PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

GUILHERME ROIKO

ANÁLISE NUMÉRICA DA INÉRCIA HIGROSCÓPICA EM MATERIAIS POROSOS DE EDIFICAÇÃO

CURITIBA
Agosto – 2017

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

GUILHERME ROIKO

ANÁLISE NUMÉRICA DA INÉRCIA HIGROSCÓPICA EM MATERIAIS POROSOS DE EDIFICAÇÃO

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luís Mauro Moura

CURITIBA
Agosto – 2017

[folha de aprovação]

Dedico este trabalho aos meus Pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná pela oportunidade de realizar o curso de Mestrado na área de Energia e Engenharia Térmicas.

Agradeço a equipe do Laboratório de Sistemas Térmicos da PUCPR: ao Dr. Nathan Mendes e ao Ms. Walter Mazuroski pela ajuda referente ao *software* Domus – Eletrobras.

Agradeço a professora Dr. Viviana Cocco Mariani por fornecer acesso ao Laboratório de Simulações Computacionais da PUCPR.

Agradeço ao José Walter Meissner e Ayres Siqueira Silva por fornecer seus dados experimentais obtidos em suas pesquisas.

I have not failed, I've just found 10,000 ways that won't work.

Thomas Edison

SUMÁRIO

RESUMO ..... **III**
ABSTRACT ..... **IV**
LISTA DE FIGURAS ..... **V**
LISTA DE TABELAS ..... **IX**
LISTA DE SIMBOLOS ..... **X**

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO **1**

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **6**

2.1 MATERIAL POROSO 6
2.2 MADEIRA 7
2.3 COMPOSIÇÃO DE MISTURAS E PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS 10
2.4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A UMIDADE NOS MATERIAIS POROSOS 13
2.5 PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE 16
2.6 MOISTURE BUFFER VALUE (MBV) 27

CAPÍTULO 3 - MODELO MATEMÁTICO **31**

3.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO 36
3.2 ENVOLTÓRIO 36
3.3 EQUAÇÕES DISCRETIZADAS 38
3.4 COMPARAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO COM SOLUÇÃO ANALÍTICA 39
3.5 REFINO DE MALHA 43
3.6 MODELOS NUMÉRICOS 45

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS **49**

4.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONSTANTES UTILIZADAS 49
4.2 PROPRIEDADES DO MATERIAL 49

4.3 COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO E DIFUSIVIDADE EFETIVA 52
4.4 UMIDADE RELATIVA.....56
4.5 MASSA DE VAPOR.....57
4.6 SORÇÃO 62
4.7 MBV.....68
4.8 TESTE DA BANCADA CONSTRUIDA 77

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....82

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS 85

APÊNDICE A – DOMUS – ELETROBRAS 89

APÊNDICE B – APARATO FÍSICO EXPERIMENTAL.....95

APÊNDICE C – EXEMPLO DO MODELO EM MATLAB 97

RESUMO

Neste estudo foi desenvolvido um modelo matemático para calcular a transferência de massa de vapor em geometria 1-D com objetivo de analisar a medição do índice MBV de materiais higroscópicos utilizados principalmente na construção civil. Nesta dissertação utilizou-se placas de madeira compensada com espessura de 15 mm. O modelo matemático foi desenvolvido na plataforma Matlab R2015a e também se utilizou o *software* Domus – Eletrobras. Este modelo tem o objetivo de aplicar condições do protocolo NORDTEST aos experimentos físicos feitos por Silva (2017) e Meissner (2008). Como o protocolo propõem variação de umidade no tempo para uma temperatura constante utiliza-se a hipótese isotérmica ao modelo, considerando apenas a transferência de massa por difusão. Para as simulações também foram utilizados a variação de umidade relativa no tempo registradas pelos sensores durante o experimento para comparações. É constatado que o índice MBV para a variação de umidade dos sensores é menor para o MBV obtido pelo protocolo NORDTEST. Para todas as isotermas de umidade foi obtido um valor diferente do MBV, sendo os maiores valores para as propriedades higroscópicas do material de Wu (2007), seguido de Osanyintola *et al.* (2006) e o valor mais baixo para Domus – Eletrobras. Os resultados de Silva (2017) apresentam um comportamento altamente higroscópico superior a todos os outros, não foi possível explicar matematicamente porque ocorreu este valor muito superior. O valor encontrado pelo modelo numérico ficou próximo dos ensaios para a célula-teste de Meissner (2008). Analisa-se neste trabalho os resultados diferentes obtidos por Meissner (2008) para a sua célula-teste e amostra para o mesmo experimento físico.

Palavras-Chave: Higroscópico, MBV, Protocolo NORDTEST, isotermas de umidade.

ABSTRACT

In this study, a mathematical model was developed to calculate the vapor mass transfer in 1-D geometry with the aim of analyzing the measurement of the MBV index of hygroscopic materials used mainly in civil construction. In this dissertation, plywood boards with a thickness of 15 mm were used. The mathematical model was developed on the Matlab R2015a platform and Domus - Eletrobras software was also used. This model has the objective of applying NORDTEST protocol conditions to the physical experiments done by Silva (2017) and Meissner (2008). As the protocol propose humidity variation in the time for a constant temperature the isothermal hypothesis is used to the model, considering only the mass transfer by diffusion. For the simulations we also used the variation of relative humidity in the time recorded by the sensors during the experiment for comparisons. It is verified that the MBV index for the humidity variation of the sensors is lower for the MBV obtained by the NORDTEST protocol. For all moisture isotherms a different value of MBV was obtained, the higher values for the hygroscopic properties of the material of Wu (2007), followed by Osanyintola *et al.* (2006) and the lowest value for Domus - Eletrobras. The results of Silva (2017) present a higher hygroscopic behavior than all others, it was not possible to explain mathematically because this much higher value occurred. The value found by the numerical model was close to the tests for the Meissner test cell (2008). We analyze the different results obtained by Meissner (2008) for his test cell and sample for the same physical experiment.

Key words: Hygroscopic, MBV, NORDTEST protocol, moisture isotherms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Exemplo da germinação de fungos dentro de uma edificação habitacional. a) Fungos dentro de um telhado (Fonte: http://www.pasi.us/mold_attic.jpg). b) Fungos escondidos dentro de uma parede (Fonte: http://www.pasi.us/mold_wall_hidden.jpg) 2
Figura 1-2 Caixa de madeira (Célula-Teste) (Meissner, 2008).....5
Figura 2-1 A – Forma genérica de árvore conífera. B – Forma genérica de uma árvore Folhosa. C – Corte transversal de uma Pseudotsuga mensiezii, sendo os espaços em branco os canais de resina. D – Corte transversal de uma Betula allegheniensis, os círculos brancos são os vasos ou poros. Escala de medida 780 μm (Forest Products Laboratory, 2010). 8
Figura 2-2 Vistas de cortes transversais de algumas espécies de madeira. a) Pinus caribaea (softwood), b) Pinus taeda (softwood), c) Corymbia citriodora (hardwood), d) Eucalyptus globulus (hardwood) (Fonte: http://www.eucalyptus.com.br/GalleryM5/index.php (Fonte: http://www.eucalyptus.com.br/GalleryM6/index.php)). 8
Figura 2-3 Vista em corte da parede celular. Adaptado de Forest Products Laboratory (2010). 9
Figura 2-4 Representação da profundidade de penetração em um material higroscópico (Rode *et al.*, 2008).....13
Figura 2-5 Influência do fluxo de vapor numa amostra em função do número de Bi_m, adaptado de Rode (2005).....14
Figura 2-6 Variação do Teor de Umidade no meio poroso em função da umidade relativa do ambiente (Ramos, 2007). 15
Figura 2-7 Etapas de fixação de água nos poros (Ramos, 2007). 16
Figura 2-8 As etapas do transporte de vapor no poro em função do teor de umidade. Etapa 1: Fluxo de vapor; Etapa 2: Transporte em série de líquido mais vapor; Etapa 3: Transporte em paralelo de líquido mais vapor; Etapa 4: fluxo líquido (Peukuri, 2003). 17
Figura 2-9 Transporte de umidade nas “lhas de Líquido”.....18
Figura 2-10 Menisco formado pela condensação capilar e Vista do detalhe dos raios e ângulo de contato. Adaptado de Hens (1991). 20

Figura 2-11 D_{eq} em função da umidade relativa, Lei de Thompsons na temperatura de 20ºC. Adaptado de Hens (2012). 21
Figura 2-12 A histerese no poro, Adaptado Hens (1991). 22
Figura 2-13 Isotermas de adsorção/dessorção para diferentes materiais. Adaptado de Kwiatkowski *et al.* (2009).....23
Figura 2-14 Linha da pressão de saturação do vapor. Adaptado de Hens (2012). ...24
Figura 2-15 Transferência de massa por difusão, mistura gasosa binaria (Incropera *et al.*, 2008). 25
Figura 2-16 Conservação de espécie num volume de controle (Incropera *et al.*, 2008). 26
Figura 2-17 Volume de controle diferencial – dx, dy, dz – para difusão de uma espécie em coordenadas cartesianas (Incropera *et al.*, 2008). 27
Figura 2-18 Classificação do MBV do material, adaptado de Rode (2005). 29
Figura 2-19 O MBV medido por vários laboratórios dos três últimos ciclos com variação constante medidos no *Robin Round Test*. Incluindo barra de desvio padrão, adaptado de Rode (2005). 30
Figura 3-1 Isoterma de sorção para madeira compensada, medição e equação. Adaptado de Osanyintola *et al.* (2006).....34
Figura 3-2 Curva de Permeabilidade de Vapor da madeira compensada, com 95% barras de incerteza. Adaptado de Osanyintola *et al.* (2006). 35
Figura 3-3 Configuração dos volumes de controle das equações discretizadas. 37
Figura 3-4 Definição dos volumes de controle para a discretização do domínio físico. 37
Figura 3-5 Penetração de umidade no tempo. Espessura do material em 15 mm. ...41
Figura 3-6 Penetração de umidade no tempo. Espessura do material em 1 m. 42
Figura 3-7 Massa específica do vapor nas posições de 4,5mm e 9,5mm (15, 75 e 150 nós). 44
Figura 3-8 Massa específica do vapor nas posições de 4,5mm e 9,5mm (Δt=[1, 5, 10 e 15 seg]). 45
Figura 3-9 Modelo computacional do aparato criado por Meissner (2008). 46
Figura 4-1 Isotermas do Teor de Umidade [kg/kg] em função da umidade relativa. .50
Figura 4-2 Ajustes propostos para a Isoterma de teor de umidade mássico de Wu (2007). 51

Figura 4-3 Permeabilidades da madeira compensada por Wu (2007) e Osanyintola *et al.* (2006). 52
Figura 4-4 Modelo 4: Coeficientes da equação discretizada (nó: i=1), $UR_{inicial,material}$=50%. a) Δt = 5 seg 150 Nós. b) Δt = 10 seg 150 Nós. c) Δt = 15 seg 150 nós. d) Δt = 30 seg 150 nós. e) Δt = 5 seg 300 nós. f) Δt = 10 seg 300 nós. g) Δt = 15 seg 300 nós. h) Δt = 30 seg 300 nós. 53
Figura 4-5 Modelo 4: Sensor da entrada, tempo 6 dias, 300 Nós, e passo de tempo de 30 seg. 54
Figura 4-6 Parâmetros a) D_{eff} e b) α_{eff} para o intervalo de 30~80% de UR.....55
Figura 4-7 Controle de umidade relativa medida pelos sensores na entrada, centro e saída do aparato experimental (Silva, 2017). 56
Figura 4-8 Amplitude da UR medida pelos sensores no experimento.....57
Figura 4-9 Massa da célula-teste do aparato experimental (Silva, 2017).....58
Figura 4-10 Massa de vapor. a) MOD1. b) MOD3. c) MOD5. 60
Figura 4-11 Massa de vapor. a) MOD2. b) MOD4. c) MOD6. 61
Figura 4-12 a) Sorção de Vapor experimental da madeira compensada. b) Diferença Percentual da Sorção Média (Silva, 2017). 62
Figura 4-13 Sorção de Vapor. a) MOD1. b) MOD3. c) MOD5. 64
Figura 4-14 Sorção de Vapor. a) MOD2. b) MOD4. c) MOD6. 65
Figura 4-15 Variação de sorção média em função da variação de umidade relativa para o último ciclo. 67
Figura 4-16 Resultados Experimentais do MBV (Silva, 2017). a) O MBV para os 3 últimos ciclos. b) A diferença percentual do MBV em comparação ao ciclo anterior. 69
Figura 4-17 Resultados numéricos do MBV. a) MBV do Modelo MOD1. b) A diferença percentual para MOD1. c) MBV do modelo MOD3. d) A diferença percentual para MOD3. e) O MBV do modelo MOD5, f) A diferença percentual para MOD5. 73
Figura 4-18 Resultados numéricos do MBV. a) MBV do Modelo MOD2. b) A diferença percentual para MOD2. c) MBV do modelo MOD4. d) A diferença percentual para MOD4. e) O MBV do modelo MOD6, f) A diferença percentual para MOD6. 74
Figura 4-19 Zonas sensoriais do aparato experimental (Meissner, 2008).....77
Figura 4-20 Balança de Precisão (Meissner, 2008). 78
Figura 4-21 Medição da variação da Umidade relativa de todos os sensores (Meissner, 2008). 78
Figura 4-22 Dados finais do MBV (Meissner, 2008). 79

Figura 4-23 Resultados da simulação do experimento de Meissner (2008), MBV para a variação da UR, utilizando a Isoterma de Osanyintola *et al.* (2006).....79
Figura 4-24 Resultado numérico do MBV para as umidades medidas pelo sensor da Amostra variando os valores de h_m na simulação.....81
Figura 5-1 Aparato Experimental recomendado para medição do MBV. Adaptado de Osanyintola *et al.* (2006) 84
Figura A-1 Domínio físico do envoltório (Mendes, 1997). 91
Figura A-2 Malha para discretização do domínio físico (Mendes, 1997).....91
Figura B-1 Câmera climática do LST da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Meissner, 2008). 95
Figura B-2 Célula-teste experimental (Meissner, 2008). 96
Figura B-3 Bancada psicrométrica (Meissner, 2008). 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 Avaliação dos valores dos impactos energéticos dos aparelhos elétricos regulamentados em 2010 (Nogueira *et al.*, 2015). 3
Tabela 2-1 Classificação dos Poros por tamanho. Adaptado de Choi *et al.* (2001). ...6
Tabela 2-2 Regimes do fluxo, adaptado de Choi *et al.* (2001). 18
Tabela 2-3 Valores médios do $MBV_{practical}$ de todos os laboratórios para todos os ciclos. Adaptado de Rode (2005). 29
Tabela 3-1 Propriedades de umidade análogas à difusividade térmica para o cálculo das propriedades da camada limite de vapor. Adaptado de Olutimayin *et al.* (2005). 39
Tabela 3-2 Dados utilizados na comparação da solução analítica com o modelo matemático. 41
Tabela 3-3 Valores de ρ_v para posições x=4,5mm e x=9,5mm. 43
Tabela 3-4 Diferença percentual de ρ_v entre os números de nós. 43
Tabela 3-5 Valores da ρ_v para 150 nós. 44
Tabela 3-6 Diferenças percentuais da ρ_v para 150 nós e Δt=[1, 5, 10, 15 seg]. 44
Tabela 3-7 Modelos numéricos com seus respectivos *TAGs*. 48
Tabela 4-1 Média de Sorção para o último ciclo para os modelos MOD1, MOD3, MOD5. 66
Tabela 4-2 Média de Sorção para o último ciclo para os modelos MOD2, MOD4, MOD6. 67
Tabela 4-3 Razão entre a sorção média dos 3 sensores com a sorção obtida pelo protocolo Nordtest, utilizadas nas simulações numéricas. 68
Tabela 4-4 MBV para os modelos matemáticos, o valor final e classificação. 75
Tabela 4-5 Diferença percentual do MBV entre Protocolo NORDTEST e as cargas de umidades registradas no experimento. 76
Tabela 4-6 Classificação do MBV final utilizando o modelo matemático com a isoterma de Osanyintola *et al.* (2006) para os valores de Umidade do experimento de Meissner (2008). 80
Tabela 4-7 Resultados da seção 4.8 81
Tabela A-1 Hipóteses adotada nos modelos de umidade do Domus – Eletrobras....94

LISTA DE SIMBOLOS

A_P	Superfície específica do poro do material [m^2/m^3]
A_w	*Water Activity* [-], área superficial de uma molécula de água [m^2]
a, b, c, d, e, f	Constantes
A, B, C, D	Coeficientes
C1, C2, C3	Coeficientes
Bi	Biot [-]
Bi_m	Biot de massa [-]
C	Concentração molar Específica [$kmol/m^3$]
C_1-C_2	Diferença de concentração de vapor numa camada [kg/m^3]
c_{ar}	Calor específico do ar [J/kg·K]
c_m	Calor específico [J/kg·K]
c_p	Calor específico [J/kg·K]
$C_{A,S}$	Concentração da espécie A na superfície [$kmol/m^3$]
$C_{A,\infty}$	Concentração da espécie A no escoamento [$kmol/m^3$]
C_i	Concentração molar Específica de uma espécie i [$kmol/m^3$]
C_h	Troca de calor entre a superfície do poro e a molécula de água [J/kg]
C_m	Acumulo de umidade [-]
d	Espessura [m]
d_c	Diâmetro característico do poro [m]
d_{eq}	Diâmetro equivalente do poro [m]
D	Coeficiente de difusão [m^2/s]
D_{atm}	Difusividade do vapor no ar [m^2/s]
D_{AB}	Coeficiente de difusão da espécie A em B [m^2/s]
D_{eff}	Coeficiente de difusão efetivo [m^2/s]
D_{TV}	Coeficiente de transporte de vapor associado a um gradiente de temperatura [$m^2/(s\ ^oC)$]
$D_{\theta V}$	Coeficiente de transporte de vapor associado a um gradiente deconteúdo de umidade [m^2/s]
D_T	Coeficiente de transporte de massa relacionado pelo gradiente de temperatura [$m^2/(s\ K)$]

D_θ	Coeficiente de transporte de massa relacionado pelo gradiente de umidade [m^2/s]
g	Fluxo de vapor [Pa·s/m]
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2 K]
h_a	Coeficiente de transferência de calor por convecção do ar [W/m^2 K]
h_m	Coeficiente de transferência de massa por convecção [m^2/s]
j	Fluxo mássico total [$kg/(m^2 s)$]
j_v	Fluxo de massa de vapor [kg/m^2 s]
j_V	Massa específica da água [kg / m^3]
$\vec{J}$	Vetor do fluxo molar [kmol/(s m^2)]
k	Constante de absorção, condutividade térmica [W/m·K]
K_n	Número de Knudsen [-]
L	Espessura [m]
L	Calor latente de vaporização [J/kg]
l_a	Calor de adsorção [J/kg]
l_b	Calor de evaporação [J/kg]
Le	Número adimensional de Lewis [-]
m	Massa [kg]
m_a	Massa de ar seco [kg]
m_A	Fração mássica da espécie A
m_i	Fração mássica da espécie i [-]
m_v	Massa de vapor [kg]
$\dot{m}$	Taxa de mudança de fase [$kg/(m^3 s)$]
M	Massa molar da mistura [kg/kmol]
M_i	Massa molar de uma espécie i [kg/kmol]
M_W	Massa de 1 mol de água [kg]
MBV	Moisture Buffer Value [$kg/(m^2 \Delta\%UR)$]
n	Número de mole da mistura [kmol], Número de camadas de moléculas de água [-], número total de nós
n_A”	Fluxo mássico de uma espécie A [kg/m^2·s]
$\dot{n}_A$	Taxa de aumento da espécie A por unidade de volume da mistura [kg/s m^3]
P	Pressão Total [kPa]

p_{sat}	Pressão de saturação [Pa]
p'_{sat}	Pressão de saturação acima de um menisco curvo [Pa]
P_a	Pressão Parcial do ar seco [kPa]
p_c	Pressão capilar [Pa]
P_i	Pressão Parcial da espécie i [kPa]
P_v	Pressão Parcial do vapor d'água [kPa]
R	Constante dos Gases ideais [kJ/(kg K)]
$\bar{R}$	Constante dos Gases ideais [kJ/kmol·K]
R_i	Constante da espécie i [kJ/kg]
R_v	Constante do vapor [J/kg·K]
r_1, r_2	Curvatura dos meniscos [m]
t	Tempo [s]
T	Temperatura [K]
T_∞	Temperatura do ar [K]
$T_{x=0}$	Temperatura na superfície [K]
u	Conteúdo de umidade [$kg_{água}/kg_{seco}$]
UR	Umidade Relativa [%]
V	Volume [m^3]
w_{ar}	Umidade Absoluta [$kg_{vapor}/kg_{ar.seco}$]
w_H	Conteúdo de umidade de equilíbrio [kg/m^3]
x_i	Fração molar da espécie i [-]
y	Comprimento [m]
$Z_{s,v}$	Resistência superficial de umidade [s/m]

Letras gregas

α	Difusividade Térmica [m^2/s]
$\alpha_{m,eff}$	Difusividade efetiva [m^2/s]
δ	Permeabilidade de vapor [kg/(m s Pa)]
δ_m	Profundidade de penetração de umidade [m]
δ_p	Permeabilidade para gradiente de pressão [s]
δ_v	Permeabilidade para gradiente de concentração [m^2/s]

ε_s	Fração volumétrica sólida da celulose [-]
ε_g	Fração volumétrica do vapor no poro do material [-]
Λ	Condutividade térmica [W / (m K)]
λ_1	Caminho livre do meio [m]
ρ	Massa específica total [kg/m^3]
ρ_0	Massa específica do material seco [kg$_{seco}$/m$_{seco}^3$]
ρ_i	Massa específica de uma espécie i [kg/m^3]
ρ_l	Massa específica da água [kg/(m^2 s)]
ρ_v	Massa específica do vapor [kg/m^3]
$\rho_{A,S}$	Massa específica de uma espécie A na superfície [kg/m^3]
$\rho_{A,\infty}$	Massa específica de uma espécie A no escoamento [kg/m^3]
ρ_W	Massa específica da água [kg/m^3]
$\rho_v\|_{x=0}$	Massa especifica do vapor na superfície [kg/m^3]
$\rho_{v,\infty}$	Massa especifica do vapor no ar [kg/m^3]
τ	Tortuosidade [m]
υ	Fator do fluxo de massa
θ	Teor de humidade volumétrico (m^3/m^3)
σ_w	Tensão superficial da água [N/m]
ϑ	Ângulo de contato entre a parede do poro e os meniscos
ϕ	Umidade Relativa [%]
ϖ	Conteúdo de umidade [kg$_{água}$ / m$_{seco}^3$].

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Vários materiais de construção têm estrutura porosa, como gesso, madeira, tijolo, concreto, dentre outros. Sendo o poro um volume de vazios, ele possibilita que haja um conteúdo de umidade em seu interior. Assim, alterações na interface da superfície desses materiais com a umidade do ambiente acarreta uma difusão de calor e de umidade. Estas duas propriedades (umidade e temperatura) são acoplados e controlam vários fatores, como por exemplo a durabilidade da construção, a qualidade do ar habitacional, o consumo energético da edificação.

Os níveis de umidade podem variar no ar, na superfície dos materiais e internamente. Esses níveis dependem de fatores externos a edificação como: precipitação, transporte difusivo de umidade nos envoltórios, transporte livre de umidade no ar, e de fatores internos como algumas atividades humanas: banho, preparo de alimentos, exercícios físicos. Além disso, a edificação pode estar localizada numa região que tenha grandes amplitudes térmicas provocando a difusão de vapor tanto para dentro como para fora (Dedesko *et al.,* 2015).

A negligência do controle do ar ambiente pode desencadear vários problemas aos ocupantes, um deles é o surgimento de mofos nas paredes das edificações que ocorre quando o nível do parâmetro A_w *(water activity)* atinge um valor crítico, quando ocorre o processo da formação dos fungos nas paredes, tetos, revestimentos. Desta forma, para evitar a patologia destas edificações, deve-se reduzir os níveis de umidade para níveis inferiores ao crítico, minimizando o crescimento de fungos nas habitações (Grant *et al.,* 1989). Se o ambiente não estiver em condições psicrométricas adequadas surgem os problemas de degradação dos materiais e da má qualidade do ar, alterando também suas propriedades mecânicas e podendo causar sintomas alérgicos e respiratórios (Desdeko *et al.*, 2015), como apresentado na Figura 1-1.

Padfield (1998) sugere o uso de materiais higroscópicos no controle de umidade em museus, para ajudar na conservação das obras do local, ou seja, utilizar estas propriedades hígricas (acoplamento das propriedades de temperatura e umidade) no controle de umidade para a preservação do acervo local. Para valores

extremos – como baixo ou alto valor do nível de umidade relativa - são prejudiciais aos materiais, por exemplo: um material orgânico seco torna-se mais rígido sendo menos tolerante as cargas de cisalhamento entre as camadas internas; um material orgânico com alto nível de umidade propicia condições para germinação; metais ficam sujeitos aos efeitos da corrosão (Padfield, 1998).

Figura 1-1 Exemplo da germinação de fungos dentro de uma edificação habitacional. a) Fungos dentro de um telhado (Fonte: http://www.pasi.us/mold_attic.jpg). b) Fungos escondidos dentro de uma parede (Fonte: http://www.pasi.us/mold_wall_hidden.jpg)

Uma grande percentagem da energia consumida no país é utilizada para climatizar os ambientes. Desde a década de 80, foram criados programas para reduzir o consumo energético voltados para o setor industrial e residencial. Dentro desses programas foi implementada a etiquetagem de eficiência energética. Mostrando os efeitos positivos destas iniciativas/programas (como por exemplo Procel, Luz para Todos, Programa Brasileiro de Etiquetagem, entre outros) é visualizado na Tabela 1-1 (Nogueira *et al.*, 2015). Os resultados de Osanyintola *et al.* (2006) mostraram que pode ser possível reduzir o consumo de energia de aquecimento e refrigeração, quando se aplicam materiais higroscópicos com sistemas de controle de HVAC, sendo um material higroscópico aquele que tem alta capacidade de troca de umidade com o ambiente. Em seu trabalho eles simularam o clima em alguns países europeus. A nível de Brasil, Nogueira *et al.* (2015) estudaram a eficiência das iniciativas para o controle e os benefícios econômicos que foram adotados até o momento. Classe de Produtos com redução de até 36,7% do consumo energético é um valor satisfatório, pela Tabela 1-1 pode-se observar a eficiência das iniciativas para o controle energético.

As propriedades de Temperatura e Umidade são acopladas, conforme já comentado, são de grande importância no consumo energético e preservação dos móveis/utensílios/equipamentos, pois todo material têm a tendência de entrar em

equilíbrio com o meio. Rode (2005) apresentou o parâmetro *Moisture Buffer Value* (MBV) sendo obtido experimentalmente. Este parâmetro tem como objetivo predizer a capacidade de um material em moderar as variações de umidade com o ambiente.

Produto	**Modelos representativos para avaliação de impacto de energia**	**Consumo médio unitário (kWh/Ano)**	**Consumo médio unitário de modelos excluídos (kWh/Ano)**	**Redução do consumo unitário**
Motores elétricos trifásicos	Motor 5 hp	3493	3528	0,98%
	Motor 25 hp	20,355	20,620	1,29%
	Motor 75 hp	66,377	71,657	7,4%
	Motor 175 hp	271,346	273,944	1,0%
Refrigeradores e freezers	Refrigerador 300 l. Uma porta	208	329	36,7%
	Refrigerator 400 l. Combinado	398	518	23,2%
	Refrigerator 400 l. Combinado. Livre de gelo	399	520	23,3%
Ar Condicionado	Ar condicionado de janelas. 9 kBTU/h	654	900	27,3%
	Ar condicionado de janelas. 21 kBTU/h	1946	2600	25,2%
	Ar condicionado dividido. 9 kBTU/h	607	830	26,8%
	Ar condicionado dividido. 21 kBTU/h	1830	2300	20,4%

Tabela 1-1 Avaliação dos valores dos impactos energéticos dos aparelhos elétricos regulamentados em 2010 (Nogueira *et al.*, 2015).

Para estabelecer uma definição mais robusta sobre o MBV, e definir uma metodologia para a sua obtenção foi feito um trabalho em conjunto com várias instituições de pesquisadores dando início ao Protocolo NORDTEST. Dentro deste projeto foi executado o *Robin Round Test*, sendo que os institutos participantes reproduziram o mesmo ensaio experimental para verificar se era possível obter resultados similares, sabendo que os Institutos dispunham de diferentes equipamentos (Rode, 2005).

Sabendo que o ar úmido e os envoltórios tendem sempre entrar em equilíbrio de temperatura e umidade, estudos sobre as condições psicrométricas são importantes, como por exemplo ASHRAE (2004) entre outros, que normaliza as condições ideais psicrométricas para uma boa qualidade do ar. Baseado em todas estas observações feitas, é interessante controlar as variáveis que afetam os processos de transferência de umidade nos materiais porosos, para reduzir o consumo energético dos ambientes habitacionais.

Heat, air and Moisture (HAM) são os modelos matemáticos computacionais que tem uma grande importância no impacto final das construções. Trabalhando com o acoplamento das propriedades de temperatura e umidade para a transferência de calor e de massa em material poroso. São técnicas avançadas para predizer o comportamento higroscópico dos materiais que estão sendo amplamente utilizadas nos projetos de edificações para evitar todos os problemas que a umidade pode ocasionar (Samuel *et al.*, 2016).

O Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR) desenvolveu o *software* Domus - Eletrobras que simula as condições higro-energéticas em ambientes (Manual Domus, 2012). Este *software* – evolução do UMIDUS - foi desenvolvido pela carência de ferramentas computacionais para o interesse nacional, pois os modelos computacionais na época não levavam em consideração o acoplamento de temperatura e umidade. Meissner (2008) desenvolveu uma bancada de ensaios para as medições experimentais psicrométricas. Abe *et al.* (2010) mostraram algumas simulações numéricas com o Domus para comparar com os resultados experimentais de Meissner (2008) e Meissner *et al.* (2010). Este trabalho foi desenvolvido em paralelo com Silva (2017), fornecendo dados experimentais que serão validados com resultados numéricos desenvolvidos neste trabalho. Por último é analisado os resultados experimentais de Meissner (2008), ele comparou as medições da transferência de água de grandes placas de madeira com uma pequena amostra que apresentaram resultados discordantes, será investigado o motivo desta diferença.

O modelo matemático implementado simula os parâmetros experimentais realizados por Meissner (2008) e Silva (2017). Ambos utilizaram uma caixa de madeira compensada, com 15 mm de espessura de parede (externamente foram isoladas com folhas de alumínio), as placas de madeira foram fixadas numa estrutura cúbica (também isolada hidricamente). Todo este material foi suspenso em 0,50 m do piso.

O escoamento do ar é controlado por uma bancada psicrométrica atendendo as condições do protocolo Nordtest. O protocolo propôs variações cíclicas de 8 horas o ar ambiente com umidade relativa em 75% e 16 horas com umidade relativa em 33%, para ciclos de 24h cada um. Este ar entra num orifício por uma das placas e saí por outro orifício em outra placa. A Figura 1-2 apresenta a geometria que o modelo matemático simula. Relembrando que esta dissertação só faz uso de análise numérica e não é realizado experimentos físicos.

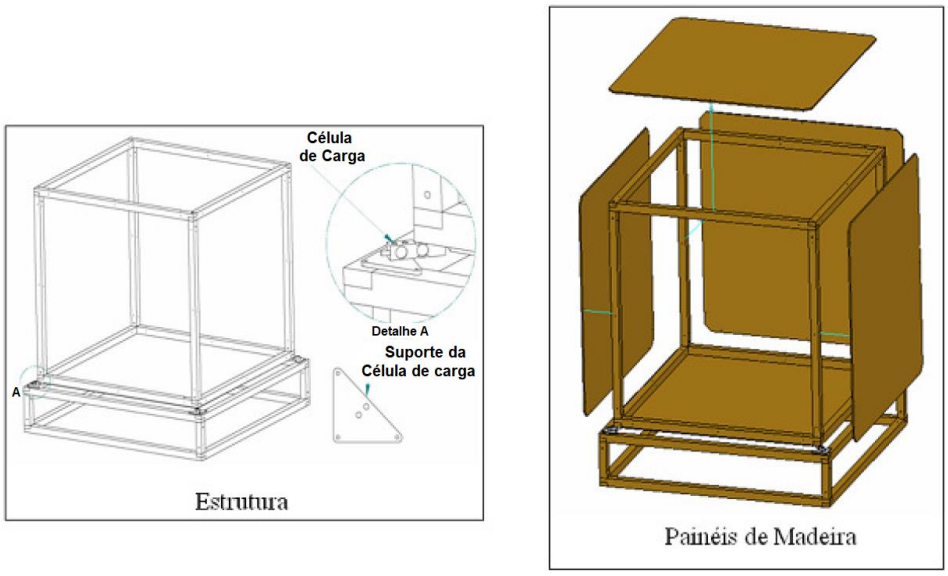

Figura 1-2 Caixa de madeira (Célula-Teste) (Meissner, 2008).

Objetivos:

- Elaborar um modelo matemático para predizer o comportamento higroscópico dos materiais antes da construção de envoltórios.
- Utilizar isotermas de umidade (conteúdo de umidade e permeabilidade) da madeira compensada de diferentes trabalhos da literatura para comparação.
- Validar os resultados numéricos com os dados experimentais obtidos por Meissner (2008) e Silva (2017).
- Comparar o MBV utilizando as cargas de Umidade Relativa seguindo o protocolo NORDTEST e as Umidades Relativas medidos pelos sensores no aparato físico.
- Comparar os resultados variando a umidade interna inicial do material.
- Analisar a diferença dos valores do MBV obtidos da caixa de madeira e da pequena amostra no experimento de Meissner (2008).

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAL POROSO

Um material higroscópico permite o aumento ou diminuição da umidade dentro de seus poros, ou seja, ocorre transferência de vapor de água em seu interior e na superfície externa (Hens, 1991). Por mais que alguns materiais são utilizados como isolantes de umidade, não existe um material 100% não higroscópico. Os processos do transporte de adsorção (será abordado na seção 2.5) podem ocorrer em poros preenchidos ou não de água.

Classificação dos Poros: O transporte da adsorção dos gases é influenciado pelo tamanho dos poros, e de acordo com IUPAC os poros estão divididos em três categorias (Thommes *et al.,* 2015), conforme Tabela 2-1 (Choi *et al.*, 2001).

Classificação dos Poros	
microporos	d < 2 nm
mesoporos	2 nm < d < 50 nm
macroporos	50 nm > d

Tabela 2-1 Classificação dos Poros por tamanho. Adaptado de Choi *et al.* (2001).

A porosidade corresponde a fração volumétrica da parede da célula do material (Porosidade ou volume de vazio), é expressa pela equação 2.1. Sendo ε_g a fração volumétrica do vapor no poro do material, e ε_s a fração volumétrica sólida da celulose, ρ_0 é a massa específica seca [kg/m^3], ε_s é definida pela equação 2.2 (Osanyintola, 2005).

$$\varepsilon_g = 1 - \varepsilon_s \tag{2.1}$$

$$\varepsilon_s = \frac{\rho_0}{1530} \tag{2.2}$$

Para a maioria dos materiais de celulose, a massa específica é aproximadamente constante em 1530 kg/m^3 (Dinwoodie, 1981).

2.2 MADEIRA

A madeira sempre foi um recurso utilizado largamente desde os primórdios da civilização e continua sendo até os dias de hoje empregado em diversas áreas de atividades humanas. Ampliando o campo de pesquisa desse material é possível novas possibilidades de uso. Tendo o devido cuidado de uso na utilização e extração da natureza, este recurso continuará a contribuir muito para a humanidade (Forest Products Laboratory, 2010).

As pesquisas que estão sendo feitas nessa área são para as chamadas construções ecológicas, com o foco na redução do consumo energético de edifícios (uso de aparelhos com maior eficiência energética, otimizar os isolamentos, e sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado *(heating, ventilation, and air-conditioning (HVAC) systems)*. A madeira possui muitas qualidades práticas, mas em condições indevidas de uso podem ocasionar sua deterioração, aumentando o desmatamento florestal para sua reposição. A utilização da madeira em condições de alta umidade propicia o surgimento de fungos que podem ser prejudiciais à saúde dos ocupantes.

A madeira é um composto com estrutura biológica complexa contendo vários componentes e tipos de células para manter a árvore viva. Para aplicações em engenharia e construção é importante conhecer suas propriedades para aprimorar seu uso. Existem basicamente dois tipos de madeiras, os *softwood* (coníferas) e *hardwood* (folhosas). A tradução destes dois termos em inglês não é adequada pois seria madeira macia e madeira dura, que não corresponde à realidade, sendo que existe madeiras macias e duras nos dois tipos de árvores. A diferença acontece em termos botânicos, por exemplo as estruturas de poros só estão presentes nos *hardwood*. As Figuras 2-1 e 2-2 demostram o corte transversal de diferentes espécies de árvores coníferas e folhosas.

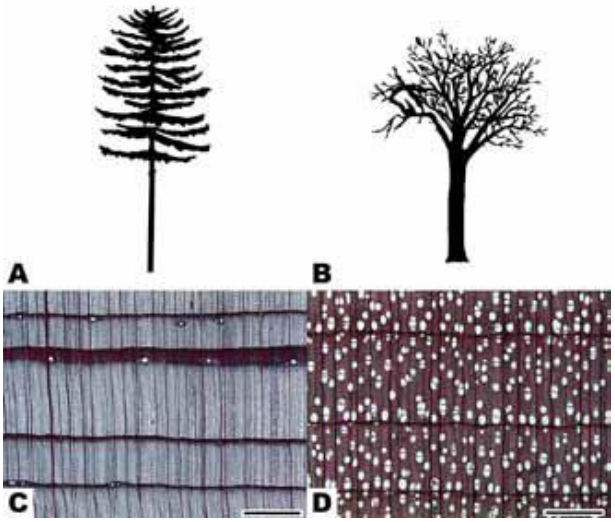

Figura 2-1 A – Forma genérica de árvore conífera. B – Forma genérica de uma árvore Folhosa. C – Corte transversal de uma Pseudotsuga mensiezii, sendo os espaços em branco os canais de resina. D – Corte transversal de uma Betula allegheniensis, os círculos brancos são os vasos ou poros. Escala de medida 780 μm (Forest Products Laboratory, 2010).

Uma das diferenças características entre os dois tipos de árvores, as Coníferas possuem apenas traqueídos (fibras) e células de parênquima; as Folhosas são formadas por fibras, parênquima e vasos (poros) (Foelkel, 2007).

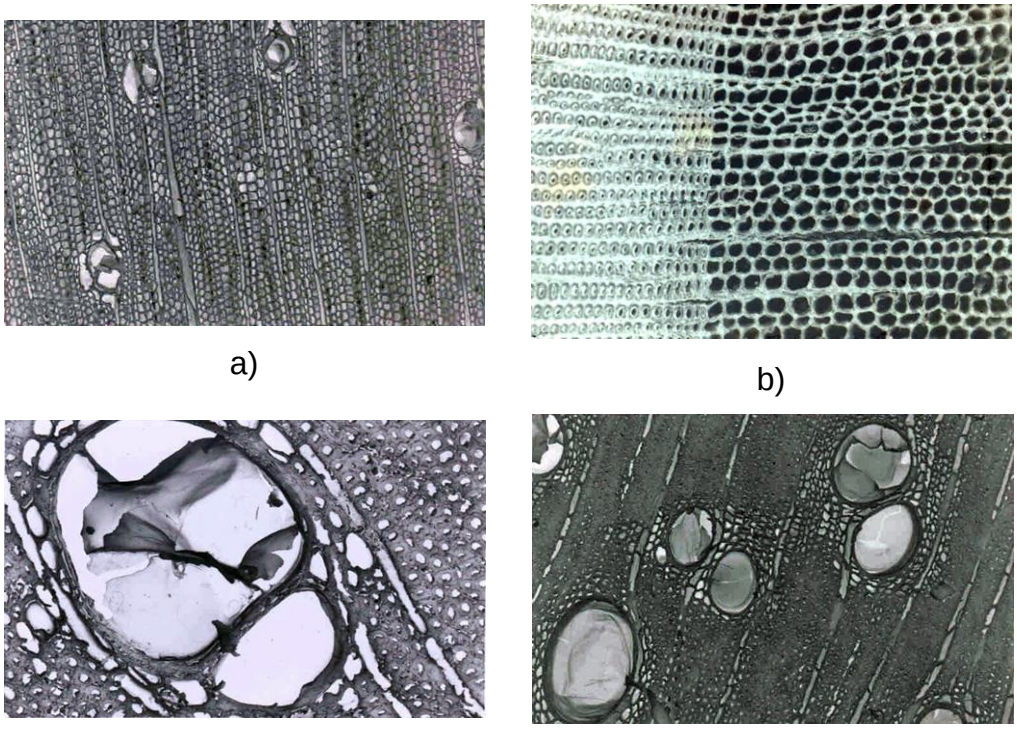

Figura 2-2 Vistas de cortes transversais de algumas espécies de madeira. a) Pinus caribaea (softwood), b) Pinus taeda (softwood), c) Corymbia citriodora (hardwood), d) Eucalyptus globulus (hardwood) (Fonte: http://www.eucalyptus.com.br/GalleryM5/index.php (Fonte: http://www.eucalyptus.com.br/GalleryM6/index.php)).

As células de madeira detém uma estrutura regular, são compostas pelo lúmen (espaços vazios para transporte de água/seiva) e a parede celular. A parede celular é composta por 3 regiões, a lamena intermediária (LM), parede primária (P) e parede secundária (S1, S2 e S3). Tendo cada região a microfibrila de celulose e hemicelulose, material incrustante na região primária e leninha na parede secundária. Os poços fazem o papel de comunicação entre as células. Estas regiões são mostradas na Figura 2-3 (Forest Products Laboratory, 2010).

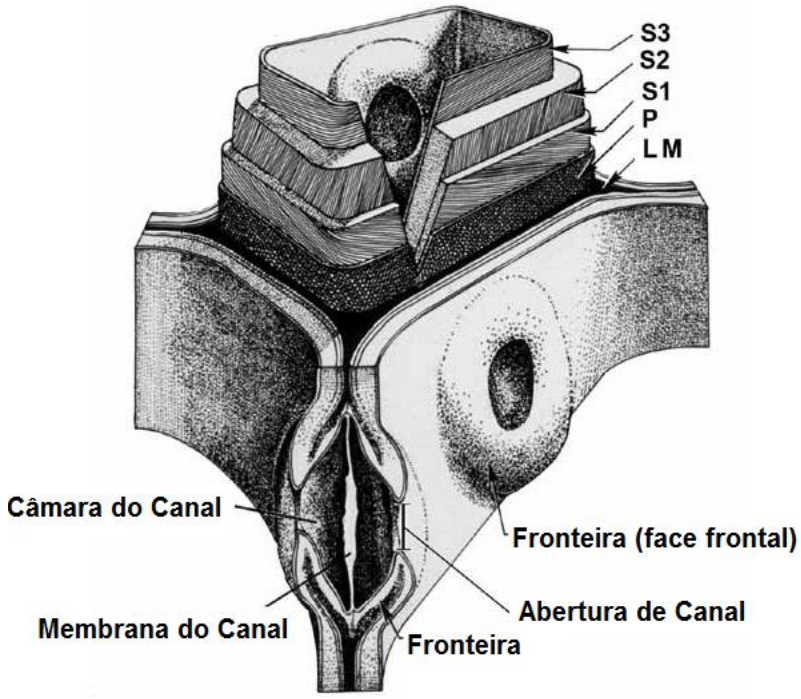

Figura 2-3 Vista em corte da parede celular. Adaptado de Forest Products Laboratory (2010).

Toda madeira armazena umidade, na forma de vapor livre (nas superfícies da célula pela força entre as moléculas de hidrogênio e moléculas de hidroxilas da celulose) e na forma de água livre (contida nos lumens/cavidades pela tensão superficial) (Osanyintola *et al.*, 2006). No processo de umedecimento e secagem da madeira podem ocorrer a contração ou expansão em sua estrutura tendo possibilidade de alterar as propriedades físicas da madeira, mas neste trabalho este fenômeno de variação de volume será desconsiderado.

2.3 COMPOSIÇÃO DE MISTURAS E PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS

A concentração molar específica - C_i (kmol/m^3) - e massa específica - ρ_i (kg/m^3) - É a quantidade de matéria de uma espécie i por unidade de volume, elas se relacionam através da massa molar M_i (kg/kmol):

$$\rho_i = M_i \cdot C_i \tag{2.3}$$

A massa específica total da mistura (kg/m^3) é a soma de todas as massas específicas das espécies:

$$\rho = \sum \rho_i \tag{2.4}$$

O número de moles total da mistura por unidade de volume (kmol/m^3):

$$C = \sum C_i \tag{2.5}$$

Pode-se representar a quantidade de uma espécie i de uma mistura de gases ideais - massa específica e a concentração molar específica:

$$\rho_i = \frac{P_i}{R_i T} \tag{2.6}$$

$$C_i = \frac{P_i}{\bar{R} T} \tag{2.7}$$

Sendo P_i a pressão parcial da espécie i (Pa), T a temperatura (K), R_i a constante da espécie i e $\bar{R}$ a constante universal dos gases ideais.

A fração mássica, m_i, representa a relação da massa específica da espécie i pela massa específica da mistura.

$$m_i = \frac{\rho_i}{\rho} \tag{2.8}$$

A fração molar representa a quantidade de moles por unidade de volume da espécie i sobre a quantidade de moles por unidade de volume da mistura.

$$x_i = \frac{C_i}{C} \tag{2.9}$$

O ar úmido (ar atmosférico) é composto por uma mistura de gases, incluindo oxigênio, vapor d'água, nitrogênio, dióxido de carbônico, argônio, entre outros (Kuehn, 1988). O ar úmido é a mistura do ar seco com o vapor d'água ambos tratados como gás ideal. Utilizando o modelo de Dalton, a pressão da mistura é a soma das pressões parciais dos gases (equação 2.10). A equação dos gases ideais é expressa pela equação 2.11 (Shapiro, 2002).

$$P = P_a + P_v \tag{2.10}$$

$$P = \frac{n\bar{R}T}{V} = \frac{m\left(\bar{R}/M\right)T}{V} = \rho RT \tag{2.11}$$

Sendo P a pressão da mistura (kPa), P_a a Pressão parcial de ar seco (kPa), P_v a Pressão parcial de vapor d´água (kPa), n o Número de mols da mistura (kmol), $\bar{R}$ a Constante universal dos gases (kJ/(kmol K)), M a Massa molar da mistura (kg/kmol), T a Temperatura (K) e V o Volume da mistura (m^3). R a constante universal dos gases perfeitos (kJ/(kg K)).

A composição do ar úmido pode ser descrita em termos de umidade absoluta (w_{ar}), é definida como a razão entre a massa de vapor d´água e a massa de ar seco sendo representada pela equação 2.12 (Shapiro, 2002).

$$w_{ar} = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_v P_v V/\bar{R}T}{M_a P_a V/\bar{R}T} = \frac{M_v P_v}{M_a P_a} = 0{,}622\frac{P_v}{P - P_v} \tag{2.12}$$

A umidade relativa (ϕ) é a razão entre a fração molar do vapor d'água e a fração molar do vapor de saturação na mesma temperatura e pressão, ou também como a razão da pressão e a pressão do vapor saturado (Shapiro, 2002).

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat,v}} \tag{2.13}$$

A permeabilidade de vapor corresponde a capacidade de um material poroso de possibilitar o fluxo de vapor através dele. Esta propriedade pode ser expressa em função da pressão parcial de vapor ou pela concentração de vapor (umidade por volume). A partir da Lei de Darcy para meios porosos encontra-se a permeabilidade de vapor pelo gradiente de vapor e pelo gradiente de concentração (Hens, 1991):

$$g = \frac{\delta_P(P_1 - P_2)}{d} = \frac{\delta_v(C_1 - C_2)}{d} \tag{2.14}$$

Sendo g o fluxo de vapor ((Pa s)/m), P_1- P_2 é a diferença da pressão de vapor parcial numa camada (Pa), C_1 - C_2 é a diferença de Concentração de vapor numa camada (kg/m^3), d é a espessura (m), δ_p é a permeabilidade para gradiente de pressão (s), δ_v é a permeabilidade para gradiente de concentração (m^2/s).

O coeficiente de transferência de massa por convecção, h_m (m/s) é um parâmetro análogo ao coeficiente de transferência de calor por convecção da lei de resfriamento de Newton. Este parâmetro relaciona o fluxo molar com a diferença de concentrações da camada limite de concentração (Incropera *et al.,* 2008):

$$h_m = \frac{-D_{AB}\,\partial C_A/\partial y|_{y=0}}{C_{A,s} - C_{A,\infty}} \tag{2.15}$$

Sendo D_{AB} (m/s) o coeficiente de difusão da espécie A em B, $C_{A,S}$ a concentração da espécie A na superfície e $C_{A,\infty}$ a concentração da espécie A no escoamento. Neste trabalho será utilizado o método de analogia das camadas limites para a sua obtenção. Utilizando as propriedades físicas da mistura de ar seco com vapor, número de Lewis aproximado a unidade, h_m é calculado pela equação 2.16 (Mendes, 1997)

$$h_m = \frac{h}{\rho c_{ar} Le^{2/3}} \tag{2.16}$$

Sendo h o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/(m^2 K)), ρ a massa específica do ar (kg/m^3), c_{ar} o calor específico do ar (J/(kg K)) e Le o número adimensional de Lewis, sendo este a fração entre os números adimensionais de

Schmidt e Prandtl. O coeficiente de transferência de massa por convecção relaciona o fluxo mássico com a diferença da massa específica (Incropera *et al.,* 2008):

$$n_A" = h_m(\rho_{A,S} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.17)$$

Sendo n_A" o fluxo mássico (kg/(m^2 s)), $\rho_{A,S}$ a massa específica de uma espécie A (kg/m^3) na superfície e $\rho_{A,\infty}$ a massa específica da espécie A num escoamento.

2.4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A UMIDADE NOS MATERIAIS POROSOS

O fator de resistência ao vapor é a razão entre a permeabilidade do vapor do material e a permeabilidade do vapor do ar estagnado sob mesmas condições termodinâmicas (Kwiatkowski *et al.,* 2009).

A profundidade de penetração de umidade num meio poroso é a região onde ocorre perturbação do teor de umidade nos poros devido a um gradiente de umidade no ambiente. A variação de umidade relativa dentro dos poros vai diminuindo na direção da superfície externa para dentro do material. Definida como a distância da superfície até um ponto interior quando a variação de umidade relativa é igual a 1% (Rode, 2005).

A Figura 2-4 ilustra a profundidade de penetração numa amostra e o amortecimento de entrada do perfil, sendo o intervalo de tempo característico e amortecimento de entrada do perfil para o material (Rode *et al.*, 2008).

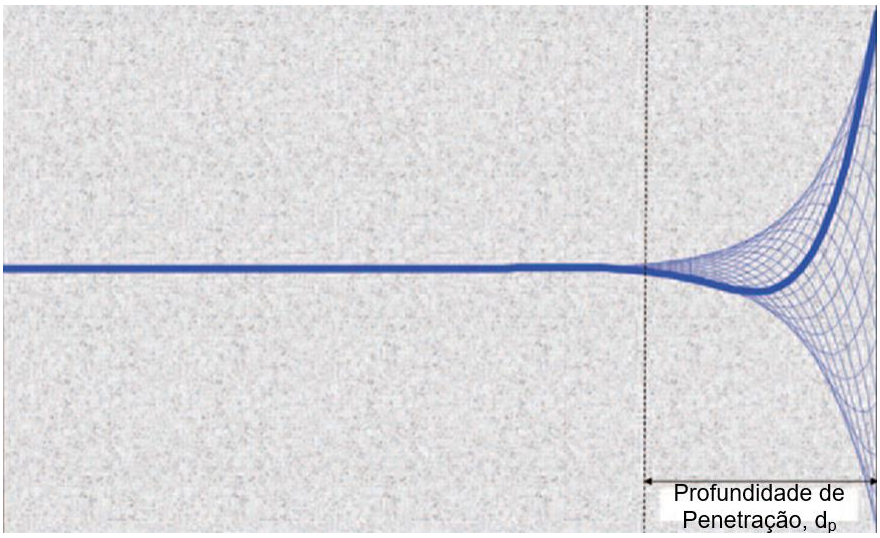

Figura 2-4 Representação da profundidade de penetração em um material higroscópico (Rode *et al.,* 2008).

O número de Biot de massa para a transferência de umidade (Bi_m) é um número adimensional utilizado para cálculos de transferência nos estados transiente e regime permanente, ele relaciona a proporção da condutividade hidráulica e a resistência mássica da superfície de um corpo. Esta proporção controla a transferência de massa de um corpo, esta relação é apresentada na Figura 2-5, quanto menor o número de Bi_m, menor será o fluxo. O número de Biot de massa é definido pela equação 2.18 (Rode, 2005).

$$Bi_m = \frac{L}{\delta_v Z_{s,v}} \tag{2.18}$$

Sendo L a espessura do material (m), δ_v é a permeabilidade de vapor (m^2/s), e $Z_{S,V}$ a resistência superficial de umidade (s/m).

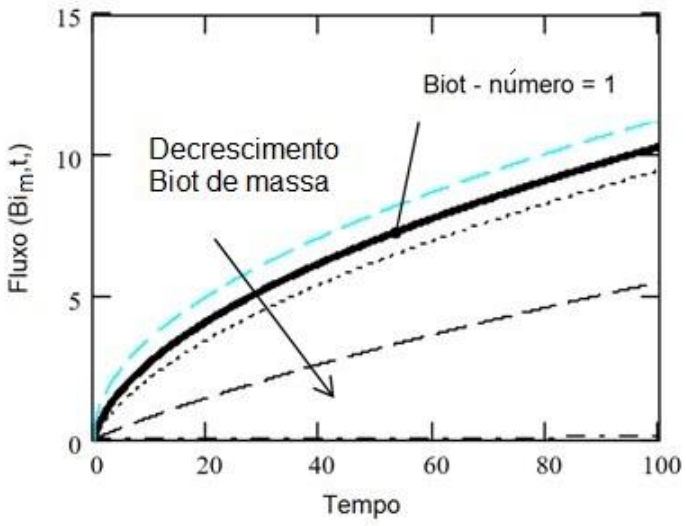

Figura 2-5 Influência do fluxo de vapor numa amostra em função do número de Bi_m, adaptado de Rode (2005).

A contribuição de um material na manutenção do conforto térmico é usualmente avaliada pelo fator de decaimento e mudança de fase. O fator de decaimento representa a diminuição da proporção da amplitude da temperatura entre as superfícies externa e interna do material. A mudança de fase ilustra o tempo que a oscilação de temperatura externa leva para se propagar da superfície externa até o interior do material (Rafidiarison, 2015).

O teor de umidade é a quantidade de água que tem um material, é um parâmetro importante na análise de difusão de vapor em poros. É definido como a

razão da massa de água que está contido em um material pela sua massa seca e é representado por u ($kg_{água}$ / kg_{seco}). O teor de umidade pode ser expresso na forma de massa de água por volume de material seco ϖ ($kg_{água}$ / m_{seco}^3). Os parâmetros u e ϖ estão relacionados através da massa específica do material seco ρ_0 (kg_{seco}/m_{seco}^3) através da Eq. (2.19) (Ramos, 2007).

$$\varpi = \rho_0 \cdot u \tag{2.19}$$

Quanto maior a umidade relativa do ambiente maior será o teor de umidade no meio poroso. O teor de umidade pode variar de zero absoluto (em contato com o ar seco) para um valor máximo. O domínio higroscópico é a região com o teor de humidade igual a zero até $\omega_{crítico}$ (quando ele está em contato com o ar saturado) (Ramos, 2007). Nesta área, o transporte de vapor ocorre por forças intermoleculares - *Van der Walls* - que operam na interface poros/umidade. Este fenômeno é dividido em três fases: adsorção monomolecular, adsorção plurimolecular e condensação capilar (Freitas, 1992), este fenômeno é representado pela Fig. 2-6.

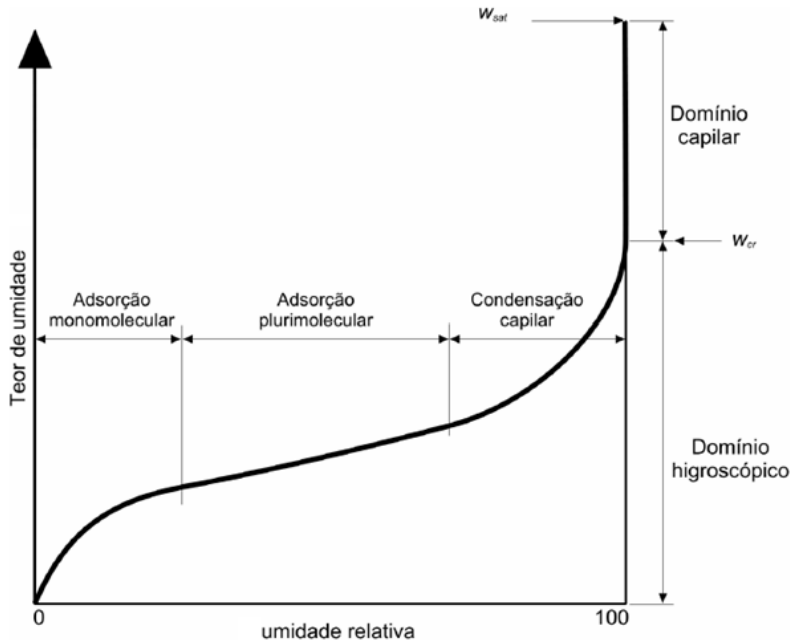

Figura 2-6 Variação do Teor de Umidade no meio poroso em função da umidade relativa do ambiente (Ramos, 2007).

2.5 PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE

Os processos de transferência de umidade existentes são, a difusão (ocorre quando os poros não estão preenchidos) e a condensação / migração capilar / evaporação (ocorre em poros preenchidos) (Mendes, 1997). Os principais mecanismos de transferência de umidade são a difusão para meios insaturados e a condensação capilar para meios saturados. Os processos de migração de umidade são: processo de adsorção monomolecular, multimolecular e condensação capilar.

Partindo de um material seco, a adsorção monomolecular acontece numa pequena faixa de umidade (0<UR<20%), onde moléculas de água vão sendo fixadas na superfície dos poros formando uma camada de moléculas. Com o aumento da umidade nos poros (20%>UR), transforma-se o processo para multicamadas de água em torno da superfície dos poros. Quando a umidade relativa alcança o valor de 40% as camadas de água nos pequenos poros se tocam e meniscos de água são formados, dando início ao processo de condensação capilar, este fenômeno obedece a Lei de Thompsons (Hens, 2012). As etapas de fixação de umidade nos poros são representadas a seguir (Figura 2-7):

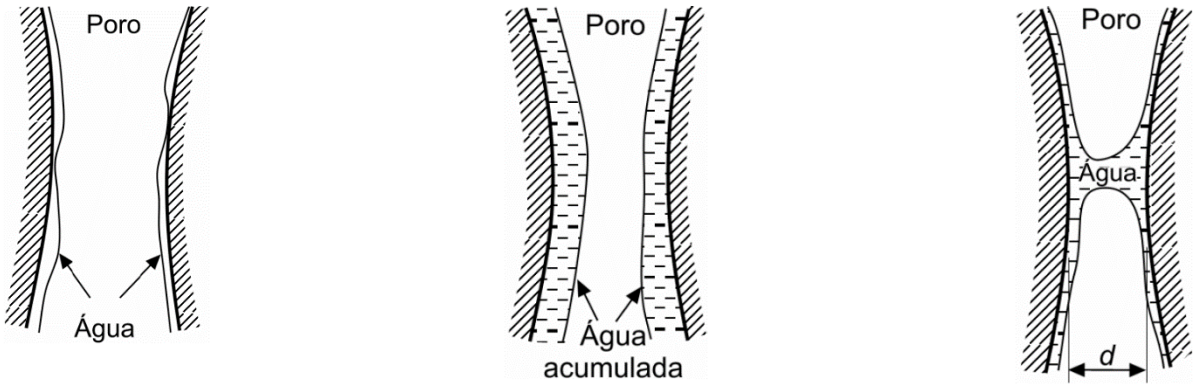

Figura 2-7 Etapas de fixação de água nos poros (Ramos, 2007).

Com o aumento da umidade relativa a condensação capilar atinge poros cada vez maiores, preenchendo todos os poros do material e atingindo 100% de umidade. Entretanto para que isto ocorra, não pode restar ar represado no interior deste material, o que na maioria dos casos não acontece (Hens, 1991). As etapas do processo do transporte de umidade no poro são representadas pela Figura 2-8.

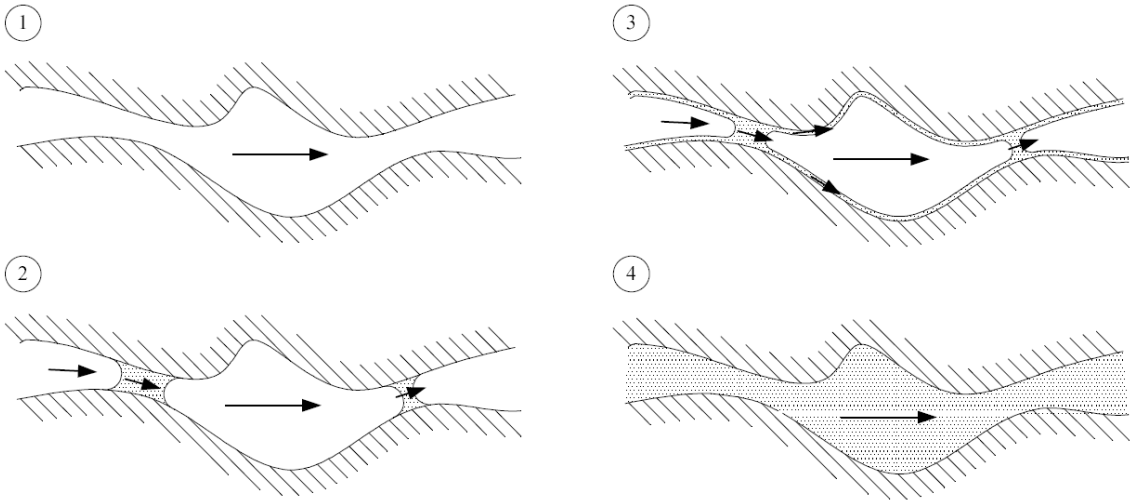

Figura 2-8 As etapas do transporte de vapor no poro em função do teor de umidade. Etapa 1: Fluxo de vapor; Etapa 2: Transporte em série de líquido mais vapor; Etapa 3: Transporte em paralelo de líquido mais vapor; Etapa 4: fluxo líquido (Peukuri, 2003).

O estágio 1 é referente a baixa umidade num poro, ocorrendo somente o transporte de vapor. O Estágio 2 mostra o transporte em série de líquido e vapor com o aumento de umidade, é observado a formação das “ilhas de líquido” (ver Figura 2-9), sendo formadas nas fronteiras dos poros e nos pontos de contato das superfícies. O Estágio 3 é a representação do transporte em paralelo de líquido e vapor, ocorrendo fluxo de massa líquida pela superfície do poro, provocado por um aumento de umidade. O Estágio 4 é o fluxo de líquido para o meio saturado. Os processos de transporte dos estágios 1-3 podem ser classificados de Transporte de Vapor e o Estágio 4 de Transporte de líquido. O transporte líquido começa quando o teor de umidade alcança $\omega_{crítico}$, que é alcançado na existência da continuidade líquida do meio (Peuhkuri, 2003).

A Figura 2-9 representa a migração capilar nas pequenas passagens dos poros, as “Ilhas”. As linhas cheias da figura representam os meniscos das ilhas que estão em equilíbrio termodinâmico. Quando é aplicado um gradiente de pressão de A para B um fluxo de vapor ocorre no sentido da seta, ocorrendo a condensação em A e evaporação em B. As linhas pontilhadas representam a mudança das curvaturas dos meniscos decorrente ao aumento do gradiente de pressão, aumentando a curvatura em A e diminuindo em B (Philip e DeVries, 1957).

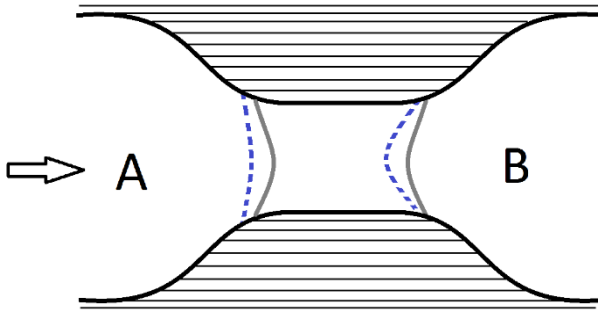

Figura 2-9 Transporte de umidade nas “lhas de Líquido”.

Um parâmetro útil para classificar o tipo de mecanismo de transferência de massa é o Número de Knudsen (Choi *et al.,* 2001):

$$K_n = \lambda_1/d_c \tag{2.20}$$

Sendo λ_1 o caminho livre do deslocamento das partículas e d_c o diâmetro característico do poro. Os três regimes de fluxo estão escritos pela Tabela 2-2. Nosso estudo de caso é na condição Kn<<1, quando o número de colisões intermoleculares é predominante, o mecanismo de transporte governante é o fluxo viscoso na fase gasosa devido ao gradiente de pressão (Choi *et al.,* 2001).

Regimes de Fluxo	
Fluxo Viscoso	Kn << 1
Fluxo de Knudsen	Kn >> 1
Fluxo de Transição	Kn = 1

Tabela 2-2 Regimes do fluxo, adaptado de Choi *et al.* (2001).

A adsorção molecular ocorre em duas etapas, para baixos valores de umidade relativa (0% ~ 40%), as moléculas são fixadas nas superfícies dos poros. Primeiramente ocorre o processo de Adsorção Monomolecular descrito pela Equação de Langmuir (equação 2.21) (Hens, 2012).

$$w_H = \frac{M_W A_p}{A_W N} \frac{C_h \phi}{1+C_h \phi} = 2{,}62 \cdot 10^{-7} A_p \frac{C_h \phi}{1+C_h \phi} \tag{2.21}$$

Sendo w_H o conteúdo de umidade de equilíbrio (kg/m^3), ϕ é a umidade relativa (escala de 0~1), A_W a área superficial de uma molécula de água (11,4 10^{-20}m^2), M_W a

massa de 1 mol de água (0,018016 kg), A_p a superfície específica do poro do material (m^2/m^3), C_h é a troca de calor entre a superfície do poro e a molécula de água (J/kg), escrito pela equação 2.22 (Hens, 2012).

$$C_h = k\ exp\left(\frac{l_a - l_b}{R_v\ T}\right) \tag{2.22}$$

Sendo k a constante de absorção, R_v a constante do vapor (J/(kg K)), l_b o calor de evaporação (J/kg), l_a o calor de adsorção (J/kg). A próxima etapa da adsorção molecular é a formação de multicamadas (umidade relativa ≈20%) descrita pela equação BET 2.23. Sendo n o número de moléculas na camada (Hens, 2012).

$$w_H = 2{,}62 \cdot 10^{-7}\ A_p\ \frac{C_h \phi}{1-\phi}\left[\frac{1-(n+1)\phi^n + n\phi^{n+1}}{1+(C_h-1)\phi - C_h\phi^{n+1}}\right] \tag{2.23}$$

O fenômeno de capilaridade acontece quando a pressão de vapor se aproxima da pressão de enchimento do poro (geralmente um valor menor que a pressão de saturação) (Choi *et al.,* 2001). Este mecanismo é regido pelas forças externas de gradiente de pressão, contato superficial e o peso da coluna de líquido (Mendes, 1997). Condensação capilar se inicia quando as camadas de moléculas de água absorvidas nas paredes dos poros tocam-se umas nas outras, formando os meniscos. Neste momento a tensão superficial rearranja as moléculas para a forma mais estável. Conforme a Figura 2-10, o transporte de água nas ilhas de líquido, o equilíbrio para depositar água no menisco de um lado e liberar umidade no outro é descrito pela Lei de Thompsons, equação 2.24 (Hens, 2012).

$$p'_{sat} = p_{sat} exp\left[-\frac{\sigma_W \cos\vartheta}{\rho_w R_v T}\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)\right] \tag{2.24}$$

Sendo r_1 e r_2 a curvatura dos meniscos, ϑ o ângulo de contato entre a parede do poro e os meniscos, σ_w a tensão superficial da água, ρ_w a massa específica da água, p_{sat} a pressão de saturação de um menisco plano, p'_{sat} a pressão de saturação acima de um menisco curvo – Figura 2-10.

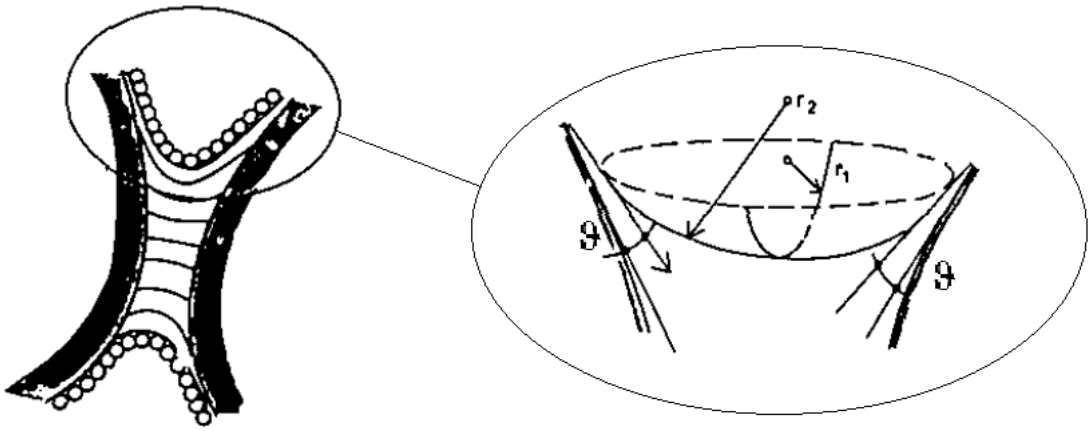

Figura 2-10 Menisco formado pela condensação capilar e Vista do detalhe dos raios e ângulo de contato. Adaptado de Hens (1991).

Considerando os poros circulares tendo um diâmetro equivalente (d_{eq}), obtendo a umidade relativa (ϕ) pela divisão p'_{sat}/p_{sat}, a equação 2.24 pode ser escrita como (2.25) (Hens, 2012).

$$ln(\phi) = -\frac{4\sigma_w \cos\vartheta}{\rho_w R_v T d_{eq}} \quad (2.25)$$

Um fenômeno que ocorre aumentando drasticamente a umidade é o preenchimento dos poros e o grande aumento no diâmetro equivalente dos poros. A umidade aumentará até o ar confinado não poder sair, este valor se chama conteúdo de umidade capilar. Quanto maior as dimensões dos poros, maior será a umidade relativa necessária para alcançar a condensação capilar. O menor diâmetro equivalente é 10^{-9} m, para a faixa menor de 20% UR. Para poros inferiores a este valor de d_{eq}, as moléculas não existem estatisticamente e a condensação capilar não ocorre. Para UR 100%, todos os poros serão preenchidos de água atingindo saturação. O aumento do diâmetro equivalente dos poros acontece com o aumento da umidade relativa - Figura 2-11 (Hens, 2012).

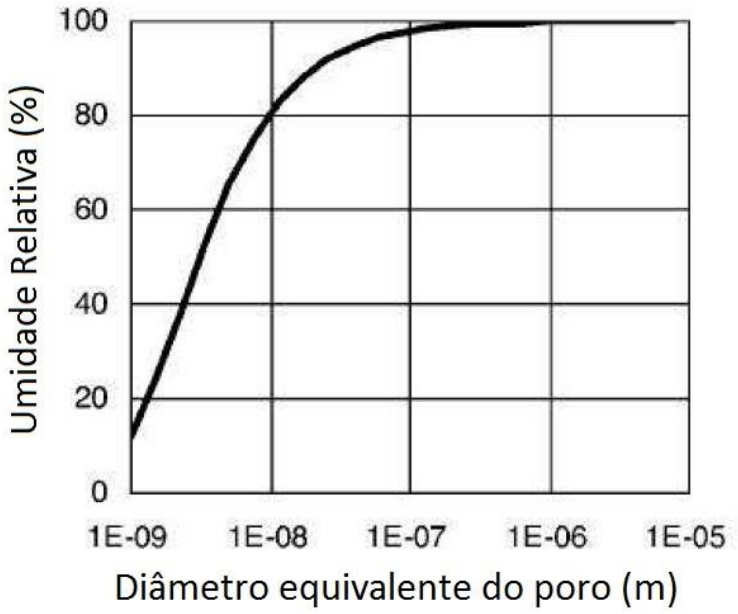

Figura 2-11 D_{eq} em função da umidade relativa, Lei de Thompsons na temperatura de 20ºC. Adaptado de Hens (2012).

A pressão capilar (p_c) num poro circular de diâmetro d_{eq} é escrita pela equação 2.26. A equação 2.26 pode ser utilizada com a p_c através da equação 2.27 (Hens, 2012).

$$p_c = -\frac{4\sigma_w \cos\vartheta}{d_{eq}} \tag{2.26}$$

$$\ln\phi = \frac{p_c}{\rho R_v T} \tag{2.27}$$

A adsorção é o acúmulo de moléculas na vizinhança de uma interface, quando as moléculas penetram na superfície de alguma camada é usado o termo absorção, e quando ocorre o processo inverso é utilizado o termo dessorção (Thommes *et al.*, 2015).

Existe o equilíbrio entre conteúdo de umidade dentro do poro com a sua umidade relativa. Cada nível de umidade relativa corresponde a um nível de conteúdo de umidade, esta “curva” é definida como uma isoterma. As curvas de isotermas de são diferentes de material para material devido as suas propriedades, como área superficial específica, a porosidade total, e a distribuição dos poros. A isoterma de dessorção é superior à de adsorção, o conteúdo de umidade do material sempre estará entre estas duas curvas. Este fenômeno é classificado como histerese (Kwiatkowski *et al.*, 2012).

Partindo de um poro saturado e com sua condição externa de baixa umidade relativa, ocorrerá secagem no poro. A curva que relaciona o conteúdo de umidade em função da umidade relativa, chama-se isoterma. Comparando a isoterma de secagem com a de saturação do mesmo poro, observa-se a histerese, ou seja, para o mesmo valor de umidade relativa, a isoterma de secagem possui um conteúdo de umidade maior que a isoterma do processo de saturação do poro (Hens, 1991). Pode-se observar esta diferença pela Figura 2-12.

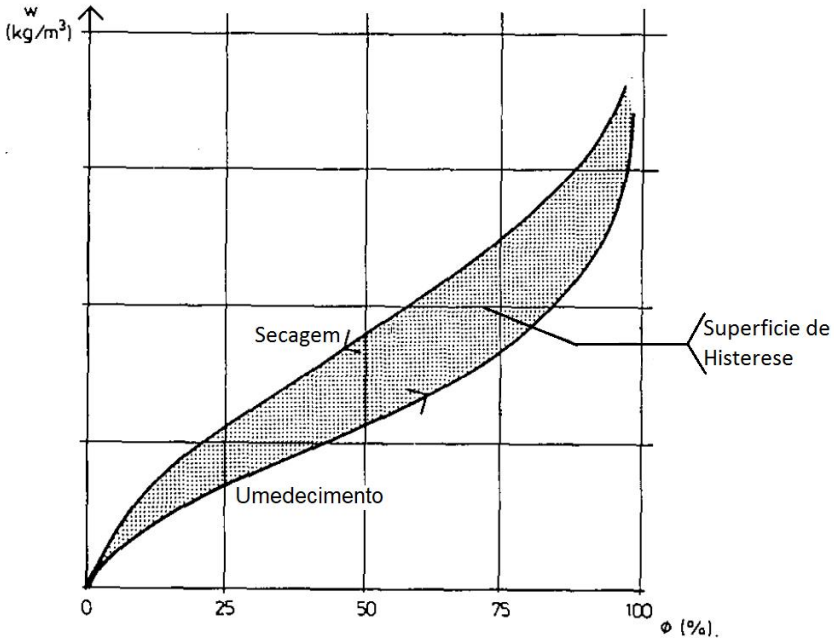

Figura 2-12 A histerese no poro, Adaptado Hens (1991).

Cada material possui suas próprias isotermas, Kwiatkowski *et al.* (2009) comparam curvas de 3 materiais distintos (Figura 2-13). A IUPAC recomenda que as isotermas de adsorção sejam representadas graficamente, pela quantidade adsorvida (mol g^{-1}) em função da pressão relativa (p/p^0), sendo p^0 a pressão de saturação do adsorvente puro, p a pressão do adsorvente acima da temperatura crítica (Thommes *et al.*, 2015).

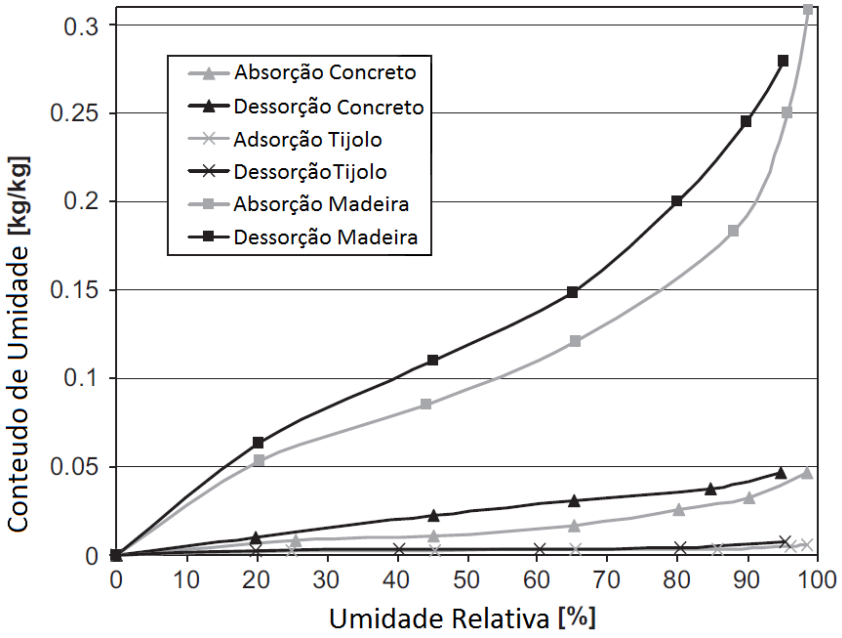

Figura 2-13 Isotermas de adsorção/dessorção para diferentes materiais. Adaptado de Kwiatkowski *et al.* (2009).

Uma das causas da histerese é a formação de bolhas de ar durante a condensação de vapor no poro causando uma descontinuidade na fase líquida no poro, quando a pressão de vapor do ar for superior a pressão do líquido a umidade migra para o poro, e no processo de dessorção o poro está preenchido de líquido saturado e é removido quando a pressão do líquido for maior que a pressão de vapor do ar no meio (Paglarini *et al*., 2013). Um dos efeitos da sorção de histerese é a redução da capacidade do acúmulo de umidade, e o equilíbrio do conteúdo de umidade aumenta conforme se reduz a temperatura para um dado valor de umidade relativa (Zangh *et al*., 2016).

A histerese é um fenômeno a ser estudado e sua implementação nos modelos matemáticos necessita ser aprimorado. Kwiatkowski *et al.* (2009) propuseram um modelo matemático chamado Humi-mur. Zangh *et al*. (2016) estudaram o efeito da temperatura e a variação da umidade acoplando o efeito de histerese. Negligenciando o fenômeno de histerese o acúmulo de umidade é superestimado, a umidade relativa pode permanecer acima do valor crítico por um tempo excessivo e ocasionar o surgimento de fungos, como este não é o foco deste trabalho o fenômeno de histerese será desconsiderado.

O ponto de equilíbrio entre as fases líquida/gasosa pode ser representada por sua função que correlaciona a pressão de saturação com a temperatura do gás (Hens, 1991).

A condensação ocorre quando o gás atinge 100% de umidade relativa ou a pressão de vapor atinge a saturação, ocorrendo sob duas maneiras: Ou o vapor de água alcança a pressão de saturação sem alterar a sua temperatura, ou o vapor é resfriado até a temperatura de saturação mantendo a sua pressão de vapor. Esta linha é o ponto de equilíbrio entre a condensação (liberação) e evaporação (captação), correlacionada com o calor latente da água, conforme a Figura 2-14 (Hens, 1991).

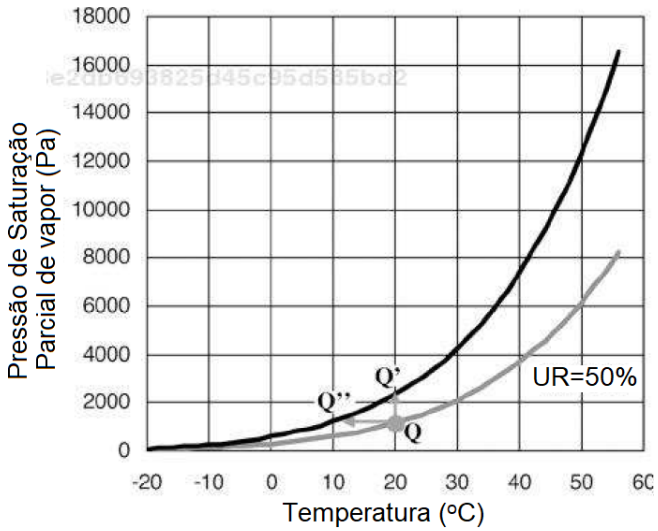

Figura 2-14 Linha da pressão de saturação do vapor. Adaptado de Hens (2012).

O processo de difusão ocorre devido ao gradiente de pressão parcial do vapor, causando o movimento relativo das moléculas de água no ar presentes nos poros. (Hens, 2012). Este fenômeno pode ser representado por uma câmara contendo duas espécies separadas por uma membrana divisória num plano imaginário, Figura 2-15. Removendo esta membrana, tanto a espécie A como a espécie B possuem o movimento molecular aleatório, tendo a probabilidade de uma partícula se mover tanto para a esquerda quanto para a direita, assim substância da espécie A irá migrar para a direita deste plano imaginário e substância da espécie B irá migrar para a esquerda, e consequentemente quando as concentrações das espécies estiverem em equilíbrio irá cessar o movimento líquido pelo plano imaginário (Incropera *et al.*, 2008).

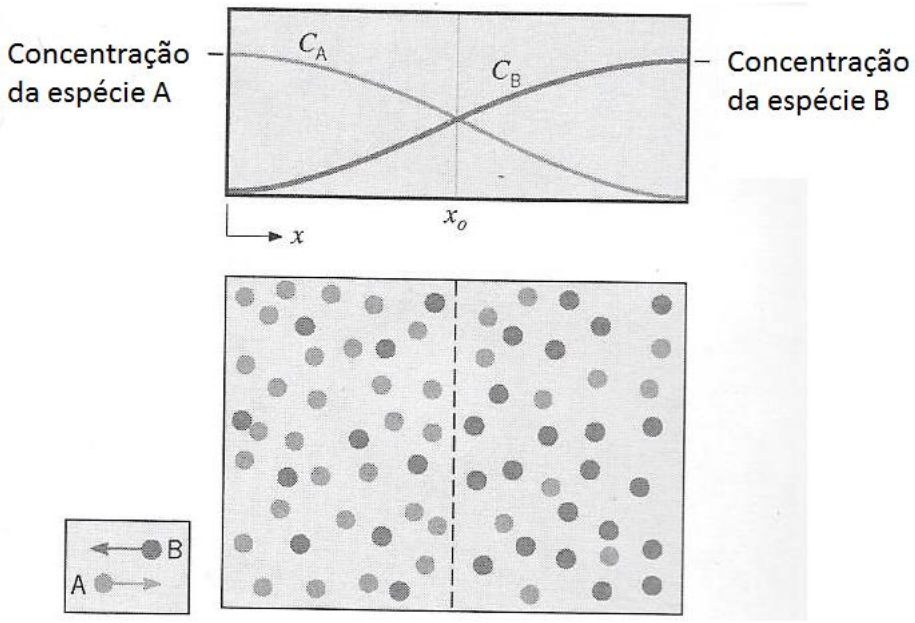

Figura 2-15 Transferência de massa por difusão, mistura gasosa binaria (Incropera *et al.*, 2008).

A equação da difusão de vapor proposta por Philip e DeVries (1957) no meio poroso é expressa como,

$$j_v = -D_{atm} \upsilon \alpha a \nabla \rho \tag{2.28}$$

Sendo j_v o vetor fluxo de massa de vapor (kg m^{-2} s^{-1}), D_{atm} a difusividade do vapor no ar (m^2/s), ρ é a massa específica de vapor (kg/m^3), α é o fator de tortuosidade, *a* é o conteúdo de ar no meio (m^3_{ar}/m^3), υ é o fator do fluxo de massa para correção da diluição do vapor no ar e é descrito pela equação 2.29.

$$v = \frac{p_0}{p_0 - p_v} \tag{2.29}$$

Sendo p_0 e p_v a pressão atmosférica e pressão de vapor parcial, *v* é aproximadamente 1 para a maioria dos casos. O mecanismo de transferência de umidade predominante para baixos valores de teor de umidade é melhor representado pela Primeira e Segunda Lei de Fick (Equações 2.30 e 2.32) (Esteves, 2009).

$$\vec{J} = -D_{AB} \overrightarrow{grad}\, C \tag{2.30}$$

Sendo **J** o vetor do fluxo molar (kmol/(s m^2)), D_{AB} o coeficiente de difusão da espécie A em B (m^2/s) e C a concentração por volume (kmol/m^3). Para um sistema cartesiano ortogonal a 1ª. Lei de Fick é expressa pela eq. (2.31).

$$\vec{J} = -D_{AB}\frac{\partial C}{\partial x}\vec{\imath} - D_{AB}\frac{\partial C}{\partial y}\vec{\jmath} - D_{AB}\frac{\partial C}{\partial z}\vec{k} \tag{2.31}$$

Quando o processo de transferência de espécie ocorre em regime transitório é utilizado a 2ª. Lei de Fick, expressa pela equação (2.32).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = div\left(D_{AB}\overrightarrow{grad}\ C\right) \tag{2.32}$$

Para definir uma formulação geral, estabelece-se um volume de controle arbitrário no espaço, possibilitando que um material escoe através dele, a sua geometria externa é chamada de superfície de controle. Aplicando a conservação da massa nesse sistema - Figura 2-16 – se obtém a equação 2.33 (Incropera *et al.*, 2008).

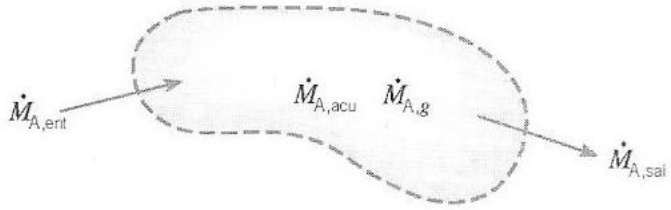

Figura 2-16 Conservação de espécie num volume de controle (Incropera *et al*., 2008).

A equação da conservação da espécie é escrita pela equação 2.33. Sendo $\dot{M}_{A,ent}$ a espécie que entrou no sistema, $\dot{M}_{A,g}$ a espécie gerada dentro do sistema, $\dot{M}_{A,sai}$ a espécie que sai do volume de controle e $\dot{M}_{A,acu}$ a espécie acumulada no interior do volume de controle (Incropera *et al*., 2008).

$$\dot{M}_{A,ent} + \dot{M}_{A,g} - \dot{M}_{A,sai} = \frac{dM_A}{dt} \equiv \dot{M}_{A,acu} \tag{2.33}$$

Definindo um volume de controle diferencial – Figura 2-17 – dx, dy, dz, existindo um gradiente de concentração nas direções x, y e z, sendo n”$_A$ o fluxo de massa absoluto, é obtido a equação da difusão mássica (Incropera *et al.*, 2008):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho D_{AB}\frac{\partial m_A}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho D_{AB}\frac{\partial m_A}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho D_{AB}\frac{\partial m_A}{\partial z}\right)+\dot{n}_A=\frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad (2.34)$$

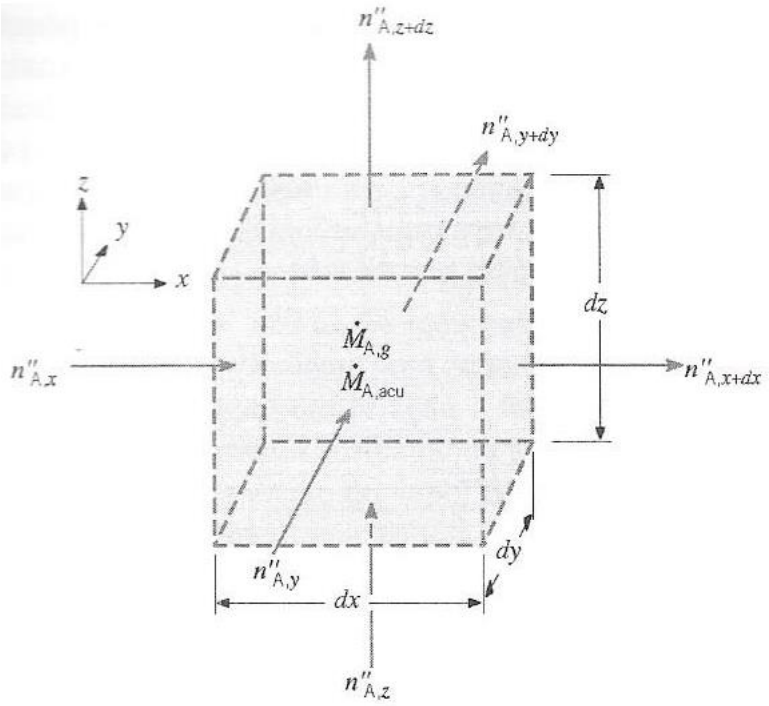

Figura 2-17 Volume de controle diferencial – dx, dy, dz – para difusão de uma espécie em coordenadas cartesianas (Incropera *et al*., 2008).

Sendo m_A a fração mássica da espécie A, $\dot{n}_A$ a taxa de aumento da espécie A por unidade de volume da mistura (kg/(s m^3)).

2.6 MOISTURE BUFFER VALUE (MBV)

O parâmetro *Moisture Buffer Value* mede a taxa e a capacidade de um material de adssorver / dessorver umidade em seu envoltório (Rode, 2005). A determinação do índice MBV depende de vários parâmetros, tais como tempo de ciclo, difusividade mássica, permeabilidade ao vapor, a capacidade de acumulação de umidade, a espessura do material, acabamento superficial, a massa específica, a rugosidade, a temperatura do ar, a taxa de ventilação e de velocidade do escoamento (Meissner, 2008). Além disso, o comportamento higroscópico do ambiente é influenciado pelos equipamentos e mobiliário da sala, a carga de umidade, a renovação de ar entre outros fatores (Rode, 2005).

O protocolo NORDTEST é um projeto que tem como objetivo determinar experimentalmente o parâmetro MBV do material. O princípio básico é baseado numa sala de testes de ar controlado para expor uma amostra a ciclos de carga higrotérmica.

O protocolo NORDTEST propõe a utilização de cargas psicrométricas em ciclos de 8 horas e 16 horas, variando a umidade. A amostra de teste é exposta a uma umidade relativa de 75% durante 8 horas e, em seguida, exposto a 33% de umidade relativa durante 16 horas. Esta variação cíclica de 8h ~ 16h melhor representa as atividades humanas em um ambiente, sendo mais fácil de controlar que num ambiente de ciclo 12h ~ 12h, e a velocidade do ar deve ser de 0,10±0,05m/s. O protocolo NORDTEST propôs a Eq. (2.35) para o cálculo de MBV, e a unidade de medida é kg/(m^{2}Δ%UR) (Rode, 2005).

$$MBV = \frac{\Delta m}{A.\Delta \%UR} \tag{2.35}$$

Sendo m a massa (kg), A é a área (m^2) e Δ%UR a variação da umidade relativa (%). Dois resultados de variação de massa devem ser computados por ciclo, uma na absorção de água ($m_{8\ horas} - m_{0\ horas}$) e na dessorção ($m_{24\ horas} - m_{8\ horas}$) na secagem do material. A média da adsorção e dessorção é calculada para cada ciclo, e o MBV é calculado pela média das três últimas medições (Rode, 2005). Existe uma classificação do MBV para os materiais, como ilustrado na Figura 2-18, sendo um material definido como excelente com um alto valor de MBV e um ruim no caso contrário.

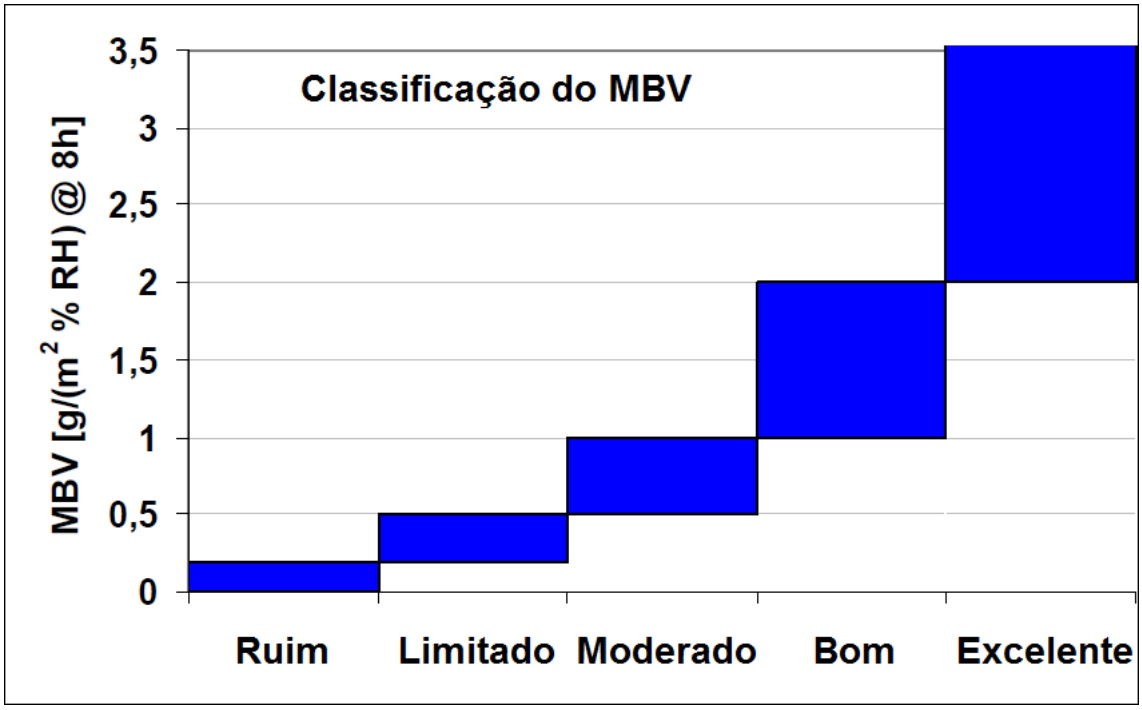

Figura 2-18 Classificação do MBV do material, adaptado de Rode (2005).

Foi executado o *Robin Round Test* com objetivo de verificar se era possível vários institutos fazer o mesmo experimento para obter resultados consistentes. Eles testaram diversos materiais como concreto, gesso, madeira laminada com verniz, tijolo, concreto celular, e outros. A síntese do *Robin Round Test* efetuado por vários institutos (Figura 2-19 e Tabela 2-3), sendo utilizado como material de teste placas de madeira compensada em todos os laboratórios.

	DTU	**LTH**	**NBI**	**UoS**	**VTT**	**Valor médio**
Média dos ciclos g/m²%UR	0,58	0,59	0,67	0,57	0,45	0,58
Desvio Padrão para ciclo Média	0,03	0,03	0,03	0,06	-	0,07

Tabela 2-3 Valores médios do $MBV_{practical}$ de todos os laboratórios para todos os ciclos. Adaptado de Rode (2005).

A média do MBV obtidos pelos laboratórios deste material ficou no intervalo de classificação de moderado.

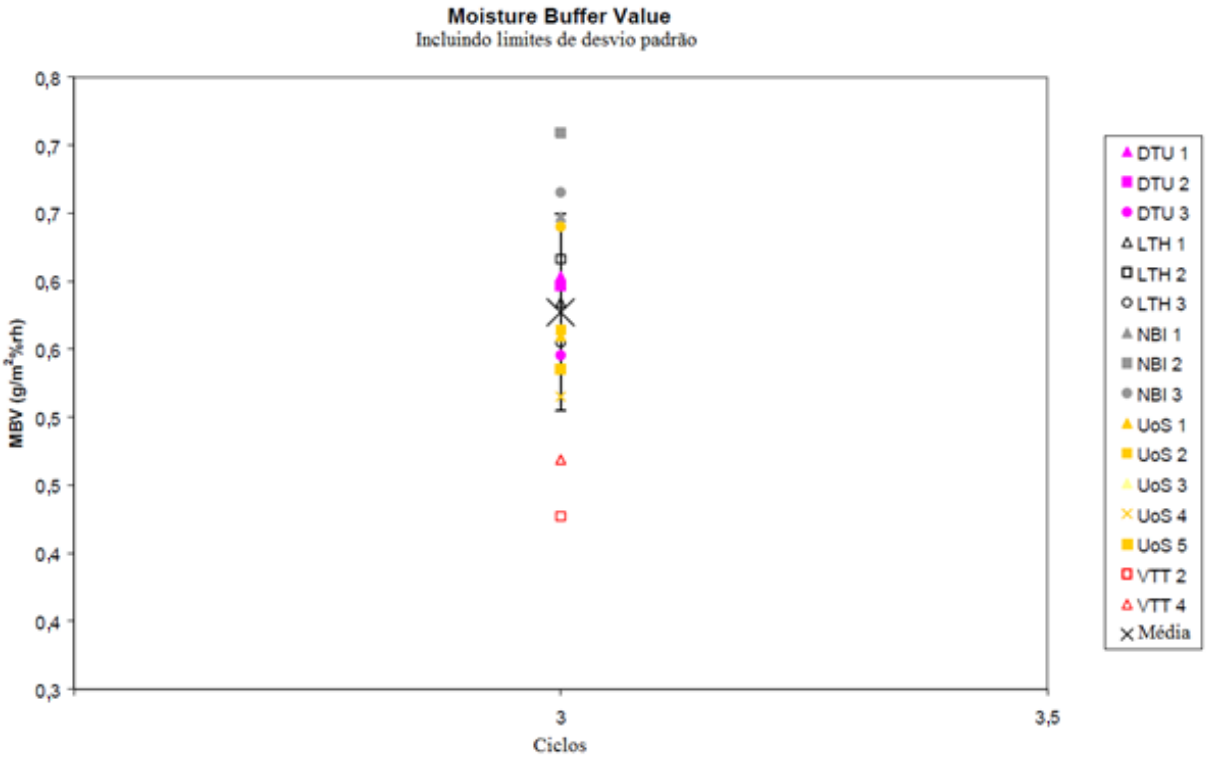

Figura 2-19 O MBV medido por vários laboratórios dos três últimos ciclos com variação constante medidos no *Robin Round Test*. Incluindo barra de desvio padrão, adaptado de Rode (2005).

Para maiores informações sobre o MBV consultar o material de Rode (2005) e Rode *et al.* (2008).

Todos os itens expostos neste capítulo servem de base para o entendimento da transferência de umidade em material poroso, desde as descrições dos fenômenos físicos até as propriedades envolvidas. Estas informações servem como base para formulação do próximo capítulo (modelo matemático), que trata da transferência de vapor em material poroso. Desde psicrometria, composições e misturas, propriedades de umidade nos materiais porosos.

CAPÍTULO 3 - MODELO MATEMÁTICO

Foi desenvolvido um modelo matemático para calcular a transferência de massa de vapor de uma geometria 1-D com o objetivo de analisar as medições do índice MBV para materiais higroscópicos. Para esta análise são utilizados os resultados experimentais realizados por Meissner (2008) e Silva (2017). Assim, o trabalho numérico desenvolvido simula os experimentos físicos realizados por trabalhos de diferentes literaturas.

São simuladas as condições de umidade e temperatura utilizadas pelo protocolo NORDTEST, sendo estas aplicadas também nos experimentos realizados por Meissner (2008) e Silva (2017). Meissner (2008) em seu trabalho implementou em um calorímetro, uma bancada de controle dos parâmetros experimentais e uma caixa de madeira compensada como material para os ensaios, no Laboratório de Simulações Térmicas (LST) na Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). E posteriormente Silva (2017) repetiu o experimento mas para uma amostra de teste de tamanho reduzido.

Esta caixa é higroscopicamente isolada no exterior. Dentro desta amostra é aplicada uma carga cíclica higroscópica para obter o fluxo de vapor entre a superfície e o fluxo de ar. As outras condições de contorno são fixas: um fluxo volumétrico de ar e temperatura constante em 23ºC, a caixa tem uma entrada e uma saída para a passagem do ar, e a sua superfície exterior desta isolada para umidade. O ciclo de tempo é proposto pelo protocolo NORDTEST, fluxo de ar constante, com 16 horas a baixa humidade (33%) e 8 horas a uma umidade relativa elevada (75%). Este ciclo representa melhor as atividades humanas. O aparato experimental do LST foi implementado por Meissner (2008) e posteriormente modificado por Silva (2017). Este trabalho compara seus resultados experimentais de Meissner (2008) e Silva (2017) com os valores numéricos obtidos a partir do modelo matemático implementado na plataforma Matlab R2015a e com o *software* Domus – Eletrobras.

No modelo matemático é aplicado as propriedades de umidade medidos por Osanyintola *et al.* (2006) e Wu (2007), sendo estas a isoterma do conteúdo de

umidade, a permeabilidade ao vapor e a massa específica do material seco. A espessura das placas da madeira compensada é de 15 mm.

Para melhor assimilação do que é simulado são mostradas as fotos dos experimentos executados por Meissner (2008) e Silva (2017). Pois o modelo matemático proposto é a representação dos Aparatos Físicos (Ver apêndice B).

Para simular a transferência de massa em um meio poroso, é utilizado um modelo baseado nas seguintes hipóteses:

Hipóteses:

- Meio isotérmicos;
- Transferência de umidade ao longo do material é unidimensional;
- Transporte de umidade é puramente difusivo;
- Ar e vapor de água se comportam como gases ideais;
- Região de conteúdo de umidade somente vapor;
- Desprezada a variação do volume (retração e inchamento na madeira) devido a mudança do conteúdo de umidade;
- Histerese e entalpia de mudança de fase desconsideradas;

Para o problema isotérmico as equações utilizadas no modelo são a Equação do Transporte de Vapor (3.1) e a Equação da taxa de mudança de fase (3.2) (Olutimayin *et al.*, 2005).

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_v)}{\partial t} - \dot{m} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{eff}\frac{\partial \rho_v}{\partial x}\right) \tag{3.1}$$

$$\dot{m} = -\frac{\partial u}{\partial t}\rho_0 \tag{3.2}$$

Sendo ṁ a taxa de mudança de fase (kg/(m^3 s)), ε_g a fração volumétrica do vapor no poro do material [-], ρ_v a massa específica do vapor (kg/m^3) e ρ_0 a massa específica do material seco (kg/m^3). É utilizado neste modelo a analogia de umidade com a difusividade térmica (Ver Tabela 3-1).

Na equação 3.2, na derivada parcial é aplicado a regra da cadeia:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial \rho_v}\frac{\partial \rho_v}{\partial t} \tag{3.3}$$

Isolando o termo P_v da equação 2.13 (umidade relativa)

$$P_v = P_{sat,v}\phi \tag{3.4}$$

Isolando o termo ρ_v da equação dos gases ideias (2.11)

$$\rho_v = \frac{P_v}{R_v T} \tag{3.5}$$

Substituindo (3.4) em (3.5)

$$\rho_v = \frac{P_{sat,v}\phi}{R_v T} \tag{3.6}$$

Substituindo o termo divisor ρ_v pela equação (3.6), e substituindo (3.3) em (3.2) obtém-se a equação (3.7)

$$\dot{m} = -\frac{\rho_0 R_v T}{P_{sat,v}}\frac{\partial u}{\partial \phi}\frac{\partial \rho_v}{\partial t} \tag{3.7}$$

Substituindo a expressão (3.7) em (3.1) obtém-se (3.8)

$$\left(\varepsilon_g + \frac{\rho_0 R_v T}{P_{sat,v}}\frac{\partial u}{\partial \phi}\right)\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = D_{eff}\frac{\partial^2 \rho_v}{\partial x^2} \tag{3.8}$$

A equação do transporte de massa pode ser escrita por (3.9) *(Olutimayin et al., 2005)*

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \alpha_{m,eff}\frac{\partial^2 \rho_v}{\partial x^2} \tag{3.9}$$

Sendo $\alpha_{m,eff}$ o termo de difusividade efetivo de umidade para um meio poroso, expresso pela equação (3.10).

$$\alpha_{m,eff} = \frac{D_{eff}}{C_m} \tag{3.10}$$

Sendo C_m o termo de acúmulo de umidade, expresso pela equação (3.11) (Olutimayin *et al.*, 2005).

$$C_m = \left(\varepsilon_g + \frac{\rho_0 R_v T}{P_{sat,v}} \frac{\partial u}{\partial \phi}\right) \tag{3.11}$$

O termo $\frac{\partial u}{\partial \phi}$ é obtido a partir da curva de isoterma de umidade no material, e neste trabalho será utilizado a isoterma proposta por Osanyintola *et al.* (2006), pois os parâmetros da carga cíclica do experimento são muito próximos deste trabalho, expressa pela Figura (3.1) e equação (3.12).

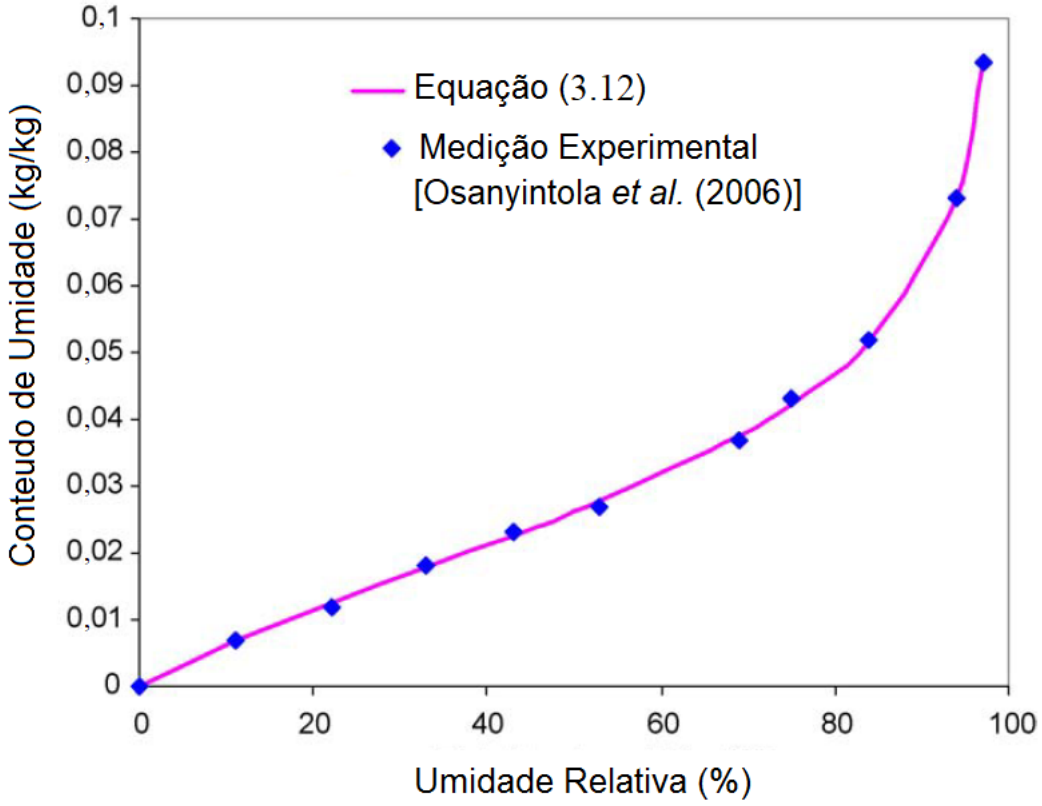

Figura 3-1 Isoterma de sorção para madeira compensada, medição e equação. Adaptado de Osanyintola *et al.* (2006)

Osanyintola *et al*. (2006) fizeram medições de uma placa de madeira compensada, numa câmara com cargas cíclicas de 75,2 ± 0,8 % UR por 8 horas e 33,3 ± 0,8 % UR por 16 horas na temperatura constante de 23,3 ± 0,3 ºC.

$$u = \frac{a+c\phi+e\phi^2}{1+b\phi+d\phi^2+f\phi^3} \quad (3.12)$$

Sendo u a isoterma de sorção de umidade na madeira compensada obtido por Osanyintola *et al.* (2006), ϕ é a umidade relativa (em fração), as constantes são: a=1,0147E-04, b=0,2339, c=0,06754, d=-2,3603, e = -0,06574, f = 1,1329. Polinômio obtido e medido com r^2 = 0,999 (Osanyintola *et al.*, 2006).

O coeficiente de difusão efetivo (D_{eff}) de vapor na madeira pode ser calculado através da equação (3.13) (Osanyintola *et al.*, 2006).

$$D_{eff} = \delta R_v T \quad (3.13)$$

Sendo δ a permeabilidade de vapor (kg/(m s Pa)), R_v a constante do vapor (J/(kgK)) e T a temperatura (K). A permeabilidade do vapor na madeira pode ser calculada através da equação (3.14) e visualizada na Figura 3-2, obtida por Osanyintola *et al.* (2006).

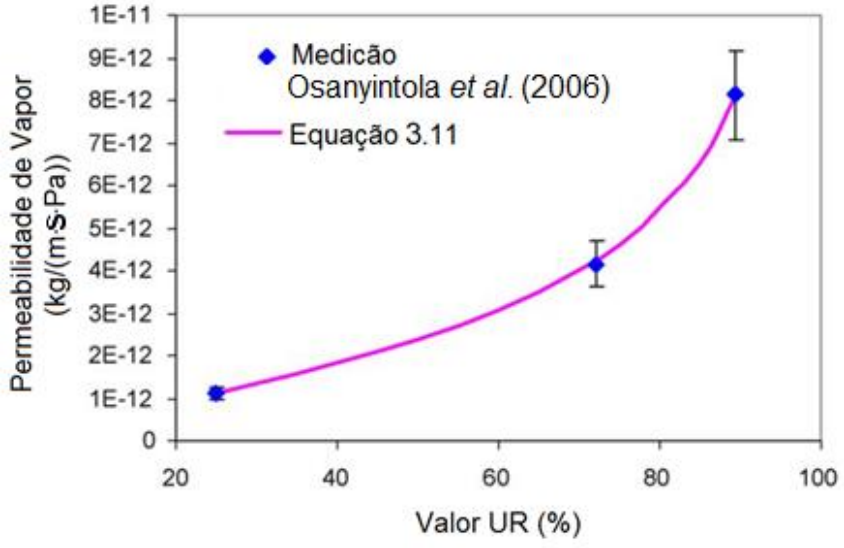

Figura 3-2 Curva de Permeabilidade de Vapor da madeira compensada, com 95% barras de incerteza. Adaptado de Osanyintola *et al.* (2006).

$$\delta = \left(a + \frac{b\emptyset}{\ln \emptyset}\right)^{1/2} \quad (3.14)$$

Sendo “a” e “b” constantes (a = -2,3573E-25; b= - 8,1601E-24) e ϕ a umidade relativa (em fração).

3.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para o lado interno da placa (x = 0 m) é exposta a troca de vapor entre a superfície porosa e o ar, expressa pela equação 3.15.

$$h_m\left(\rho_v|_{x=0} - \rho_{v,\infty}\right) = D_{eff} \left.\frac{\partial \rho_v}{\partial x}\right|_{x=0} \quad (3.15)$$

Para o lado externo (x = L) a superfície é isolada e sua condição de contorno é expressa pela equação 3.16.

$$\left.\frac{\partial \rho_v}{\partial x}\right|_{x=L} = 0 \quad (3.16)$$

Como dito anteriormente o modelo tem a hipótese isotérmica. Esta consideração ela só é necessária na obtenção inicial dos parâmetros utilizados, como por exemplo Pressão de Saturação de Vapor, massa específica entre outros.

3.2 ENVOLTÓRIO

Para solução numérica das equações discretizadas, o domínio físico é mostrado pela Figura 3.3. Adotando a técnica de volumes finitos e utilizado a formulação explícita. O lado esquerdo representa a condição de contorno onde ocorre a troca de umidade entre o ar úmido e o material e o lado direito da malha representa a condição de contorno onde não ocorre o fluxo de umidade.

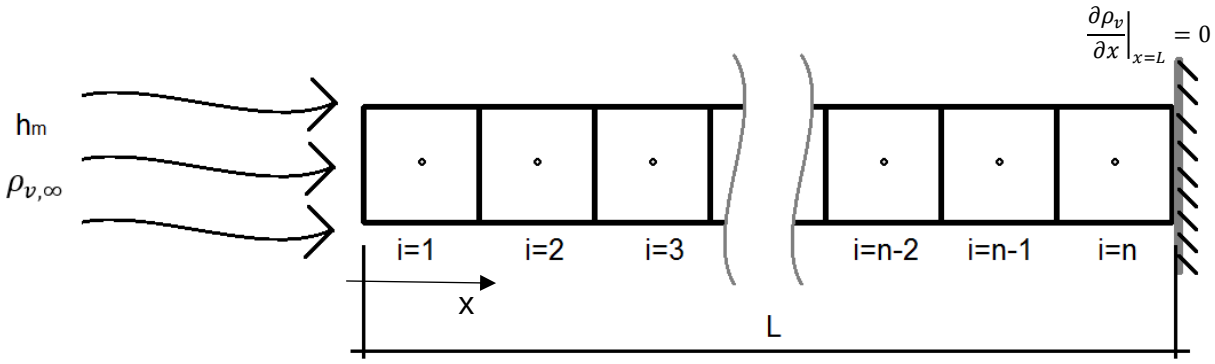

Figura 3-3 Configuração dos volumes de controle das equações discretizadas.

A malha para a discretização do domínio é descrita pela Figura 3-4.

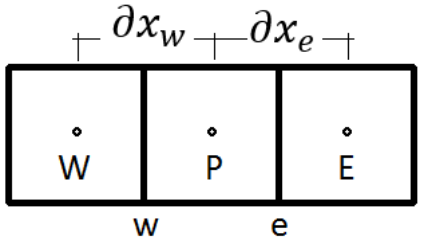

Figura 3-4 Definição dos volumes de controle para a discretização do domínio físico.

Avaliando o parâmetro D_{eff} na fronteira *e*, pela primeira Lei de Fick. (Eq. 3.17)

$$J_e = -D_{eff}\frac{C_E - C_P}{\delta x^e} = \frac{C_P - C_E}{\frac{\delta x^e}{D_{eff}}} = \frac{C_P - C_E}{\frac{\delta x_e^-}{D_{eff,P}} + \frac{\delta x_e^+}{D_{eff,E}}} \tag{3.17}$$

Sendo δx_e a distância entre o ponto P e E, δx_e^+ a distância da fronteira *e* e o ponto E, δx_e^- a distância da fronteira *e* e o ponto P. Definindo a razão entre δx_e^+ por δx_e como f_e expresso pela equação 3.18.

$$f_e = \frac{\delta x_e^+}{\delta x_e} \tag{3.18}$$

Assim o termo $D_{eff,e}$ pode ser avaliado como:

$$D_{eff,e} = \left[\frac{1-f_e}{D_{eff,P}} + \frac{f_e}{D_{eff,E}}\right]^{-1} \tag{3.19}$$

Se a fronteira *e* ficar no centro de P e E, $f_e = 0.5$, então D_{eff} se torna uma Média Harmônica (Patankar, 1980):

$$D_{eff}\Big|_e = \frac{2D_{eff,P} \cdot D_{eff,E}}{D_{eff,P} + D_{eff,E}} \tag{3.20}$$

Para avaliar $D_{eff,w}$, e $\alpha_{m,eff}$ tanto para a fronteira *e* e *w* é feita de maneira equivalente a $D_{eff,e}$ como descrito previamente.

3.3 EQUAÇÕES DISCRETIZADAS

As equações discretizadas por volumes finitos e formulação explicita assumem a forma da equação 3.21.

$$A_p \cdot \rho_{v,p} = A_e \cdot {\rho_{v,E}}^0 + A_w \cdot {\rho_{v,W}}^0 + S \tag{3.21}$$

Os valores dos parâmetros são: $A_p = \frac{\Delta x}{\Delta t}$; $A_e = \frac{\alpha_{m,eff}}{\partial x}\Big|_e$; $A_w = \frac{\alpha_{m,eff}}{\partial x}\Big|_w$; e $S = \left(A_p - A_e - A_w\right) \cdot {\rho_{v,P}}^0$. Se $\partial x_e = \partial x_w = \Delta x$, então $\alpha_{m,eff}\frac{\Delta t}{\Delta x^2} = r$.

As equações discretizadas para cada elemento são expressas pelas equações (3.22), (3.23) e (3.24).

<u>Para i=1:</u>

$$\rho_{v,1} = C1 \cdot {\rho_{v,1}}^0 + C2 \cdot {\rho_{v,2}}^0 + C3 \cdot {\rho_{v,\infty}}^0 \tag{3.22}$$

Sendo:

$$C1 = \left(1 - \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot \Delta x_{1/2}}\alpha_{m,eff}(1) + \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot \Delta x_{1/2}} \cdot \frac{D_{eff}(1)}{D_{eff}(1) + h_m \cdot \Delta x_f} \cdot \alpha_{m,eff}(1) - \frac{\Delta t}{\Delta x^2}\frac{2\alpha_{m,eff}(1)\alpha_{m,eff}(2)}{\alpha_{m,eff}(1) + \alpha_{m,eff}(2)}\right);$$

$$C2 = \left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\frac{2\alpha_{m,eff}(1)\alpha_{m,eff}(2)}{\alpha_{m,eff}(1)+\alpha_{m,eff}(2)}\right); \qquad C3 = \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot \Delta x_{1/2}} \cdot \frac{h_m}{\frac{D_{eff}(1)}{\Delta x_{1/2}} + h_m} \cdot \alpha_{m,eff}(1);$$

Para 1<i<n:

$$\rho_{v,i} = \left(\frac{2\alpha_{m,eff}(i-1)\alpha_{m,eff}(i)}{\alpha_{m,eff}(i-1)+\alpha_{m,eff}(i)}\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\right)\rho_{v,i-1}{}^{0} + \left(1 - \frac{2\alpha_{m,eff}(i-1)\alpha_{m,eff}(i)}{\alpha_{m,eff}(i-1)+\alpha_{m,eff}(i)}\frac{\Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2\alpha_{m,eff}(i)\alpha_{m,eff}(i+1)}{\alpha_{m,eff}(i)+\alpha_{m,eff}(i+1)}\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\right)\cdot \rho_{v,i}{}^{0} + \left(\frac{2\alpha_{m,eff}(i)\alpha_{m,eff}(i+1)}{\alpha_{m,eff}(i)+\alpha_{m,eff}(i+1)}\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\right)\cdot \rho_{v,i+1}{}^{0} \quad (3.23)$$

Para i=n:

$$\rho_{v,n} = \left(\frac{2\alpha_{m,eff}(n-1)\alpha_{m,eff}(n)}{\alpha_{m,eff}(n-1)+\alpha_{m,eff}(n)}\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\right)\cdot \rho_{v,n-1}{}^{0} + \left(1 - \frac{2\alpha_{m,eff}(n-1)\alpha_{m,eff}(n)}{\alpha_{m,eff}(n-1)+\alpha_{m,eff}(n)}\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\right)\cdot \rho_{v,n}{}^{0} \quad (3.24)$$

3.4 COMPARAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO COM SOLUÇÃO ANALÍTICA

A solução analítica para transferência de calor por convecção na parede para um meio semi-infinito pode ser utilizada de maneira similar para o problema de convecção de umidade na superfície de uma parede de meio semi-infinito (Incropera *et al.*, 2008). Olutimayin *et al.* (2005) desenvolveram analogia da propriedade de difusividade de umidade ($\alpha_{m,eff}$) que é análogo a propriedade de difusividade térmica (α), incluindo armazenamento de umidade no poro, como mostrado na Tabela 3-1 (Osanyintola, 2005).

Propriedades Térmicas	**Analogia das propriedades de umidade (antiga)**	**Analogia das propriedades de umidade (Nova)**
h	h_m	h_m
k	D_{eff}	D_{eff}
$\boldsymbol{\alpha = \frac{k}{\rho c_p}}$	D_{eff}	$\alpha_{m,eff} = \frac{D_{eff}}{C_m}$

Tabela 3-1 Propriedades de umidade análogas à difusividade térmica para o cálculo das propriedades da camada limite de vapor. Adaptado de Olutimayin *et al.* (2005).

A transferência de calor por condução unidimensional transiente representada pela equação (3.25) para as condições de contorno com convecção na superfície de um meio semi-infinito possui solução analítica expressa pela equação (3.26)

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{3.25}$$

$$\frac{T-T_i}{T_\infty - T_i} = erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - \left[exp\left(\frac{h_a x}{k} + \frac{{h_a}^2 \alpha t}{k^2}\right)\right] \times \left[erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h_a\sqrt{\alpha t}}{k}\right)\right] \tag{3.26}$$

Sendo h_a o coeficiente de transferência de calor por convecção do ar (W/(m^{2}K)), α a difusividade térmica (m^2/s) e k a condutividade térmica por condução (W/(m K)). Fazendo as analogias dos parâmetros de transferência de calor para massa (mostrados na Tabela 3-1) a solução analítica para o problema de transferência de massa para um meio semi-infinito com convecção na superfície é expressa como: (Olutimayin *et al.*, 2005).

$$\frac{\rho_v - \rho_{v,i}}{\rho_\infty - \rho_{v,i}} = erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_{m,eff} t}}\right) - \left[exp\left(\frac{h_m x}{D_{eff}} + \frac{{h_m}^2 \alpha_{m,eff} t}{{D_{eff}}^2}\right)\right] \times \left[erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_{m,eff} t}} + \frac{h_m\sqrt{\alpha_{m,eff} t}}{D_{eff}}\right)\right]. \tag{3.27}$$

Sendo $\rho_{v,i}$ a massa específica de vapor inicial, erf a função erro (Função erro de Gauss)(equação 3.28), e erfc a função erro complementar (equação 3.29) (Incropera *et al.,* 2008).

$$\mathrm{erf}\, w = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w e^{-v^2} dv \tag{3.28}$$

$$erfc\, w = 1 - \mathrm{erf}\, w \tag{3.29}$$

O termo de profundidade de penetração de umidade (δ_m) é definido como a posição no meio poroso quando a massa específica de vapor é perturbada em 1% nos poros. É expresso pela equação (3.30).

$$\frac{\rho_v - \rho_{v,i}}{\rho_\infty - \rho_{v,i}} = 0{,}01 \tag{3.30}$$

A profundidade de penetração de umidade (δ_m) foi calculada pela equação (3.27) e comparada com o modelo matemático. A Figura 3-5 apresenta os resultados obtidos com a solução analítica e com o modelo matemático para espessura de material em 15mm e a Figura 3-6 é a mesma análise para a espessura do material alterado para 1 m. Os dados para a comparação da solução analítica para os dois casos (Figuras 3-5 e 3-6) são descritos na Tabela 3-2. Para ambos os resultados foi utilizado passo de tempo de 60 segundos, a umidade relativa inicial do material em 50%, a umidade relativa do ar escoando sobre a placa é constante no valor de 75%, Difusividade do vapor efetivo de 3,2488E-07 m^2/s, h_m de 2,70E-03 m/s e temperatura constante em 296,15 K.

	Dados	
	Figura 3-5	**Figura 3-6**
Comprimento da Placa [m]	0,015	1,0
Núm. de Iterações	1440 [1 dia]	7200 [5 dias]
Núm. de Nós	75	5000

Tabela 3-2 Dados utilizados na comparação da solução analítica com o modelo matemático.

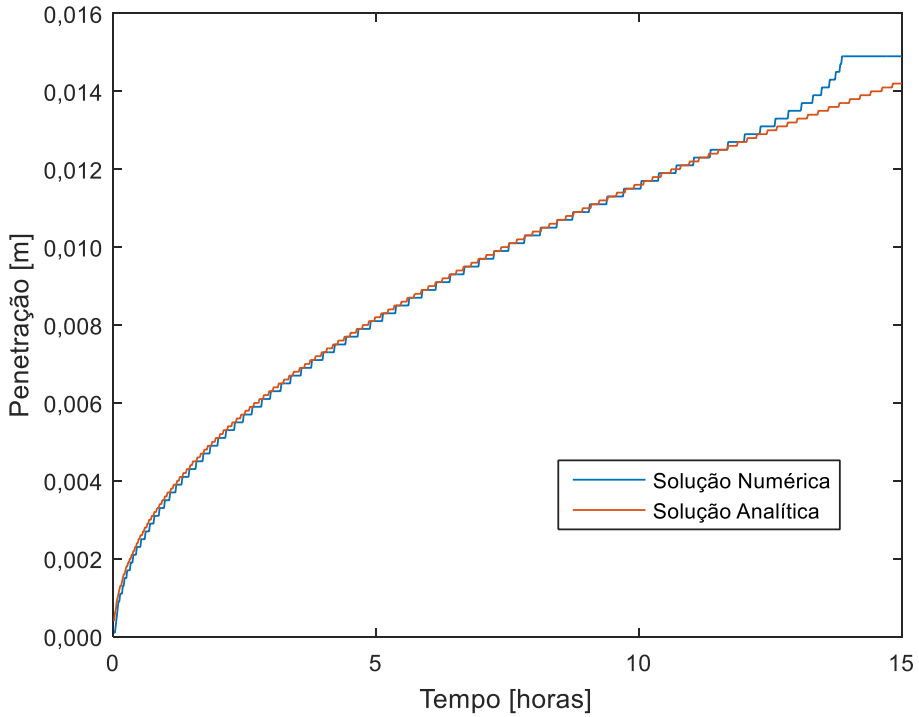

Figura 3-5 Penetração de umidade no tempo. Espessura do material em 15 mm.

Observando a Figura 3-5 nota-se que a solução analítica com o modelo matemático é equivalente até o comprimento de 12 mm, a partir deste ponto a condição de contorno começa a influenciar a curva.

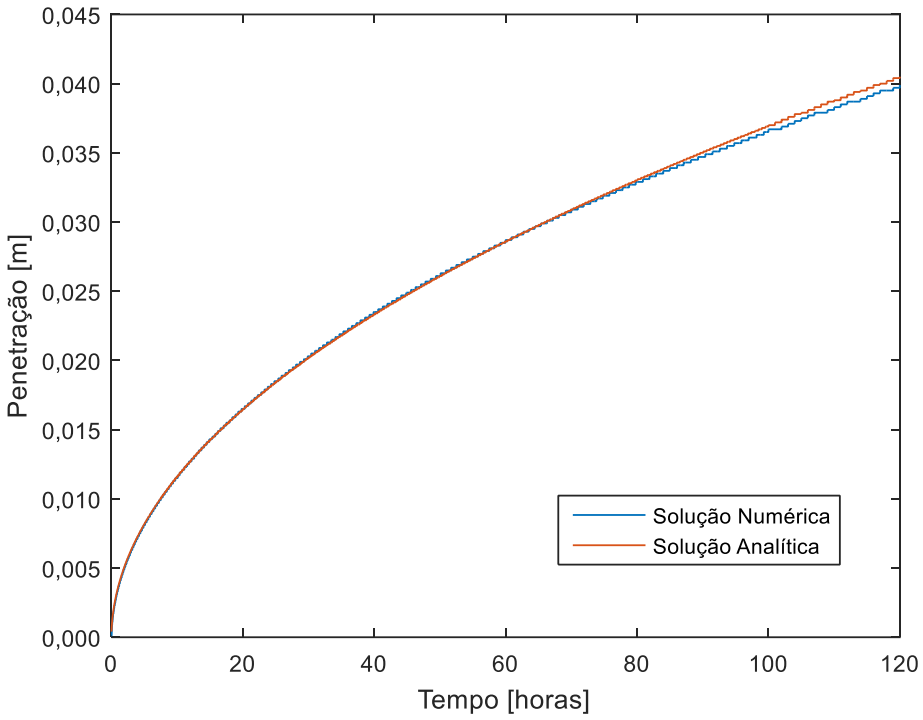

Figura 3-6 Penetração de umidade no tempo. Espessura do material em 1 m.

Observando a Figura 3-6 nota-se que a solução analítica com o modelo matemático é equivalente. As curvas começam a se afastar numa região longe da superfície (em torno de 35 mm) sendo muito superior a espessura do material que será analisado, pois a condição de contorno começa a influenciar a curva na região mais afastada. Para o modelo 1-D, fazendo a hipótese isotérmica conclui-se que é satisfatório esse resultado.

Neste capítulo foi detalhado o modelo matemático utilizado neste trabalho. Além do modelo em Matlab será utilizado o software Domus – Eletrobras para comparação, este sendo detalhado no Apêndice A ao final do trabalho. Os resultados a serem comparados são os obtidos pelo Matlab (duas isotermas de umidade) com Domus – Eletrobras (isoterma de umidade do próprio programa), e com os resultados experimentais realizados por Silva (2017) e Meissner (2008), todos para o mesmo material (madeira compensada).

3.5 REFINO DE MALHA

O modelo matemático utiliza as equações diferenciais parciais discretizadas, pelo método dos volumes finitos pela formulação explícita. Para a sua solução numérica é definida uma malha para valores com diferenças percentuais menores que 0,01% no refino no valor da massa específica de vapor, variando os valores de Δx e posteriormente para Δt. Os pontos escolhidos da placa de madeira são as posições x=4,5 mm e x=9,5 mm. Inicialmente para Δx são testados o número de nós para Δt=5 segundos. Após isto, escolhe-se um valor para Δt.

Para o refino de malha os parâmetros de simulação são: Umidade relativa inicial de todo material é de 50%, comprimento da placa de 15 mm, o passo de tempo de 5 segundos durante um ciclo de 24h, a umidade relativa do ar-úmido constante em 75%, meio isotérmico, coeficiente de transferência de massa h_m=2,75E-03 m/s, as propriedades do material conforme Osanyintola *et al.* (2006) (Conteúdo de umidade, permeabilidade ao vapor, massa específica do material seco).

Fixados estes dados, obedecendo o critério da diferença percentual entre as massas específicas de vapor variando Δx, é definido o número de nós em 150, pois a diferença percentual entre as massas específicas de vapor para 75 nós e 150 nós foi de 0,003%. Para visualização dos outros valores ver Tabela 3-3, Tabela 3-4 e Figura 3-7.

Posição [mm]	**ρ_v [kg/m^3] (15 nós)**	**ρ_v [kg/m^3] (75 nós)**	**ρ_v [kg/m^3] (150 nós)**
4,5	0,01314474	0,01314656	0,01314607
9,5	0,01138758	0,01138906	0,01138869

Tabela 3-3 Valores de ρ_v para posições x=4,5mm e x=9,5mm.

Posição [mm]	**Diferença [%] Entre 15 e 75 nós**	**Diferença [%] Entre 75 e 150 nós**
4,5	0,01388196	0,00373876
9,5	0,01297737	0,00321811

Tabela 3-4 Diferença percentual de ρ_v entre os números de nós.

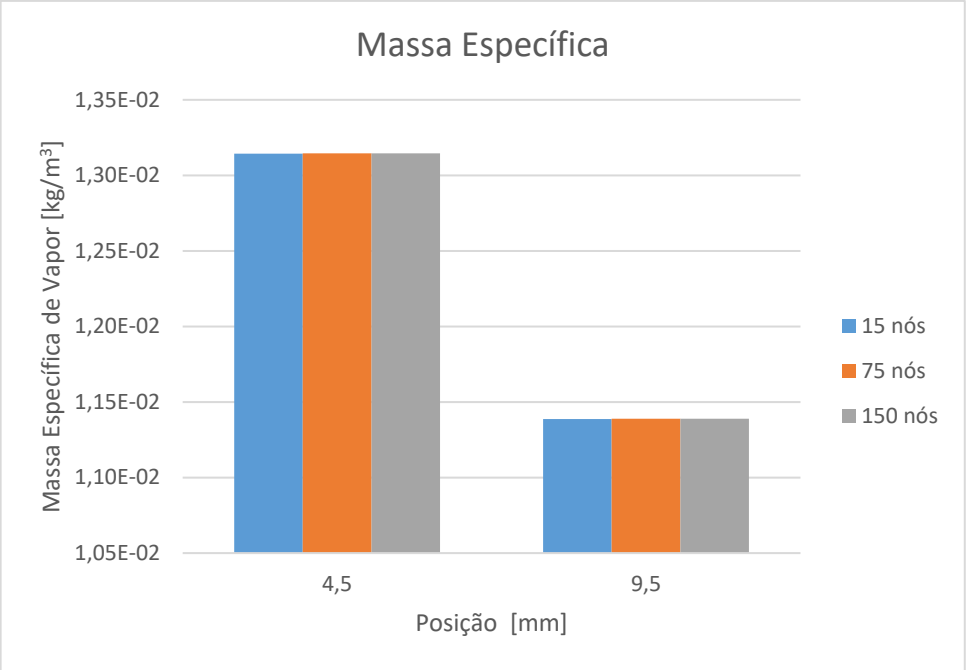

Figura 3-7 Massa específica do vapor nas posições de 4,5mm e 9,5mm (15, 75 e 150 nós).

Definida a malha em 150 nós, é testado valores de Δt, para diferença percentual menor que 0,01% na massa específica de vapor para os pontos 4,5mm e 9,5mm (pontos intermediários na placa). Os valores testados para Δt são: 1, 5, 10, 15 segundos. A diferença percentual entre 5 e 10 segundos foram menores que 0,01%, assim o refino de malha é definido para 150 nós ($\Delta x=10^{-4}$ m) e $\Delta t=5$ segundos. Outros valores são apresentados na Tabela 3-5, Tabela 3-6 e Figura 3-8.

Posição [mm]	**ρ_v [kg/m³] (Δt=1 seg)**	**ρ_v [kg/m³] (Δt=5 seg)**	**ρ_v [kg/m³] (Δt=10 seg)**	**ρ_v [kg/m³] (Δt=15 seg)**
4,5	0,01314604	0,01314607	0,01314611	0,01310542
9,5	0,01138868	0,01138869	0,01138871	0,01138299

Tabela 3-5 Valores da ρ_v para 150 nós.

Posição [mm]	**Diferença [%] Δt = [1 e 5 seg]**	**Diferença [%] Δt = [5 e 10 seg]**	**Diferença [%] Δt = [10 e 15 seg]**
4,5	0,00023962	0,00030047	0.31048606
9,5	0,00011415	0,00015366	0,05026361

Tabela 3-6 Diferenças percentuais da ρ_v para 150 nós e Δt=[1, 5, 10, 15 seg].

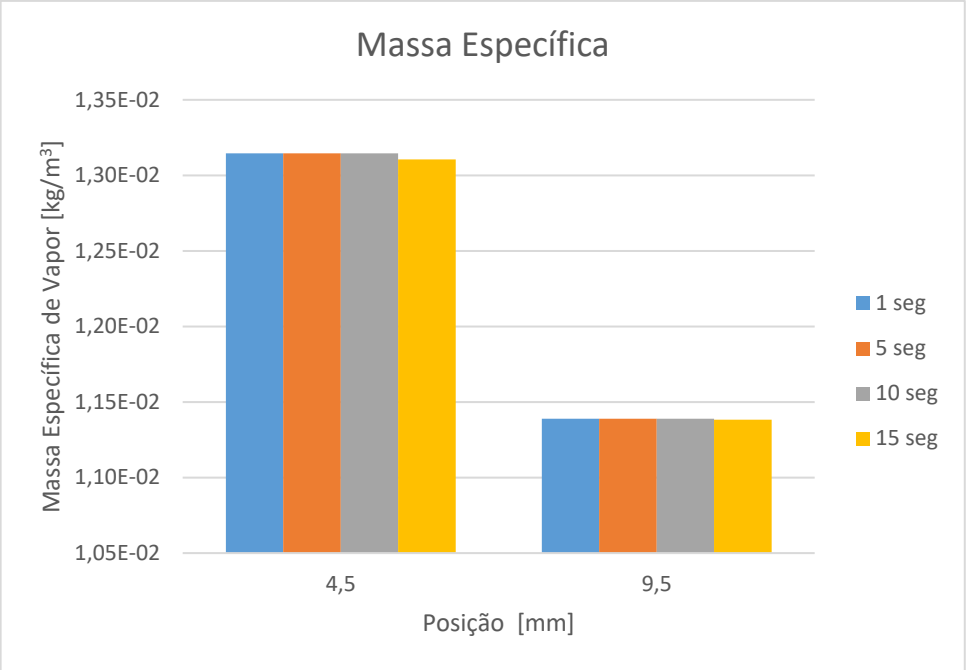

Figura 3-8 Massa específica do vapor nas posições de 4,5mm e 9,5mm (Δt=[1, 5, 10 e 15 seg]).

3.6 MODELOS NUMÉRICOS

Conforme descrito o modelo matemático no capítulo 3, o algoritmo foi implementado na plataforma Matlab R2015a. A cada iteração numérica as propriedades calculadas são armazenadas em arquivos txt. Dados como umidade relativa, permeabilidade, teor de umidade, massa específica de vapor entre outras são armazenadas. Além deste algoritmo utilizou-se o *software* Domus – Eletrobras para obter-se mais dados para análise.

O Domus - Eletrobras foi o primeiro *software* nacional de simulação higrotérmica e energética de edificações, com o objetivo de projetar ambientes climáticos mais eficientes e evitar o superdimensionamento de equipamentos e contribuir em projetos de habitação e climatização. Tendo como meta a redução no consumo de energia elétrica nas edificações. Integrando o programa UMIDUS, o Domus – Eletrobras é uma poderosa ferramenta para análise de transferência de umidade e calor para ambientes e materiais higroscópicos (Manual do Domus, 2012). Para este trabalho será utilizado o modelo 0 (zero simplificações). A Figura 3-9 mostra a interface do *software*.

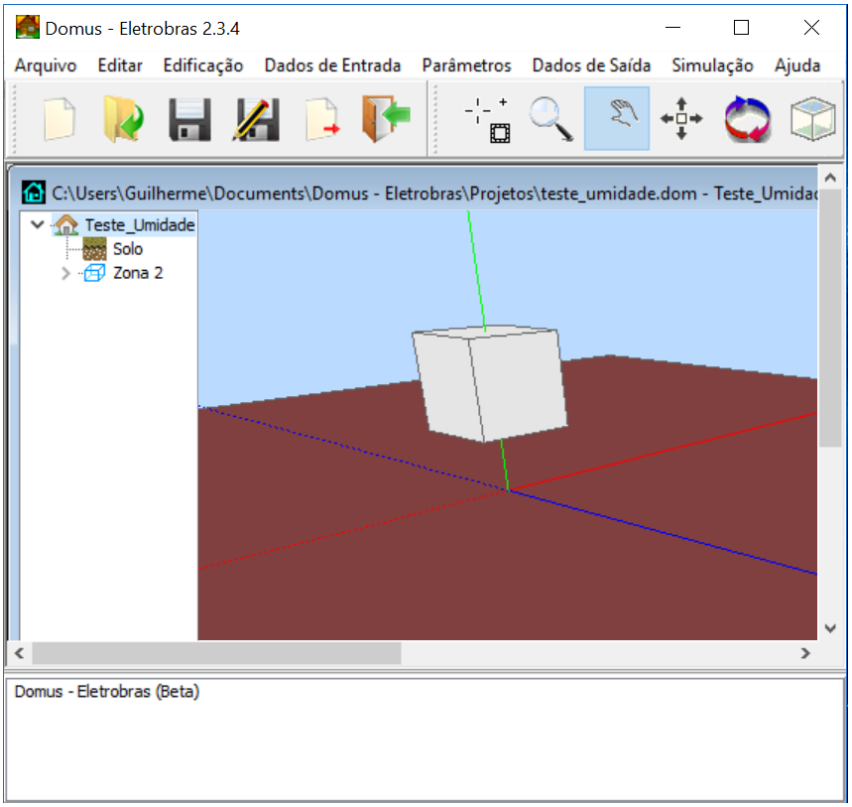

Figura 3-9 Modelo computacional do aparato criado por Meissner (2008).

É simulado uma caixa de madeira experimentalmente analisadas por Silva (2017), cujas dimensões são de 0,89 m x 0,89 m x 0,89 m, esta caixa está suspensa 0,50 m acima do piso, Fig. 3-9. Por mais que a célula-teste do aparato tenha uma dimensão maior (890 por 890 mm), a sua área exposta no seu interior é reduzida para (730 por 730 mm) por causa de sua fixação na estrutura, esta área está em contato com a estrutura de fixação das placas, então será simulado uma caixa cúbica com dimensões internas de 730 mm de comprimento 15 mm de espessura (configuração utilizada por Silva (2017)).

Simulações em Matlab: As simulações foram divididas em 4 modelos, todas com o passo de tempo de 5 segundos e 150 como número de nós (Δx = 0,1 mm).

- Modelo 1 – Isoterma de Osanyintola *et al*. (2006) com carga cíclica do Protocolo Nordtest (8h~75% de UR / 16h~33% de UR) para as condições iniciais de 33%, 50% e 75% de umidade relativa do material.
- Modelo 2 – Isoterma de Wu (2007) com carga cíclica do Protocolo Nordtest (8h~75% de UR / 16h~33% de UR) para as condições iniciais de 33%, 50% e 75% de umidade relativa do material.

- Modelo 3 – Isoterma de Osanyintola *et al.* (2006) com as cargas cíclicas medidas pelos sensores da caixa de madeira no experimento de Silva (2017) (sensor na entrada, sensor no centro e sensor na saída).
- Modelo 4 – Isoterma de Wu (2007) com as cargas cíclicas medidas pelos sensores da caixa de madeira no experimento de Silva (2017) (sensor na entrada, sensor no centro e sensor na saída).

Simulações em DOMUS – Eletrobras: As simulações foram divididas em 2 modelos, todas com o passo de tempo de 30 segundos e 300 como número de nós (Δx = 0,05 mm).

- Modelo 5 – Simulado a madeira compensada com os dados internos do programa do material com carga cíclica do Protocolo Nordtest (8h~75% de UR / 16h~33% de UR) para as condições iniciais de 33%, 50% e 75% de umidade relativa do material.
- Modelo 6 – Simulado a madeira compensada com os dados internos do programa do material com as cargas cíclicas medidas pelos sensores da caixa de madeira no experimento de Silva (2017) (sensor na entrada, sensor no centro e sensor na saída).

As diferenças entre os modelos acima escritos são a carga de umidade relativa, as isotermas de umidade e a plataforma de simulação, para o próximo capítulo (Resultados) eles serão referenciados como descritos na Tabela 3-7 para o fim de evitar de repetir no texto os parâmetros da simulação como a isoterma e as cargas de umidade.

Modelo	*TAG*	Plataforma Numérica	Isoterma	Carga de Umidade
Modelo 1	MOD1	Matlab	Osanyintola *et al.* (2006)	Protocolo NORDTEST
Modelo 2	MOD2	Matlab	Wu (2007)	Protocolo NORDTEST
Modelo 3	MOD3	Matlab	Osanyintola *et al.* (2006)	UR registradas pelos sensores do experimento de Silva (2017)
Modelo 4	MOD4	Matlab	Wu (2007)	UR registradas pelos sensores do experimento de Silva (2017)
Modelo 5	MOD5	Domus	Banco de dados do próprio *software.*	Protocolo NORDTEST
Modelo 6	MOD6	Domus	Banco de dados do próprio *software.*	UR registradas pelos sensores do experimento de Silva (2017)

Tabela 3-7 Modelos numéricos com seus respectivos *TAGs.*

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

4.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONSTANTES UTILIZADAS

Como a madeira não é composta 100% por celulose – possui ar e células lúmen - Osanyintola (2005) mediu a massa específica (ρ_0) de suas amostras de madeira compensada secas e obteve o valor de 445 ± 0,3 kg/m^3. São utilizados os valores obtidos por Osanyientola (2005), de 0,30 para a fração volumétrica das paredes das células da madeira compensada (ε_s) e 0,70 (ε_g) para a porosidade com ± 0,01 de incerteza.

O valor do coeficiente de transferência de calor por convecção interna é 3 W/(m^{2}K), sendo este utilizado como padrão no Domus – Eletrobras. No *software* este valor é obtido pela formulação apresentada por Alamdari e Hammond (1983), a qual se trata de uma correlação, em função da diferença de temperatura entre a superfície da parede e o ar externo à camada limite (Mendes, 1997). Mesmo utilizando a hipótese de problema isotérmico, este coeficiente é utilizado para obter o coeficiente h_m através da analogia das camadas limites, equação (2.16).

4.2 PROPRIEDADES DO MATERIAL

Para efeito de comparação entre os resultados das simulações (Seção 3 – Modelo Matemático) utiliza-se as isotermas de madeira compensada medidas por dois trabalhos independentes entre si. Basicamente o que é alterado nesta análise são as isotermas do conteúdo de umidade, permeabilidade e a massa específica do material seco. A Figura 4-1 apresenta as isotermas medidas em dois trabalhos independentes, realizados por Osanyintola *et al.* (2006), Wu (2007) e a isoterma utilizada no Domus - Eletrobras, sendo todos da madeira compensada.

Observa-se na Figura 4-1 que diferentes trabalhos da literatura possuem diferentes teores de umidade para a madeira compensada. Wu (2007) possui uma curva de maior magnitude e mais inclinada na região higroscópica, Osanyintola *et al.*

(2006) apresenta uma curva de menor magnitude e uma inclinação menor e mais constante na região higroscópica. Estes materiais possuem diferentes curvas porque são de origem distintas e ainda, talvez, com diferentes processos de fabricação.

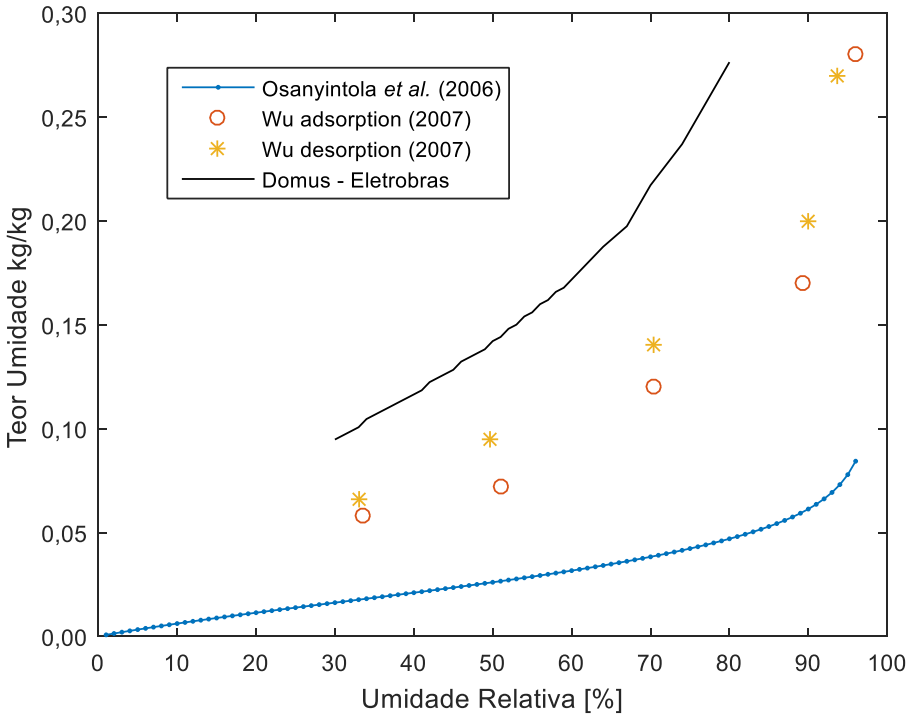

Figura 4-1 Isotermas do Teor de Umidade [kg/kg] em função da umidade relativa.

Osanyintola *et al.* (2006) fornece a equação do teor de umidade, equação 3.12. Como Wu (2007) fornece os pontos medidos será escolhido um ajuste para o teor de umidade e sua derivada, este ajuste é utilizado nas equações discretizadas no modelo matemático, a Figura 4-2 mostra o ajuste realizado.

Para obtenção dos valores da massa das simulações utilizando a isoterma de Wu (2007) será utilizado o ajuste cúbico e para a derivada do teor de umidade em função da umidade relativa será utilizado regressão linear para o intervalo de 30% a 90% de umidade relativa (equação 4.1), não foi considerado o último ponto pois a reta teria uma inclinação maior, e usando apenas os 4 pontos para a regressão linear a função se aproxima melhor aos pontos medidos. O uso da curva de interpolação não é recomendado pois a derivada nos pontos apresentariam fortes mudanças na inclinação e mudança de sinal:

$$y = 0{,}2066x - 0{,}0211 \tag{4.1}$$

Sendo y a regressão linear para o teor de umidade e x o valor da umidade relativa (em fração), fazendo sua derivada obtém-se a constante 0,2066 para todos os pontos. A Figura 4-3 apresenta a permeabilidade medida nesses dois trabalhos.

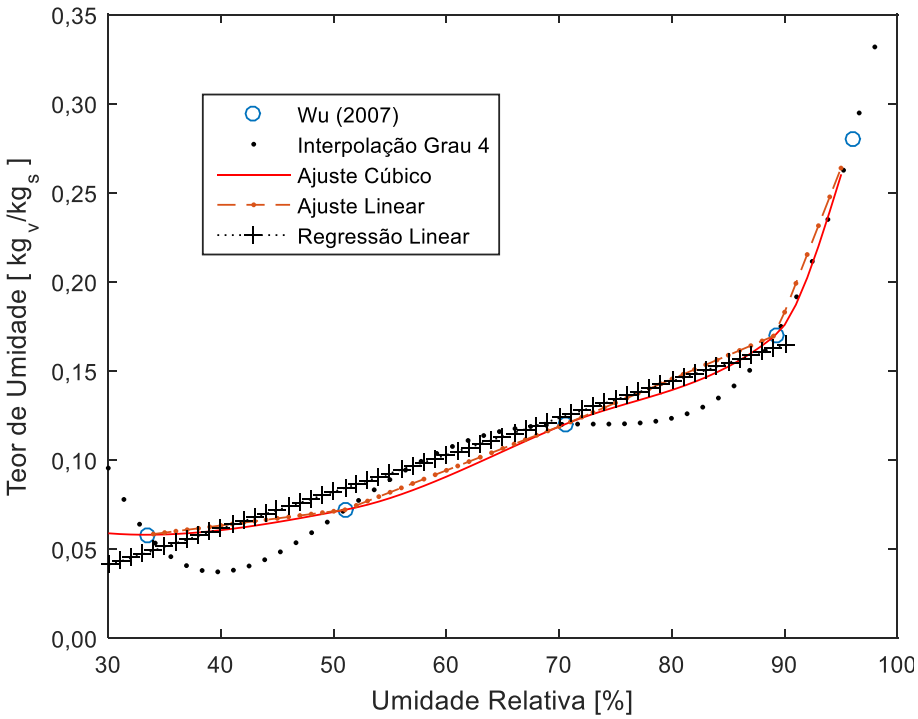

Figura 4-2 Ajustes propostos para a Isoterma de teor de umidade mássico de Wu (2007).

Osanyintola *et al.* (2006) em seu trabalho forneceram a função de ajuste calculada da permeabilidade, a equação 3.14. Para os cálculos utilizando a permeabilidade de Wu (2007) será escolhido o ajuste cúbico. Para as simulações do software Domus – Eletrobras (Apêndice A) será utilizado a própria biblioteca de dados (isotermas). A massa específica do material seco para as curvas de Osanyintola *et al.* (2006) é 445 kg/m^3, e 456 kg/m^3 para Wu (2007).

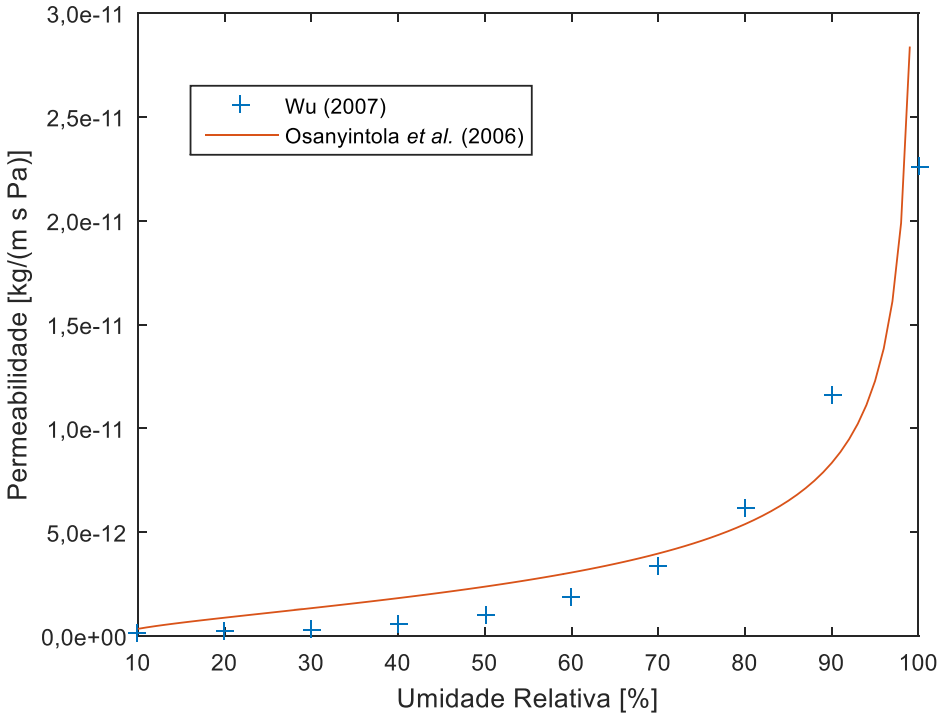

Figura 4-3 Permeabilidades da madeira compensada por Wu (2007) e Osanyintola *et al.* (2006).

4.3 COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO E DIFUSIVIDADE EFETIVA

Para a escolha da malha dos modelos 1 a 4 (Tabela 3-7) foi utilizado malhas com 150 (Δx=0,1mm) e 300 (Δx=0,05mm) nós, e os passos de tempo em 5, 10, 15, 30 segundos. Os coeficientes das equações discretizadas para o nó de i=1 são mais sensíveis, por causa da condição de contorno convectiva, para analisar isto é observado as variações desses coeficientes em função do parâmetro $\alpha_{m,eff}$, pois na superfície interna o valor de umidade relativa na parede se aproxima da condição de umidade do ar do escoamento. A Figura 4-4 apresenta o comparativo na escolha do refino da malha.

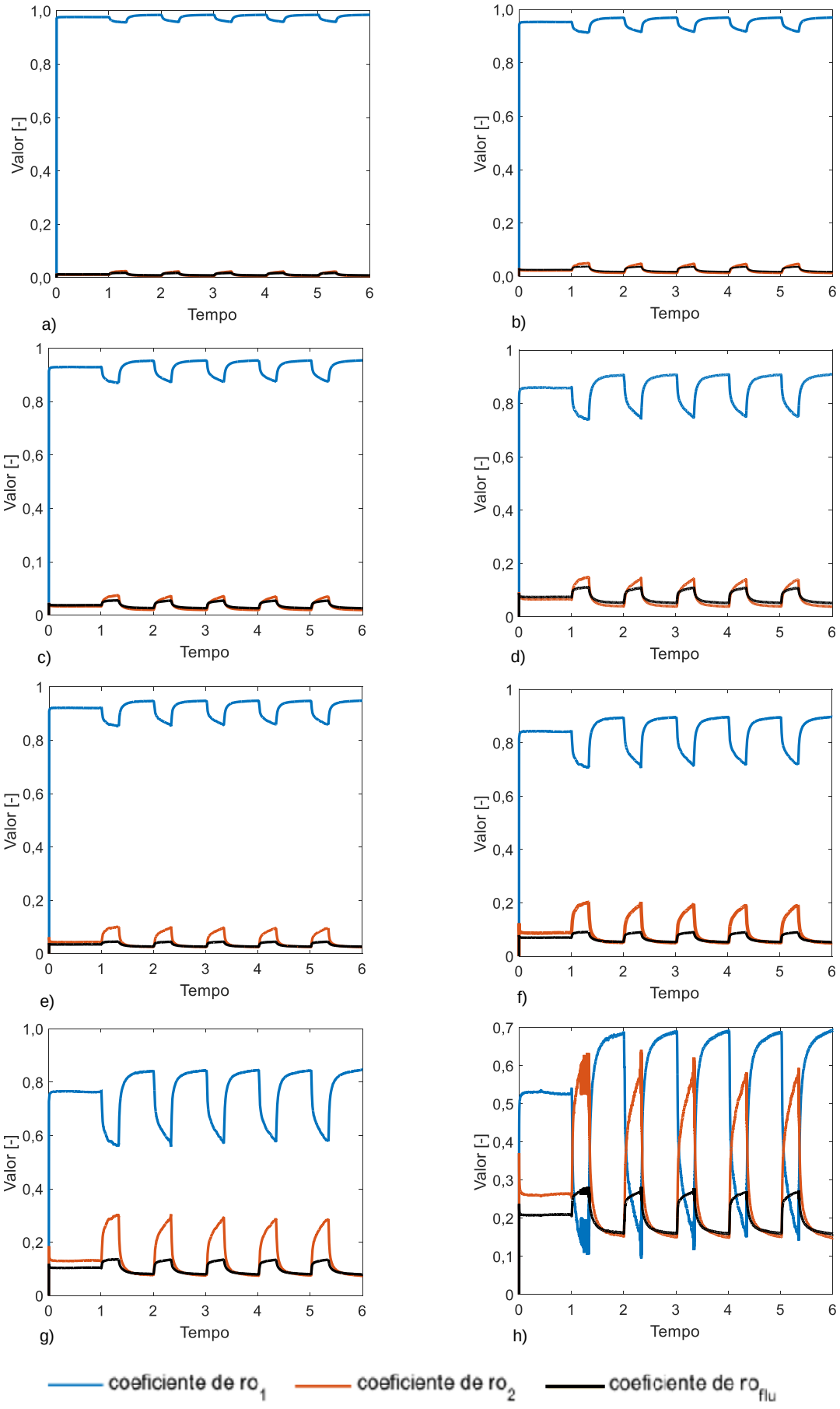

Figura 4-4 Modelo 4: Coeficientes da equação discretizada (nó: i=1), $UR_{inicial,material}$=50%. a) Δt = 5 seg 150 Nós. b) Δt = 10 seg 150 Nós. c) Δt = 15 seg 150 nós. d) Δt = 30 seg 150 nós. e) Δt = 5 seg 300 nós. f) Δt = 10 seg 300 nós. g) Δt = 15 seg 300 nós. h) Δt = 30 seg 300 nós.

Como o nó da fronteira interna (i=1) é muito sensível a mudança de umidade, será testado a positividade desses coeficientes. Foi comparado os coeficientes de todas as simulações com malhas de 150 nós e 300 nós para os passos de tempo de 5 seg, 10 seg, 15 seg, e 30 seg. A Figura 4-4 mostra que quanto maior for o passo de tempo, ocorre maior amplitude dos coeficientes da equação discretizada para i=1, e para a Figura 4-4h) observa-se que os coeficientes sofrem grande oscilação distorcendo os valores calculados pela simulação. Para algumas simulações dos modelos 1~4 estes coeficientes (equação 3.22) produziram valores negativos ocasionando instabilidade numérica, como o caso da Figura 4-5.

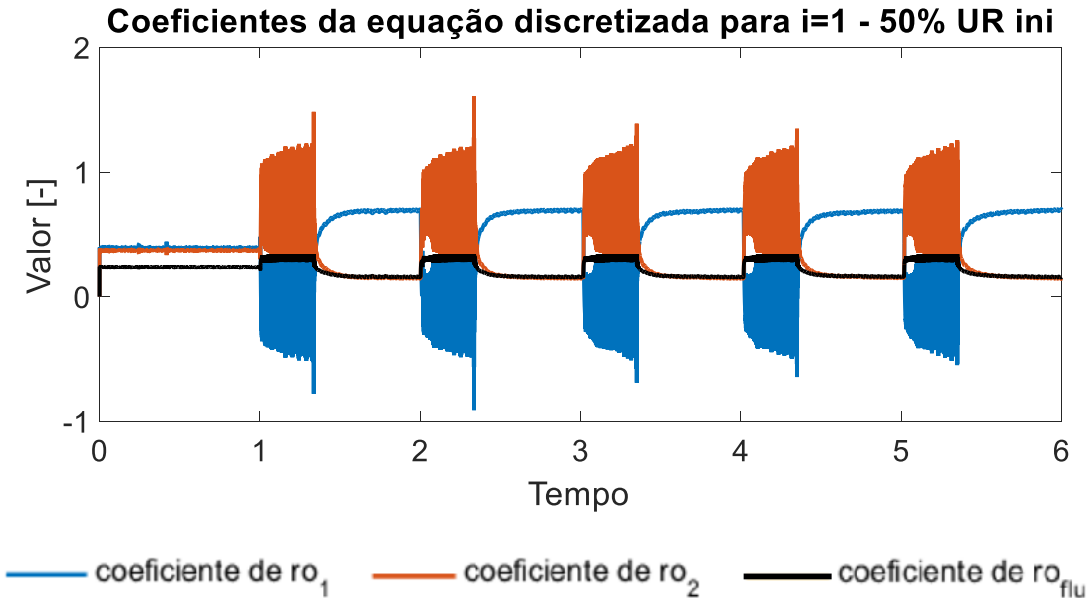

Figura 4-5 Modelo 4: Sensor da entrada, tempo 6 dias, 300 Nós, e passo de tempo de 30 seg.

Algumas simulações com o aumento de Δt os refinos de malha apresentaram comportamento semelhantes a Figura 4-5, e outras com resultados satisfatórios, para padronizar o refino de malha para os modelos 1~4 foi definido 150 nós e passo de tempo de 5 segundos. Os coeficientes da equação (3.22) são muito sensíveis ao refino de malha porque as propriedades são obtidas ponto-a-ponto em todas as iterações em função da umidade relativa (equações 3.10, 3.11 e 3.14), e o nó de i=1 possui a maior sensibilidade a variação de umidade relativa por causa da condição de contorno interna.

Os valores de D_{eff} e α_{eff} em função da umidade relativa são apresentados na Figura 4-6. Como a superfície interna da malha é muito sensível a mudança de umidade relativa, pode-se ver que os parâmetros de D_{eff} e $Alfa_{eff}$ influenciam

fortemente os coeficientes da equação discretizada para o nó de i=1, exigindo o cuidado na hora da escolha do refino de malha, pois estes parâmetros sofrem alterações consideráveis de valores conforme são realizadas as simulações.

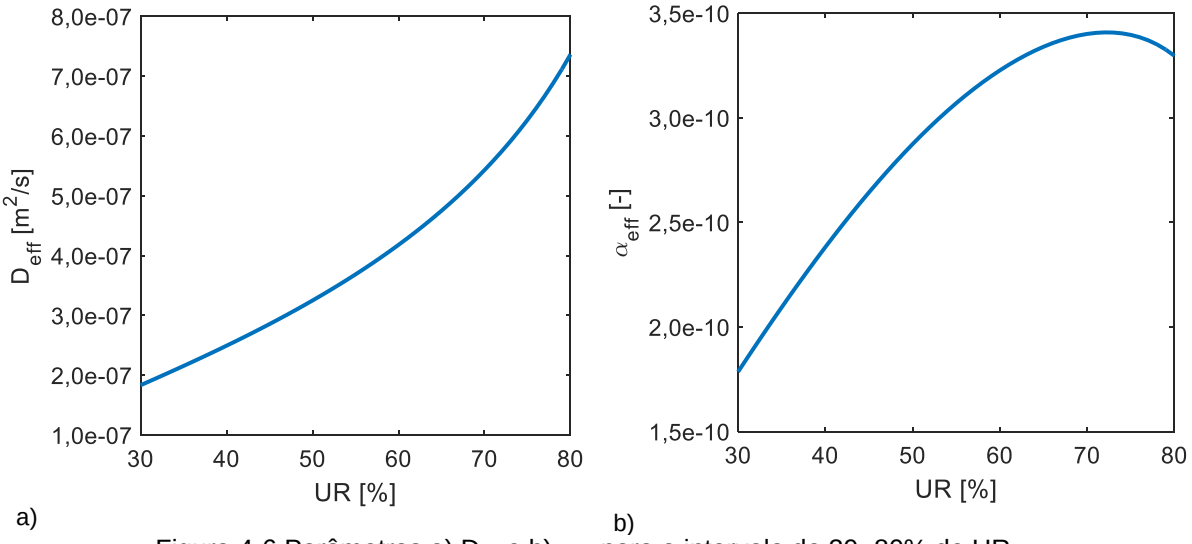

Figura 4-6 Parâmetros a) D_{eff} e b) α_{eff} para o intervalo de 30~80% de UR.

Para o refino de malha de 300 Nós e passo de tempo de 5 segundos algumas simulações ainda não apresentaram convergência nos resultados. Um problema visto ao se utilizar uma malha com grande refino foi a geração dos relatórios dos dados de simulação com tamanho de arquivo muito extenso para os modelos 1~4 (Tabela 3-7). Para convergência quanto maior o número de nós é necessário um menor passo de tempo. Por este motivo foi escolhido o refino de malha de 150 nós e 5 segundos para o passo de tempo, sendo que está malha obteve convergência para todas as simulações.

Os modelos 5~6 (Tabela 3-7) foram executados no Domus – Eletrobras, os resultados das simulações são: o tempo na simulação, temperatura, conteúdo volumétrico de umidade nó a nó em cada linha do relatório - todos num arquivo txt. Para o refino de malha de 300 nós e passo de tempo de 5 segundos, os dados dos relatórios ultrapassam o limite de linhas que um arquivo no formato txt suporta, por este motivo o refino de malha para os modelos executados no Domus – Eletrobras foi definido em 300 nós e passo de tempo de 30 segundos. Para gerar relatórios com refino de malha de 300 nós e passo de tempo de 5 segundos no Domus – Eletrobras é necessário salvar cada nó como um arquivo txt, e fazer toda a integração desses relatórios seria uma tarefa árdua.

4.4 UMIDADE RELATIVA

A umidade relativa registrada do escoamento do ar (carga cíclica) do aparato experimental (Silva, 2017) está ilustrado na Figura 4-7. Os sensores foram posicionados na entrada da Câmara, no centro e na saída.

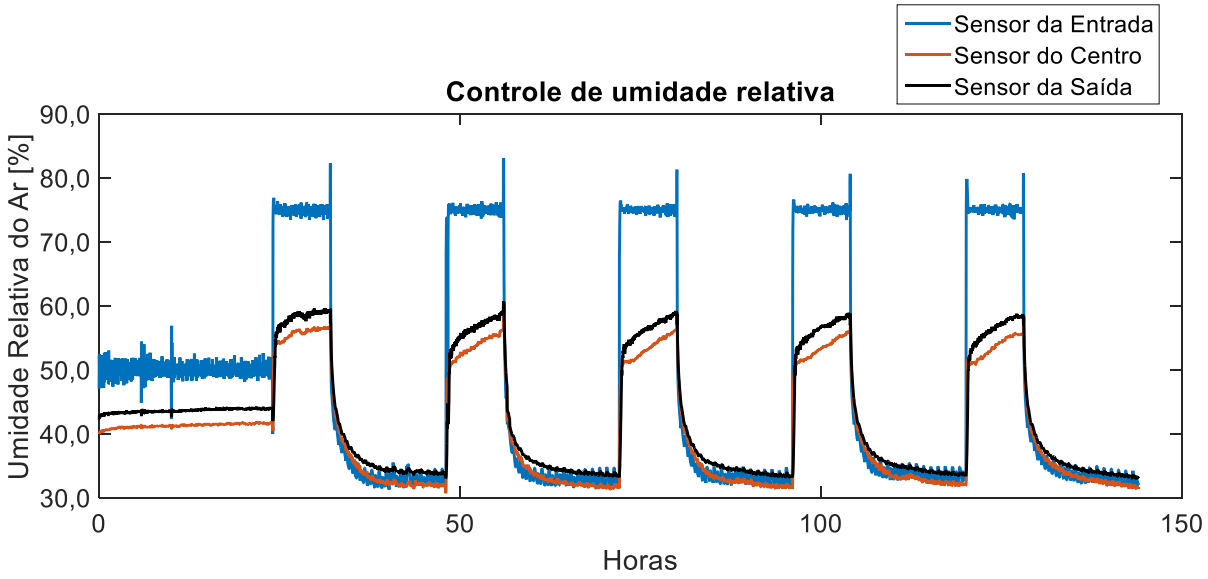

Figura 4-7 Controle de umidade relativa medida pelos sensores na entrada, centro e saída do aparato experimental (Silva, 2017).

Observa-se que o escoamento de ar tem alteração na umidade no avanço do tempo no experimento, pois os valores medidos pelos sensores na caixa de madeira são diferentes. No período de adsorção a umidade relativa registrada é maior na entrada da caixa, no centro um valor inferior, e na saída um valor inferior aos demais. Isto acontece porque a caixa está absorvendo a umidade do ar. No período de dessorção a umidade relativa registrada é menor na entrada da caixa, no centro um valor superior a entrada e na saída um valor superior aos dois. Isto acontece porque a caixa está liberando umidade ao ambiente.

Conforme descrito na seção 3.6, são simulados todos estes casos, a variação da umidade relativa no tempo proposto pelo protocolo Nordtest para as isotermas de Osanyintola *et al.* (2006), Wu (2007) e no Domus – Eletrobras; e são simuladas as umidades relativas registradas do experimento pelos 3 sensores para as isotermas de Osanyintola *et al.* (2006), Wu (2007) e no Domus – Eletrobras. Desta forma é possível comparar os resultados numéricos com as flutuações de umidade relativa no

experimento físico. A Figura 4-8 apresenta as amplitudes diárias de umidade relativa medida pelos sensores.

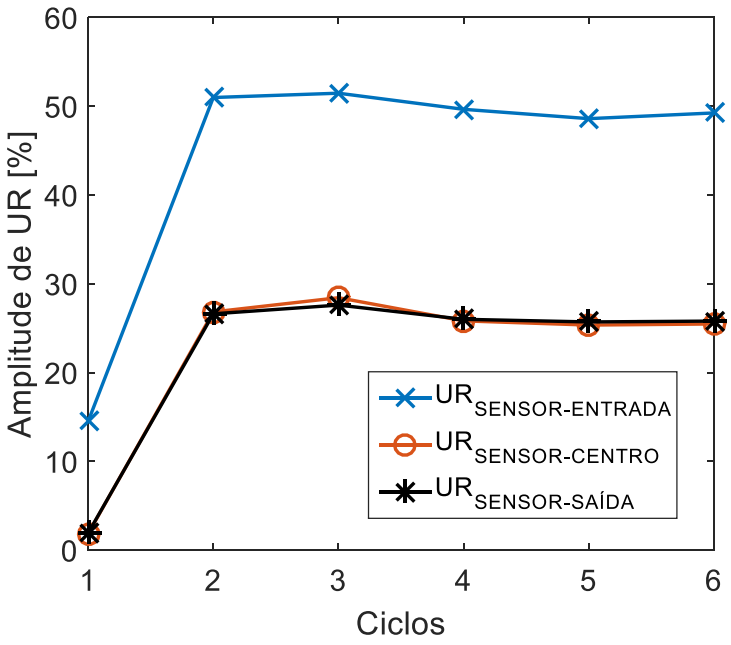

Figura 4-8 Amplitude da UR medida pelos sensores no experimento.

Pela Figura 4-7 observa-se que o primeiro ciclo é para estabilidade no experimento, ocorrendo pouca variação de umidade relativa no interior da célula-teste. Para os ciclos seguintes ocorre maior amplitude de umidade sendo que o sensor da entrada mediu as maiores amplitudes (ar vindo da câmara de controle de temperatura e umidade), já os outros dois sensores (centro, saída) apresentaram quase a metade do valor de amplitude (ar dentro da célula-teste interagindo com as placas de madeira). Na seção 4.7 será observado como este fenômeno influencia o valor do MBV.

4.5 MASSA DE VAPOR

A Figura 4-9 apresenta a massa da célula-teste do experimento (Silva, 2017) e a umidade relativa do ar fornecido (carga de umidade), observa-se que o aumento e diminuição de massa acompanha a carga de umidade. Também é observado a flutuação de umidade no primeiro ciclo, onde a umidade programada no aparato está fixa em 50%, mas a massa do sistema se altera. A partir do 4 ciclo o sistema se estabiliza.

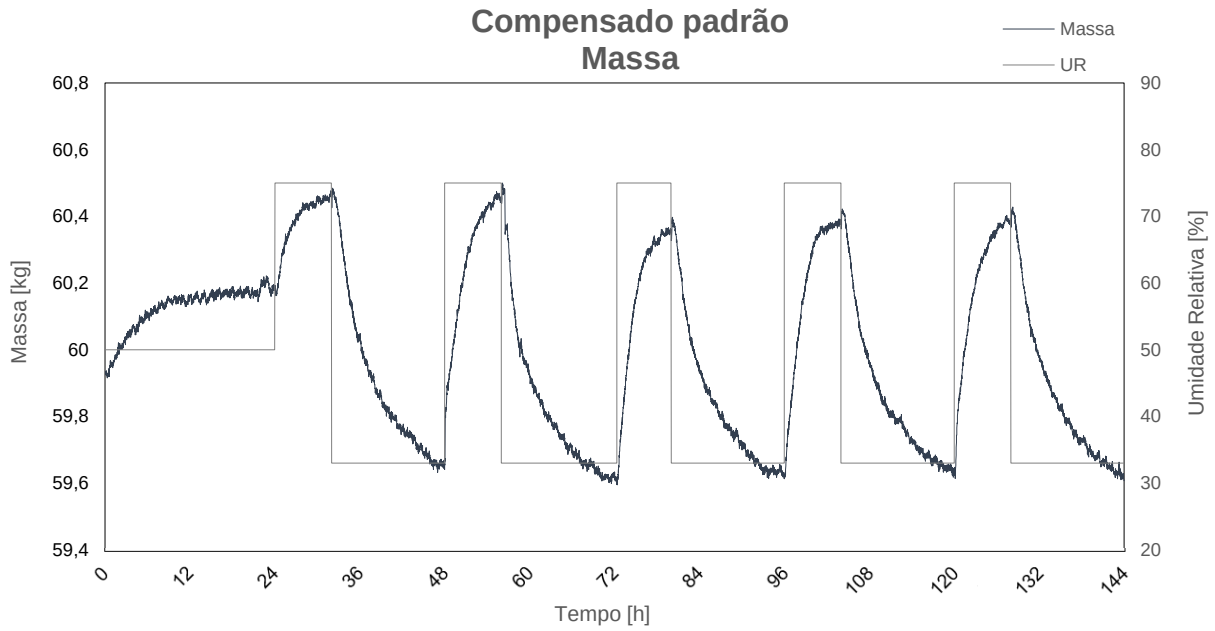

Figura 4-9 Massa da célula-teste do aparato experimental (Silva, 2017).

Realizando as simulações para os modelos de 1 a 6 (Tabela 3-7) para a próxima análise. A Figura 4-10 apresenta a massa de vapor por área de material utilizando a variação de umidade relativa no tempo proposto pelo protocolo NORDTEST, para as condições iniciais de UR 33%, 50% e 75% para a madeira compensada, para os modelos matemáticos. As diferentes curvas representam a simulação utilizando a UR proposto pelo protocolo Nordtest.

A Figura 4-10a) apresenta o resultado numérico obtido da massa de vapor por área, para as três condições de umidade relativa inicial do material. Pode-se observar que a curva de umidade presente no material tende a entrar em equilíbrio, na condição de baixa umidade relativa inicial (33%) e alta umidade relativa inicial (75%), as curvas de umidade tende a se estabilizar próxima a curva de UR inicial de 50%. Como nesta simulação foi utilizada as isotermas de Osanyintola *et al.* (2006) o material acumula pouca umidade tendo mais facilidade em entrar em equilíbrio de conteúdo de umidade. A Figura 4-10b) mostra a variação da massa de vapor por área de material utilizando as isotermas de Wu (2007). Para as 3 condições de umidade relativa inicial o sistema também tende a entrar em equilíbrio, mas agora para tempos maiores. A Figura 4-10c) mostra a variação da massa de vapor por área de material para as isotermas do Domus - Eletrobras sendo a isoterma de umidade é superior as outras, observa-se que o sistema tende a entrar em estabilidade com a umidade, mas de uma maneira mais lenta que as outras isotermas.

A Figura 4-11 apresenta as curvas da massa de vapor por área utilizando as umidades relativas dos sensores do experimento (ar úmido) com UR inicial do material em 50% para os modelos matemáticos com as isotermas de Osanyintola *et al.* (2006), Wu (2007) e Domus – Eletrobras. As curvas foram obtidas utilizando as umidades registradas pelos sensores do experimento, ou seja, a umidade relativa do ar medida experimentalmente.

Na Figura 4-11a) utilizou-se a isoterma de Osanyintola *et al.* (2006), a massa de vapor por área de material para a umidade relativa do sensor de entrada se aproxima do protocolo, pois este ar-úmido não sofreu interferência da madeira e está curva se assemelha a curva da Figura 4-10a) para a UR inicial do material em 50%. As curvas de massa de vapor simulados pela UR dos sensores do centro e saída apresentaram um resultado diferente em comparação ao sensor de entrada, pois se observa na Figura 4-7, para o resultado experimental é facilmente verificado que a amplitude de umidade relativa do ar é inferior para os sensores do centro e saída, influenciando na transferência de massa na parede. Este mesmo comportamento é observado quando se utiliza a isoterma de Wu e de Domus respectivamente, Figuras 4-11b) e 4-11c). Também se verifica que a massa de vapor para a umidade relativa do sensor de entrada se comporta de maneira equivalente a carga de umidade relativa proposta pelo protocolo NORDTEST, pois conforme citado acima, este sensor não sofreu interferência do material testado, e para os sensores do centro e saída o perfil de massa de vapor é diferente.

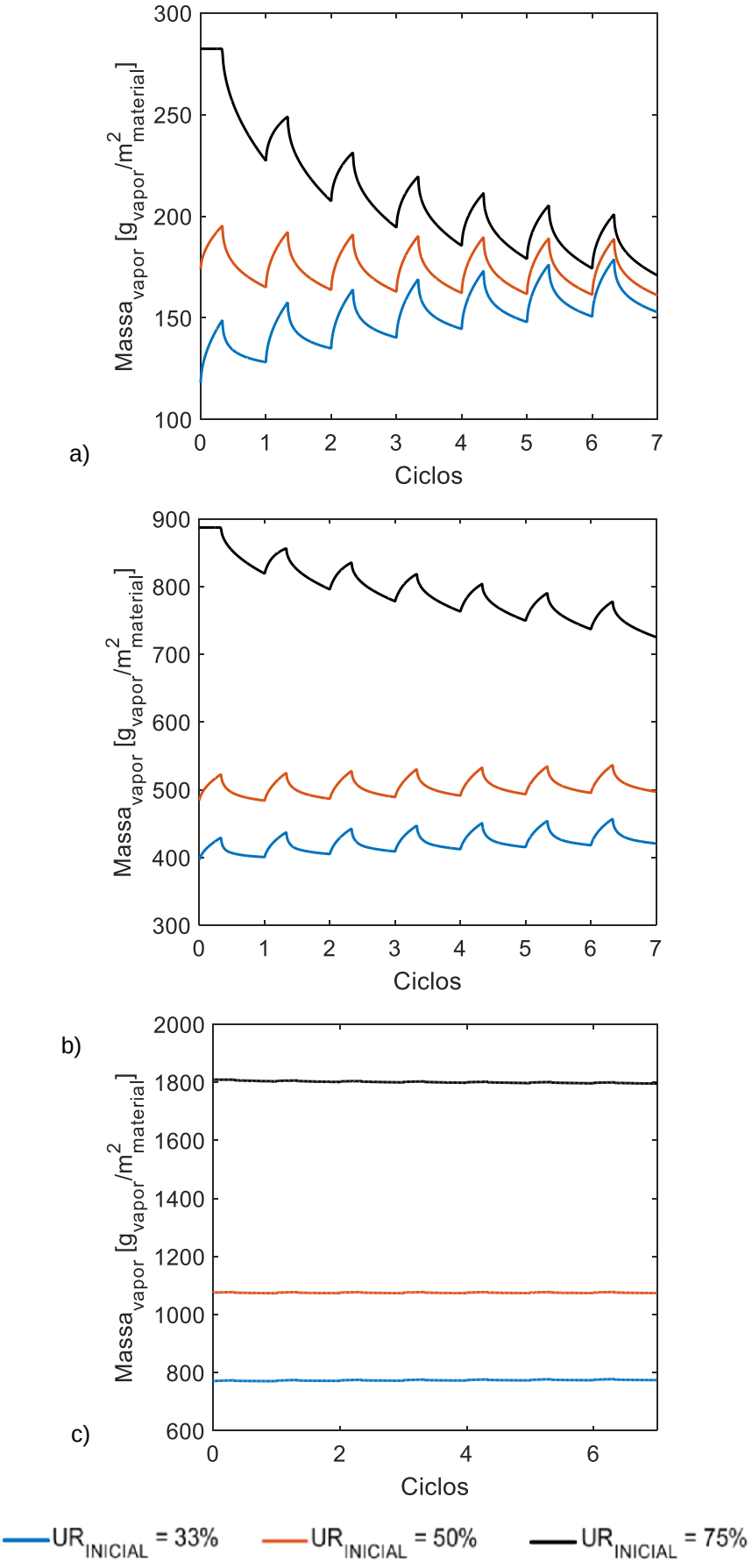

Figura 4-10 Massa de vapor. a) MOD1. b) MOD3. c) MOD5.

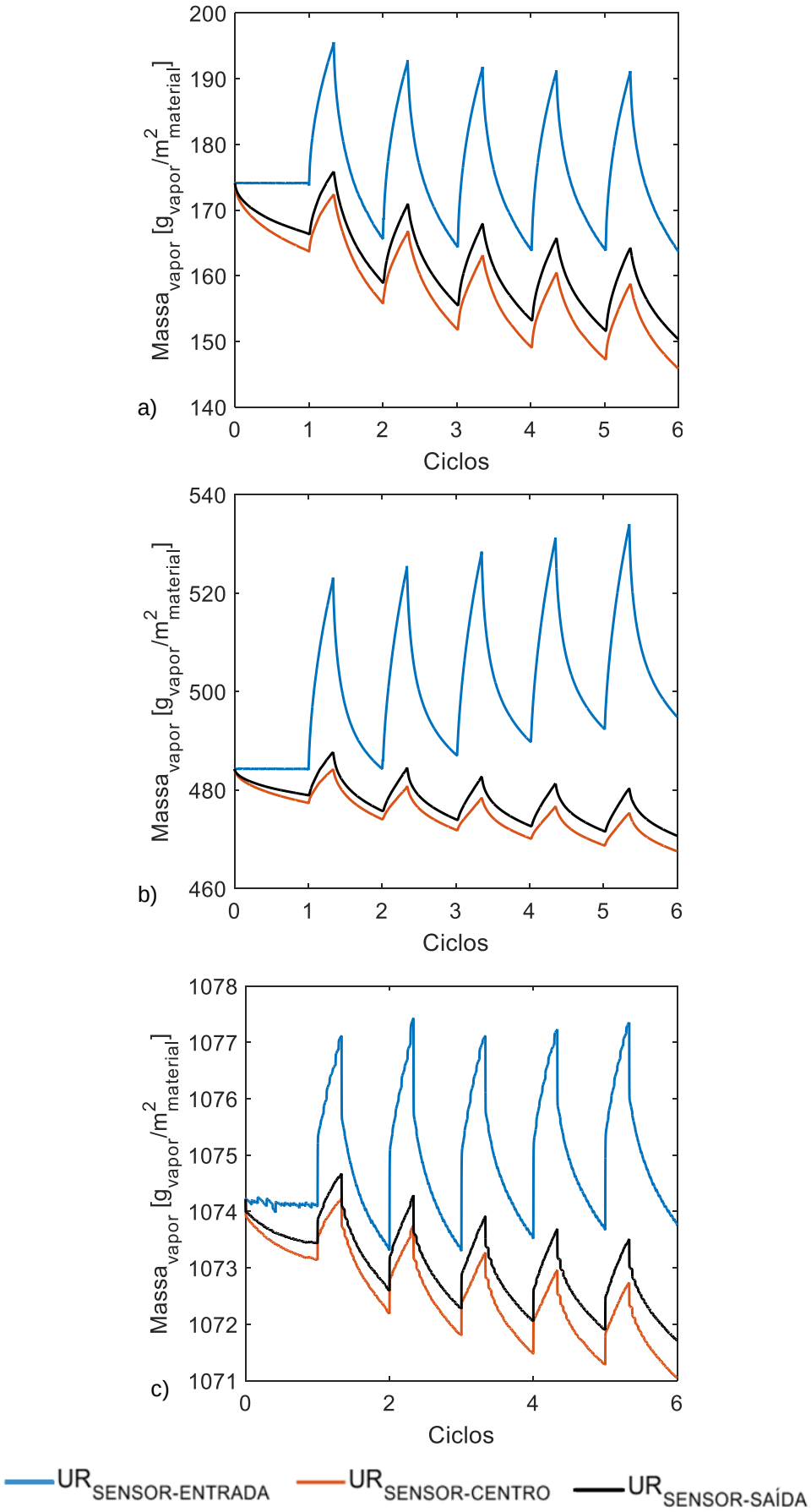

Figura 4-11 Massa de vapor. a) MOD2. b) MOD4. c) MOD6.

4.6 SORÇÃO

Esta seção discute a sorção de vapor na madeira, ou seja, a massa de vapor que o material adsorveu (absorveu), dessorveu (liberou) e a média entre elas para o ciclo de ensaio de 24h. Primeiramente será exposto os resultados experimentais (Figura 4-12), em seguida para os modelos (Tabela 3-7) MOD1, MOD3, MOD5 - Figura 4-13 - e por último para os modelos MOD2, MOD4, e MOD6 mostrados na Figura 4-14.

A Figura 4-12 apresenta a sorção de vapor da madeira compensada no experimento realizado por Silva (2017) para os 3 últimos ciclos de medições, verificando que as médias de sorção em cada ciclo tendem a se estabilizar para uma diferença percentual menor que 5%. Os valores esperados são que a adsorção e dessorção alcancem o mesmo valor, porém para o último ciclo aumentou a amplitude da adsorção e dessorção, este efeito foi causado pela instabilidade do controle de temperatura e umidade dos equipamentos. Assim mesmo este resultado é satisfatório pois utiliza-se a média da sorção para efetuar o cálculo do MBV e a cada ciclo a diferença percentual atinge um valor menor que o anterior.

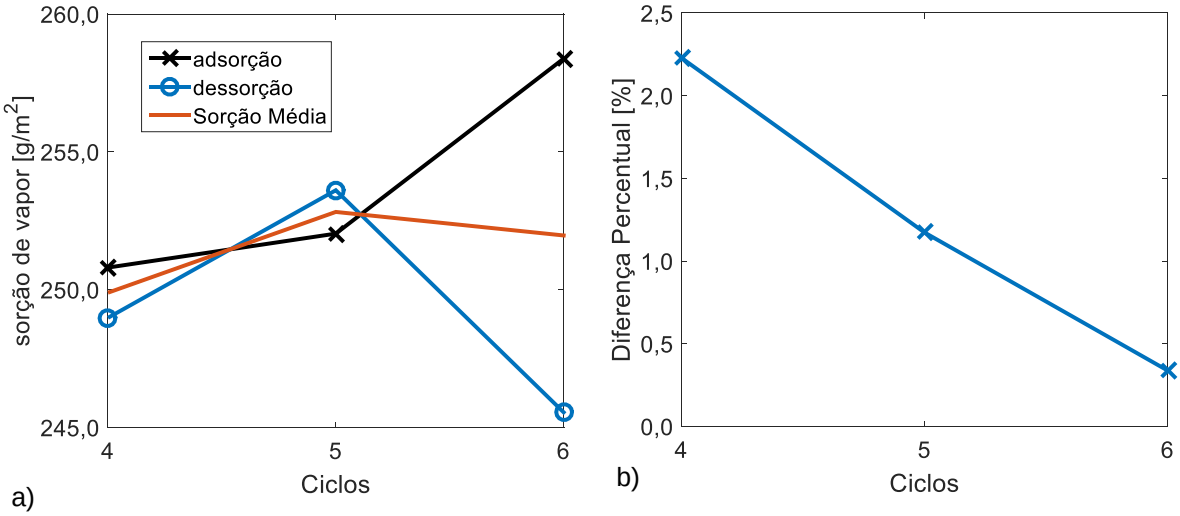

Figura 4-12 a) Sorção de Vapor experimental da madeira compensada. b) Diferença Percentual da Sorção Média (Silva, 2017).

A Figura 4-13a) retrata a isoterma de Osanyintola *et al.* (2006) e mostra que para todas as curvas de sorção tendem a se estabilizar em 28 g/(m^2 dia), mesmo que a umidade relativa do material esteja baixa, média e alta. O material com condição seco tem a maior adsorção e menor dessorção no início. O material mais úmido tem

a maior dessorção e menor adsorção no início. Sendo estes resultados coerentes com o problema. A Figura 4-13b) mostra o mesmo perfil de comportamento das curvas para a isoterma de Wu (2007), porém as curvas tendem a se estabilizar no valor de 40 g/(m^2 dia). A Figura 4-13c) mostra as curvas de sorção de umidade para a isoterma de Domus – Eletrobras, também apresentando uma tendência do sistema a entrar em estabilidade, mas se aproximando para uma sorção no valor de 3,75 g/(m^2 dia). Para as 3 isotermas de umidade a variação de umidade relativa no dia é de 42%, conforme definido pelo protocolo NORDTEST. Cada modelo citado acima (da Tabela 3-7) possui as propriedades de umidade diferentes para a madeira compensada, isto causou diferentes valores de Sorção pois a permeabilidade de cada modelo é diferente.

A Figura 4-14 relata a sorção de umidade simuladas para as UR medidas pelos 3 sensores do experimento para as 3 isotermas. A Figura 4-14a) mostra a isoterma de Osanyintola *et al.* (2006), cada sensor mede uma amplitude de umidade diferente como já foi citado, para o sensor de entrada que possui uma amplitude de umidade relativa na faixa de 49,25% apresenta um maior valor de sorção comparado as sorções de umidade dos sensores do centro e saída, que tem uma amplitude na faixa de 25,6%. A sorção de umidade para o sensor de entrada tende a se estabilizar com um valor de 27,4 g/(m^2 dia), o sensor do centro tende a se estabilizar em 12,2 g/(m^{2}dia), e o sensor de saída tende a se estabilizar em 13,2 g/(m^2 dia).

A Figura 4-14b) exibe a sorção de umidade para cada sensor para a isoterma de Wu (2007). A sorção de umidade para o sensor de entrada tende a se estabilizar com o valor de 42,9 g/(m^2 dia), para o sensor do centro tende a se estabilizar em 7,2 g/(m^2 dia), e para o sensor de saída tende a se estabilizar em 9,1 g/(m^2 dia).

A Figura 4-14c) apresenta a sorção de umidade para cada sensor para a isoterma de Domus – Eletrobras. A sorção de umidade para o sensor de entrada tende a se estabilizar com o valor de 3,6 g/(m^2 dia), para o sensor do centro tende a se estabilizar em 1,6 g/(m^2 dia), e para o sensor de saída tende a se estabilizar em 1,7 g/(m^2 dia).

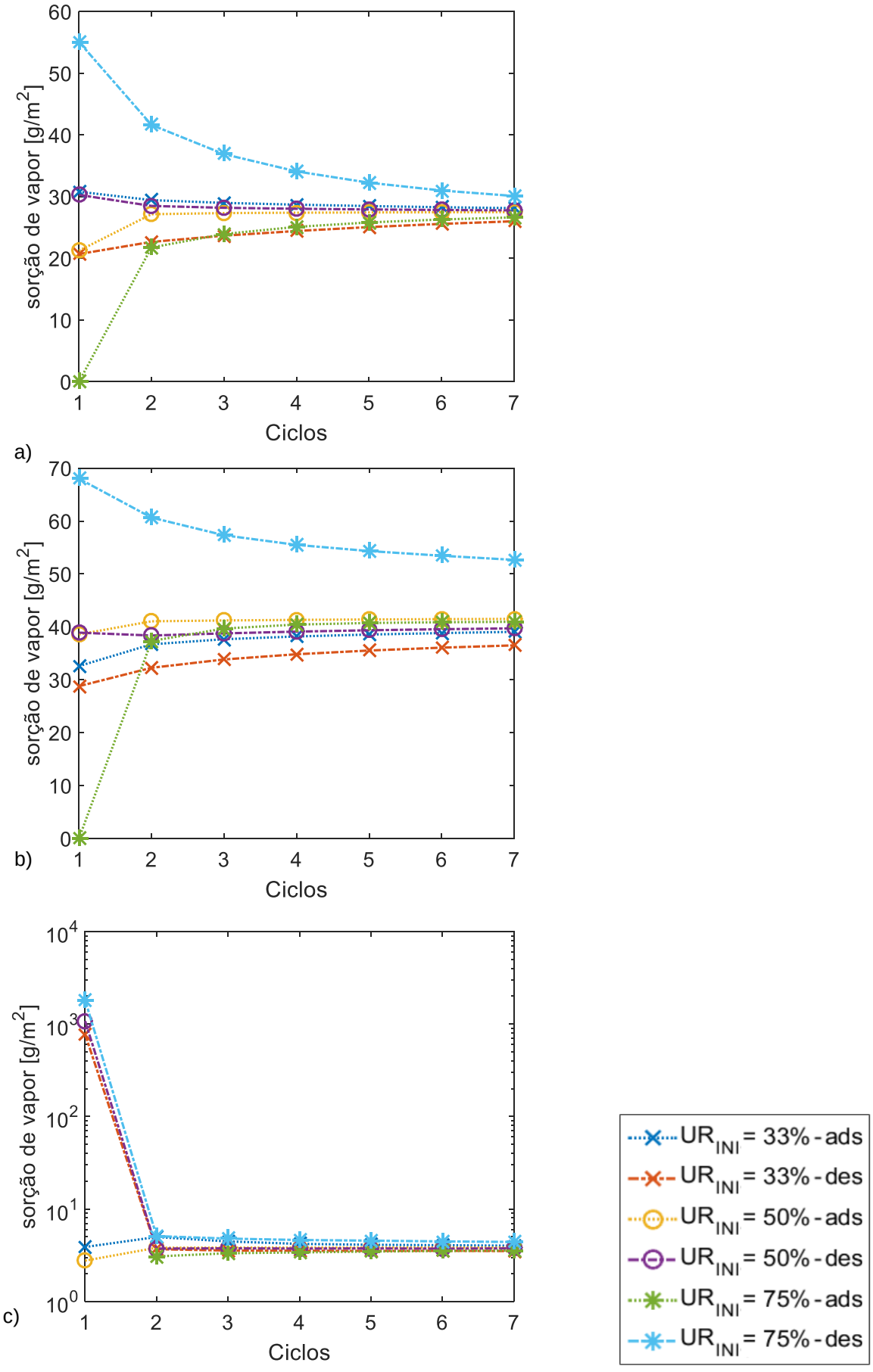

Figura 4-13 Sorção de Vapor. a) MOD1. b) MOD3. c) MOD5.

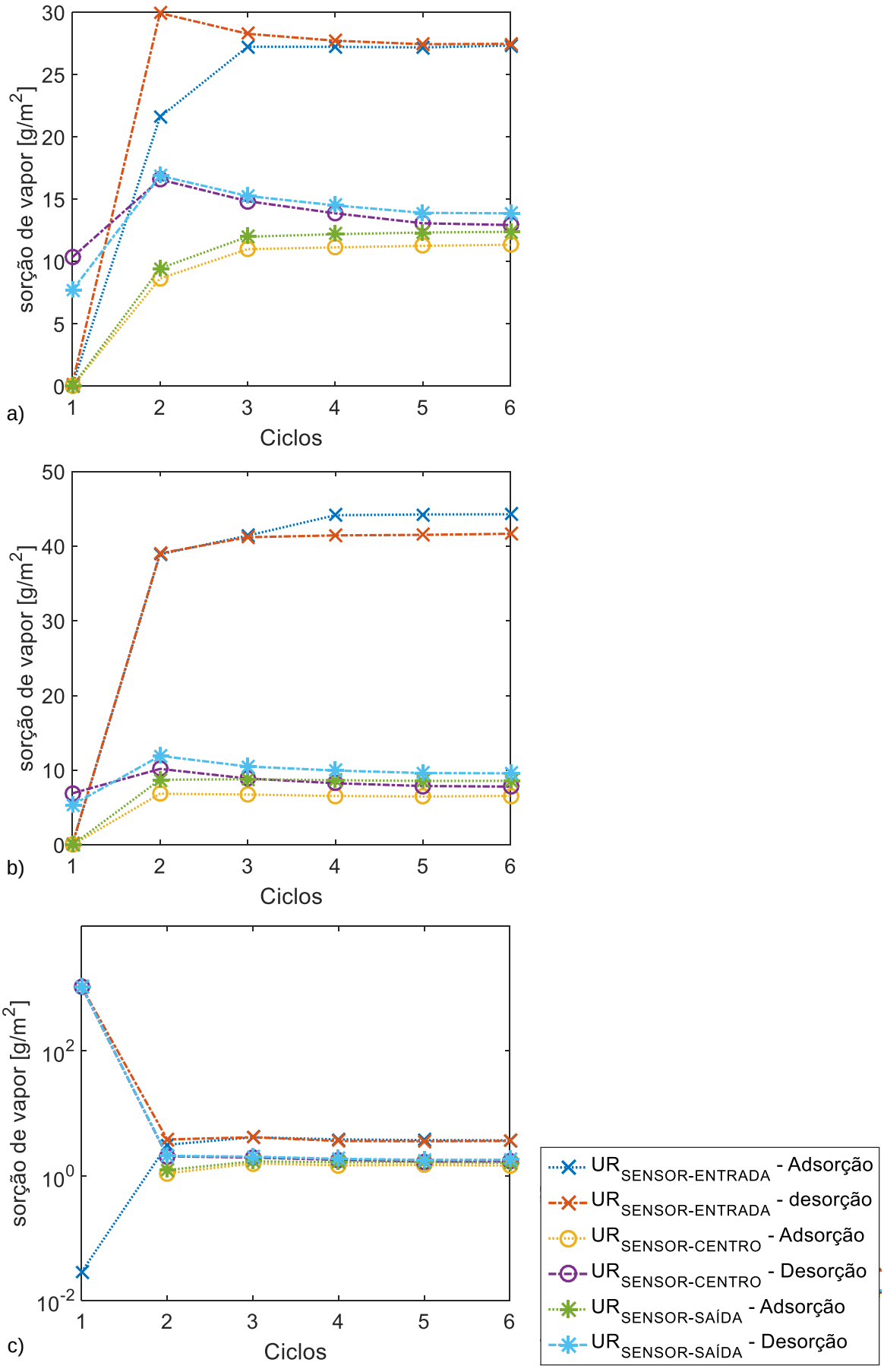

Figura 4-14 Sorção de Vapor. a) MOD2. b) MOD4. c) MOD6.

Para o último ciclo a sorção média do resultado experimental foi de 252,0 g/(m^2) e a média da variação da UR foi de 33,5%. Sendo este valor o maior encontrado neste trabalho.

Agrupando os dados da média da sorção entre a adsorção e dessorção no último ciclo para os modelos que utilizam a variação de umidade proposto pelo protocolo NORDTEST na Tabela 4-1. Das 3 isotermas, a de Wu (2007) apresenta a maior sorção e a do Domus – Eletrobras valores menores. As simulações para Osanyintola *et al.* (2006) é constatado menor tempo para o sistema entrar em equilíbrio, para Wu (2007) por mais que tenha os maiores valores de Sorção não é a isoterma que possui o menor tempo para que o sistema entre em equilíbrio de umidade pois este material armazena mais umidade em comparação com Osanyintola *et al.* (2006). O material para Domus – Eletrobras precisa de um longo tempo para entrar em equilíbrio de umidade, este além de ter a menor sorção ele suporta maior quantidade de umidade entre todos os materiais.

UR$_{inicial}$	**MOD1**	**MOD3**	**MOD5**
	Sorção Média g/(m^2)		
33%	27,1	37,8	3,8
50%	27,6	40,6	3,8
75%	28,4	46,8	4,0
Média	27,7	41,7	3,9

Tabela 4-1 Média de Sorção para o último ciclo para os modelos MOD1, MOD3, MOD5.

Reunindo os dados da média da sorção entre a adsorção e dessorção no último ciclo para os modelos que utilizam a variação de umidade medidos pelos sensores no experimento físico na Tabela 4-2. Cada sensor mediu uma amplitude de UR, e comparando esta amplitude com a sorção média calculada pela umidade registrada pelo respectivo sensor, observa-se que quanto maior a variação da umidade relativa do ar do escoamento, maior é a média de sorção do material. Ou seja, quanto maior a diferença entre a umidade relativa na superfície exposta do material com a UR do ar, maior será o gradiente de umidade causando maior sorção ao sistema.

Sensor	Variação UR - último Ciclo	MOD2	MOD4	MOD6
	∆%UR	Sorção Média g/(m^2)		
Entrada	49,2%	27,4	43,0	3,6
Centro	25,5%	12,1	7,2	1,6
Saída	25,8%	13,1	9,1	1,7
Média	33,5%	17,1	19,4	2,3

Tabela 4-2 Média de Sorção para o último ciclo para os modelos MOD2, MOD4, MOD6.

A Figura 4-15 expressa a variação de sorção média em função da variação de umidade relativa no ciclo. Os pontos utilizados neste gráfico são a média dos 3 valores de sorção média para as umidades relativas iniciais do material em 33%, 50% e 75% (Protocolo), a sorção média dos três sensores do experimento e a média dos três sensores, para as isotermas de Osanyintola *et al.* (2006), Wu (2007) e Domus – Eletrobras. Observa-se que a relação entre sorção e variação de umidade relativa no ciclo não é linear, mas aumentando-se a variação de UR do ar do escoamento no ciclo, também aumenta a sorção média.

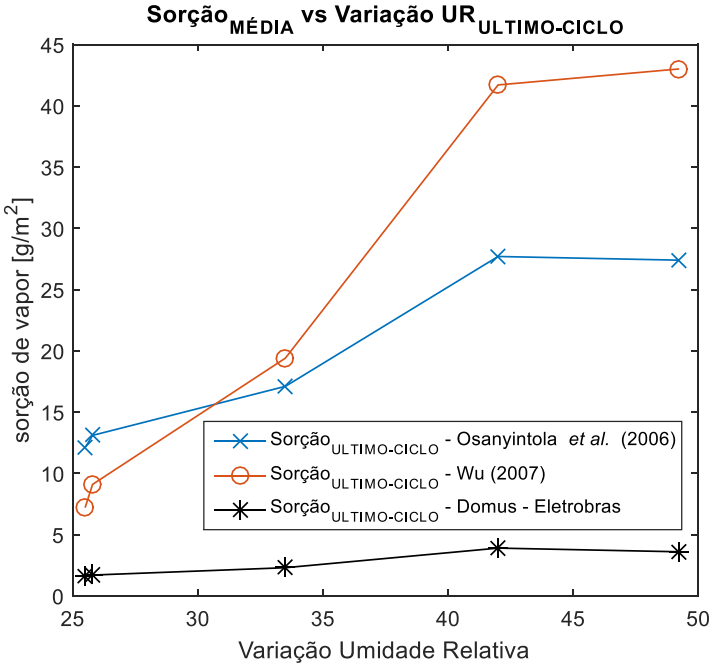

Figura 4-15 Variação de sorção média em função da variação de umidade relativa para o último ciclo.

Fazendo a última análise sobre sorção (Tabela 4-3), avalia-se a razão entre a média de sorção entre as UR entre 3 sensores com a sorção média obtida com a

variação da umidade no tempo proposto pelo protocolo NORDTEST (com 50% $UR_{inicial}$ do material).

ISOTERMA DE UMIDADE	$\frac{SORÇÃO_{MÉDIA\_3\_sensores,ULTIMO-CICLO}}{SORÇÃO_{PROTOCOLO(50\%UR_{INI})}}$
Osanyintola *et al.* (2006)	61,9%
Wu (2007)	47,8%
Domus – Eletrobras	60,5%

Tabela 4-3 Razão entre a sorção média dos 3 sensores com a sorção obtida pelo protocolo NORDTEST, utilizadas nas simulações numéricas.

Comparando os valores da Tabela 4-3, constata-se que a sorção obtida pelos valores da umidade relativa registrada no experimento, é inferior a sorção obtida pelas umidades relativas proposto pelo protocolo NORDTEST. Reforçando a ideia de que a parede do envoltório influencia o ar úmido, conforme discutido na seção 4.4, ou seja, todo material presente no ambiente causa perturbação na umidade do ar, alterando o equilíbrio de sorção do material. Os modelos matemáticos propostos consideram que toda umidade relativa no ar úmido seja constante e uniforme em todo espaço, assim, pelo protocolo NORDTEST a umidade relativa do ar fica em 75% por 8 horas seguidas e depois 33% por 16 horas seguidas, comparando os resultados com a carga de umidade medida pelos sensores observa-se redução na sorção média.

Comparando a razão da sorção experimental com a sorção do protocolo NORDTEST pela isoterma de Osanyintola *et al.* (2006) proposto neste modelo matemático obteve-se um valor 913% maior.

4.7 MBV

Os valores de MBV foram obtidos a partir da equação 2.35, tanto para os resultados experimentais quanto para os numéricos, pela média de sorção de vapor nos 3 últimos ciclos. Os valores experimentais do MBV estão expressos na Figura 4-16. Ela apresenta o MBV medido experimentalmente com um valor aproximadamente de 6,0 [g/(m^2 Δ%UR)]. Comparando este resultado com a classificação do MBV do material, apresentado por Rode (2005) na Figura 2.18, este material é altamente higroscópico.

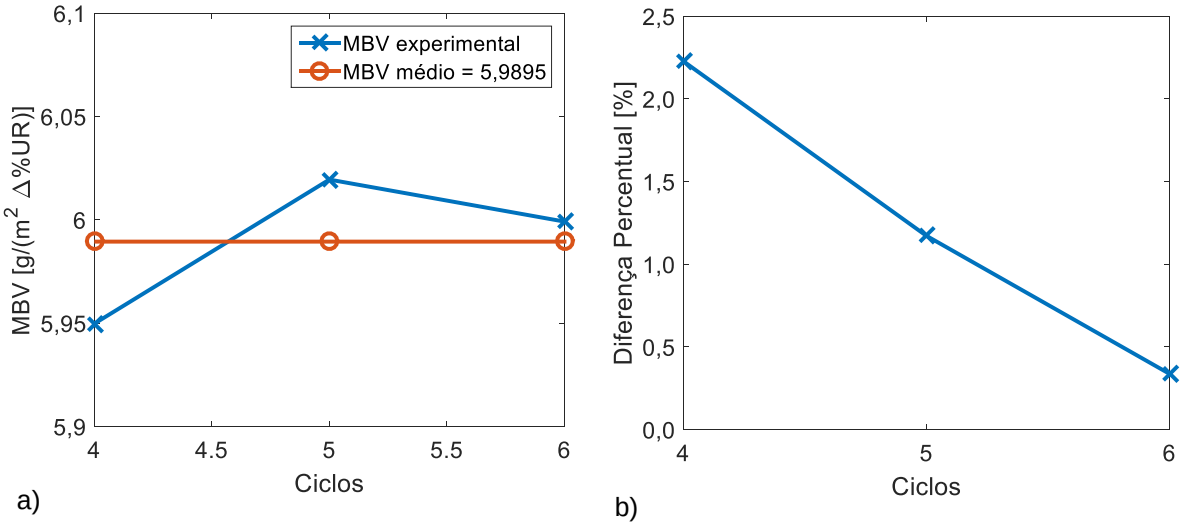

Figura 4-16 Resultados Experimentais do MBV (Silva, 2017). a) O MBV para os 3 últimos ciclos. b) A diferença percentual do MBV em comparação ao ciclo anterior.

Conforme a definição do MBV, o parâmetro de área utilizado no cálculo é a área exposta a troca de umidade, sendo as dimensões 0,73 m x 0,73 m para todas as placas, e o comprimento total de cada placa é 0,89 m x 0,89 m, ou seja, todo este espaço restante serve como acumulador de umidade interferindo na saturação dos poros, a placa na prática pode armazenar mais umidade pois a transferência de umidade ocorre nas 3 dimensões. Fazendo um cálculo de diferença de área, somadas as 6 placas, expressão 4.2:

$$Diferença_{ÁREAS} = \frac{Área_{TOTAL,MAIOR} - Área_{TOTAL,MENOR}}{Área_{TOTAL,MAIOR}} \times 100 \quad (4.2)$$

Fazendo o cálculo da expressão 4.2 a diferença percentual entre as duas áreas é de 32,7%, ou seja, as placas em si absorvem/dessorvem mais umidade que a área menor. Isto aconteceu por causa da estrutura física do aparato experimental (Apêndice B - Figura B-2) sendo que as placas são fixadas numa estrutura cúbica de vigas de madeira, esta área maior tem a função de fixar as placas na estrutura. Comparando uma placa com essa área menor com a maior, o fenômeno físico que ocorre é que a placa maior tem uma inercia maior de saturação, pois a umidade interna aos poros vai penetrando no material, já a placa menor satura com mais facilidade dificultando o transporte.

Agora os resultados expostos são para a simulação dos modelos (Tabela 3-7). A Figura 4-17 apresenta os resultados do MBV para a variação de umidade no tempo conforme o protocolo NORDTEST para o material com umidade seca, média e úmida

($UR_{INICIAL,MATERIAL}$ = [33%, 50%, 75%]) para os modelos matemáticos utilizando as isotermas de Osanyintola *et al.* (2006), Wu (2007) e o software Domus – Eletrobras e a Diferença Percentual do MBV do ciclo atual em relação ao anterior.

A Figura 4-18 mostra os resultados do MBV utilizando a variação de umidade no tempo registradas pelos sensores de umidade do experimento (Sensor da entrada, no centro e saída do aparato) para umidade relativa inicial do material em 50% para os modelos matemáticos utilizando as isotermas de Osanyintola *et al.* (2006), Wu (2007) e o *software* Domus – Eletrobras e a Diferença Percentual do MBV do ciclo atual em relação ao anterior.

Observando-se a Figura 4-17a) - modelo MOD1 - as 3 curvas tendem a se estabilizar no valor de 0,66 [g/(m^2 Δ%UR)], as curvas para a condição de umidade relativa inicial do material em 33% e 75% ainda não atingiram este valor pois o sistema ainda não entrou em equilíbrio com o ar úmido. Avaliando a diferença percentual (Figura 4-17b), a partir do terceiro ciclo, todas as curvas apresentam uma diferença percentual menor que 5% (parâmetro definido pelo protocolo NORDTEST). A curva de 50% alcança mais rapidamente o equilíbrio porque começa numa condição de umidade mais próxima de estabilização na umidade que as outras duas curvas. As curvas de 50% e 75% de UR apresentam um pico no segundo ciclo, isto ocorre por causa do equilíbrio de sorção de vapor no material, sendo que a maior média de sorção (adsorção e dessorção) ocorre no segundo ciclo (observado na Figura 4-13a)).

Observando na Figura 4-17c) – variação de umidade no tempo pelo Protocolo para a Isoterma de Wu (2007) - as 3 curvas tendem a se estabilizar no valor de 0,96 [g/(m^2 Δ%UR)], as curvas para a condição de umidade relativa inicial do material em 33% e 75% ainda não atingiram este valor pois o sistema ainda não entrou em equilíbrio com o ar úmido. Analisando a Figura 4-17d), a partir do terceiro ciclo, todas as curvas apresentam uma diferença percentual menor que 5% (parâmetro definido pelo protocolo NORDTEST). A curva de 50% alcança mais rapidamente o equilíbrio por que começa numa condição de umidade mais próximo de estabilização na umidade que as outras duas curvas. A curva de 75% de UR mostra um pico no segundo ciclo, isto ocorre por causa do equilíbrio de sorção de vapor no material, sendo que a maior média de sorção (adsorção e dessorção) ocorre no segundo ciclo (observado na Figura 4-13b)).

Analisando a Figura 4-17e) – Domus (Eletrobras) - variação de umidade no tempo pelo Protocolo – mostra o menor valor de MBV dentre os modelos matemáticos,

sendo que o sistema tende ao MBV na faixa de 0,090 [g/(m^2 Δ%UR)]. O sistema entra em equilíbrio no terceiro ciclo pois a diferença percentual do MBV está menor que 5% (Figura 4-17f). As 3 isotermas de umidade apresentaram resultados diferentes porque cada uma teve uma sorção diferente, o maior valor de MBV é de Wu (2007) seguindo de Osanyintola *et al.* (2006) e o valor mais baixo para isoterma de umidade de Domus – Eletrobras. Estes resultados evidenciam a influência da propriedade de permeabilidade do material na inercia higroscópica.

Analisando agora o MBV para a variação de umidade no tempo medida pelos sensores no aparato experimental, sabendo que todos os sensores mediram valores distintos ao longo de todo experimento, será utilizada como dados de entrada nas simulações no lugar da variação de umidade proposta pelo protocolo NORDTEST para representar a inércia hígrica do material. A Figura 4-18 exibe o MBV para as umidades dos 3 sensores e um valor médio, representando o fenômeno físico real e a diferença percentual do MBV entre os ciclos.

A Figura 4-18a) apresenta o MBV utilizando as isotermas de umidade de Osanyintola *et al.* (2006). É observado que para o mesmo modelo matemático, alterando a variação de umidade no tempo (sensores de umidade), obtém-se diferentes valores de MBV, mas para este modelo os valores são próximos, e o MBV médio para os 3 últimos ciclos é 0,52 [g/(m^2 Δ%UR)], valor um pouco abaixo do MBV obtido pela variação de umidade no tempo do protocolo NORDTEST. Assim a diferença percentual do MBV médio final entre o Protocolo NORDTEST e a as umidades medidas pelos 3 sensores é de 21,2%. A partir do terceiro ciclo o sistema já tem uma diferença percentual de MBV por ciclo menor que 5% (Figura 4-18b).

A Figura 4-18c) expõe os valores do MBV para a variação de umidade no tempo registrados pelos 3 sensores no experimento, para este modelo matemático é utilizando as isotermas de umidade de Wu (2007). Os valores obtidos para o MBV de cada sensor não são próximos, os valores do MBV são diferentes para todos os sensores, sendo o sensor de entrada que mais se aproximou do MBV simulado pela umidade do Protocolo NORDTEST, para os sensores do centro e saída obteve uma redução considerável no MBV final. Analisando a Figura 4-18d), observa-se que a partir do terceiro ciclo a diferença percentual dos MBV já ficaram menores que 5%, indicando estabilidade a umidade. O MBV médio final foi de 0,50 [g/(m^2 Δ%UR)], sendo menor que o valor do MBV do protocolo. Assim a diferença percentual do MBV

médio final entre o Protocolo e a variação de umidade no tempo pelos 3 sensores é de 47,8%.

Analisando a Figura 4-18e) – Modelo matemático de Domus-Eletrobras para variação de umidade no tempo medida pelos sensores – o MBV médio final dos 3 sensores é de 0,068 [g/(m^2 Δ%UR)]. Assim a diferença percentual do MBV médio final calculado entre o Protocolo e a variação de umidade no tempo registrado pelos 3 sensores é de 24,4%. A diferença percentual de MBV a cada ciclo é menor que 5% a partir do terceiro ciclo - Figura 4-18f).

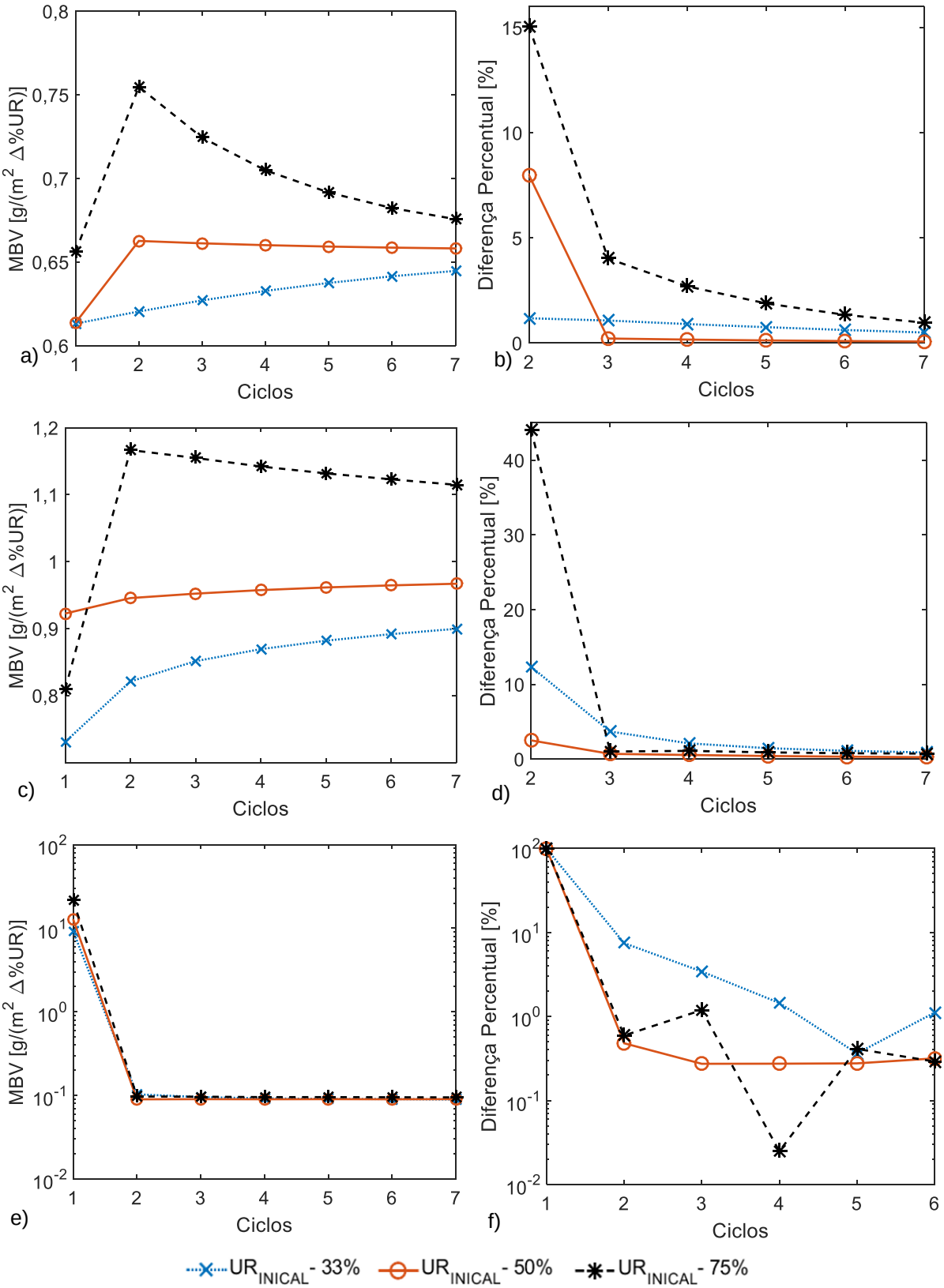

Figura 4-17 Resultados numéricos do MBV. a) MBV do Modelo MOD1. b) A diferença percentual para MOD1. c) MBV do modelo MOD3. d) A diferença percentual para MOD3. e) O MBV do modelo MOD5, f) A diferença percentual para MOD5.

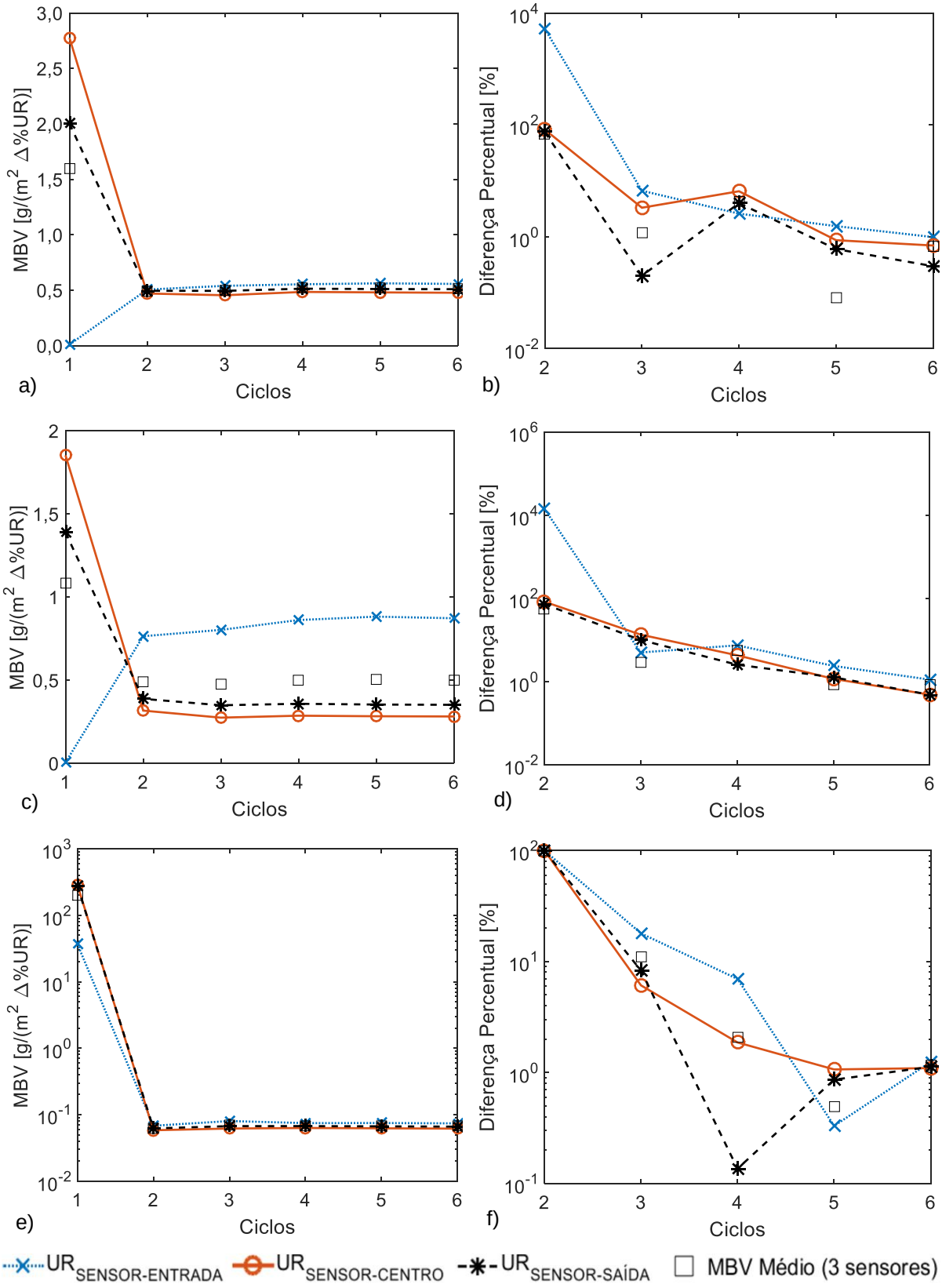

Figura 4-18 Resultados numéricos do MBV. a) MBV do Modelo MOD2. b) A diferença percentual para MOD2. c) MBV do modelo MOD4. d) A diferença percentual para MOD4. e) O MBV do modelo MOD6, f) A diferença percentual para MOD6.

As Figuras 4-17 e 4-18 apresentaram o MBV obtidos nas simulações para todos os modelos matemáticos utilizando todas as isotermas de umidade. Para todos os casos onde o MBV foi calculado a partir das medidas obtidas pelos sensores os valores foram menores que os calculados pelo protocolo NORDTEST. Os modelos matemáticos possuem a hipótese de que o ar úmido possui propriedades constantes ao longo de todo volume para cada passo de tempo, isto não confere com as umidades relativas medidas pelos sensores pois estes mostram que o ar úmido ganha/perde umidade ao longo de todo experimento e consequentemente a diferença de umidade na superfície das paredes com o ar úmido é reduzido influenciando todo comportamento hígrico do material. Na prática o MBV real é menor que o MBV teórico (simulado pelo protocolo). Em todos os casos a diferença percentual de MBV ciclo a ciclo é menor que 5% a partir do terceiro ciclo mostrando que o sistema tende a obter estabilidade de umidade.

A Tabela 4-4 apresenta os valores dos MBV para os modelos matemáticos com sua classificação higroscópica (Figura 2-18). Observa-se que os modelos matemáticos para as isotermas de Osanyintola *et al.* (2006) e Wu (2007) o material se enquadra na classificação de moderado, e o material para o modelo de Domus – Eletrobras se encontra como ruim na classificação do MBV. Ou seja, para o mesmo tipo de material, alterando suas propriedades higrotérmicas (Isoterma de vapor e Permeabilidade) afeta diretamente o índice MBV.

		Osanyintola *et al.* (2006)		**Wu (2007)**		**Domus - Eletrobras**	
Carga de Umidade		**MBV g/(m² ∆%UR)**		**MBV g/(m² ∆%UR)**		**MBV g/(m² ∆%UR)**	
Protocolo NORDTEST	33%	0,6413	Moderado	0,8911	Moderado	0,0902	Ruim
	50%	0,6587	Moderado	0,9643	Moderado	0,0901	Ruim
	75%	0,6832	Moderado	1,1231	Bom	0,0951	Ruim
	Média	**0,6611**	**Moderado**	**0,9928**	**Moderado**	**0,0918**	**Ruim**
Umidade dos Sensores	Entrada	0,5573	Moderado	0,8722	Moderado	0,0744	Ruim
	Centro	0,4805	Limitado	0,2839	Limitado	0,0623	Ruim
	Saída	0,5111	Moderado	0,3545	Limitado	0,0667	Ruim
	Média	**0,5163**	**Moderado**	**0,5035**	**Moderado**	**0,0678**	**Ruim**

Tabela 4-4 MBV para os modelos matemáticos, o valor final e classificação.

Calculando a diferença percentual dos MBV para as simulações utilizando a variação de umidade no tempo pelo Protocolo NORDTEST com o MBV para a variação de umidade registrada pelos sensores, equação (4.3).

$$Diff_{Percentual}(MBV) = \frac{MBV_{PROTOCOLO(UR_{inicial50\%})} - MBV_{Médio\,SENSORES}}{MBV_{PROTOCOLO(UR_{inicial50\%})}} \times 100 \quad (4.3)$$

A Tabela 4-5 exibe a diferença percentual entre os MBV para o Protocolo NORDTEST e os MBV obtidos pelas umidades dos sensores.

	Osanyintola *et al*. (2006)	**Wu (2007)**	**Domus - Eletrobras**
∆%MBV	21,6%	47,8%	24,8%

Tabela 4-5 Diferença percentual do MBV entre Protocolo NORDTEST e as cargas de umidades registradas no experimento.

Analisando a Tabela 4-5, os valores do MBV para a umidade simulada dos sensores são menores que o MBV simulados pela umidade Protocolo NORDTEST. Isto acontece porque pelo modelo do Protocolo, as propriedades são constantes no tempo, 8 horas com umidade relativa de 75% e 16 horas de umidade relativa a 33%. Já os valores de umidade relativa medida pelos sensores não são constantes, ou seja, no intervalo de adsorção a umidade relativa é menor que 75% e no período de dessorção é maior que 33%, conforme observado e discutido na seção 4.4 pela Figura 4-7. Isto comprova novamente que o MBV é influenciado, além das propriedades higroscópicas do material, sofre influência do ambiente.

Não foi possível justificar o porquê o MBV experimental de Silva (2017) foi de 6 g/(m^2 ∆%UR). Este valor classifica o material como excelente na Tabela do MBV. No momento da execução dos trabalhos não foi possível medir as propriedades higroscópicas da madeira utilizada no experimento, limitando as comparações entre os modelos matemáticos com os resultados experimentais.

O material de estudo deste trabalho é a madeira compensada, foi utilizado 3 isotermas de umidade distintos e para cada um foi calculado um valor distinto de MBV. O modelo matemático feito possibilitou o uso de diferentes isotermas de umidade e variação da umidade no ar úmido sendo necessário algumas alterações no código. Feito essas análises, pode-se afirmar que num ambiente, os moveis, objetos e

envoltórios interferem no equilíbrio de umidade da zona climática, e consequentemente o MBV.

4.8 TESTE DA BANCADA CONSTRUIDA

Nesta seção é analisado os resultados de Meissner (2008), ele fez o primeiro trabalho experimental no aparato do LST. Construiu uma célula-teste de dimensões internas de 2020 x 2020 x 2005 mm, totalizando uma área superficial interna total de 24,3516 m^2 e um volume interno de 9,76468 m^3, para detalhes do aparato experimental ver seção Apêndice B. Além da caixa de madeira se utilizou para comparação uma pequena amostra que estava localizada dentro da caixa dentro de uma balança para aquisição dos dados. A área da amostra interna é de 7,82x10^{-2} m^2. Esta amostra foi posicionada internamente para comparar o resultado de toda célula-teste com a pequena amostra dentro dela.

Para aquisição de dados a célula-teste foi dividida em 9 zonas sensoriais, foram instalados 11 sensores de umidade relativa, como mostrado na Figura 4-19. A balança utilizada na época é a fotografia na Figura 4-20.

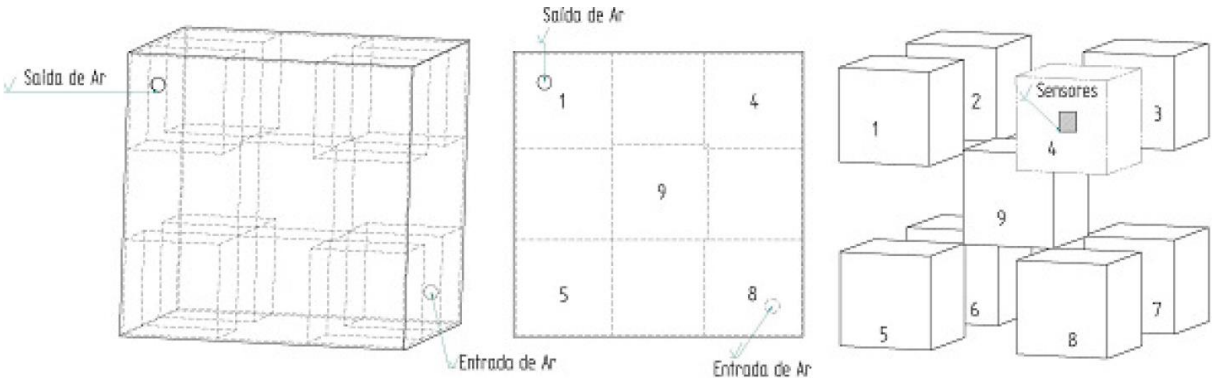

Figura 4-19 Zonas sensoriais do aparato experimental (Meissner, 2008).

Em cada zona sensorial é instalado um sensor de umidade e temperatura, além destes 9 pontos foi instalado um sensor de umidade na entrada e outro na amostra. A balança da Figura 4-20 com a amostra foi posicionada dentro da estrutura de madeira perto da saída do ar da célula-teste. As umidades relativas medidas por todos os sensores são apresentadas na Figura 4-21 e foram utilizadas para a simulação numérica para o modelo matemático utilizando a isoterma de Osanyintola *et al.* (2006).

Figura 4-20 Balança de Precisão (Meissner, 2008).

Meissner (2008) fez o experimento para 5 ciclos (1 ciclo por dia). A balança de precisão foi posicionada dentro da estrutura de madeira, com o objetivo de comparar os resultados do MBV da Célula-Teste com a amostra. Após realizados todos os experimentos Meissner (2008) encontrou os valores distintos de MBV entre a célula-teste e a amostra. É simulado as cargas de umidade registrada pelos sensores para analisar a diferença entre os resultados de Meissner (2008).

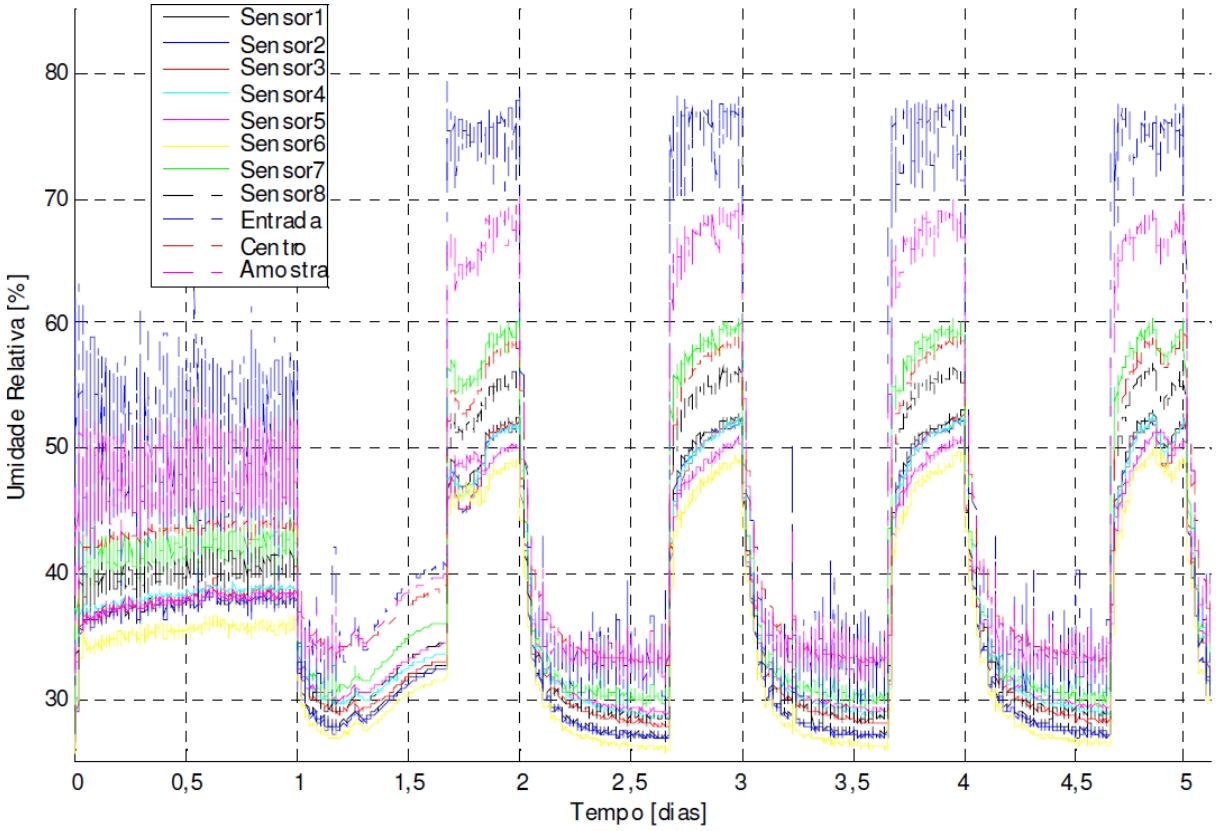

Figura 4-21 Medição da variação da Umidade relativa de todos os sensores (Meissner, 2008).

Observando a Figura 4-21, é constatado que cada sensor mede diferentes valores da umidade relativa para o mesmo intervalo de tempo, mostrando que o ar interno não possui as mesmas propriedades psicrométricas em todo espaço para o mesmo intervalo de tempo. Meissner (2008) obteve valores do MBV distintos entre a célula-teste e amostra, seus resultados são mostrados na Figura 4-22.

MBV [kg/m^2%UR]	Ensaio sem isolamento	Ensaio com isolamento
Amostra	$10{,}5.10^{-5} \pm 6{,}5.10^{-6}$	$10{,}6.10^{-5} \pm 6{,}5.10^{-6}$
Célula	$10{,}0.10^{-4} \pm 4.10^{-5}$	$5{,}8.10^{-4} \pm 4.10^{-5}$

Figura 4-22 Dados finais do MBV (Meissner, 2008).

Meissner (2008) comentou que o MBV experimental da Amostra é 5,5 vezes menor que o MBV da Célula-Teste (com isolamento de umidade externa). São simulados os dados experimentais fornecidos por Meissner (2008) para analisar esta diferença. Foi simulado o MBV numérico aplicando todos os dados da Figura 4-21. Assim, utilizando o modelo numérico deste trabalho, o MBV obtido computando as variações de umidade no tempo do experimento de Meissner (2008) é exibido na Figura 4-23.

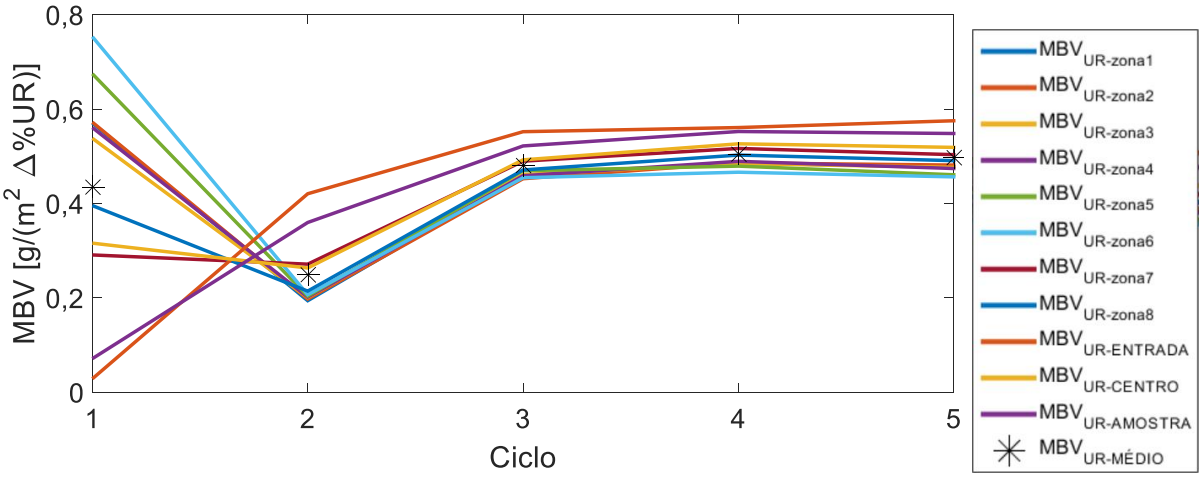

Figura 4-23 Resultados da simulação do experimento de Meissner (2008), MBV para a variação da UR, utilizando a Isoterma de Osanyintola *et al.* (2006).

Os valores do MBV tendem a se estabilizar a partir do 3 ciclo, assim como foi discutido na seção 4.7. Cada sensor do aparato mediu diferentes valores de umidade

relativa no mesmo instante do tempo, mostrando que isto afeta o MBV. A maioria dos resultados se enquadram na classificação higroscópica de Limitado.

A Tabela 4-6 exibe a classificação do MBV (pelo modelo matemático) final utilizando a variação de Umidade Relativa medidos pelos sensores de Meissner (2008). Observando esses valores, todos os MBV tendem a se estabilizar em 0,49 g/(m^2 %UR). A diferença percentual entre os MBV médio do experimento Meissner (2008) e o MBV do Protocolo NORDTEST pela equação 4.3 é de 25%. Mesmo os valores tendo esta diferença percentual, os resultados estão coerentes com os resultados do MBV obtidos no *Round Robin Test* (Figura 2-19).

Zona Climática	**MBV [g/(m^2 %UR)]**	**QUASSIFICAÇÃO**
zona1	0,4747	Limitado
zona2	0,4736	Limitado
zona3	0,4743	Limitado
zona4	0,4743	Limitado
zona5	0,4701	Limitado
zona6	0,4594	Limitado
zona7	0,5035	Moderado
zona8	0,4884	Limitado
Centro	0,5129	Moderado
Amostra	0,5412	Moderado
médio	**0,4941**	**Limitado**

Tabela 4-6 Classificação do MBV final utilizando o modelo matemático com a isoterma de Osanyintola *et al.* (2006) para os valores de Umidade do experimento de Meissner (2008).

Comparando o MBV d a célula-teste de Meissner (2008) com os resultados numéricos, a diferença percentual é de 14,8% sendo um valor próximo e ambos coerentes com os resultados do *Round Robin Test*.

O MBV simulado pela umidade da zona climática da amostra ficou próximo dos MBV simulados pelas outras zonas climáticas e do MBV médio das zonas climáticas. Isto aconteceu no modelo matemático por causa do cálculo feito para o parâmetro h_m (Coeficiente de Transferência de massa por convecção), pois pela analogia das camadas limites, enquanto as superfícies das placas têm escoamento livre, o espaço volumétrico da balança está protegido pelas laterais por uma pequena parede, isto

reduz o valor do coeficiente h_m. Repetindo as simulações para a variação de umidade da zona climática da amostra, mas alterando os valores do h_m os resultados obtidos são apresentados na Figura 4-24.

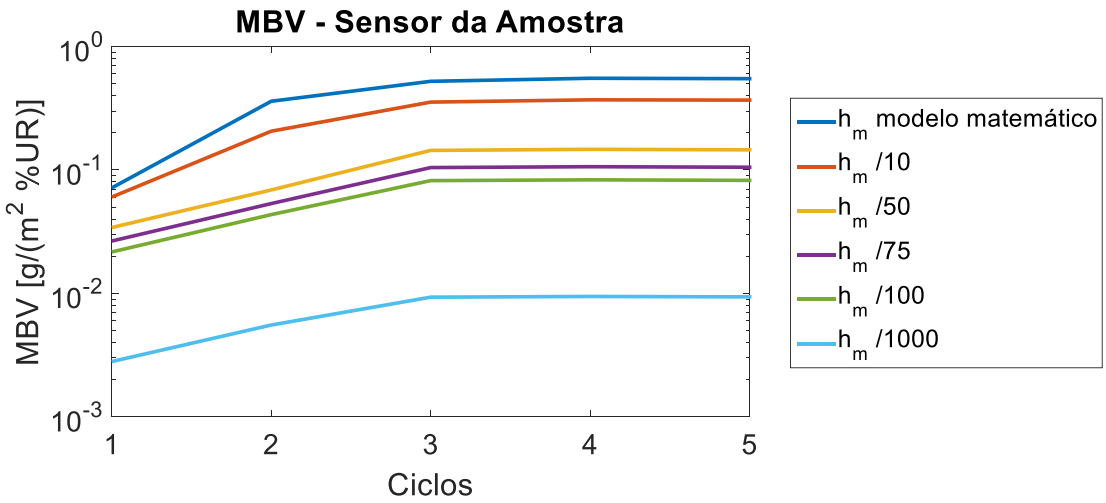

Figura 4-24 Resultado numérico do MBV para as umidades medidas pelo sensor da Amostra variando os valores de h_m na simulação.

Como mostrado anteriormente o MBV obtido pela amostra [0,106 g/(m² %UR)] é 5,5 vezes menor que o MBV obtido para a célula-teste [0,58 g/(m² %UR)]. Observando a Figura 5-25, verificou-se que dividindo o h_m em 75 vezes obtém-se o resultado esperado, comprovando que as paredes laterais da balança influenciaram o experimento da Amostra afetando o valor de h_m e por fim alterando o valor do MBV. Agrupando os resultados da seção 4.8 na Tabela 4-7.

MBV [g/(m² %UR)]	**Resultado Experimental Meissner (2008)**	**Modelo-Matemático MBV médio**	**MBV para h_m/75**
Amostra	0,106	0,494	0,1053
Célula-Teste	0,58	0,494	-----

Tabela 4-7 Resultados da seção 4.8

O MBV calculado para o modelo matemático se aproximou do MBV obtido para a célula-teste no experimento, e reduzindo o h_m em 75 vezes o MBV da amostra ficou próximo do MBV experimental, sendo a diferença percentual entre estes dois valores em 0,66% apenas.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um modelo matemático para analisar a transferência de massa para materiais porosos de geometria 1-D, analisando especificando o ensaio de *MBV*, seguindo o protocolo NORDTEST. São implementados neste modelo os dados das medições dos trabalhos experimentais de Meissner (2008) e Silva (2017) para comparação.

O modelo matemático feito neste trabalho possibilitou realizar várias análises do MBV e outros parâmetros, mostrando que o MBV real é menor que o valor do MBV avaliado numericamente pelo fato dos envoltórios adsorverem/dessorverem umidade alterando a carga de umidade do ar-úmido ao longo do experimento/simulações. Foi possível utilizar a carga de umidade do Protocolo NORDTEST, as cargas de umidade medidas pelos sensores (cargas reais do experimento físico) para comparações, tanto para o experimento físico de Silva (2017) como para o experimento físico de Meissner (2008).

Foi utilizado duas isotermas de umidade no modelo matemático (em MATLAB) e a isoterma de umidade no *software* Domus – Eletrobras para comparações, todas estas isotermas são referentes ao material Madeira compensada, mas todos foram medidos por amostras, trabalhos e pessoas distintas todos de origens diferentes. A isoterma de Domus – Eletrobras permite maior quantidade de água, mas tem uma resistência maior ao fluxo de vapor, e a isoterma de Wu (2007) mostrou maiores valores de MBV e uma quantidade média de umidade no material. Para todos os casos a partir do terceiro ciclo o MBV estava na condição de estabilidade de 5% de diferença em relação ao ciclo anterior, atendendo as exigências do protocolo NORDTEST.

Foi observado que a diferença de umidade relativa máxima e mínima medidas pelos sensores em cada ciclo afeta a sorção média, quanto maior esta diferença maior é o valor da sorção média, pois seguindo a lógica, quanto maior o gradiente de umidade relativa, maior é o potencial para troca de umidades entre o material e o ar-úmido.

Mesmo assim os resultados experimentais destes dois trabalhos puderam ser utilizados. Não foi possível justificar porque o MBV obtido por Silva (2017) foi muito elevado, mas foi descoberto o porquê o MBV da amostra do trabalho de Meissner

(2008) é 5,5 vezes menor que o obtido pela célula-teste, pois as paredes da balança em que estava posicionado a amostra interferiu no escoamento interno assim reduzindo drasticamente o coeficiente de transferência de massa por convecção. O resultado do MBV obtido pelo modelo matemático foi próximo do MBV experimental de Meissner (2008). Para uma análise mais completa é recomendado medir as propriedades higrotérmicas do material para comparação com os resultados numéricos.

O modelo matemático neste trabalho considera que o problema é isotérmico, sendo que este fenômeno não é real porque no processo de transferência de umidade no material poroso, tanto a evaporação como a condensação que ocorre internamente nos poros ou libera ou absorve calor alterando sua temperatura e consequentemente afetando o equilíbrio da fase líquida/gasosa da umidade (como por exemplo a pressão de saturação de vapor que é dependente da temperatura).

Para trabalhos futuros é sugerido evoluir o modelo matemático utilizando o balanço de energia para obter resultados mais refinados, pois a temperatura e umidade são fenômenos físicos acoplados. Estudar a influência do MBV alterando a variação de umidade no tempo no escoamento (como por exemplo o valor de máximo e mínimo de UR nos ciclos) e tentar encontrar alguma relação.

É sugerido utilizar um aparato como mostra na Figura 5-1, pode-se facilmente utilizar correlações adimensionais de camada limites pois o perfil de escoamento é mais facilmente obtido. Já o perfil de escoamento de uma construção de estrutura do aparato experimental o perfil de escoamento é muito mais complexo, pois existem regiões de recirculação de ar próximos aos cantos e arestas da estrutura de fixação das placas, o uso direto das hipóteses de correlações de camada limite aumenta o erro numérico, tanto que a posição da abertura de entrada e saída do ar na câmara influencia fortemente o escoamento interno da célula-teste, sendo necessário duas aberturas em alguma placa para fornecer a entrada e saída do ar úmido. Mesmo com todas estas diferenças pode-se fazer boas comparações entre os resultados obtidos, como por exemplo a variação de umidade no tempo no ar úmido cumprindo o protocolo NORDTEST e a variação de umidade no tempo registradas nos sensores.

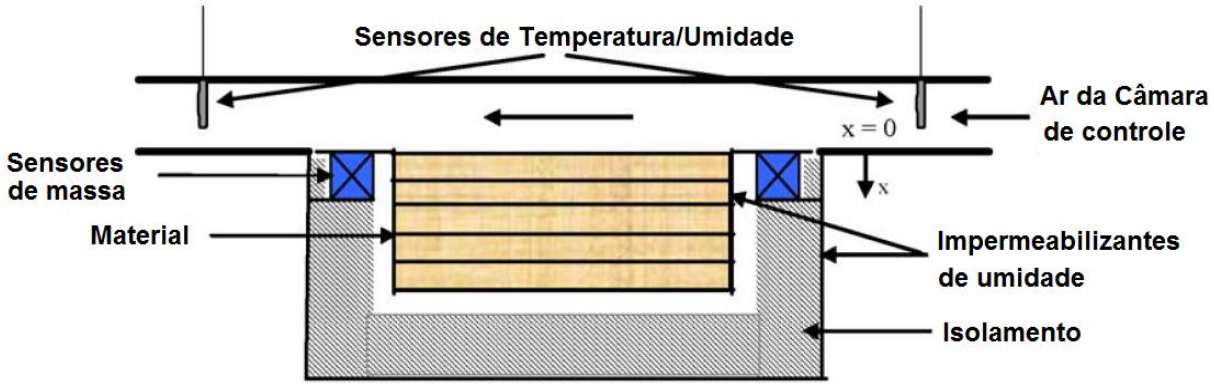

Figura 5-1 Aparato Experimental recomendado para medição do MBV. Adaptado de Osanyintola *et al.* (2006)

Esta geometria é mais simples favorecendo a criação de um modelo matemático mais realístico e o uso da analogia das camadas limites para a obtenção dos coeficientes de transferência de calor e massa e com esta forma construtiva não ocorre a recirculação de ar como na estrutura física mostrada na Figura B-2 (Apêndice B – Aparato físico experimenta).

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS

Abe, L.R.A., Meissner, J.W., Moura, L.M., Abadie, M. O., Mendonça, K.C. and Mendes, N, 2010. A numerical analysis of an experimental set-up for evaluating moisture buffer effects of porus material. 13th Brazilian congress of thermal sciences and engineering.

Alamdari F. and Hammond G.P. Improved Data Correlations for Buoyancy-Driven Convection in Rooms, Building Services Engineering Research and Technology, 4 (3) 106-112, 1983.

ANSI/ASHRAE – 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta, 2004.

Akinyemi, O.D., Mendes, N., 2007. Numerical and experimental determination of surface temperature and moisture evolution in a field soil. J. Geophys. Eng. 3 (2006) 1–11.

ANSI/ASHRAE – 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta, 2004.

Choi, J.G. Do, D.D., Do, H.D. Surface Diffusion of Adsorbed Molecules in Porous Media: Monolayer, Multilayer, and Capillary Condensation Regimes. Ind. Eng. Chem. Res. 2001, 40, 4005-4031

Dedesko, S., Siegel, A.J. Moisture parameters and fungal communities associated with gypsum drywall in buildings. Microbiome (2015) 3:71

Dinwoodie, J.M., 1981. Timber: Its Structure, Properties and Utilization, 6th edition. MacMillan Press Ltd., London. 410.

Epstein, N. On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media, Chem. Eng. Sci., 44(3), (1989) 777– 779

Esteves, C.M.G. Identificação das propriedades de difusão na madeira Pinus Pinaster Aiton. Dissertação de mestrado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Departamento de Engenharias da Escola de Ciências. Portugal. 2009.

Freitas, V.M.A.P. Transferência de umidade em Paredes de Edifícios. Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Departamento de Engenharia Civil. 1992

Foelkel, C. Elementos de vaso e celuloses de eucalipto. Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2007.

Forest Products Laboratory. Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. (2010) 508 p.

Grant C., Hunter C.A., Flannigan B. & Bravery A.F. The Moisture Requirements of Moulds Isolated from Domestic Dwellings. International Biodeterioration 25 (1989) 259-284

Hens, H. Modelling: hygric aspects, IEA Annex XIV ‘’Condensation and Energy’’ – Sourcebook, 1991

Hens, H. Building physics: heat, air and moisture: fundamentals and engineering methods with examples and exercises. 2nd ed. Berlin, Germany: Ernst & Sohn, 2012.

Incropera, P.F. DeWitt, Bergman, Lavine. Fundamentos de transferência de calor e de massa, 6ª. Edição. Editora LTC, 2008.

Kwiatkowski, J., Woloszyn, M., Roux, J.J. Modelling of hysteresis influence on mass transfer in buildong materials. Building and Environment 44 (2009) 633-642.

Manual do Domus – Eletrobras, 2012. Disponível em: <http://domus.pucpr.br/>. Acesso em: 30 jun. 2015

Meissner, J.W; Desenvolvimento de um aparato experimental para avaliação da inércia higroscópica de elementos porosos de edificações. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná; Mestrado em Engenharia Mecânica, 2008.

Meissner, J.W., Mendes, N., Mendonça, K.C. and Moura, L.M., 2010. A full-scale experimental set-up for evaluating the moisture buffer effects of porous material. International Communications in Heat and Mass Transfer , v.37, p. 1197.

Mendes, N. Modelos para Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações.Dissertação de Doutorado, Florianópolis, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

Mendes, N., Oliveira, R.C.L.F, Santos, G.H. Domus 2.0: A whole-building hygrothermal simulation program. Eighth International IBPSA Conference. Eubdhoven, Netherlands. August 11-14, 2003.

Mendes, N., Philippe, P.C., Lamberts, R. A new mathematical Method to Solve Highly Coupled Equantions of Heat and Mass Transfer in porous Media. International Journal of Heat and Mass Transfer, V. 45,p.509-518, 2002.

Nogueira, L.A.H., Cardoso, R.B., Cavalcanti, C.Z.B., Leonelli, P. A. Evaluation of the energy impacts of the Energy Efficiency Law in Brazil. Energy for Sustainable Development 24 (2015) 58–69

Olutimayin, S.O., Simonson, C.J. Measuring and modeling vapor boundary layer growth during transient diffusion heat and moisture transfer in cellulose insulation. International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005) 3319–3330.

Osanyintola, O.F. Transiente moisture characteristics of spruce plywood. Master Tesis of Science. University of Saskatchewan. Department of Mechanical Engeneering. 2005.

Osanyintola, O.F., Simonson, C.J. Moisture buffering capacity of hygroscopic materials: Experimental facilities and energy impact. Energy and Buildings 38 (2006) 1270-1282.

Padfield T. The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity [PhD thesis]. Lyngby (DK): Technical Univ. of Denmark; 1998.

Paglarini, C.S., Silva, F.S., Porto, A.G., Piasson, D., Furtado, G.F. Análise da histerese em isotermas de equilíbrio de amêndas de cumbaru (Dipteryx alata Vogel). Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.15, n.1, p.1-6, 2013. ISSN 1517-8595

Patankar, S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, 1st Ed - 1980.

Peuhkuri, R. Moisture dynamics in building envelopes, PhD Thesis, Departament of Civil Engineering, DTU, Lyngby, Denmark. 2003.

Philip J.R. e DeVries, D.A. Moisture mouvement in porous material under temperature gradients. Transactions of the American Geophysical Union. v.38, n.2, p222-232, 1957.

Ramos, N.M.M., 2007. A Importância da Inércia Higroscópica no Comportamento Higrotérmico dos Edifícios. Dissertação de doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 486p. Doutorado em Engenharia Civil.

Rafidiarison, H. Dataset for validating 1-D heat and mass transfer models within building walls with hygroscopic materials. Building and Environment 89 (2015) 356-368

Rode C. Moisture buffering of building materials, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Report R-126. 2005.

Rode C., Grau K., 2008. Moisture Buffering and its Consequence in Whole Building Hygrothermal Modeling. Journal of BUILDING PHYSICS, Vol. 31, No. 4. April— 2008.

Samuel, D., Arnaud, E., Christophe, B., Frédéric, L. Temperature and moisture storage in crop-based materials: Modelling a straw bale wall subject to a thermal shcok. Jounal of Building Physics, 2016, Vol. 39(5) 421-439

Shapiro, N.H., Moran, J.M. Princípios de termodinâmica para engenharia, Editora LTC. 2002.

Silva, A.S. Análise do método experimental para determinação do índice MBV em materiais higroscópicos. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2017.

Thommes, M., Kaneko, K., Neimark,. A.V., Oliver, J.O., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., Sing,. K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report), Pure Appl. Chem. 2015; 87(9-10):1051-1069

Wu, W. Experimental study of hygrothermal properties for building materials. Master Thesis. Montreal, Quebec, Canada. Department of Building civil and environmental engineering, Concordia University, 2007.

Zerihun T., Jelle D., Roels S. Experimental data set for validation of heat, air and moisture transport models of building envelopes. Building and Environment 46 (2011) 1038-1046

Zhang, X., Zillig, W., Künzel, H.M., Mitterer, C., Zhang, X. Combined effects of sorption hysteresis and its temperature dependency on wood materials and building enclosures-part II: Hygrothermal modeling. Building and Environment 106 (2016) 181-195.

APÊNDICE A – DOMUS – ELETROBRAS

A.1 Equações dos fenômenos físicos

A transferência de calor e de massa em meios porosos é modelado por equações diferenciais parciais e resolvido por uma abordagem numérica (Domus - Eletrobras). O modelo matemático utilizado é o proposto por Mendes *et al.* (2002). A expressão para a equação de conservação de energia utilizada é eq. (A.1) (Akinyemi *et al.*, 2006).

$$\rho_0 c_m(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial x}\right) - L(T)\frac{\partial}{\partial x}\left(j_v\right) \tag{A.1}$$

Sendo x a direção (m), T a temperatura (°C), t é o tempo (s), θ é o teor de humidade volumétrico (m^3/m^3), ρ_0 é a massa específica da matriz sólida (kg/m^3), c_m é o calor específico (J / (kg K)), λ é a condutividade térmica (W / (m K)), L é o calor latente de vaporização (J / (kg K)) e j_V a massa específica da água (kg / m^3). A equação da conservação da massa é eq. (A.2) (Akinyemi *et al.,* 2006).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{j}{\rho_l}\right) \tag{A.2}$$

Em que j é o fluxo de massa total ($kg/(m^2\ s)$ e ρ_l é a massa específica da água (kg/m^3). O fluxo de massa de vapor é definido pela Eq. (A.3) (Akinyemi *et al.*, 2006).

$$\frac{j_v}{\rho_l} = -D_{Tv}(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial x} - D_{\theta v}(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial x} \tag{A.3}$$

Sendo D_{TV} é a difusividade térmica de vapor, $D_{\theta v}$ a difusividade do vapor mássica. A equação que expressa o fluxo de massa total é escrito como eq. (A.4) (Akinyemi *et al.*, 2006).

$$\frac{j}{\rho_l} = -D_T(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial x} - D_\theta(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial x} \tag{A.4}$$

Sendo $D_T = D_{TL} + D_{Tv}$ (coeficiente de transporte de massa relacionados por gradiente de temperatura ($m^2/(s\ K)$) e $D_\theta = D_{\theta l} + D_{\theta v}$ (coeficiente de transporte de massa relacionados por gradiente de umidade (m^2/s)). Estas são as principais equações implementadas no *software* do Domus.

Este método considera o gradiente de temperatura e teor de umidade no interior do envoltório. É utilizado o método de volumes finitos com diferença central e linearização da diferença de concentração de vapor dos termos de temperatura e conteúdo de umidade (Mendes *et al.,* 2003). O modelo faz duas considerações: a primeira assume que a troca de vapor entre a superfície da parede e o fluxo de ar é uma função linear da temperatura e teor de umidade, em vez da concentração de vapor; a segunda introduz um algoritmo tri-diagonal para resolver as equações simultaneamente (Mendes *et al*., 2002).

A.2 Condições de Contorno

O lado externo da parede (x=0) é exposto a convecção de calor, mudança de fase e troca de vapor entre a superfície porosa e o ar. Com estas condições o balanço de energia é expresso pela equação A.5 (Mendes *et al.,* 2002).

$$-\left(\lambda(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} - \left(L(T)j_v\right)_{x=0} = h\left(T_\infty - T_{x=0}\right) + L(T)h_m\left(\rho_{v,\infty} - \rho_{v,x=0}\right) \qquad \text{(A.5)}$$

O balanço de massa é expresso pela equação A.6 (Mendes *et al.,* 2002).

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(D_\theta(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial x} + D_T(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = \frac{h_m}{\rho_l}\left(\rho_{v,\infty} - \rho_{x=0}\right) \qquad \text{(A.6)}$$

O lado interno (x=L) é similar ao lado externo, assim o balanço de energia é escrito pela equação (A.7) e o balanço de massa é escrito pela equação (A.7).

$$-\left(\lambda(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L} - \left(L(T)j_v\right)_{x=L} = h\left(T_\infty - T_{x=L}\right) + L(T)h_m\left(\rho_{v,\infty} - \rho_{v,x=L}\right) \qquad \text{(A.7)}$$

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(D_\theta(T,\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}+D_T(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L}=\frac{h_m}{\rho_l}\left(\rho_{v,\infty}-\rho_{x=L}\right) \quad \text{(A.8)}$$

A.3 Envoltório

É discretizado as equações diferenciais, o domínio físico é representado pela Figura A.1, adotando a técnica de volumes finitos. As linhas cheias representam o centro dos nós e as linhas finas a fronteira de cada nó. A indicação 0 é referente ao nó interno e n como o nó da região externa.

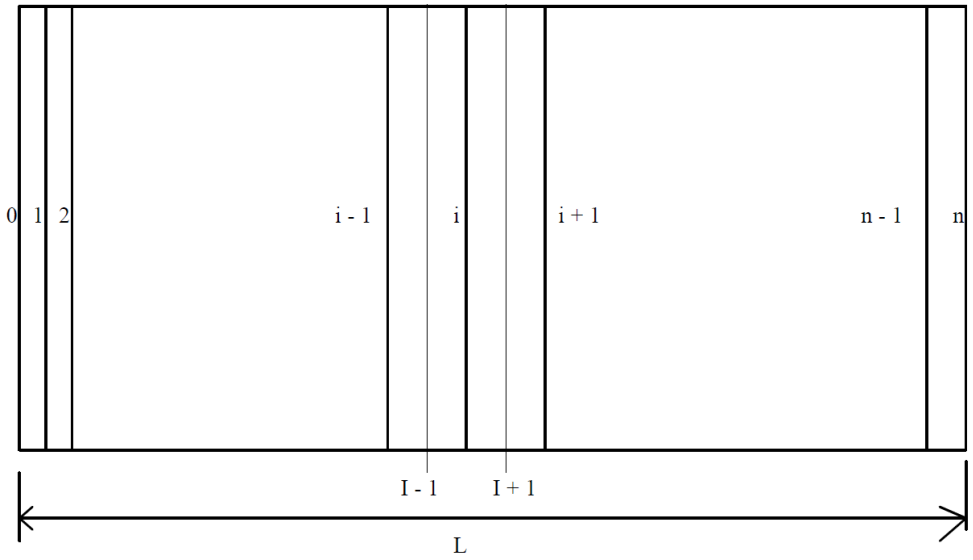

Figura A-1 Domínio físico do envoltório (Mendes, 1997).

A malha para a discretização do domínio é ilustrada pela Figura A-2.

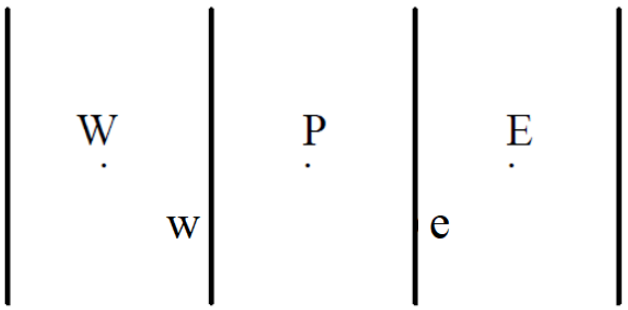

Figura A-2 Malha para discretização do domínio físico (Mendes, 1997).

Para cada nó, o valor do coeficiente D sobre uma interface *e* é escrita pela equação (A.9) (Mendes, 1997).

$$\frac{\delta x_e}{D_e} = \frac{\delta x^-{}_e}{D_P} + \frac{\delta x^+{}_e}{D_E} \tag{A.9}$$

Sendo δx^-_e e δx^+_e a distância entre a fronteira *e*, os pontos P, e E. Para malhas uniformes, o coeficiente D é calculado pela equação (A.10) para face *e* e equação (A.11) para a face *w* (Mendes, 1997).

$$D_e = \frac{2}{\frac{1}{D_P} + \frac{1}{D_E}} \tag{A.10}$$

$$D_w = \frac{2}{\frac{1}{D_P} + \frac{1}{D_W}} \tag{A.11}$$

A.4 Algoritmo Genérico para solucionar as equações diferencias parciais de maneira acoplada

Discretizando as equações diferenciais obtém-se a seguinte expressão algébrica (TDMA - Eliminação de Gauss para matriz 3D) (A.12).

$$A_i \cdot x_i = B_i \cdot x_{i+1} + C_i \cdot x_{i-1} + D_i \tag{A.12}$$

Sendo A_i, B_i e C_i tensores de segunda ordem. O vetor x_i contendo as variáveis dependentes.

$$x_i = \begin{bmatrix} \theta_i \\ T_i \end{bmatrix} \tag{A.13}$$

O vetor x_i pode ser expresso em função de x_{i+1}.

$$x_i = P_i \cdot x_{i+1} + q_i \tag{A.14}$$

Sendo P_i um tensor de segunda ordem. Substituindo (A.13) em (A.12), avaliado no ponto i-1, a expressão (A.12) pode ser reescrita como (A.15)

$$(A_i - C_i \cdot P_{i-1})x_i = B_i \cdot x_{i+1} + C_i \cdot q_{i-1} + D_i \tag{A.15}$$

Isolando x_i na equação (A.12), obtém-se (A.16)

$$x_i = \left[(A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} \cdot B_i\right] \cdot x_{i+1} + (A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1}(C_i \cdot q_{i-1} + d_i) \tag{A.16}$$

Comparando (A.15) com (A.13), o termo P_i pode ser escrito como equação A.17 e o termo q_i pela equação A.18.

$$P_i = (A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} \cdot B_i \tag{A.17}$$

$$q_i = (A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1}(C_i \cdot q_{i-1} + d_i) \tag{A.18}$$

Desta forma, os coeficientes internos do algoritmo de Mendes *et al.* (2002) são expressos pela equação (A.19)

$$A(i) = \begin{bmatrix} \dfrac{\Delta x}{\Delta t} + \dfrac{D_{\theta e}}{\delta x_e} + \dfrac{D_{\theta w}}{\delta x_w} & \dfrac{D_{Te}}{\delta x_e} + \dfrac{D_{Tw}}{\delta x_w} \\ L\rho_l\left(\dfrac{D_{\theta ve}}{\delta x_e} + \dfrac{D_{\theta vw}}{\delta x_w}\right) & \left(\dfrac{\lambda_e}{\delta x_e} + \dfrac{LD_{Tve}}{\delta x_e} + \dfrac{\lambda_w}{\delta x_w} + \dfrac{LD_{Tvw}}{\delta x_w} + \rho_0 c_m \dfrac{\Delta x}{\Delta t}\right) \end{bmatrix},$$

$$B(i) = \begin{bmatrix} \dfrac{D_{\theta e}}{\delta x_e} & \dfrac{D_{Te}}{\delta x_e} \\ L\rho_l \dfrac{D_{\theta ve}}{\delta x_e} & \left(\dfrac{\lambda_e}{\delta x_e} + \dfrac{LD_{Tve}}{\delta x_e}\right) \end{bmatrix},$$

$$C(i) = \begin{bmatrix} \dfrac{D_{\theta w}}{\delta x_w} & \dfrac{D_{Tw}}{\delta x_w} \\ L\rho_l \dfrac{D_{\theta vw}}{\delta x_w} & \left(\dfrac{\lambda_w}{\delta x_w} + \dfrac{LD_{Tvw}}{\delta x_w}\right) \end{bmatrix},$$

$$D(i) = \begin{bmatrix} \dfrac{\Delta x}{\Delta t}\theta_P^o \\ \rho_0 c_m \dfrac{\Delta x}{\Delta t} T_P^o \end{bmatrix} \tag{A.19}$$

A.5 Modelos de Umidade

O Domus – Eletrobras apresenta 6 modelos de umidades em sua interface para efetuar os cálculos durante o período de simulação. Estes modelos são referentes as simplificações adotadas. A Tabela A-1 apresenta estas simplificações.

Modelo	Hipóteses
0	Nenhuma Simplificação
1	$V_\Theta = 0$
2	V_Θ , $V_T = 0$
3	V_Θ , $V_T = 0$, λ = constante
4	$V_\Theta = 0$, $V_T = 0$ e D_T , D_Θ c_m e λ = constante
5	D_T , D_Θ , $D_{T\Theta}$, $D_{\Theta V} = 0$ e c_m , λ = constante

Tabela A-1 Hipóteses adotada nos modelos de umidade do Domus – Eletrobras.

Sendo λ a condutividade térmica (W/(m K)), c_m o calor específico do material poroso, D_T o coeficiente de transporte de umidade associado a um gradiente de temperatura ($D_{TV} + D_{TL}$), D_{TV} o coeficiente de transporte líquido associado a um gradiente de temperatura (m^2/(s K)), D_Θ o coeficiente de transporte de umidade associado a um gradiente de conteúdo de umidade ($D_{\Theta V} + D_{\Theta L}$), $D_{\Theta V}$ o coeficiente de transporte de vapor associado a um gradiente de conteúdo de umidade (m^2/s), $D_{\Theta L}$ o coeficiente de transporte de líquido associado a um gradiente de conteúdo de umidade (m^2/s), $V_T = L(t)\rho_l \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{TV}(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial \theta}\right)$ e $V_\theta = L(t)\rho_l \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{\theta V}(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial \theta}\right)$ (Mendes, 1997).

APÊNDICE B – APARATO FÍSICO EXPERIMENTAL

Silva (2017) utilizou a câmara de climatização (Figura B-1) do LST da PUCPR para realizar as medições de MBV.

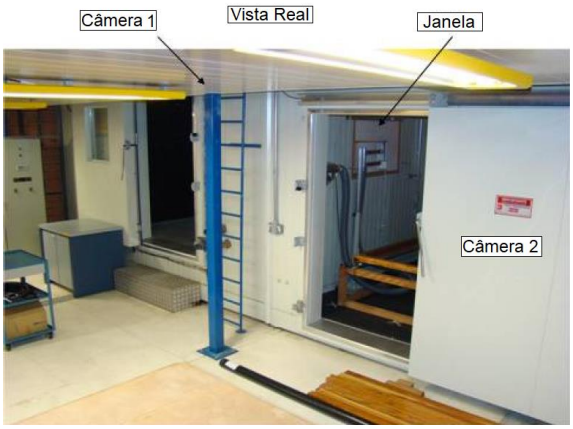

Figura B-1 Câmera climática do LST da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Meissner, 2008).

A Câmara 1 controla as propriedades do ambiente e o escoamento para a célula que está na Câmera 2. A célula-teste é composta por placas de madeiras fixadas na estrutura (Figura B-2) também de madeira e impermeabilizada com papel de alumínio a fim de evitar a transferência de umidade. Meissner (2008) fez uma construção com medidas internas de 2020 x 2020 x 2005 mm, Silva (2017) modificou toda estrutura para medidas externas de 890 mm de largura, comprimento e profundidade. A célula-teste está suspensa em 0,50 m para viabilizar escoamento de ar na parte inferior.

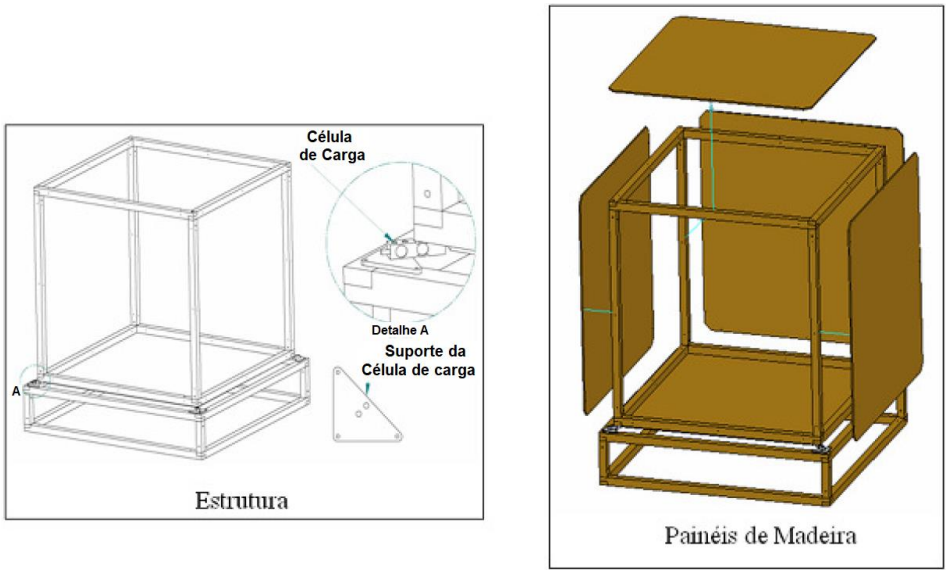

Figura B-2 Célula-teste experimental (Meissner, 2008).

O interior da célula-teste de Meissner (2008) é dividida em 9 zonas sensoriais, são posicionados sensores de temperatura e umidade do ar em cada uma. Em sua base são posicionadas células de cargas para medição de massa. Uma bancada psicométrica controla as propriedades do experimento (Figura B-3). Silva (2017) reduziu as dimensões da célula-teste e utilizou menos sensores.

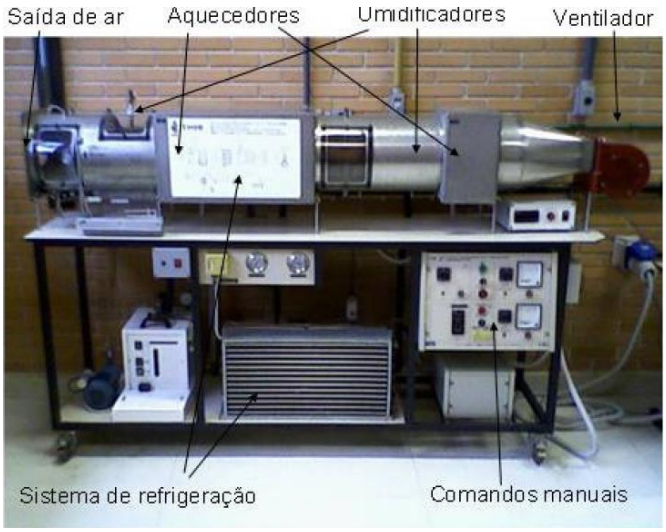

Figura B-3 Bancada psicrométrica (Meissner, 2008).

O escoamento de ar tem sua temperatura e umidade de operação controlada pela bancada psicrométrica, que escoa da câmera 1 até a câmera 2 através de um duto de ar ligado a célula-teste.

APÊNDICE C – EXEMPLO DO MODELO EM MATLAB

Esta seção tem como objetivo mostrar um exemplo do código implementado em Matlab. O código abaixo foi escrito para um dos casos de simulação. Neste específico utilizou-se a isoterma de Osanyintola *et al.* (2006) para a carga de umidade/temperatura do Protocolo NORDTEST, a umidade relativa inicial da amostra em 50%, espessura das placas em 15 mm, para o passo de tempo de 5 segundos e 150 nós de malha. Para outros parâmetros deve-se ajustar o código abaixo.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%     Modelo 1                                       %%%
%%%     Isoterma Osanyintola et al. (2006)              %%%
%%%     Carga de umidade - Protocolo Nordtest          %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
clc
format long g;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%       Informações da Malha      %%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
n=150; % Número de Nós da Malha
dias=7; %Número de Ciclos (Dias de simulação)
dt=5; %passo de tempo %segundos
L=0.015; % comprimento total em [m]
dx=L/n; % comprimento do nó interno
dx2=dx/2; % comprimento de meio nó

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
E_g=0.70; % Porosidade
ro_0=445; % Densidade Madeira compensada seca [kg/m^3]
UR0=0.50; % Umidade relativa inicial

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      ESCOLHA ORDEM CÍCLICA (ADS/DES) OU (DES/ADS)     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Adsorção --> Dessorção = 1
% Dessorção --> Adsorção = 2
% UR Constante = 3
sorption=1; %<== ESCOLHA ORDEM CÍCLICA (ADS/DES) OU (DES/ADS)
urx=0.75;
resp=1;
switch sorption
     case{1}
          higro1=28800/dt;
```

```
            higro2=57600/dt;
            ur1=0.75;
            ur2=0.33;
      case{2}
            higro1=57600/dt;
            higro2=28800/dt;
            ur1=0.33;
            ur2=0.75;
      case{3}
            higro1=43200/dt;
            higro2=43200/dt;
            %urx=ur_cte;
            ur1=urx;
            ur2=urx;
      otherwise
            resp=0;
end
if resp ==0
      clc
      disp('Configuração de adsorção/desorção Errada')
      break
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calculo do Coeficiente de transferência de Massa  h_m %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
P_sat_v=0.0282722*(10^5); %bar--> Pa
P_v_1=ur1*P_sat_v;
P_v_2=ur2*P_sat_v;

% Calculo do volume especifico
R_a=287; % J/kg*K
P_a=101325; % Pa
Temp = 296.15; % Temperatura em Kelvin
v_1=R_a*Temp/(P_a-P_v_1); % m^3/kg
v_2=R_a*Temp/(P_a-P_v_2); % m^3/kg

% Cálculo de Reynolds
ro_1=v_1^-1;
ro_2=v_2^-1;
vel=0.1; % m/s
L_board=0.73; %comprimento placa
mi=18.46*10^-6; %viscosidade do ar
Re_L_1=ro_1*vel*L_board/mi; % escoamento laminar
Re_L_2=ro_2*vel*L_board/mi; % escoamento laminar

% Cálculo de Sc
ro=(ro_1+ro_2)/2;
D_ab=0.24*10^-4;
Sc=mi/(ro*D_ab);
```

```
% Cálculo de Lewis
Pr=0.7;
Le=Sc/Pr;

% Cálculo do h_m
n_Le=1/3;
c_p_ar=1007;
h_int=3;
h_m=h_int/(ro*c_p_ar*Le^(1-n_Le));

%MASSA MOLAR (kg/kmol) Fonte: Incropera, Tabela A.4
M_mol=18.02;
% Constante R do vapor
R_v = 461.5; % J/(kg*K)
% Constante R universal dos gases (m^3 * bar)/(kmol K)
Rg=8.314*(10^-2);

% Constantes para cálculo Permeabilidade de vapor da madeira
compensada
a1=-2.3573*10^(-25);
b1=-8.1601*10^(-24);
% Constantes para cálculo Teor de Umidade
a=1.0147*10^-4;
b=0.2339;
c=0.06754;
d=-2.3603;
e=-0.06574;
f=1.1329;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%        Condição inicial dos nós - t=0 segundos                 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for ini=1:n
     %Peso específico (densidade de vapor)
     ro_v(ini)= UR0*P_sat_v/(R_v*Temp);
     %Umidade Relativa
     UR(ini)=UR0;
     % Teor de umidade
     u(ini)=(a+c*UR0+e*UR0^2)/(1+b*UR0+d*UR0^2+f*UR0^3);
     % Permeabilidade
     Perm(ini)=(a1+b1*UR(ini)/(log(UR(ini))))^(1/2);
     %Coeficiente de Difusão em meio poroso
     D_eff(ini)=R_v*Temp*Perm(ini);
     %Derivada Teor de Umidade
du_dphy(ini)=((c+2*e*UR(ini))*(1+b*UR(ini)+d*UR(ini)^2+f*UR(in
i)^3)-
(a+c*UR(ini)+e*UR(ini)^2)*(b+2*d*UR(ini)+3*f*UR(ini)^2))/((1+b
*UR(ini)+d*UR(ini)^2+f*UR(ini)^3)^2);
     %Moisture Storage Coefficient
     C_m(ini)=E_g+ro_0*R_v*Temp/P_sat_v*du_dphy(ini);
     % alpha - Effetive Moisture Diffusivity
```

```
     alfa(ini)=D_eff(ini)/C_m(ini);
end

% Fluxo mássico n" [kg/(s*m^2)]
flu=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Indexar condição inicial aos relatorios txt - t=0 seg %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cont=1; % contador para gerar arquivos de dados
for i=1:n
     arq_ro(cont,i)=[ro_v(i)];
     arq_ur(cont,i)=[UR(i)];
     arq_u(cont,i)=[u(i)];
     arq_Perm(cont,i)=(a1+b1*UR(i)/(log(UR(i))))^(1/2);
     arq_deff(cont,i)=R_v*Temp*Perm(i);
     arq_du_dphy(cont,i)=((c+2*e*UR(i))*(1+b*UR(i)+d*UR(i)^2+f*
UR(i)^3)-
(a+c*UR(i)+e*UR(i)^2)*(b+2*d*UR(i)+3*f*UR(i)^2))/((1+b*UR(i)+d
*UR(i)^2+f*UR(i)^3)^2);
     arq_C_m(cont,i)=E_g+ro_0*R_v*Temp/P_sat_v*du_dphy(i);
     arq_alfa(cont,i)=D_eff(i)/C_m(i);
end
arq_flu(cont)=flu;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%     Inicio das iterações, equações discretizadas      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for ciclo=1:dias
     clc
     disp('   '); disp('   '); disp('   '); disp('   ');
disp('   ')
     disp(['Simulando o Ciclo de número ',num2str(ciclo),' do
total de ',num2str(dias)])
     %<----------------------carga ciclica UR a 75% em 8 horas
     %densidade da carga ciclica
     ro_inf=ur1*P_sat_v/(R_v*Temp);
     it=higro1; %numero de iterações

          for j=1:it

               for k=1:n
                    %Umidade Relativa
                    UR(k)=ro_v(k)*R_v*Temp/P_sat_v;
                    %Permeabilidade
                    Perm(k)=(a1+b1*UR(k)/(log(UR(k))))^(1/2);
                    %Coeficiente de Difusão em meio poroso
                    D_eff(k)=R_v*Temp*Perm(k);
                    %Derivada Teor de Umidade

du_dphy(k)=((c+2*e*UR(k))*(1+b*UR(k)+d*UR(k)^2+f*UR(k)^3)-
```

```
(a+c*UR(k)+e*UR(k)^2)*(b+2*d*UR(k)+3*f*UR(k)^2))/((1+b*UR(k)+d
*UR(k)^2+f*UR(k)^3)^2);
                    %Moisture Storage Coefficient

C_m(k)=E_g+ro_0*R_v*Temp/P_sat_v*du_dphy(k);
                    % alfa - Effetive Moisture Diffusivity
                    alfa(k)=D_eff(k)/C_m(k);
                    % Teor de umidade

u(k)=(a+c*UR(k)+e*UR(k)^2)/(1+b*UR(k)+d*UR(k)^2+f*UR(k)^3);
                end

                %Coeficientes das equações discretizadas para
i=1
                const1=(1-
dt/(dx*dx2)*alfa(1)+dt/(dx*dx2)*D_eff(1)/(D_eff(1)+h_m*dx2)*al
fa(1)-dt/(dx^2)*(2*alfa(1)*alfa(2))/(alfa(1)+alfa(2)));

const2=dt/(dx^2)*(2*alfa(1)*alfa(2))/(alfa(1)+alfa(2));

const3=(dt/(dx*dx2))*(h_m/(D_eff(1)/dx2+h_m))*alfa(1);
                %pause
                %Iteração Novos valores de Concentração
                %densidade vapor para i=1

ro_v_new(1)=const1*ro_v(1)+const2*ro_v(2)+const3*ro_inf;

                %densidade vapor para i=2:n-1
                for i=2:n-1
                    cte1=(2*alfa(i-1)*alfa(i))/(alfa(i-
1)+alfa(i))*(dt/(dx^2));

cte2=(2*alfa(i)*alfa(i+1))/(alfa(i)+alfa(i+1))*(dt/(dx^2));
                    ro_v_new(i)=cte1*ro_v(i-1)+(1-cte1-
cte2)*ro_v(i)+cte2*ro_v(i+1);
                end

                %Concentração para i=n
                ro_v_new(n)=(2*alfa(n-1)*alfa(n))/(alfa(n-
1)+alfa(n))*(dt/(dx^2))*ro_v(n-1)+(1-(2*alfa(n-
1)*alfa(n))/(alfa(n-1)+alfa(n))*(dt/(dx^2)))*ro_v(n);
                ro_v=ro_v_new;

                %Calcular Fluxo Mássico n" = flu
                flu=-
((D_eff(1)*h_m)/(D_eff(1)+h_m*dx2)*ro_v(1)+((h_m^2)/(D_eff(1)/
dx2+h_m)-h_m)*ro_inf);

                %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                %                                           %
                %  Registro de dados calculados nesta It %
```

```
                %                                                 %
                %     - Densidade de Vapor                        %
                %     - Umidade Relativa                          %
                %     - Teor de Umidade                           %
                %     - Permeabilidade                            %
                %     - Coeficiente de Difusao efetivo            %
                %     - du_dphy                                   %
                %     - c_m                                       %
                %     - alfa                                      %
                %                                                 %
                %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                cont=cont+1;
                %pause
                for i=1:n
                     arq_ro(cont,i)=[ro_v(i)];
                     arq_ur(cont,i)=[UR(i)];
                     arq_u(cont,i)=[u(i)];

arq_Perm(cont,i)=(a1+b1*UR(i)/(log(UR(i))))^(1/2);
                     arq_deff(cont,i)=R_v*Temp*Perm(i);

arq_du_dphy(cont,i)=((c+2*e*UR(i))*(1+b*UR(i)+d*UR(i)^2+f*UR(i
)^3)-
(a+c*UR(i)+e*UR(i)^2)*(b+2*d*UR(i)+3*f*UR(i)^2))/((1+b*UR(i)+d
*UR(i)^2+f*UR(i)^3)^2);

arq_C_m(cont,i)=E_g+ro_0*R_v*Temp/P_sat_v*du_dphy(i);
                     arq_alfa(cont,i)=D_eff(i)/C_m(i);
                     arq_const(cont,1)=const1;
                     arq_const(cont,2)=const2;
                     arq_const(cont,3)=const3;
                end
                arq_flu(cont)=flu;

           end

           %<----------------carga ciclica UR a 33% em 16 horas

           %densidade da carga ciclica
           ro_inf=ur2*P_sat_v/(R_v*Temp);
           it=higro2; %numero de iterações

           for j=1:it

                for k=1:n
                     %Umidade Relativa
                     UR(k)=ro_v(k)*R_v*Temp/P_sat_v;
                     %Permeabilidade
                     Perm(k)=(a1+b1*UR(k)/(log(UR(k))))^(1/2);
                     %Coeficiente de Difusão em meio poroso
                     D_eff(k)=R_v*Temp*Perm(k);
```

```
                    %Derivada Teor de Umidade

du_dphy(k)=((c+2*e*UR(k))*(1+b*UR(k)+d*UR(k)^2+f*UR(k)^3)-
(a+c*UR(k)+e*UR(k)^2)*(b+2*d*UR(k)+3*f*UR(k)^2))/((1+b*UR(k)+d
*UR(k)^2+f*UR(k)^3)^2);
                    %Moisture Storage Coefficient

C_m(k)=E_g+ro_0*R_v*Temp/P_sat_v*du_dphy(k);
                    % alfa - Effetive Moisture Diffusivity
                    alfa(k)=D_eff(k)/C_m(k);
                    % Teor de umidade

u(k)=(a+c*UR(k)+e*UR(k)^2)/(1+b*UR(k)+d*UR(k)^2+f*UR(k)^3);
                end

                %Coeficientes das equações discretizadas para
i=1
                const1=(1-
dt/(dx*dx2)*alfa(1)+dt/(dx*dx2)*D_eff(1)/(D_eff(1)+h_m*dx2)*al
fa(1)-dt/(dx^2)*(2*alfa(1)*alfa(2))/(alfa(1)+alfa(2)));

const2=dt/(dx^2)*(2*alfa(1)*alfa(2))/(alfa(1)+alfa(2));

const3=(dt/(dx*dx2))*(h_m/(D_eff(1)/dx2+h_m))*alfa(1);
                %pause
                %Iteração Novos valores de Concentração
                %densidade vapor para i=1

ro_v_new(1)=const1*ro_v(1)+const2*ro_v(2)+const3*ro_inf;

                %densidade vapor para i=2:n-1
                for i=2:n-1
                    cte1=(2*alfa(i-1)*alfa(i))/(alfa(i-
1)+alfa(i))*(dt/(dx^2));

cte2=(2*alfa(i)*alfa(i+1))/(alfa(i)+alfa(i+1))*(dt/(dx^2));
                    ro_v_new(i)=cte1*ro_v(i-1)+(1-cte1-
cte2)*ro_v(i)+cte2*ro_v(i+1);
                end

                %Concentração para i=n
                ro_v_new(n)=(2*alfa(n-1)*alfa(n))/(alfa(n-
1)+alfa(n))*(dt/(dx^2))*ro_v(n-1)+(1-(2*alfa(n-
1)*alfa(n))/(alfa(n-1)+alfa(n))*(dt/(dx^2)))*ro_v(n);
                ro_v=ro_v_new;

                %Calcular Fluxo Mássico n" = flu
                flu=-
((D_eff(1)*h_m)/(D_eff(1)+h_m*dx2)*ro_v(1)+((h_m^2)/(D_eff(1)/
dx2+h_m)-h_m)*ro_inf);
```

```
               %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
               %                                        %
               %  Registro de dados calculados nesta It %
               %                                        %
               %      - Densidade de Vapor              %
               %      - Umidade Relativa                %
               %      - Teor de Umidade                 %
               %      - Permeabilidade                  %
               %      - Coeficiente de Difusao efetivo  %
               %      - du_dphy                         %
               %      - c_m                             %
               %      - alfa                            %
               %                                        %
               %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
               cont=cont+1;
               %pause
               for i=1:n
                    arq_ro(cont,i)=[ro_v(i)];
                    arq_ur(cont,i)=[UR(i)];
                    arq_u(cont,i)=[u(i)];

arq_Perm(cont,i)=(a1+b1*UR(i)/(log(UR(i))))^(1/2);
                    arq_deff(cont,i)=R_v*Temp*Perm(i);

arq_du_dphy(cont,i)=((c+2*e*UR(i))*(1+b*UR(i)+d*UR(i)^2+f*UR(i
)^3)-
(a+c*UR(i)+e*UR(i)^2)*(b+2*d*UR(i)+3*f*UR(i)^2))/((1+b*UR(i)+d
*UR(i)^2+f*UR(i)^3)^2);

arq_C_m(cont,i)=E_g+ro_0*R_v*Temp/P_sat_v*du_dphy(i);
                    arq_alfa(cont,i)=D_eff(i)/C_m(i);
                    arq_const(cont,1)=const1;
                    arq_const(cont,2)=const2;
                    arq_const(cont,3)=const3;
               end
               arq_flu(cont)=flu;

          end

end
clc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%              Gerar arquivos de dados TXT               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
save
C:\Users\Guilherme\Documents\Mestrado\Matlab\saved_data\densid
ade_vapor.txt arq_ro -ascii
save
C:\Users\Guilherme\Documents\Mestrado\Matlab\saved_data\umidad
e_relativa.txt arq_ur -ascii
```

```
save
C:\Users\Guilherme\Documents\Mestrado\Matlab\saved_data\conteu
do_umidade.txt arq_u -ascii
save
C:\Users\Guilherme\Documents\Mestrado\Matlab\saved_data\permea
bilidade.txt arq_Perm -ascii
save
C:\Users\Guilherme\Documents\Mestrado\Matlab\saved_data\coef_d
ifusao.txt arq_deff -ascii
save
C:\Users\Guilherme\Documents\Mestrado\Matlab\saved_data\du_dph
y.txt arq_du_dphy -ascii
save
C:\Users\Guilherme\Documents\Mestrado\Matlab\saved_data\C_m.tx
t arq_C_m -ascii
save
C:\Users\Guilherme\Documents\Mestrado\Matlab\saved_data\alfa.t
xt arq_alfa -ascii
save
C:\Users\Guilherme\Documents\Mestrado\Matlab\saved_data\fluxo.
txt arq_flu -ascii
save
C:\Users\Guilherme\Documents\Mestrado\Matlab\saved_data\coefic
ientes.txt arq_const -ascii
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                 Acumulo Umidade    [kg/m^2]                 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=1:cont
     % Acumulo Umidade
     au=sum(arq_u(i,:));
     m(i)=au*ro_0*dx;
     % Coordenada Tempo
     tempo(i)=(i-1)*(dt/3600);
end
% Plotando Gráfico
figure(1)
plot(tempo,m)
%title(['Massa/área de vapor de água na madeira no tempo -
',num2str(UR0*100),'% UR ini'])
axis([0 24 0.15 0.25])
xlabel('Horas')
ylabel('Massa vapor de água na madeira [kg/m^2]')
% Gerando Relatório
m=m';
save
C:\Users\Guilherme\Documents\Mestrado\Matlab\saved_data\acumul
o_umidade.txt m -ascii
disp('Simulação finalizada')
```