°C	58
Figura 6.4 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados: T=65°C	59
Figura 6.5 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados: T=35°C.....	61
Figura 6.6 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados: T=50°C.....	62
Figura 6.7 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados: T=65°C.....	63
Figura 6.8 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção longitudinal: T=35°C.....	65
Figura 6.9 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção longitudinal: T=50°C	66

Figura 6.10 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção longitudinal: T=65°C	68
Figura 6.11 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: T=35°C	69
Figura 6.12 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: T=50°C	70
Figura 6.13 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: T=65°C	71
Figura 6.14 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: T=35°C.....	73
Figura 6.15 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: T=50°C.....	74
Figura 6.16 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: T=65°C.....	75
Figura 6.17 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=35°C	76
Figura 6.18 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=50°C	77
Figura 6.19 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=65°C	79
Figura 6.20 – Variação do coeficiente de difusão para HR1 (HR \cong 30%).	80
Figura 6.21 – Variação do coeficiente de difusão para T=35°C.....	80
Figura 6.22 – Variação do coeficiente de difusão HR2 (HR \cong 50%).	81
Figura 6.23 – Variação do coeficiente de difusão para T=50°C.....	83
Figura 6.24 – Variação do coeficiente de difusão para HR3 (HR \cong 65%)	83
Figura 6.25 – Variação do coeficiente de difusão para T=65°C	83
Figura 6.26 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados: T=35°C.....	85
Figura 6.27 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados: T=50°C.....	87

Figura 6.28 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados: T=65°C.....	87
Figura 6.29 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados: T=35°C....	89
Figura 6.30 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados: T=50°C....	90
Figura 6.31 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados: T=65°C....	91
Figura 6.32 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: T=35°C.....	92
Figura 6.33 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados na direcção longitudinal: T=50°C	93
Figura 6.34 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados na direcção longitudinal: T=65°C	94
Figura 6.35 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: T=35°C	95
Figura 6.36 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: T=50°C	96
Figura 6.37 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: T=65°C	97
Figura 6.38 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: T=35°C.....	98
Figura 6.39 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: T=50°C.....	99
Figura 6.40 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: T=65°C.....	100
Figura 6.41 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=35°C.....	102
Figura 6.42 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=50°C.....	103
Figura 6.43 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=65°C	104

Figura 6.44 – Variação do coeficiente de difusão para HR1 ($HR \cong 30\%$).	106
Figura 6.45 – Variação do coeficiente de difusão para $T=35^{\circ}\text{C}$.	106
Figura 6.46 – Variação do coeficiente de difusão para HR2 ($HR \cong 50\%$).	107
Figura 6.47 – Variação do coeficiente de difusão para $T=50^{\circ}\text{C}$.	107
Figura 6.48 – Variação do coeficiente de difusão para HR3 ($HR \cong 65\%$).	108
Figura 6.49 – Variação do coeficiente de difusão a para $T=65^{\circ}\text{C}$.	108
Figura 6.50 – Isotérmica de adsorção para cubos não isolados.	111
Figura 6.51 – Isotérmica de adsorção, para paralelepípedos não isolados.	111
Figura 6.52 – Isotérmica de adsorção, para cubos não isolados na direcção longitudinal.	112
Figura 6.53 – Isotérmica de adsorção, para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal.	112
Figura 6.54 – Isotérmica de adsorção, para cubos não isolados na direcção tangencial.	113
Figura 6.55 – Isotérmica de adsorção, para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial.	113
Figura 6.56 – Isotérmica de dessorção, para cubos não isolados.	115
Figura 6.57 – Isotérmica de dessorção, para paralelepípedos não isolados.	115
Figura 6.58 – Isotérmica de adsorção, para cubos não isolados na direcção longitudinal.	116
Figura 6.59 – Isotérmica de adsorção, para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal.	116
Figura 6.60 – Isotérmica de adsorção, para cubos não isolados na direcção tangencial.	117
Figura 6.61 – Isotérmica de adsorção, para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial.	117
 Capítulo 7	
Figura 7.1 – Diagrama de retracção, $T= 35^{\circ}\text{C}$.	123
Figura 7.2 – Diagrama de retracção, $T= 50^{\circ}\text{C}$.	124
Figura 7.3 – Diagrama de retracção, $T= 65^{\circ}\text{C}$.	125

Figura 7.4 – Diagrama de inchamento, $T= 35^{\circ}\text{C}$	126
Figura 7.5 – Diagrama de inchamento, $T= 50^{\circ}\text{C}$	127
Figura 7.6 – Diagrama de inchamento, $T= 65^{\circ}\text{C}$	128

Índice de Tabelas

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Composição química da madeira.....	26
---	----

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Solução salina.....	46
----------------------------------	----

Tabela 5.2 – Dimensões e tipo de isolamento das amostras.....	48
---	----

Capítulo 6

Tabela 6.1 – Dimensão nominal dos provetes.....	54
---	----

Tabela 6.2 – Solução salina.....	55
----------------------------------	----

Tabela 6.3 – Resultados experimentais para cubos não isolados: $T=35^{\circ}\text{C}$	57
---	----

Tabela 6.4 – Resultados experimentais para cubos não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$	59
---	----

Tabela 6.5 – Resultados experimentais para cubos não isolados: $T=65^{\circ}\text{C}h$	60
--	----

Tabela 6.6 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: $T=35^{\circ}\text{C}$	62
---	----

Tabela 6.7 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$	62
---	----

Tabela 6.8 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: $T=65^{\circ}\text{C}$	63
---	----

Tabela 6.9 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=35^{\circ}\text{C}$	66
---	----

Tabela 6.10 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=50^{\circ}\text{C}$	67
--	----

Tabela 6.11 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=65^{\circ}\text{C}$	67
--	----

Tabela 6.12 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: $T=35^{\circ}\text{C}$	69
---	----

Tabela 6.13 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: T=50°C.....	70
Tabela 6.14 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: T=65°C	71
Tabela 6.15 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: T=35°C.....	72
Tabela 6.16 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: T=50°C.....	73
Tabela 6.17 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: T=65°C.....	74
Tabela 6.18 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=35°C.....	77
Tabela 6.19 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=50°C.....	78
Tabela 6.20 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=65°C.....	79
Tabela 6.21 – Valores do coeficiente de difusão para a adsorção.....	79
Tabela 6.22 – Resultados experimentais para cubos não isolados: T=35°C.	86
Tabela 6.23 – Resultados experimentais para cubos não isolados: T=50°C.	86
Tabela 6.24 – Resultados experimentais para cubos não isolados: T=65°C.	88
Tabela 6.25 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: T=35°C	89
Tabela 6.26 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: T=50°C.....	90
Tabela 6.27 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: T=65°C.....	91
Tabela 6.28 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: T=35°C.....	92
Tabela 6.29 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: T=50°C	93

Tabela 6.30 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: T=65°C.....	94
Tabela 6.31 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: T=35°C	95
Tabela 6.32 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: T=50°C.	96
Tabela 6.33 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: T=65°C.	97
Tabela 6.34 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: T=35°C.....	98
Tabela 6.35 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: T=50°C.....	99
Tabela 6.36 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: T=65°C.....	100
Tabela 6.37 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=35°C.....	102
Tabela 6.38 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=50°C	103
Tabela 6.39 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: T=65°C	104
Tabela 6.40 – Valores do coeficiente de difusão para a dessorção.	105
Tabela 6.41 – Valores do teor de humidade em equilíbrio para a adsorção.....	110
Tabela 6.42 – Valores do teor de humidade em equilíbrio para a dessorção	114

Capítulo 7

Tabela 7.1 – Valores da retracção linear (ϵ_r), T=35°C.....	124
Tabela 7.2 – Valores da retracção linear (ϵ_r), T=50°C	124
Tabela 7.3 – Valores da retracção linear (ϵ_r), T=65°C.....	125
Tabela 7.4 – Valores do inchamento linear (ϵ_i), T=35°C	127

Tabela 7.5 – Valores do inchamento linear (ϵ_l), T=50°C	127
Tabela 7.6 – Valores do inchamento linear (ϵ_l), T=65°C	128

Nomenclatura

Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
FSP	Ponto de saturação das fibras
HR	Humidade Relativa
L	Longitudinal
LC	Cubo não isolado na direcção longitudinal
LM	Lamela média
LP	Paralelepípedo não isolado na direcção longitudinal
NC	Cubo não isolado
NP	Paralelepípedo não isolado
P	Parede primária
S1	Parede secundária interna
S2	Parede secundária média
S3	Parede secundária externa
R	Radial
T	Tangencial
TC	Cubo não isolado na direcção tangencial
TP	Paralelepípedo não isolado na direcção tangencial
TUE	Teor de humidade de equilíbrio com o ambiente
W	Parede da Célula

Simbologia

C	concentração
C_0	concentração inicial
D	difusibilidade; coeficiente de difusão
E	potencial total
E_g	potencial gravitacional
E_p	potencial de pressão
E_v	potencial químico
E_o	potencial osmótico
f	função genérica
$grad$	gradiente
Me	teor de humidade no equilíbrio
l_1	dimensão, numa dada direcção, do provete saturado
l_2	dimensão, numa dada direcção, do provete seco em estufa
P	ponto genérico
S	sistema material
T	temperatura
t	tempo
\vec{n}	vector normal a uma dada superfície
Σ	superfície
V	volume
dm	massa do soluto
\vec{J}	vector de corrente
x, y, z	coordenadas num referencial Cartesiano
ε_r	retracção linear
ε_i	inchamento linear

Capítulo 1

Introdução

O homem tem utilizado a madeira como um material de construção, desde os tempos mais remotos na história (Kollman and Côté, 1984; Gibson and Ashby, 1997). A própria palavra “material” deriva do latim “*materies*”, que significa do tronco de uma “árvore”. Actualmente a madeira continua a ser um material com ampla aplicabilidade por exemplo na engenharia mecânica, naval, civil, paralelamente com os outros materiais tais como os metais, plásticos e plásticos reforçados. A madeira é um material biológico e tem a seu favor o facto de ser eco-eficiente na medida que provém de uma fonte vegetal renovável e reciclável. Porém, é caracterizada fundamentalmente pela sua forte anisotropia, heterogeneidade e variabilidade (Oliveira, 2004).

Ao nível macroscópico a madeira pode ser considerada com um material contínuo e homogéneo (Kollman and Côté, 1984; Schniewind, 1989; Dinwoodie, 2000). A partir da sua estrutura anatómica é possível definir, em cada ponto, três direcções de simetria material designadas por: Longitudinal (L), ao longo das fibras; Radial (R), perpendicular às fibras e paralela aos raios; Tangencial (T), aos anéis de crescimento e mutuamente perpendicular às direcções L e R (Xavier, 2003).

O comportamento físico e mecânico da madeira é completamente caracterizado pelas relações temperatura e humidade relativa, tensão e deformação no referencial de simetria material *LRT*.

O conhecimento científico da madeira como material permitirá a sua adequada utilização desde o processamento industrial até à aplicação industrial. Para que seja possível aplicar a madeira para um determinado uso final, esta deve satisfazer os requisitos de qualidade do produto e também da sua transformação industrial. Implicitamente relacionado aos requisitos de qualidade da madeira estão as técnicas e sistemas de secagem existentes que podem melhorar a qualidade da mesma, minimizando custos, otimizando a fiabilidade inerentes ao processo de transformação, bem como à aplicabilidade industrial. Resumidamente, o principal objectivo da secagem da madeira é otimizar um produto utilitário para determinado fim, minimizando qualquer perda de qualidade que ela afere, assegurando as propriedades físicas e mecânicas, e portanto, conservando assim recursos naturais da mesma natureza existentes no ambiente. A secagem de madeira é, ou deveria ser uma conservação orientada, um processo de eficiência e benefício.

Quase todas as propriedades físicas da madeira são influenciadas pelo teor de humidade. Tiemann (1906) deu um passo importante na análise físico-mecânica da madeira ao definir o *Ponto de Saturação das Fibras (FSP)*. O conhecimento deste ponto é importante pois é a partir deste que ocorrem as alterações de carácter estrutural na madeira, isto é, retracção ou expansão (inchamento), e alterações na resistência mecânica.

Como se sabe, a madeira é caracteristicamente higroscópica, isto é, tende permanentemente a equilibrar o seu teor de humidade com o espaço higroscópico e a temperatura ambiente. Nos anos 60 foi mostrado (Christensen, 1965; Skaar *et al.*, 1970), que a taxa de sorção (adsorção ou dessorção), de humidade ao equilíbrio é dependente do nível da humidade relativa circundante e do aumento ou redução na humidade relativa (Time, 1998).

Directamente relacionado com a sorção de humidade está a difusão. A difusão é o movimento aleatório das moléculas de água em resposta a um gradiente de humidade. Este movimento ocorre de regiões de alta concentração de humidade para as de baixa concentração (Siau, 1984). A fracção da difusão aumenta com a temperatura, aumentando 37 vezes quando a temperatura é elevada de 35°C para 100°C (Walker, 1993).

A determinação da difusividade efectiva de humidade num material como a madeira reveste-se de primordial importância na formulação dos modelos físico-matemáticos que descrevem o comportamento da madeira durante a secagem. De um modo geral é utilizada a *lei de Fick* da difusão para a estimar o valor médio da difusividade efectiva de água num sólido (Porter; Schurr; Wells and Semrau, 1984).

É neste contexto que se insere o objectivo desta Dissertação, na identificação das propriedades de difusão da madeira, partindo do princípio que é higroscópica e portanto, identificar o coeficiente de difusão e o teor de concentração de humidade no equilíbrio com o ambiente (*Me*). Como material foi escolhido a madeira de espécie *Pinus pinaster* Aiton. Neste trabalho, estudar-se-á a madeira quando sujeita a diferentes atmosferas em termos de humidade relativa e temperatura, na perspectiva de observar e analisar diferentes comportamentos, inerentes ao facto da característica anisotrópica, e portanto ser possível efectuar o estudo segundo as suas direcções de simetria anatómica.

1.1 Objectivos

Os principais objectivos deste trabalho podem sintetizar-se da seguinte forma:

- Criação e concepção de um procedimento experimental para a realização adequada de ensaios de difusão;
- Identificar e caracterizar as propriedades da difusão na madeira devido à influência da humidade relativa e temperatura, comprovando que sendo a madeira anisotrópica, a difusão varia em função das diferentes direcções de simetria anatómica, comparando estas com a difusão multi-direccional e respectiva quantificação;
- Caracterizar experimentalmente a influência da temperatura e humidade relativa na variação dimensional da madeira e respectiva quantificação dos coeficientes lineares de retracção e inchamento.

1.2 Conteúdo da Tese

O presente trabalho encontra-se dividido em oito Capítulos, incluindo este, de introdução, e o último onde se apresentam as conclusões principais do trabalho e algumas propostas de trabalho futuro.

No Capítulo 2 é apresentado uma breve revisão bibliográfica relacionada com a anatomia da madeira, em particular a espécie resinosa, grupo ao qual pertence a madeira de *Pinus pinaster* Aiton.

O Capítulo 3, aborda sucintamente os aspectos relativos às principais características e propriedades da madeira, nomeadamente a higroscopicidade, retracção e inchamento e composição química.

No Capítulo 4 são apresentados os mecanismos de transporte de humidade na madeira, descrevendo detalhadamente todas as formas e composição em que a água se apresenta, bem como a envolvente do processo na qual a água se movimenta na madeira.

O Capítulo 5 é dedicado à descrição do trabalho experimental preliminar com vista à avaliação das propriedades de difusão da madeira. Este estudo preliminar conduziu à elaboração de um procedimento experimental. Ainda neste Capítulo, é descrito o processo de obtenção dos provetes, bem como a identificação dos equipamentos necessários. Apresentam-se também os resultados, análise, conclusões e considerações finais do estudo experimental preliminar.

O Capítulo 6 é dedicado ao trabalho experimental, baseado no procedimento apresentado no Capítulo anterior. São apresentados os resultados obtidos e sua análise. Apresenta-se ainda as isotérmicas de adsorção e dessorção.

O Capítulo 7 é dedicado à análise da retracção e inchamento dos provetes.

Capítulo 2

Estrutura Anatômica da Madeira

Conteúdo do Capítulo

Pretende-se com esta sucinta da revisão bibliográfica da anatomia da madeira esclarecer de uma forma clara e explícita, toda a complexidade da estrutura macro, microscópica da madeira e a estrutura da sua parede celular, de modo a clarificar posteriormente aspectos importantes onde insere a difusão, com especial incidência nas madeiras resinosas, dado ser uma Resinosa a espécie considerada neste trabalho (*Pinus Pinaster* Aiton) é uma Resinosa.

2.1 Introdução

A madeira, é um material natural orgânico, anisotrópico e de estrutura celular complexa constituído por elementos histológicos diferenciados segundo as funções que desempenha. A natureza e a arquitectura desses elementos definem a estrutura anatômica da madeira, que difere de espécie para espécie. A madeira desempenha as funções estruturais, de transporte da seiva, de transformação e armazenamento dos produtos da fotossíntese (Oliveira, 2004).

Numa perspectiva Botânica, as madeiras com interesse comercial provêm de dois grandes grupos (Kollman and Côté, 1984; Carvalho, 1996): Gimnospérmicas e Angiospérmicas. Nas Gimnospérmicas, a classe mais importante é a das Coníferas (ou resinosas), também designadas na literatura internacional como *Softwoods* (madeiras macias). Nas Angiospérmicas, distinguem-se as Dicotiledóneas (ou folhosas), usualmente designadas na literatura internacional como *Hardwoods* (madeiras duras). As Coníferas (A e C da Figura 2.1), ou Resinosas diferenciam-se basicamente em traqueídeos e parênquima. Os traqueídeos desempenham as funções de condução da seiva bruta e de suporte, enquanto o parênquima garante a função de armazenamento das substâncias elaboradas no processo da fotossíntese (Figura 2.2) (Oliveira, 2004).

Nas Folhosas, (B e D da Figura 2.1) há maior especialização, com células responsáveis pelo transporte da seiva bruta, os vasos, células de armazenamento, parênquima axial e transversal (Figura 2.3).

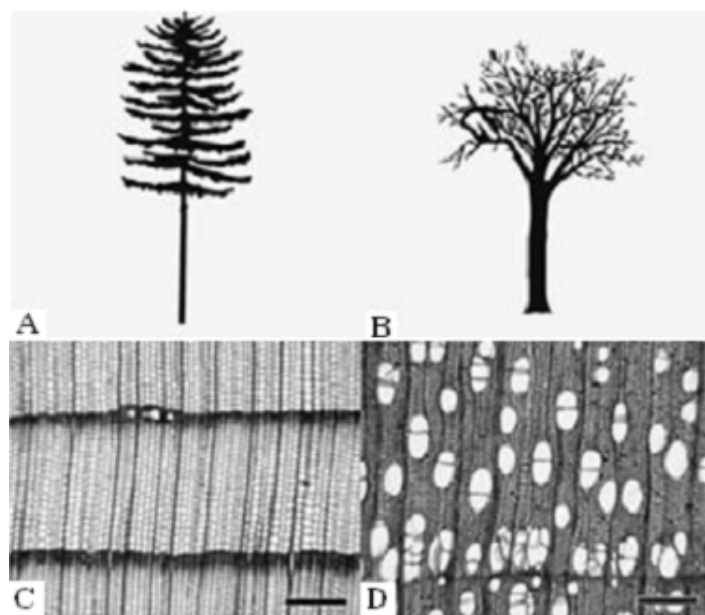


Figura 2.1 – Madeira resinosa e folhosa. (A) Aspecto genérico de uma árvore resinosa. (B) Aspecto genérico de uma árvore folhosa. (C) Secção transversal de uma *Pseudotsuga mensiezii*, típica resinosa. Os três espaços em branco são os canais de resina. (D) Secção transversal de uma *Betula allegheniensis*, típica folhosa. A estrutura branca são os vasos ou poros, a principal característica das folhosas. (Escala de = 300µm) (Rowell, 2005).

As madeiras resinosas são muito mais uniformes do que as folhosas quanto ao seu aspecto, razão pela qual é mais fácil distinguir o lenho inicial do lenho final, geralmente o lenho inicial tem menor densidade que o lenho final (C e D da Figura 2.1).

As árvores produtoras de madeira são plantas superiores, de elevada complexidade anatómica. O aspecto mais saliente da anatomia da madeira é a sua organização hierárquica, em diferentes escalas, desde a macro-escala típica das aplicações estruturais, até à nano-escala da parede celular (Thibaut *et al*, 2001; Bruck *et al*, 2002). É esta organização hierárquica da estrutura anatómica que explica a variabilidade do comportamento mecânico da madeira e a sua anisotropia.

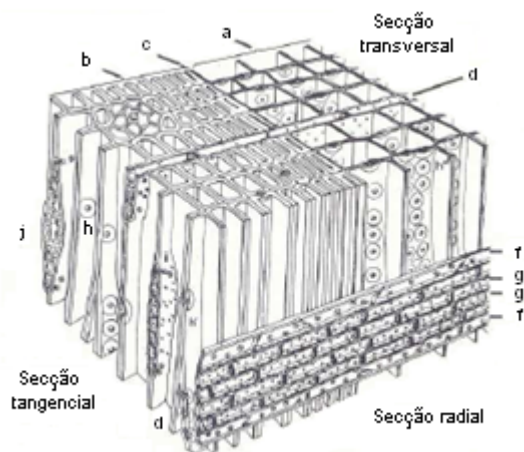


Figura 2.2 – Esquema do lenho da resinosa: (a) lenho inicial; (b) lenho final; (d) raio lenhoso; (e) canal de resina vertical; (f) traqueídeos radiais marginais; (g) célula do parênquima; (h) pontuação areolada; (i) pontuação de cruzamento; (j) raio lenhoso fusiforme com canal de resina horizontal (Carvalho, 1996).

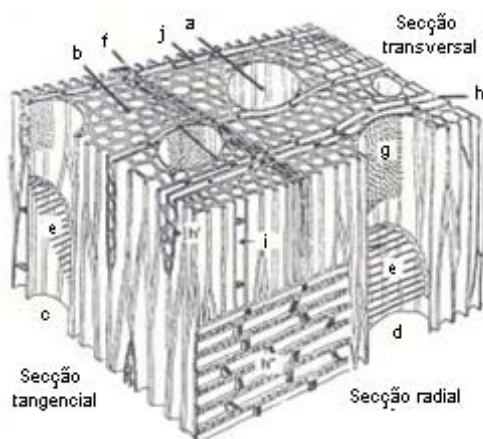


Figura 2.3 – Esquema do lenho da folhosa: (a) poro-seção transversal do vaso; (b) fibra; (c e d) segmento vascular; (e) perfuração; (g) pontuações radio-vasculares; (h e j) raio lenhoso; (i) parênquima axial (Carvalho, 1996).

Todo o estudo da arquitectura anatómica requer a consideração de planos principais de observação, para revelação completa e espacial dos elementos constitutivos e respectiva avaliação biométrica.

Consideram-se assim, três planos fundamentais de observação:

- Plano transversal;
- Plano radial;
- Plano tangencial.

O primeiro define-se como perpendicular ao eixo da árvore e corresponde à secção recta do tronco, no qual se observam as formações cíclicas do lenho, denominados anéis de crescimento, bem como uma formação central, de cor mais intensa do que a coroa circular periférica, delimitada pela casca, que se denomina cerne, enquanto a parte restante se denomina borne. Os outros dois planos longitudinais e paralelos ao eixo axial, são definidos, como radial por passar teoricamente pela medula e seccionar perpendicularmente os anéis de crescimento, e como tangencial por ser paralelo ao plano radial e conseqüentemente tangente ao contorno de uma qualquer anel de crescimento (Carvalho, 1996).

De facto existem três direcções de simetria anatómica na madeira, mutuamente ortogonais (Figura 2.4), a direcção Longitudinal (*L*), no sentido das fibras, a direcção radial (*R*) no sentido dos anéis de crescimento e a direcção tangencial (*T*) aos anéis de crescimento anual.

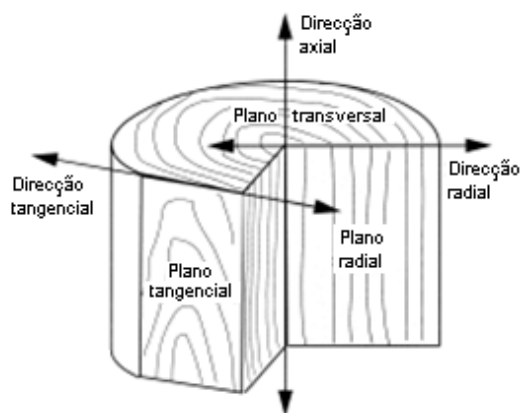


Figura 2.4 – Principais planos e direcções de referência (Chapelet, *et al*, 1991).

2.2 Estrutura macroscópica da madeira

O crescimento da madeira na árvore processa-se em duas camadas de células geradoras, que pela sua repetida divisão, dão origem a novos tecidos e aumentam todos os anos o diâmetro do tronco. A estas camadas embrionárias, dá-se o nome de câmbio, situam-se na periferia do tronco antes da casca (CA na Figura 2.5 e VC na Figura 2.7). Durante a actividade do câmbio, as células aí formadas aumentam de volume, alteram as suas proporções, e evoluem para se especializarem em diversas funções. Tal como já foi dito anteriormente, nas Folhosas a especialização é maior do que nas Resinosas (Oliveira, 2004).

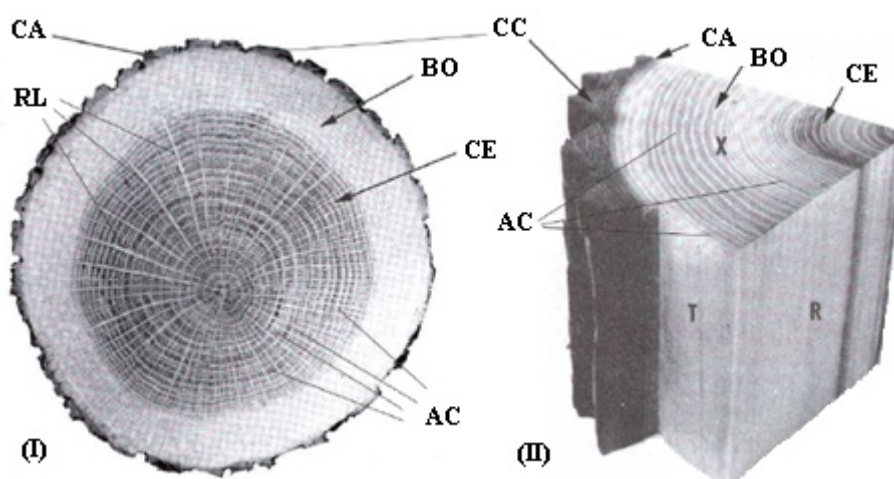


Figura 2.5 – Estrutura macroscópica da madeira resinosa: (CC) casca; (CA) câmbio vascular; (BO) Bórne; (CE) cerne; (AC) anéis de crescimento; (RL) raios lenhosos (I) (Tsoumis, 1991), (II) (Schniewind, 1989).

Nas regiões temperadas o engrossamento do tronco é sazonal, pois o câmbio só entra em actividade quando condições como a temperatura e humidade são favoráveis. Ao longo do período de crescimento vegetativo, uma nova camada de lenho vai sendo produzida. Contudo, esta camada anual é heterogénea devido à diferenciação das células formadas em alturas distintas do ciclo de crescimento. O lenho formado no início do período de crescimento, chamado lenho inicial ou de Primavera, apresenta células de lúmen maior e paredes mais finas, fruto de condições ambientais mais favoráveis. As células que se diferem mais tarde, têm as paredes mais espessas e o lúmen mais estreito e formam o lenho final ou de Outono. Esta diferenciação permite-nos observar, num corte transversal do tronco, uma série de anéis que podem ser considerados aproximadamente concêntricos,

correspondentes a outros anos de crescimento, chamados anéis de crescimento (AC da Figura 2.5 e Figura 2.6) (Oliveira, 2004).

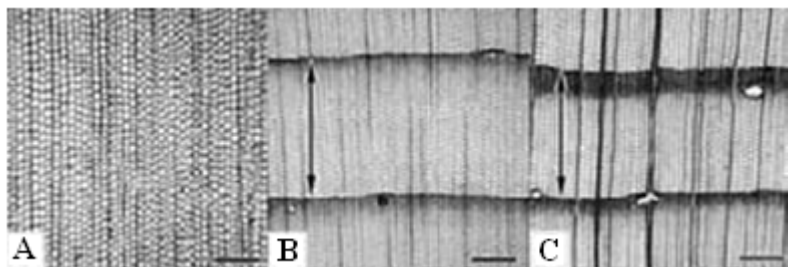


Figura 2.6 – Secções transversais ilustrando tipos de anéis de crescimento. As flechas delimitam anéis de crescimento, quando presente. (A) Nenhuma transição dentro do anel de crescimento (anel de crescimento ausente) em *Podocarpus imbricata*. (B) transição Gradual do lenho inicial ao lenho final em *Picea glauca*. (C) Transição bruta do lenho inicial para o lenho final em *Pseudotsuga mensiezii* (Rowell, 2005).

O engrossamento sazonal do tronco vai empurrando cada vez mais para o interior as camadas de lenho formado mais antigas. Por outro lado, a deposição de lenhina (composto químico da madeira), nas paredes dos vasos (Folhosas) e traqueídeos (Resinosas), vai tornando estes elementos cada vez menos eficientes no transporte dos nutrientes. Assim, o lenho da parte central do tronco vai-se tornando inactivo, constituído por células mortas de paredes lenhificadas que se impregnam de taninos, gomas e corantes e formam uma coluna cónica a que se dá o nome de cerne (CE na Figura 2.5). Com os anos, esta zona central acompanha o crescimento da árvore, expandindo-se em altura e em largura. A camada mais externa, de formação mais recente, representa o lenho activo e constitui o borne (BO na Figura 2.5). Esta região activa do tronco situa-se, numa camada relativamente estreita, compreendendo a parte mais interna da casca (CC na Figura 2.5), o câmbio e os anéis periféricos do lenho (Oliveira, 2004).

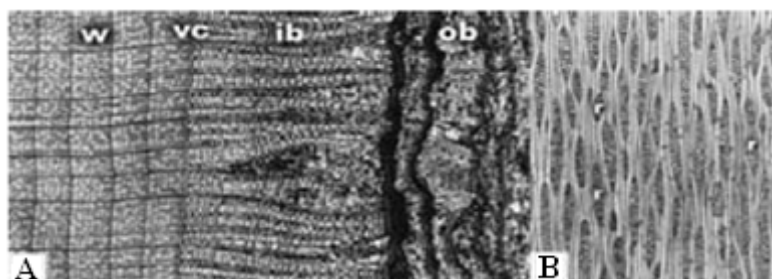


Figura 2.7 – Estrutura microscópica do câmbio vascular. (A) secção transversal ilustrando a madeira (w), cambium vascular (vc), parte interior (ib), parte exterior (ob), na madeira *Tilia americana*. (B) secção

tangencial pelo câmbio vascular de *Malus sylvestris*, (r) traqueídeos iniciais. Escala não disponível (Rowell, 2005).

2.3 Estrutura microscópica da madeira

Ao nível microscópico, o lenho das árvores Resinosas é constituído por dois tipos de elementos: os traqueídeos e os raios lenhosos. Os traqueídeos são células de paredes espessas, lenhificadas, muito alongadas (quarenta e cinco vezes mais compridas do que largas), de configuração fusiforme, alinhadas lado a lado longitudinalmente, e desempenham simultaneamente funções de suporte e de transporte (Figuras 2.2 e 2.8). Estas células comunicam entre si através das pontuações areoladas que se situam em longas extensões de paredes celulares sobrepostas (*h* na Figuras 2.2 e 2.8). As células de parênquima agrupam-se em fiadas longitudinais muitas vezes dispostas irregularmente e em raios lenhosos dispostos transversalmente muito estreitos e baixos (*g* e *d* na Figura 2.2). A comunicação dos traqueídeos com os raios lenhosos é também assegurada por pontuações (Figuras 2.2 e 2.8). Durante o período de crescimento, os traqueídeos não se apresentam sempre com o mesmo aspecto. Os traqueídeos formados no início do ciclo vegetativo possuem paredes finas, muitas pontuações e um lúmen largo e asseguram a condução da seiva (Figura 2.8); por seu lado, os traqueídeos diferenciados no fim do ciclo têm paredes espessas, extremamente bicudas, poucas pontuações e um lúmen reduzido e asseguram as funções de suporte (figura 2.8). Assim, em geral, os anéis das Resinosas produzidos em cada ano distinguem-se facilmente num corte transversal do tronco (Figura 2.5) (Oliveira, 2004).

Os troncos das Resinosas podem apresentar ainda um outro tipo de tecido: os canais secretores ou de resina, responsáveis pela elaboração e transporte de um fluido conhecido genericamente por resina (Figuras 2.2 e 2.9). Encontram-se revestidos interiormente por células vivas muito activas na secreção desta substância. Os canais em si são apenas um espaço entre células, mas as células secretoras que os envolvem podem ser consideradas um parênquima resinífero (Oliveira, 2004).

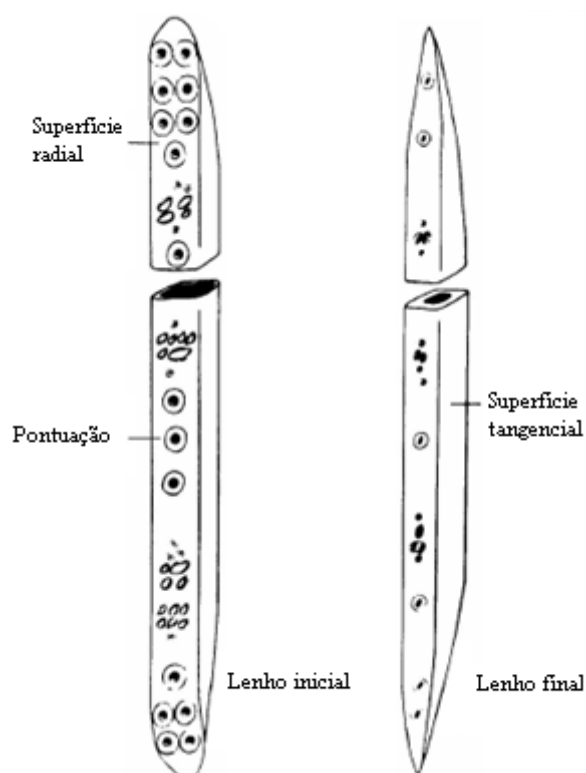


Figura 2.8 – Esquema longitudinal dos traqueídeos inerentes ao lenho (Lewin and Goldstein, 1991).

O número de anéis que se mantém activo varia de espécie para espécie, devido sobretudo às características anatómicas do próprio lenho. As Resinosas, em geral, têm elementos vasculares pouco eficientes no transporte, mas de grande resistência. Os traqueídeos são condutores de líquidos com uma secção demasiado reduzida para neles circularem grandes caudais, pelo que, é necessário um grande número de anéis em actividade para garantir o abastecimento da copa. Assim, as Resinosas, têm em geral maior abundância de borne do que as Folhosas (Figura 2.5) (Oliveira, 2004).

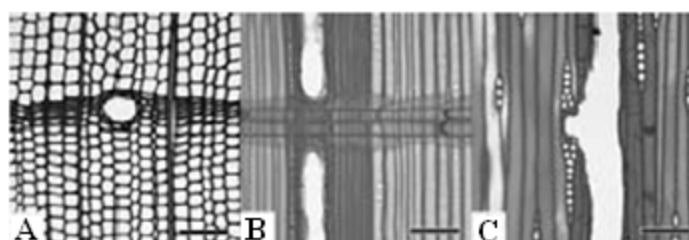


Figura 2.9 - Estrutura microscópica dos canais de resina em *Pseudotsuga menziesii*. (A) Secção transversal ilustra axialmente um canal de resina. (B) Secção radial ilustra um canal de resina axial embutido no lenho final. Neste, cruza um raio lenhoso (*ray*) que se estende entre o lenho inicial e o outro lado do lenho final. (C) Secção tangencial ilustra a anastomose entre o canal de resina axial e radial. O raio fusiforme que carrega o canal de resina está em contacto com o canal de resina axial (Escala = 100 μ m) (Rowell, 2005).

Para a água poder fluir entre os traqueídeos, ela deve circular pelas pontuações areoladas que são concentradas nos fins longos, afilados das células. O escoamento de água deve assim tomar ligeiramente um caminho de ziguezague, circulando pois, de célula em célula pelas perfurações areoladas. Como as perfurações areoladas têm uma membrana (Figura 2.12), há uma resistência significativa ao escoamento. A resistência da membrana do buraco ligada com o diâmetro estreito da lumina faz com que os traqueídeos tenham canais de relativa ineficiência, em comparação com as células de condução de madeiras Folhosas. Os tratamentos detalhados da estrutura de madeira em relação às suas funções condutivas podem ser encontrados na literatura (Zimmermann, 1983; Kozlowski and Pallardy, 1997).

2.4 Estrutura da parede celular

A unidade básica da estrutura da parede celular cuja observação é possível com recurso a microscopia electrónica é a microfibrila, que por sua vez é um agrupamento de cadeias de moléculas de celulose $(C_6H_{12}O_5)_n$, sendo n (grau de polimerização), igual a 5000-10000. As microfibrilas apresentam secção rectangular com 100 a 300 Å de largura, 50 a 100 Å de espessura e vários micrómetros de comprimento. A posterior agregação dos feixes microfibrilares em camadas de 300 a 600 Å revela-se sob a forma de lamelas ou camadas que constituem a parede celular (Haygreen and Bowyer, 1982).

No esquema da Figura 2.10 está representada a estrutura da parede de uma célula fibrosa (traqueído), a qual é composta pelas seguintes camadas: a *parede primária* (P), mais fina e a *parede secundária* (S) mais espessa e dividida em 3 sub-camadas (S_1 , S_2 e S_3). A ligação entre duas células contíguas é assegurada pela *lamela média* (LM), formando agregados de células.

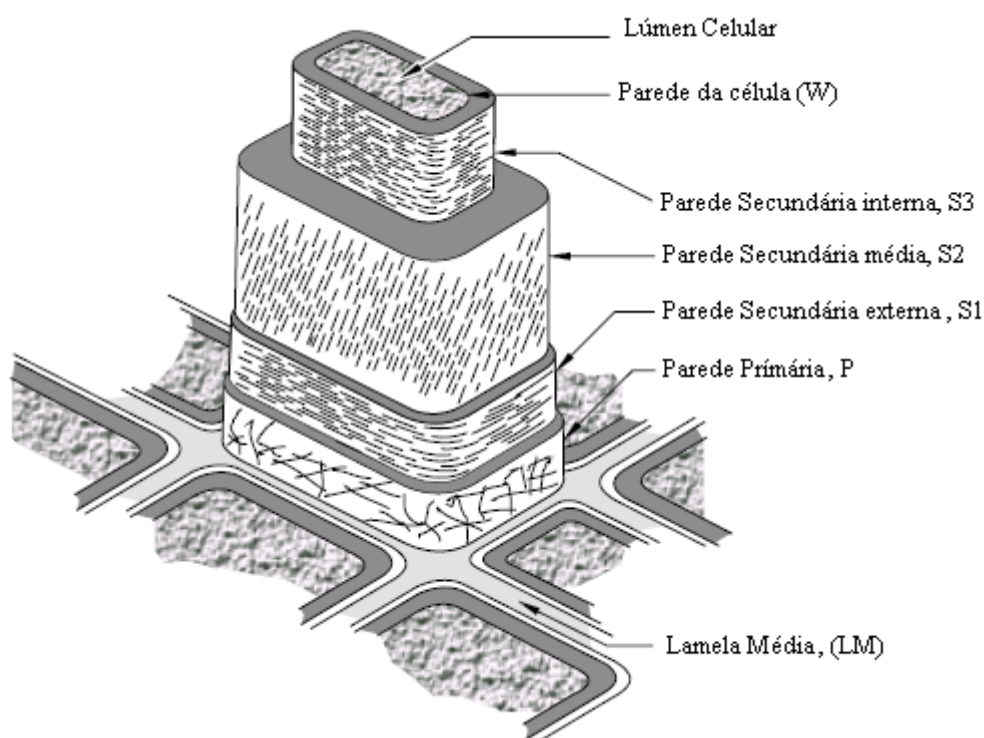


Figura 2.10 – Modelo esquemático da parede celular da madeira. Consiste numa parede primária (P) e três paredes secundárias (S1, S2 e S3). Dentro da parede S3, esta é revestida com a parede celular (W) para algumas espécies. As fibras estão unidas juntamente com a lamela média (LM). A parede secundária S2 é caracteriza-se como sendo maior parte da estrutura celular (aproximadamente 85% da espessura da parede celular em *Picea abies* (Wadsø, 1993).

A lamela média é quimicamente caracterizada pela predominância de lenhina que é uma substância de natureza fenólica, que está também presente nas paredes primárias dos elementos fibrosos adjacentes, funcionando como cimento aglutinador das células.

A parede primária encontra-se altamente lenhificada e contém uma quantidade considerável de hemiceluloses. Segundo Kollman e Côté (1984), nesta camada o teor de celulose é relativamente baixo não excedendo os 20 a 25% e as microfibrilas não têm nenhuma orientação preferencial.

Na parede secundária, as substâncias predominantes são a celulose, as hemiceluloses e a lenhina, encontrando-se esta dispersa ou associada às hemiceluloses e à celulose. As camadas S1 e S3 são constituídas por espirais de microfibrilas cuja inclinação em relação ao eixo do traqueído varia entre 50° a 90°. A camada S2, pelo contrário, apresenta as microfibrilas orientadas quase paralelamente ao mesmo eixo (10° a 30°). Adicionalmente, esta última camada é a mais espessa das três camadas que compõem a parede secundária (3

a 15 vezes mais espessa que as *S1* e *S3* juntas), resultando numa maior influência no comportamento mecânico da madeira. A camada *S2* é também aquela que apresenta maior amplitude de variação de espessura e conseqüentemente maior peso na variabilidade do comportamento do material. Nas células do lenho adulto, o ângulo das microfibrilas da camada *S2* é aproximadamente de 7 graus ou inferior, enquanto que no lenho juvenil (como no lenho de compressão), este ângulo pode ascender aos 45° (Jozsa e Middleton, 1994).

Cada camada no traqueído contém diferentes percentagens de lenhina, hemicelulose e celulose. A Figura 2.11 é um diagrama que ilustra aproximadamente as percentagens nas camadas da parede celular. A maior percentagem de lenhina está localizada na lamela média (*LM*). A camada *S2* contém a maior parte de lenhina por peso, dado esta ser o maior componente do traqueído.

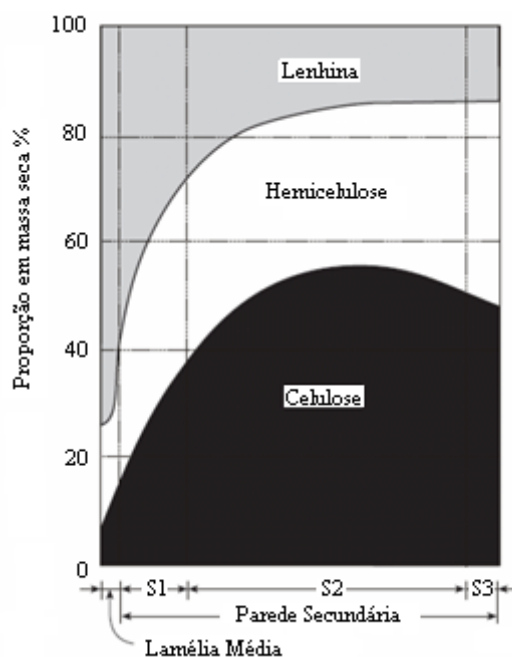


Figura 2.11 – Percentagem das substâncias na parede celular (Hale, 1969).

As pontuações são importantíssimas na movimentação da água na madeira. Juntamente com os lúmens celulares constituem a principal rede de condução que fica completa ao juntar os canais intercelulares, as perfurações intervasculares e os capilares submicroscópicos que existem na parede celular. A água, na forma líquida ou de vapor, desloca-se com relativa facilidade nos lúmens celulares mas, para passar de uma célula

para a adjacente encontra uma dificuldade muito grande em atravessar a parede onde a secção dos capilares (capilares submicroscópicos da parede celular), é muito reduzida. Constituindo, as pontuações, zonas de menor resistência à passagem, é por elas que circula grande parte do volume de água movimentado entre células. A circulação da água na madeira depende, pois, em elevado grau, do tipo, distribuição e área das pontuações. As pontuações areoladas existem entre células prosenquimatosas (traqueídeos, fibrotraqueídeos e elementos vasculares), embora estas células possam apresentar pares de pontuações semi-areoladas ou mesmo simples com as células parenquimatosas vizinhas, como ilustrado Figura 2.12 (Melo, 2000).

No respeitante às pontuações simples, as areoladas, além das diferenças morfológicas, são normalmente maiores e apresentam em quase todas as resinosas um espessamento na parte central, designado por toro (Figura 2.12). O toro é constituído pelas duas paredes primárias e pela lamela média. A sua ligação à margem ou bordadura da pontuação é feita por uma rede microfibrilar celulósica (margo), cujas malhas estabelecem a comunicação entre os luméns celulares. A água pode circular com relativa facilidade através deste tipo de pontuação (as aberturas da malha ou rede microfibrilar celulósica têm uma largura média de 2500 Å e a molécula de água tem cerca de 3,2 Å de diâmetro). A permeabilidade da pontuação pode diminuir por aspiração do toro ou por depósito de substâncias extractáveis e incrustações de matérias afins da lenhina (Melo, 2000).

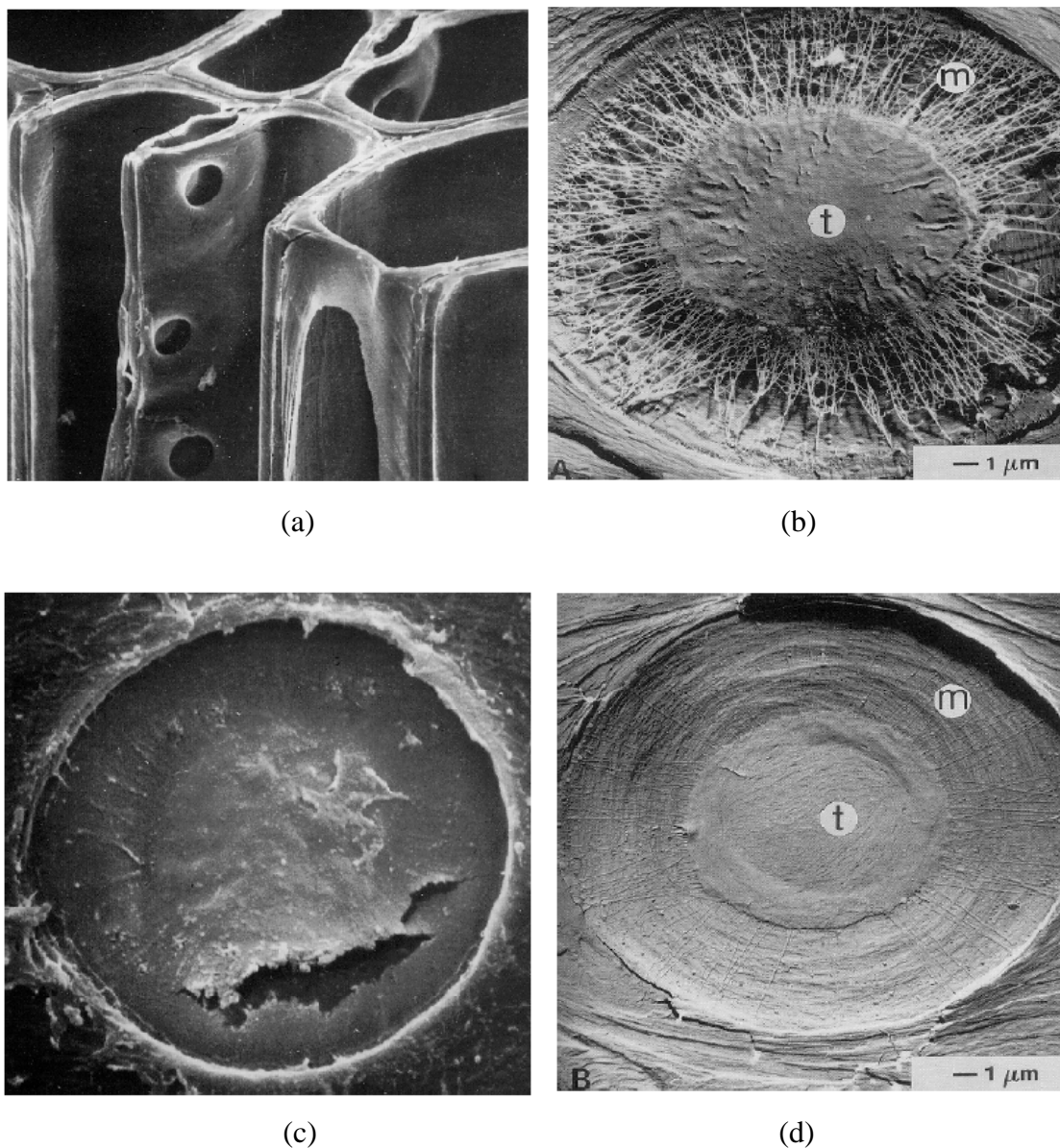


Figura 2.12 – Bordos das pontuações areoladas de *pinus radiata*; a) secção da pontuação areolada entre dois traqueídeos; b) traqueído do lenho inicial não aspirado mostrando o margo (m) e o toro (t) intacto; c) bordo da pontuação areolada do lenho final; d) pontuação areolada do lenho inicial aspirado (Butterfield and Meylan, 1972; Kininmonth and Whitehouse, 1991; Butterfield and Meylan, 1980).

As pontuações das paredes radiais são maiores e arredondadas nos traqueídeos do lenho inicial (Primavera). Os fibrotraqueídeos apresentam igualmente pontuações areoladas mas, normalmente, de menor dimensão que as dos traqueídeos. Os elementos vasculares são células com numerosas “aberturas” nas suas paredes, quer com perfurações nas extremidades, e com abundantes pontuações nas paredes laterais. As pontuações com as fibras agrupam-se, normalmente, em fiadas longitudinais unisseriadas. As pontuações simples aparecem entre células parenquimatosas, dos raios e do parênquima e nas fibras.

Nestas fibras, as pontuações simples constituem o principal aspecto de distinção em relação aos fibrotraqueídeos (Melo, 2000).

2.5 Variabilidade da madeira

Genericamente, podem distinguir-se três fontes de variabilidade: a que ocorre entre espécies; a que existe para uma espécie, entre árvores; a que se verifica no interior de cada árvore. A variabilidade natural entre espécies distintas é atribuída às diferenças genéticas entre estas; enquanto que, para uma espécie a variabilidade entre árvores pode ser quer genética quer devida a factores do meio ambiente, tais como o clima (temperatura e humidade relativa), solo, fornecimento de água, disponibilidade de nutrientes, etc. Por sua vez, a variabilidade que se verifica no interior de uma árvore é apenas devida aos factores do meio ambiente que condicionam o seu crescimento específico. Ao longo do tronco duma árvore, o comprimento das células, a espessura das paredes celulares (e consequentemente a massa volúmica), o ângulo que as células formam com o eixo vertical do tronco (fio espiral), e o ângulo das microfibrilas da camada S2 das paredes celulares, variam radialmente, desde a medula até à casca e em altura, do plano basal até à copa da árvore. Esta variabilidade na estrutura interna duma árvore, traduz-se também na distinção entre o lenho juvenil, formado nos primeiros anos de vida da árvore e o lenho adulto, formado no estado adulto do seu crescimento (parte exterior do tronco). Genericamente, pode afirmar-se que o lenho juvenil das resinosas é caracterizado por apresentar traqueídeos curtos, com diâmetros reduzidos e paredes finas, densidades médias relativamente baixas, uma reduzida percentagem de lenho final e uma pequena diferenciação dos lenhos formados no início e fim da estação. Além disso, apresenta frequentemente fio inclinado, elevadas retracções longitudinais e reduzida resistência mecânica. Contudo, apesar do lenho adulto ser dotado de características diversas das do lenho juvenil, não existe uma linha de separação bem definida entre estes dois tipos de lenho, mas sim um *continuum*, já que as alterações dum para outro são normalmente feitas gradualmente e durante vários anos, havendo uma zona de transição que possui características intermédias.

Assim, como resultado da origem natural da madeira as suas propriedades físicas e mecânicas têm um grau de variabilidade elevado, tipicamente superior a outros materiais estruturais, existindo entre estas uma forte relação (Xavier, 2003).

Capítulo 3

Características e Propriedades da Madeira

Conteúdo do Capítulo

A ciência que estuda os materiais identifica informação específica, em termos de características e propriedades para cada material e portanto, com a madeira não é diferente. Este Capítulo tem como principal objectivo a descrição das principais características e propriedades físicas e químicas da madeira como material.

3.1 Características físicas

Quase todas as características físicas da madeira são influenciadas pelo teor de humidade existente. Esta humidade encontra-se em duas formas básicas, água de capilaridade (ou água livre), localizada no lúmen das células, em estado líquido, água de adesão (ou higroscópica), localizada no interior das paredes celulares, em estado de vapor.

Teoricamente, a água livre pode ser facilmente retirada, passando de uma célula para outra, até atingir a superfície externa da madeira. Quanto à água de adesão, mantém-se unida às microfibrilas das paredes das células em estado de vapor. A remoção deste tipo de

água é mais difícil e o processo geralmente é mais lento, sendo necessário a utilização de mais energia neste processo.

Quando toda a água livre ou de capilaridade for retirada da madeira remanescendo apenas a água de adesão, diz-se que a madeira atingiu o teor de humidade de saturação do ar, ou atingiu o ponto de saturação das fibras (*FSP*). Tiemann (1906), definiu *FSP* como sendo o ponto em que o conteúdo de humidade nas paredes das células da madeira está saturado enquanto os luméns estão vazios ou seja, sem água de capilaridade, este é um ponto perfeito e como tal não pode ser calculado com precisão. A atribuição do valor padrão do ponto de saturação das fibras (*FSP*), para as madeiras que crescem num clima temperado é de aproximadamente 30% (Siau, 1995).

Contudo, o conhecimento deste ponto é importante pois é a partir deste que ocorrem as alterações na estrutura da madeira, isto é, contração ou expansão (inchamento), que posteriormente podem causar defeitos como empenos e fissuras e conseqüentemente, alterações na resistência mecânica e física da madeira. Em contrapartida, quando uma peça de madeira é previamente seca e exposta ao meio ambiente, esta tende a absorver a água que está dispersa no ar em forma de vapor. Neste sentido, a água absorvida irá corresponder a água higroscópica ou de adesão. Quando a madeira absorve água do meio ambiente e atinge um teor de humidade final, valor este que é função da espécie e das condições do meio ambiente, diz-se que a madeira atingiu o teor de humidade de equilíbrio com o ambiente (*TUE*). Se a madeira ganha humidade, as paredes das células vão inchar até as paredes das células ficarem saturadas, esse ponto como já fora descrito é o chamado ponto de saturação das fibras (*FSP*). Em contraste, a perda de humidade (abaixo do *FSP*), devido à difusão e evaporação, resulta na retracção da madeira (Rowell, 1984).

Obviamente tal estado não se verifica uniformemente em toda a massa da peça de madeira, mais rapidamente na película superficial em contacto com o ar envolvente, prosseguindo gradualmente, mas não uniformemente, da periferia para o centro. Desta forma, desenvolvem-se estados de tensão interna que podem conduzir a fenómenos de rotura entre porções da peça e segundo superfícies de fissuração.

Inversamente à secagem, pode ocorrer o fenómeno do entumescimento, isso é, um ganho de teor de humidade, cujas repercussões ou conseqüências são idênticas (mas não iguais) às da secagem, embora de sinal contrário. A madeira está permanentemente

disposta a ceder e a absorver água, isto é, a fenómenos de adsorção e de dessorção, mas as isotérmicas de sorção não são exactamente sobreponíveis, isto é, há uma histerese, como de resto acontece com muitos outros fenómenos físico-químicos (Figura 3.1).

O teor de humidade exprime-se em percentagem do peso da substância lenhosa que o provete ou amostra de madeira efectivamente contém. No Capítulo 4 apresentar-se-á a metodologia de avaliação.

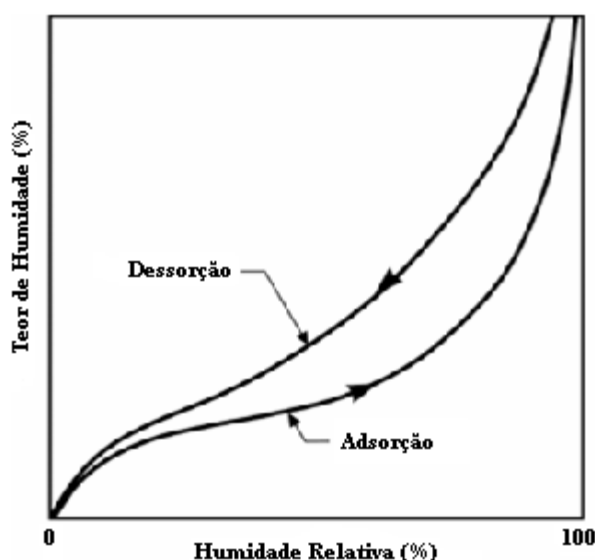


Figura 3.1 – Isotérmica de adsorção e dessorção com o fenómeno *histerese* (Hansen, 1986).

Embora o teor de humidade contido na madeira seja um factor de extrema importância, a temperatura também é uma condição extremamente relevante. Estes dois factores revelam-se cruciais nas alterações de carácter físico e mecânico na madeira, nomeadamente a contracção e inchamento, peso, volume, resistência mecânica.

3.1.1 Higroscopicidade

É dito que a madeira é caracteristicamente higroscópica, isto é, tende permanentemente a equilibrar o seu teor de humidade com o espaço higrométrico e com temperatura do ambiente em que se encontra. Na verdade, a água é a componente indissociável da substância lenhosa e por isso um dos estados em que ela encontra é a água de constituição, no entanto, a relação íntima entre as duas substâncias verifica-se noutras

formas: a água de adesão (ou higroscópica), e água livre, que mais à frente se vai referenciar com mais detalhe. As ligações da água com a substância lenhosa das paredes celulares são extremamente débeis, por isso, a água liberta-se da madeira com muita facilidade.

Em termos de tecnologia e utilização do material apenas a água de adesão e livre são importantes a ter em consideração sendo, sobretudo, importante a presença da água de adesão, pois é nesta fase em que ocorrem fenómenos de variação física e mecânica (Figura 3.2).

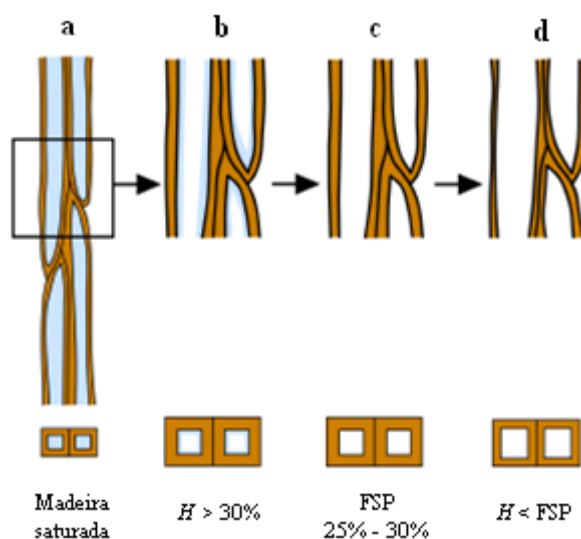


Figura 3.2 – Fases de secagem da madeira (LENEC, 1997).

A natureza química da substância da madeira, particularmente as dos polissacarídeos, proporciona também a higroscopicidade à parede da célula. Os grupos hidroxilos das moléculas de celulose e hemicelulose são responsáveis pela grande afinidade à água e possuem forte tendência em formar ligações de hidrogénio. (Rowell, 1984). A lenhina, por outro lado, possui comparativamente poucos hidróxilos e como resultado é muito menos higroscópica. De facto, para todos os efeitos, a lenhina é considerada essencialmente hidrofóbica e como tal dificulta a absorção de humidade. Como a consequência da hidrofobia, o tecido lenhoso vai procurar estabilizar-se através de grandes ganhos ou perdas de humidade, até encontrar o teor de humidade de equilíbrio (*TUE*).

Portanto, o que em termos práticos efectivamente importa identificar como a principal propriedade da madeira é a sua higroscopicidade e as consequências que a variação do teor de humidade do material tem nas outras propriedade e comportamentos, nomeadamente à difusão de vapor de água.

3.1.2 Retracção e Inchamento

A madeira é dimensionalmente estável quando o seu conteúdo de humidade é maior que o do ponto de saturação de fibras (*FSP*). Altera a sua dimensão quando ganha ou perde a humidade abaixo do *FSP*. Retrai quando perde humidade nas paredes de células e aumenta de dimensão quando ganha humidade nas paredes de células. Esta instabilidade constitui um dos mais graves defeitos da madeira, diz-se que a madeira reage inchando ao absorver humidade, retraindo-se ao perdê-la. A madeira, predominantemente anisotrópica e heterogénea, não apresenta os mesmos valores de contracção segundo as três direcções principais (Figura 3.3), ou seja, longitudinal (*L*), tangencial (*T*) e radial (*R*).

Quando a humidade contida, evapora da parede das células da madeira, a matriz encolhe-se e as microfibrilas ficam mais perto umas das outras. Na direcção das microfibrilas (i.e. direcção longitudinal), há uma modificação muito pequena na dimensão. Isto é devido ao facto de as paredes das células serem mais distanciadas na direcção longitudinal (aproximadamente 100 paredes de células na direcção transversal para uma parede na longitudinal da mesma distância) (Time, 1998).

Como já foi referido, a retracção da madeira normalmente inicia-se quando esta atinge o *FSP*, continuando de maneira regular e linear até a madeira estar completamente seca. Contudo, na secagem normal de madeira em pequena ou em grande escala, a superfície da madeira seca em primeiro lugar. Quando a superfície atinge valores inferiores ao *FSP*, a retracção inicia e portanto a madeira começa a retrair dimensionalmente. No entanto, o interior da madeira ainda pode conter bastante água e não se retrair. Como resultado, significa que a madeira ao ser seca, pode iniciar o processo de retracção antes da humidade média da amostra inteira ser inferior ao ponto de saturação das fibras (*FSP*). A Figura 3.4 ilustra um exemplo da relação entre retracção – teor de humidade, para uma madeira resinosa. A forma exacta da curva depende de várias variáveis, principalmente da forma da amostra, espécie de madeira e condições secagem usadas. (U.S.D.A., 1999)

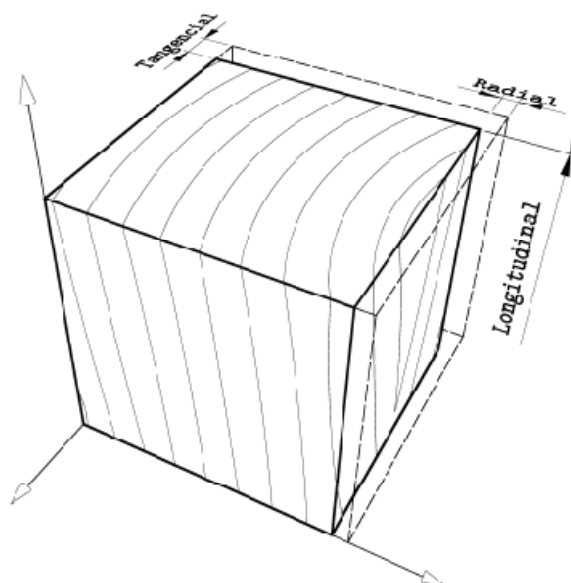


Figura 3.3 – Variação dimensional nas três direcções (Hiziroglu, OSU).

Quando a madeira atinge um teor de humidade de 15%, aproximadamente 50% da retracção possível total ocorreu, quando atinge a 8%, quase 75% do encolhimento possível ocorreu. A Figura 3.4 ilustra como a madeira *Douglas-fir*, uma resinosa, retrai com a perda da humidade. A relação entre o teor de humidade e retracção é geralmente aproximada por uma relação linear.

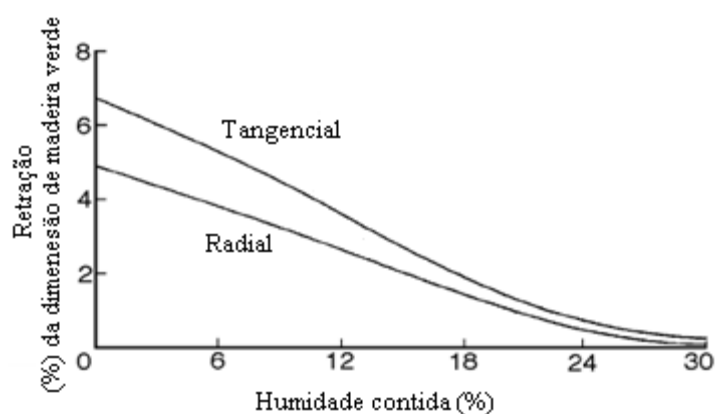


Figura 3.4 – Curva típica de humidade contida – retracção (U.S.D.A., 1999).

A diferença entre a retracção – inchamento tangencial (*T*) e radial (*R*) da madeira não está totalmente explicado (Mårtensson, 1992). Várias explicações razoáveis para a

retracção – inchamento anisotrópico entre as direcções tangencial (T) e radial (R) foram propostas, mas nenhuma até a actualidade foi comprovada. A explicação mais comum é a ocorrência de raios de madeira na direcção radial (R). Supõe-se que a existência de raios de madeira tenha um efeito de impedimento no encolhimento na direcção radial. Este efeito é mais pronunciado nas madeiras das folhosas do que nas madeiras das resinosas. Outra teoria é baseada na diferença da retracção entre o lenho inicial e final. Uma terceira teoria sugere uma orientação mais pobre das microfibrilas nas paredes radiais (R), quando comparada com a das paredes tangenciais. Por último, foi mostrado que o grau de lenhificação é mais alto nas paredes radiais (R) do que nas paredes tangenciais (T). Nenhuma das teorias acima mencionadas foi alguma vez comprovada, embora todas elas provavelmente sejam relevantes no comportamento (Time, 1998).

Para calcular a retracção e o inchamento na madeira, duas suposições terão que ser efectuadas. Na primeira, assume-se que o tamanho dos lúmenes permanece constante. Beiser (1933), mediu a alteração nas áreas dos lúmenes na madeira *Picea sp.* e *Butela sp.* dentro da variedade higroscópica. Contudo, esta suposição não é aplicável para todas as espécies de madeira porque, em alguns casos, os lúmenes aumentam de tamanho e em outros diminuem com o aumento da humidade da água de adesão (higroscópica) (Siau, 1995).

A segunda suposição baseia-se na anisotropia da madeira relativamente ao encolhimento e ao inchamento. A retracção normal da madeira na direcção longitudinal (L) esta compreendida entre 0,1% a 0,3%, embora a retracção seja maior no lenho inicial do que no lenho final. Devido a esta pequena magnitude na madeira, a componente longitudinal não é considerada. A retracção na direcção tangencial (T) é normalmente duas vezes maior que na direcção radial (R) para a maior parte das espécies de madeiras. A retracção e inchamento volumétrico são sensivelmente iguais à soma das retracções segundo a direcção longitudinal, radial e tangencial (Siau, 1995).

3.2 Composição química

Em termos químicos, as diferentes espécies de madeira têm essencialmente a mesma composição. De facto, em todas elas, os principais constituintes da parede celular são a celulose, as hemiceluloses e a lenhina (Lewin and Goldstein, 1991). A celulose é um

polissacarídeo linear, de elevado peso molecular, que na parede celular se encontra agrupado em feixes cristalinos (microfibrilas), intercalados por feixes amorfos. As hemiceluloses são polímeros lineares amorfos, mais ou menos ramificados, enquanto que a lenhina é um polímero tridimensional complexo, de elevado peso molecular, mas também amorfo. As hemiceluloses e a lenhina funcionam como matriz onde estão embebidas as microfibrilas.

A forma como estes compostos estão interligados entre si dão à madeira as características dum compósito natural, em que o papel da fibra é atribuído às microfibrilas de celulose, enquanto que a lenhina e a hemicelulose são consideradas como componentes separados da matriz (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Composição química da madeira (Dinwoodie, 2000).

Componente	Massa (%)	Estado polimérico
celulose	42 ± 2	cristalino/amorfo
hemicelulose	27 ± 2	semi-cristalino
lenhina	28 ± 2	amorfo
extractáveis	3 ± 2	

Segundo a sua natureza, a madeira é constituída por cerca de 60% de celulose que é constituída por hidratos de carbono (carbono, oxigénio e hidrogénio), e que constitui a maior parte das paredes células, por cerca de 28% de lenhina (substância dura, impermeável pouco elástica, de resistência mecânica apreciável e insensível à humidade e temperaturas normais), sendo os outros constituintes óleos, resinas, açúcares, amidos, taninos, substâncias nitrogenadas, sais inorgânicos e ácidos orgânicos (Sampaio, 1995/76; Uriartt, 1992).

3.2.1 Celulose

A celulose é o produto químico orgânico mais abundante na terra, que ocorre em plantas na forma fibrilar. É também o principal constituinte da parede celular e é o principal responsável pela resistência mecânica e higroscopicidade da madeira. É um polímero que contém moléculas de diferentes comprimentos, composto por segmentos

repetidos de celobiose, cada um dos quais se compõe de duas unidades de glicose como representado na Figura 3.5.

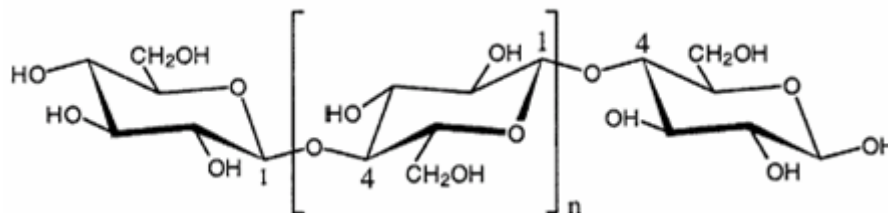


Figura 3.5 – Estrutura química da celulose – A repetição da unidade na celulose é 1,4 β -ligado com polissacarídeo de glicose triangular (Alén, 2000).

Cada segmento de celobiose tem o comprimento de 1.03 nm e cada unidade de célula cristalina tem as dimensões de $0,84 \times 0,79 \text{ nm}$. A celulose da madeira na parede secundária tem um grau de polimerização médio de 10.000 correspondente ao comprimento aproximado de $5 \mu\text{m}$ (Gloring and Timell, 1962). Cada unidade de celulose contém três grupos de hidróxilos que podem formar hidrogénio em combinação com a água nas regiões amorfas, forçando as cadeias adjacentes a separarem-se provocando inchamento da parede celular (Siau, 1995).

3.2.2 Hemicelulose

A hemicelulose é um polissacarídeo similar ao composto da celulose mas com massa molar inferior a esta. São igualmente hidratos de carbono existentes nos vegetais e distinguem-se por uma maior velocidade de hidrólise sob acção dos ácidos diluídos e pela natureza dos produtos obtidos: hexoses, pentoses e ácidos urónicos. A hemicelulose constitui cerca de 20 a 25 por cento de massa da parede celular e melhoram as propriedades estruturais da madeira. O grau de polimerização das hemiceluloses é bastante menor que o da celulose nativa, aproximadamente 100 a 200 e podem ser lineares ou bifurcados. A determinação das massas moleculares resulta bastante mais difícil que para a celulose (Melo, 2000).

3.2.3 Lenhina e outros materiais

A lenhina é um material tridimensional muito complexo quer nas madeiras resinosas quer nas folhosas (Sharkanen and Ludwig 1971, Adler 1977). A lenhina é um polímero amorfo com unidade básica estrutural de fenilpropano. A lenhina é um polímero termoplástico e quando é aquecido acima da sua temperatura de transição vítrea, fica semelhante à borracha. A lenhina é insolúvel e não pode ser retirada da madeira sem degradação severa devido ao seu elevado peso molecular e estrutura tridimensional. A lenhina não é higroscópica por natureza e fornece uma barreira à penetração de água. Localizada na parede celular, a lenhina actua como um agente unificador. Reduz também as alterações dimensionais que ocorrem com as variações de humidade na parede celular.

3.2.4 Substâncias extractáveis

O tratamento dos vegetais e das pastas celulósicas por solventes orgânicos, pelo *soxhlett* (equipamento de laboratório para extracção de elementos de um sólido), permite extrair resinas, ceras, substâncias gordas, corantes, etc. Estas substâncias estão sempre presentes em pequenas quantidades relativamente aos polissacarídeos e à lenhina (Tabela 3.1). As resinosas segregam naturalmente e mais abundantemente quando se pratica a incisão dos tecidos, produtos designados de óleo-resinas ou terebintinas. A madeira de pinheiro bravo (*Pinus pinaster*) é particularmente rica em resina que justifica o seu aproveitamento para a produção de gema (Melo, 2000).

As substâncias extractáveis na madeira inclui um largo número de componentes orgânicos que podem ser solúveis em álcool e benzina, água quente ou outros solventes orgânicos. Os extractivos incluem terpenes, polifenoles, resinas de madeira, taninos, açúcares e ácidos gordos. As substâncias extractáveis usualmente, encontram-se no cerne (*heartwood*) onde desempenham um papel considerável na contribuição de algumas propriedades tais como a cor da madeira, o odor, menor resistência, densidade e diminuição da permeabilidade e da higroscopicidade da madeira. A madeira pode ainda conter resíduos de componentes inorgânicos de cálcio, potássio e magnésio (Siau, 1995).

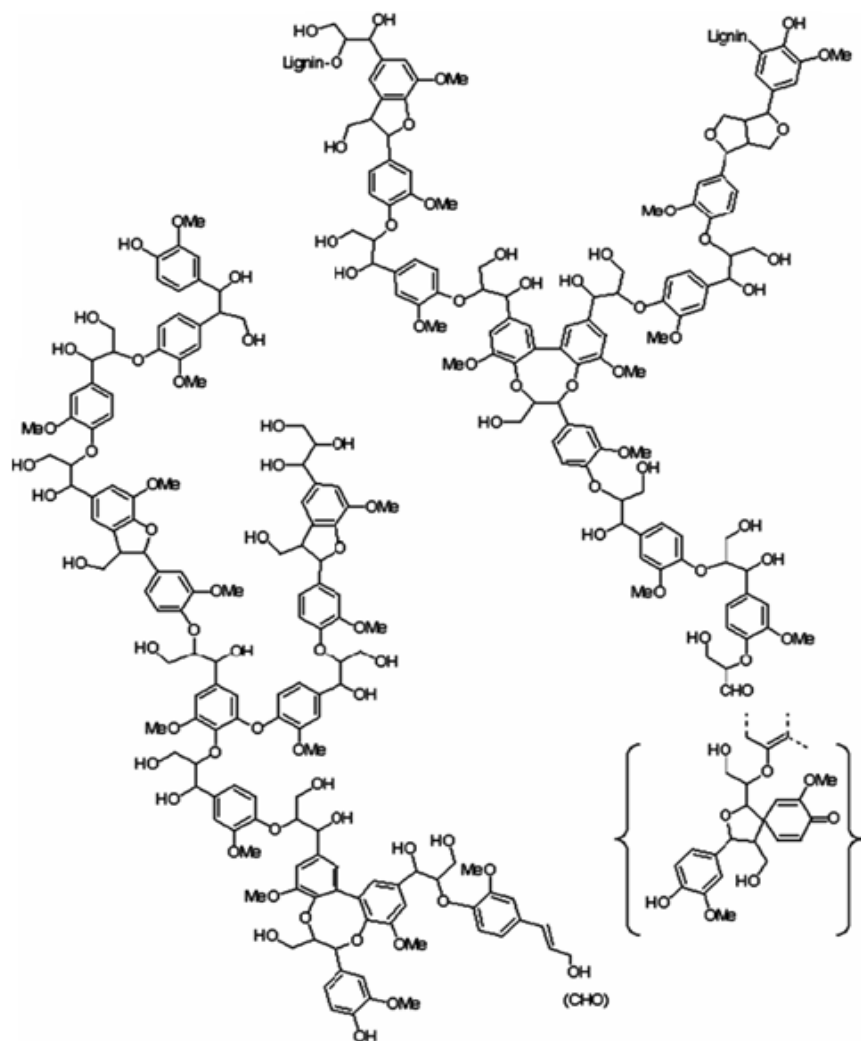


Figura 3.6 – Estrutura química da lenhina de uma resinosa (Karhunen *et al.* 1995; Adler, 1977).

Capítulo 4

Mecanismos de Transporte de Humidade na Madeira

Conteúdo do Capítulo

A higroscopicidade é uma das principais características da madeira, como tal é necessário descrever os mecanismos e formas na qual a humidade se movimenta. Além do mais a humidade na madeira encontra-se localizada em diversas formas. É neste contexto que este Capítulo se insere, na descrição detalhada das diversas formas e dos mecanismos de transporte de humidade na madeira.

4.1 Introdução

Toda a madeira perde ou ganha humidade numa tentativa de conseguir um estado de equilíbrio com as condições do ar circundante. Isto é, o estado do equilíbrio depende da humidade relativa e temperatura do ar ambiente. Por este motivo, é importante o conhecimento de relações de humidade na madeira de modo que seja útil na compreensão sobre o que acontece à madeira durante a secagem, o armazenamento, a fabricação e uso por exemplo. A água pode atingir teores muito elevados na madeira proveniente de árvores recém-abatidas. São frequentes nas resinosas valores superiores a 105% de humidade, podendo mesmo atingir níveis acima dos 300% (Melo, 2000).

A água na madeira encontra-se diversamente localizada na respectiva estrutura e é possível subdividi-la em cinco fracções:

- Água livre (ou capilaridade);
- Água de adesão (ou higroscópica);
- Água de constituição;
- Água de adsorção superficial;
- Água de condensação capilar.

4.2 Água livre

Quando as paredes das células estão completamente saturadas de água de adesão, mas a água ainda não chegou aos vazios celulares (lúmens), diz-se que a madeira atingiu o ponto de saturação das fibras (*PSF*). Para a maioria das espécies o *PSF* situa-se entre os 25 e 30%.

Depois de saturar completamente as paredes das células, a água começa a encher os vazios capilares (lúmens), é esta a água livre. Nem a presença nem a remoção da água livre causam qualquer alteração dimensional do material. Nesta situação, a humidade da madeira é superior ao ponto de saturação das fibras (*PSF*). Na secagem de madeiras a remoção da água livre, até ao *PSF*, não tem interferência nas dimensões das peças a secar, nem nas suas propriedades (Melo, 2000).

Um aspecto importante a referir, é que a madeira quando atinge teores de humidade inferiores a 20%, pode considerar-se ao abrigo do ataque dos agentes de destruição, sendo este o teor mínimo necessário como ambiente favorável à proliferação de fungos e bactérias.

4.3 Água de adesão

A água de adesão (ou higroscópica), como já referido, está impregnada ou embebida nas paredes celulares, isto é, representa a água contida na parede celular depois de retirada toda a água livre. A água de adesão provoca uma considerável expansão das paredes celulares, levando a uma alteração notável de volume da peça de madeira com a variação

desta. No entanto, a remoção desta água é já acompanhada de redução das dimensões das peças em consequência das retrações do material.

Todo o comportamento físico e mecânico do material fica alterado com a presença ou com a variação da água de adesão. De facto, por exemplo, para a resistência à compressão, pode verificar-se uma variação de 4 a 5% e para a resistência à flexão de 2 a 4% quando a humidade varia de 1% (água de adesão).

A distinção entre as fracções de água livre e de água de adesão é muito importante. Estas são completamente distintas, no que diz respeito à sua circulação na madeira, às suas relações com o lenho e às consequências qualitativas para o material lenhoso.

Na água de adesão podemos distinguir várias fracções de humidade e que são expostas de seguida

4.3.1 Água de constituição

A água de constituição (ou água de sorção química), encontra-se em combinação química com os principais constituintes do material lenhoso, não é eliminada na secagem. A água de constituição corresponde a teores de humidade variáveis entre os 0% e os 7%. É a fracção de água da parede celular devida a ligações químicas particularmente fortes, por pontes de hidrogénio, que estabelecem entre as valências não saturadas (OH^-) das cadeias celulósicas e as moléculas de água cuja polaridade facilita a ligação. A ligação por sorção química termina quando estiverem saturados todos os hidroxilos. Quanto à madeira que só contém água de constituição, diz-se anidra (Melo, 2000).

4.3.2 Água de adsorção superficial

A água de adsorção superficial corresponde a teores de humidade variáveis entre os 7% e os 15%, é a fracção de água da parede celular resultante da adsorção superficial das moléculas de água na enorme superfície interna da parede celular (na ordem dos $0,2$ a $2,8 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$). A ligação que se estabelece é feita por forças de atracção molecular do tipo *Van der Waals*, sempre menos fortes que as inerentes às pontes de hidrogénio da

fracção de água anterior. Esta quantidade de água varia directamente com a superfície interna da madeira (Melo, 2000).

4.3.3 Água de condensação capilar

Correspondente a teores de humidade variáveis entre os 15% e os 25% a 30%, é a fracção de água da parede celular que é fixada por condensação capilar devido a forças de tensão capilar. Esta fixação depende da tensão do vapor da atmosfera ou ambiente que envolve a parede celular, isto é, encontra-se na dependência das características do ar exterior à madeira, particularmente do respectivo estado higrométrico e do existente nos próprios lúmens celulares. Assim a pressão capilar pode atingir valores suficientemente elevados para provocar a condensação de vapor nos tubos capilares.

Na descrição da água de adesão podemos considerar um progressivo aumento da humidade, desde a situação anidra até ponto de saturação das fibras (*PSF*). Numa operação de secagem a ordem de escoamento das diferentes fracções é a inversa. As paredes que inicialmente estão saturadas de água vão sofrendo um processo ao longo do qual os diâmetros dos microcapilares vão-se reduzindo até desaparecerem, podendo mesmo perder a capacidade de reabrir porque a aproximação das cadeias celulósicas pode ocasionar o estabelecimento, entre elas, de ligações tão fortes que uma posterior humedificação não possa vencer. Por este motivo, os capilares da parede celular são por vezes designados “capilares transitórios”. Este fenómeno pode ainda explicar a diferença entre as isotérmicas de adsorção e dessorção: *histeresis* (Figura 3.1 do capítulo anterior).

As forças que provocam a circulação de água na madeira, seja sob a forma líquida seja sob a forma de vapor, nos capilares nela existentes, isto é, nos macrocapilares (lúmens capilares), e nos microcapilares das paredes celulares (espaços interfibrilares), são susceptíveis de avaliação quantitativa através de formulação matemática. A circulação de fluidos na madeira e, portanto, a respectiva permeabilidade, obedece, de um modo geral, às leis de *Darcy* e *Poiseuille* (Melo, 2000).

Este trabalho apenas vai focar nas propriedades da difusão de vapor de água na madeira sujeita a diferentes valores de humidades relativas, bem como, a diferentes valores de temperatura.

4.4 Bases de determinação do teor de água.

A humidade da madeira é expressa em percentagem da respectiva massa anidra. A determinação do teor de humidade (em estado de vapor), na madeira é relativa e não fornece uma medida da quantidade absoluta de água a não ser que se tenha em conta a massa volúmica da madeira em questão.

O método universalmente aceite para a determinação do teor de água na madeira é de calcular, com base numa amostra representativa, a relação, expressa em percentagem, entre a massa de água contida na amostra e a massa depois de seca em estufa até esta ficar com massa constante. Este método de determinação – método das pesagens – é o mais rigoroso embora exija cuidados especiais tendo em vista uma selecção correcta da amostra que deve ser suficientemente representativa, nomeadamente, não conter defeitos e anomalias. Deve entender-se por defeitos da madeira toda qualquer irregularidade, descontinuidade ou anomalia estrutural, alteração química ou de coloração, modificação morfológica do fuste ou das peças, originada durante a vida da árvore, na exploração e transporte de madeira, na conversão primária, na secagem, na preparação e noutras operações tecnológicas, sempre que qualquer um destes aspectos comprometa o valor intrínseco da madeira (Melo, 2000).

O método das pesagens é o método que vai ser utilizado no âmbito deste trabalho e será aplicado na análise experimental, descrita no próximo Capítulo.

4.5 Mecanismos de transporte de humidade na madeira

4.5.1 Estado de energia de humidade na madeira

A energia cinética e potencial são duas formas principais da energia. A energia cinética é proporcional à velocidade ao quadrado. Uma vez que o movimento da água na madeira é bastante lento, o potencial cinético é geralmente desprezado (Siau, 1984). Por outro lado, a energia potencial, que é devida à posição ou condição interna, tem a importância primária na determinação do estado e movimento de água na madeira. A água move-se constantemente na direcção da redução de energia potencial.

A fracção da redução da energia potencial com a distância é a força móvel que causa o movimento de humidade. As forças implicadas no movimento de humidade na madeira incluem a força gravitacional, força capilar e força higroscópica (Hillel, 1971).

O potencial total de água na madeira pode ser definido como o montante do trabalho que deve ser realizado por unidade de água pura para transportar reversivelmente e isotérmicamente água de um poço numa elevação especificada à pressão atmosférica (Zimmerman, 1983; Kozlowski and Pallardy, 1997). O potencial total de água na madeira pode ser expresso como a soma de várias contribuições, Equação 4.1.

$$E = E_g + E_p + E_v + E_o \quad (4.1)$$

onde E representa o potencial total, E_g é o potencial gravitacional, E_p é o potencial de pressão, E_v é o potencial químico e E_o é o potencial osmótico.

O movimento de água no estado líquido dentro da madeira devido à gravidade é muitas vezes negligenciado, tipicamente quando as dimensões do poro são muito pequenas (Siau, 1984). O potencial químico que é devido à diferença de pressão do vapor parcial é significativo na difusão que ocorre na secagem convencional (Walker, 1993). O *Bulk Flow* (movimento conjunto de água e soluto devido a um gradiente de pressão), líquido ou em vapor devido à diferença de pressão total pode ser causado através da pressão total, retracção, temperaturas elevadas e capilaridade (Waananen and Okos, 1989). Estudos acerca do *Bulk Flow* podem ser encontrados mais detalhadamente em diversas fontes (Hillel, 1971; Salisbury and Ross, 1992; Zimmerman, 1983 e Kozlowski and Pallardy, 1997). A seguinte informação pode ser obtida através destes estudos.

Quando a madeira está completamente saturada (o máximo *MC* - *moisture content* teórico), a pressão hidrostática da água na madeira é igual à pressão atmosférica do meio envolvente. Na madeira não saturada, a água é forçada por acção capilar e por forças de absorção, e portanto o seu potencial de energia é geralmente negativo. Em condições normais, a madeira está geralmente não saturada e o potencial de água de madeira é negativo.

Um potencial de pressão negativo é muitas vezes denominado de potencial capilar e mais recentemente de *matric potential* (potencial mátrico), em ciências da madeira (Siau, 1984). Este potencial de água na madeira resulta das forças de capilaridade e de absorção devido à matriz da madeira. Estas forças atraem e retêm a água na madeira e diminuem a sua energia potencial. (Hillel, 1971).

4.5.2 Movimento de água livre (*Free Water Bulk flow*)

A humidade existe na madeira na forma de água livre (capilaridade), dentro da parede de célula e água de capilaridade na forma líquida e de vapor em forma de gás nos lúmens da madeira. O escoamento de água capilar refere-se ao caudal de líquido pelos lúmens interligados e por cima da superfície de um sólido devido à atracção molecular entre o líquido e o sólido (Haygreen and Bowyer, 1996).

Na madeira saturada, a madeira está em equilíbrio com a água livre (capilar), na mesma elevação. A pressão real é a atmosférica. A água na madeira não saturada é sujeita a uma pressão subatmosférica ou de sucção, que é equivalente a um potencial de pressão negativo. A perda de água pode ocorrer até ao aumento de sucção a um determinado valor crítico no qual o maior poro começa a esvaziar (Hillel, 1971). Como a sucção é aumentada, mais água é tirada da madeira. Os poros relativamente grandes que não podem conservar a água contra a sucção aplicada, vão esvaziar-se. Um aumento gradual da sucção resultará no esvaziamento de poros progressivamente mais pequenos. Para elevados valores de sucção, só os poros muito estreitos conservam a água. Quando a sucção é uniforme, não há nenhuma força de movimento (Hillel, 1971).

A compreensão do movimento de água livre (ou de capilaridade), na estrutura capilar da madeira necessita de conhecimentos no que diz respeito à pressão capilar. A pressão capilar e o potencial mátrico desempenham um papel central na descrição do escoamento de um líquido em meios de comunicação porosos (Eaton and Hale, 1993).

4.5.3 Movimento de vapor de água (*Water Vapor Bulk Flow*)

Em temperaturas aproximadas e superiores ao ponto de ebulição da água, rapidamente o vapor de água pode produzir gradientes de pressão significativos para além

dos gradientes de pressão parciais (Waananen and Okos, 1989). O vapor de água desloca-se de uma região de pressão elevada para uma região de baixa pressão através de uma diferença de pressão. Isto é semelhante ao movimento de água no estado líquido. A permeabilidade do gás é considerada no escoamento de vapor de água (*water vapor bulk flow*) (Tesoro *et al.* 1974; Bolton and Petty, 1978; Walker, 1993). Embora a densidade do vapor de água seja baixa, a fracção do caudal volumétrico é grande sob certas diferenças de pressão. Uma quantidade significativa da humidade pode ser transferida pelo movimento de vapor de água. Na secagem a vácuo, as diferenças de pressão totais dentro da madeira provoca o escoamento do vapor de água. Existe um caudal de vapor de água contínuo fornecido na região de ebulição por causa da evaporação de água (Waananen and Okos, 1989).

4.5.4 Difusão na madeira

A difusão na madeira é o movimento aleatório das moléculas de água em resposta a um gradiente de humidade. Este movimento ocorre das regiões de alta concentração de humidade para as de baixa concentração. O movimento da humidade na madeira acima do ponto de saturação das fibras (*PSF*), é causado pela acção capilar. O movimento depende dos tamanhos relativos dos orifícios principais nos lúmens da célula (Siau, 1984). A água e outras pequenas moléculas podem migrar através das paredes das células mesmo quando a madeira é impermeável e não há um gradiente de pressão (Walker, 1993). A difusão aumenta com a temperatura, aumentando aproximadamente 37 vezes quando a temperatura é elevada de 25°C para 100°C (Walker, 1993).

Na difusão de *Fick* (Massey, 1986), todas as moléculas de água são livres de migrar. Estas geralmente difundem-se de uma região de elevada concentração para uma região de baixa concentração de humidade. Assim, reduz-se o gradiente de humidade e iguala o conteúdo de humidade Siau (1984).

Contrariamente ao movimento de água líquida (*free water bulk flow*), devido a forças capilares (*matric potencial*), a difusão é a transferência de um material por movimento molecular essencialmente aleatório de moléculas únicas em resposta a gradientes de concentração (Hougen *et al.* 1940).

A difusão na madeira ocorre na variedade higroscópica (Walker, 1993; Perre and Mosnier, 1995). Segundo Siau (1984), há dois tipos da difusão que ocorrem na madeira: difusão de água no estado de vapor e difusão de água livre ou de capilaridade. A difusão de água no estado de vapor é a transferência do vapor de água pelo ar nos lúmens das células. A difusão de água livre é a transferência de água dentro da parede da célula de madeira.

Hougen *et al.* (1940) afirmou que a análise da difusão é eficaz para calcular a quantidade de humidade média na madeira em qualquer momento durante a secagem acima do ponto de saturação das fibras, mas não sendo possível calcular exactamente a quantidade de humidade contida.

Portanto, podemos dizer que o modo mais comum de descrever os aspectos quantitativos de movimentos de humidade na madeira é assumir que a troca da fracção de humidade é governada por processos de difusão (difusão molecular). O coeficiente de difusão na equação de transporte (Equação 4.11) é usado para descrever a fracção do escoamento de humidade migratória. Como já referido, a difusão na madeira é governada por dois mecanismos: difusão de vapor através dos lúmenes e difusão de água livre no estado líquido pelas paredes das células. O transporte de água pelas paredes das células pode ser dividido em diferentes ramos e tipos de fluxo como nos ilustra a Figura 4.1.

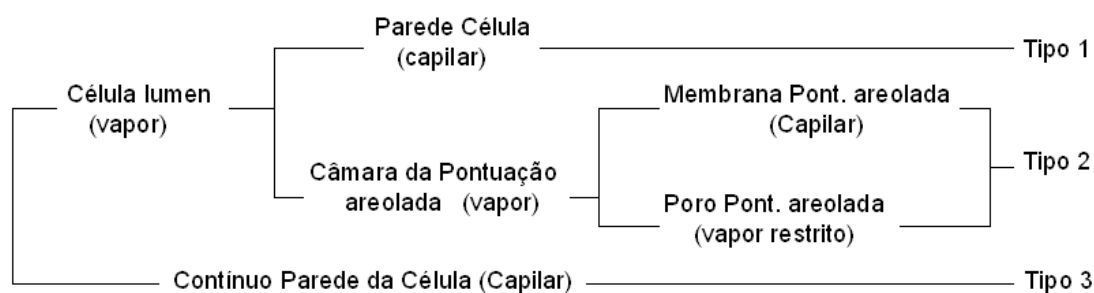


Figura 4.1 – Difusão de água livre e de vapor numa fibra de madeira resinosa (Stamm and Nelson, 1961, adaptado).

- **Tipo 1. Difusão na parede da célula – Lúmen:** Ocorre difusão de vapor de água pelos lúmenes em série com a difusão de água livre (no estado líquido), pelas paredes das células.
- **Tipo 2. Lúmen – Pontuação aureolada:** Ocorre difusão de vapor de água pelos lúmenes em série com difusão de vapor pelas pontuações aureoladas sendo esta

dividida em difusão de água livre (no estado líquido), pela membrana da pontuação aureolada com a difusão de vapor no poro da perfuração aureolada.

- **Tipo 3. Contínuo – Parede da célula:** Difusão de água livre (no estado líquido), pelas paredes das células.

Normalmente apenas a combinação do coeficiente de difusão através de todos estes tipos de transporte de água (movimento de humidade em estado líquido e de vapor), podem ser obtidos através de experiências laboratoriais. Stamm (1959 and 1960) e Yokota (1959), afirmaram terem realizado medições de difusão apenas nas paredes das células.

Nas últimas décadas tem sido afirmado que o movimento de humidade na madeira na variação higroscópica não é somente um processo de difusão em resposta a gradientes de pressão de vapor ou de humidade contida na madeira (ver exemplos, Christensen, 1965; Ghooq and Fogg, 1968, Skaar *et al.* 1970; Wadsø, 1993). Outro processo, para além da difusão de Fick, existe para limitar a fracção da migração de humidade na madeira.

O mecanismo da lei de Fick parece ser mais predominante em humidades relativas baixas, (Comstock, 1963; Skaar *et al.* 1970; Wadsø 1993).

No que diz respeito a este trabalho, convém referir que todo o estudo respeitante à difusão é governado pela primeira e segunda lei de Fick.

4.5.4.1 Modelo de Fick da difusão

Considere-se um sistema material S , delimitado por uma superfície Σ , que contém uma mistura binária (Figura 4.2). Uma mistura binária é constituída por um solvente, que é o componente presente na mistura em maior concentração, e um soluto, que é o componente presente na mistura em menor concentração. Seja P um ponto genérico da mistura e dV o volume de uma porção elementar da mistura, que contém o ponto P . Seja dm a massa do soluto contido no volume dV da mistura. Chama-se concentração do soluto em P a:

$$C(P) = \frac{dm}{dV} \quad (4.2)$$

Chama-se concentração do solvente no ponto P a:

$$C'(P) = \frac{dm'}{dV} \quad (4.3)$$

sendo dm' a massa do solvente contido no volume dV da mistura.

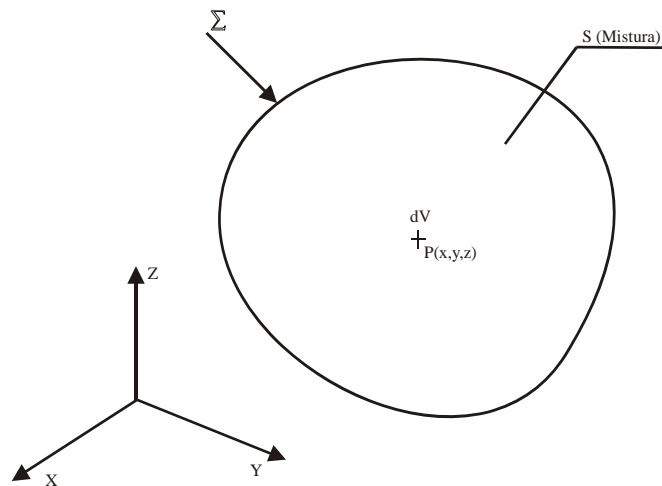


Figura 4.2 - Mistura binária (Costa e Rodrigues, 2005).

Consideremos agora as seguintes hipóteses: (1) o solvente distribui-se de modo uniforme no espaço; (2) o solvente está macroscopicamente em repouso. A hipótese 1 diz que $C'(P)$ é independente de P , mas em geral a concentração do soluto, $C(P)$, varia de ponto para ponto, no interior da mistura. O problema da difusão, no contexto das hipóteses anteriores, consiste em achar a função:

$$C = C(P, t) = C(x, y, z, t), \quad (4.4)$$

conhecidas as condições de fronteira e as condições iniciais. As condições de fronteira, para o referido problema da difusão são:

$$C_{\Sigma} = C(P,t), \quad P \in \Sigma \quad (4.5)$$

e

$$f_{\Sigma} = f(P,t), \quad P \in \Sigma \quad (4.6)$$

Designando por C_0 a concentração inicial, tem-se a seguinte condição inicial:

$$C_0 = C(P,t=0), \quad P \in S \quad (4.7)$$

A corrente de difusão da substância difusora no ponto P de S é dado pelo vector densidade de corrente (do soluto) \vec{J} , expresso na expressão (Crank, 1975):

$$\vec{J} = C \cdot \vec{v} \quad (4.8)$$

A densidade do fluxo (do soluto), F , é dada por (Crank, 1975):

$$F = \vec{J} \cdot \vec{n} = f(P, \vec{n}) \quad (4.9)$$

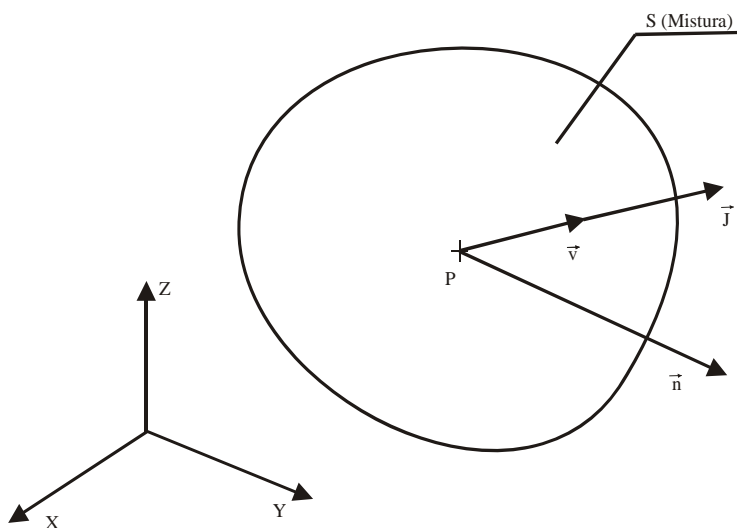


Figura 4.3 - Vector densidade de corrente (Costa e Rodrigues, 2005).

4.5.4.2 Primeira lei de Fick da difusão

A lei mais utilizada para descrever o processo da difusão é a primeira lei de Fick (Crank, 1975), que indica uma correlação linear entre a densidade de corrente, \vec{J} , e o gradiente de concentração da fase difusora (Crank, 1975):

$$\vec{J} = -D \cdot \overrightarrow{\text{grad}} C \quad (4.10)$$

onde D representa a difusibilidade (soluto no solvente) ou coeficiente de difusão. Num dado sistema de coordenadas cartesiano e ortonormado, a expressão cartesiana da densidade de corrente vem:

$$\vec{J} = -D \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \vec{i} - D \frac{\partial C}{\partial y} \cdot \vec{j} - D \frac{\partial C}{\partial z} \cdot \vec{k} \quad (4.11)$$

4.5.4.3 Segunda lei de Fick da difusão

Tomando por base a 1ª Lei de Fick (Crank, 1975) e aplicando o princípio da conservação da massa a um bloco elementar, que contém o ponto P da mistura e cujas arestas são paralelas aos eixos do sistema de coordenadas $Oxyz$ (Figura 4.4), demonstra-se que (Crank, 1975):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(\overrightarrow{\text{grad}} C) \quad (4.12)$$

Relativamente a um referencial espacial $Oxyz$, a Equação 4.12 vem:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (4.13)$$

que é a equação diferencial da difusão, designada pela 2ª Lei de Fick para a difusão.

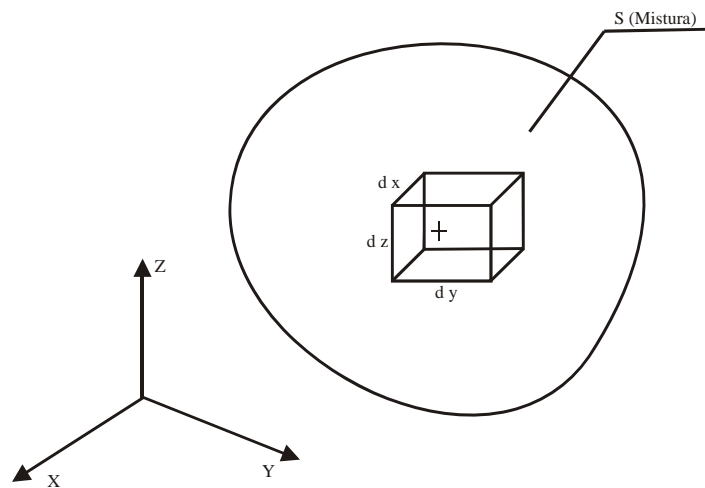


Figura 4.4 – 2ª Lei de Fick da difusão (Costa e Rodrigues, 2005).

Capítulo 5

Estudo Experimental Preliminar

Conteúdo do Capítulo

Neste capítulo é descrito o trabalho experimental preliminar que foi efectuado com vista à avaliação das propriedades de difusão da madeira *Pinus pinaster*. A realização do trabalho experimental foi dividida em duas partes. A primeira, a que constitui este capítulo, consistiu num estudo preliminar, com o objectivo de desenvolver uma metodologia experimental. Deste estudo preliminar resultou um procedimento experimental. Também, com este estudo preliminar pretende-se identificar os necessários equipamentos e respectiva aprendizagem para o correcto manuseamento. São também apresentados os resultados, análise, conclusões e considerações finais do estudo experimental preliminar.

5.1 Procedimento experimental

As amostras utilizadas para os ensaios de difusão foram extraídas de uma árvore da espécie *Pinus pinaster* Aiton. A árvore foi seleccionada tendo em conta alguns aspectos da morfologia do fuste (rectilidade, conicidade, feridas de resinagem, doenças, etc.), por forma a facilitar a preparação dos provetes e a fazer o máximo aproveitamento da madeira na zona do fuste.

A selecção das amostras foi cuidadosamente verificada no âmbito de eventuais defeitos tais como nós e fissuras de modo a tirar o máximo proveito dos resultados. Os provetes foram obtidos a partir de vigas previamente cortadas com as dimensões de 20×20×300 mm (Figura 5.1).



Figura 5.1 – Vigas de madeira *Pinus pinaster*.

Na presença das amostras cortadas, estas foram sujeitas a uma inspecção seguida de um polimento superficial com lixa de madeira de grão 180 e 100, de modo a retirar cuidadosamente restos de madeira presentes nas arestas devido ao corte com a serra de fita.

Na condução do *trabalho experimental preliminar*, os ensaios de difusão respeitantes à adsorção de vapor de água decorreram em condições higrotérmicas estacionárias à temperatura de 50°C. No ensaio foi utilizado a solução salina com Cloreto de Magnésio hexa-hidratado dissolvido em água destilada como indica a norma ASTM E 104-85, 1991. Para esta temperatura higrométrica, a solução salina conduz a uma atmosfera de humidade relativa de 45,4% (Tabela 5.1). As amostras (provetes), foram introduzidos em recipientes fechados (Figura 5.2), contendo a solução salina.

No que diz respeito ao processo de dessecção (secagem), a atmosfera seca foi obtida recorrendo a sais de sílica gel.

Tabela 5.1 - Solução salina (ASTM E 104-85, 1991).

Solução	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)
MgCl ₂ .6H ₂ O	50	45,4

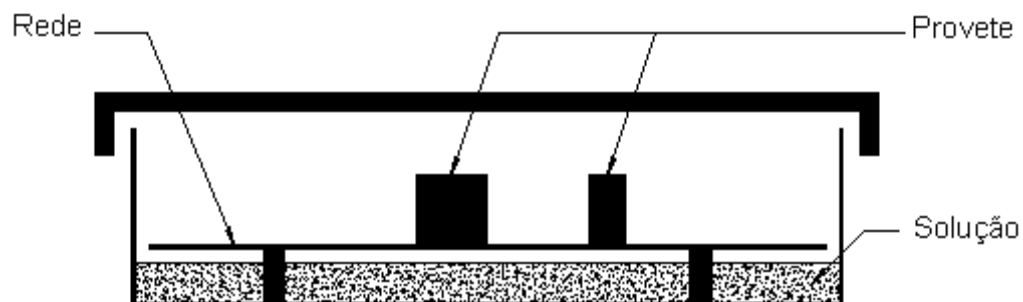


Figura 5.2 – Recipiente higrotérmico.

Os recipientes foram introduzidos em estufa (Figura 5.3), à temperaturas de 50°C.



Figura 5.3 - Estufa utilizada nos ensaios de difusão.

As sucessivas pesagens dos provetes, foram efectuadas numa balança analítica de calibração automática (KERN ALJ160-4NM), ilustrada na Figura 5.4.



Figura 5.4 – Balança analítica de calibração automática.

As amostras foram pesadas ao longo do tempo. O espaçamento temporal variou ao longo do ensaio, iniciou-se com intervalos de 30 minutos que foram aumentando à medida que os valores tendiam para o valor de saturação. Após retirar-se o recipiente da estufa, este passa por um tempo de estágio às condições ambiente antes de ser aberto e dar início à pesagem dos provetes. O tempo de estágio foi de 15 minutos. Estas operações de pesagem tinham a duração aproximada de 25 minutos, por cada temperatura e humidade estudada.

Os provetes foram pesados até se atingir um patamar de estabilidade em termos de ganho ou perda do teor de humidade ou então um estado de degradação que inviabilizasse a continuação da pesagem. Os provetes consideraram-se estabilizados quando no mínimo não existia entre duas pesagens uma variação de massa superior a 0,5%.

Para determinar o teor em água (H) dos provetes foi utilizada a metodologia da norma Portuguesa NP-614, que segue de acordo também com o método universal descrito no capítulo anterior, utilizando a seguinte expressão:

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \times 100 \quad (5.1)$$

onde m_0 representa a massa dos provetes secos, m_H a massa dos provetes no momento da pesagem.

5.2 Trabalho experimental preliminar

O trabalho experimental preliminar, incidiu na análise quantitativa e qualitativa do comportamento à difusão relativamente à adsorção de vapor de água tridimensional e nas diferentes direcções de simetria, isto é, longitudinal (*L*), Tangencial (*T*), Radial (*R*). No respeitante à dessorção (secagem), apenas foi realizada a análise tridimensional.

Os factores mais relevantes a considerar nesta fase, foi a geometria dos provetes, a variação do tempo de saturação e secagem e a percepção da sensibilidade em termos de ganho e perda do teor de humidade do provete em função da espessura e da direcção de simetria natural. Na Tabela 5.2 estão ilustradas as dimensões dos provetes, bem como as direcções não isoladas onde era permitido a difusão ocorrer.

Tabela 5.2 – Dimensões e tipo de isolamento das amostras.

Nº do Proвете	DIMENSÃO [mm]			Direcção não isolada
	Longitudinal	Radial	Tangencial	
1	20	20	20	Longitudinal
2	20	20	20	Radial
3	20	20	20	Tangencial
4	15	20	20	Tangencial
5	20	10	20	Longitudinal
6	20	9	20	Longitudinal
7	20	20	10	Tangencial
8	20	6	20	Longitudinal
9	20	7	20	Tangencial
10	10	20	20	Radial
11	10	20	20	Tangencial
12	9	20	20	Tangencial
13	20	4	20	Longitudinal
14	20	20	5	Tangencial
15	20	20	3	Radial
16	4	20	20	Longitudinal

5.2.1 Procedimento experimental

O procedimento experimental do trabalho preliminar foi efectuado em duas fases; a primeira incidiu na análise quantitativa relativamente à difusão respeitante à adsorção e dessorção de vapor de água nos provetes sem qualquer isolamento nas direcções de simetria (longitudinal, radial e tangencial). Após a conclusão desta fase iniciou-se a segunda fase, que incidiu num processo idêntico e considerando apenas para a adsorção, mas com a particularidade das faces dos provetes estarem isoladas segundo diferentes direcções. O isolamento foi efectuado com cola industrial Araldite (2015, Huntsman). O isolante foi aplicado duas vezes de modo a garantir que toda a face ficaria isolada. A secagem das amostras, antes de se iniciar cada fase, foi realizada numa estufa de vácuo durante cerca de dois dias e à temperatura de 50°C.

5.3 Resultados e discussão

Nas figuras que se seguem apresentam-se a evolução do ganho ou perda de massa (em percentagem) em função da raiz quadrada do tempo (em horas), para uma humidade relativa de 45,4%.

5.3.1 Adsorção em provetes não isolados

A Figura 5.5 apresenta o aspecto qualitativo e característico da difusão de água num meio sólido: depois de uma fase inicial de ganho de água, segue-se o patamar de equilíbrio com as condições ambientais. Da observação da figura resulta que a taxa inicial de ganho de humidade diminui ao longo do tempo, independentemente da geometria do provete. De uma forma geral, observa-se que, para os provetes atingirem o patamar de saturação são necessárias aproximadamente 36 horas. Nestas condições higrotérmicas, em geral, os provetes ganham aproximadamente 12% a 13% de teor de humidade. As irregularidades no andamento das curvas experimentais em alguns provetes no que diz respeito ao ganho de humidade foram devidas ao facto de estes entrarem em contacto com a solução salina no estado líquido e conseqüentemente verifica-se um ganho de massa anómalo. Este aspecto foi tido em conta e foram tomadas medidas no sentido de evitar estas ocorrências.

De uma forma geral, o andamento das curvas ilustra o andamento típico das curvas de difusão.

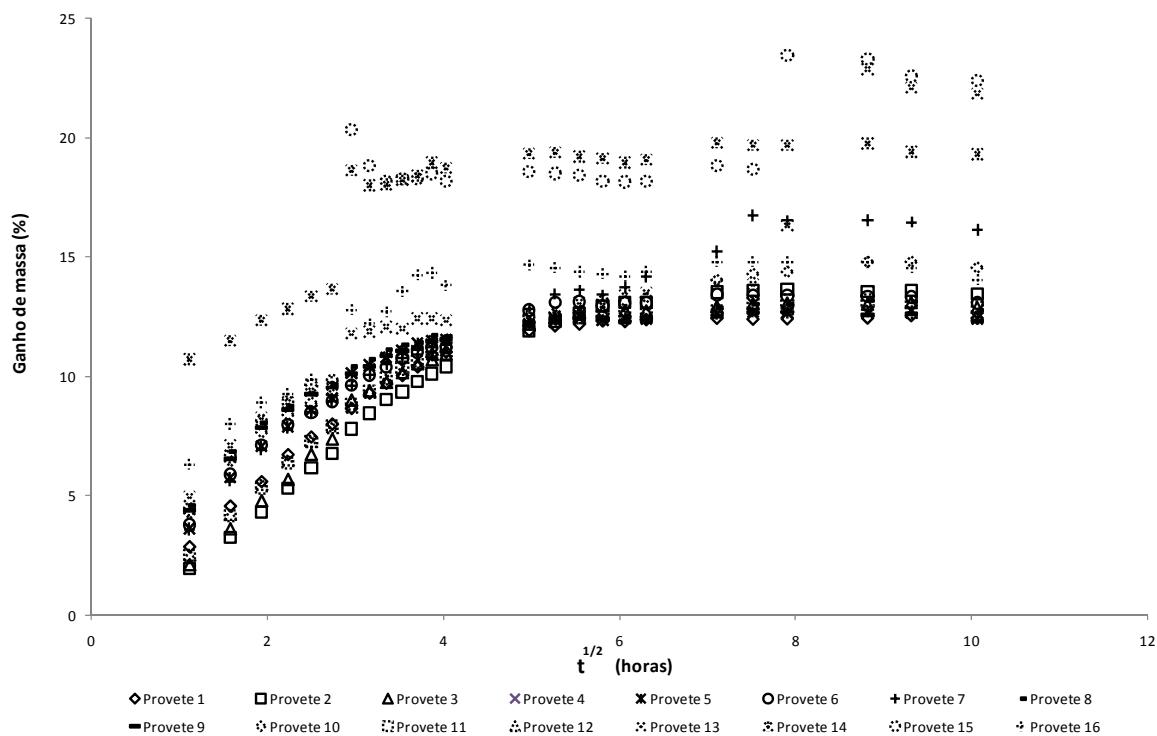


Figura 5.5 – Evolução do ganho de massa em provetes não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR= 45,4\%$.

5.3.2 Dessorção em provetes não isolados

Recorrendo aos mesmos provetes anteriormente utilizados para a adsorção, na Figura 5.6 apresentam-se os resultados obtidos para a dessorção (secagem). Tal como aconteceu para a adsorção, na Figura 5.6, evidencia a variação da taxa de perda de massa, sendo maior no início, diminui ao longo do tempo, independentemente da geometria do provete. Observa-se que, em geral, o tempo para atingir o patamar de equilíbrio na dessorção, aproximadamente 25 horas, é inferior ao tempo necessário para atingir o patamar de equilíbrio no caso da adsorção. Nestas condições higrotérmicas, em geral, os provetes perdem aproximadamente 12% a 13% de teor de humidade

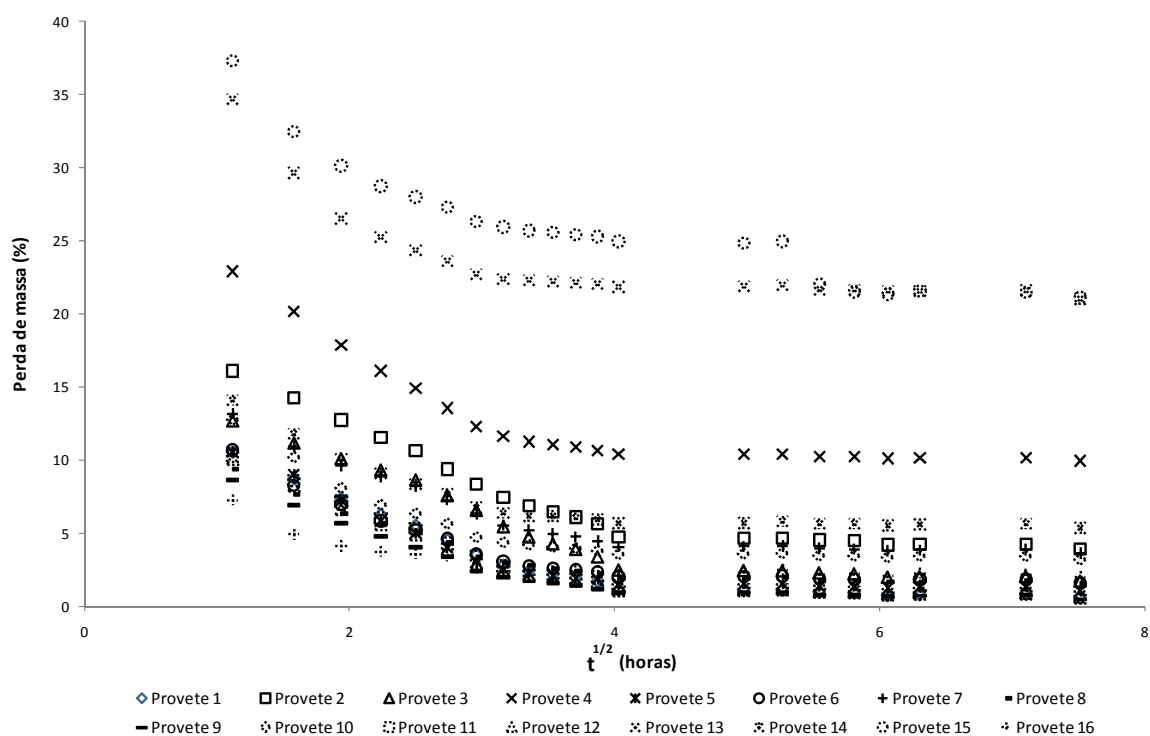


Figura 5.6 – Evolução da perda de massa em provetes não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR=45,4\%$

5.3.3 Adsorção em provetes isolados

A taxa de ganho de teor de humidade ao longo do tempo para diferentes direcções é apresentado na Figura 6.3. Observa-se que esta taxa varia em função do tipo de isolamento efectuado em cada provete (Tabela 5.2 do Capítulo 5), isto é, a taxa de difusão que ocorre nas diferentes direcções dos provetes varia de acordo com essas direcções. Os provetes não isolados na direcção longitudinal e tangencial ganham aproximadamente 10% a 11% de teor de humidade (menos que a adsorção com provetes não isolados). O provete não isolado na direcção longitudinal demora cerca de 36 horas a atingir o patamar de saturação, embora alguns provetes não isolados na direcção tangencial também registam aproximadamente o mesmo valor, no entanto, este facto é devido às pequenas dimensões do provete.

O andamento regular destas curvas permite concluir tratarem-se de curvas típicas de difusão e permite a caracterização das propriedades de difusão.

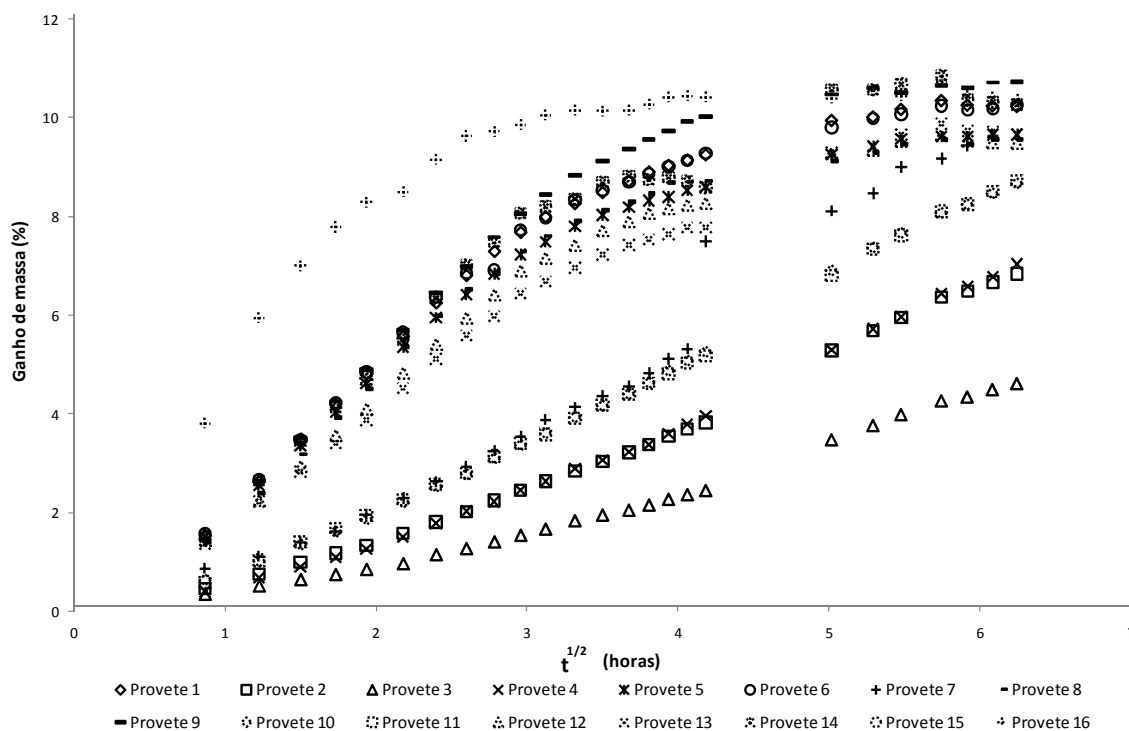


Figura 5.7 – Evolução do ganho de massa em provetes isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR=45,4\%$.

5.3.4 Conclusões e considerações finais

As informações de carácter quantitativo permitiram analisar o tempo necessário para a saturação e secagem e a sensibilidade do provete em função da dimensão na variação de massa com e sem isolamento facial.

Nos provetes não isolados, verificou-se que a difusão se processa mais rápida quando comparada com a verificada nos provetes isolados. No caso dos provetes isolados facilmente, se observou que a difusão é mais rápida na direcção longitudinal que na tangencial, assim como a direcção tangencial é mais rápida que na direcção radial. Em média, a difusão que ocorre nos provetes, em termos quantitativos, é superior com o aumento da dimensão do provete.

A elaboração deste estudo preliminar permitiu desenvolver uma metodologia experimental, identificar os necessários equipamentos, a necessária aprendizagem para um correcto manuseamento dos mesmos e a organização prática necessária para realização do estudo experimental da difusão.

Capítulo 6

Estudo Experimental da Difusão

Conteúdo do Capítulo

Neste capítulo é apresentado o protocolo experimental baseado no procedimento experimental desenvolvido no Capítulo anterior. São apresentados os resultados dos ensaios experimentais da difusão e sua discussão. Por fim, apresentam-se e analisam-se as isotérmicas de adsorção e dessorção.

6.1 Introdução

Através da informação obtida do *estudo experimental preliminar*, o *estudo experimental da difusão* consistiu na análise qualitativa e quantitativa da difusão de vapor de água nos provetes em condições de adsorção e dessorção. Foram utilizados provetes de duas espessuras diferentes (Tabela 6.1). As amostras foram subdivididas em três variantes (*A*, *B* e *C*). Os provetes do tipo *A*, estão sem qualquer isolamento facial, os do tipo *B*, não se encontram isolados na direcção longitudinal e os do tipo *C*, não se encontram isolados na direcção tangencial, como nos ilustra o histograma apresentado na Figura 6.1. Para cada espessura e variante foram estudados quatro provetes, perfazendo um total de 216 provetes.

Tabela 6.1 – Dimensão nominal dos provetes.

Geometria	Dimensão [mm]		
	Longitudinal	Radial	Tangencial
Cubo	20	20	20
Paralelepípedo	10	20	20

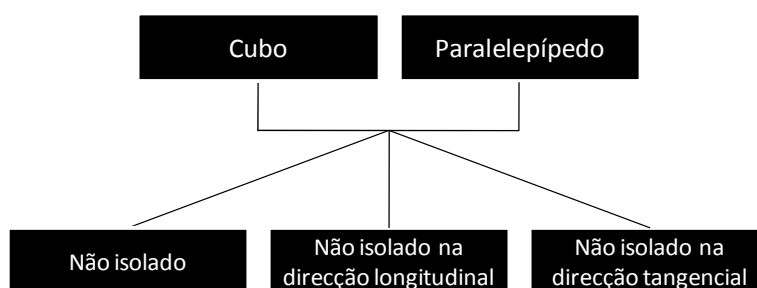


Figura 6.1 – Histograma ilustrando os diferentes tipos de amostras.

6.2 Protocolo experimental

Toda a metodologia realizada no *estudo experimental preliminar* foi utilizada. Os ensaios de difusão decorreram também em condições higrométricas estacionárias, mas com a particularidade de ser estudado três diferentes temperaturas, 35°C, 50°C e 65°C.

De modo a obter-se o comportamento da madeira na presença de humidade foi também realizado o estudo em função de diferentes humidades respeitante à adsorção de vapor de água. Recorreu-se, desta forma, ao uso dos sais di-Cloreto de Magnésio, Brometo de Sódio e o Iodeto de Potássio, cada um deles, dissolvido em água destilada com indica a norma ASTM E 104-85, 1991. Para cada uma das temperaturas higrométricas mencionadas, cada solução salina conduz a uma atmosfera de humidade relativa, apresentadas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Solução salina (ASTM E 104-1085, 1991).

Numero	Solução	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)
<i>HR 1</i>	MgCl ₂	35	32,4 ± 0,2
		50	30,5 ± 0,2
		65	29,3 ± 0,2
<i>HR 2</i>	NaBr	35	54,6 ± 0,4
		50	50,4 ± 0,6
		65	49,6 ± 1,0
<i>HR 3</i>	KI	35	67,0 ± 0,3
		50	66,5 ± 0,3
		65	62,5 ± 0,4

Tal como *no trabalho experimental preliminar*, o processo de secagem (dessorção) foi conduzido na presença de sais de sílica gel, por forma a criar a atmosfera seca.

O programa de ensaios experimentais foi dividido em duas fases, a primeira incidu nos ensaios de difusão respeitante à adsorção de vapor de água nos provetes nas três variantes (*A*, *B* e *C*). Após a conclusão desta fase iniciou-se a segunda, que incidu nos ensaios de difusão respeitante à dessorção de vapor de água também nas três variantes. De salientar que para a segunda fase foram utilizados os mesmos provetes utilizados nos ensaios de adsorção, os quais se, encontravam saturados às condições de humidade relativa e temperatura impostas.

A metodologia usada para o isolamento dos provetes foi descrita no Capítulo anterior.

6.3 Concentração de água no equilíbrio e coeficiente de difusão

Além da determinação experimental, a concentração de água no equilíbrio (M_e) e o coeficiente de difusão (D), foram determinados pelo método dos mínimos quadrados, ajustando a média dos resultados experimentais de difusão dos quatro provetes da mesma variante (*A*, *B* e *C*), ao modelo matemático de Shen & Springer, 1976 (Equação 6.1). Os valores destes parâmetros são apresentados em conjunto com os resultados experimentais.

$$\frac{M}{M_e} = 1 - \exp \left[- 7,3 \left(\frac{D_t}{h^2} \right)^{0,75} \right] \quad (6.1)$$

onde M é a concentração de massa, h é a espessura do provete, M_e é a concentração de água no equilíbrio e D_t é o coeficiente de difusão num dado instante.

6.4 Resultados e discussão

6.4.1 Adsorção

De seguida são apresentados os resultados experimentais comparados com os obtidos por aplicação do modelo matemático de Shen & Springer, 1976, os resultados, ilustram o ganho de massa, em percentagem *versus* a raiz quadrada do tempo, em horas, para as diferentes humidades relativas e temperaturas. Os resultados apresentados nas diferentes temperaturas (35, 50 e 65°C) são idênticos (em termos qualitativos). Cada ponto experimental registado é o valor médio de quatro provetes da mesma natureza.

Nos resultados que se seguem, observa-se que para todos os casos estudados, a taxa de ganho de massa diminui com o aumento da temperatura, independentemente das diferentes humidades relativas (*HR*). Verifica-se também que o aumento da humidade relativa traduz-se num aumento de massa nos provetes, independentemente da temperatura. Salienta-se que o aumento da temperatura, reduz o tempo que os provetes demoram a atingir de saturação.

De seguida são apresentados os resultados e respectiva discussão para cada variante do provete.

6.4.1.1 Cubos não isolados

A evolução do ganho de massa dos provetes ao longo do tempo de exposição sob as condições de temperatura e humidade relativa impostas, permite verificar que existe variações no ganho de massa com o aumento quantitativo dessas mesmas condições. Essas variações vão ser observadas de seguida para os provetes da variante *cubos não isolados*.

A velocidade de remoção da água a temperaturas mais baixas diminui uma vez que a energia fornecida para a evaporação da água é menor e, de um modo geral, as temperaturas

mais elevadas podem aumentar a velocidade da remoção da água. A temperatura está relacionada com o fornecimento de energia para a evaporação da água e a humidade relativa com a capacidade do ar em receber maior ou menor quantidade de vapor de água com a remoção da água da superfície da madeira (Tsoumis, 1991). Para esta situação e nas próximas, relativas à *adsorção*, trata-se do inverso, ou seja, não a remoção de água mas sim a adsorção de vapor de água no provete de madeira com as condições já mencionadas.

Por observação da Figura 6.2, do ensaio efectuado a 35°C, constata-se que o ganho de massa para *HR1* ($HR \cong 30\%$) foi de 3,3%, para *HR2* ($HR \cong 50\%$) foi de, 4,2% e para *HR3* ($HR \cong 65\%$) foi de, 6,9% (Tabela 6.3). Este facto é caracterizado pela maior disponibilidade do ar ceder maior vapor de água aos provetes, verificando-se assim um maior ganho mássico do provete com o aumento da humidade relativa (*HR*), e portanto, um maior valor de *Me* (teor de humidade no equilíbrio). Esta diferença é cerca de 30% de *HR1* para *HR2* e de 61% de *HR2* para *HR3*.

Relativamente ao tempo que os provetes demoram a saturar (atingir o valor de *Me*), este aumenta com o aumento da humidade relativa do ar e diminui com o aumento da temperatura (energia fornecida). Para $T=35^\circ\text{C}$ (Figura 6.3), o tempo é de aproximadamente 80 horas, 145 horas e 325 horas, respectivamente para *HR1*, *HR2* e *HR3*. Para $T=50^\circ\text{C}$ (Figura 6.4) é menor em relação ao anterior, sendo aproximadamente de 50 horas, 65 horas e 100 horas, respectivamente para *HR1*, *HR2* e *HR3*. Para $T=65^\circ\text{C}$ é menor em relação ao anterior, sendo aproximadamente 20 horas, 30 horas e 36 horas, respectivamente para *HR1*, *HR2* e *HR3*.

Na Tabela 6.3, bem como nas seguintes, os valores de *D* e *Me*, foram obtidos pelo modelo matemático de Shen & Springer, 1976.

Tabela 6.3 – Resultados experimentais para cubos não isolados: $T=35^\circ\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, *Me*; coeficiente de difusão, *D*; espessura do provete, *h*.

HR (%)	32,4 ± 0,2	54,6 ± 0,4	67,0 ± 0,3
<i>Me</i> (%)	3,312	4,285	6,906
<i>D</i> (mm ² /h)	2,663	1,693	1,504
<i>h</i> (mm)	19,95	19,96	19,90

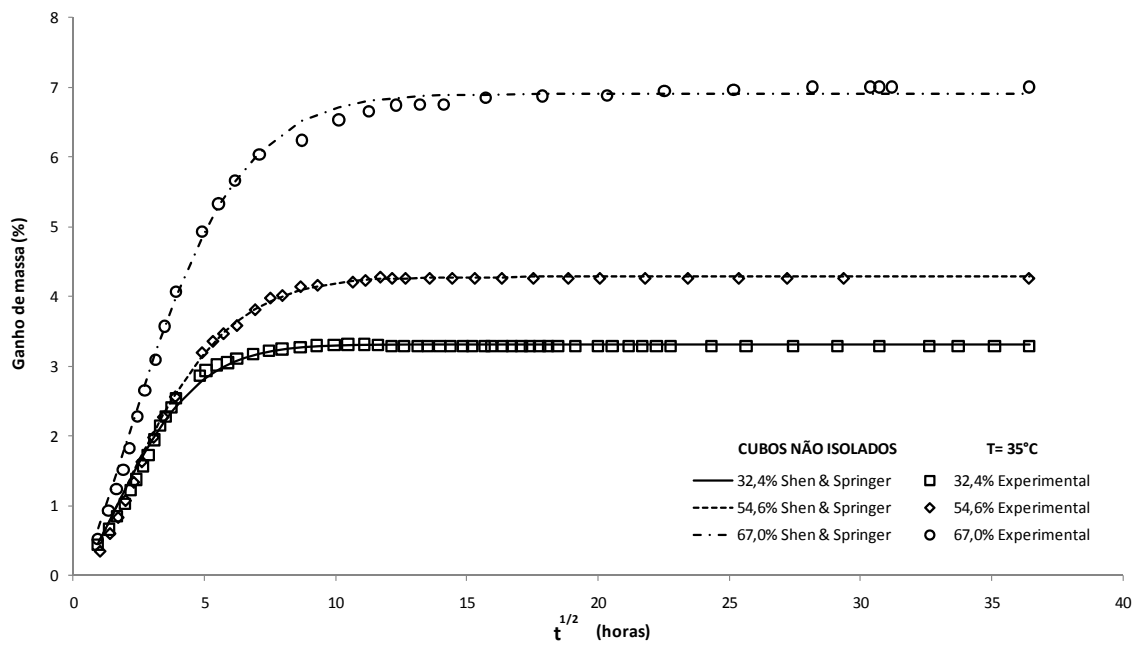


Figura 6.2 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados: $T=35^{\circ}\text{C}$ e $HR= 32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

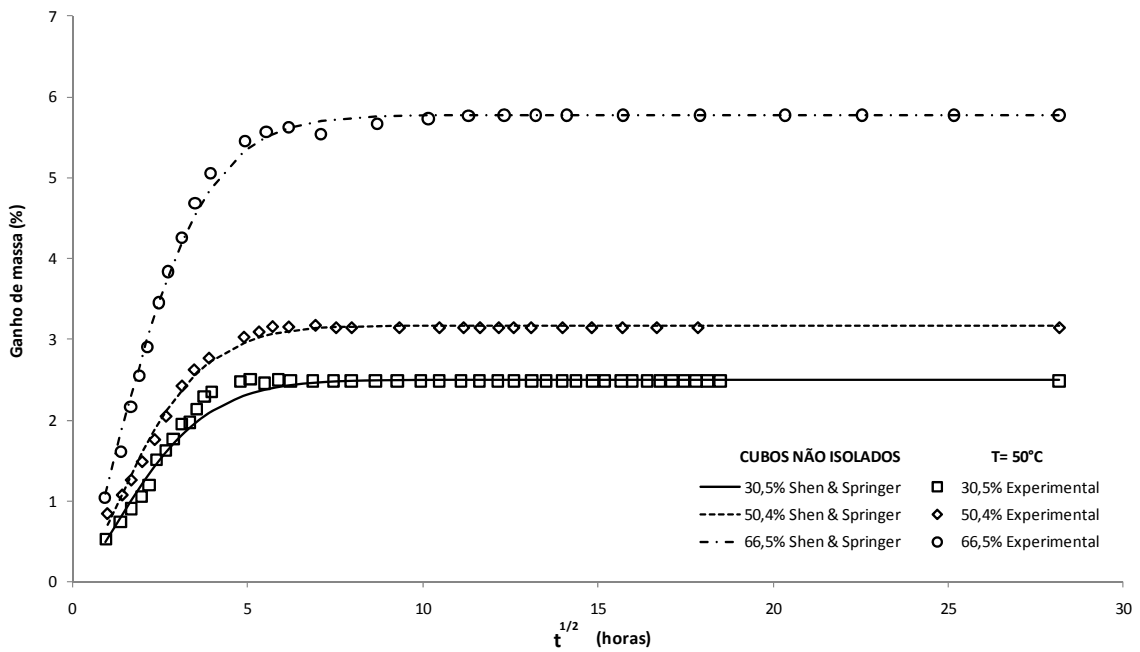


Figura 6.3 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR= 30,5\%$; $50,4\%$; $66,5\%$.

Tabela 6.4 – Resultados experimentais para cubos não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	2,508	3,174	5,775
D (mm^2/h)	4,508	4,449	4,036
h (mm)	20,10	20,02	19,86

Na Figura 6.3, do ensaio efectuado a 50°C , observa-se que o ganho de massa para $HR1$ e $HR2$ é inferior em relação ao ensaio efectuado a 35°C (Figura 6.2), 35% e 32% respectivamente, para $HR3$ verifica-se uma variação de 20%.

Observando o gráfico obtido na Figura 6.4, do ensaio efectuado a 65°C , observa-se que o ganho de massa para $HR1$ ($HR \cong 30\%$) foi de 2,5%, para $HR2$ ($HR \cong 50\%$) foi de 3% e para $HR3$ ($HR \cong 65\%$) foi de 4,7%.

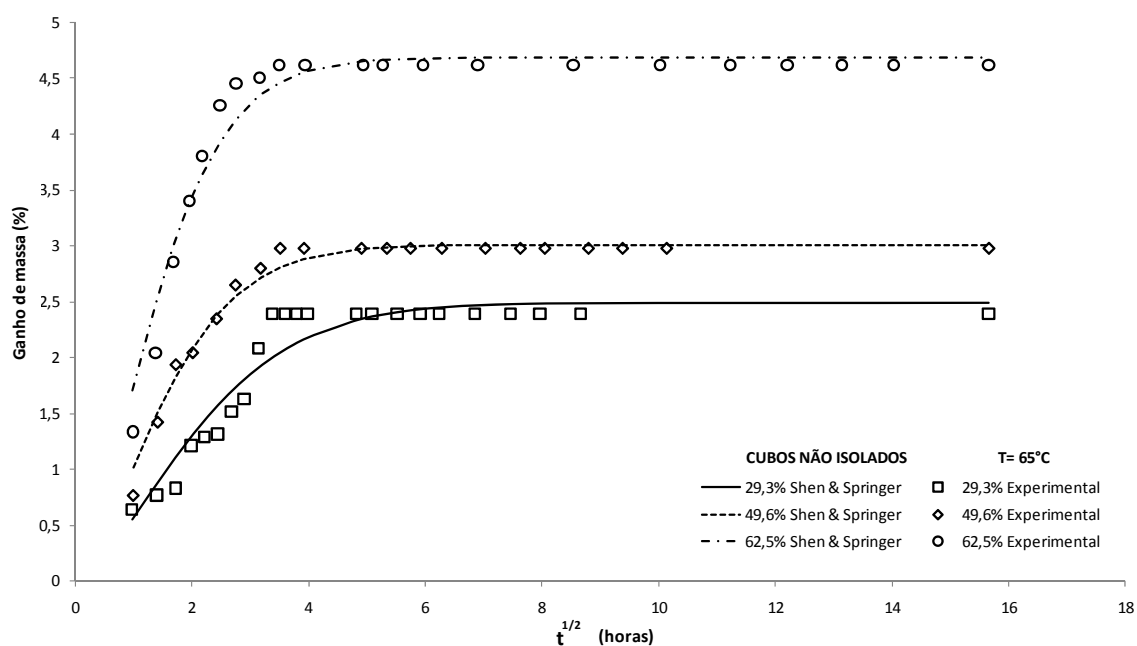


Figura 6.4 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR= 29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

Tabela 6.5 – Resultados experimentais para cubos não isolados: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	2,490	3,005	4,683
D (mm^2/h)	4,845	8,643	10,213
h (mm)	20,22	19,95	19,99

Na Figura 6.4, do ensaio efectuado a 65°C , observa-se que o ganho de massa para $HR1$ e $HR2$ é ligeiramente inferior em relação ao ensaio efectuado a 50°C (Figura 6.3), 0,7% e 6% respectivamente, para $HR3$ verifica-se uma variação superior, cerca de 23%.

Da análise efectuada em termos de temperatura e humidade relativa para os *cubos não isolados*, observa-se que o teor de humidade no equilíbrio (Me) para $HR1$ ($HR \cong 30\%$) aumenta de $T=65^{\circ}\text{C}$ para $T=50^{\circ}\text{C}$, 0,7% e deste para $T=35^{\circ}\text{C}$, 32%. Para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), o Me tem ganhos de 6% de $T=65^{\circ}\text{C}$ para $T=50^{\circ}\text{C}$, e deste para $T=35^{\circ}\text{C}$, um ganho de 35%. Para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), o Me tem ganhos de 23% de $T=65^{\circ}\text{C}$ para $T=50^{\circ}\text{C}$, e deste para $T=35^{\circ}\text{C}$, um ganho de 20%.

Relativamente ao coeficiente de difusão de $HR1$ para $HR3$, para $T=35^{\circ}\text{C}$, este diminui 45%, para $T=50^{\circ}\text{C}$, diminui 10% e no caso de $T=65^{\circ}\text{C}$ aumenta 111%. A fracção da difusão aumenta com a temperatura, aumentando 37 vezes quando a temperatura é elevada de 35°C para 100°C (Walker, 1993). Neste caso aqui analisado, para $HR3$ verifica-se que o aumento da temperatura de 35°C para 65°C , a fracção do coeficiente da difusão aumenta cerca de 7 vezes, e cerca de 5 vezes para o caso da $HR2$.

De acordo com os resultados experimentais obtidos para os *cubos não isolados* as curvas as evoluções de ganho de massa que melhor são descritas pelo modelo matemático de Shen & Springer, 1976, (Equação 6.1), são as obtidas para $T=35^{\circ}\text{C}$ e $T=50^{\circ}\text{C}$.

6.4.1.2 Provetes paralelepípedos não isolados

Observando as Figuras 6.5, 6.6 e 6.7, dos ensaios efectuados a 35°C , 50°C e 65°C , observa-se que os resultados obtidos para provetes da variante *paralelepípedos não isolados*, seguem a mesma tendência no que diz respeito à variação do teor de humidade no

equilíbrio quando comparados com os resultados obtidos para os *cubos não isolados*. Foram obtidos valores idênticos, como pode ser observado nas tabelas respeitantes aos respectivos ensaios experimentais. De notar, que nestes ensaios a diferença para os ensaios anteriores, reside na espessura dos provetes, sendo neste caso igual a metade da espessura considerada nos provetes da variante *cubos não isolados*.

Para estes ensaios verifica-se também uma semelhança respeitante ao tempo que demoram a saturar (a atingir o teor de humidade no equilíbrio, M_e). No ensaio a $T=35^\circ\text{C}$ (Figura 6.5), o tempo de saturação é de aproximadamente 80 horas e 145 horas, para $HR1$ ($HR \cong 30\%$), $HR2$ ($HR \cong 50\%$) respectivamente. Para $HR3$ ($HR \cong 65\%$) tal semelhança já não se verifica, sendo relativamente menor em relação aos *cubos não isolados*, obtendo-se um tempo de saturação de aproximadamente 200 horas.

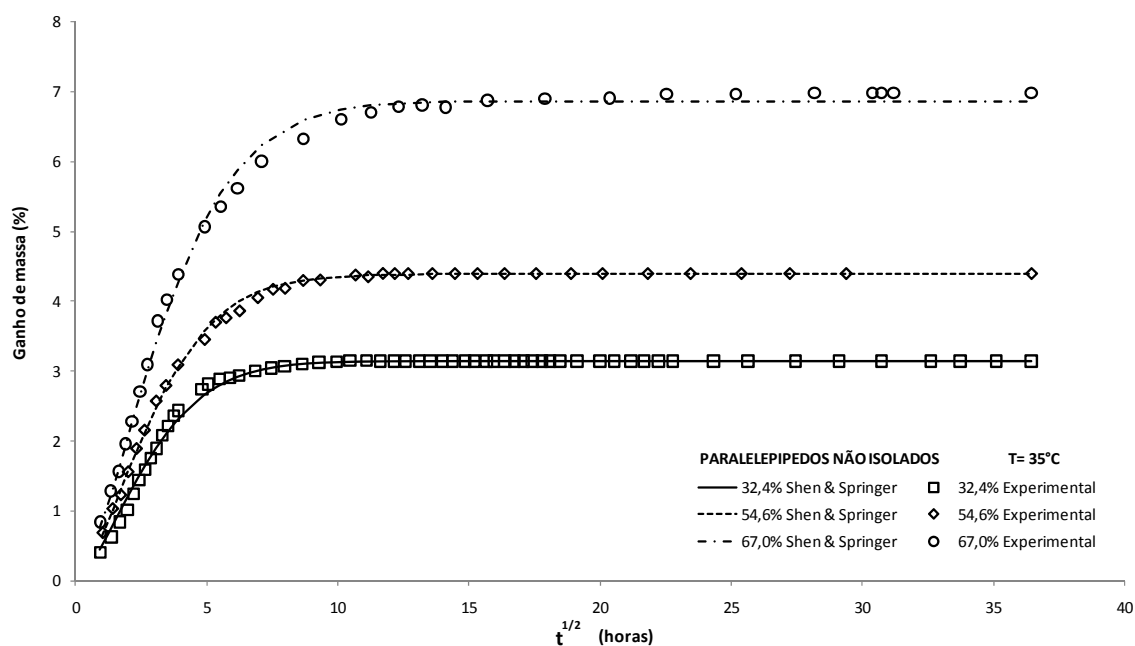


Figura 6.5 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados: $T=35^\circ\text{C}$ e $HR= 32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

Tabela 6.6 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: $T=35^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$32,4 \pm 0,2$	$54,6 \pm 0,4$	$67,0 \pm 0,3$
Me (%)	3,152	4,388	6,862
D (mm^2/h)	0,716	0,607	0,472
h (mm)	10,32	10,17	10,26

Observando a Tabela 6.6, respeitante ao estudo efectuado a 35°C , verifica-se que o coeficiente de difusão diminui significativamente em relação aos obtidos para os *cubos não isolados* (tabela 6.3). Esta variação é de aproximadamente 270%, 180% e 220% para $HR1$ ($HR \cong 30\%$), $HR2$ ($HR \cong 50\%$) e $HR3$ ($HR \cong 65\%$), respectivamente.

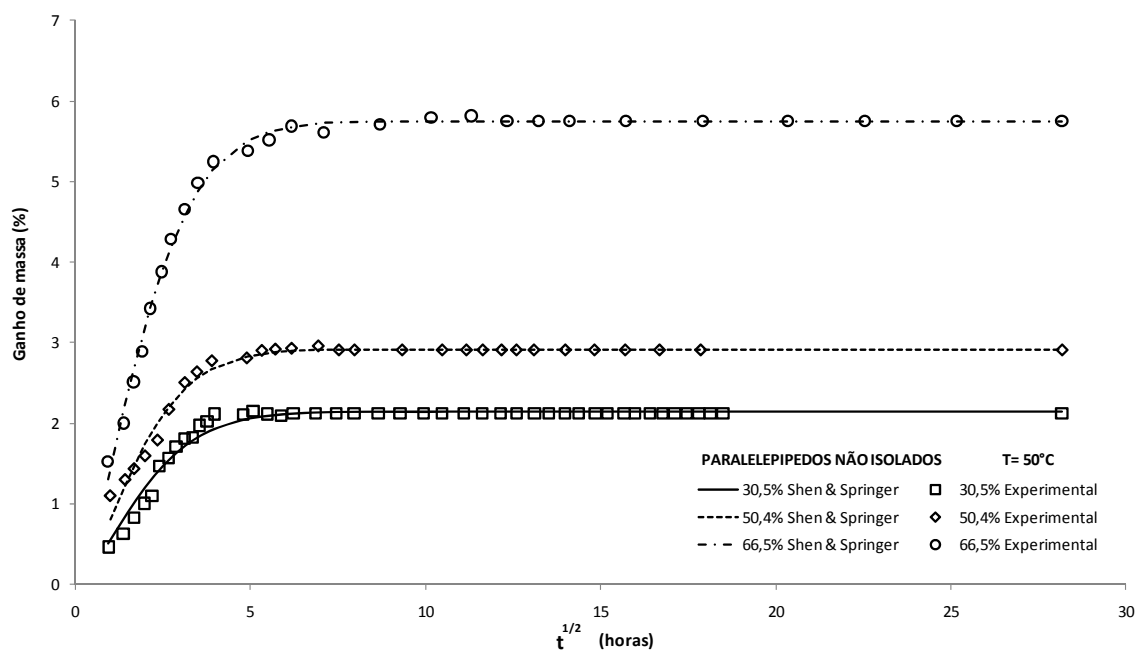


Figura 6.6 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR= 30,5\%$; $50,4\%$; $66,5\%$.

Tabela 6.7 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	2,143	2,919	5,750
D (mm^2/h)	1,425	1,638	1,414
h (mm)	10,27	10,24	10,27

Os tempos de saturação foram idênticos aos obtidos para *cubos não isolados* a $T=50^{\circ}\text{C}$. Observando a Tabela 6.7, os valores de concentração de água no equilíbrio (Me) aumentaram em cerca de 36% e 97%, quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ para $HR2$ e de $HR2$ para $HR3$, respectivamente. Estes valores de Me , não são muito diferentes dos obtidos para os *cubos não isolados* à mesma temperatura (Tabela 6.4). A variação máxima, a de $HR1$ para $HR3$, registou aproximadamente de 170%

Relativamente ao coeficiente de difusão (Tabela 6.7), tal como acontece para $T=35^{\circ}\text{C}$, este diminui significativamente em relação aos obtidos para os *cubos não isolados* (Tabela 6.4). Esta variação é de aproximadamente 215%, 170% e 185%, para $HR1$ ($HR \cong 30\%$), $HR2$ ($HR \cong 50\%$) e $HR3$ ($HR \cong 65\%$), respectivamente.

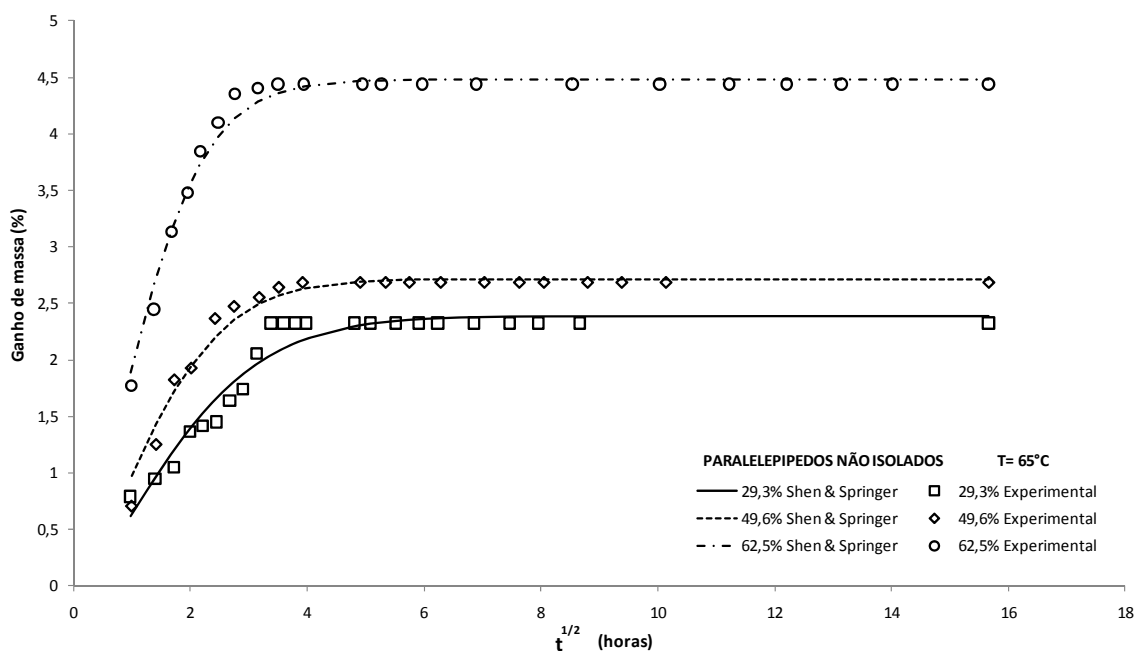


Figura 6.7 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR= 29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

Tabela 6.8 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	2,386	2,716	4,478
D (mm^2/h)	1,599	2,546	3,326
h (mm)	10,35	10,36	10,09

Tal como acontece para $T=50^{\circ}\text{C}$, os tempos de saturação a $T=65^{\circ}\text{C}$ são idênticos aos verificados para os *cubos não isolados* (Figura 6.4). Comparando a Tabela 6.8 com a Tabela 6.5, os valores de concentração de água no equilíbrio (Me) para provetes *paralelepípedos* são inferiores, embora não de forma significativa. Os valores da Tabela 6.5 aumentam cerca de 36% e 97%, quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ para $HR2$ e de $HR2$ para $HR3$, respectivamente. Os valores obtidos para Me , não são muito diferentes quando comparados com os valores obtidos para os *cubos não isolados* à mesma temperatura (Tabela 6.4).

Da análise efectuada em termos de temperatura e humidade relativa para os *paralelepípedos não isolados*, observa-se que o teor de humidade no equilíbrio (Me) para $HR1$ ($HR \cong 30\%$) diminui de $T=65^{\circ}\text{C}$ para $T=50^{\circ}\text{C}$, cerca de 11% e aumenta de $T=35^{\circ}\text{C}$ em cerca de 47%. Para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), o Me tem ganhos de 7% de $T=65^{\circ}\text{C}$ para $T=50^{\circ}\text{C}$, e de $T=50^{\circ}\text{C}$ para $T=35^{\circ}\text{C}$, um ganho de 50%. Para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), o Me tem ganhos de 30% de $T=65^{\circ}\text{C}$ para $T=50^{\circ}\text{C}$ e de $T=50^{\circ}\text{C}$ para $T=35^{\circ}\text{C}$, um ganho de 20%.

Relativamente ao coeficiente de difusão de $HR1$ para $HR3$, para $T=35^{\circ}\text{C}$, este diminui 35%, para $T=50^{\circ}\text{C}$, diminui 1% e no caso de $T=65^{\circ}\text{C}$ aumenta 110% (valor idêntico ao verificado na situação anterior, *cubos não isolados*). Para estes provetes e para $HR3$ (humidade mais elevada), verifica-se que o aumento da temperatura de 35°C para 65°C , aumentou o coeficiente da difusão em cerca de 7 vezes e cerca de 4 vezes para o caso da $HR2$.

Tal como acontece nos ensaios efectuados para os *cubos não isolados*, os valores experimentais que melhor são descritos pelo modelo matemático de Shen & Springer, 1976, (Equação 6.1) são os obtidos para $T=35^{\circ}\text{C}$ e $T=50^{\circ}\text{C}$.

Em síntese, a principal diferença entre os *cubos* e *paralelepípedos não isolados*, é verificada na diminuição significativa do coeficiente de difusão, evidenciada numa variação de 211%. Tal facto pode ser justificado pela diferença de espessura (h) do provete.

6.4.1.3 Cubos não isolados na direcção longitudinal

Observando as Figuras 6.8, 6.9 e 6.10, dos ensaios efectuados a 35°C, 50°C e 65°C, constata-se que os provetes da variante *cubos não isolados na direcção longitudinal*, seguem a mesma tendência no que diz respeito à variação do teor de humidade no equilíbrio quando comparados com os provetes da mesma variante *cubos não isolados*, obtendo-se, desta forma, valores inferiores, como se pode observar nas tabelas que se apresentam de seguida. Nestes ensaios, a diferença para os ensaios realizados com os provetes da variante *cubos não isolados*, reside, tal como já referido (Figura 6.1), no facto de a adsorção de vapor de água ocorrer apenas na direcção longitudinal. Em termos quantitativos, o tempo que estes ensaios demoram a atingir o patamar de saturação é idêntico face aos ensaios em comparação, havendo uma variação pouco significativa de 5 a 10 horas. Esta variação é justificada pelo facto da adsorção ser unidireccional e no sentido dos traqueídos da substância lenhosa, enquanto que para os *cubos não isolados* a adsorção de vapor de água ocorre nas três direcções de simetria anatómica do provete. No entanto, salienta-se que esta variação é “quase inexistente” face aos ensaios efectuados para *cubos e paralelepípedos não isolados na direcção tangencial*, os quais serão apresentados mais à frente neste Capítulo.

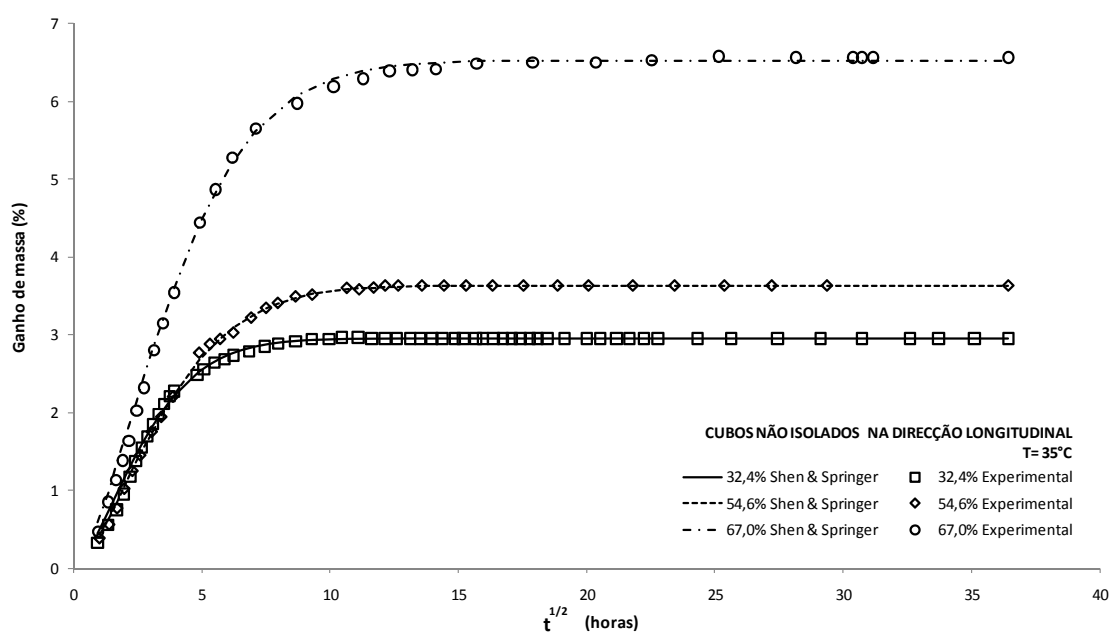


Figura 6.8 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=35^{\circ}\text{C}$ e $HR=32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

Tabela 6.9 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=35^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$32,4 \pm 0,2$	$54,6 \pm 0,4$	$67,0 \pm 0,3$
Me (%)	2,958	3,634	6,526
D (mm^2/h)	2,795	1,760	1,370
h (mm)	19,91	20,06	19,94

Da observação dos resultados obtidos para $T=35^{\circ}\text{C}$ e $T=50^{\circ}\text{C}$ (Figuras 6.8 e 6.9, respectivamente), tal como ocorre nos ensaios às mesmas temperaturas para os *cubos não isolados*, o valor de Me aumenta de forma semelhante com o aumento da humidade relativa. Para $T=35^{\circ}\text{C}$ e $T=50^{\circ}\text{C}$ à humidade relativa $HR3$, verifica-se uma variação de 6% e 10%, respectivamente em relação aos valores obtidos para os *cubos não isolados*. A mesma semelhança quantitativa ocorre para o coeficiente de difusão mas na situação inversa, ou seja, diminui à medida que a humidade relativa aumenta (Tabela 6.9 e 6.10).

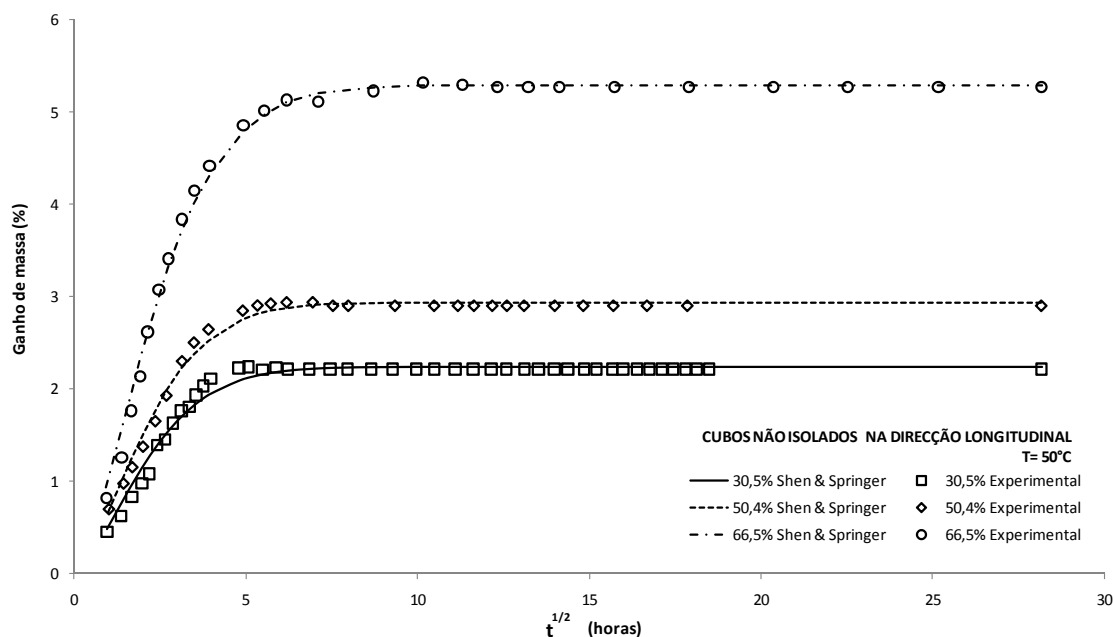


Figura 6.9 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR=30,5\%$; $50,4\%$; $66,5\%$.

Tabela 6.10 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	2,239	2,937	5,292
D (mm^2/h)	4,614	4,530	3,722
h (mm)	19,98	19,90	20,11

Para o ensaio efectuado a $T=65^{\circ}\text{C}$ (Figura 6.10) comparativamente ao ensaio à mesma temperatura para *cubos não isolados*, observa-se uma variação da concentração de água no equilíbrio (Me) de aproximadamente 15%,

Observando as Tabelas 6.10 e 6.11, relativamente ao coeficiente de difusão de $HR1$ para $HR3$, para $T=35^{\circ}\text{C}$, este diminui cerca de 50%, para $T=50^{\circ}\text{C}$, diminui cerca de 20% e no caso de $T=65^{\circ}\text{C}$ aumenta cerca de 90% (valor inferior em cerca de 10 % face ao valor obtido para os *cubos não isolados*).

Relativamente ao coeficiente de difusão, para $HR3$ (humidade mais elevada), verifica-se que o aumento da temperatura de 35°C para 65°C , aumentou o coeficiente de difusão em cerca de 7 vezes e cerca de 5 vezes para o caso da $HR2$.

Tal como acontece com os resultados obtidos para os *cubos não isolados*, a melhor previsão através do modelo matemático de Shen & Springer, 1976, (Equação 6.1) é conseguida para $T=35^{\circ}\text{C}$ e $T=50^{\circ}\text{C}$.

Tabela 6.11 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	2,410	2,775	4,122
D (mm^2/h)	4,809	8,144	8,994
h (mm)	19,95	20,06	19,98

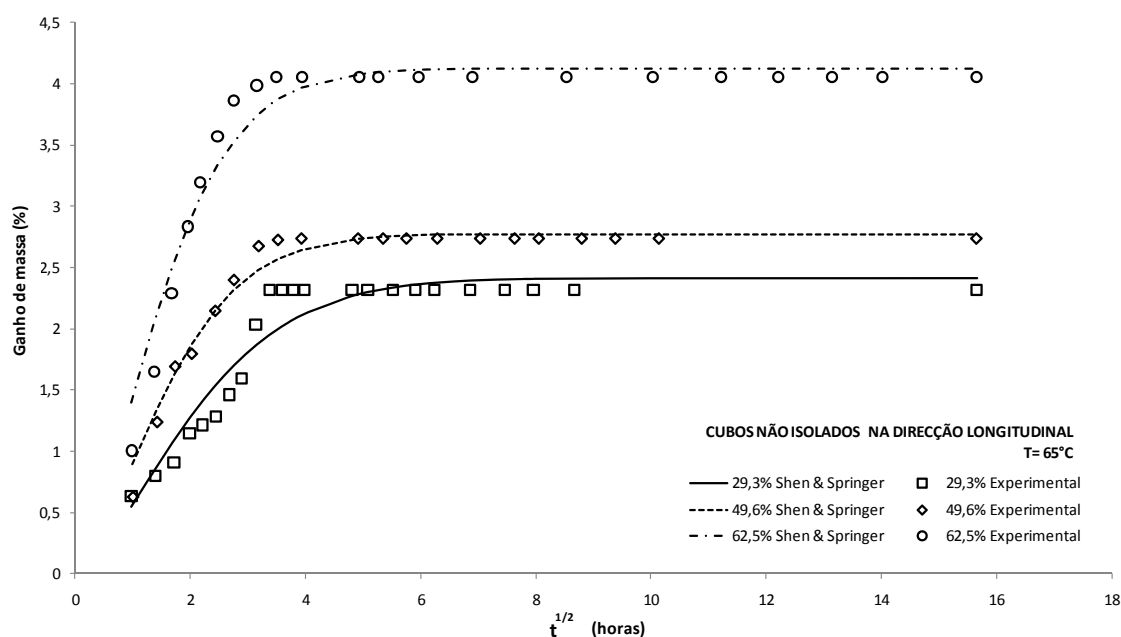


Figura 6.10 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR= 29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

6.4.1.4 Paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal

Através das Figuras 6.11, 6.12 e 6.13, relativos aos ensaios efectuados a 35°C , 50°C e 65°C e em termos quantitativos, como se pode observar nas Tabelas 6.12, 6.13 e 6.14, respectivamente, a variação do teor de humidade no equilíbrio (M_e) em relação aos ensaios para os *cubos não isolados na direcção longitudinal*, não se traduz numa variação acentuada, tal como acontece para a situação dos ensaios de *cubos e paralelepípedos não isolados*.

Em relação ao tempo necessário para ser atingido o estado de saturação para estes provetes, foi semelhante ao necessário para os *cubos não isolados na direcção longitudinal*.

Com estes provetes verificou-se também uma semelhança, no que diz respeito ao tempo de saturação com os provetes da variante *paralelepípedos não isolados*. No ensaio a $T=35^{\circ}\text{C}$ (Figura 6.11), o tempo de saturação é de aproximadamente 80 horas e 145 horas, para $HR1$ ($HR \cong 30\%$) e $HR2$ ($HR \cong 50\%$), respectivamente. Para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), tal semelhança já não se verifica, sendo relativamente menor (aproximadamente 200 horas), que o valor obtido para os *paralelepípedos não isolados*.

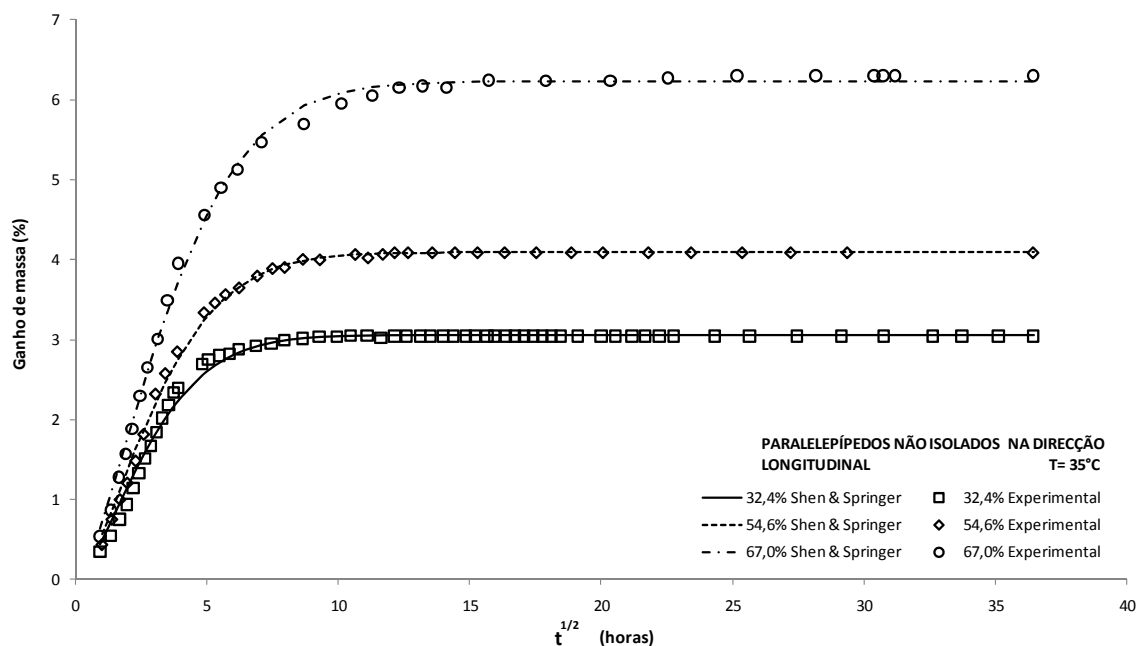


Figura 6.11 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: $T=35^{\circ}\text{C}$ e $HR= 32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

Tabela 6.12 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: $T=35^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$32,4 \pm 0,2$	$54,6 \pm 0,4$	$67,0 \pm 0,3$
Me (%)	3,055	4,091	6,228
D (mm^2/h)	0,700	0,552	0,404
h (mm)	10,28	10,15	9,95

Analisando os valores da Tabela 6.12, respeitante ao ensaio efectuado a 35°C , verifica-se que o coeficiente de difusão diminui de forma significativa em relação aos valores obtidos para os *cubos não isolados na direcção longitudinal* (Tabela 6.9), esta variação é aproximadamente de 325%, 220% e 240% para $HR1$ ($HR \cong 30\%$), $HR2$ ($HR \cong 50\%$) e $HR3$ ($HR \cong 65\%$), respectivamente.

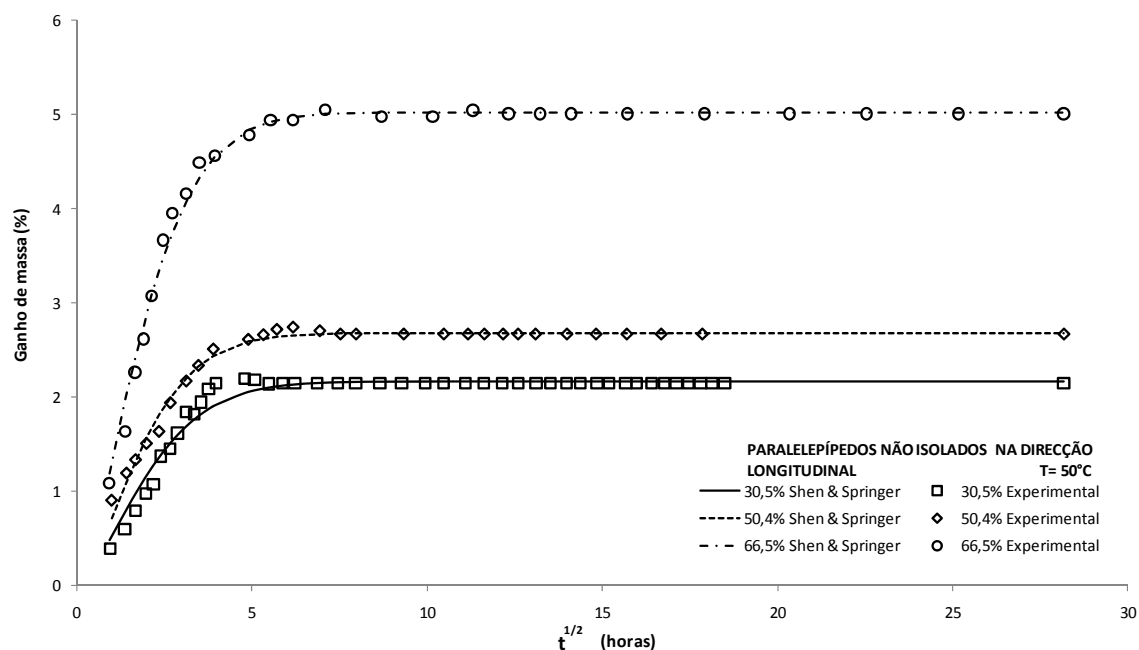


Figura 6.12 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direção longitudinal: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR= 30,5\%$; $50,4\%$; $66,5\%$.

Através das Figuras 6.12 e 6.13 e efectuando uma comparação com as obtidas para os provetes da variante cubos não isolados na direção longitudinal (Figuras 6.10 e 6.11), verifica-se um situação análoga para os valores do teor de humidade no equilíbrio (Me) e do coeficiente de difusão (D), tal como se tinha verificado entre os *cubos e paralelepípedos não isolados* a $T=50^{\circ}\text{C}$ e $T=65^{\circ}\text{C}$. Verifica-se uma variação idêntica em termos quantitativos dos valores de Me e D para as diferentes humidades relativas. O coeficiente de difusão diminui significativamente (Tabelas 6.10, 6.11, 6.13 e 6.14).

Tabela 6.13 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direção longitudinal: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	2,170	2,682	5,026
D (mm^2/h)	1,271	1,548	1,479
h (mm)	10,09	10,19	10,16

Relacionando os valores obtidos a $T=65^{\circ}\text{C}$ e $T=35^{\circ}\text{C}$, Figuras 6.11 e 6.13 respectivamente, verifica-se que o aumento da temperatura de 35°C para 65°C , manifestou

num aumento do valor do coeficiente da difusão em cerca de 8 vezes para *HR3*, 6 vezes para *HR2* e 2 vezes para *HR1*.

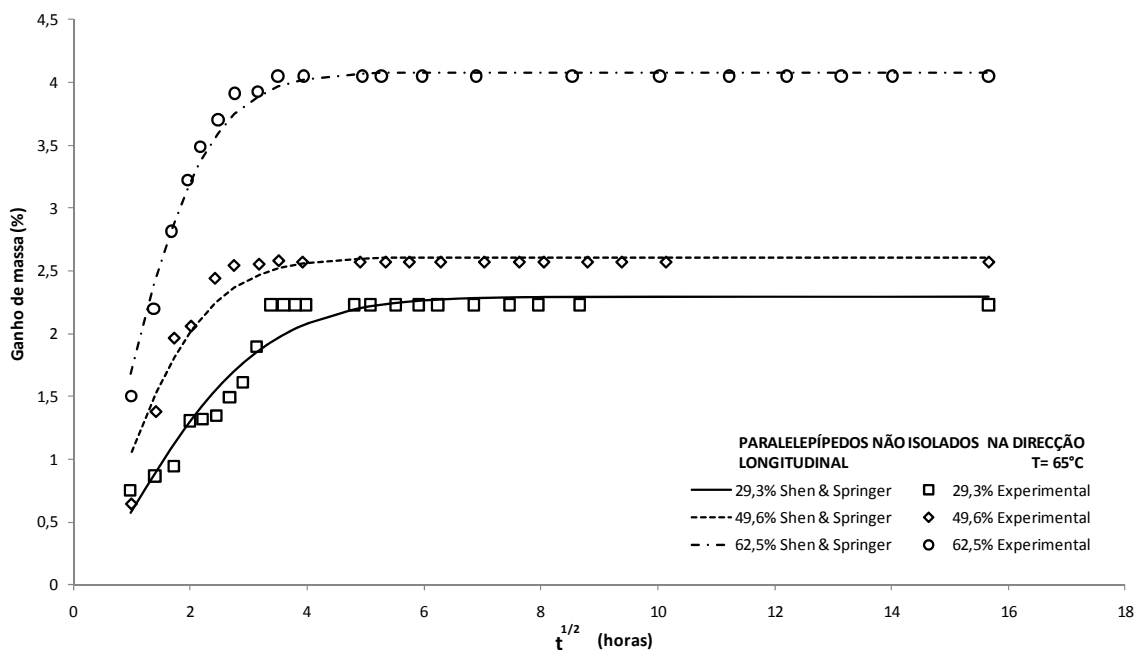


Figura 6.13 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direção longitudinal: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR= 29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

Tabela 6.14 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direção longitudinal: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	2,293	2,607	4,082
D (mm^2/h)	1,427	3,133	3,283
h (mm)	10,10	10,28	10,21

Tal como acontece com os resultados obtidos para os *paralelepípedos não isolados*, a melhor previsão através do modelo matemático de Shen & Springer, 1976, (Equação 6.1) é conseguida para $T=35^{\circ}\text{C}$ e $T=50^{\circ}\text{C}$.

6.4.1.5 Cubos não isolados na direcção tangencial

As Figuras 6.14, 6.15 e 6.16, que representam os ensaios efectuados com provetes da variante *cubos não isolados na direcção tangencial*, a 35°C, 50°C e 65°C, respectivamente, mostram valores bastante diferentes que os obtidos nos provetes da variante cubos não isolados e cubos não isolados na direcção longitudinal, nomeadamente: o tempo de saturação; o teor de humidade no equilíbrio (Me) e o coeficiente de difusão (D). Nestes ensaios, a principal diferença para os ensaios anteriores, reside apenas no facto de a adsorção de vapor de água ocorrer apenas na direcção tangencial.

Relativamente ao tempo que os provetes levaram até saturar, aumenta com o aumento da humidade relativa do ar e diminui com o aumento da temperatura (energia fornecida). Em termos quantitativos, este tempo foi é muito superior face aos ensaios anteriores, 1080 horas para $T=35^\circ\text{C}$, 710 horas para $T=50^\circ\text{C}$ e 190 horas para $T=65^\circ\text{C}$. Esta variação é justificada pelo facto da adsorção ser unidireccional e perpendicular aos traqueídos da substância lenhosa, enquanto para os *cubos não isolados* a adsorção de vapor de água ocorrer nas três direcções de simetria anatómica do provete.

Tabela 6.15 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=35^\circ\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$32,4 \pm 0,2$	$54,6 \pm 0,4$	$67,0 \pm 0,3$
Me (%)	2,527	3,538	6,012
D (mm^2/h)	0,104	0,164	0,151
h (mm)	19,78	19,79	20,12

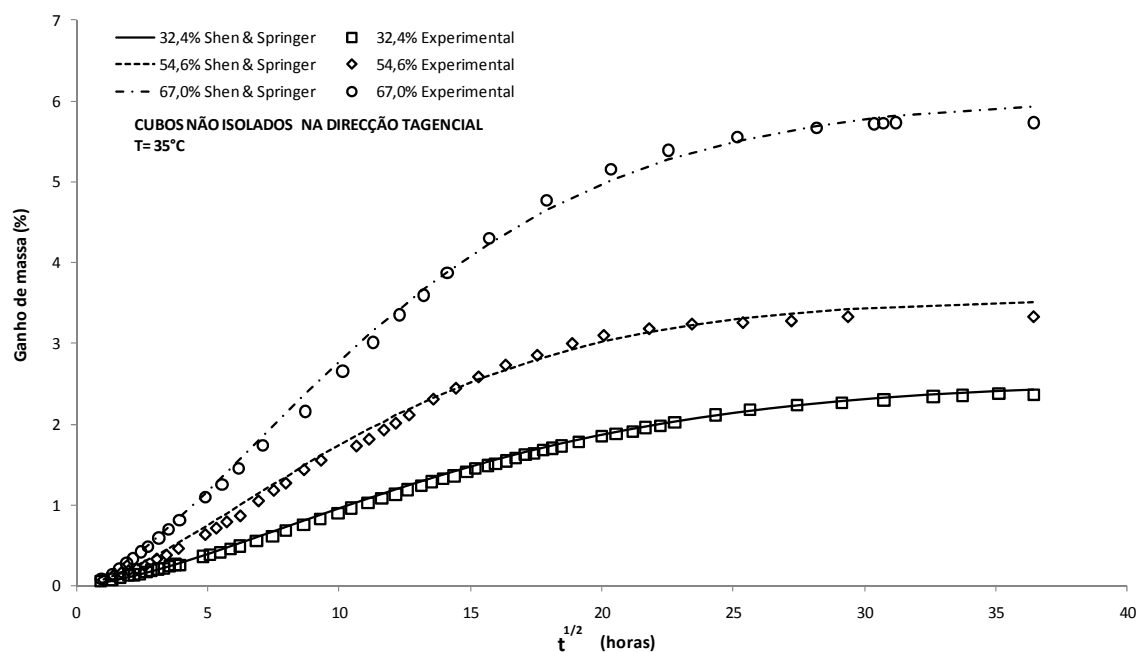


Figura 6.14 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=35^{\circ}\text{C}$ e $HR=32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

No ensaio para $T=35^{\circ}\text{C}$, o valor do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta de $HR1$ ($HR \cong 30\%$) para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), em cerca de 40%, e de $HR2$ para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), cerca de 70% (Tabela 6.15). Comparando os valores de Me com os obtidos para os cubos não isolados (Tabela 6.3), verifica-se uma variação de 30%, 20% e 15% para $HR1$, $HR2$ e $HR3$, respectivamente.

Tabela 6.16 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; Espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	1,573	1,820	4,831
D (mm^2/h)	0,344	0,517	0,772
h (mm)	19,57	19,91	19,62

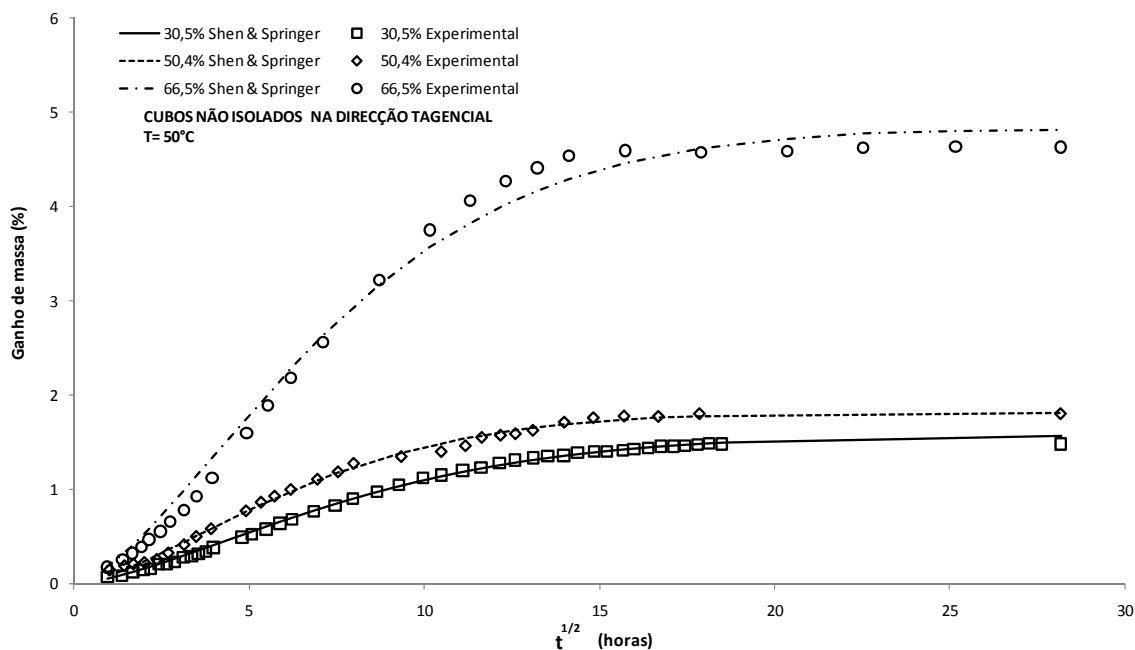


Figura 6.15 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR= 30,5\%; 50,4\%; 66,5\%$.

Já no ensaio para $T=50^{\circ}\text{C}$, o valor do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta de $HR1$ ($HR \cong 30\%$) para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), em cerca de 16%, e de $HR2$ para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), cerca de 165% (tabela 6.16). Comparando os valores de Me com obtidos nos *cubos não isolados* (Tabela 6.4), verifica-se uma variação de 60%, 74% e 20% para $HR1$, $HR2$ e $HR3$, respectivamente.

Tabela 6.17 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	0,580	1,361	3,530
D (mm^2/h)	1,397	1,260	0,772
h (mm)	19,65	19,69	19,64

No que diz respeito ao ensaio para $T=65^{\circ}\text{C}$, o valor do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta de $HR1$ ($HR \cong 30\%$) para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), em 135%, e de $HR2$ para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), em 160% (tabela 6.17). Comparando os valores de Me com os

valores obtidos nos provetes da variante *cubos não isolados* (tabela 6.5), verifica-se uma variação de 329%, 120% e 33% para *HR1*, *HR2* e *HR3*, respectivamente.

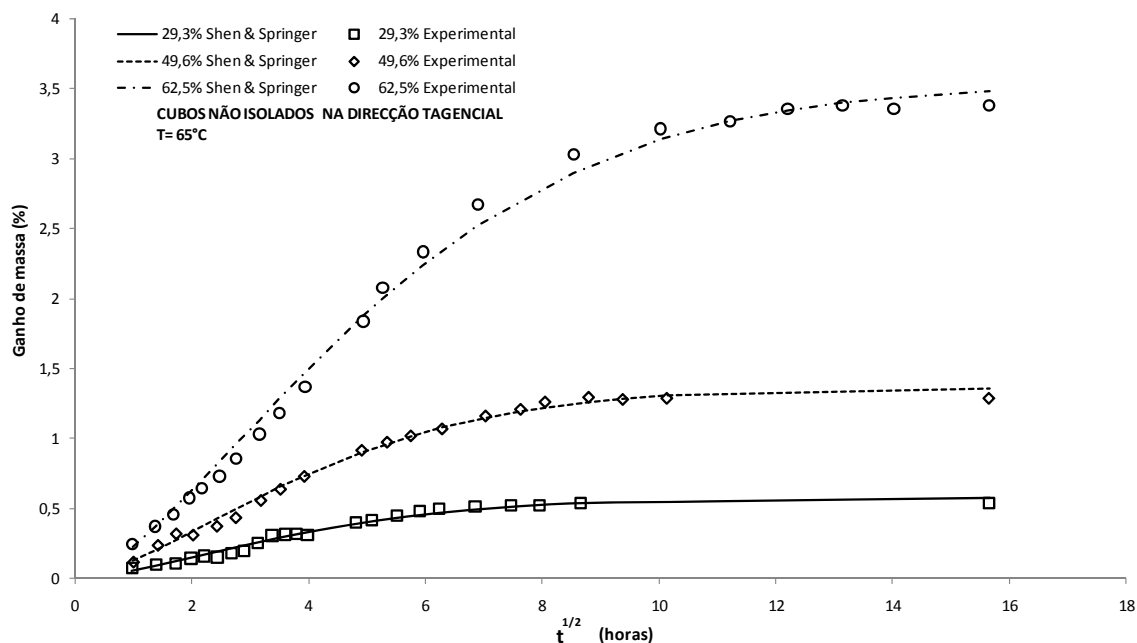


Figura 6.16 – Evolução do ganho de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR=29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

Como se pode observar pelas Tabelas 6.15, 6.16 e 6.17, os valores dos coeficientes de difusão são baixos quando comparados com os obtidos nos ensaios anteriores. Comparando os valores com os obtidos nos ensaios para *cubos não isolados*, verificam-se variações bastante elevadas, nomeadamente para $T=35^{\circ}\text{C}$, cerca de 2500%, correspondendo a um coeficiente de difusão cerca de 26 vezes inferior para *HR1* ($HR \cong 30\%$). Comparando os valores obtidos nos ensaios realizados a $T=35^{\circ}\text{C}$ com $T=65^{\circ}\text{C}$, (Figuras 6.14 e 6.16), respectivamente, verifica-se que com o aumento da temperatura de 35°C para 65°C , o coeficiente da difusão aumenta cerca de 13 vezes para *HR1* e 8 vezes para *HR2*.

De acordo com os resultados experimentais obtidos para os *cubos não isolados na direcção tangencial*, as curvas as evoluções de ganho de massa que melhor são descritas pelo modelo matemático de Shen & Springer, 1976, (Equação 6.1), são as obtidas para $T=35^{\circ}\text{C}$ e $T=65^{\circ}\text{C}$.

6.4.1.6 Paralelepípedos não isolados na direcção tangencial

Pela observação das Figuras 6.17, 6.18 e 6.19, que resultam dos ensaios efectuados com provetes na variante paralelepípedos não isolados na direcção tangencial, a 35°C, 50°C e 65°C, respectivamente, e tal como acontece nos ensaios para os *cubos não isolados na direcção tangencial*, estes têm valores diferentes, quando comparados com os obtidos nos ensaios efectuados para *paralelepípedos não isolados e paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal*. Nestes ensaios, a diferença para os ensaios com *cubos não isolados na direcção tangencial*, reside apenas, no comprimento nominal do provete na direcção longitudinal, sendo neste caso metade (Tabela 6.1).

Relativamente ao tempo que os provetes demoraram a saturar e em termos quantitativos, foi semelhante aos obtidos para os *cubos não isolados na direcção tangencial*.

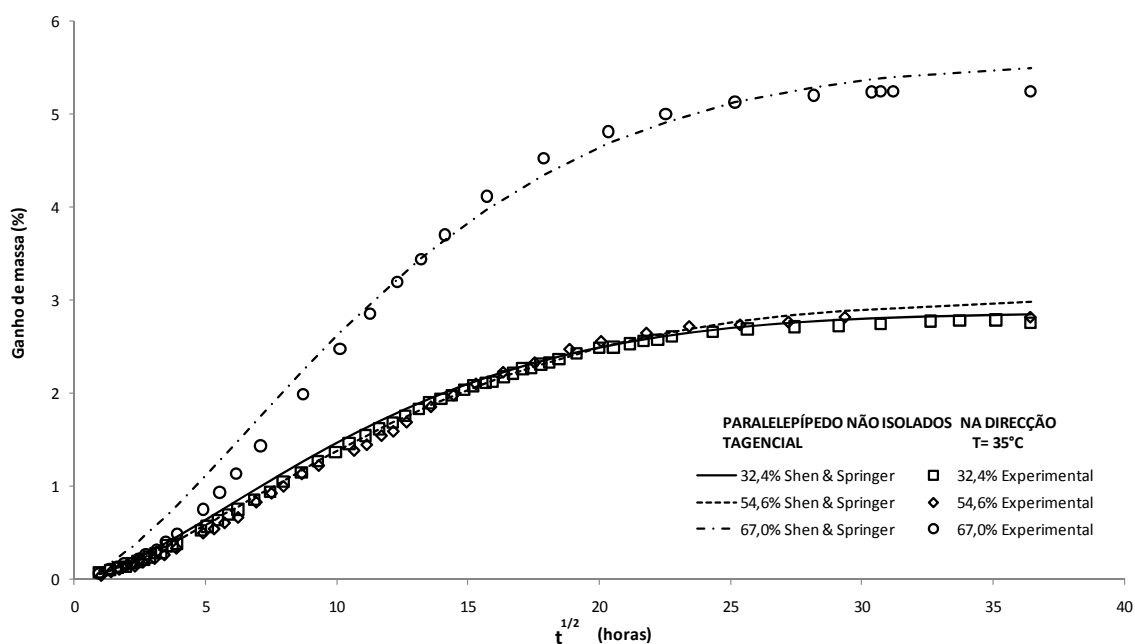


Figura 6.17 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: $T=35^{\circ}\text{C}$ e $HR= 32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

Tabela 6.18 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: $T=35^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$32,4 \pm 0,2$	$54,6 \pm 0,4$	$67,0 \pm 0,3$
Me (%)	2,870	3,037	5,573
D (mm^2/h)	0,173	0,143	0,149
h (mm)	19,51	19,88	19,65

Para o ensaio realizado a para $T=35^{\circ}\text{C}$, o valor do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta de $HR1$ ($HR \cong 30\%$) para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), em cerca de 6%, e de $HR2$ para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), em cerca de 80% (Tabela 6.18). Comparando os valores de Me com os obtidos para os *cubos não isolados na direcção tangencial* (Tabela 6.15), verifica-se uma variação de 14%, 16% e 8% para $HR1$, $HR2$ e $HR3$, respectivamente. Já os valores do coeficiente de difusão, são semelhantes.

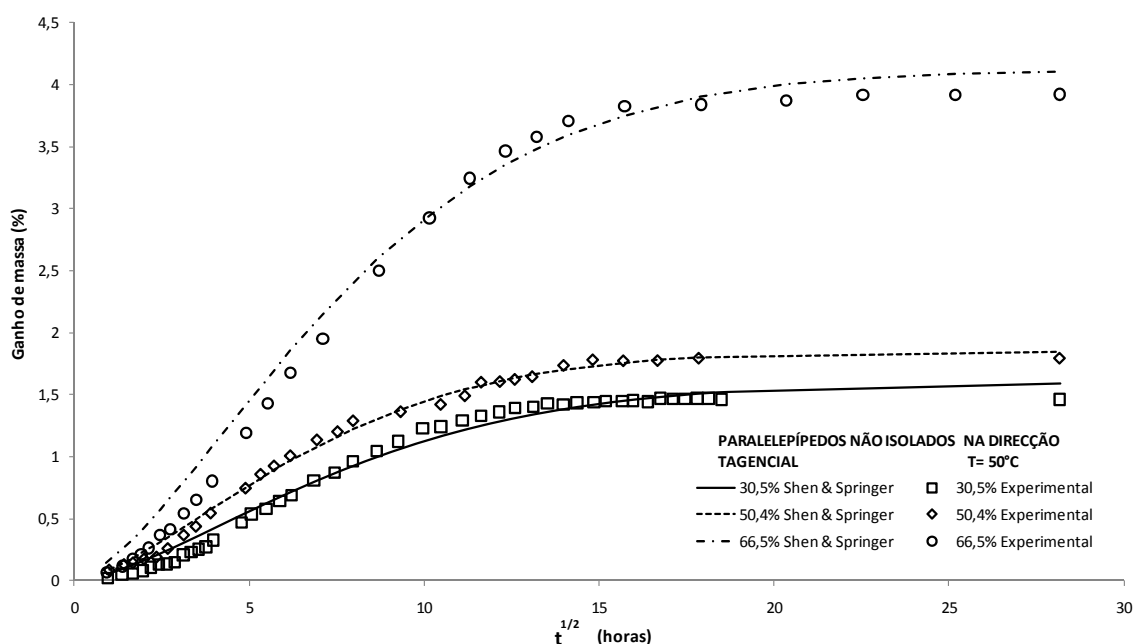


Figura 6.18 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR= 30,5\%$; $50,4\%$; $66,5\%$.

Tabela 6.19 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	1,600	1,849	4,117
D (mm^2/h)	0,359	0,489	1,292
h (mm)	19,74	19,88	19,64

O ensaio para $T=50^{\circ}\text{C}$, mostrou que o valor do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta significativamente de $HR2$ ($HR \cong 50\%$) para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), em 123% (Tabela 6.19). Comparando os valores de Me com os obtidos para os *cubos não isolados na direcção tangencial* (Tabela 6.16), verifica-se que a maior variação é para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), cerca de 17%. O mesmo acontece para o coeficiente de difusão, obtendo-se uma variação de 67%.

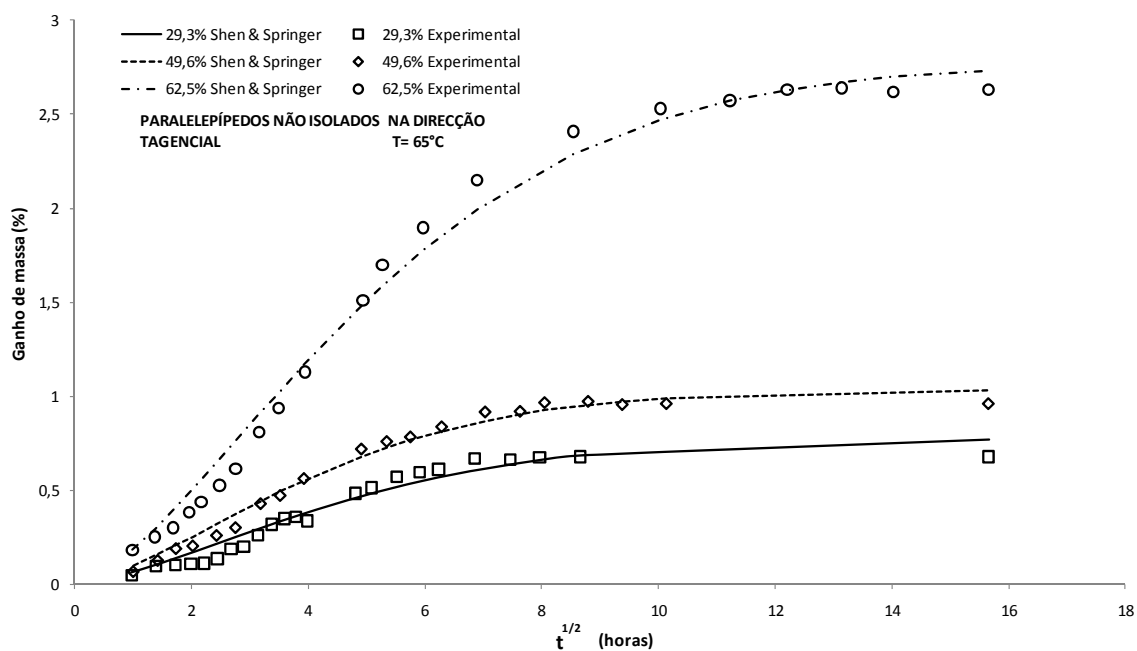


Figura 6.19 – Evolução do ganho de massa para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR= 29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

Tabela 6.20 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	0,773	1,034	2,766
D (mm^2/h)	1,010	1,292	0,810
h (mm)	19,56	20,10	19,86

Comparando os valores obtidos nos ensaios a $T=65^{\circ}\text{C}$ e $T=35^{\circ}\text{C}$, (Figuras 6.19 e 6.17) respectivamente, verifica-se que o aumento da temperatura de 35°C para 65°C , conduziu a um aumento do coeficiente da difusão aumenta cerca de 6 vezes para $HR1$ e 9 vezes para $HR2$. É de notar que estes aumentos são inferiores aos verificados nos *cubos* com o mesmo tipo de isolamento.

6.4.2 Influência da temperatura e da humidade relativa no coeficiente de difusão na adsorção

De seguida apresentar-se-ão comparações relativas aos valores dos coeficientes de difusão (D) quando influenciados pela temperatura e pela humidade relativa para os diferentes tipos de provetes. Cada ponto experimental registado, é o valor médio de quatro provetes da mesma variante (A , B e C).

Tabela 6.21 – Valores do coeficiente de difusão (D) para a adsorção, em mm^2/h .

Provete	HR 1			HR 2			HR 3		
	35°C	50°C	65°C	35°C	50°C	65°C	35°C	50°C	65°C
NC	2,663	4,508	4,845	1,693	4,449	8,643	1,504	4,036	10,213
NP	0,716	1,425	1,599	0,607	1,638	2,546	0,472	1,414	3,326
LC	2,795	4,614	4,809	1,760	4,530	8,144	1,370	3,722	8,994
LP	0,700	1,271	1,427	0,552	1,548	3,133	0,404	1,479	3,283
TC	0,104	0,344	1,397	0,164	0,517	1,260	0,151	0,390	0,772
TP	0,173	0,359	1,010	0,143	0,489	1,292	0,149	1,292	0,810

NC - Cubos não isolados

NP - Paralelepípedos não isolados

LC - Cubos não isolados na direcção longitudinal

LP - Paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal

TC - Cubos não isolados na direcção tangencial

TP - Paralelepípedos não isolados na direcção tangencial

Pela análise dos valores da Tabela 6.21 podemos concluir que o coeficiente de difusão (D), aumenta com o aumento da temperatura em todas as variantes de provetes, independentemente da humidade relativa. Verifica-se que os valores mais elevados correspondem à humidade relativa mais elevada ($HR3$) e temperatura (65°C). A velocidade de remoção da água a temperaturas mais baixas diminui uma vez que a energia fornecida para a evaporação da água é menor e, de um modo geral, as temperaturas mais elevadas podem aumentar a velocidade da remoção da água. A temperatura está relacionada com o fornecimento de energia para a evaporação da água e a humidade relativa com a capacidade do ar em receber maior ou menor quantidade de vapor de água com a remoção da água da superfície da madeira (Tsoumis, 1991)

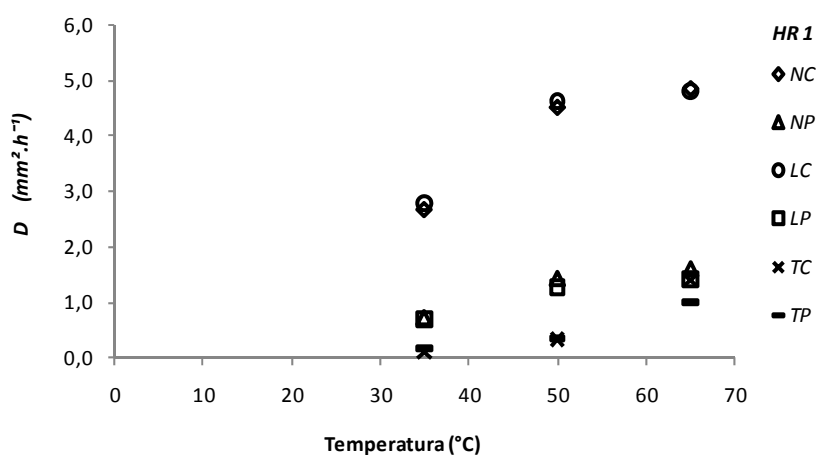


Figura 6.20 – Variação do coeficiente de difusão *versus* temperatura para $HR1$ ($HR \cong 30\%$).

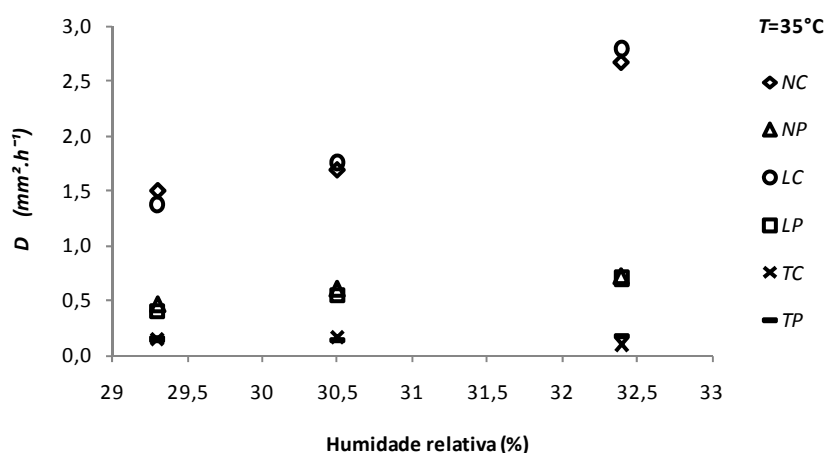


Figura 6.21 – Variação do coeficiente de difusão *versus* humidade relativa para $T=35^{\circ}\text{C}$.

A Figura 6.20 e 6.21, mostra que para $HR1$ ($HR \cong 30\%$), a influência do factor temperatura, de um modo geral, tende a manifestar-se de forma significativa quando a temperatura é elevada de 35°C para 50°C . Esta variação é quantificada em 70%, 65% e 230%, para cubos não isolados (NC), cubos não isolados da direcção longitudinal (LC) e cubos não isolados na direcção tangencial (TC), respectivamente. Para um aumento da temperatura de 50°C para 65°C , o coeficiente de difusão aumenta cerca de 8%, 4% e 306%, na mesma ordem de referência usada anteriormente. Como se pode constatar pela Tabela 6.21, os valores mais elevados correspondem aos NC e LC e não ultrapassam os $5 \text{ mm}^2/\text{h}$, sendo que o mais baixo é para provetes TC . Comparando a diferença do coeficiente de difusão entre os ensaios para os provetes NC e TC , observa-se uma variação substancial, aproximadamente 1210% e 250%, para $T=50^\circ\text{C}$ e $T=65^\circ\text{C}$, respectivamente. Para os ensaios com provetes LC e TC , as variações são de aproximadamente 1241% e 245%, para $T=50^\circ\text{C}$ e $T=65^\circ\text{C}$ respectivamente.

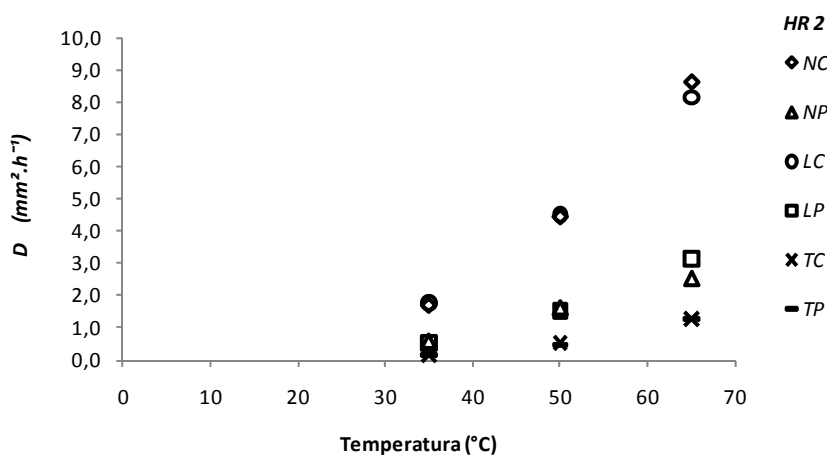


Figura 6.22 – Variação do coeficiente de difusão *versus* temperatura para $HR2$ ($HR \cong 50\%$).

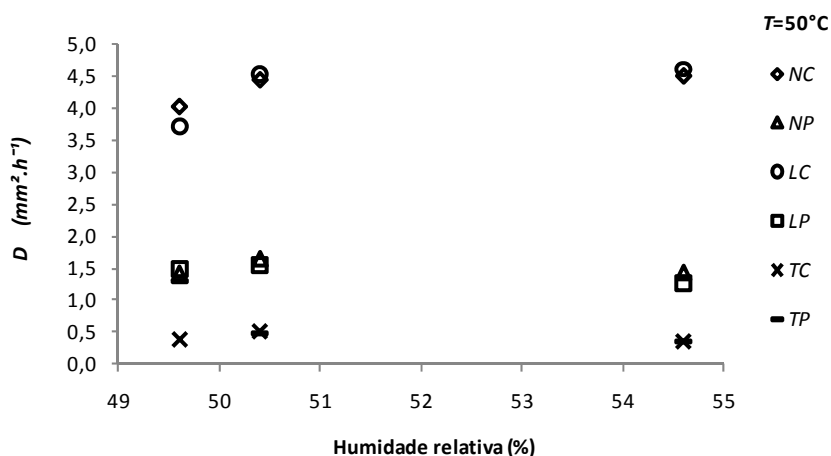


Figura 6.23 – Variação do coeficiente de difusão *versus* humidade relativa para $T=50^{\circ}\text{C}$.

Para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), a influência do factor temperatura, de um modo geral, aumenta de forma mais significativa que no caso anterior ($HR1$ da Figura 6.20) quando a temperatura é elevada de 35°C para 50°C . A variação é aproximadamente de 163%, 157% e 215%, para cubos não isolados (NC), cubos não isolados da direcção longitudinal (LC) e cubos não isolados na direcção tangencial (TC) respectivamente. Para um aumento da temperatura de 50°C para 65°C , o coeficiente de difusão aumenta em cerca de 94%, 80% e 144%, na mesma ordem de referência usada anteriormente. Os valores do coeficiente de difusão mais elevados não ultrapassam os $9\text{ mm}^2/\text{h}$. Comparando a diferença do coeficiente de difusão entre os provetes NC e TC , observa-se uma variação substancial, aproximadamente 760% e 585%, para $T=50^{\circ}\text{C}$ e $T=65^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Para os ensaios com provetes LC e TC , essas variações são aproximadamente 776% e 546%, para $T=50^{\circ}\text{C}$ e $T=65^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

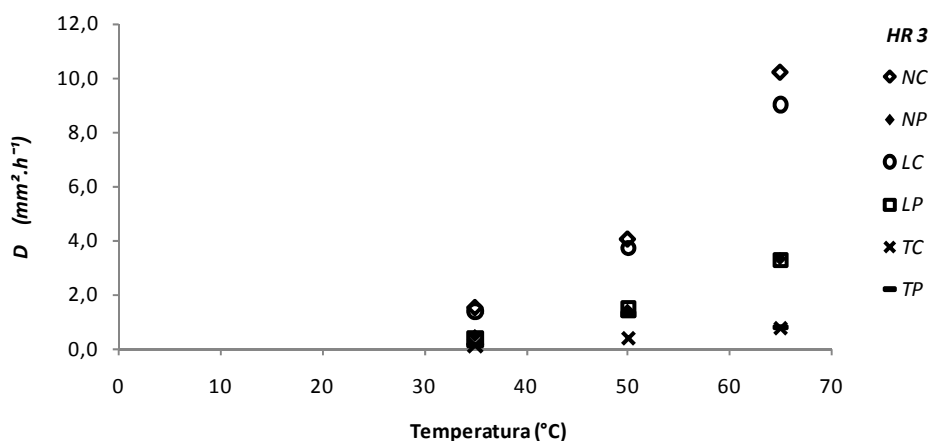


Figura 6.24 – Variação do coeficiente de difusão *versus* temperatura para $HR3$ ($HR \cong 65\%$).

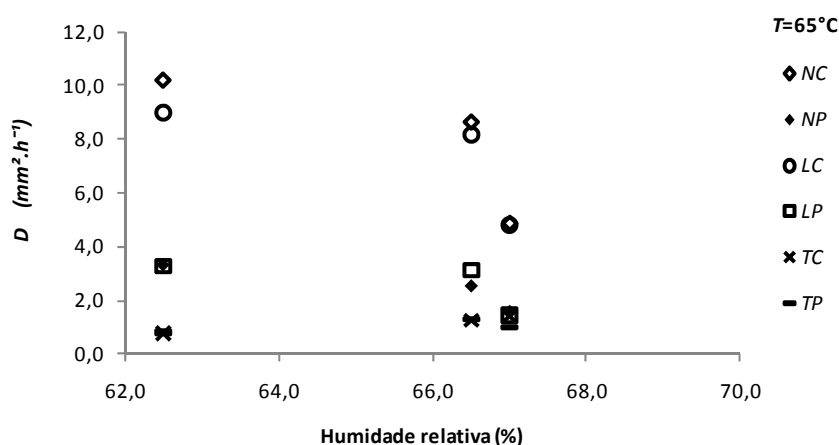


Figura 6.25 – Variação do coeficiente de difusão *versus* humidade relativa para $T=65^{\circ}\text{C}$.

Para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), a influência do factor temperatura é de um modo geral, ainda mais acentuada que nos casos anteriores. Quando a temperatura é elevada de 35°C para 50°C , essa variação é aproximadamente de 163%, 157% e 215%, para *cubos não isolados (NC)*, *cubos não isolados da direcção longitudinal (LC)* e *cubos não isolados na direcção tangencial (TC)*, respectivamente. Para um aumento da temperatura de 50°C para 65°C , o coeficiente de difusão aumenta cerca de 8%, 4% e 306%, na mesma ordem de referência usada anteriormente. Quando a temperatura de 50°C para 65°C , o coeficiente de difusão aumenta cerca de 94%, 80% e 144%, na mesma ordem de referência usada anteriormente. Os valores mais elevados não ultrapassam os $9 \text{ mm}^2/\text{h}$.

Comparando os valores do coeficiente de difusão entre ensaios com provetes *NC* e *TC*, observa-se uma variação substancial de aproximadamente 760% e 585% para $T=50^{\circ}\text{C}$ e $T=65^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Relativamente às diferentes geometrias dos provetes (*cubos, C* e *paralelepípedos, P*), o coeficiente de difusão tem uma variação acentuada. Para *provetes não isolados* a $T=65^{\circ}$ e $HR1$, verifica-se uma variação de 203%; em $HR2$, uma variação de 240% e em $HR3$, uma variação de 207%. Para *provetes não isolados na direcção longitudinal* a $T=65^{\circ}\text{C}$, e $HR1$, verifica-se uma variação de 237%; em $HR2$, uma variação de 160% e em $HR3$, uma variação de 173%. Para *provetes não isolados na direcção tangencial* a $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR1$, verifica-se uma variação de 38%; em $HR2$, uma variação de 2% e em $HR3$, uma variação de 1%.

Ao longo da análise dos resultados, foi possível constatar que a fracção da difusão é aumentada quando a temperatura é elevada de 35°C para 65°C. Assim, para *HR1* ($HR \cong 30\%$) e em provetes *NC* (*cubos não isolados*) o aumento é de aproximadamente 2 vezes, em provetes *LC* (*cubos não isolados na direcção longitudinal*) é de aproximadamente 2 vezes, e em provetes *TC* (*cubos não isolados na direcção tangencial*), é de aproximadamente 13 vezes. A fracção verificada para *HR2* ($HR \cong 50\%$) em provetes *NC* é de 5 vezes, em provetes *LC* de é aproximadamente 5 vezes e em provetes *TC*, é de aproximadamente 8 vezes. Para *HR3* ($HR \cong 65\%$) e para provetes *NC* a fracção é aumentada em 7 vezes, em provetes *LC* é aproximadamente 7 vezes superior, e em provetes *TC*, é aproximadamente de 5 vezes.

6.4.3 Dessorção (secagem)

De seguida são apresentados os resultados experimentais, bem como os obtidos pelo modelo matemático de Shen & Springer, 1976, que ilustram a perda de massa, em percentagem *versus* a raiz quadrada do tempo, em horas. De um modo geral, os resultados apresentados para as diferentes temperaturas (35, 50 e 65°C) são idênticos (em termos qualitativos).

Dos resultados que se seguem, observa-se que para todos os casos estudados, a taxa de perda de massa diminui com o aumento da temperatura, independentemente das diferentes humidades relativas (*HR*) a que se efectua a dessecagem. Salienta-se que o aumento da temperatura, reduz o tempo necessário para atingir o equilíbrio (tempo que demora os provetes a secar), ou seja a atingir o valor de *Me*.

Segundo Tsoumis (1991), a velocidade de remoção da água a temperaturas mais baixas diminui uma vez que a energia fornecida para a evaporação da água é menor e, de um modo geral, as temperaturas mais elevadas podem aumentar a velocidade da remoção da água. A temperatura está relacionada com o fornecimento de energia para a evaporação da água e a humidade relativa com a capacidade do ar em receber maior ou menor quantidade de vapor de água com a remoção da água da superfície da madeira.

Neste contexto e em todos os ensaios de dessecagem (secagem), foram utilizados saís de sílica gel, de modo a criar atmosferas de humidade relativa nula.

Os provetes são os mesmos que previamente foram utilizados nos ensaios de adsorção. Deste modo, os provetes encontram-se saturados para uma determinada condição de humidade relativa e temperatura. Assim, os valores de Me apresentados de seguida correspondem à perda de massa desde a saturação até ao equilíbrio, ou seja, remoção total de humidade no provete para cada condição estudada.

6.4.3.1 Provetes cubos não isolados

Pela análise da Figura 6.26, do ensaio efectuado a 35°C, observa-se que a perda de massa para $HR1$ ($HR \cong 30\%$) foi de 3,76%, para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), de 5,2% e para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), de 7,68% (Tabela 6.22). Comparando os valores de Me com os obtidos no caso adsorção (Tabela 6.3), verifica-se que são superiores (em módulo). De um modo geral, este efeito verifica-se para todos os ensaios efectuados. Isto pode ser justificado pela maior disponibilidade dos sais de sílica gel em absorverem uma maior quantidade de vapor de água dos provetes, do que a madeira. Torna-se óbvio, que em todos os ensaios, os valores de perda de massa seja maior para $HR3$ que para $HR2$, assim como estes serão superiores aos valores resultantes para $HR1$. Pois estes valores estão relacionados com uma determinada humidade relativa, e portanto, para um maior ganho de massa (na adsorção), resultará uma maior perda de massa na dessorção.

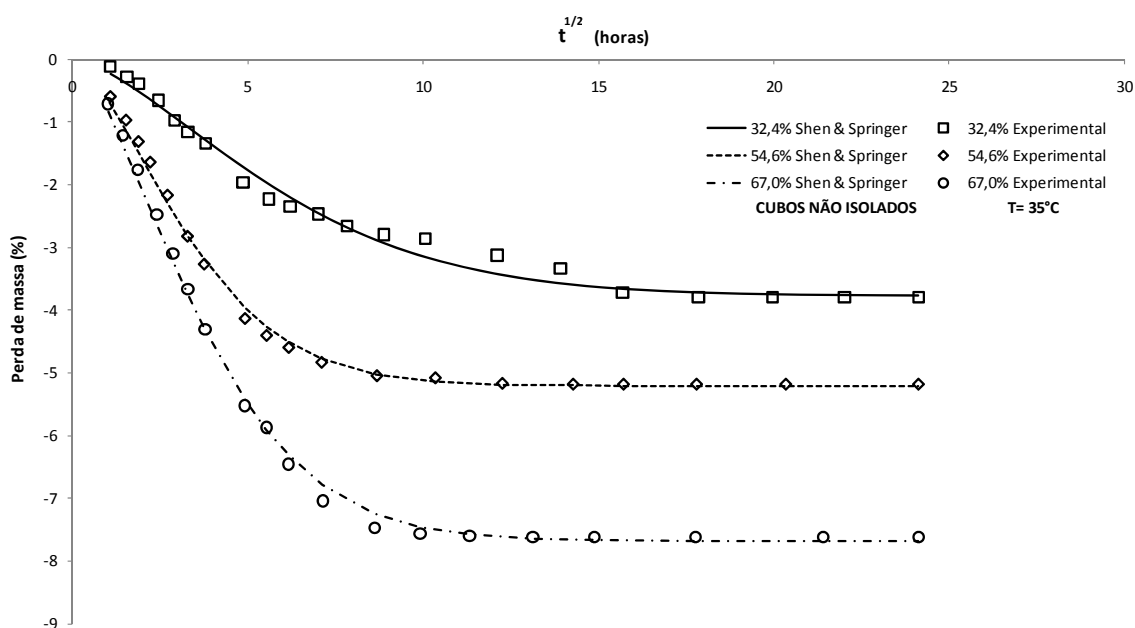


Figura 6.26 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados: $T=35^{\circ}\text{C}$ e $HR= 32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

Tabela 6.22 – Resultados experimentais para cubos não isolados: $T=35^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$32,4 \pm 0,2$	$54,6 \pm 0,4$	$67,0 \pm 0,3$
Me (%)	-3,764	-5,205	-7,683
D (mm^2/h)	0,610	1,872	1,554
h (mm)	19,91	19,96	20,11

Da Figura 6.26, referente ao ensaio à temperatura de 35°C , observa-se que a concentração de água no equilíbrio (Me) aumenta (em módulo), cerca de 38% e 48%, quando passamos de $HR1$ ($HR \cong 30\%$) para $HR2$ ($HR \cong 50\%$) e de $HR2$ para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), respectivamente.

Relativamente ao tempo que os provetes demoram a atingir o patamar de equilíbrio, este diminui com o aumento da temperatura (energia fornecida). Para $T=35^{\circ}\text{C}$ (Figura 6.22), o tempo é de aproximadamente 325 horas, 170 horas e 170 horas, respectivamente para $HR1$, $HR2$ e $HR3$. Para $T=50^{\circ}\text{C}$ (Figura 6.27), o tempo necessário para o equilíbrio é menor em relação ao anterior, sendo aproximadamente de 145 horas, 90 horas e 90 horas, respectivamente para $HR1$, $HR2$ e $HR3$. Para $T=65^{\circ}\text{C}$ (Figura 6.28), o tempo para o equilíbrio diminui em relação ao anterior (Figura 6.27), sendo aproximadamente de 120 horas, 65 horas e 50 horas, respectivamente para $HR1$, $HR2$ e $HR3$.

Observa-se, também, que alguns pontos experimentais nas proximidades do equilíbrio, dispersam em relação aos valores obtidos pelo modelo matemático de Shen & Springer, 1976. Este facto, é devido à necessária troca dos sais de sílica gel, por se encontrarem saturados.

Tabela 6.23 – Resultados experimentais para cubos não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	-3,511	-4,447	-7,043
D (mm^2/h)	1,716	3,792	2,877
h (mm)	20,09	20,03	20,07

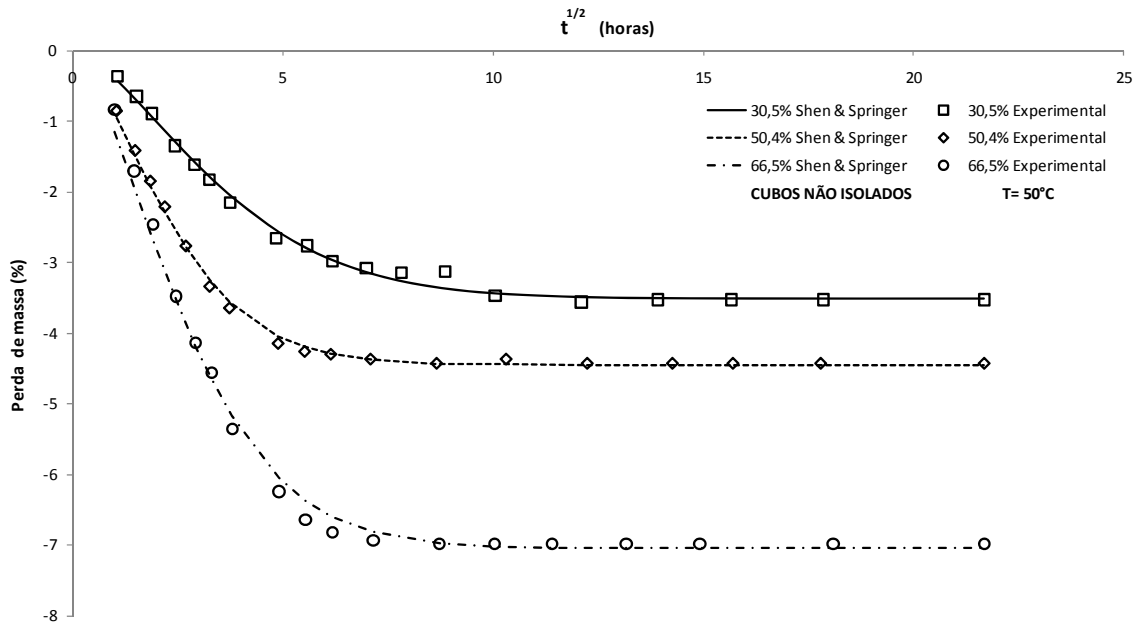


Figura 6.27 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR= 30,5\%$; $50,4\%$; $66,5\%$.

Os valores obtidos do ensaio efectuado a 50°C e representados na Figura 6.27, observa-se que a concentração de água no equilíbrio (Me) aumenta (em módulo) cerca de 27% e 58%, quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ para $HR2$ e de $HR2$ para $HR3$, respectivamente.

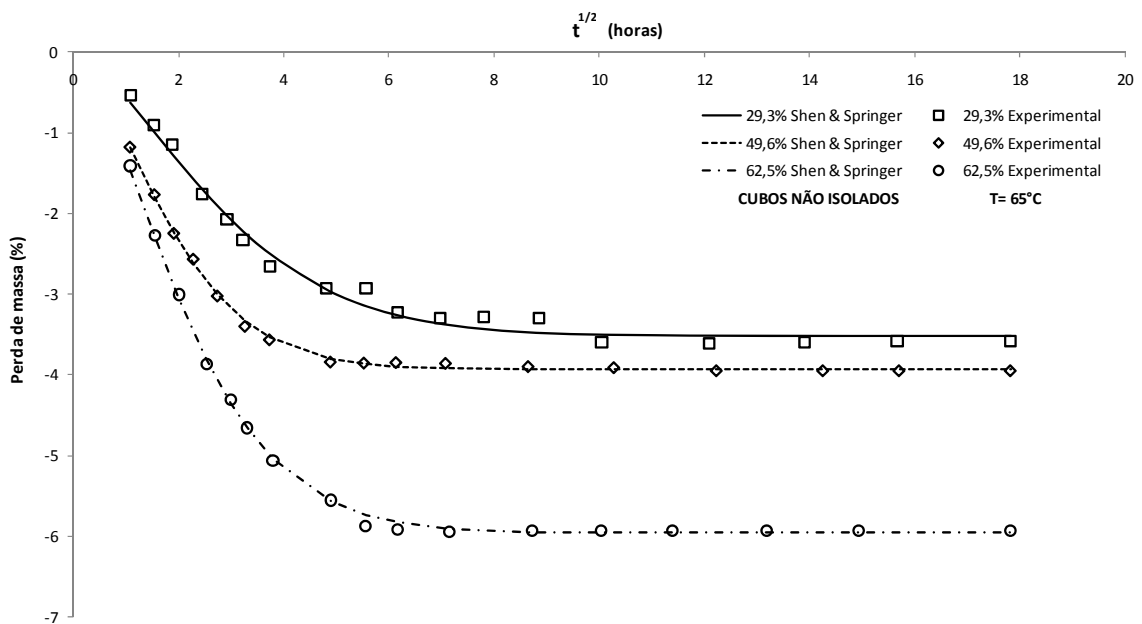


Figura 6.28 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR= 29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

Tabela 6.24 – Resultados experimentais para cubos não isolados: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	-3,512	-3,927	-5,952
D (mm^2/h)	2,698	6,127	4,528
h (mm)	20,05	19,99	20,02

A Figura 6.28 ilustra os resultados obtidos no ensaio a 65°C . É possível observar que a concentração de água no equilíbrio (Me) aumenta (em módulo) cerca de 12% e 52%, quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ para $HR2$ e de $HR2$ para $HR3$, respectivamente.

Relativamente ao coeficiente de difusão, como se pode observar nas Tabelas 6.22, 6.23 e 6.24, e quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ para $HR3$ a $T=35^{\circ}\text{C}$, este aumenta 154%. Para as temperaturas $T=50^{\circ}\text{C}$ e $T=65^{\circ}\text{C}$, o coeficiente de difusão aumenta em 68%.

6.4.3.2 Paralelepípedos não isolados

Pela análise das Figuras 6.29, 6.30 e 6.31, constata-se que os valores experimentais seguem a mesma tendência no que diz respeito à variação do teor de humidade no equilíbrio quando comparados aos valores obtidos para os *cubos não isolados*. Foram obtidos valores idênticos como se pode observar nas tabelas que a seguir se apresentam. Nestes ensaios verifica-se também uma semelhança idêntica no que diz respeito ao tempo necessário para atingir o valor do teor de humidade no equilíbrio (Me).

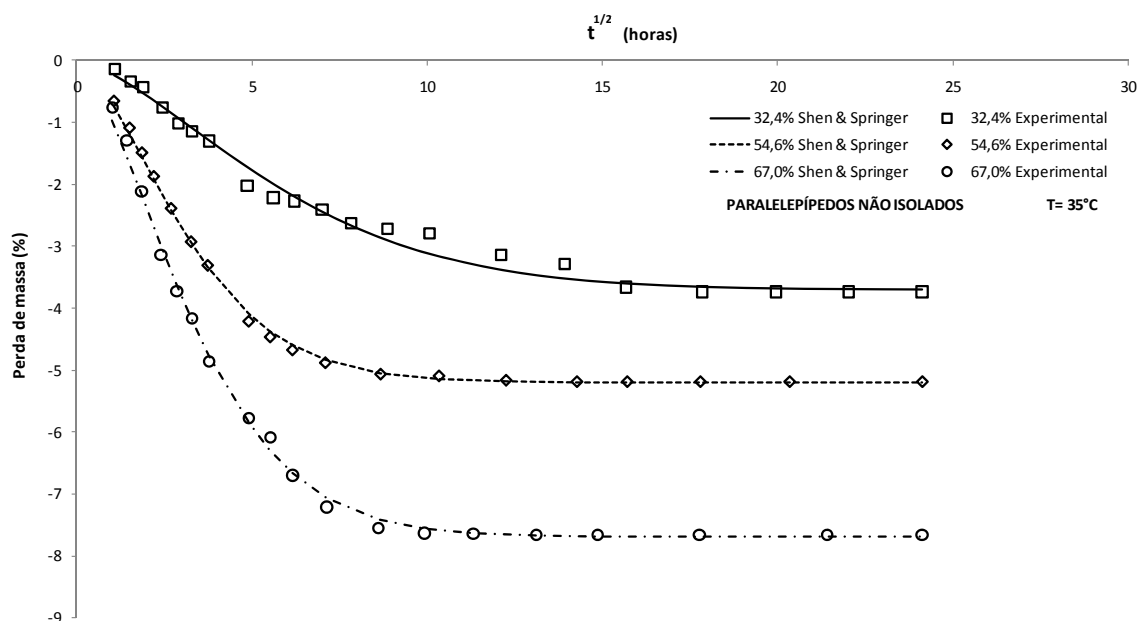


Figura 6.29 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados: $T=35^{\circ}\text{C}$ e $HR= 32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

Tabela 6.25 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: $T=35^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$32,4 \pm 0,2$	$54,6 \pm 0,4$	$67,0 \pm 0,3$
Me (%)	-3,693	-5,195	-7,681
D (mm^2/h)	0,168	0,558	0,501
h (mm)	10,31	10,35	10,28

Pela Tabela 6.25, os valores de concentração de água no equilíbrio (Me) aumentam (em módulo) cerca de 41% e 48%, quando passamos de $HR1$ para $HR2$ e de $HR2$ para $HR3$, respectivamente. Estes valores de Me , não são muito diferentes quando comparados com os obtidos para os *cubos não isolados* à mesma temperatura (Tabela 6.22). Ainda através da Tabela 6.25, verifica-se que o coeficiente de difusão diminui significativamente quando comparado com os valores obtidos para os *cubos não isolados* (Tabela 6.22). Esta variação é aproximadamente de 210% para $HR3$ ($HR \cong 65\%$).

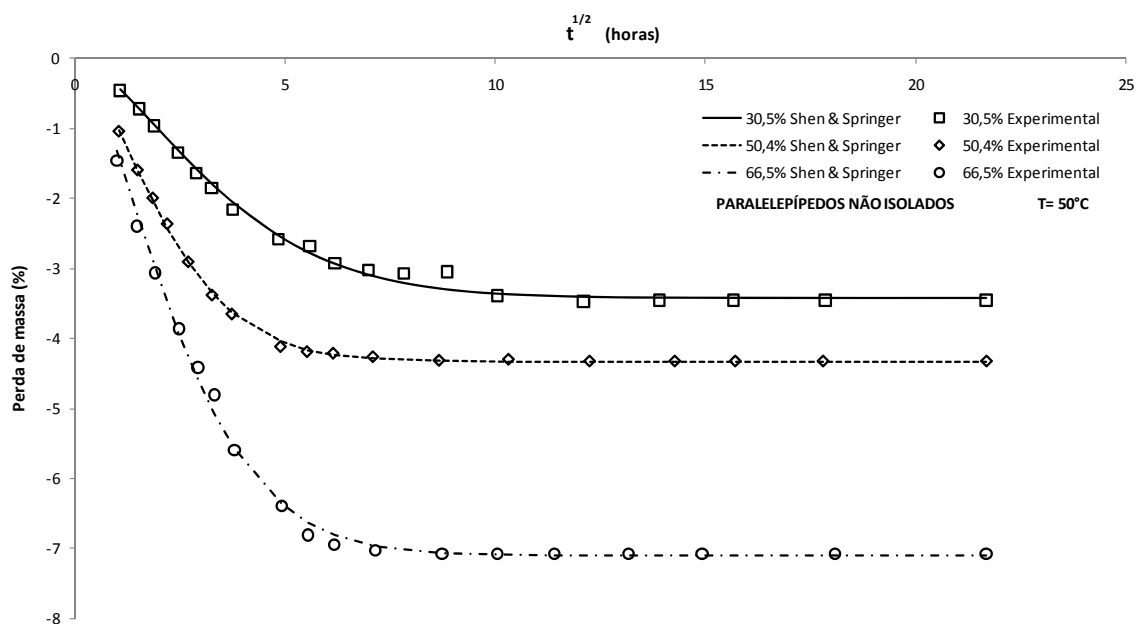


Figura 6.30 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR= 30,5\%$; $50,4\%$; $66,5\%$.

Tabela 6.26 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	-3,423	-4,329	-7,099
D (mm^2/h)	0,473	1,175	0,914
h (mm)	10,26	10,25	10,29

Tal como aconteceu com os *cubos não isolados* a $T=50^{\circ}\text{C}$, neste ensaio forma obtidos tempos de saturação idênticos. Pela Tabela 6.26, os valores de concentração de água no equilíbrio (Me) aumentam (em módulo) cerca de 26% e 64%, quando a umidade relativa aumenta de $HR1$ para $HR2$ e de $HR2$ para $HR3$, respectivamente. Estes valores mostram-se idênticos quando comparados com os obtidos para os *cubos não isolados* à mesma temperatura (Tabela 6.23).

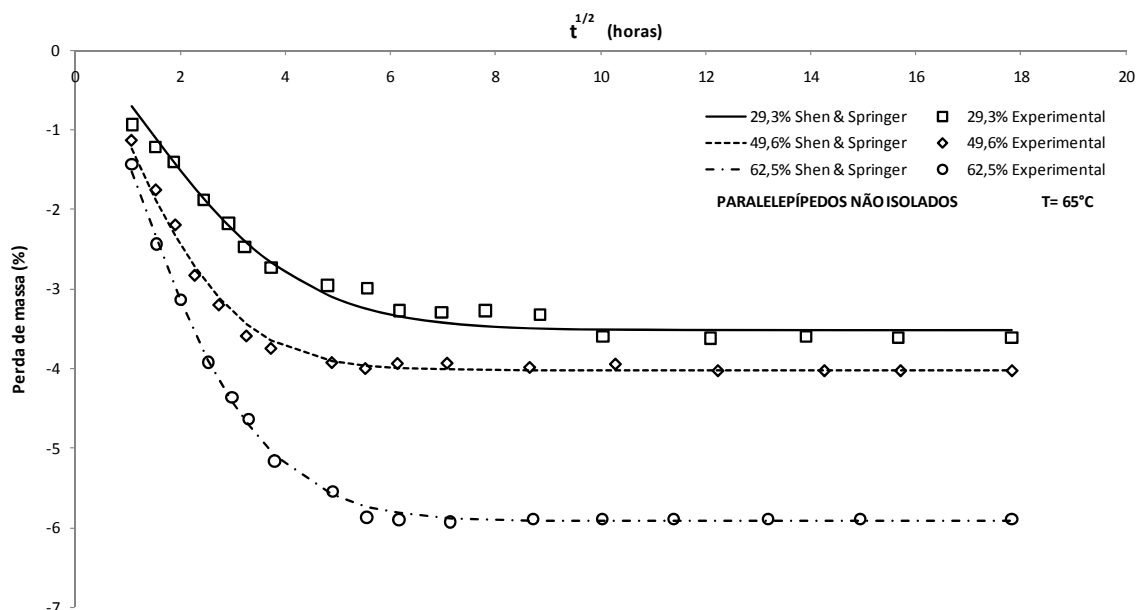


Figura 6.31 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR= 29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

Tabela 6.27 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	-3,520	-4,017	-5,914
D (mm^2/h)	0,860	1,672	1,231
h (mm)	10,34	10,19	10,09

Pela Figura 6.31, referente ao ensaio efectuado a 65°C , observa-se que a concentração de água no equilíbrio (Me) aumenta (em módulo) cerca de 107%, quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ para $HR3$.

Relativamente ao coeficiente de difusão, como se pode verificar nas Tabelas 6.25, 6.26 e 6.27, quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ para $HR3$ e para $T=35^{\circ}\text{C}$, aumenta 197%. Para $T=50^{\circ}\text{C}$, o coeficiente de difusão aumenta 93% e para $T=65^{\circ}\text{C}$, este aumenta 43%.

Considerando $HR2$, verifica-se que o aumento da temperatura de 35°C para 65°C , aumenta a fracção do coeficiente da difusão aumenta cerca de 3 vezes.

6.4.3.3 Provetes cubos não isolados na direcção longitudinal

Nas Figuras 6.32, 6.33 e 6.34, apresentam-se os resultados dos ensaios efectuados com provetes da variante cubos não isolados na direcção longitudinal. Observa-se que estes resultados seguem a mesma tendência no que diz respeito à variação do teor de humidade no equilíbrio quando comparados com os resultados obtidos para os provetes da variante *cubos não isolados*. No entanto, os valores são inferiores, como se pode constatar nas Tabelas 6.28, 6.29. e 6.30.

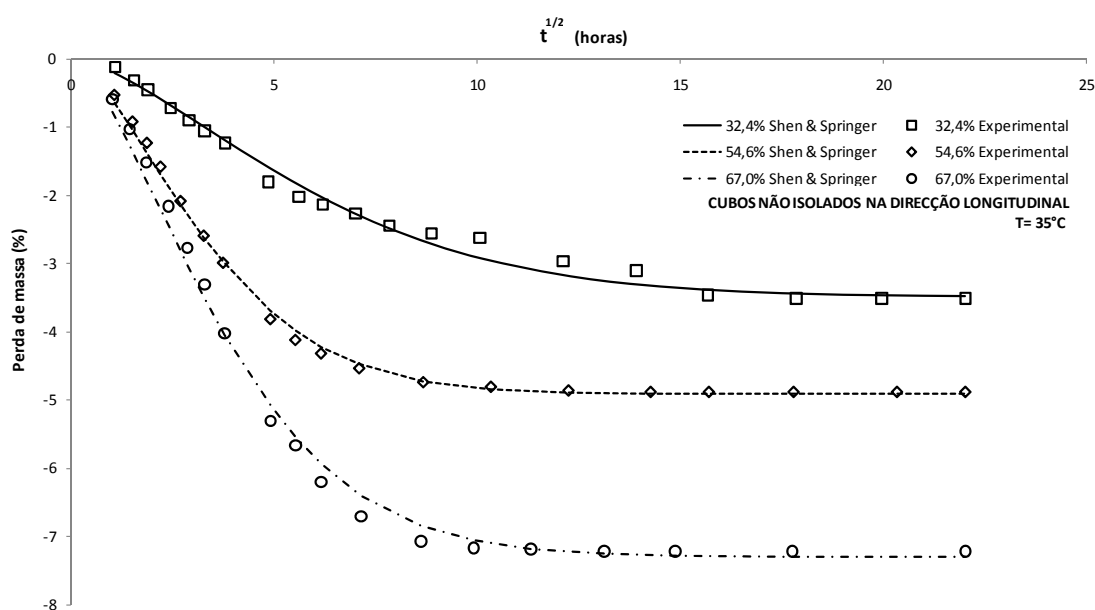


Figura 6.32 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=35^{\circ}\text{C}$ e $HR=32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

Tabela 6.28 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=35^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$32,4 \pm 0,2$	$54,6 \pm 0,4$	$67,0 \pm 0,3$
Me (%)	-3,480	-4,908	-7,295
D (mm^2/h)	0,614	1,845	1,482
h (mm)	19,95	20,06	19,96

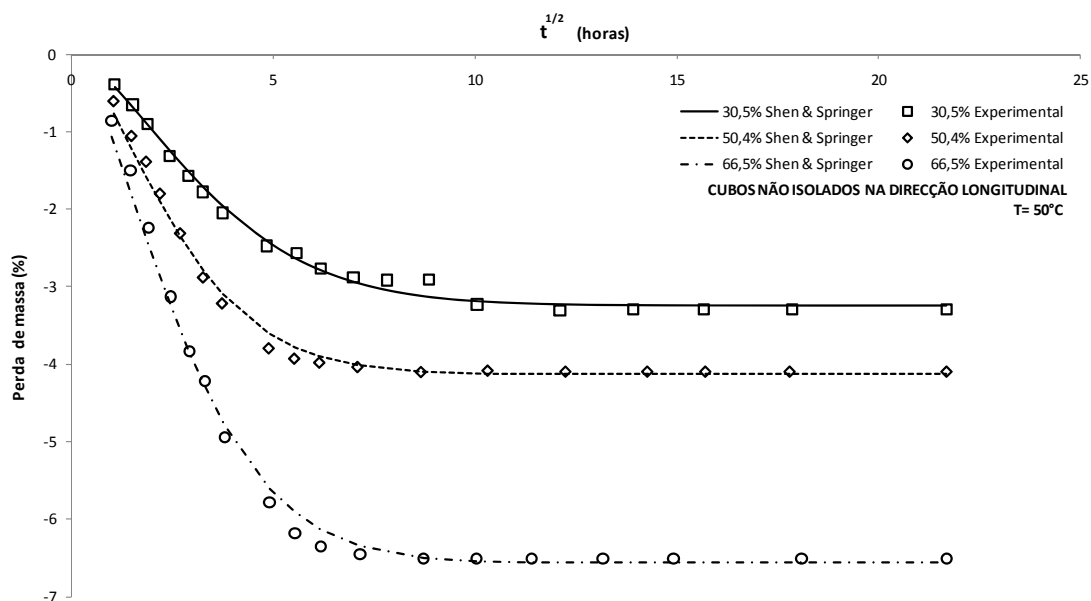


Figura 6.33 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados na direção longitudinal: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR= 30,5\%$; $50,4\%$; $66,5\%$.

Tabela 6.29 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direção longitudinal: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	-3,246	-4,128	-6,565
D (mm^2/h)	1,814	3,046	2,820
h (mm)	19,96	19,90	20,13

Pela análise da Figura 6.32, 6.33 e 6.34, verifica-se que a concentração de água no equilíbrio (Me) aumenta (em módulo) de forma idêntica quando comparada com a obtida para os *cubos não isolados*. O tempo para atingir o valor de Me diminui com o aumento da temperatura (energia fornecida). Para $T=35^{\circ}\text{C}$, $T=50^{\circ}\text{C}$ e $T=65^{\circ}\text{C}$, o tempo é idêntico ao obtido para os *cubos não isolados*.

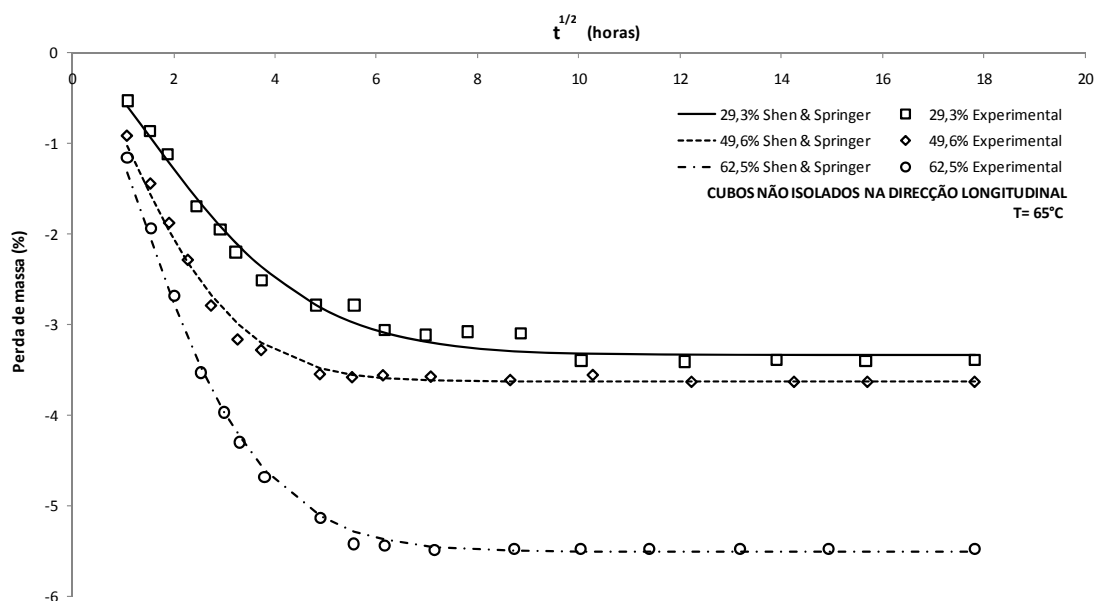


Figura 6.34 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR=29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

Tabela 6.30 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção longitudinal: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; Espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	-3,337	-3,626	-5,503
D (mm^2/h)	2,652	5,598	4,323
h (mm)	19,94	20,10	19,99

Como se pode verificar nas Tabelas 6.28, 6.29 e 6.30, quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ para $HR3$ e para $T=35^{\circ}\text{C}$, aumenta 141%. Na situação em que $T=50^{\circ}\text{C}$, o coeficiente de difusão aumenta 55% e para $T=65^{\circ}\text{C}$, verifica-se um aumento de 63%.

Considerando $HR1$, $HR2$ e $HR3$ verifica-se que o aumento da temperatura de 35°C para 65°C , aumenta a fracção do coeficiente da difusão em cerca de 4 vezes, 3 vezes e 3 vezes, respectivamente.

6.4.3.4 Provetes paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal

Tal como verificado nos casos anteriores, os provetes da variante *paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal*, produziram valores para a variação do teor de humidade no equilíbrio que seguem a mesma tendência que foi verificada para os provetes da variante *paralelepípedos não isolados* (Figuras 6.35, 6.36 e 6.37). Nestes ensaios verifica-se também uma semelhança respeitante ao tempo necessário para atingir o valor teor de humidade no equilíbrio (Me).

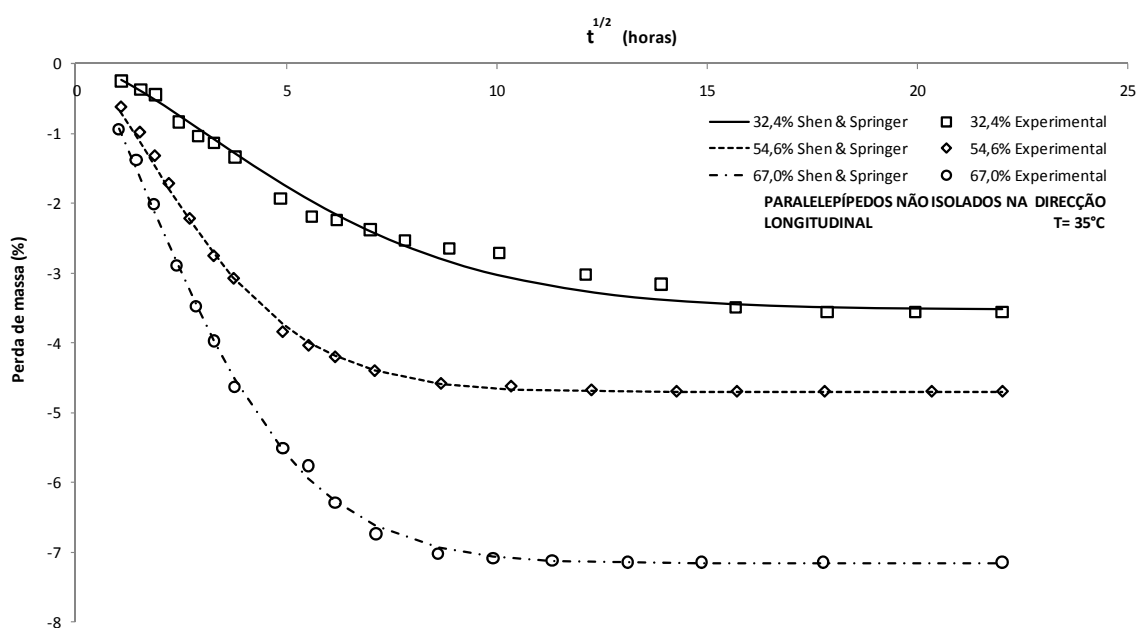


Figura 6.35 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: $T=35^{\circ}\text{C}$ e $HR= 32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

Tabela 6.31 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: $T=35^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; Espessura do provete, h .

HR (%)	$32,4 \pm 0,2$	$54,6 \pm 0,4$	$67,0 \pm 0,3$
Me (%)	-3,511	-4,701	-7,155
D (mm^2/h)	0,185	0,564	0,490
h (mm)	10,34	10,26	9,95

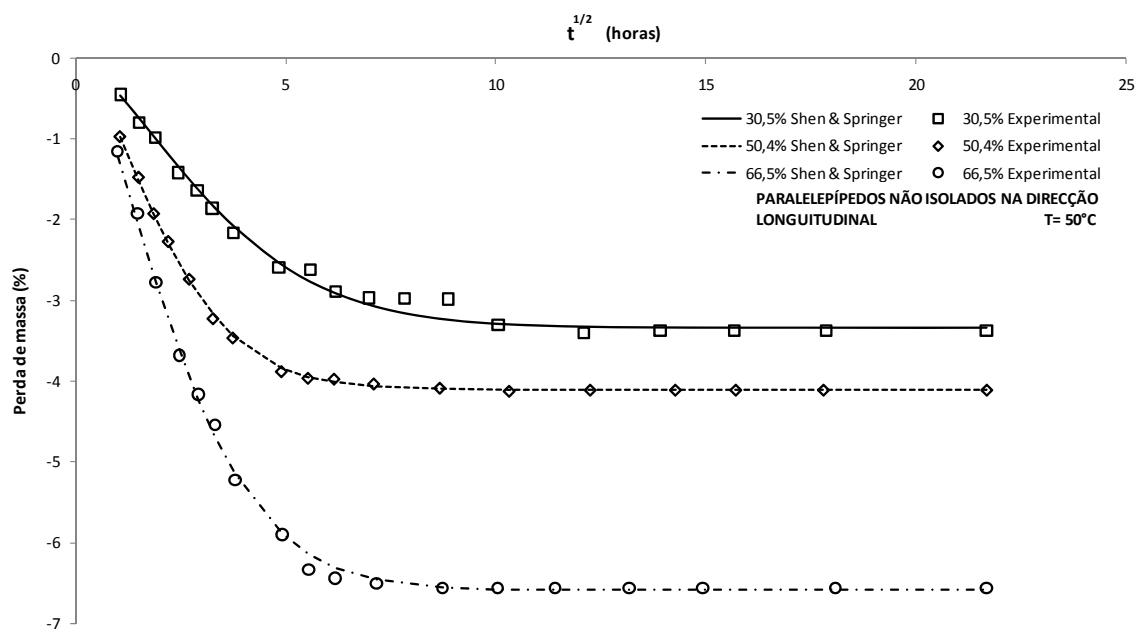


Figura 6.36 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direção longitudinal: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR= 30,5\%; 50,4\%; 66,5\%$.

Tabela 6.32 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direção longitudinal: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; Espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	-3,337	-4,104	-6,589
D (mm^2/h)	0,490	1,144	0,887
h (mm)	10,10	10,13	10,18

Das Figuras 6.35, 6.36 e 6.37, verifica-se que o valor do teor de água no equilíbrio (Me) aumenta (em módulo), de forma idêntica quando comparado com o obtido para os *paralelepípedos não isolados*.

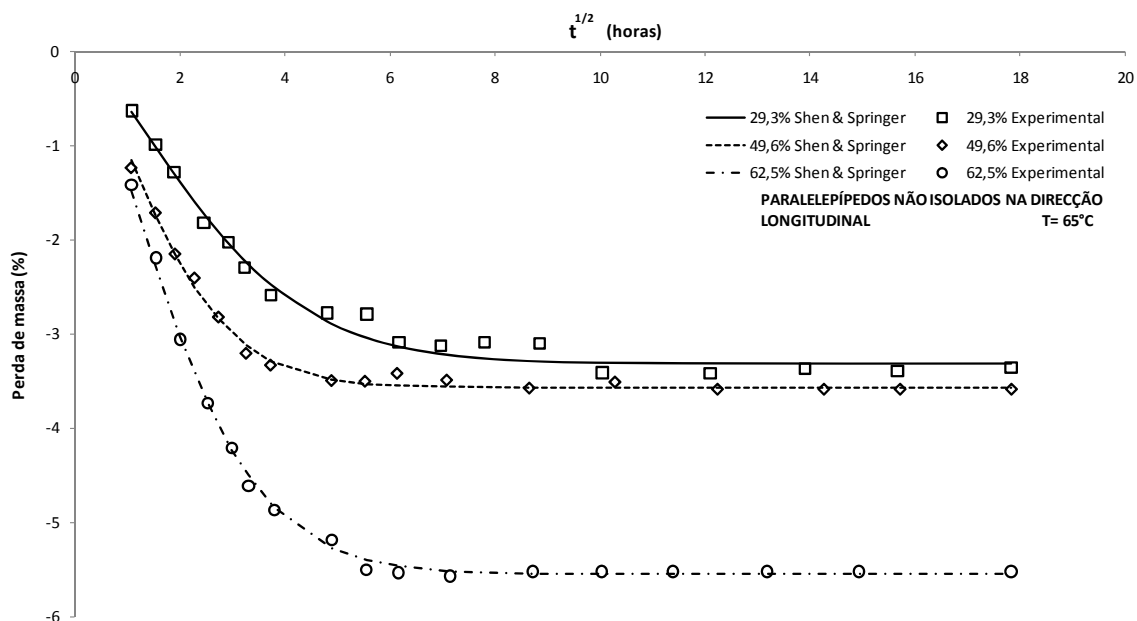


Figura 6.37 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR= 29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

Tabela 6.33 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; Espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	-3,314	-3,571	-5,546
D (mm^2/h)	0,788	1,798	1,337
h (mm)	10,11	10,15	10,21

Pela análise das Tabelas 6.31, 6.32 e 6.33, quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ para $HR3$ e para $T=35^{\circ}\text{C}$, o coeficiente de difusão aumenta 165%. Para $T=50^{\circ}\text{C}$, o coeficiente de difusão aumenta 81% e para $T=65^{\circ}\text{C}$, aumenta 70%.

6.4.3.5 Cubos não isolados na direcção tangencial

Das Figuras 6.38, 6.39 e 6.40, referentes aos ensaios efectuados a 35°C , 50°C e 65°C , para os provetes da variante *cubos não isolados na direcção tangencial*, observa-se que os valores do tempo necessário para o equilíbrio (Me) e do coeficiente de difusão (D), são

significativamente diferentes, quando comparados com os valores obtidos para *cubos não isolados e cubos não isolados na direcção longitudinal*.

O tempo necessário para o equilíbrio (secagem) é muito superior face aos provetes anteriores. Em termos quantitativos, forma necessárias desde 840 horas e as 1520 horas para se atingir o equilíbrio.

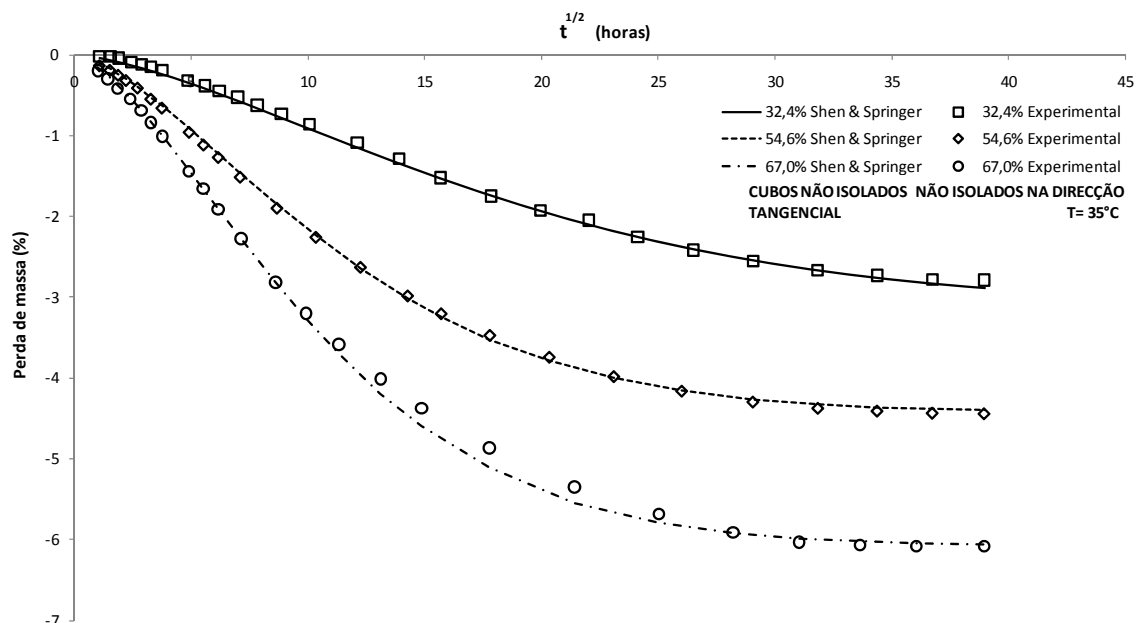


Figura 6.38 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=35^{\circ}\text{C}$ e $HR=32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

Tabela 6.34 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=35^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; Espessura do provete, h .

HR (%)	$32,4 \pm 0,2$	$54,6 \pm 0,4$	$67,0 \pm 0,3$
Me (%)	-3,098	-4,421	-6,070
D (mm^2/h)	0,067	0,164	0,201
h (mm)	20,15	19,90	20,53

Para $T=35^{\circ}\text{C}$, o valor do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta (em módulo), quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ ($HR \cong 30\%$) para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), em cerca de 43%. Quando a humidade relativa aumenta de $HR2$ para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), o aumento é de 37%. O coeficiente de difusão aumenta também com o aumento da humidade

relativa. Estes aumentos são aproximadamente de 145% quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ ($HR \cong 30\%$) para $HR2$ ($HR \cong 50\%$) e de 23% quando a humidade relativa aumenta de $HR2$ ($HR \cong 50\%$) para $HR3$ ($HR \cong 65\%$) (Tabela 6.34). No entanto, o valor do coeficiente mais elevado e registado para $HR3$, é muito inferior quando comparado ao obtido nos *cubos não isolados na direcção longitudinal*, havendo uma variação de 640%.

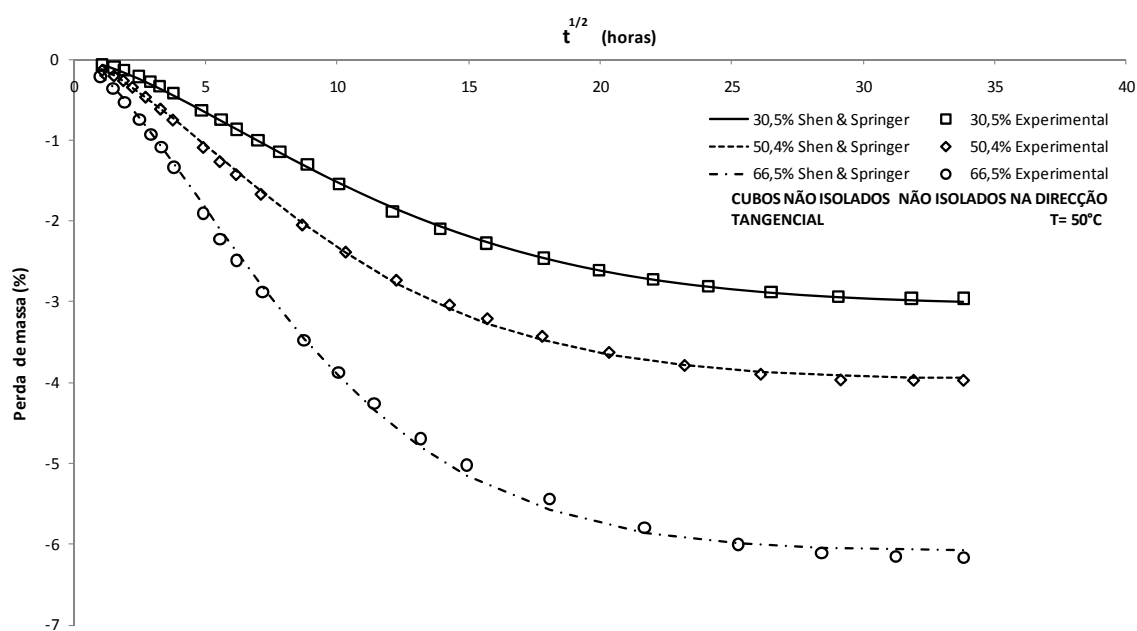


Figura 6.39 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR=30,5\%$; $50,4\%$; $66,5\%$.

Tabela 6.35 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; Espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	-3,037	-3,962	-6,085
D (mm^2/h)	0,168	0,240	0,291
h (mm)	19,68	20,03	19,98

Para a $T=50^{\circ}\text{C}$, o valor do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta (em módulo) de $HR1$ ($HR \cong 30\%$) para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), em cerca de 30%, e de $HR2$ para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), o aumento é de 53%. O coeficiente de difusão aumenta de $HR1$ ($HR \cong$

30%) para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), em cerca de 43% e de $HR3$ ($HR \cong 65\%$), aumenta em cerca de 21% (Tabela 6.35). O valor do coeficiente mais elevado e registado para $HR3$, é muito inferior quando comparado ao obtido nos *cubos não isolados na direcção longitudinal* (Tabela 6.28), havendo uma variação de 868%.

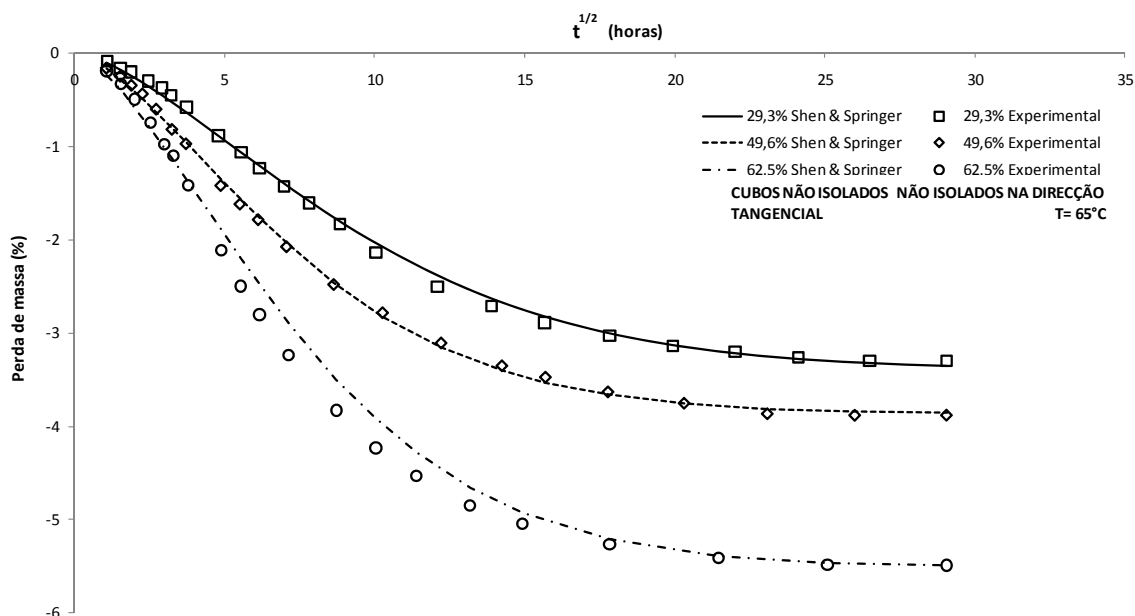


Figura 6.40 – Evolução da perda de massa para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR=29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

Tabela 6.36 – Resultados experimentais para cubos não isolados na direcção tangencial: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; Espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	-3,386	-3,857	-5,502
D (mm^2/h)	0,254	0,381	0,396
h (mm)	19,73	19,88	19,89

Tal como para $T=35^{\circ}\text{C}$ e $T=50^{\circ}\text{C}$, para $T=65^{\circ}\text{C}$, o valor do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta quando a humidade relativa aumenta de $HR1$ ($HR \cong 30\%$) para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), em cerca de 14%. Quando a humidade relativa aumenta de $HR2$ para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), o aumento é de 43% (Tabela 6.36). Comparando os valores de Me para $T=65^{\circ}\text{C}$ com os obtidos para os *cubos não isolados na direcção longitudinal* (Tabela 6.29),

verifica-se uma variação de 2% e 6% para *HR1* e *HR2*, respectivamente. Em relação ao coeficiente de difusão, este aumenta de *HR1* ($HR \cong 30\%$) para *HR2* ($HR \cong 50\%$), em cerca de 50%. Quando a humidade relativa aumenta de *HR2* para *HR3* ($HR \cong 65\%$), o aumento é de 4% (Tabela 6.35). Nesta temperatura, o valor do coeficiente de difusão mais elevado, registado para *HR3*, é muito inferior quando comparado com o obtido para os *cubos não isolados na direcção longitudinal* (Tabela 6.28), havendo uma variação de 1008%.

Como se pode observar nas Tabelas 6.34, 6.35 e 6.36, os valores dos coeficientes de difusão são extremamente baixos quando comparados com os obtidos para provetes de geometria cúbica. Comparando estes resultados com os obtidos para os ensaios para *cubos não isolados*, obtêm-se variações bastante elevadas, nomeadamente para $T=50^\circ\text{C}$, variações aproximadas de 1480% correspondendo a uma fracção de 16 vezes inferior para *HR2* ($HR \cong 50\%$). Comparando os resultados de $T=35^\circ\text{C}$ com $T=65^\circ\text{C}$, Figuras 6.33 e 6.35, respectivamente, verifica-se que o aumento da temperatura de 35°C para 65°C , a maior fracção do coeficiente da difusão aumenta cerca de 2 vezes e é verificada para *HR2* e *HR3*.

6.4.3.6 Paralelepípedos não isolados na direcção tangencial

Os resultados para provetes da variante *paralelepípedos não isolados na direcção tangencial*, ilustrados nas Figuras 6.41, 6.42 e 6.43, referentes aos ensaios efectuados a 35°C , 50°C e 65°C , respectivamente, mostram, tal como acontece para provetes *cubos não isolados na direcção tangencial*, valores diferentes, comparando com os obtidos para os *paralelepípedos não isolados* e *paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal*.

O tempo necessário para o equilíbrio foi semelhante ao necessário para os provetes da variante *cubos não isolados na direcção tangencial*.

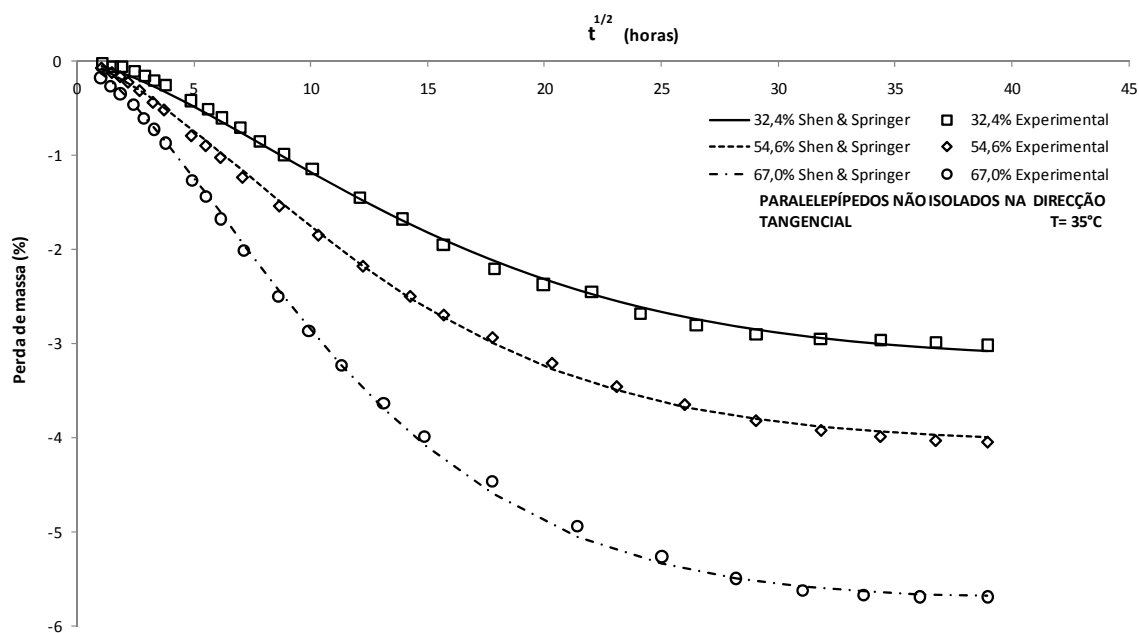


Figura 6.41 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: $T=35^{\circ}\text{C}$ e $HR= 32,4\%$; $54,6\%$; $67,0\%$.

Tabela 6.37 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: $T=35^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; Espessura do provete, h .

HR (%)	$32,4 \pm 0,2$	$54,6 \pm 0,4$	$67,0 \pm 0,3$
Me (%)	-3,170	-4,040	-5,707
D (mm^2/h)	0,098	0,137	0,171
h (mm)	19,68	20,30	19,94

Para o ensaio realizado a $T=35^{\circ}\text{C}$, o valor do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta de $HR1$ ($HR \cong 30\%$) para $HR2$ ($HR \cong 50\%$), em cerca de 27%. Quando a humidade relativa aumenta de $HR2$ para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), o aumento é de 41% (Tabela 6.37). Comparando os valores de Me com os obtidos a $T=35^{\circ}\text{C}$ para os provetes da variante *cubos não isolados na direcção tangencial* (Tabela 6.34), verifica-se uma variação de 2%, 9% e 78% para $HR1$, $HR2$ e $HR3$, respectivamente. Comparando os valores do coeficiente de difusão, para $T=35^{\circ}\text{C}$, verifica-se uma variação de 48%, 19% e 17% para $HR1$, $HR2$ e $HR3$, respectivamente.

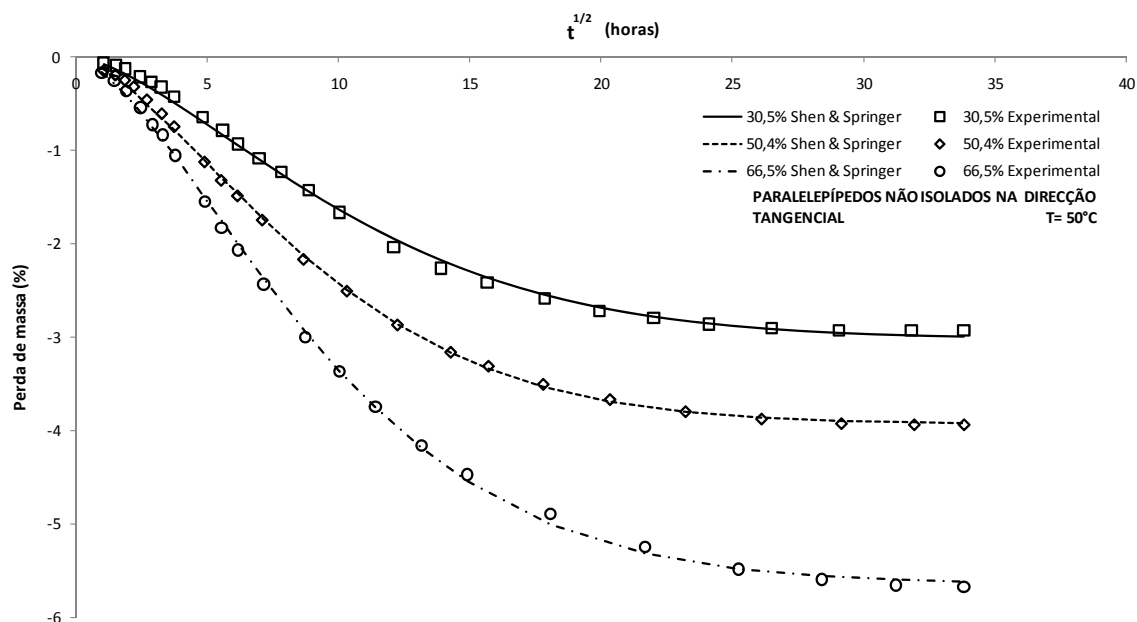


Figura 6.42 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direção tangencial: $T=50^{\circ}\text{C}$ e $HR= 30,5\%$; $50,4\%$; $66,5\%$.

Tabela 6.38 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direção tangencial: $T=50^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; Espessura do provete, h .

HR (%)	$30,5 \pm 0,2$	$50,4 \pm 0,6$	$66,5 \pm 0,3$
Me (%)	-3,023	-3,930	-5,632
D (mm^2/h)	0,200	0,283	0,244
h (mm)	19,87	20,55	19,94

A $T=50^{\circ}\text{C}$, o valor do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta cerca de 43% quando a humidade relativa aumenta de $HR2$ ($HR \cong 50\%$) para $HR3$ ($HR \cong 65\%$) (Tabela 6.38). Comparando os valores de Me para $T=50^{\circ}\text{C}$ nos provetes da variante *cubos não isolados na direção tangencial* (Tabela 6.16), avalia-se a maior variação em cercam de 8% para $HR3$ ($HR \cong 65\%$). O mesmo acontece para o coeficiente de difusão, obtendo-se uma variação de 20%.

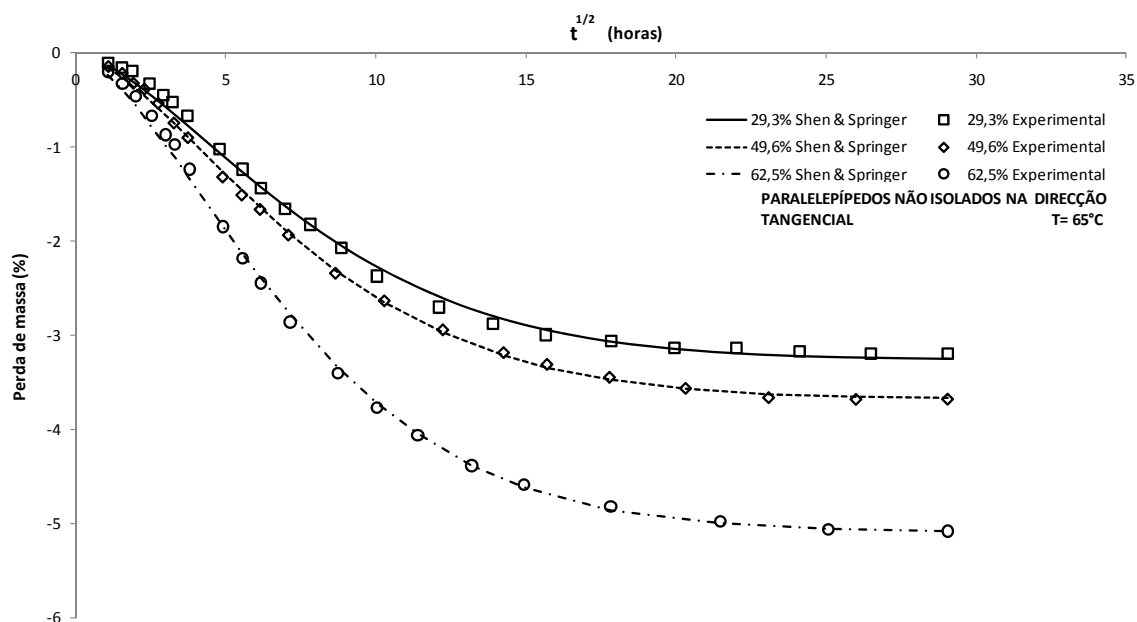


Figura 6.43 – Evolução da perda de massa para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR= 29,3\%$; $49,6\%$; $62,5\%$.

Tabela 6.39 – Resultados experimentais para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial: $T=65^{\circ}\text{C}$, concentração de água no equilíbrio, Me ; coeficiente de difusão, D ; Espessura do provete, h .

HR (%)	$29,3 \pm 0,2$	$49,6 \pm 0,2$	$62,5 \pm 0,2$
Me (%)	-3,257	-3,670	-5,078
D (mm^2/h)	0,344	0,370	0,406
h (mm)	19,65	19,99	20,03

Do ensaio a $T=65^{\circ}\text{C}$, verifica-se que o valor do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta de $HR1$ ($HR \cong 50\%$) para $HR2$ ($HR \cong 65\%$), em cerca de 13% e de $HR2$ ($HR \cong 50\%$) para $HR3$ ($HR \cong 65\%$), o aumento é de 38%, (Tabela 6.39). Comparando os ensaios a $T=65^{\circ}\text{C}$ e a $T=35^{\circ}\text{C}$, Figuras 6.41 e 6.43 respectivamente, verifica-se que o aumento da temperatura de 35°C para 65°C , aumentou a fracção do coeficiente da difusão em cerca de 1 vez e é verificada para todas as humidades relativas. Observa-se que estas fracções são inferiores às verificadas para os ensaios de cubos com o mesmo tipo de isolamento.

6.4.4 Influência da temperatura e da humidade relativa no coeficiente de difusão na dessorção

De seguida será analisada a forma como os coeficientes de difusão são influenciados pela temperatura e humidade relativa, para as variantes de provetes.

Tabela 6.40 – Valores do coeficiente de difusão (D) para a dessorção, em mm^2/h .

Proвете	HR 1			HR 2			HR 3		
	35°C	50°C	65°C	35°C	50°C	65°C	35°C	50°C	65°C
<i>NC</i>	0,610	1,716	2,698	1,872	3,792	6,127	1,554	2,877	4,528
<i>NP</i>	0,168	0,473	0,860	0,558	1,175	1,672	0,501	0,914	1,231
<i>LC</i>	0,614	1,814	2,652	1,845	3,046	5,598	1,482	2,820	4,323
<i>LP</i>	0,185	0,490	0,788	0,564	1,144	1,798	0,490	0,887	1,337
<i>TC</i>	0,067	0,168	0,254	0,164	0,240	0,381	0,201	0,291	0,396
<i>TP</i>	0,098	0,200	0,344	0,137	0,283	0,370	0,171	0,244	0,406

NC - Cubos não isolados

NP - Paralelepípedos não isolados

LC - Cubos não isolados na direcção longitudinal

LP - Paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal

TC - Cubos não isolados na direcção tangencial

TP - Paralelepípedos não isolados na direcção tangencial

Analisando os resultados obtidos na Tabela 6.40, pode concluir-se que o coeficiente de difusão, aumenta com o aumento da temperatura em todas as variantes de provetes, independentemente da condição de humidade relativa que se encontravam as variantes na adsorção. Verifica-se que os valores mais elevados correspondem à humidade relativa mais elevada (*HR3*) e à temperatura de 65°C. Comparando estes valores com os apresentados na Tabela 6.21 (valores do coeficiente de difusão para a adsorção), conclui-se que, de um modo geral, os valores do coeficiente de difusão para a dessorção são muito inferiores. É de salientar que para os provetes *NC* (*cubos não isolados*), à temperatura de 65°C obtêm-se variações de 125%, 41% e 80%, para *HR3*, *HR2* e *HR1*, respectivamente. Para os provetes *TC* (*cubos não isolados na direcção tangencial*), à temperatura de 65°C obtêm-se variações de 94%, 230% e 450%, para *HR3*, *HR2* e *HR1*, respectivamente.

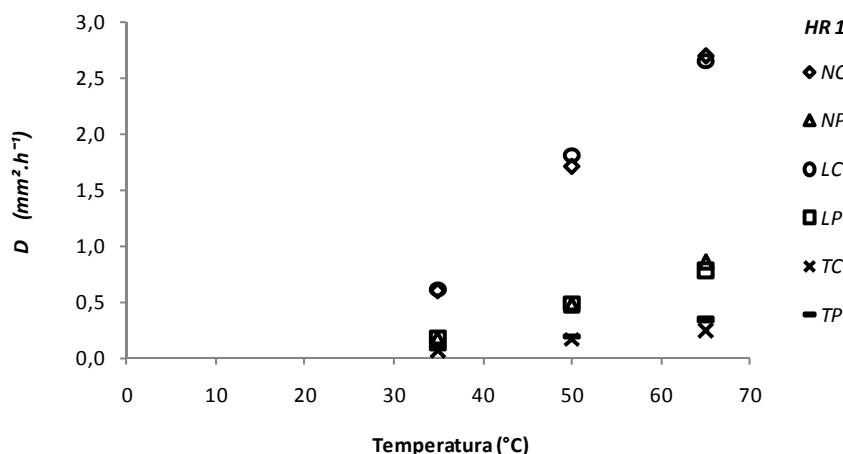


Figura 6.44 – Variação do coeficiente de difusão *versus* temperatura para *HRI* ($HR \cong 30\%$).

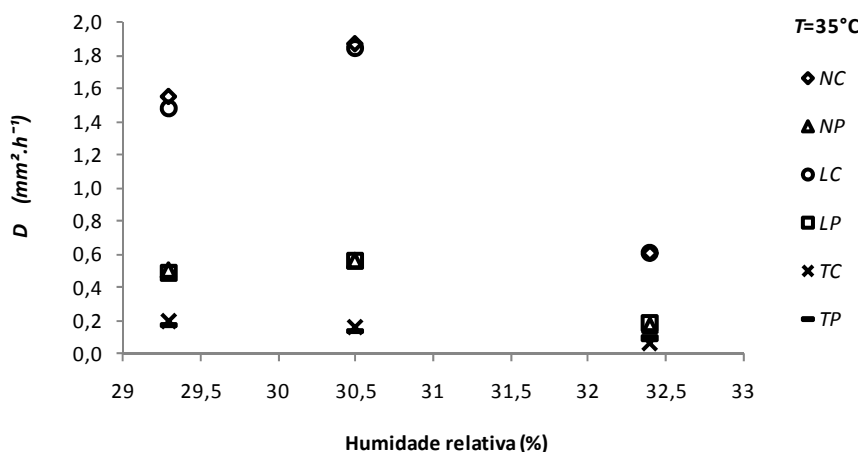


Figura 6.45 – Variação do coeficiente de difusão *versus* humidade relativa para $T=35^{\circ}\text{C}$.

Pelas Figuras 6.44 e 6.45, verifica-se que para a *HRI* ($HR \cong 30\%$), a influência do factor temperatura, de um modo geral, aumenta de forma significativa quando a temperatura é elevada de 35°C para 50°C . Essa variação é quantificada aproximadamente em 181%, 195% e 151%, para *cabos não isolados* (*NC*), *cabos não isolados da direcção longitudinal* (*LC*) e *cabos não isolados na direcção tangencial* (*TC*), respectivamente. Para um aumento da temperatura de 50°C para 65°C , o coeficiente de difusão aumenta cerca de 57%, 46% e 900%, na mesma ordem de referência usada anteriormente. Como podemos observar na Tabela 6.40, os valores mais elevados correspondem aos provetes *NC* e *LC*, que não ultrapassam os $4,6 \text{ mm}^2/\text{h}$, sendo que o mais baixo é verificado para os provetes *TC*. Comparando a diferença do coeficiente de difusão obtida entre os provetes *NC* e *TC*,

observa-se uma variação substancial, aproximadamente 921% e 962%, para $T=50^{\circ}\text{C}$ e $T=65^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Para os provetes *LC* e *TC*, essas variações são aproximadamente 980% e 945%, para $T=50^{\circ}\text{C}$ e $T=65^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

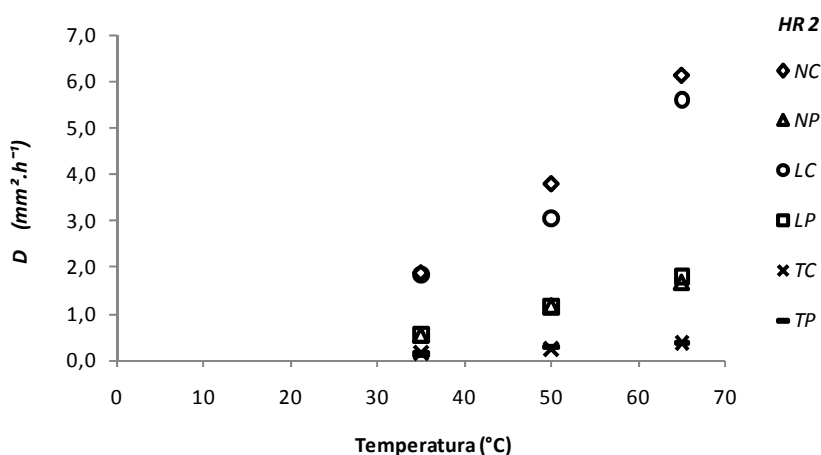


Figura 6.46 – Variação do coeficiente de difusão *versus* temperatura para *HR2* ($HR \cong 50\%$).

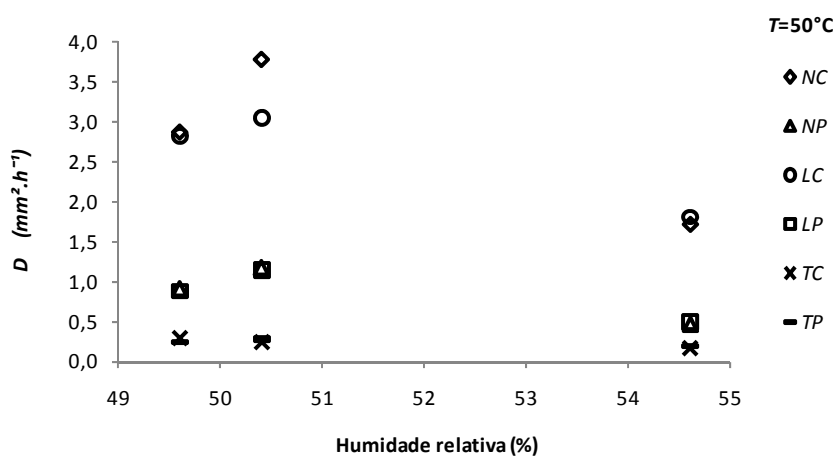


Figura 6.47 – Variação do coeficiente de difusão *versus* humidade relativa para $T=50^{\circ}\text{C}$.

Para *HR2* ($HR \cong 50\%$), a influência da temperatura é mais significativa que a verificada para *HR1* (Figura 6.44), Quando a temperatura é elevada de 35°C para 50°C , a variação é de aproximadamente 102%, 65% e 46%, para *cubos não isolados (NC)*, *cubos não isolados da direcção longitudinal (LC)* e *cubos não isolados na direcção tangencial (TC)*, respectivamente. Para um aumento da temperatura de 50°C para 65°C , o coeficiente de difusão aumenta cerca de 62%, 84% e 59%, considerando a mesma ordem de referência usada anteriormente. Quando a temperatura aumenta de 50°C para 65°C , o coeficiente de

difusão aumenta cerca de 94%, 80% e 144%, na mesma ordem de referência usada anteriormente. Os valores mais elevados não ultrapassam os $6,2 \text{ mm}^2/\text{h}$.

Comparando a diferença do coeficiente de difusão entre os provetes *NC* e *TC*, observa-se uma variação substancial, avaliada em 1480% e 1508%, para $T=50^\circ\text{C}$ e $T=65^\circ\text{C}$, respectivamente. Para os provetes *LC* e *TC*, essas variações foram avaliadas em 1169% e 1369%, para $T=50^\circ\text{C}$ e $T=65^\circ\text{C}$, respectivamente.

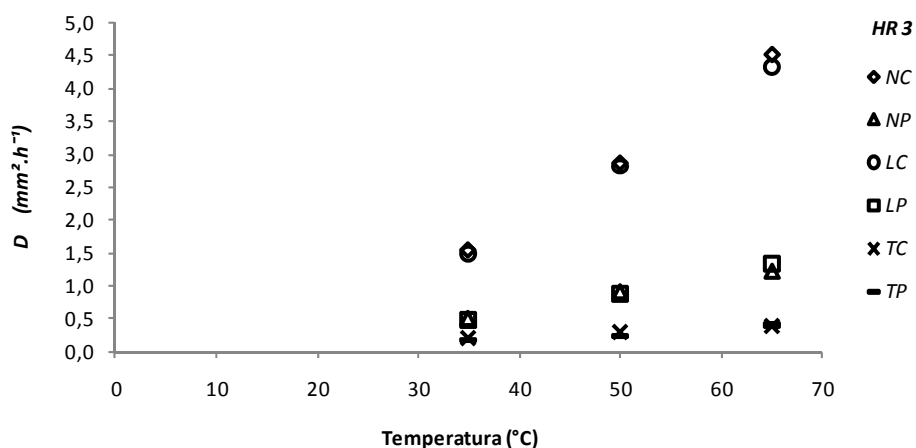


Figura 6.48 – Variação do coeficiente de difusão *versus* temperatura para *HR3* ($HR \cong 65\%$).

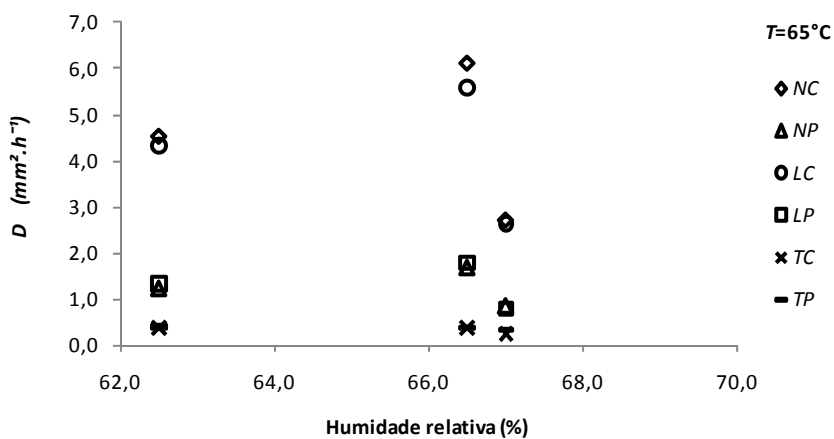


Figura 6.49 – Variação do coeficiente de difusão *versus* humidade relativa para $T=65^\circ\text{C}$.

Para *HR3* ($HR \cong 65\%$), a influência do factor temperatura, de um modo geral aumenta de forma mais significativa quando a temperatura é elevada de 35°C para 50°C . Essa variação é avaliada em, 86%, 90% e 45%, para *cubos não isolados (NC)*, *cubos não isolados da direcção longitudinal (LC)* e *cubos não isolados na direcção tangencial (TC)*,

respectivamente. Para um aumento da temperatura de 50°C para 65°C, o coeficiente de difusão aumenta cerca de 57%, 53% e 37%, considerando a mesma ordem de referência usada anteriormente. Os valores mais elevados não ultrapassam os 4,6 mm²/h.

Comparando a diferença do coeficiente de difusão entre os ensaios *NC* e *TC*, observa-se uma variação substancial, aproximadamente 889% e 1043%, para $T=50^{\circ}\text{C}$ e $T=65^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Para os ensaios *LC* e *TC*, essas variações são aproximadamente 869% e 991%, para $T=50^{\circ}\text{C}$ e $T=65^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Relativamente às diferentes geometrias dos provetes (*cubos*, *C* e *paralelepípedos*, *P*), o coeficiente de difusão tem uma variação acentuada. Para provetes *não isolados* a $T=65^{\circ}\text{C}$: em *HR1*, cerca de 214%; em *HR2*, cerca de 266% e em *HR3*, cerca de 267%. Para provetes *não isolados na direcção longitudinal* a $T=65^{\circ}\text{C}$: em *HR1*, cerca de 237%; em *HR2*, cerca de 211% e em *HR3*, cerca de 223%. Para provetes *não isolados na direcção tangencial* a $T=65^{\circ}\text{C}$: em *HR1*, cerca de 35%; em *HR2*, cerca de 3% e em *HR3*, cerca de 2%.

6.5 Determinação das isotérmicas de adsorção e dessorção.

Mantendo-se a temperatura do sistema sólido-gás e variando-se a humidade ambiente, podemos obter, para cada valor desta variável, um teor de humidade de equilíbrio do sólido. A curva assim obtida, da humidade relativa do ar *versus* o teor de humidade de equilíbrio (*Me*) do sólido chama-se isotérmica de adsorção ou dessorção; partindo de uma situação inicial de humidade relativa nula e aumentando-a até atingir a saturação, o processo será de adsorção, obtendo a respectiva isotérmica de adsorção; se, ao contrário, a situação inicial for de humidade relativa igual a 100%, com posterior redução até aos 0% a curva obtida será a isotérmica de dessorção (Martins, 1990).

No âmbito deste trabalho, apresentamos apenas os valores correspondentes às três humidades relativas estudadas (Tabela 6.2) e os respectivos valores do teor de humidade de equilíbrio calculados através da Equação (6.1). Cada ponto experimental registado, é o valor médio da perda de massa de quatro provetes da mesma natureza.

6.5.1 Isotérmica de adsorção

De seguida são apresentados resultados relativos à isotérmica de adsorção, com as variáveis humidade relativa (%) *versus* teor de humidade em equilíbrio (%), considerando os diferentes tipos de provetes. De uma forma geral, os resultados apresentados são idênticos (em termos qualitativos).

Tabela 6.41 – Valores do teor de humidade em equilíbrio (*Me*) para a adsorção, (%).

Provete	<i>HR 1</i>			<i>HR 2</i>			<i>HR 3</i>		
	35°C	50°C	65°C	35°C	50°C	65°C	35°C	50°C	65°C
<i>NC</i>	3,312	2,508	2,490	4,285	3,174	3,005	6,906	5,775	4,683
<i>NP</i>	3,152	2,143	2,386	4,388	2,919	2,716	6,862	5,750	4,478
<i>LC</i>	2,958	2,239	2,410	3,634	2,937	2,775	6,526	5,292	4,122
<i>LP</i>	3,055	2,170	2,293	4,091	2,682	2,607	6,228	5,026	4,082
<i>TC</i>	2,527	1,573	0,580	3,538	1,820	1,361	6,012	4,831	3,530
<i>TP</i>	2,870	1,600	0,773	3,037	1,849	1,034	5,573	4,117	2,766

NC - Cubos não isolados

NP - Paralelepípedos não isolados

LC - Cubos não isolados na direção longitudinal

LP - Paralelepípedos não isolados na direção longitudinal

TC - Cubos não isolados na direção tangencial

TP - Paralelepípedos não isolados na direção tangencial

Observando as diferentes variantes e geometrias dos provetes, no que diz respeito ao teor de humidade em equilíbrio, pode observar-se na Tabela 6.41 que, de um modo geral, os provetes designados por *cubos* obtêm um maior teor de humidade em equilíbrio, salvo algumas exceções.

Da análise das Figuras 6.50 e 6.51, verifica-se que os provetes *cubos* obtêm um maior valor de teor de humidade no equilíbrio (*Me*), sendo superior face ao obtido nos provetes *paralelepípedos*. Para provetes *não isolados* verifica-se uma variação de 4%, 11% e 5%, correspondente a *HR1* ($HR \cong 30\%$), *HR2* ($HR \cong 50\%$), *HR3* ($HR \cong 65\%$), respectivamente, para a temperatura de 65°C.

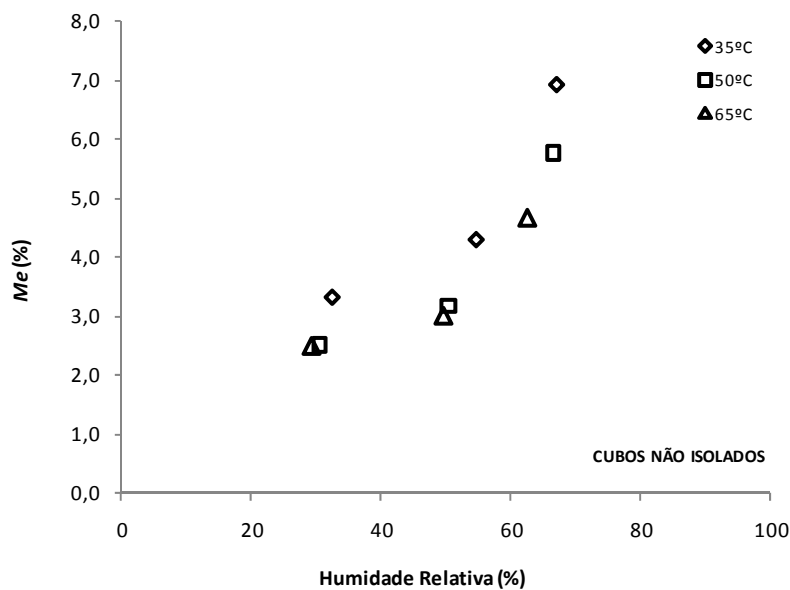


Figura 6.50 – Isotérmica de adsorção para cubos não isolados.

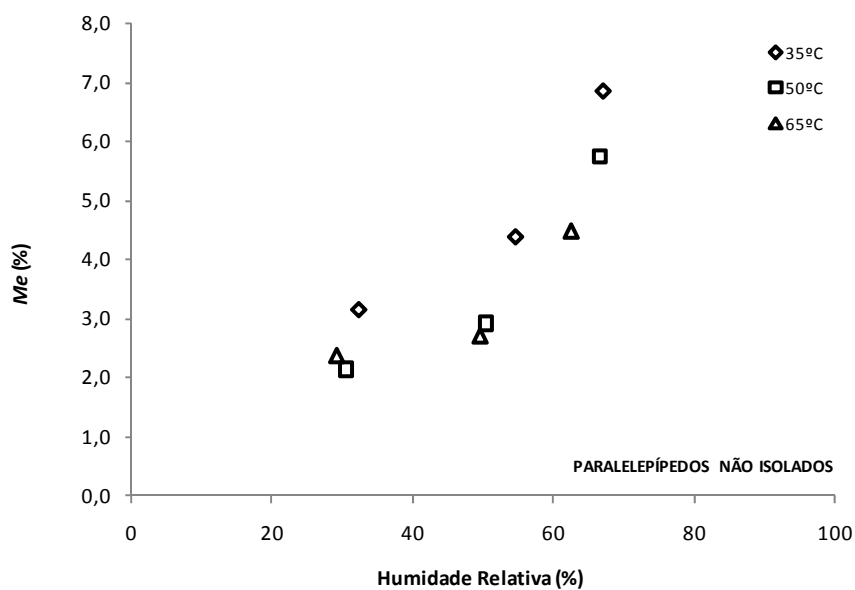


Figura 6.51 – Isotérmica de adsorção, para paralelepípedos não isolados.

Analisando as Figuras 6.52 e 6.53, verifica-se que os provetes *cubos* manifestam um valor mais elevado de teor de humidade no equilíbrio (Me) quando comparados com os provetes *paralelepípedos*. Para provetes *não isolados na direcção longitudinal*, obtêm-se uma variação de 5%, 7% e 1%, correspondente a $HR1$ ($HR \cong 39\%$), $HR2$ ($HR \cong 50\%$), $HR3$ ($HR \cong 65\%$), respectivamente para a temperatura de 65°C .

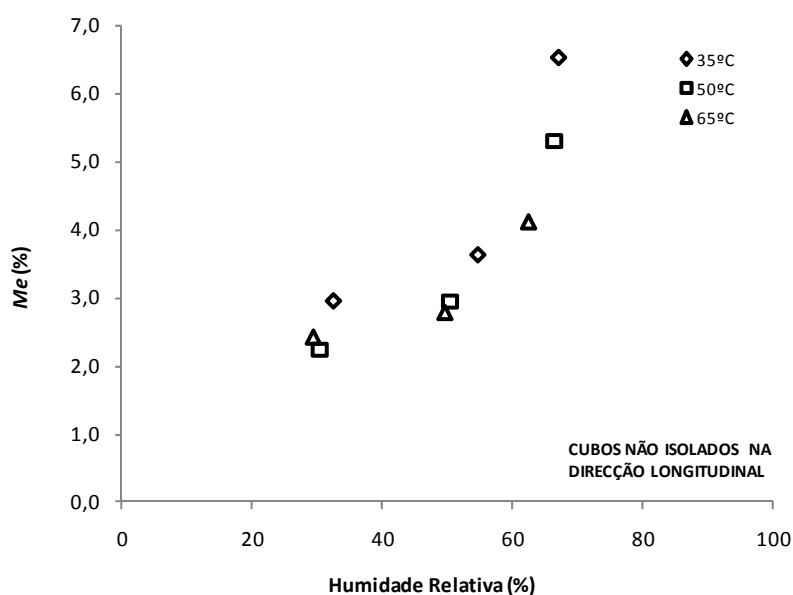


Figura 6.52 – Isotérmica de adsorção, para cubos não isolados na direcção longitudinal.

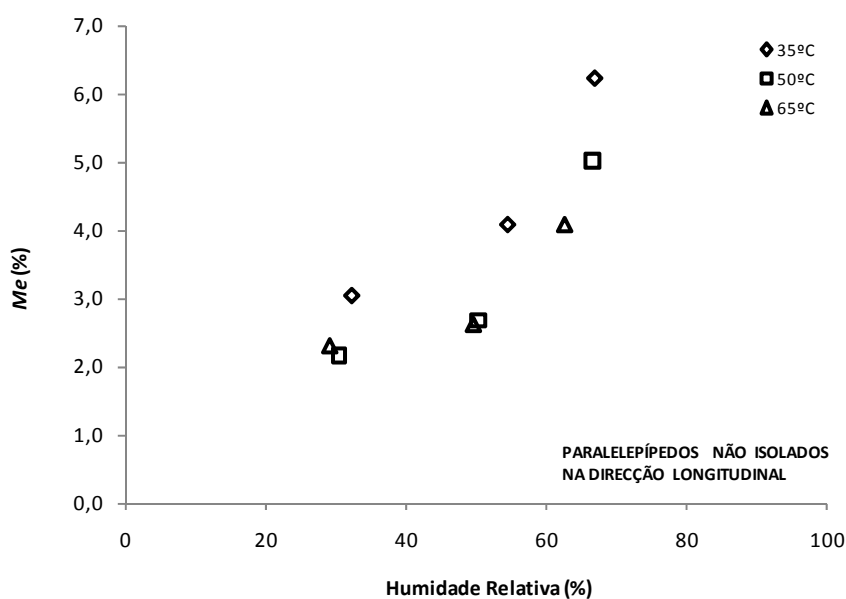


Figura 6.53 – Isotérmica de adsorção, para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal.

Pelas Figuras 6.54 e 6.55, verifica-se que os provetes *cubos* mostram um valor superior para o teor de humidade no equilíbrio (Me) quando comparados ao dos provetes *paralelepípedos*. Para provetes *não isolados na direcção tangencial*, tem-se uma variação de 32%, 28%, correspondente a $HR2$ ($HR \cong 50\%$), $HR3$ ($HR \cong 65\%$), respectivamente à temperatura de 65°C . Para $HR1$ ($HR \cong 30\%$), os provetes *paralelepípedos* obtiveram um

valor de Me superior ao verificada para os provetes *cubos*, variação esta, avaliada em 33%, também para a temperatura de 65°C.

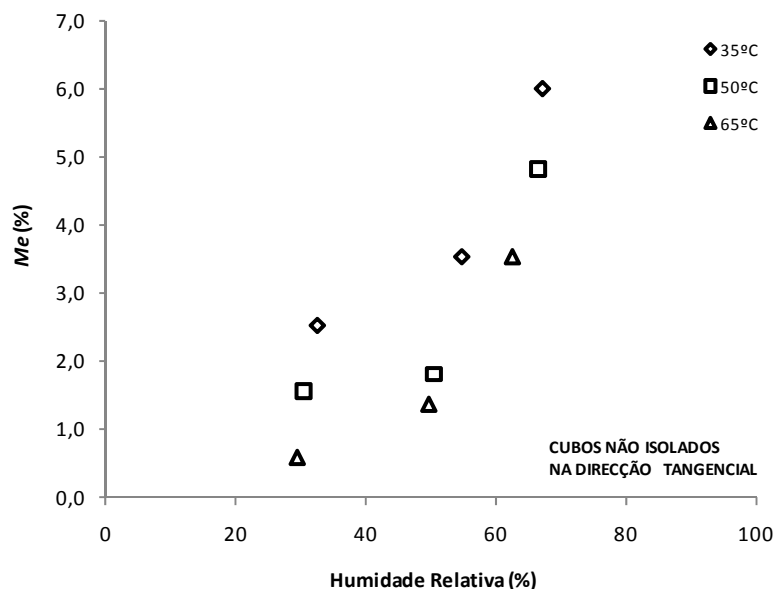


Figura 6.54 – Isotérmica de adsorção, para cubos não isolados na direcção tangencial.

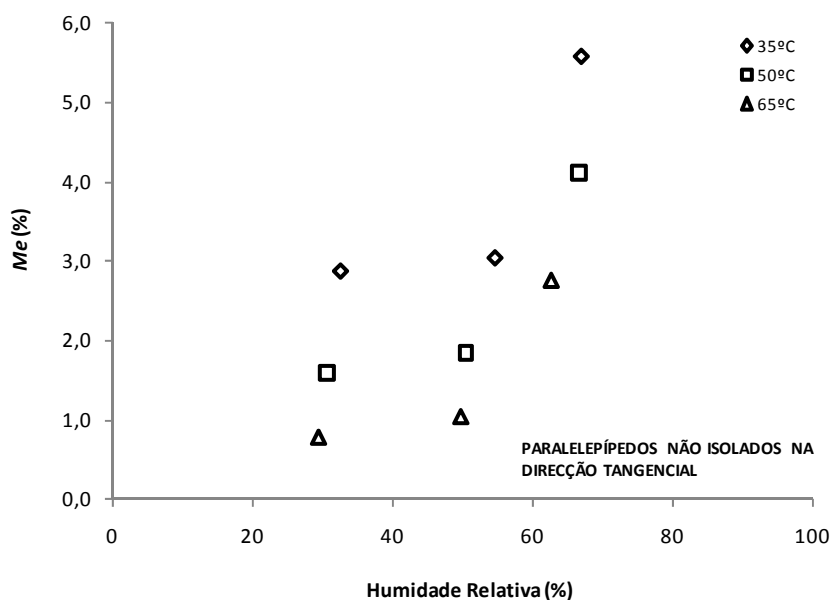


Figura 6.55 – Isotérmica de adsorção, para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial.

Em suma, face aos resultados ilustrados nas Figuras 6.50 e 6.51, 6.52, 6.53, 6.54 e 6.55 pode concluir-se que os provetes *cubos*, de um modo geral obtiveram um maior valor

de teor de humidade no equilíbrio, com algumas excepções a determinadas temperaturas. Conclui-se também que a taxa de ganho do teor de humidade em equilíbrio (Me) aumenta com o aumento da humidade relativa (HR), independentemente das diferentes temperaturas. Verifica-se também que o aumento da temperatura se traduz numa redução do teor de humidade em equilíbrio, independentemente da humidade relativa.

6.5.2 Isotérmica de dessorção

De seguida são apresentados resultados relativos à isotérmica de dessorção, com as variáveis humidade relativa (%) *versus* teor de humidade em equilíbrio (%), considerando os diferentes tipos de provetes. De uma forma geral, os resultados apresentados são idênticos (em termos qualitativos).

Tabela 6.42 – Valores do teor de humidade em equilíbrio (Me) para a dessorção, (%).

Provete	<i>HR 1</i>			<i>HR 2</i>			<i>HR 3</i>		
	35°C	50°C	65°C	35°C	50°C	65°C	35°C	50°C	65°C
<i>NC</i>	-3,764	-3,511	-3,512	-5,205	-4,447	-3,927	-7,683	-7,043	-5,952
<i>NP</i>	-3,693	-3,423	-3,520	-5,195	-4,329	-4,017	-7,681	-7,099	-5,914
<i>LC</i>	-3,480	-3,246	-3,337	-4,908	-4,128	-3,626	-7,295	-6,565	-5,503
<i>LP</i>	-3,511	-3,337	-3,314	-4,701	-4,104	-3,571	-7,155	-6,589	-5,546
<i>TC</i>	-3,098	-3,037	-3,386	-4,421	-3,962	-3,857	-6,070	-6,085	-5,502
<i>TP</i>	-3,170	-3,023	-3,257	-4,040	-3,930	-3,670	-5,707	-5,632	-5,078

NC - Cubos não isolados

NP - Paralelepípedos não isolados

LC - Cubos não isolados na direcção longitudinal

LP - Paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal

TC - Cubos não isolados na direcção tangencial

TP - Paralelepípedos não isolados na direcção tangencial

Observando as diferentes variantes e geometrias dos provetes, no que diz respeito ao teor de humidade em equilíbrio (Me), tal como acontece nos valores apresentados anteriormente para as isotérmicas de adsorção, os provetes designados por *cubos* obtêm um maior teor de humidade em equilíbrio, salvo algumas excepções.

De um modo geral, como podemos observar na Tabela 6.42 e nas Figuras apresentadas de seguida, as variações dos valores de Me para todas as variantes e geometrias dos provetes apresentados em função das humidades relativas (HR),

evidenciam uma semelhança quantitativa em relação aos resultados e respectiva análise apresentada anteriormente para as isotérmicas de adsorção.

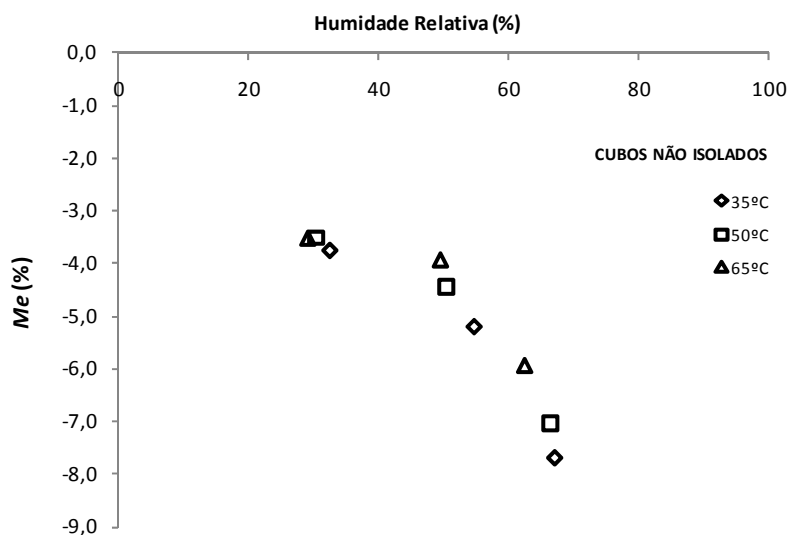


Figura 6.56 – Isotérmica de dessorção, para cubos não isolados.

Comparando as Figuras 6.56 e 6.50, relativas aos provetes da variante *cubos não isolados*, podemos concluir que a principal diferença ocorre no valor de Me , é dada para $T=50^{\circ}\text{C}$, sendo de 130% na isotérmica de adsorção e de 100% na isotérmica de dessorção.

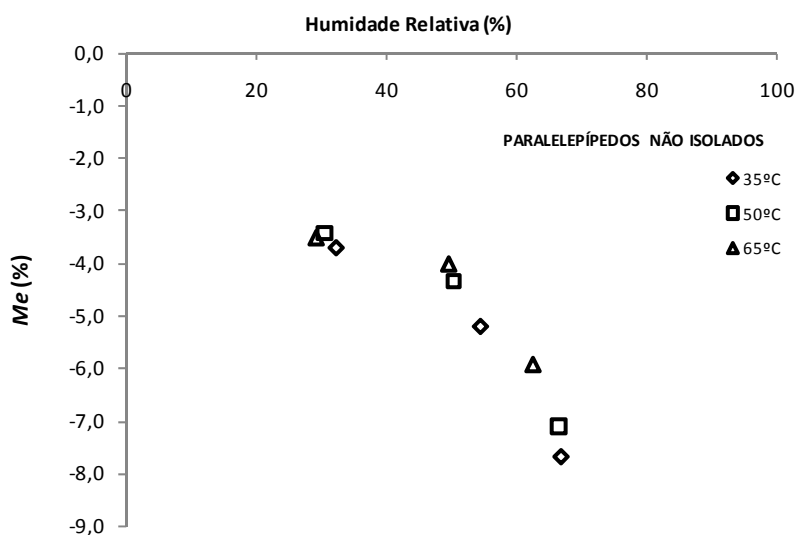


Figura 6.57 – Isotérmica de dessorção, para paralelepípedos não isolados.

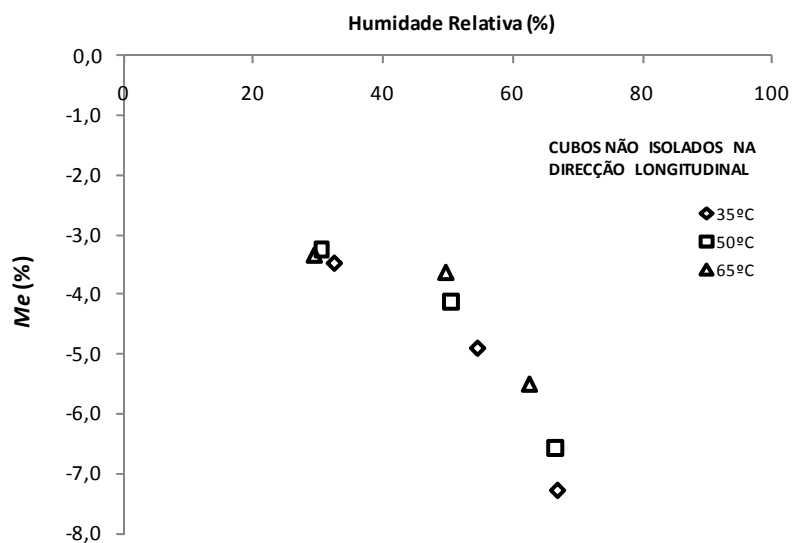


Figura 6.58 – Isotérmica de dessorção, para cubos não isolados na direcção longitudinal.

Comparando as Figuras 6.58 e 6.52, relativas aos provetes da variante *cubos não isolados na direcção longitudinal*, podemos concluir que a principal diferença ocorre no valor de Me , é dada para $T=35^{\circ}\text{C}$, sendo de 120% na isotérmica de adsorção e de 110% na isotérmica de dessorção.

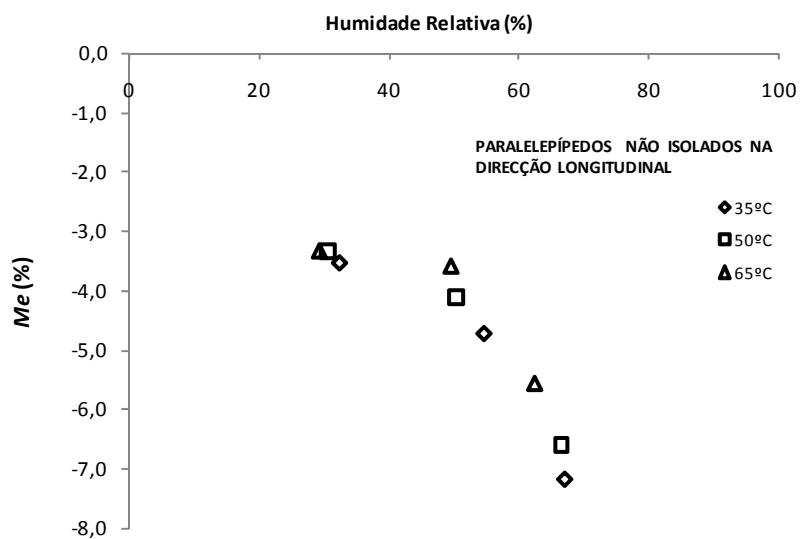


Figura 6.59 – Isotérmica de dessorção, para paralelepípedos não isolados na direcção longitudinal.

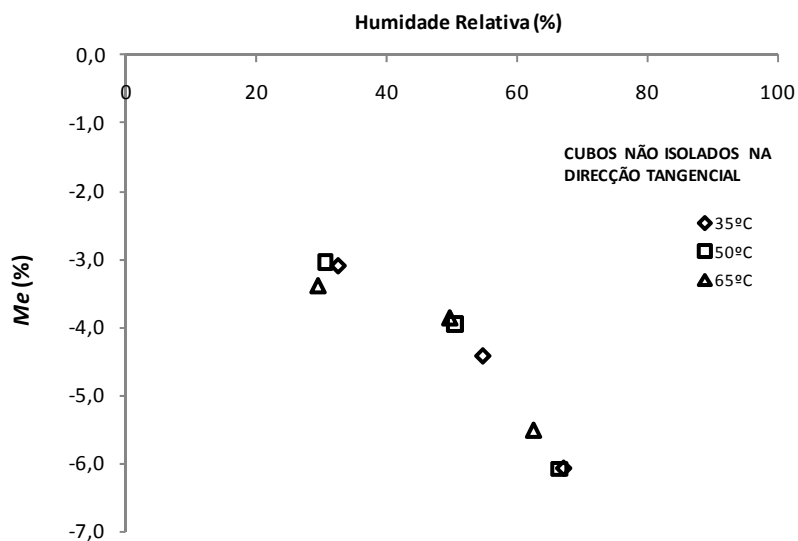


Figura 6.60 – Isotérmica de dessorção para cubos não isolados na direcção tangencial.

Comparando as Figuras 6.60 e 6.54, relativas aos provetes da variante *cubos não isolados na direcção tangencial*, podemos concluir que a principal diferença ocorre no valor de Me , é dada para $T=65^{\circ}\text{C}$, sendo de 508% na isotérmica de adsorção e de 100% na isotérmica de dessorção para $T=50^{\circ}\text{C}$.

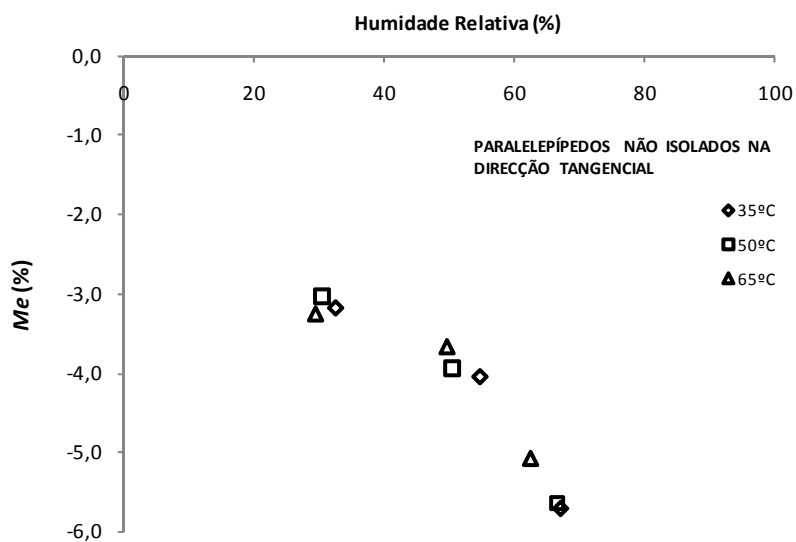


Figura 6.61 – Isotérmica de dessorção para paralelepípedos não isolados na direcção tangencial.

6.6 Conclusões

Dos resultados para os ensaios de adsorção, conclui-se que a taxa de ganho de massa diminui com o aumento da temperatura, independentemente das diferentes humidades relativas. Conclui-se, também, que o aumento da humidade relativa traduz-se num aumento de massa no provete de madeira, independentemente da temperatura. O aumento da humidade relativa reduz, também, o tempo que a madeira demora a atingir o patamar de saturação à condição de humidade relativa imposta.

De um modo geral, na adsorção, os provetes reproduziram curvas típicas de difusão. Considerando os provetes *não isolados* nas duas geometrias (*cubos e paralelepípedos*), verificou-se que o valor do teor de humidade no equilíbrio não apresentou uma diferença significativa. Já o coeficiente de difusão mostrou diferenças, evidenciando uma diferença de 211% nos valores mais elevados de temperatura e humidade relativa estudadas. Ainda dos resultados obtidos para o coeficiente de difusão nos provetes *não isolados*, verificaram-se ganhos na ordem dos 111% para os provetes da variante *cubos* e 448% para provetes da variante *paralelepípedos* à temperatura de 65°C, quando a humidade relativa aumenta de 30% para 65%.

Na situação em que os provetes apenas têm as faces na *direcção longitudinal não isoladas*, em ambas as geometrias, o valor do teor de humidade de equilíbrio, tal como se verifica para os provetes *não isolados*, não apresenta diferenças significativas. Para o coeficiente de difusão não se verifica tal situação, evidenciando uma diferença de aproximadamente 174%. Verificou-se também que, quando a humidade relativa aumenta de 30% para 65% à temperatura de 65°C, o coeficiente de difusão obtém ganhos de 87% para os provetes da variante *cubos* e 130% para provetes da variante *paralelepípedos*.

Os resultados dos ensaios de adsorção realizados com provetes de faces *não isoladas na direcção tangencial*, mostraram três aspectos não verificados, quando comparados com os ensaios de provetes *não isolados e não isolados na direcção longitudinal*. O primeiro aspecto, é a resistência que a madeira oferece ao transporte de humidade na direcção tangencial. Pois, estes provetes apresentaram um tempo necessário para atingir o equilíbrio muito superior em relação aos restantes provetes. A variação máxima deste tempo foi de 1080 horas. O segundo aspecto e talvez o mais importante, é a diminuição drástica do

coeficiente de difusão, independentemente da geometria, face às restantes variantes de provetes, registando uma variação que pode ser avaliada em 2500%. O terceiro aspecto é a diminuição verificada, no que diz respeito ao teor de humidade no equilíbrio, chegando a registar uma diferença em cerca de 329%.

De um modo geral, para todas as variantes de provetes, com a excepção da variante de provetes *não isolados na direcção tangencial*, a principal diferença verificada entre as duas geometrias estudadas, foi a variação significativa do coeficiente de difusão, registando variações em cerca de 240%.

Dos resultados para os ensaios de dessorção, conclui-se que a taxa de perda de massa diminui com o aumento da temperatura, independentemente das diferentes humidades relativas em que se encontravam os provetes antes de se iniciar a dessorção. O aumento da temperatura reduz o tempo necessário para atingir o equilíbrio (tempo que demora os provetes a secar).

Conclui-se que e de acordo com Tsoumis (1991), a velocidade de remoção de água à temperatura mais baixa estudada diminui em relação às restantes, sendo estas superiores, uma vez que a energia fornecida para a evaporação da água é menor e, de um modo geral, as temperaturas mais elevadas estudadas aumentaram a velocidade da remoção da água localizada na madeira sob a saturação de uma determinada condição de humidade relativa e temperatura, referente da adsorção.

De um modo geral, na dessorção, o coeficiente difusão aumenta com o aumento da temperatura em todas as variantes de provetes. Verifica-se que os valores mais elevados, estão associados às humidades relativas e às temperaturas mais elevadas. A comparação dos valores do coeficiente de difusão nos dois processos de sorção, permitiu verificar que a dessorção produz valores inferiores, independentemente da geometria. Verificaram-se variações nos provetes da variante *cubos não isolados*, da ordem dos 125% e em provetes *não isolados na direcção tangencial*, variações avaliadas em 450%.

Foram determinadas as isotérmicas de adsorção e dessorção, evidenciando a variação do teor de humidade relativa no equilíbrio em função da humidade relativa. Verificou-se que para provetes da variante *cubos não isolados*, a maior variação do valor do teor de humidade no equilíbrio é obtida para $T=50^{\circ}\text{C}$, sendo de 130% para a adsorção e de 100% na dessorção. Para provetes da variante *cubos não isolados na direcção longitudinal*, é

obtida para $T=35^{\circ}\text{C}$, sendo de 120% na adsorção e de 110% na dessorção. Para provetes da variante *cubos não isolados na direcção tangencial*, a maior variação do teor de humidade no equilíbrio é verificada para $T=65^{\circ}\text{C}$ e $T=50^{\circ}\text{C}$, sendo 508% na adsorção e de 100% na dessorção, respectivamente.

Para finalizar, verifica-se que, quando apenas as faces na *direcção longitudinal* estão expostas à adsorção ou à dessorção, os valores de Me e de D , praticamente são iguais aos obtidos para os provetes *não isolados*. Assim, pode concluir-se que é pela direcção longitudinal que, grande parte o transporte de humidade ocorre na madeira de *Pinus pinaster*.

Capítulo 7

Retracção e Inchamento

Conteúdo do Capítulo

Neste capítulo são apresentados o procedimento, os resultados e a respectiva análise da retracção e inchamento dos provetes.

7.1 Determinação da retracção e inchamento

7.1.1 Procedimento experimental – Retracção

Segundo a norma portuguesa NP-615 – *Determinação da retracção*, a retracção de um provete de madeira denomina-se pelo quociente, expresso em percentagem, da variação do comprimento de um segmento tomado sobre o provete, devida a uma diminuição de humidade, pelo comprimento desse segmento correspondente ao menor valor do teor de água. Para cada uma das temperaturas, 35°C, 50°C e 65°C os provetes foram medidos no início do processo de dessorção, quando os provetes estavam saturados e estabilizados e no fim, quando os provetes se encontravam secos e estabilizados. A medição das dimensões foi realizada utilizando uma craveira de leitura digital (Mitutoyo – *Digimatic caliper*) com precisão de 0,01 mm. Apenas os provetes designados por *provetes não isolados* foram

submetidos às medições relativas à retracção linear (axial, radial e tangencial). Os restantes provetes devido a possuírem o isolamento facial, faz com que a precisão das medições não seja adequada.

A retracção linear (axial, radial ou tangencial), expressa em percentagem, é dada pela Equação (7.1).

$$\varepsilon_r = \frac{l_1 - l_2}{l_2} \times 100 \quad (7.1)$$

onde l_1 é a dimensão, numa dada direcção, do provete saturado, em *mm* e l_2 é a dimensão, numa dada direcção, do provete seco em estufa, em *mm*.

7.1.2 Procedimento experimental – Inchamento

Para o inchamento considerou-se igualmente a norma portuguesa NP 615 – *Determinação da retracção*. O inchamento de um provete de madeira denomina-se pelo quociente, expresso em percentagem, da variação do comprimento de um segmento tomado sobre o provete, devida a um aumento de humidade, pelo comprimento desse segmento correspondente ao maior valor do teor de água. Para cada uma das temperaturas, 35°C, 50°C e 65°C os provetes foram medidos ao início do processo de adsorção, quando os provetes estavam secos e estabilizados, e no fim, quando os provetes se encontravam saturados e estabilizados. O equipamento e as condições de medição foram as mesmas que as utilizadas no estudo da retracção. Tal como acontece na retracção apenas os *provetes não isolados* foram sujeitos a medições.

O inchamento linear (axial, radial ou tangencial), expresso em percentagem, é dado pela Equação (7.2)

$$\varepsilon_i = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \times 100 \quad (7.2)$$

onde l_1 é a dimensão, numa dada direcção, do provete saturado, em mm e l_2 é a dimensão, numa dada direcção, do provete seco em estufa, em mm .

7.2 Resultados e discussão

7.2.1 Retracção

De seguida são apresentados os diagramas relativos à retracção linear (axial, radial e tangencial), ou seja, a representação gráfica da variação dimensional (%) *versus* teor de água (%) (teor de humidade no equilíbrio relativo à dessorção), para os *provetes não isolados* (*cubos e paralelepípedos*). Cada ponto experimental registado, é o valor médio da perda de massa de quatro provetes da mesma natureza.

Por análise das Figuras 7.1, 7.2 e 7.3 e Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3, pode observar-se que a retracção linear radial e tangencial apresenta valores mais elevados para a humidade relativa mais elevada ($HR3$), independentemente da temperatura. Verifica-se também que o valor de retracção linear mais elevado é verificado para a retracção linear tangencial, cerca de 3,75% para $T=35^{\circ}C$, $HR3$ (Figura 7.1). Este resultado está de acordo com os obtidos anteriormente para a dessorção. Deste modo, existe uma relação directa entre a maior perda de teor de humidade e a retracção.

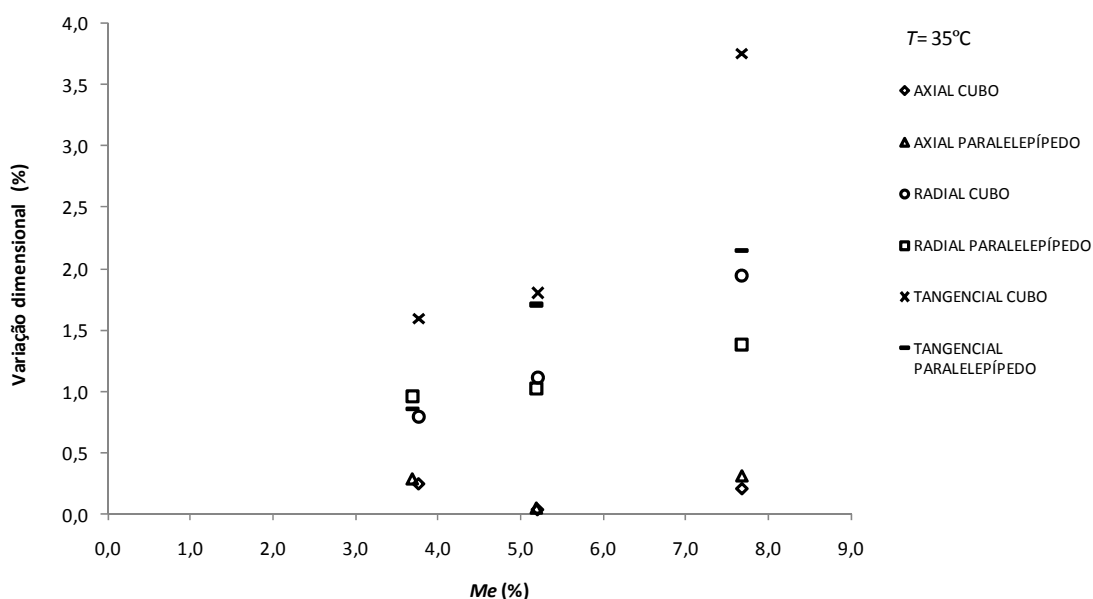
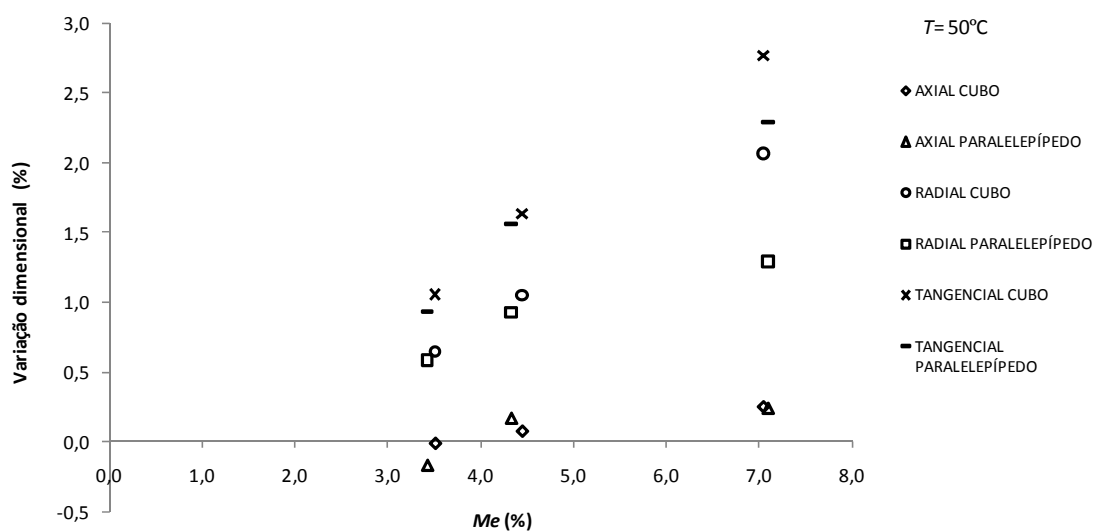


Figura 7.1 – Diagrama de retracção, $T= 35^{\circ}C$.

Tabela 7.1 – Valores da retracção linear (ϵ_r), $T=35^\circ\text{C}$.

Provete	LONGITUDINAL (AXIAL)			RADIAL			TANGENCIAL		
	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3
NC	0,25	0,04	0,21	0,80	1,12	1,94	1,59	1,80	3,75
NP	0,29	0,05	0,32	0,96	1,02	1,38	0,86	1,71	2,15

De acordo com Siau (1995), a retracção na direcção tangencial é normalmente duas vezes maior que na direcção radial para a maior parte das espécies de madeiras. Por análise da Figura 7.1, para $T=35^\circ\text{C}$ e HR3, a retracção tangencial para os provetes *cubos* (NC) é aproximadamente 1,9 vezes a retracção radial. Para os provetes *paralelepípedos* (NP) é aproximadamente 1,6 vezes.

Figura 7.2 – Diagrama de retracção, $T=50^\circ\text{C}$.Tabela 7.2 – Valores da retracção linear (ϵ_r), $T=50^\circ\text{C}$.

Provete	LONGITUDINAL (AXIAL)			RADIAL			TANGENCIAL		
	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3
NC	-0,01	0,07	0,25	0,65	1,05	2,06	1,05	1,63	2,76
NP	-0,17	0,17	0,24	0,59	0,93	1,29	0,94	1,56	2,29

Para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $HR3$, Figura 7.2, a retracção tangencial para os provetes *cubos* (NC) é aproximadamente de 1,3 vezes a retracção radial. Para os provetes *paralelepípedos* (NP) é de aproximadamente 1,8 vezes.

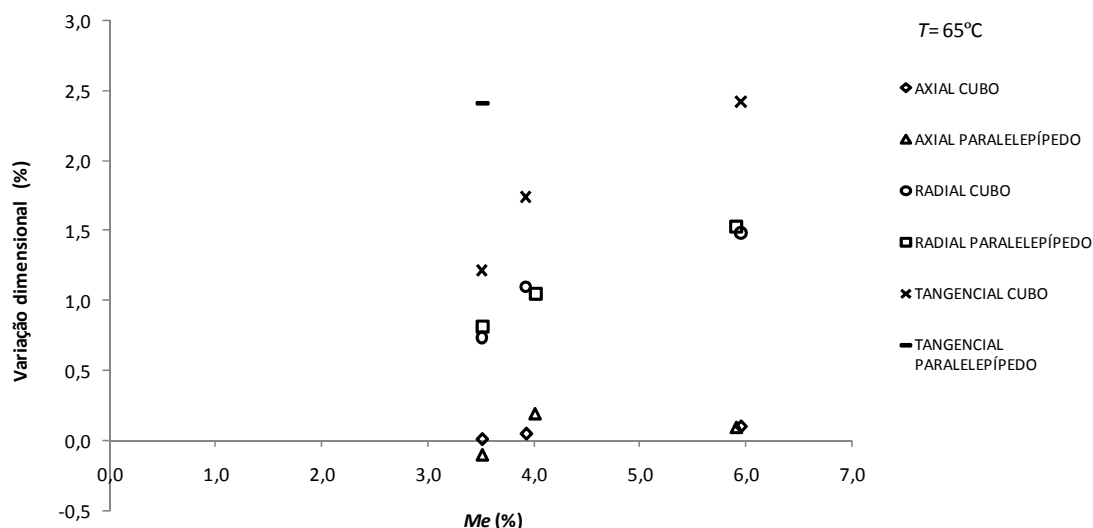


Figura 7.3 – Diagrama de retracção, $T = 65^{\circ}\text{C}$.

Tabela 7.3 – Valores da retracção linear (ϵ_r), $T = 65^{\circ}\text{C}$.

Provete	LONGITUDINAL (AXIAL)			RADIAL			TANGENCIAL		
	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3
NC	0,01	0,05	0,10	0,74	1,10	1,48	1,22	1,74	2,42
NP	-0,10	0,20	0,10	0,81	1,05	1,53	1,12	1,68	2,41

Da Figura 7.3 para $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $HR3$, verifica-se que a retracção tangencial para os provetes *cubos* (NC) é de aproximadamente 1,6 vezes a retracção radial. O mesmo se verifica para os provetes *paralelepípedos* (NP).

Quando a humidade contida, evapora da parede das células da madeira, a matriz encolhe-se e as microfibrilas ficam mais perto umas das outras. Na direcção das microfibrilas (i.e. direcção longitudinal ou axial), há uma modificação pouco significativa na dimensão. Isto é devido ao facto de as paredes das células estarem mais distanciadas na direcção longitudinal (aproximadamente 100 paredes de células na direcção transversal para uma parede na longitudinal da mesma distância) (Time, 1998). A retracção normal da madeira na direcção longitudinal (L) esta compreendida entre 0,1% a 0,3%, embora a retracção seja maior no lenho inicial do que no lenho final. Devido a esta pequena magnitude na madeira, a componente longitudinal não é considerada (Siau, 1995).

Como se pode constatar, pelos resultados obtidos, a retracção linear axial é tem um valor muito baixo a como tal é desprezada. Observa-se também que quanto maior for a humidade relativa maior é o valor da retracção do provete, independentemente da temperatura. No entanto, relativamente a esses factores (humidade relativa e temperatura), verifica-se que o aumento destes em conjunto traduz num aumento da retracção.

7.2.2 Inchamento

De seguida são apresentados os resultados referentes ao fenómeno de inchamento linear (axial, radial e tangencial). Para o efeito, são utilizados diagramas que mostram variação dimensional (%) *versus* teor de água (%) (teor de humidade no equilíbrio relativo à adsorção), para os *provetes não isolados (cubos e paralelepípedos)*

Pela análise das Figuras 7.4, 7.5 e 7.6 e Tabelas 7.4, 7.5 e 7.6, pode observar-se que o inchamento linear radial e tangencial, tal como se verifica na retracção, apresenta valores mais elevados para a humidade relativa mais elevada ($HR3$), independentemente da temperatura. Verifica-se também que o valor do inchamento linear mais elevado é para o inchamento linear tangencial, apresentando uma variação em cerca de 2,50% para $T=35^{\circ}\text{C}$, (Figura 7.4), sendo 50% inferior ao maior valor da retracção linear registada. Este resultado, vem de alguma forma comprovar o que foi referido aquando do estudo da adsorção e dessorção: a quantidade de humidade movimentada nos dois processos não é exactamente igual.

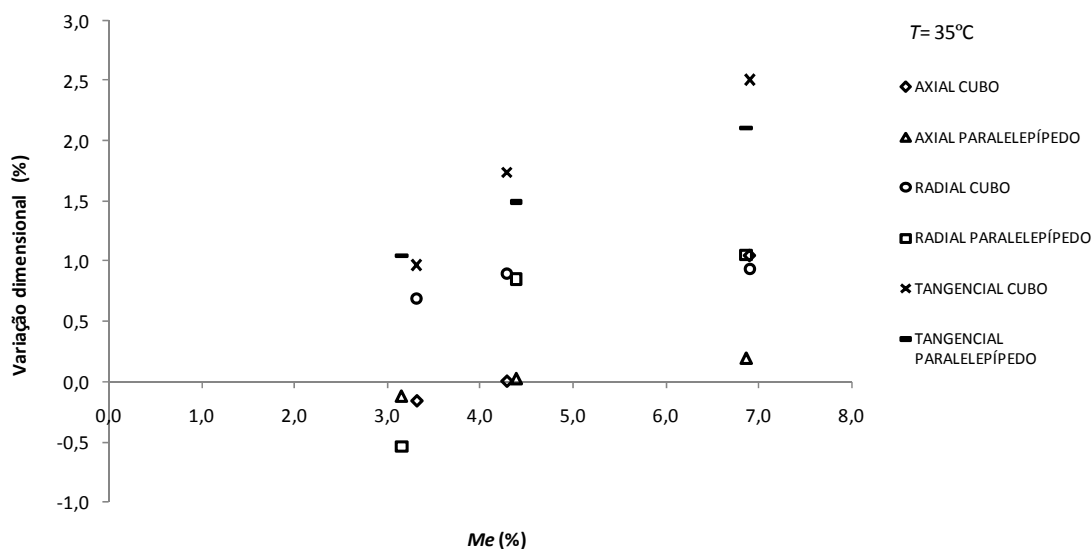
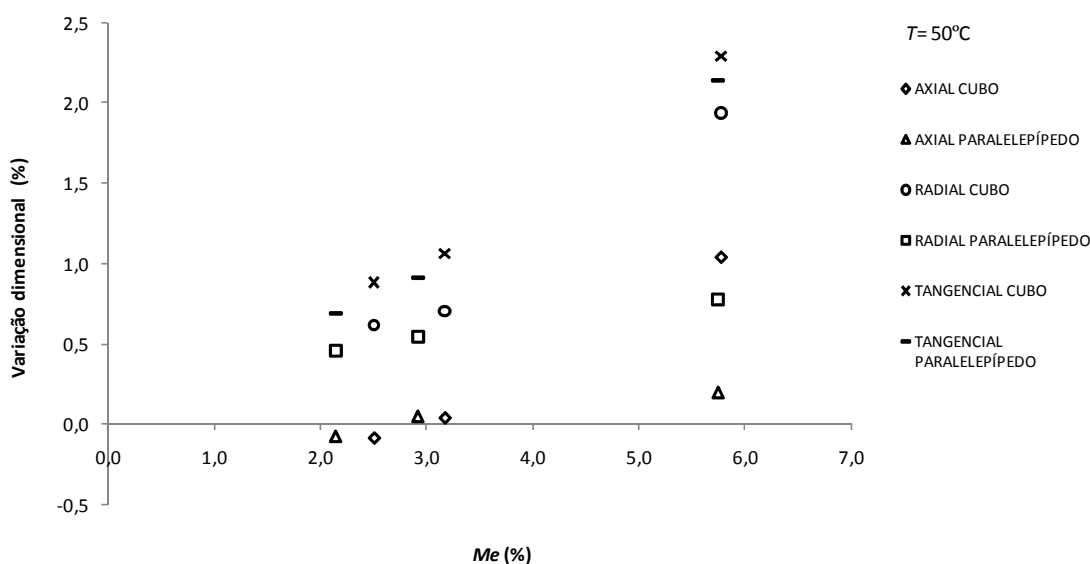


Figura 7.4 – Diagrama de inchamento, $T=35^{\circ}\text{C}$.

Tabela 7.4 – Valores do inchamento linear (ϵ_i), $T=35^\circ\text{C}$.

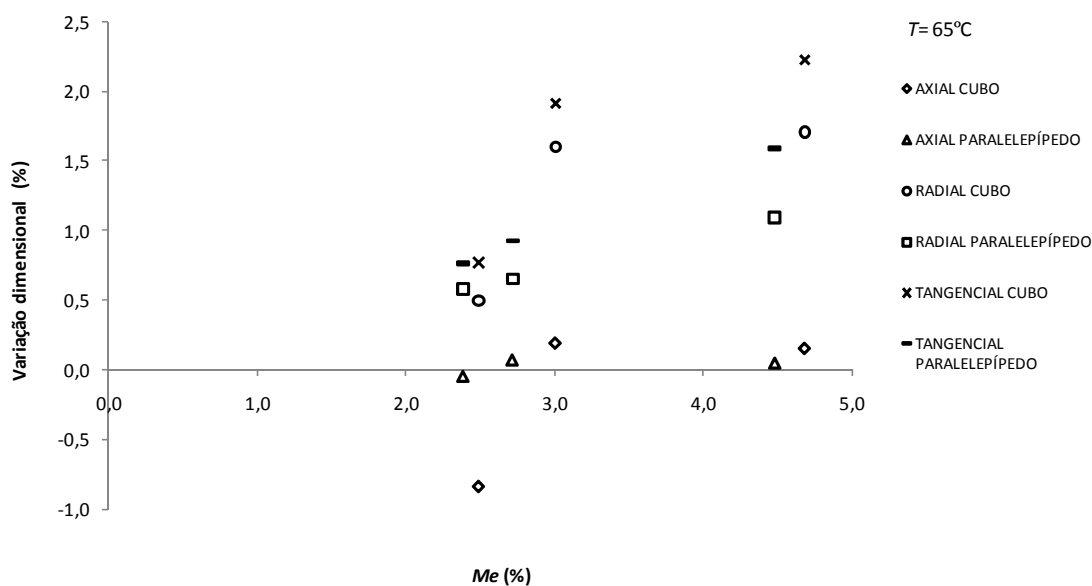
Provete	LONGITUDINAL (AXIAL)			RADIAL			TANGENCIAL		
	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3
NC	-0,16	0,00	1,04	0,69	0,90	0,94	0,97	1,74	2,50
NP	-0,12	0,02	0,19	-0,54	0,85	1,05	1,04	1,49	2,10

Da figura 7.4, para $T = 35^\circ\text{C}$ e $HR3$, verifica-se que o inchamento tangencial para os provetes *cubos* (NC) é de aproximadamente 2,7 vezes o inchamento radial. Para os provetes *paralelepípedos* (NP), o inchamento tangencial é avaliado em 2 vezes o inchamento radial. O inchamento axial (longitudinal) é praticamente nulo, apenas para $HR3$ apresenta uma variação de 1%.

Figura 7.5 – Diagrama de inchamento, $T= 50^\circ\text{C}$.Tabela 7.5 – Valores do inchamento linear (ϵ_i), $T=50^\circ\text{C}$.

Provete	LONGITUDINAL (AXIAL)			RADIAL			TANGENCIAL		
	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3
NC	-0,09	0,04	1,03	0,62	0,70	1,93	0,88	1,06	2,29
NP	-0,07	0,05	0,19	0,46	0,54	0,78	0,69	0,91	2,14

Para $T = 50^\circ\text{C}$ e $HR3$, Figura 7.5, o inchamento tangencial para os provetes *cubos* (NC) é aproximadamente de 1,2 vezes o inchamento radial. Já para os provetes *paralelepípedos* (NP), o inchamento tangencial é de 2,7 vezes o inchamento radial.

Figura 7.6 – Diagrama de inchamento, $T=65^{\circ}\text{C}$.Tabela 7.6 – Valores do inchamento linear (ϵ_i), $T=65^{\circ}\text{C}$.

Provete	LONGITUDINAL (AXIAL)			RADIAL			TANGENCIAL		
	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3	HR 1	HR 2	HR 3
NC	-0,84	0,19	0,15	0,49	1,60	1,71	0,77	1,91	2,22
NP	-0,05	0,07	0,05	0,58	0,65	1,09	0,76	0,92	1,59

Por análise da Figura 7.6 para $T=65^{\circ}\text{C}$ e $HR3$, o inchamento tangencial para os provetes *cubos* (NC) é aproximadamente de 1,3 vezes ao inchamento radial e para os provetes *paralelepípedos* (NP), o inchamento tangencial é de 1,5 vezes o inchamento radial.

7.2.3 Conclusões

Foram desenvolvidas medições de retracção e inchamento em *provetes não isolados*, que permitiram estudar o comportamento destes, em função das diferentes temperaturas e humidades relativas estudadas. Foi possível identificar os parâmetros de retracção e inchamento lineares nas condições já mencionadas, cujos resultados foram apresentados e analisados no presente Capítulo.

A retracção e o inchamento linear radial e tangencial apresentam valores mais elevados para a humidade relativa estudada mais elevada ($HR3$), independentemente da temperatura. No entanto, de uma forma geral, quando ambos os parâmetros (humidade relativa e temperatura) aumentam, traduz-se num aumento da retracção e do inchamento.

Conclui-se também que os valores mais elevados para a retracção e inchamento linear, é verificado na direcção tangencial, com cerca de 3,75% e 2,50%, respectivamente, considerando $T=35^{\circ}\text{C}$.

De um modo geral, pode concluir-se que a retracção e o inchamento linear axial é pouco significativa, como Siau (1995) e Time (1998) referiram.

Na previsão de Siau (1995), a retracção na direcção tangencial é normalmente duas vezes maior que na direcção radial para a maior parte das espécies de madeiras. Pelos resultados obtidos, conclui-se que este facto, é verificado para a retracção quando os provetes são das variantes *cubos* e *paralelepípedos* à temperatura mais baixa e humidade relativa mais elevada estudada.

Capítulo 8

Conclusões Finais e Trabalho Futuro

8.1 Conclusões finais

O objectivo principal deste trabalho foi a determinação experimental de curvas características da difusão, de acordo com as leis de Fick, relativas à adsorção e à dessorção de humidade tridimensional e unidimensional (direcção longitudinal e tangencial), em provetes de duas geometrias diferentes. Para a concretização do programa experimental foram consideradas diferentes condições em termos de temperatura e humidade relativa.

Os resultados experimentais foram posteriormente ajustados recorrendo ao modelo matemático de Shen & Springer. Através deste modelo, foram identificados o coeficiente de difusão e o teor de humidade em equilíbrio. Os resultados, de um modo geral, ilustraram o ganho e perda de humidade na madeira.

Foi elaborado um estudo preliminar que permitiu desenvolver uma metodologia experimental, identificando os necessários equipamentos, a necessária aprendizagem para um correcto manuseamento dos mesmos e a organização prática necessária para realização do estudo experimental da difusão. Através do estudo preliminar elaborado, foi desenvolvido um procedimento experimental que se mostrou ao longo de todos os ensaios

efectuados, ser o adequado. Também as dimensões dos provetes e o material de isolamento mostraram-se adequados ao estudo do transporte de água na madeira. O número de provetes de cada variante estudada, mostrou-se ser o suficiente, uma vez que a média dos resultados reflectiu os valores individuais de cada provete.

Dos resultados para os ensaios de adsorção, verificou-se que a taxa de ganho de massa diminui com o aumento da temperatura, independentemente das diferentes humidades relativas. Conclui-se também que o aumento da humidade relativa traduz-se num aumento de massa no provete, independentemente da temperatura e que o aumento desta, reduz o tempo que provete demora a atingir o patamar de saturação à condição de humidade relativa imposta.

De um modo geral, na adsorção, os provetes reproduziram curvas típicas de difusão. Considerando os provetes *não isolados* nas duas geometrias, verificou-se que o valor do teor de água no equilíbrio não apresentou uma diferença significativa. Já o coeficiente de difusão mostrou diferenças, evidenciando uma diferença de 211% nos valores mais elevados de temperatura e humidade relativa estudadas. Ainda dos resultados obtidos para o coeficiente de difusão nos provetes *não isolados*, verificaram-se ganhos na ordem dos 111% para os provetes da variante *cubos* e 448% para provetes da variante *paralelepípedos* à temperatura de 65°C, quando a humidade relativa aumenta de 30% para 65%.

Na situação em que os provetes apenas têm as faces das *direcções longitudinais não isoladas*, em ambas as geometrias, o valor do teor de humidade no equilíbrio, tal como se verifica para os provetes *não isolados*, não apresenta diferenças significativas. Para o coeficiente de difusão não se verifica tal situação, evidenciando uma diferença de aproximadamente 174%. Verificou-se também que, quando a humidade relativa aumenta de 30% para 65% à temperatura de 65°C, o coeficiente de difusão obtém ganhos de 87% para os provetes da variante *cubos* e 130% para provetes da variante *paralelepípedos*.

Os resultados dos ensaios de adsorção realizados com provetes de *faces não isoladas na direcção tangencial*, mostraram três aspectos não verificados, quando comparados com os ensaios de provetes *não isolados* e *não isolados na direcção longitudinal*. O primeiro aspecto, é a dificuldade que a madeira oferece ao transporte de humidade na direcção tangencial. Pois, estes provetes apresentaram um tempo necessário para atingir o equilíbrio muito superior em relação aos restantes provetes. A variação máxima deste tempo foi de

1080 horas. O segundo aspecto e talvez o mais importante, é a diminuição drástica do coeficiente de difusão, independentemente da geometria, face às restantes variantes de provetes, registando uma variação que pode ser avaliada em 2500%. O terceiro aspecto é a diminuição verificada, no que diz respeito ao teor de humidade no equilíbrio, chegando a registar uma diferença em cerca de 329%.

De um modo geral, para todas as variantes de provetes, com a excepção da variante de *provetes não isolados na direcção tangencial*, a principal diferença verificada entre as duas geometrias estudadas, foi a variação significativa do coeficiente de difusão, registando variações em cerca de 240%.

Dos resultados para os ensaios de dessorção, conclui-se que a taxa de perda de massa diminui com o aumento da temperatura, independentemente das diferentes humidades relativas em que se encontravam os provetes antes de se iniciar a dessorção. O aumento da temperatura reduz o tempo necessário para atingir o equilíbrio (tempo que demora os provetes a secar).

Conclui-se que, a velocidade de remoção de água à temperatura mais baixa estudada diminui em relação às restantes, sendo estas superiores, uma vez que a energia fornecida para a evaporação da água é menor e, de um modo geral, as temperaturas mais elevadas estudadas aumentaram a velocidade da remoção da água localizada na madeira sob a saturação de uma determinada condição de humidade relativa e temperatura, referente da adsorção.

De um modo geral, pode concluir-se que para a dessorção, o coeficiente de difusão aumenta com o aumento da temperatura em todas as variantes de provetes. Verifica-se que os valores mais elevados, estão associados a humidades relativas e temperaturas mais elevadas. A comparação dos valores do coeficiente de difusão, mostra que estes são inferiores na dessorção, quando comparados com os obtidos na adsorção, independentemente da geometria. Verificaram-se variações em provetes da variante *cubos não isolados*, em cerca de 125% e em provetes *não isolados na direcção tangencial*, variações de aproximadamente 450%.

Conclui-se que, quando apenas as *faces na direcção longitudinal* estão expostas à adsorção ou à dessorção, os valores do coeficiente de difusão e do teor de humidade no equilíbrio, praticamente são iguais aos obtidos para os *provetes não isolados*. Assim, pode

concluir-se que é pela direcção longitudinal que grande parte o transporte de humidade ocorre na madeira de *Pinus pinaster*.

Foram avaliados os parâmetros de retracção e inchamento, que permitiram estudar o comportamento destes, em função das diferentes condições em termos de temperatura e humidade relativa. Foi possível identificar os parâmetros de retracção e inchamento lineares nas condições estudadas.

Conclui-se que a retracção e o inchamento na madeira de *Pinus pinaster*, de uma forma geral, apresenta valores mais elevados à medida que a temperatura e humidade relativa aumenta, verificando-se que, na direcção tangencial, apresenta valores sensivelmente duas vezes superiores do que os verificados na direcção radial. Na direcção longitudinal, os valores da retracção e inchamento são pouco significativos.

8.2 Trabalho futuro

O presente trabalho contribui para o estudo e interpretação da forma como a humidade se movimenta na madeira segundo as diferentes direcções de simetria anatómica da madeira. Contribui também, para o estudo e interpretação da variação dimensional.

No que se refere ao desenvolvimento futuro do trabalho apresentado, pretende-se dar continuidade ao estudo das propriedades de difusão, alargando o número de condições em termos de humidade relativa e temperatura. Desta forma, pretende-se identificar as propriedades de difusão, nesta espécie florestal, ao longo de todo o intervalo possível da humidade relativa.

Também, pretende-se identificar novos modelos matemáticos que por ajuste aos resultados experimentais, permitam a identificação das propriedades de difusão.

Referências Bibliográficas

Aaron, J., 2006, “*Diffusion of chemicals into green wood*”, Dissertation Thesis, School of Chemical and Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology.

Adler, E., “*Lignin - Past, Present and Future*”, Wood Science and Technology, 1977.

Alén, R., “*Forest Products Chemistry*”, Papermaking Science and Technology. 2000, Helsinki: Fapet Oy.

ASTM E 104-85, 1991, “*Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solution*”, American Society for Testing and Materials, Book of ASTM Standards. ASTM Philadelphia, PA.

Bolton, A.J., and J.A. Petty, 1978. “*A model describing axial flow of liquids through conifer wood*”, Wood Science and Technology 12.

Bruck H. A., Evans J. J., Peterson M. L., 2002, “*The role of mechanics in biological and biologically inspired materials*”, Experimental Mechanics.

Butterfield, B.G., Meylan, B.A., 1980, “*Three-dimensional structure of wood: an ultrastructural approach*”, Chapman and Hall, London.

Butterfield, B.G., Meylan, B.A., 1972. “*Three-dimensional structure of wood: a scanning electron microscope study*”, Reed Education, Hong Kong.

Carvalho A., 1996, Madeiras Portuguesas – “*Estrutura Anatómica, Propriedades, Utilizações*”, Vol. I. Direcção Geral de Florestas, Portugal.

Chapelet, Josette; Dirol, Danièle; Ozanne, Gérald; Rayzal, Michel e Serment, Marie-Madeleine, 1991, *Bois: “Mode d’emploi et preservation”*, Département Biologie - Environnement - Technologies. Centre Technique du Bois et de l’Ameublement - CTBA, Décembre.

Choong, E.T. and Fogg, P.J., 1968, “*Moisture movement in six wood species*”, Forest Products Journal, Vol. 18, No. 5.

Christensen, GN., 1965, “*The rate of sorption of water vapor by thin materials*”, Division of Forest Products, Commonwealth Scientific and Industrial Research organization, Australia.

Comstock, G.L., 1963, “*Moisture diffusion in wood as calculated from adsorption, desorption and steady state data*”, Forest Products Journal, Vol. 13.

Costa, M.M.L., Rodrigues, P.M.G.A.O., 2005, “*Estudo do envelhecimento físico de um polímero estrutural*”, Relatório de Projecto, Engenharia Mecânica, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, Vila Real.

Crank, J., 1975, “*The mathematics of diffusion*”, Oxford Science Publications. Second edition. Clarendon Press, Oxford.

Dinwoodie, J.M., 2000, “*Timber, Its nature and behavior*”, Van Nostrand Reinhold, 2 edition.

Eaton, R.A. and M.D.C. Hale. 1993. Wood: “*Decay, Pests, and Protection*”, Chapman and Hall, New York.

Gibson L.J. e M.F. Ashby, 1997, “*Cellular solids. Structure and properties*”, Cambridge University Press, 2 edition.

Hale, J.D., 1969, “*Structural and Physical Properties of Pulpwood*”, in *The Pulping of Wood*, R.G. MacDonald, Editor, McGraw-Hill: New York.

Hansen, Kurt, 1986, “*Sorption isotherms*” - A catalogue. *Technical report 162/86*. Building Materials Laboratory. The Technical University of Denmark.

Haygreen J. G., Bowyer J. L., 1982, “*Forest products and wood science - an introduction*”, Iowa State University Press/Ames.

Haygreen, J.G., and J. L.Bowyer., 1996. Forest Products and Wood Science: “*An Introduction*”, Iowa State University Press, Iowa.

Hillel, D., 1971, “*Soil and Water*”, Academic Press. New York.

Hiziroglu, Salim. F-5009 – “*Dimensional Changes in Wood*”, Oklahoma State University (OSU). Division of Agricultural Sciences and Natural Resources.

Hougen, O. A., H.J. McCauley, and W.R. Marshall 1940, “*Limitations of diffusion equations in drying*”, AIChE Transaction.

I.P.Q., 1973, NP-614. Madeiras. “*Determinação do teor em água*”. Lisboa.

I.P.Q., 1973, NP-615. Madeiras. “*Determinação da retracção*”. Lisboa.

Jozsa L. A., Middleton G. R.,1994, “*A discussion of wood quality attributes and their practical implications*”, Forintek Canada Corporation, Vancouver.

Karhunen, P., et al., 1995, *Dibenzodioxocins; A Novel Type of Linkage in Softwood Lignins*. Tetrahedron Letters.

Kelly, M.W., Hart, H.C., 1970, “*Water vapour sorption rates by wood cell walls*”, Wood and Fiber, Vol. 1, No.4.

Kininmonth, J.A. and Whitehouse, L.J. 1991, “*Properties and uses of NZ radiata pine*”, Volume 1 wood properties. Ministry of Forestry and FRI.

Kollman F P F, Côté W A, 1984, “*Principles of wood science and technology. Solid Wood*”, Springer-Verlag, Berlin.

Kozłowski T.T., and S.G. Pallardy, 1997, “*Physiology of Woody Plants*”. Academic Press. New York.

LNEC, 1997, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, “*Ficha M9*”, Humidade da madeira.

Lewin M. and I.S. Goldstein. 1991, “*Wood structure and composition*”. International Fiber Science and Technology Series, Vol. 11.

Martins L.A.S.B. 1990, “*Determinação de curvas características da secagem de rolhas de cortiça*”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de engenharia, Porto, Portugal.

Massey, B. S. 1986, “*Mechanics of Fluid*”, 6th edition. Reinhold Co. Van Nostrand, London.

Mårtensson, A., 1992, *Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations*, Doctoral Thesis, Report TVBK – 1006, Lund Institute of Technology. Department of Structural Engineering.

Melo, J., 2000, “*Secagem de Madeiras*”, Teoria e prática de secagem artificial de madeiras.

Oliveira J. M., 2004, “*Aplicação do ensaio de Arcan na identificação do comportamento ao corte da madeira*”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, Vila Real.

Pereira J., 2005, “*Comportamento mecânico da madeira em tracção nas direcções de simetria material*”. Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, Vila Real.

Perre, P., and S. Mosnier, 1995. “*Vacuum drying with radiative heating*” Vacuum Drying of Wood ‘95.

Porter H.F., Schurr, G.A., Wells, D.F., and Semrau, K.T., 1984, “*Solids Drying and Gas-Solid Systems*”, Perry's Chemical Engineering Handbook. McGraw-Hill, Singapore, 6 Ed.

Rowell, Roger M., 1984, “*The chemistry of solid wood*”, American chemical society, Washington D. C.

Rowell, Roger M. 2005, “*Handbook of wood chemistry and composites*”, CRC Press, Washington D. C.

Salisbury, F.B. and C.W. Ross., 1992. “*Plant physiology*”, Wadsworth Publish Co. CA.

Sampaio, J. C., 1995, “*Apontamentos das aulas teóricas de materiais de construção*”, FEUP, Porto, 1975/76.

Sarkanen, K.V. and C.H. Ludwig, 1971, “*Lignins: occurrence, formation, structure and reactions*”, New York: Wiley. 916.

Schniewind, A.P., 1989, “*Concise encyclopedia of wood and wood-based materials*”, Pergamon Press

Shen, C. H., Sringer, G. S., 1976, “*Moisture absorption and desorption of composite materials*”, Journal of Composite Materials.

Siau, J.F., 1995, “*Wood: Influence of moisture on physical properties*”, Department of Wood Science and Forest Products. Virginia Polytechnic Institute and state university.

Siau, J.F., 1984, “*Transport Process in Wood*”. Springer-verlag, New York.

Stamm, A.J., 1960, “*Bound-water diffusion into wood in across-the-fiber directions*”, Forest Products Journal, Vol 10.

Stamm, A.J., 1964, “*Wood-and Cellulose Science*”, The Ronald Press Company, New York.

Stamm, A.J., Nelson R.M.Jr., 1961, “*Comparison between measured and theoretical drying diffusion coefficients for southern pine*”, Forest Products Journal, November.

Tesoro, F.O., E.T. Choong, and O.K. Kimbler, 1974, “*Relative permeability and the gross pore structure of wood*”, Wood and Fiber.

Thibaut B., Gril J., Fournier M., 2001, “*Mechanics of wood and trees: some new highlights for an old story*”, C. R. Acad. Sci. Paris.

Tiemann, H. D., 1906, “*Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood*”, USDA Forest Service, Bulletin 70.

Time, Berit, 1998, “*Hygroscopic moisture transport in wood*”, Doctoral Thesis, Department of Building and Construction Engineering, Norwegian University of Science and Technology.

Tsoumis G., 1991, “*Science and technology of wood: Structure, properties, utilization*” Van Nostrand Reinhold, New York.

Uriaitt, A. A, “*A madeira como material de construção*”. Capítulo 17. Materiais de construção 2. L.A. Falão Bauer – Livros Técnicos e Científicos Editora, 4ª Edição, Rio de Janeiro, Brasil, 1992.10

U.S.D.A., 1999, Wood handbook – “*Wood as an engineering material*”. Gen. Tech. Rep.FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, ForestProducts Laboratory.

Xavier J.C., “*Caracterização do comportamento ao corte do Pinus Pinaster Ait. usando o ensaio de Iosipescu*”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, Vila Real, 2003.

Waananen, K.M., and M.R. Okos, 1989. “*Analysis of mass transfer mechanisms during drying of extruded semolina*”, Proceedings of the 5th International Congress on Engineering and Food. May 28-June 3, Cologne, Germany.

Wadsø, L. 1993, “*Studies of water vapor transport and sorption in wood,*” Doctoral Dissertation, Report TVBM-1013, Building Materials, Lund University.

Walker, J.C.F., 1993, “*Primary Wood Processing*”. Chapman & Hall, New York.

Yokota, T., 1959, “*Diffusion of sorption-water through the cell wall of wood*”, Japan Wood Research Society, Vol. 5, No. 4.20

Zhangjing, C. 1997, “*Primary driving force in wood vacuum drying*”, Doctoral Thesis, Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University

Zimmermann, M.H. 1983, “*Xylem Structure and the Ascent of Sap*”, Springer-Verlag, Berlin.