

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

AYRES SIQUEIRA SILVA

**ANÁLISE DO MÉTODO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE
MBV EM MATERIAIS HIGROSCÓPICOS**

CURITIBA

2017

AYRES SIQUEIRA SILVA

**ANÁLISE DO MÉTODO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE
MBV EM MATERIAIS HIGROSCÓPICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luís Mauro Moura

CURITIBA

2017

RESUMO

Um dos temas abordados nos estudos voltados para eficiência energética é a influência dos materiais higroscópicos no controle da variação da umidade relativa do meio através dos fenômenos de adsorção/dessorção da umidade. Devido à complexidade em caracterizar esses fenômenos no material poroso, surgiram diferentes métodos práticos para isso, o mais utilizado é um método simplificado que através da quantidade de umidade adsorvida/dessorvida pelo material obtém-se um índice chamado de MBV (*Moisture Buffer Value*). Neste trabalho são realizados ensaios com diferentes materiais higroscópicos seguindo o protocolo desenvolvido para determinação do índice MBV em uma câmara climatizada com temperatura e umidade relativa controlada, onde a umidade relativa varia ciclicamente em intervalos de 24 horas, com 8 horas de alta umidade relativa, 75% UR, e 16 horas com baixa umidade relativa, 33% UR e o índice MBV do material é determinado através da variação da massa da amostra entre os ciclos. Os resultados determinados de forma experimental seguindo o protocolo padrão são comparados com ensaios realizados com diferentes parâmetros, como teor de umidade inicial, tamanho da amostra e material com e sem isolante higroscópico, a fim de analisar a influência que esses parâmetros exercem na determinação do índice MBV. A variação do teor de umidade inicial influencia nos primeiros ciclos, mas em seguida os diferentes ensaios tendem ao equilíbrio.

Palavras-chave: Transferência de massa; Índice MBV; Inércia higroscópica.

ABSTRACT

One of the themes in studies on energy efficiency is the influence of hygroscopic materials in controlling the relative humidity of the medium through the adsorption/desorption phenomena. Due to the complexity in characterizing these phenomena in the porous material, different practical methods have arisen for this, the most used is the simplified method that through the amount of moisture adsorbed/desorbed by the material obtains an index called MBV (Moisture Buffer Value). In this study, have been done tests with different hygroscopic materials following the protocol developed to determine the MBV index in an air-conditioned room with temperature and controlled relative humidity, where the relative humidity varies cyclically in intervals of 24 hours, with 8 hours of high relative humidity, 75% RH, and 16 hours with low relative humidity, 33% RH and MBV index of the material is determined by varying the sample mass between cycles. The results determined experimentally following the standard protocol are compared with tests performed with different parameters, such as initial moisture content, sample size and material with and without hygroscopic insulation, thus analyzing the influence of these parameters on the determination of the MBV index. The variation of the initial moisture content influences the first cycles, but then the tests tend to balance.

Award: Mass transfer; MBV index; Hygroscopic inertia.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática de um meio poroso	16
Figura 2 – Representação do teor de umidade no interior do material poroso.....	17
Figura 3 – Representação dos mecanismos de transferência de umidade no poro..	19
Figura 4 – Histerese das curvas de adsorção/dessorção do material	22
Figura 5 – Câmara desenvolvida por Padfiel.....	23
Figura 6 – Classificação da Inércia Higroscópica segundo Nordtest.....	25
Figura 7 – Comparação entre os ciclos do Nordtest e JIS	27
Figura 8 – Diferentes equipamentos utilizados para medição do MBV	30
Figura 9 – Determinação do MBV prático através de medições dinâmicas	33
Figura 10 – Classificação do índice MBV	34
Figura 11 – Representação esquemática do aparato experimental	37
Figura 12 – Bancada psicrométrica dentro da câmara 1	39
Figura 13 – Sistema <i>by-pass</i>	40
Figura 14 – Representação do escoamento laminar e turbulento	43
Figura 15 – Estrutura de madeira da célula teste	44
Figura 16 – Ilustração real da célula teste.....	44
Figura 17 – Ilustração real do interior da célula teste.....	45
Figura 18 – Ilustração real da célula teste isolada do meio externo	45
Figura 19 – Projeto célula teste.....	46
Figura 20 – Interface do software supervisor.....	47
Figura 21 – Amostra dos materiais utilizados nos ensaios.....	48
Figura 22 – Variação da condição inicial dos ensaios.....	49
Figura 23 – Sistema de aquisição de dados.....	51
Figura 24 – Anemômetro.....	52
Figura 25 – Sensor Novus.....	52
Figura 26 – Erro de medição do transmissor da umidade relativa do ar	53
Figura 27 – Termopar tipo T	54
Figura 28 – Célula de carga HBM S40.....	55
Figura 29 – Variação da massa da célula teste com duração de 1 hora.....	59
Figura 30 – Controle da temperatura do compensado, primeiro ensaio.....	65
Figura 31 – Controle da umidade relativa do compensado, primeiro ensaio.....	66
Figura 32 – Variação da massa da célula teste do compensando, primeiro ensaio..	66

Figura 33 – Controle da temperatura, segundo ensaio	67
Figura 34 – Controle da umidade relativa segundo ensaio	67
Figura 35 – Variação da massa da célula teste segundo ensaio	68
Figura 36 – Controle da temperatura terceiro ensaio	68
Figura 37 – Controle da umidade relativa terceiro ensaio	68
Figura 38 – Variação da massa da célula teste terceiro ensaio	69
Figura 39 – Variação das massas do compensado.....	70
Figura 40 – Adsorção e dessorção do compensado.	71
Figura 41 – Variação da massa nos ciclos 01 e 05.	72
Figura 42 – Análise MBV compensado	74
Figura 43 – Controle da temperatura – <i>drywall standard</i>	76
Figura 44 – Controle da umidade relativa – <i>drywall standard</i>	76
Figura 45 – Variação da massa do – <i>drywall standard</i>	77
Figura 46 – Controle da temperatura – <i>drywall</i> “verde”	78
Figura 47 – Controle da umidade relativa – <i>drywall</i> “verde”	78
Figura 48 – Variação da massa – <i>drywall</i> “verde”	78
Figura 49 – Variação da massa inicial do <i>drywall</i> verde.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – MBV para compensado	13
Tabela 2 – Proposta de classificação de acordo com a inércia higroscópica.....	24
Tabela 3 – Materiais utilizados pelas Universidades no Round Robin.	31
Tabela 4 – Parâmetros para determinação do número de Reynolds	42
Tabela 5 – Natureza do escoamento	42
Tabela 6 – Valores do controlador PID	47
Tabela 7 – Instrumentação empregada nos ensaios do índice MBV	50
Tabela 8 – Incerteza de medição do sistema de aquisição de dados	51
Tabela 9 – Incerteza de medição da equação das células de carga.....	56
Tabela 10 – Incerteza de medição da célula de carga.	58
Tabela 11 – Incerteza de medição da massa total.	59
Tabela 12 – Área da célula teste em função do lado.	60
Tabela 13 – Valores para cálculo da incerteza de medição da área total.	61
Tabela 14 – Incerteza de medição da área.	61
Tabela 15 – Valores para cálculo da incerteza de medição do MBV.	62
Tabela 16 – Incerteza de medição do índice MBV.	63
Tabela 17 – Valores de adsorção/dessorção do compensado.....	71
Tabela 18 – MBV compensado padrão.	73
Tabela 19 – MBV compensado úmido.	73
Tabela 20 – MBV compensado seco.....	73
Tabela 21 – MBV compensado.	74
Tabela 22 – MBV <i>drywall standard</i>	80
Tabela 23 – MBV <i>drywall verde</i>	80
Tabela 24 – MBV <i>drywall</i>	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO ₂	Gás Carbônico
DTU	<i>Technical University of Denmark</i>
HVAC	<i>Heating, ventilating and air conditioning</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standard</i>
LTH	<i>Lund University, Sweden</i>
MBC	<i>Moisture Buffer Capacity</i>
MBV	<i>Moisture Buffer Value</i>
NBI	<i>Norwegian Building Research Institute</i>
OMS	Organização Mundial de Saúde
QAI	Qualidade do ar interno
UR	Umidade Relativa
VTT	<i>Technical Research Centre of Finland</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

b_m	Efusividade mássica – [kg/(m ² ·Pa·s ^{1/2})]
D	Coeficiente de difusão do vapor d'água no ar – [m ² /s]
g	Gravidade
g_t	Densidade do fluxo de massa total – [kg/(m ² s)]
g_l	Densidade do fluxo de líquido – [kg/(m ² s)]
g_v	Densidade do fluxo de vapor – [kg/(m ² s)]
K	Condutividade hidráulica pura – [m/s]
k	Permeabilidade absoluta – [m ²]
k_{rg}	Permeabilidade ao vapor relativo – [-]
MBV	<i>Moisture Buffer Value</i> – [kg/(m ² ·%UR)]
P_s	Pressão de saturação – [Pa]
P_{suc}	Pressão de sucção – [Pa]
P_v	Pressão de vapor – [Pa]
t	Tempo – [s]
T	Temperatura – [K]
t_p	Tempo de adsorção/dessorção de umidade – [s]
u	Quantidade de umidade no material – [kg/kg]
w	Teor de umidade – [kg/m ³]
w_{cap}	Saturação Capilar – [kg/m ³]
w_{cr}	Conteúdo de umidade crítico – [kg/m ³]
w_s	Conteúdo de umidade saturado – [kg/m ³]
δ_v	Permeabilidade ao vapor d'água – [m ² /s]
μ	Fator de resistência à difusão do vapor d'água – [-]
ρ_0	Massa específica do material seco – [kg/m ³]
ϕ	Umidade relativa – [%]

Subíndice

l	Líquido
m	Mássica
v	Vapor
rg	Vapor relativo
s	Saturado
suc	Sucção
cap	Capilar
cr	Crítico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO DO TRABALHO	14
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	MEIO POROSO.....	16
2.2	TRANSFERÊNCIA DE MASSA.....	18
2.2.1	Difusão	19
2.2.2	Sucção Capilar.....	20
2.2.3	Modelo Matemático	21
2.2.4	Histerese	21
2.3	ESTUDOS EXISTENTES	22
2.4	PROJETO NORDTEST (RODE, 2005)	30
2.4.1	Índice Moisture Buffer Value (MBV)	31
2.4.1.1	MVB Ideal	31
2.4.1.2	MBV Prático.....	32
2.4.1.3	Classificação dos materiais pelo índice MBV	34
2.4.2	Protocolo de Teste	34
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	APARATO EXPERIMENTAL	36
3.1.1	Calorímetro	37
3.1.2	Bancada Psicrométrica	38
3.1.3	Duto de Insuflamento de Ar	40
3.1.4	Célula Teste	43
3.1.5	Software Supervisório.....	46
3.1.6	Material	48
3.1.7	Metodologia de Ensaio.....	49
4	ANÁLISE DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.....	50
4.1	INSTRUMENTAÇÃO	50
4.1.1	Sistema de aquisição de dados.....	50
4.1.2	Medição da velocidade do ar	51
4.1.3	Transmissor de umidade relativa do ar	52
4.1.4	Termorresistência PT-100	53

4.1.5	Termopar tipo T	54
4.1.6	Célula de carga de 50 kg	55
4.1.7	Área da célula teste	56
4.2	PROPAGAÇÃO DOS ERROS.....	56
4.2.1	Medição da massa	57
4.2.2	Medição da umidade relativa.....	59
4.2.3	Medição da área das paredes da célula teste	60
4.2.4	Incerteza de medição do índice MBV.....	61
5	RESULTADOS	64
5.1	COMPENSADO.....	64
5.1.1	Influência da umidade inicial no índice MBV	67
5.1.2	Comparação dos ensaios do compensado.....	70
5.1.3	Índice MBV - Compensado	72
5.2	DRYWALL	75
5.2.1	Ensaio <i>drywall standard</i>	75
5.2.2	Ensaio <i>drywall verde</i>	77
5.2.3	Índice MBV – <i>Drywall</i>	80
6	CONCLUSÃO.....	82
	REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

O grande crescimento do mercado imobiliário no Brasil fez com que surgissem diversos empreendimentos, tanto residenciais quanto comerciais, junto com eles dois temas importantes, o conforto térmico dos indivíduos e a eficiência energética das edificações.

A grande maioria dos edifícios comerciais trabalham com sistemas de condicionamento de ar artificial: *heating, ventilation, and air conditioning systems* (HVAC); O problema desses sistemas é que apresentam um alto índice de consumo energético, consumindo cerca de 50% da energia das edificações e de 10-20% da energia elétrica produzida anualmente no mundo (MAHMUD, 2010), em épocas quentes e úmidas esses números sobem para 20-40% (ZHANG, 2012).

Os primeiros estudos sobre qualidade do ar e conforto térmico começaram no século 19 quando isso se tornou um tema importante, o primeiro engenheiro a começar com esses estudos foi Max von Pettenkofer que realizou pesquisas sobre a relação entre ventilação, concentração de CO₂ e qualidade do ar interno (HENS, 2012). Nos dias atuais o conforto térmico ao qual uma pessoa está sujeita no ambiente interno é normatizado através da Norma Internacional ISO 7730, a qual é baseada em Fanger (1970), que foi o primeiro a realizar estudos em câmaras climatizadas, analisando as respostas psicofisiológicas relativas à percepção térmica de um grande grupo de pessoas quando submetidos a variações ambientais efetuadas em câmara climatizada (XAVIER, 2000).

O conforto associado à qualidade do ar interno (QAI) está relacionado com uma complexa combinação de fatores, como, as fontes de poluição do ar (interiores ou exteriores; físicas, químicas ou biológicas) e suas interações, as condições ambientais, os materiais e a estrutura do edifício, as atividades, o comportamento e o número dos ocupantes, os sistemas HVAC, taxa de renovação de ar e até mesmo a percepção sensorial de cada indivíduo (COSTA, 2011).

Diversos problemas relacionados à QAI são mundialmente reconhecidos como um fator de risco para a saúde humana e uma importante questão de Saúde Pública (NUNES *et al.*, 2005; QUADROS *et al.*, 2009). A Organização Mundial da Saúde (OMS) apontou a poluição do ar de interiores como responsável por 2,7% dos casos de doenças respiratórias e alérgicas no mundo, causadas principalmente pela presença de aerossóis no ambiente (WHO, 2009).

No passado, os sistemas de condicionamento de ar dos edifícios eram projetados apenas para garantir os requisitos necessários para a salubridade do ambiente independente do consumo de energia, foi assim até a primeira grande crise energética mundial que ocorreu no início da década de 70, onde a produção de petróleo entrou em crise e os estudos sobre conservação de energia começaram a ganhar destaque. (BASTO, 2007).

Com a atenção especial que foi dada a eficiência energética, nessa época, diversos softwares começaram a serem desenvolvidos para simular o comportamento termoenergético de edificações e para adotar políticas racionais de conservação de energia, mas, devido a simplificações nos processos fluidos térmicos presentes, esses softwares apresentavam uma grande discrepância em relação ao que de fato ocorre com relação aos fenômenos termofísicos das edificações (MENDES, 1997), uma dessas simplificações diz respeito à capacidade de adsorção e dessorção de umidade pelos materiais porosos.

Com estudos aprofundados sobre o comportamento higroscópico do material poroso utilizado na construção, é possível usar essa capacidade do material de adsorção/dessorção da umidade a favor da eficiência energética dos edifícios, melhorando a sensação de conforto térmico, diminuindo a variação da umidade relativa (UR) e o consumo energético com sistemas de condicionamento de ar (RODE, 2008). O problema em caracterizar essa capacidade dos materiais está na complexidade dos fenômenos termofísicos envolvidos no processo de transferência de massa no interior do material poroso (ABADIE; MENDONÇA, 2009).

Com o objetivo de padronizar e quantificar os materiais higroscópicos, em 2002 o instituto *Japanese Industrial Standard* (JIS) apresenta um protocolo baseado na variação da umidade relativa e da massa da amostra. Mais tarde, durante o projeto Nordtest, Rode (2005) define o índice MBV [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{UR})$] (*Moisture Buffer Value*) com o objetivo de caracterizar os materiais higroscópicos de acordo com sua capacidade de adsorção/dessorção de umidade do/para o meio, junto com o índice foi apresentado um protocolo de teste para a determinação do índice MBV de forma experimental, porém sem uma definição clara do tamanho da área de transferência de massa que deve ser utilizada.

Durante o desenvolvimento de um aparato experimental para a avaliação da inércia higroscópica, Meissner (2008) realizou testes com uma célula teste de 2m x 2m x 2m, feita de chapas de compensado com espessura de 0,015 m e área de

transferência de massa de aproximadamente 24 m^2 , um um furo lateral superior para insuflamento de ar e um furo lateral inferior para saída de ar, essa célula teste é colocada dentro de um calorímetro composto por duas câmaras independentes, com controle de temperatura e umidade relativa.

Dentro da célula teste foi colocado uma balança de precisão e uma pequena amostra do mesmo material, com área de transferência de massa de aproximadamente $0,08 \text{ m}^2$. Foram realizados dois ensaios diferentes, um com a célula teste sem isolamento externo e outra com isolamento, revestida com folhas de alumínio. O valor do índice MBV obtido para a célula teste sem isolamento foi quase duas vezes maior que a com isolamento, assim como o índice obtido para a amostra do material no interior da célula teste que foi aproximadamente dez vezes menor para a célula teste sem isolamento e cinco vezes menor com isolamento, essas diferenças dos índices é apresentada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – MBV para compensado

MBV [kg/(m²·%UR)]	Ensaio sem isolamento	Ensaio com isolamento
Amostra	$10,5 \cdot 10^{-5} \pm 6,5 \cdot 10^{-6}$	$10,6 \cdot 10^{-5} \pm 6,5 \cdot 10^{-6}$
Célula	$10,0 \cdot 10^{-4} \pm 4,0 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-4} \pm 4,0 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Meissner, 2008.

Embora o comportamento da célula teste e da amostra apresentem uma curva de adsorção/dessorção semelhante às curvas obtidas por Rode (2005), os valores do índice MBV obtidos por Meissner (2008) para o compensado foram diferentes, dessa forma, alguns fatores podem ter influenciado na determinação do índice MBV do material.

Um fator que pode ser considerado é o tamanho da amostra, nos testes realizados por Rode, as amostras eram relativamente pequenas, com uma área de transferência de massa variando entre $0,01$ a $0,08 \text{ m}^2$ aproximadamente, tamanho parecido com o da amostra utilizada por Meissner, porém, bem menor que a célula teste. Outro fator a considerar é o fato da amostra estar dentro da célula teste, desta forma, o controle cíclico da umidade relativa não funciona para a amostra, já que, o meio externo da amostra não é uma câmara climatizada e sim o interior da célula

teste, onde o material já está adsorvendo/dessorvendo a umidade interior, influenciando diretamente o resultado da amostra.

Portanto é clara a relação entre o índice MBV da célula teste e da amostra, justificando os estudos realizados sobre o índice dos diferentes materiais e dos parâmetros que exercem influência. Principalmente para a escolha do material mais apropriado em diferentes situações, onde pode ocorrer a necessidade de interação entre a umidade do material ou não.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é analisar diferentes parâmetros e a influência que cada um exerce na determinação do índice MBV prático, esses parâmetros são a variação do conteúdo de umidade inicial no interior do material e o uso ou não de um isolante higroscópico nas superfícies.

O índice MBV da célula teste do compensado obtido por Meissner (2008) é comparado com o índice MBV de uma nova célula teste de mesmo material, com área de transferência de massa aproximadamente oito vezes menor e assim avalia-se a influência que a área de transferência de massa têm em relação ao índice MBV.

Outro objetivo deste trabalho é analisar a influência que o teor de umidade presente no interior do material exerce na determinação do índice MBV prático. Para isso são realizados ensaios em 3 condições iniciais diferentes, um ensaio padrão seguindo o protocolo de teste Nordtest com teor de umidade inicial de 50% UR, um ensaio com o material seco com teor de umidade inicial de 33% UR e outro com o material úmido com teor de umidade inicial de 75% UR.

Além do compensado, também são realizados ensaios com outros dois materiais, *drywall standard* e *drywall verde*, onde o *drywall verde* apresenta um revestimento superficial que funciona como isolante higroscópico, com isso se compara o comportamento dos diferentes tipos de materiais.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 é apresentado o material poroso e alguns fenômenos de transferência de massa no seu interior, estudos voltados para a determinação da capacidade dos materiais higroscópicos em adsorver/dessorver umidade do meio, o

projeto Nordtest e os conceitos dos índices MBV prático e ideal, juntamente com o protocolo de teste para sua determinação.

No Capítulo 3 detalha-se o aparato experimental, com seus componentes e o funcionamento de cada um. Também é apresentada a metodologia de ensaio, os materiais utilizados e as variações do teor de umidade inicial presente no material.

No Capítulo 4 é apresentado toda a instrumentação utilizadas nos ensaios, tanto para monitoramento quanto controle do aparato experimental, a incerteza de medição de cada instrumento e os cálculos para a determinação da incerteza de medição do índice MBV prático.

No Capítulo 5 são mostrados os ensaios realizados, os gráficos de controle das condições psicrométricas de insuflamento e no interior da célula teste, os gráficos de adsorção e dessorção de umidade, a determinação do índice MBV e a comparação para as diferentes condições propostas.

No Capítulo 6 são realizadas as considerações finais e a conclusão do presente trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MEIO POROSO

Todo material sólido apresenta um grau de porosidade, detectável ou não, resultante da presença de cavidades, canais ou interstícios (HURT, 2001), esses materiais porosos são encontrados nas edificações através de tijolos, argamassa, telhas, concreto, arenito, madeira, etc. (MENDES, 1997).

Os poros são espaços livres no interior da estrutura sólida do material, sua porosidade exerce influência sobre suas propriedades físicas, tais como: massa específica, condutividade térmica e resistência mecânica (FERREIRA, 2007), o material poroso pode ser representado como na Figura 1, com seu espaço preenchido por grãos e poros.

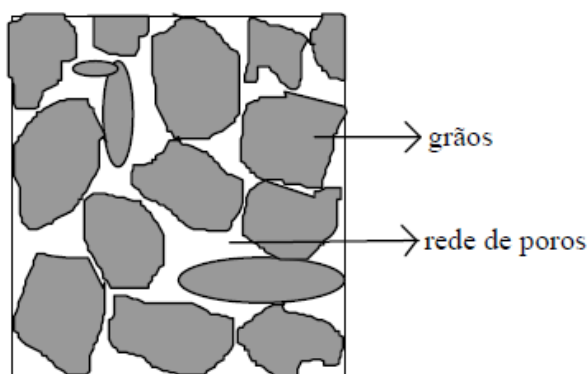


Figura 1 – Representação esquemática de um meio poroso
Fonte: Mendes, 1997.

Essa estrutura porosa dos materiais faz com que eles tenham a capacidade de adsorver/dessorver umidade do meio quando ocorre uma variação na umidade relativa. Isso ocorre devido às forças intermoleculares, conhecidas como forças de *Van der Waals*, que atuam no interior dos poros, esses materiais que adsorvem/dessorvem umidade são ditos materiais higroscópicos (GONÇALVES, 2011).

O interior desses materiais normalmente é composto por três fases, (COUASNET, 1989):

- Fase sólida, referente à estrutura do material;
- Fase líquida, referente à água contida nos poros;
- Fase gasosa, referente aos gases no interior dos poros.

O material poroso pode adsorver umidade do meio de duas formas, através do vapor d'água ou da água em seu estado líquido. Existe uma quantidade máxima de água que o material é capaz de armazenar através da troca de umidade com o meio pelo vapor d'água, isso pode ocorrer quando a umidade relativa do ar varia entre 0% (ambiente totalmente seco) até 98% (quase saturado), quando o material atinge o teor de umidade crítico, w_{cr} [kg/m³], esse intervalo é determinado como o domínio higroscópico de adsorção do material. Para o material armazenar mais água, é necessário estar em contato direto com ela em seu estado líquido por um longo período de tempo, nesse caso ocorre o fenômeno de sucção capilar até o limite máximo que o material é capaz de armazenar umidade, chamado de teor de umidade de saturação capilar, w_{cap} [kg/m³]. (HAGENTOFT, 2001)

A Figura 2 mostra a parte sólida do material e o volume total dos seus poros, onde são representados os diferentes teores de umidade no material e sua respectiva quantidade de água armazenada. É possível visualizar o domínio higroscópico da adsorção, que ocorre quando a umidade relativa varia de 0 a 98% atingindo o teor de umidade crítica w_{cr} , em seguida com o material em contato direto com a água no estado líquido, consegue fixar uma maior quantidade no seu interior até ocorrer à saturação capilar w_{cap} , se todos os poros fossem preenchidos o teor de umidade do material encontraria-se saturado w_s , mas isso dificilmente ocorre devido à facilidade com que o ar fica aprisionado nos poros (RAMOS, 2007).

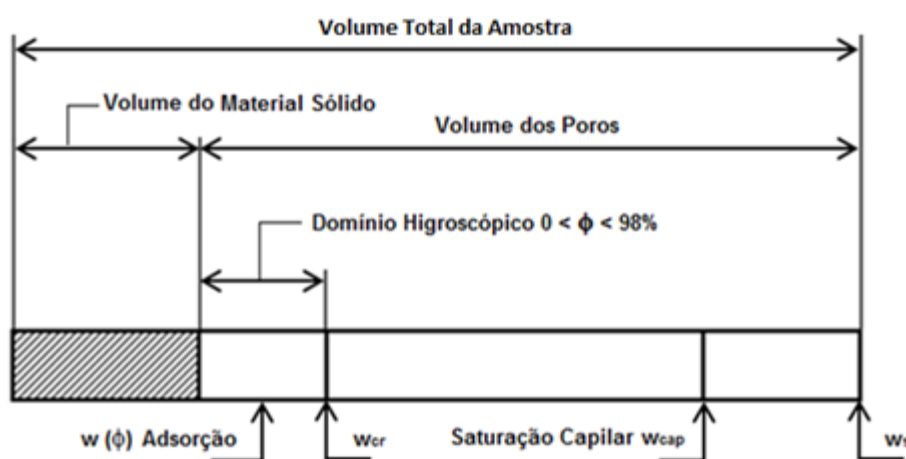


Figura 2 – Representação do teor de umidade no interior do material poroso
Fonte: Adaptado Hagentoft, 2001.

Para melhor compreensão do fenômeno de adsorção/dessorção de umidade pelo material poroso é necessário compreender o que acontece com a umidade no interior do material, dessa forma, na sequência deste capítulo é apresentado o fenômeno da transferência de massa no interior do material poroso.

2.2 TRANSFERÊNCIA DE MASSA

A transferência de umidade no interior do material poroso é uma complexa interação entre os diferentes mecanismos de transferência de massa (PEUHKURI, 2003), no decorrer deste capítulo são apresentadas duas formas de transferência de massa para fenômenos que ocorrem de forma isotérmica. O fenômeno da difusão que é a transferência de vapor d'água e a sucção capilar que é o transporte da água líquida. A taxa de fluxo de massa no poro é a soma desses dois fluxos, vapor e líquido, representada pela Equação (1):

$$g_t = g_l + g_v \quad (1)$$

onde: g_t é a taxa de fluxo de massa total [kg/(m²s)];

g_l é a taxa de fluxo de líquido [kg/(m²s)];

g_v é a taxa de fluxo de vapor [kg/(m²s)];

A Figura 3 ilustra diferentes mecanismos de transferência de umidade no meio poroso: i) devido à baixa concentração de umidade no poro, ocorre apenas difusão do vapor d'água; ii) com o aumento da concentração de umidade no momento em que o vapor d'água passa por um espaço menor no poro, ocorre um aumento da pressão parcial e o vapor d'água condensa, ocorrendo o fenômeno da migração capilar e com a diminuição da pressão parcial a água vaporiza novamente, desta forma, ocorre a transferência de vapor d'água e água líquida simultaneamente em série; iii) ocorre o mesmo que na imagem anterior, só que, com uma concentração de umidade maior, o vapor d'água interage com a parede do poro por difusão, com isso a transferência de umidade ocorre em paralelo; iv) com os poros completamente saturados, ocorre o fluxo da água no seu estado líquido.

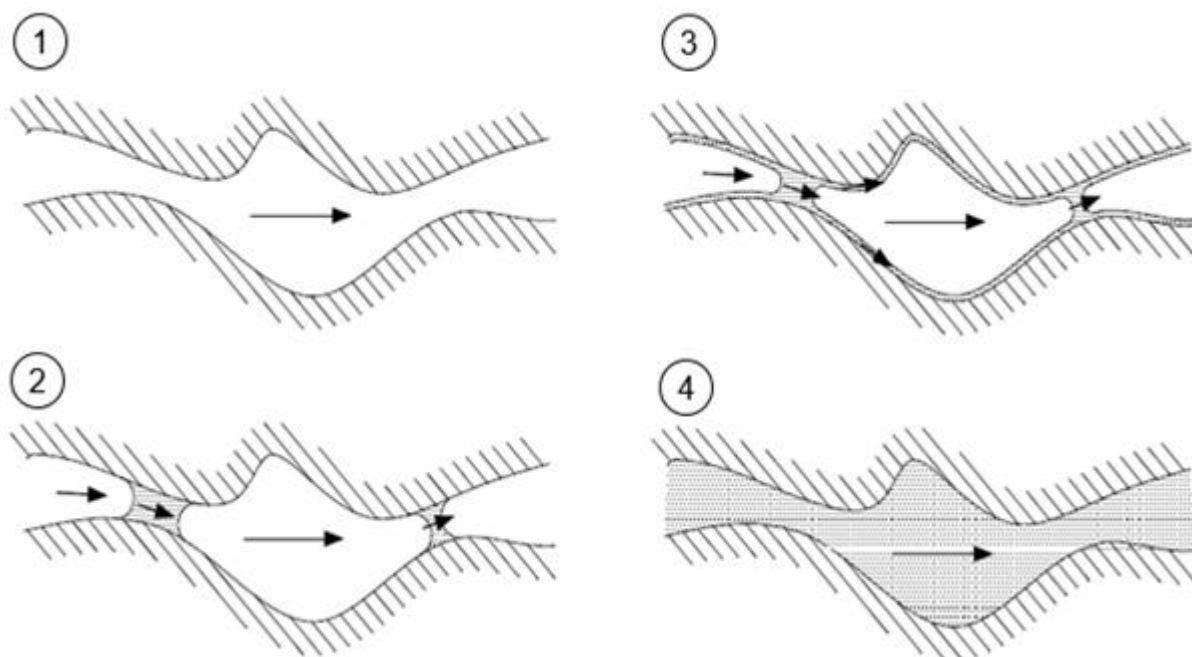


Figura 3 – Representação dos mecanismos de transferência de umidade no poro
Fonte: Adaptado Peuhkuri, 2003.

2.2.1 Difusão

O fenômeno da difusão molecular ocorre devido ao gradiente de concentração, as moléculas mais concentradas vão exercer uma atividade molecular maior colidindo com as moléculas menos concentradas, fazendo com que ocorra a transferência de vapor d'água, isso ocorre até que o sistema entre em estado estacionário (TREYBAL, 1980), em materiais porosos as moléculas de água também colidem com as paredes dos poros (RAMOS, 2007).

A primeira lei de Fick estabelece uma relação entre o fluxo de água e um gradiente de concentração no estado estacionário, que pode expressar a transferência de vapor d'água em meios porosos através do fluxo difusivo (HAGENTOFT, 2001).

O fluxo de vapor é calculado em função da primeira lei de Fick, considerando o potencial da condução térmica, pressão de vapor saturado e o gradiente de pressão do ar. Conforme a Equação (2) Santos e Mendes (2009):

$$\vec{g}_v = -\delta_v \cdot \vec{\nabla} P_v - \rho_v \cdot \frac{k k_{rg}}{\mu_g} \cdot \vec{\nabla} P_g \quad (2)$$

onde: δ_v é a permeabilidade ao vapor d'água [m^2/s];

P_v é a pressão parcial de vapor [Pa];

ρ_v é a massa específica do vapor [kg/m^3];

k é a permeabilidade absoluta [m^2];

k_{rg} é a permeabilidade ao vapor relativo [-];

μ_g é a viscosidade dinâmica do fluido [$\text{Pa}\cdot\text{s}$];

P_g é a pressão dos gases [Pa];

2.2.2 Sucção Capilar

O fenômeno da sucção capilar ocorre na transferência isotérmica da água no seu estado líquido em um meio poroso saturado, a taxa de fluxo de água líquida, g_l [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$] pode ser definido pela lei de Darcy através do produto da condutividade hidráulica pura, K [s] pelo gradiente da pressão de sucção (P_{suc}) [Pa], conforme a Equação (3) (RAMOS, 2007):

$$\vec{g}_l = -K (\vec{\nabla}P_{suc} - \rho_l g) \quad (3)$$

onde: K é a permeabilidade à água líquida [s];

P_{suc} é a pressão de sucção capilar [Pa];

ρ_l é a massa específica da água líquida [kg/m^3];

g é a aceleração da gravidade [m/s^2];

A pressão de sucção pode ser escrita em função da temperatura [K] e teor de umidade pela pressão de vapor [Pa], de acordo com a Equação (4).

$$\vec{\nabla}P_{suc} = \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} \vec{\nabla}T + \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} \vec{\nabla}P_v \quad (4)$$

2.2.3 Modelo Matemático

Santos e Mendes (2009) citam a Equação (5) como o teor de umidade (w) [kg/m³] encontrado no interior do material poroso.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot g_t \quad (5)$$

A equação da conservação da massa da água sofre a influência de três fatores, umidade relativa (ϕ) [-], pressão de vapor (P_v) [Pa] e temperatura (T) [K] e pode ser descrita como a Equação (6).

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial P_v} \frac{\partial P_v}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Desta forma, a equação geral da conservação da massa pode ser escrita agrupando a Lei de Fick com a Lei de Darcy conforme a Equação (7).

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial P_v} \frac{\partial P_v}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \\ = \vec{\nabla} \cdot \left[-K \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} \vec{\nabla} T - \left(K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} - \delta_v \right) \vec{\nabla} P_v + \rho_v \frac{k k_{rg}}{\mu_g} \vec{\nabla} P_g + k \rho_l g \right] \end{aligned} \quad (7)$$

2.2.4 Histerese

O fenômeno da histerese ocorre na grande maioria dos materiais porosos higroscópicos durante a adsorção e dessorção da umidade, diferenças obtidas experimentalmente nesses processos demonstram sua existência (MENDES, 1997). Este fenômeno ocorre devido ao fato que certas propriedades dependem do seu estado anterior (AZEVEDO, 2011).

De acordo com Gonçalves (2011), a curva de dessorção é superior à de adsorção da umidade e normalmente usa apenas a curva de dessorção para caracterizar a capacidade do material em armazenar umidade. A Figura 4 mostra a histerese representando a tendência do comportamento das curvas isotermas de adsorção/dessorção de um material poroso.

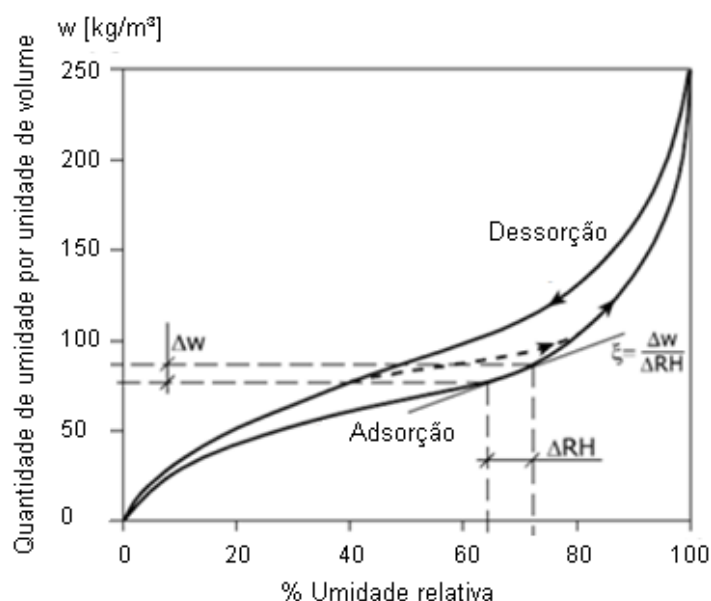


Figura 4 – Histerese das curvas de adsorção/dessorção do material
Fonte: Adaptado Gonçalves, 2011.

Começando do zero, quando a umidade relativa começa a aumentar progressivamente, o material começa a adsorver o vapor do meio, esse vapor é fixado no interior dos poros, com o aumento da umidade maior é o fluxo de vapor d'água que é adsorvido pelo material, isso faz com que o vapor fixado nos poros comece a condensar, preenchendo os poros de água.

2.3 ESTUDOS EXISTENTES

Em parceria com o Museu Nacional da Dinamarca, Padfield (1999) inicia os estudos de adsorção/dessorção de umidade dos materiais porosos com o objetivo de diminuir a variação da umidade relativa em ambientes fechados que apresentam menos de uma troca de ar por hora, apenas substituindo os materiais das paredes e forro por materiais mais higroscópicos.

Durante o trabalho foi construída uma câmara climatizada para simular o comportamento da adsorção de umidade de uma parede feita com diferentes

Ramos e Freitas (2002) desenvolveram um modelo matemático para estimar a variação da umidade relativa no interior de ambientes, este modelo considera a taxa de ventilação, produção de vapor de água, e clima do lado de fora, assim como, a contribuição de materiais higroscópicos para o equilíbrio da umidade do ar interior. Com esse modelo, eles desenvolveram o software RH2000 e com os resultados das simulações concluíram que os materiais higroscópicos podem desempenhar um papel importante na moderação da variação da umidade relativa no interior dos edifícios.

Devido aos bons resultados obtidos através das simulações numéricas, Ramos e Freitas (2004), complementam seu trabalho com um estudo numérico e experimental para validar o software RH2000 e sugeriram a criação de uma classificação para os materiais higrotérmicos em classes de inércia higroscópica de acordo com a capacidade de cada material em diminuir a variação da umidade relativa, conforme Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Proposta de classificação de acordo com a inércia higroscópica

Classe	Redução (R)	Designação
1	$R \leq 5\%$	Baixa Inércia
2	$5\% \leq R \leq 15\%$	Média Inércia
3	$15\% < R$	Alta Inércia

Fonte: Adaptado Ramos e Freitas, 2004.

Mesmo com os avanços nos estudos da capacidade dos materiais higroscópicos em diminuir a variação da umidade interna, ainda não existia um padrão bem definido a seguir. Em 2002 o *Japanese Industrial Standard* (JIS) define um método de ensaios para padronizar e quantificar a capacidade de adsorção/dessorção dos materiais porosos utilizados na construção: '*test method of ad/desorption performance of building materials to regulate indoor humidity*' (JIS A 1470-1).

Outro trabalho de padronização foi desenvolvido pelo Projeto Nordtest (RODE, 2005), onde foi criado um protocolo para a realização de ensaios, e define a capacidade dos materiais porosos de adsorção/dessorção da umidade através do índice MBV baseado na variação do peso da amostra em relação à variação da umidade relativa do ar. Rode (2005) também apresentou três diferentes níveis da

influência da inércia higroscópica em relação ao todo, ficando subdividido em ambiente, sistema e material, conforme apresentado na Figura 6.

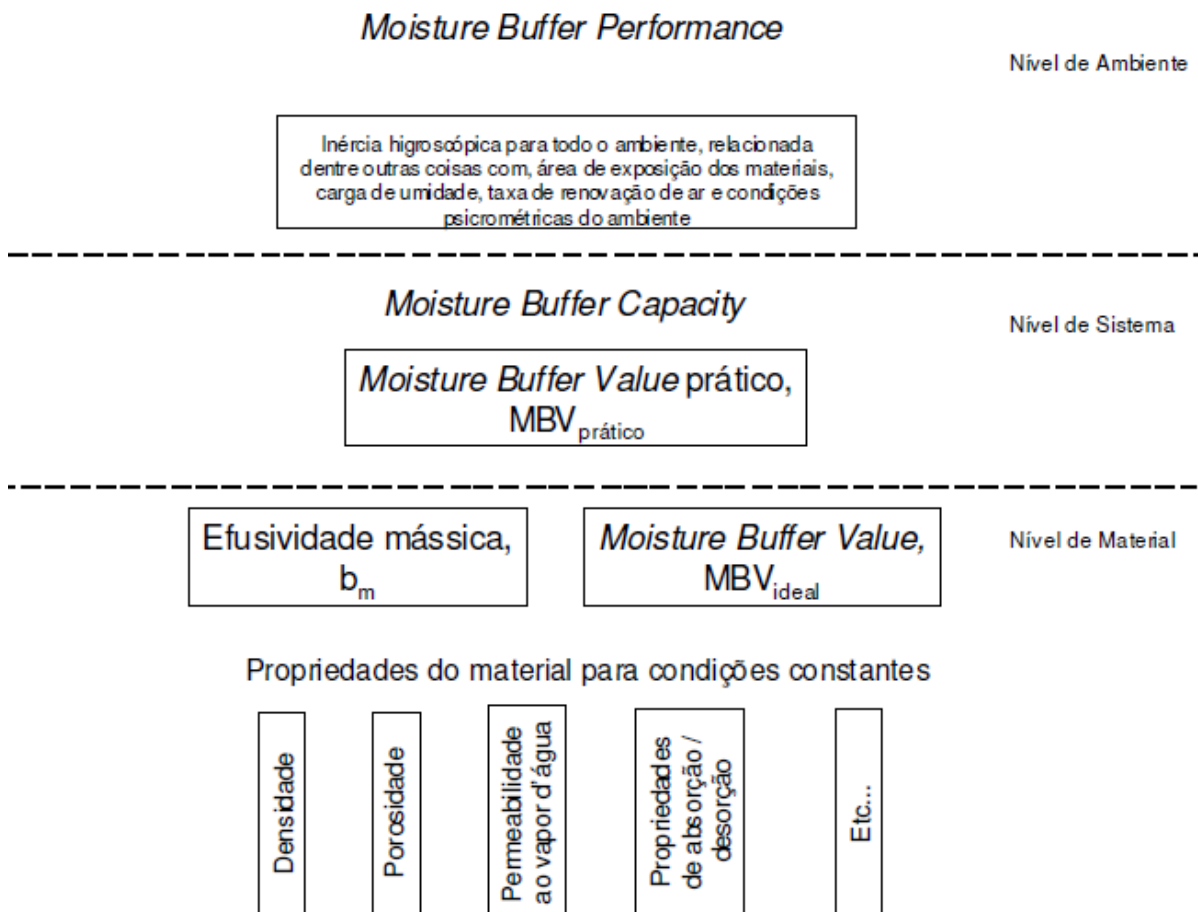


Figura 6 – Classificação da Inércia Higroscópica segundo Nordtest
Fonte: Meissner, 2008.

O nível material é caracterizado pelas propriedades físicas do material, como massa específica, porosidade, permeabilidade ao vapor d'água e dentre essas características o índice MBV_{ideal} . No nível sistema é determinado o desempenho prático do material através do protocolo de teste Nordtest, sendo denominado de índice $MBV_{prático}$ a capacidade do material de adsorver/dessorver umidade do meio. O nível ambiente considera o todo em geral, isto é, tudo que está no ambiente e suas influências no meio.

Após a apresentação do protocolo Nordtest, Roels e Janssen (2005) examinaram a sua confiabilidade através da sensibilidade do índice MBV apresentado no protocolo. Os testes foram realizados com três materiais, placa de fibra de madeira, madeira compensada e placas de gesso. Através da variação de três parâmetros,

variação do sinal imposto na câmara, coeficiente do filme usado nas faces da amostra e a espessura da amostra utilizada nos experimentos. Concluiu-se que a espessura da amostra é de extrema importância para os testes, onde deve ser utilizada uma espessura maior do que a profundidade de penetração da umidade do material.

Os dois métodos experimentais apresentados anteriormente são isotérmicos, baseados em ensaios em câmaras climáticas, onde a amostra é submetida a variações cíclicas da umidade relativa de acordo com um passo de tempo. Esse processo ocorre até que a variação da massa da amostra se estabilize.

Roels e Janssen (2006) compararam numericamente os dois métodos apresentados, que são muito parecidos, ambos têm o objetivo de mensurar a capacidade dos materiais de construção de adsorver/dessorver umidade do meio com a variação da umidade interior. Os métodos utilizam o mesmo princípio de medição: calcular a variação da massa da amostra até que se estabilize. Eles também apontaram as principais diferenças entre os dois métodos, como o tempo de exposição da amostra, as variações do nível da umidade relativa imposta, a espessura da amostra requerida e a forma de interpretar os dados. Apesar das diferenças, ambos os métodos apresentaram resultados similares quando comparados com o mesmo material.

O padrão JIS impõe um ciclo de 48 horas com 24 horas de alta UR e 24 horas de baixa UR com três níveis diferentes de UR. Baixo nível de umidade com 53 e 33% de UR, médio nível de umidade com 75 e 53% de UR e um alto nível de umidade com 93 e 75% de UR (JIS A 1470-1). Já o protocolo apresentado pelo Nordtest (RODE, 2005) o ciclo tem duração de 24 horas, sendo 8 horas de alta umidade relativa (75% UR) período em que o material vai adsorver umidade do meio e 16 horas com baixa umidade relativa (33% UR) em que o material vai dessorver essa umidade para o meio, o ciclo se repete até o material entrar em equilíbrio.

Na Figura 7 é apresentada a progressão da variação da umidade relativa do ar de cada ciclo conforme proposto pelos protocolos Nordtest e JIS.

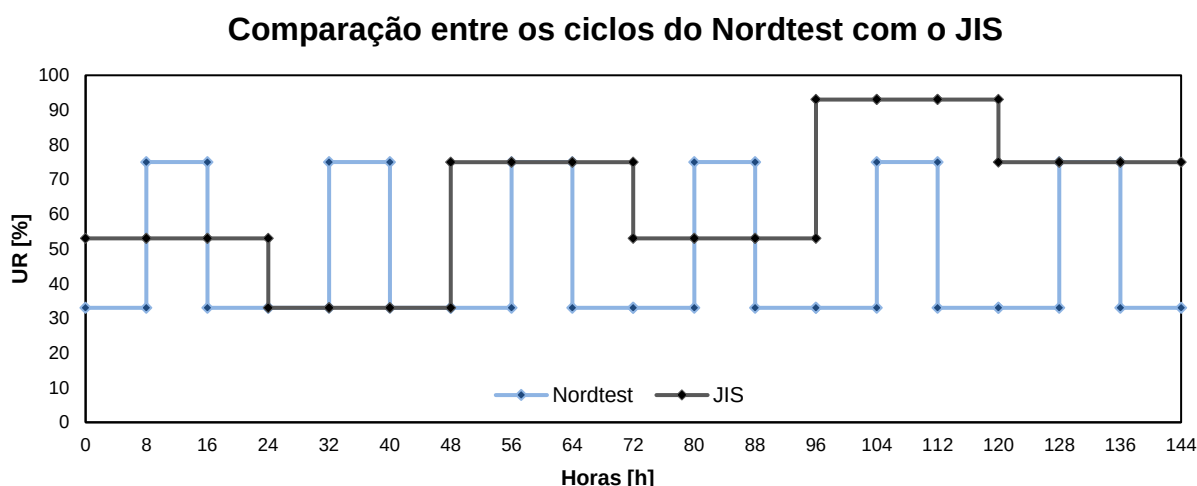


Figura 7 – Comparação entre os ciclos do Nordtest e JIS

Com os métodos muito parecidos, de acordo com Gonçalves (2011), o protocolo proposto pelo Nordtest é o que vem sendo utilizado pela maioria dos pesquisadores para classificar os materiais higroscópicos através do índice MBV.

Através de um estudo sobre a eficiência energética em edificações que utilizam sistemas HVAC, Osanyintola e Simonson (2006) utilizaram madeira compensada para controlar a variação da umidade interna e assim diminuir entre 2-3% da energia consumida pelo HVAC. Eles utilizaram a madeira compensada devido à uniformidade da transferência de umidade no seu interior, facilitando assim a análise dos resultados, os ensaios foram realizados utilizando o protocolo Nordtest.

Svennberg *et al.* (2006) estudaram a interação entre a superfície dos materiais com a umidade interna do ar, em um ambiente real, totalmente mobiliado, com temperatura constante. Os autores concluíram que os materiais higroscópicos presentes no ambiente contribuem significativamente no controle dos picos de umidade.

Em outro estudo, Osanyintola e Simonson (2006) analisaram os efeitos das condições iniciais, as condições de contorno e a espessura da amostra para a realização dos ensaios com madeira compensada de forma experimental e numérica. Os resultados obtidos ficaram muito próximos, com uma variação menor que $\pm 2\%$. A capacidade dos materiais higrotérmicos em reter umidade aumenta diretamente proporcional a espessura da amostra e ao coeficiente de convecção. Para reduzir o número de ciclos necessários para a amostra entrar em equilíbrio, a condição inicial do teor de umidade da amostra deve estar em equilíbrio entre a umidade relativa alta e baixa que é aplicada no ensaio.

Com testes realizados em uma câmara climatizada, com temperatura e umidade relativa controlada, Yoshino *et al.* (2006) simularam a um espaço residencial dentro da câmara para verificar a influência do gesso no controle da umidade interna, o material é o mesmo descrito no projeto Nordtest, os testes foram realizados com 6 horas com umidificação e 12 horas sem umidificação, com diferentes taxas de ventilação. Posteriormente Yoshino *et al.* (2008) compararam seis métodos de simulação de análise higroscópica com os resultados obtidos através da sua bancada experimental.

Talukdar; Olutmayin; Osanyintola e Simonson (2007) apresentaram um modelo experimental e numérico para transferência de calor e umidade transiente 1-D em dois materiais higroscópicos, madeira compensada e um isolamento de celulose. As comparações entre os resultados da quantidade de umidade acumulada ficaram muito próximas.

Uma bancada flexível desenvolvida por Meissner (2008) é capaz de quantificar esses fenômenos higroscópicos em materiais porosos. Isso foi comprovado experimentalmente com a realização de ensaios com uma célula teste feita de compensado, uma caixa cúbica com 2 metros de lado, para a realização dos ensaios seguiu-se o protocolo apresentado no Projeto Nordtest.

O trabalho apresentado por Abadie e Mendonça (2009) propõe um modelo de simulação computacional baseado no índice MBV, calculando o comportamento da umidade relativa do ar no ambiente, mostrando a relação entre o MBV ideal e o MBV prático, apresentando bons resultados.

Comprovado a eficiência dos materiais higroscópicos em amortecer a umidade interna dos ambientes e melhorar a qualidade do ar, novos materiais com melhor capacidade de adsorção/dessorção começaram a serem desenvolvidos. Kim *et al.* (2010) trabalharam no desenvolvimento de uma nova placa de fibra mineral, comparada com o gesso, a nova fibra foi capaz de adsorver cinco vezes mais umidade do que o gesso e dessorver quatro vezes mais.

Com o objetivo de melhorar o controle da variação da umidade no ambiente Gonçalves (2011) estudou a estrutura porosa da argamassa e com a adição de aditivos, formulou a argamassa para melhorar o desempenho higroscópico controlando a adsorção/dessorção da umidade do meio. As argamassas foram testadas em uma câmara climatizada seguindo o protocolo apresentado pelo projeto Nordtest.

Em continuidade aos estudos, Gonçalves *et al.* (2014) seguiram com o objetivo de maximizar o uso de aditivos na argamassa melhorando o desempenho higroscópico, foram utilizados pó de alumínio, olefinas sulfonato de sódio e um polímero super adsorvente em diferentes quantidades. A adição dos aditivos, fez com que todas as argamassas testadas fossem classificadas como boa ou ótima, de acordo com o índice de adsorção/dessorção do MBV, da Figura 10.

Mesmo com o desenvolvimento de novos materiais, a madeira ainda é um material muito utilizado na construção civil e principalmente nos objetos interiores, o problema é que a madeira em contato com água sofre grande degradação. Desta forma, Osterberg (2015) analisou o índice MBV de placas de madeira que sofreram tratamento superficial com o objetivo de aumentar a resistência à água líquida e preservar a capacidade higroscópica do material, isso foi obtido através do tratamento com micropartículas de cera, porém com a aplicação da cera em todos os testes a capacidade de adsorção/dessorção da umidade pelo material foi considerado limitado ou insignificante.

Outro material muito utilizado em interiores é o gesso, Ronzino e Corrado (2015), realizaram ensaios em uma câmara climatizada para verificar a adsorção/dessorção num período de 24 horas, com 8 horas de alta umidade relativa e 16 horas de baixa umidade relativa. As placas testadas foram revestidas com diferentes tipos de tintas, onde apresentaram uma redução de 15% na capacidade de adsorção do material, os resultados foram comparados com um modelo numérico desenvolvido por eles, onde os valores ficaram muito próximo dos obtidos experimentalmente.

Latif (2015) analisou o índice MBV do *hemp-lime*, material bio-composto a base de fibra de cânhamo com excelente capacidade higroscópica que pode ser utilizado em pisos, paredes ou telhados. O *hemp-lime* foi misturado com diferentes composições de materiais como gesso, folhas de alumínio, cal, madeira, entre outros e teve sua superfície tratada com dois diferentes tipos de tinta, uma convencional e outra a base de argila. A parede desenvolvida apenas com *hemp-lime* sem tratamento superficial apresentou um ótimo índice MBV, as demais combinações apresentaram um bom índice MBV de acordo com a classificação da Figura 10 apresentada na página 34.

2.4 PROJETO NORDTEST (RODE, 2005)

O projeto Nordtest iniciou-se com um Workshop em 2003 na Dinamarca, com uma parceria entre as Universidades Technical University of Denmark (DTU), Norwegian Building Research Institute (NBI), Technical Research Centre of Finland (VTT) e Lund University, Sweden (LTH), com objetivo de criar uma definição para a capacidade dos materiais de construção em adsorver/dessorver umidade do meio e estabelecer um protocolo de teste capaz de quantificar essa capacidade, possível de ser realizado em diferentes laboratórios. A Figura 8 mostra os diferentes equipamentos utilizados neste projeto.



Figura 8 – Diferentes equipamentos utilizados para medição do MBV
Fonte: Adaptado Rode, 2005.

As universidades realizaram ensaios com oito materiais diferentes, os materiais foram testados em pelo menos três universidades, os testes iniciais foram chamados de Round Robin. A Tabela 3 mostra os diferentes materiais usados nos ensaios e as respectivas universidades que realizaram os testes.

Tabela 3 – Materiais utilizados pelas Universidades no Round Robin.

Material	DTU	VTT	LTH	NBI
Madeira compensada de <i>spruce</i>	x	x	x	x
Placas de <i>spruce</i>	x	x		x
Concreto	x		x	x
Gesso		x	x	x
Madeira Laminada	x	x		x
Concreto de agregado leve	x		x	x
Concreto Celular	x	x	x	
Tijolo	x	x	x	
Painel de madeira <i>birch</i>		x	x	x

Fonte: Adaptado Rode, 2005.

Os resultados obtidos foram considerados similares e satisfatórios, dessa forma, foi possível validar o protocolo de teste e criar o índice MBV.

2.4.1 Índice Moisture Buffer Value (MBV)

A definição do índice MBV, proposto no projeto Nordtest, define a capacidade dos materiais higroscópicos de adsorver/dessorver umidade do/para o meio através de uma variação cíclica da umidade interior, para não ocorrer influência externa a superfície externa do material deve estar isolada.

Nos três diferentes níveis da inércia higroscópica apresentados, o MBV prático é apresentado no nível de sistema, onde são considerados os fatores que podem influenciar na variação das condições psicrométricas do ambiente interno, a área de transferência de massa, espessura do material e a taxa de ventilação, já o MBV ideal é encontrado no nível do material e para determiná-lo são consideradas as características físicas do material como, massa específica, porosidade, efusividade mássica, entre outros.

2.4.1.1 MVB Ideal

O índice do MBV ideal é uma aproximação dos valores obtidos experimentalmente do MBV prático, já que, a determinação das propriedades físicas

do material e a estabilidade das condições para a obtenção da efusividade mássica é muito difícil (GONÇALVES, 2011). A expressão que define o índice MBV ideal é apresentada na Equação (8):

$$MBV_{ideal} \cong 0,00568 \cdot P_s \cdot b_m \cdot \sqrt{t_p} \quad (8)$$

onde: P_s é a pressão de vapor de saturação [Pa];

b_m é a efusividade mássica [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{1/2})$];

t_p é o período de tempo em que ocorre adsorção/dessorção de umidade [s].

A efusividade mássica constitui uma forma teórica de expressar a quantidade de umidade adsorvida/dessorvida por um material quando sujeito a uma variação da umidade na sua superfície. A expressão teórica para o cálculo da efusividade (b_m) é apresentada na Equação (9):

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial \phi}}{P_s}} \quad (9)$$

onde: δ_p é a permeabilidade ao vapor de água [s];

ρ_0 é a massa específica do material seco [kg/m^3];

u é a quantidade de umidade [kg/kg];

ϕ é a umidade relativa [%].

2.4.1.2 MBV Prático

O MBV prático é obtido de forma experimental para determinar a quantidade de água que é transportada para dentro ou fora do material por unidade de área, durante certo período de tempo. Normalmente uma variação temporal diária em que o material é submetido a uma alta umidade relativa de 75% UR durante 8 horas e uma baixa umidade relativa de 33% UR por 16 horas, devendo ser repetido por pelo menos

três vezes e a variação da massa entre cada ciclo inferior a 5%, sua unidade é $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{UR})]$.

A Figura 9 representa um procedimento experimental para determinação do MBV prático, dentro da circunferência três ciclos de medições onde é possível observar as variações cíclicas da umidade relativa e o processo de adsorção/dessorção de umidade, com um ganho de massa da amostra em cada ciclo.

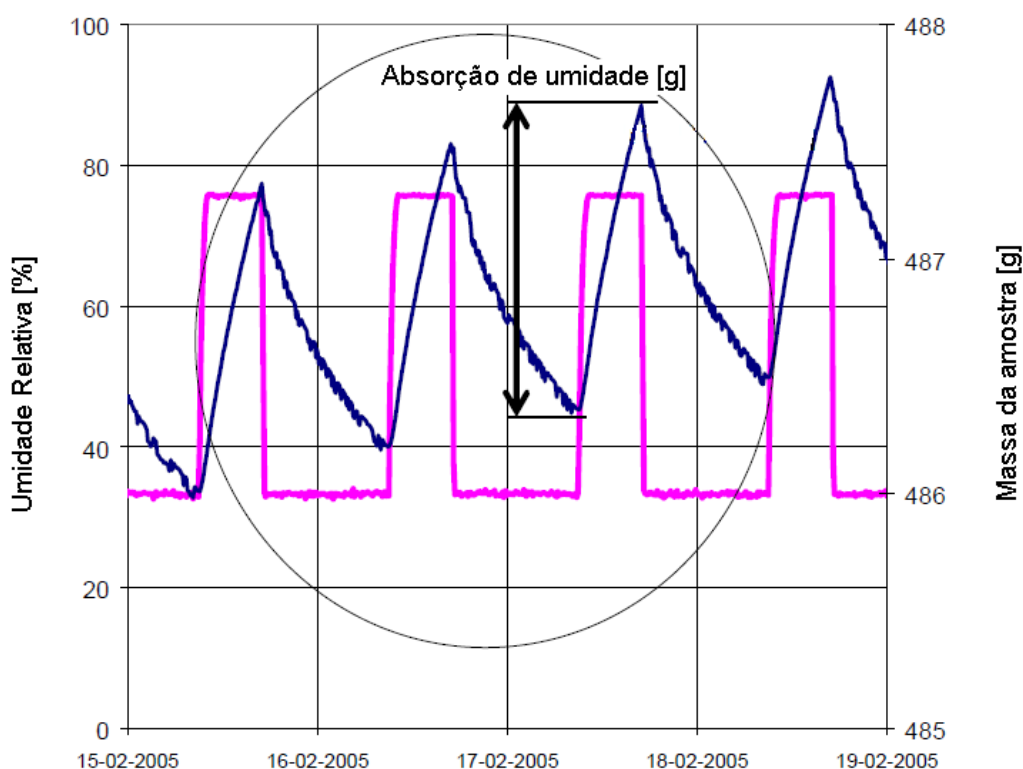


Figura 9 – Determinação do MBV prático através de medições dinâmicas
Fonte: Adaptado Rode, 2005.

Para o cálculo do MBV prático, Rode (2005) apresenta a Equação (10):

$$\text{MBV}_{\text{prático}} = \frac{\Delta m}{A \cdot (\text{UR}_{\text{alta}} - \text{UR}_{\text{baixa}})} \quad (10)$$

onde: Δm é a variação da massa da amostra [kg];

A é a área da superfície em contato com o ar [m^2];

UR_{alta} é o valor da umidade alta usada nos ensaios [%];

UR_{baixa} é o valor da umidade baixa usada nos ensaios [%];

2.4.1.3 Classificação dos materiais pelo índice MBV

Os materiais foram classificados de acordo com o seu desempenho no processo de adsorção/dessorção da umidade no meio, desta forma, podem ser classificados como desprezível quando o índice MBV varia entre 0 ~ 0,2 [g/(m² %UR)] até excelente 3,5 ~ [-] [g/(m² %UR)], conforme classificação da Figura 10 a seguir.

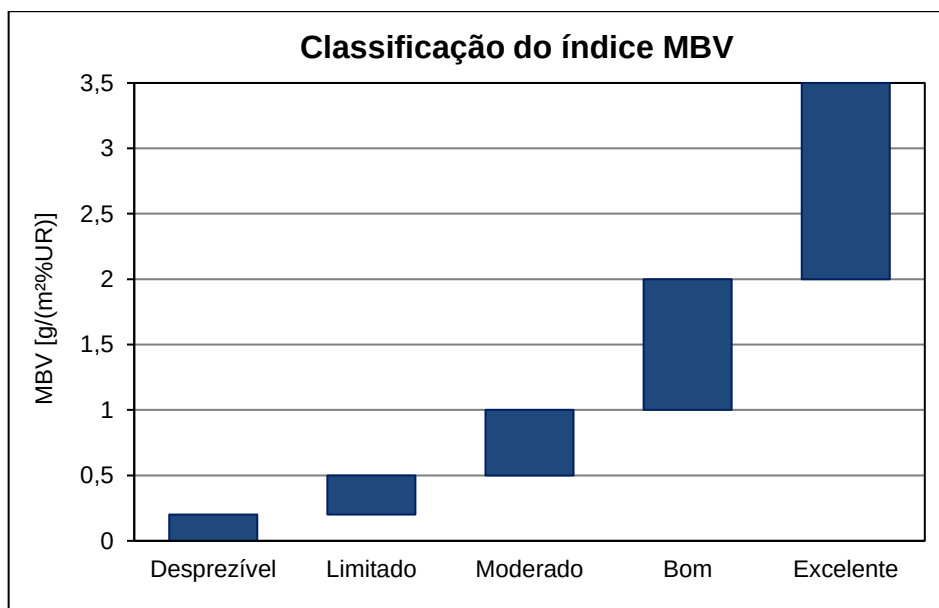


Figura 10 – Classificação do índice MBV
Fonte: Adaptado Rode, 2005.

2.4.2 Protocolo de Teste

O protocolo de teste foi apresentado pelo projeto Nordtest, com o objetivo de padronizar ensaios realizados com materiais higroscópicos expostos a variações cíclicas de umidade interna para quantificar a umidade trocada entre o material e o ambiente. A seguir são apresentadas as condições necessárias para a realização dos ensaios.

O MBV do material é definido através da quantidade de umidade adsorvida/dessorvida por ele quando exposto a uma variação de onda quadrada da umidade relativa, com 75% de UR durante 8 horas (± 10 min) e 33% de UR durante 16 horas (± 10 min), durante o ensaio a temperatura permanece constante em 23°C.

Os sensores utilizados devem ser calibrados e é necessário um sistema contínuo para registro da temperatura e umidade relativa no interior da célula teste.

O protocolo não apresenta uma recomendação clara sobre o tamanho da amostra ou sua espessura, mas, é recomendado que a amostra possua uma área de troca de umidade mínima de $0,01 \text{ m}^2$ e sua espessura deve ser de, pelo menos, a profundidade de penetração da umidade para uma variação diária. As amostras utilizadas no Nordtest tinham área de transferência variando entre $0,01$ até $0,087 \text{ m}^2$, uma área muito pequena quando comparada aos 24 m^2 utilizado por Meissner (2008) ou a utilizada neste trabalho de $3,20 \text{ m}^2$.

Para iniciar os ensaios a amostra deve permanecer por um período de 24 horas em uma temperatura de $23^\circ\text{C} \pm 5\text{K}$ e $50 \pm 5\%$ UR, nesse período de tempo o teor de umidade inicial da amostra tende a estabilizar entre a alta e baixa umidade. O ensaio é realizado até a amostra entrar em equilíbrio, que é determinado com uma variação da massa inferior a 5% nos últimos 3 ciclos, considerando que a diferença entre ganho e perda de massa em cada ciclo deve ser inferior a 5%.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado detalhadamente o aparato experimental desenvolvido por Meissner (2008). Com a redução do tamanho da célula teste original proposta por Meissner (2008), foi necessário a realização de alguns ajustes nos parâmetros do aparato.

Devido a alterações no tamanho da célula teste, parâmetros como a velocidade do ar no duto de insuflamento e o controlador do sistema PID da umidade relativa e temperatura foram modificados. Essas alterações são apresentadas ao longo do capítulo.

Os ensaios seguiram o protocolo proposto por Rode (2005), já descrito no capítulo anterior, aqui são apresentados diferentes materiais utilizados, as variações do teor de umidade inicial de cada amostra e o detalhamento da redução do tamanho da célula teste em comparação à usada por Meissner (2008).

3.1 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato é composto por um calorímetro, que tem duas câmaras independentes, onde é possível controlar umidade e temperatura em cada uma, elas são interligadas por uma janela com área de 1 m² utilizado em condições de teste de aparelhos condicionadores de ar. Uma bancada psicrométrica que garante as condições do ar que entra na célula teste, um duto de insuflamento de ar que liga a bancada psicrométrica com a célula teste, a estrutura da célula teste para troca das placas dos materiais, onde são realizados os ensaios para a obtenção do índice MBV prático do material, e um software supervisor que realiza a leitura dos sensores e gravação dos dados, além do controle da bancada psicrométrica.

A Figura 11 representa esquematicamente a bancada psicrométrica, com o duto de insuflamento e seus componentes. O ventilador insufla o ar captado da câmara 1 até as resistências que são responsáveis por aquecê-lo até a temperatura de 23 °C, depois disso o ar é umidificado até a respectiva umidade relativa desejada, para o controle da baixa umidade relativa o ar frio e seco é aquecido diminuindo assim a umidade relativa do ar. Na saída da bancada psicrométrica foi necessário inserir um sistema para redução da vazão volumétrica, assim, o ar passa por uma válvula de controle onde parte do ar retorna para a câmara 1 e o restante entra no duto onde é

feito o controle da velocidade do ar, temperatura e umidade relativa que é insuflada na célula teste.

A célula de teste está situada na câmara 2, posicionada sobre três células de carga que registram a variação da massa da amostra de acordo com as condições psicrométricas do ar insuflado.

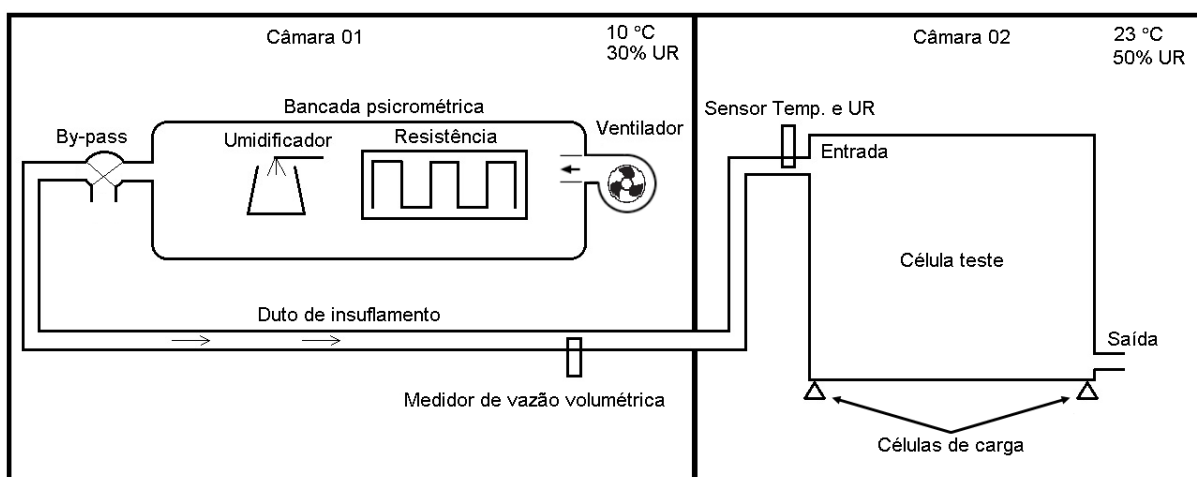


Figura 11 – Representação esquemática do aparato experimental

Na sequência são apresentados cada subcomponente do aparato experimental com mais detalhes.

3.1.1 Calorímetro

O calorímetro utilizado é do tipo calibrado, construído em parceria com a Eletrobras com o objetivo de realizar ensaios de teste em aparelhos condicionadores de ar com até 3 toneladas de refrigeração (10550 W) seguindo as normas da ISO 5151:2010.

A câmara 1 possui um volume de 25,11 m³, sendo 3 m de comprimento, 3,22 m de largura e 2,6 m de altura, operando na faixa de 0 a 60 °C $\pm$ 1K e de 30 a 70% UR $\pm$ 5% UR. A câmara 2 possui um volume de 40,66 m³, sendo 3,66 m de comprimento, 3,22 m de largura e 3,45 m de altura, operando na faixa de -25 a 70 °C $\pm$ 1K e de 30 a 99% UR $\pm$ 1% UR. A janela de ligação entre as duas câmaras possui uma área de 1 m², para a realização dos ensaios foi feito uma adaptação onde a janela é mantida isolada através de uma parede de isopor.

Embora o calorímetro apresenta grande faixa de variação da temperatura, durante os ensaios ela é mantida constante. A câmara 1 serve como regulador das

condições psicrométricas do ar que é sugado pela bancada psicrométrica e insuflado dentro da célula teste, enquanto que a câmara 2 é a reguladora das condições psicrométricas do ambiente externo da célula teste.

Para um melhor desempenho do aparato as condições psicrométricas na câmara 1 devem ser de 10 °C e 30% UR, nessa condição o ar encontra-se frio e seco, isso melhora o desempenho da bancada psicrométrica que aquece e umidifica o ar sugado pelo ventilador da bancada psicrométrica. Já a câmara 2 que representa o ambiente externo, é mantida constante à 23 °C e 50% UR.

3.1.2 Bancada Psicrométrica

Como o controle da câmara 2 não permite o condicionamento do ar conforme as condições desejadas para o ensaio, utiliza-se uma bancada psicrométrica situada dentro da câmara 1, que é responsável por garantir as condições psicrométricas do ar que é insuflado na célula teste, respeitando as condições propostas pelo protocolo Nordtest.

Como está situada na câmara 1, o ar encontra-se frio e seco, esse ar é succionado pela bancada psicrométrica através de um ventilador, em seguida o ar passa por um conjunto de 6 resistências responsáveis por aquece-lo e então passa por um umidificador que garante as condições psicrométricas necessárias.

O controle do ventilador, das resistências e do umidificador é realizado pelo software supervisor que impõe a potência em cada um deles, o software é apresentado na sequência deste capítulo. Na Figura 12 apresenta-se a bancada psicrométrica utilizada nos ensaios.



Figura 12 – Bancada psicrométrica dentro da câmara 1
Fonte: Meissner, 2008.

O aparato experimental, junto com a bancada psicrométrica, foi desenvolvido por Meissner (2008). A célula teste original para a realização dos ensaios era um cubo com volume de 8 m^3 e 24 m^2 de área. Por ser muito grande e de difícil manuseio, neste trabalho efetuou-se a redução do tamanho da célula teste para um volume interior de $0,6\text{ m}^3$ sendo aproximadamente 13 vezes menor em comparação com o trabalho de Meissner (2008).

Nesta alteração, para manter a condição de 3 trocas de ar por hora proposta pelo protocolo, a potência no ventilador necessitava ser muito baixa, implicando também em uma velocidade do ar reduzida, superaquecendo as resistências. Para resolver esse problema foi necessário fazer uma adaptação na saída da bancada psicrométrica, onde foi instalado um sistema by-pass com a utilização de um tubo de junção simples de diâmetro de 100 mm seguido de uma válvula manual tipo esférica volante de diâmetro de 100 mm.

Com o sistema by-pass é possível aumentar a potência do ventilador e a quantidade de ar que passa pelas resistências sem alterar a taxa de renovação do ar no interior da célula teste. Quando o ar passa pelo sistema by-pass, parte do ar volta para a câmara 1 enquanto que só a quantidade necessária passa pela válvula de controle e entra no duto de insuflamento de ar.

A Figura 13 mostra a adaptação feita na saída da bancada psicrométrica, com o sistema *by-pass* e a válvula esférica, a parte branca é o tubo de de junção com duas saídas, uma ligada na válvula de controle e a outra aberta onde o ar retorna para a câmara 1, depois de montado o sistema foi revestido com lã de vidro e folhas de alumínio.

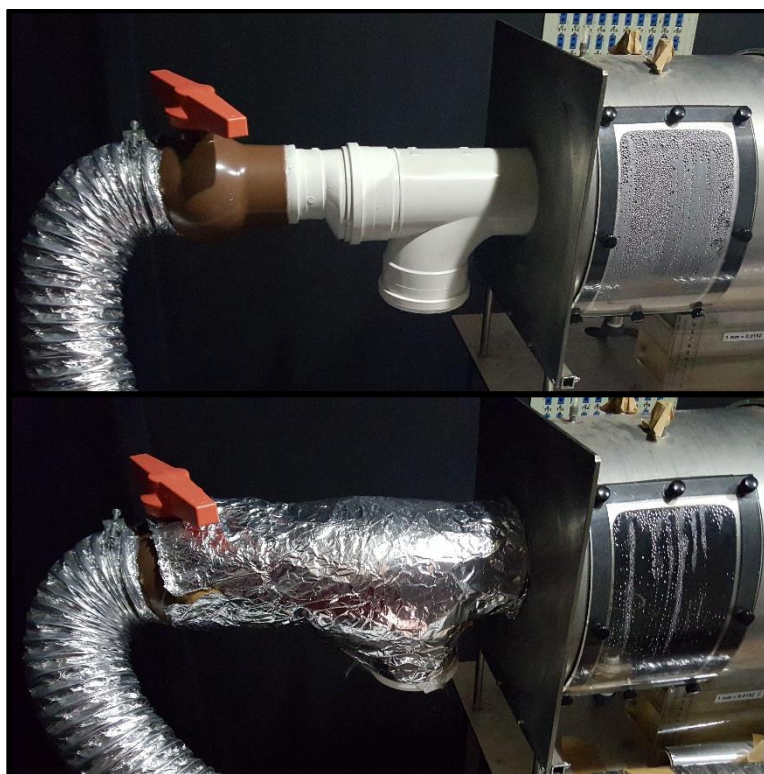


Figura 13 – Sistema *by-pass*

Como o ajuste da válvula de controle é feito de forma manual, para um bom desempenho do controlador PID do software supervisor, o ideal é ajustar de forma que a potência do ventilador trabalhe numa faixa de 20 a 30% da sua potência máxima.

3.1.3 Duto de Insuflamento de Ar

O duto de insuflamento de ar é responsável por transportar o ar que sai da bancada psicrométrica até a célula teste, para isso, é fixado na válvula de controle na saída da bancada psicrométrica. É um duto flexível em formato helicoidal com diâmetro de 100 mm, revestido por folha de alumínio com uma camada adicional de lã de vidro. Apesar de já possuir uma camada isolante térmica, o sistema estava

perdendo muito calor para meio, sendo necessário revestir todo o duto com uma nova camada de lã de vidro com 15 mm de espessura. Após a aplicação do revestimento o ar insuflado atingiu a temperatura necessária de 23 °C.

Para a medição da vazão de ar, utiliza-se um eletroduto inserido no interior do duto flexível sem curva de comprimento de 3 m e diâmetro de 3" (76,2 mm). Esse comprimento é suficiente para que o escoamento se torne plenamente desenvolvido, tanto para escoamento laminar como para escoamento turbulento, nele também é fixado o sensor que mede a velocidade do ar. Para o software fazer o controle da velocidade, é necessário estimar a velocidade máxima U [m/s] no centro do eletroduto, onde foi posicionado o sensor de medição da velocidade do ar.

Para obter o valor da velocidade máxima necessária, deve-se conhecer o volume da célula teste, a área da secção transversal do eletroduto e a quantidade de trocas de ar por hora. O primeiro passo é calcular a velocidade média do ar no interior do eletroduto, conforme a Equação (11).

$$\bar{v} = \frac{V}{A_s} \cdot tr_{ar} \quad (11)$$

onde: $\bar{v}$ é a velocidade média do ar no interior do eletroduto [m/s];

V é o volume da célula teste [m³];

A_s é a área da secção transversal do eletroduto [m²];

tr_{ar} é a taxa de renovação de ar por segundo [s⁻¹];

Estimando a velocidade média no interior do eletroduto, é possível determinar o padrão do escoamento, laminar ou turbulento através do número de Reynolds [-], calculado pela Equação (12).

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot D}{\mu} \quad (12)$$

onde: ρ é a massa específica do ar [kg/m³];

D é o diâmetro do eletroduto [m];

μ é a viscosidade dinâmica do ar [Pa·s]

As propriedades do ar, massa específica e viscosidade dinâmica, foram as mesmas utilizadas por Meissner (2008) e o diâmetro do eletroduto permanece constante durante os ensaios, desta forma, os valores utilizados para o cálculo do número de Reynolds são apresentados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Parâmetros para determinação do número de Reynolds

Propriedades	Valor	Unidade
Massa específica (ρ)	1,29	kg/m ³
Viscosidade dinâmica (μ)	1,82*10 ⁻⁵	Pa.s
Diâmetro (D)	76,2	mm

Fonte: Meissner, 2008.

Com a facilidade de variar os parâmetros na bancada psicrométrica para analisar a influência no índice MBV, a Tabela 5 mostra a velocidade média limite para determinar o padrão do escoamento para diferentes ensaios.

Tabela 5 – Natureza do escoamento

Escoamento	Número de Reynolds	Velocidade média
Laminar	$Re \leq 2300$	$\bar{v} < 0,37 \text{ m/s}$
Turbulento	$Re > 2300$	$\bar{v} \geq 0,37 \text{ m/s}$

Para escoamento laminar a velocidade máxima é determinada pela Equação (13), enquanto que para escoamento turbulento pela Equação (14), (Fox e McDonald, 2014).

$$U = 2 \cdot \bar{v} \quad (13)$$

$$U = \bar{v} \cdot \left(\frac{(n+1) \cdot (2 \cdot n + 1)}{2 \cdot n^2} \right) \quad (14)$$

onde: U é a velocidade no centro do eletroduto [m/s];

n é o fator de achatamento da curva de velocidade [-];

O fator n é calculado conforme a Equação (15).

$$n = -1,7 + 1,8 \cdot \log(Re) \quad (15)$$

A Figura 14 mostra a diferença entre o escoamento laminar e turbulento no interior de um eletroduto, onde $\bar{v}$ é a velocidade média e n o fator de achatamento da curva do escoamento turbulento.

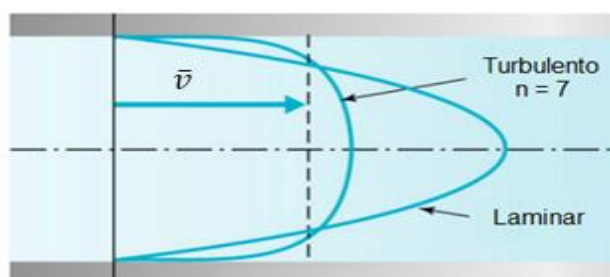


Figura 14 – Representação do escoamento laminar e turbulento
Fonte: Adaptado (Fox e McDonald, 2014).

3.1.4 Célula Teste

A nova célula teste foi construída sobre uma estrutura de madeira impermeabilizada e revestida com folhas de alumínio, com isso, é possível realizar a troca das paredes da célula por diferentes materiais, mantendo a mesma estrutura. A Figura 15 mostra duas imagens, a da esquerda é o interior da célula teste onde é possível visualizar a estrutura de madeira antes de ser isolada com folhas de alumínio, na figura da direita toda a estrutura já está revestida com alumínio.

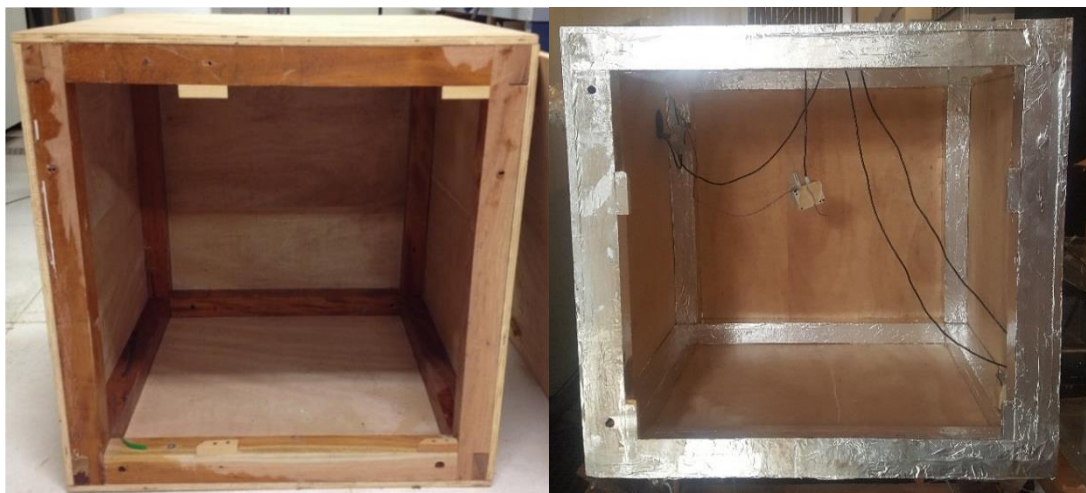


Figura 15 – Estrutura de madeira da célula teste

Com o tamanho reduzido, as placas possuem 0,73 m lado, com uma área de transferência de massa total de 3,19 m² e volume interno total de 0,60 m³. Com a redução do tamanho da célula teste, é possível comparar os resultados obtidos por Meissner (2008) e analisar a influência que a área de transferência de massa exerce sobre o índice MBV do compensado.

Os materiais utilizados para as medições é o compensado e dois diferentes tipos de *drywall*, um *standard* e outro com revestimento impermeável, a Figura 16 mostra a célula teste feita de compensado.



Figura 16 – Ilustração real da célula teste

Para os ensaios com os dois tipos de *drywall*, são trocadas apenas as paredes laterais da célula teste, tanto a parede inferior quanto a superior são mantidas de compensado e são isoladas com folhas de alumínio para não ocorrer influência no

índice MBV do *drywall*. A Figura 17 mostra o interior da célula teste feita de *drywall*, já com as paredes isoladas.



Figura 17 – Ilustração real do interior da célula teste

Em todos os ensaios, toda a sua superfície externa é coberta com folhas de alumínio para isolá-la do meio evitando que ocorra adsorção de umidade pela superfície externa da célula teste, dessa forma, toda a adsorção física que ocorre é proveniente da superfície interna em contato com o ar insuflado pelo duto. A Figura 18 mostra a célula teste com a superfície externa revestida por folhas de alumínio.

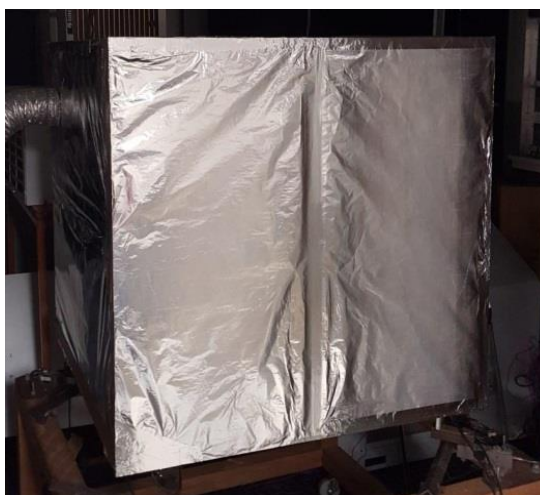


Figura 18 – Ilustração real da célula teste isolada do meio externo

Na célula teste utilizada por Meissner (2008) foram utilizadas 9 zonas sensoriais, com termopar, transmissor de temperatura e umidade em cada uma, além de sensores na entrada e saída da célula teste. Os resultados obtidos mostram que o

comportamento do ar no interior da célula teste foi semelhante em todas as zonas sensoriais, desta forma, para a nova célula teste são utilizados sensores apenas na entrada, centro e saída. A Figura 19 mostra o projeto da célula teste, com a posição da entrada de ar, saída e a zona central onde ficam os sensores.

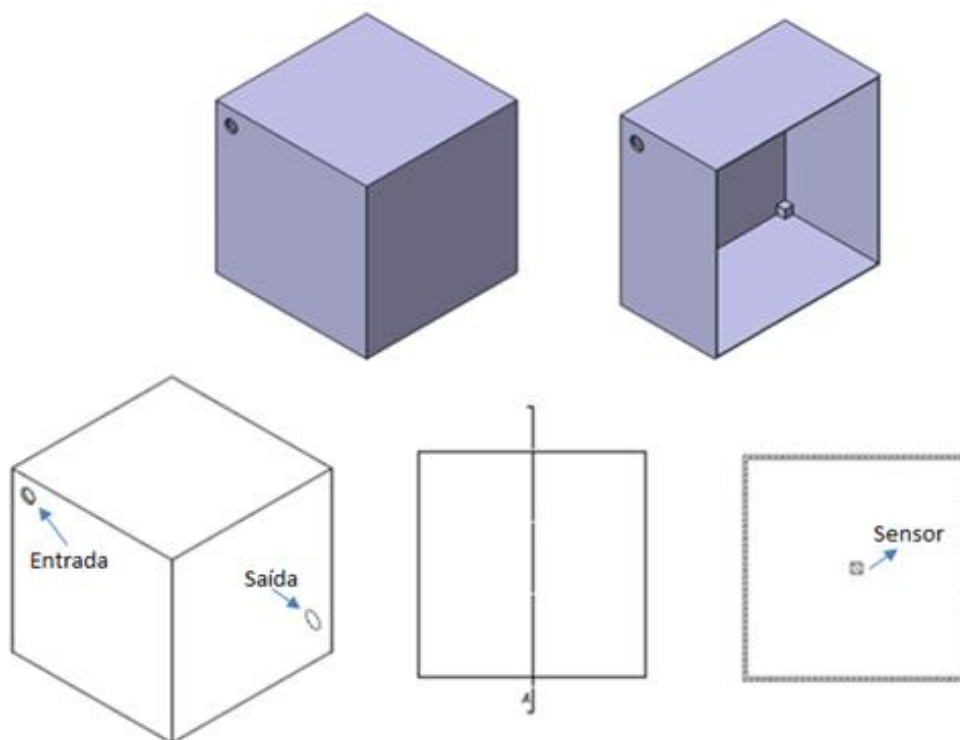


Figura 19 – Projeto célula teste

3.1.5 Software Supervisório

Meissner (2008) desenvolveu um módulo de interface entre a bancada psicrométrica e o computador, utilizando o software LabView, capaz de controlar temperatura, umidade e velocidade do ar, cada uma delas independentemente, utilizando um controlador PID (proporcional, integral e derivativo). Dessa forma, o software processa as informações dos sensores posicionados na célula teste, executa os cálculos de controle e fornece a potência necessária para o ventilador, resistências e umidificador.

Para o controle da temperatura é utilizado um sensor PT-100 na entrada da célula teste. Para controlar a velocidade do ar é utilizado um sensor de esfera quente da marca Testo, modelo 445, posicionando no final do eletroduto. Já a umidade é

controlada pelo transmissor de umidade relativa do ar da marca Novus modelo RHT-DM situado junto com o PT-100 na entrada da célula teste.

Devido a redução do tamanho da célula teste, o controlador PID utilizados por Meissner (2008) da umidade relativa apresentou grande oscilação em seus valores, inviabilizando os ensaios, por isso foi necessário reajustar os valores do controlador. Esse ajuste foi feito de forma manual analisando as respostas gráficas do controlador no software supervisorio. A Tabela 6 apresenta os valores utilizados para os controladores PID.

Tabela 6 – Valores do controlador PID

Sistema	Kp	Ki	Kd
Ventilação	0,0954	0,0087	0
Aquecimento	7,7790	0,005	1000
Umidificação	0,4	0,05	7,0417

Além de fazer o controle da bancada psicrométrica, o software gera diferentes tipos de saídas gráficas para o monitoramento do ensaio além do armazenamento do sinal de todos os sensores. A Figura 20 mostra a interface do software e as telas gráficas de controle de velocidade do ar, temperatura, umidade relativa e massa da célula teste.

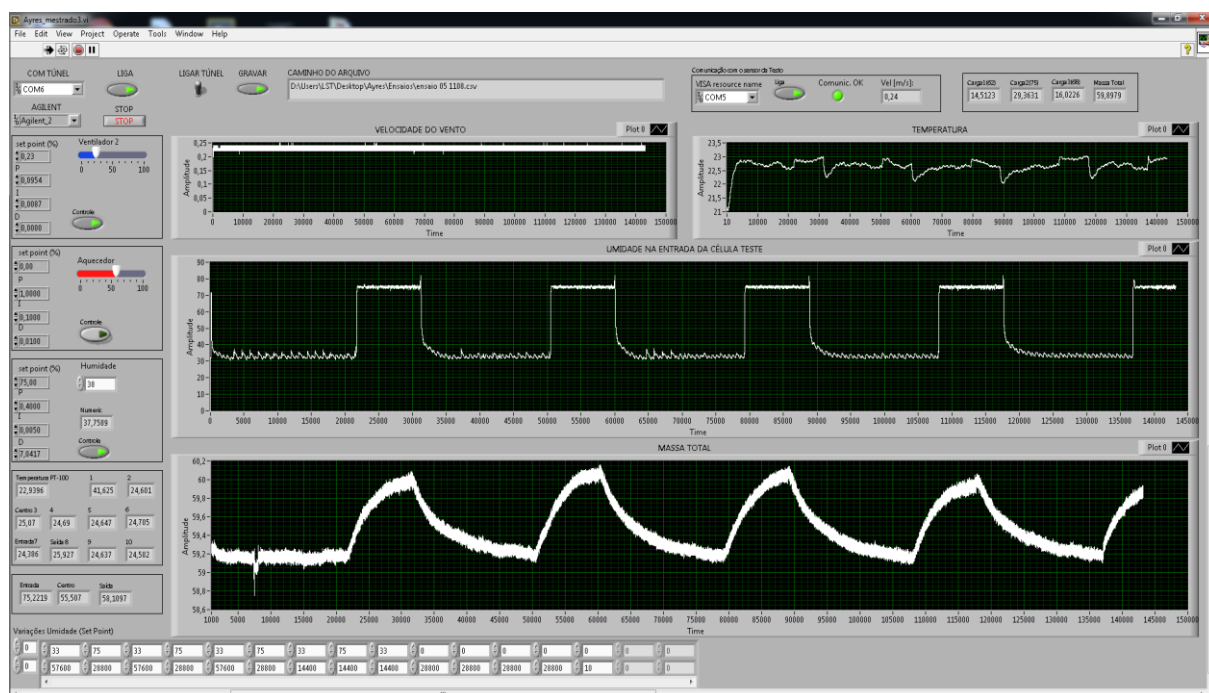


Figura 20 – Interface do software supervisorio

3.1.6 Material de Teste

O primeiro material escolhido foi o compensado, mesmo material utilizado por Meissner (2008), a fim de comparar os resultados de duas células teste de mesmo material e tamanhos distintos, o compensado é um material muito utilizado na composição do interior das edificações, presente principalmente na forma de móveis, é um material com grande fator de porosidade já que sua composição é feita da junção de placas de entalhes de madeira, por isso é considerado um material com alto índice MBV, sua capacidade de adsorver e desorver umidade do meio tem grande influência na condição do ar interior.

O segundo material escolhido foi o *drywall*, material muito utilizado para construção civil nos Estados Unidos e na Europa especialmente em paredes interiores. Nos últimos anos esse é um material que vem ganhando destaque também no Brasil aumentando muito o seu uso na construção.

Foram realizados ensaios em dois diferentes tipos de *drywall*, ambos utilizados por uma empresa de construção, um *standard* que é de uso geral para interiores e o outro *drywall* “verde”, que apresenta uma camada revestida de isolante higroscópico, esse tipo de *drywall* é utilizado em situações onde ocorrem altos índices de umidade relativa, como é o caso do banheiro, cozinha e lavanderia.

As placas utilizadas nos ensaios têm espessura de 0,015 m e lado de 0,73 x 0,73 m e são fixadas na estrutura da célula teste. A Figura 21 a seguir mostra uma amostra de cada material, da esquerda para a direita começando com compensado, *drywall standard* e *drywall verde*.



Figura 21 – Amostra dos materiais utilizados nos ensaios

3.1.7 Metodologia de Ensaio

Para o compensado foram realizados três ensaios, o primeiro seguindo o protocolo de teste padrão Nordtest, os outros dois foram realizados variando a condição inicial do teor de umidade do material. O primeiro ensaio o material inicia com 50% UR, o segundo ensaio inicia com o material seco, com 33% UR e o terceiro ensaio o material está úmido, com 75% UR. Desta forma é possível comparar o teor de umidade inicial do material, $kg_{H_2O}/kg_{material}$, com o índice MBV obtido. A Figura 22 mostra a variação da condição inicial em cada ensaio.

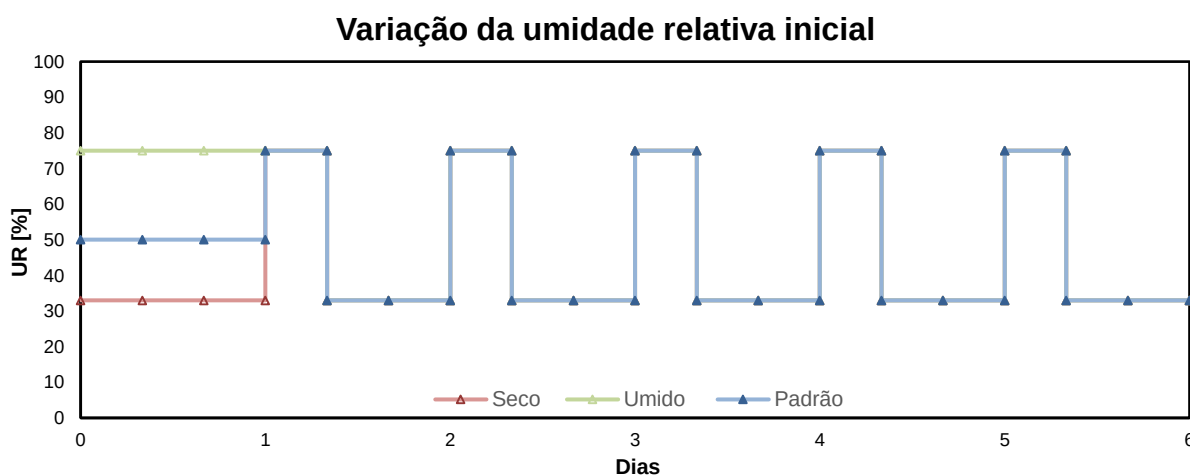


Figura 22 – Variação da condição inicial dos ensaios

Para o *drywall* os ensaios seguiram o protocolo de teste padrão do Nordtest, com o objetivo de comparar a influência que o revestimento higroscópico do *drywall* verde exerce no índice MBV em relação ao *standard*.

No primeiro ensaio a célula teste inicia com temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 5\text{K}$ e $50 \pm 5\%$ UR até que a variação da massa fique estabilizada. Com a estabilização da massa da célula teste, começa a ocorrer a ciclagem da umidade relativa, variando entre 8 horas com 75% de UR e 16 horas com 33% UR, os ciclos se repetem até que a variação do ganho de massa seja inferior a 5% nos últimos 3 ciclos, quando se realiza a obtenção do índice MBV.

Os ensaios foram realizados somente na célula teste, não sendo utilizado a amostra no seu interior.

4 ANÁLISE DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Neste capítulo é apresentado o sistema de aquisição de dados, a instrumentação utilizada nos ensaios para controle da velocidade do ar, umidade relativa, temperatura e medição da massa da célula teste. Também é apresentado o cálculo da incerteza de medição do índice MBV.

4.1 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação utilizada na célula teste para controle e monitoramento pelo software supervisor é listada na Tabela 7, relativo à sua grandeza, o tipo do sensor, quantidade e como é realizado sua leitura.

Tabela 7 – Instrumentação empregada nos ensaios do índice MBV

Grandeza	Tipo	Quantidade	Leitura
Temperatura	Termopar tipo T	3	Tensão
Temperatura	PT-100	1	Resistência
Velocidade do ar	Esfera quente	1	Digital – RS232
Umidade relativa do ar	Capacitância	3	Tensão
Força	Célula de carga	3	Tensão

4.1.1 Sistema de aquisição de dados

Utilizou-se um sistema de aquisição de dados da marca Agilent® modelo 34980A que é conectado à câmara 2 através de um painel de conexões. O sistema possui 8 módulos de aquisição e conversor analógico digital de 6½ dígitos. A comunicação com o computador é realizada através de um protocolo Ethernet e todos os sinais são monitorados pelo software supervisor. A Figura 23 apresenta o sistema Agilent® 34980A.



Figura 23 – Sistema de aquisição de dados

Na Tabela 8 seguem as incertezas de medição da leitura dos sinais pelo sistema de aquisição de dados, fornecidas pelo fabricante. As incertezas são para a leitura dos termopares, sensores eletrônicos e PT-100. Também é considerada a incerteza de medição crítica, levando em conta o pior caso possível.

Tabela 8 – Incerteza de medição do sistema de aquisição de dados

Grandeza	Faixa	Finalidade	IM $\pm$ (%leitura + %faixa)	IM
Tensão Contínua	0 – 100 mV	Termopar	0,005 + 0,004	$\pm 9 \mu\text{V}$
Tensão Contínua	0 – 10 V	Sensores Eletrônicos	0,0035 + 0,0005	$\pm 0,4 \text{ mV}$
Resistência a 4 fios	0 – 1 k Ω	PT-100	0,010 + 0,001	$\pm 0,1 \Omega$

4.1.2 Medição da velocidade do ar

Para a medição da vazão volumétrica foi empregado um anemômetro da marca Testo modelo 445, Figura 24, com sensor telescópico de medição de baixa velocidade, do tipo esfera quente com 3 mm de diâmetro. A faixa de operação deste sensor apresentada pelo fabricante é de 0 a 10 m/s com incerteza de medição de $\pm 0,03 \text{ m/s}$ + 5% do valor medido. O sensor é conectado ao transmissor 445 que fornece alimentação e executa a medição da velocidade do ar.



Figura 24 – Anemômetro
Fonte: (data sheet).

O anemômetro possui interface RS232, com isso é conectado através de um cabo serial com o computador permitindo a automação dos ensaios, desta forma, os valores da velocidade do ar são lidos diretamente no software supervisor. O princípio de funcionamento do anemômetro é de esfera quente, calculando a potência necessária para manter a temperatura da esfera constante.

4.1.3 Transmissor de umidade relativa do ar

Para medição da umidade relativa do ar foram utilizados 3 transmissores da marca Novus®, modelo RHT-WM sem haste, conforme Figura 25. Um posicionado na entrada da célula teste que funciona como controle do ar insuflado na célula teste pelo software supervisor, os outros dois funcionam para o monitoramento e são posicionados no centro e na saída da célula teste.



Figura 25 – Sensor Novus
Fonte: (data sheet)

O funcionamento desses transmissores ocorre pela alimentação de uma fonte de tensão de 24 V, cujo sinal de saída é de 0 a 10 V linearmente proporcional à umidade relativa do ar (0 a 100%). O funcionamento ocorre numa faixa de temperatura de -10 a 65 °C e 0 a 95% UR.

A variação do erro de medição desses transmissores com a umidade relativa do ar é apresentada pelo fabricante de acordo com a Figura 26. A faixa de operação da umidade relativa durante os ensaios varia de 33 a 75% UR, por isso, para o cálculo da incerteza de medição é considerado $\pm 1,5$ % UR.

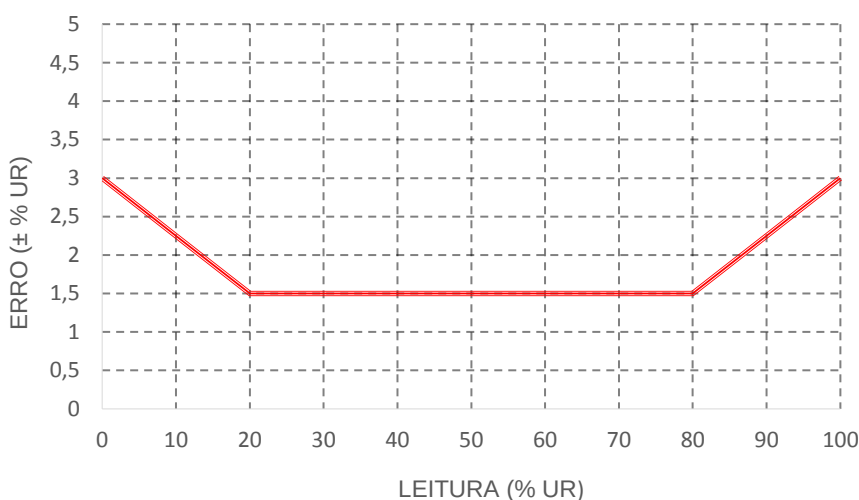


Figura 26 – Erro de medição do transmissor da umidade relativa do ar
Fonte: Adaptado (Data sheet).

4.1.4 Termorresistência PT-100

Durante os ensaios é utilizado um sensor de termorresistência PT-100, que fica posicionado na entrada da célula teste. O sensor tem duas funções, através dele que o software supervisor realiza o controle da temperatura do ar que é insuflado na célula teste e por ser um instrumento com um erro menor que o termopar, é utilizado como referência para correção da leitura dos termopares em relação a junta fria do sistema de aquisição de dados.

Seu funcionamento consiste na variação de sua resistência elétrica em função da temperatura em que ele se encontra. O PT-100 possui uma curva característica padrão seguindo a Escala Internacional de Temperatura de 1990, ITS-90 (Preston-Thomas H, 1990), porém o PT-100 utilizado foi previamente calibrado onde se obteve

um polinômio como função da resistência, sua calibração foi realizada pelo TECPAR (Instituto de Tecnologia do Paraná) na faixa de -40 a 80 °C, fornecendo o valor da termorresistência em função da temperatura com um passo de 1 °C.

A incerteza de medição apresentada é a incerteza do laboratório de calibração, o erro da curva polinomial e a incerteza do sistema de aquisição de dados, a combinação dos erros resulta na incerteza de medição de $\pm 0,1$ K.

4.1.5 Termopar tipo T

Termopares são sensores simples, por isso são muito utilizados para medição de temperatura. São compostos por dois fios de materiais distintos ligados pela extremidade, a temperatura da junta gera uma pequena tensão na ordem de microvolts que aumenta conforme aumenta a temperatura, isso é chamado de efeito de Seebeck. A Figura 27, mostra um termopar tipo T, medido a temperatura de 20 °C gerando uma tensão de 0,79 mV.

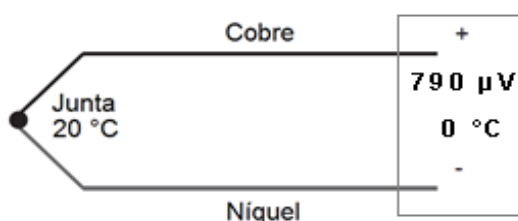


Figura 27 – Termopar tipo T

São utilizados 3 termopares do tipo T, composto por cobre (+) e níquel (-), sua faixa de operação é entre -200 e 350 °C. O primeiro é posicionado junto com o PT-100, os outros dois um é posicionado no centro da célula teste e o outro na saída.

A incerteza de medição do termopar é a incerteza apresentada pelo sistema de aquisição de dados, primeiro o sistema de aquisição de dados faz a leitura da temperatura da junta de referência que é do próprio sistema, calcula a tensão equivalente para o termopar e depois soma a tensão de cada canal, a incerteza apresentada é de $\pm 0,5$ K.

4.1.6 Célula de carga de 50 kg

As células de carga são utilizadas para medir a variação da massa da célula teste. Elas são compostas por 3 transdutores de força que utiliza um sensor *strain gage* para medição da força, seja de compressão ou tração, onde a deformação do sensor gera uma tensão linear através da variação da resistência elétrica do condutor.

São utilizadas 3 células de carga da marca HBM, modelo S40 com capacidade para 50 kg. Elas apresentam classe de exatidão C3 de 0,03%. A sensibilidade da célula de carga é de 3 mV/V e a tensão de alimentação pode variar de 5 a 15 V, quanto maior a tensão de entrada, maior a tensão de saída. A Figura 28 é da célula de carga utilizada nos ensaios.



Figura 28 – Célula de carga HBM S40

A alimentação das células de carga é realizada através de uma fonte portátil da marca Tektronix modelo ps280 que fornece uma tensão de 0 a 30V de corrente contínua e incerteza de medição de 5 mV + 0,01%. Para a realização dos ensaios a tensão utilizada foi de 8 V.

As células de carga foram calibradas usando massas padrão de aproximadamente 1 kg previamente medidas em balança de precisão com capacidade de até 6 kg e com incerteza de medição de 1 g. As massas foram postas em ordem sobre a célula de carga até atingirem 20 kg e retiradas na mesma ordem, o processo foi repetido por 3 vezes com cada célula teste, para a obtenção da equação linear da célula de teste.

Para obter a equação de cada célula de carga foi realizado uma regressão linear referente aos valores obtidos da tensão de saída em função da massa sobre a célula de carga, utilizando fator de Student de 95%.

Na Tabela 9, apresenta-se as incertezas das células de carga de acordo com seu número de série e a equação linear obtida através da calibração, para facilitar a descrição na sequência do trabalho, elas são numeradas como C_1 , C_2 e C_3 .

Os erros referentes à fonte de alimentação e o sistema de aquisição de dados são desconsiderados, já que a calibração foi realizada na mesma condição dos ensaios.

Tabela 9 – Incerteza de medição da equação das células de carga

Célula de carga	Número de série	Equação [kg]	Incerteza de medição [kg]
C_1	31241262H	$m = 0,3202 \cdot x + 0,1342$	$\pm 0,013$
C_2	31241268H	$m = 0,3201 \cdot x + 0,1428$	$\pm 0,002$
C_3	31241275H	$m = 0,3206 \cdot x + 0,1611$	$\pm 0,007$

4.1.7 Área da célula teste

A área para a transferência de massa são as paredes da célula teste, para mensurar a área de cada lado foi utilizado uma trena com incerteza de medição padrão de ± 1 mm.

Para a célula teste de compensado são utilizados os 6 lados da célula teste, já para as outras duas células teste feitas de *drywall* são utilizadas apenas as 4 paredes laterais, isso ocorre devido a dificuldade de manuseio do *drywall* nas superfícies inferior e superior, ocorrendo quebra do material, nesse caso, as paredes superior e inferior ficam isoladas desconsiderando as suas superfícies.

A área total de transferência de massa é de 3,20 m² para o compensado e 2,13 m² para o *drywall*.

4.2 PROPAGAÇÃO DOS ERROS

“Toda medida é afetada por um erro. Este erro pode ter inúmeras possíveis causas como a temperatura dilatando os materiais, a instabilidade de circuitos

eletrônicos de medição em função do tempo em que se encontram ligados e da temperatura em que está operando, dentre outras fontes de erro” (Flesch, 1990).

Uma forma de verificar a confiabilidade dos dados obtidos nos ensaios para o cálculo do índice MBV é através da propagação dos erros das grandezas envolvidas. Quando um parâmetro ou grandeza a ser medido (G) é dependente de outras grandezas independentes ($G_1; G_2; \dots; G_n$), para determinar a incerteza de medição da variável dependente é necessário analisar a propagação dos erros de cada variável independente, neste caso, as grandezas envolvidas são a massa, umidade relativa e área de transferência de massa.

A incerteza de medição total da variável dependente devido às incertezas (G_i) das variáveis independentes é dada pela Equação (16) (Flesh, 1990).

$$\frac{IMG}{G} = \pm \sqrt{\left(\frac{(IMG)G_1}{G}\right)^2 + \left(\frac{(IMG)G_2}{G}\right)^2 + \dots + \left(\frac{(IMG)G_n}{G}\right)^2} \quad (16)$$

onde, $\frac{(IMG)G_i}{G}$ são as incertezas relativas a cada grandeza independente.

Esta análise de propagação dos erros é útil para avaliar os efeitos que cada grandeza exerce sobre a variável dependente e possibilitando analisar a viabilidade do sistema de medição antes mesmo da realização de ensaios (Taylor, 1988).

Na sequência deste capítulo é apresentado o cálculo da propagação dos erros de cada grandeza envolvida na determinação do índice MBV e para finalizar, a incerteza de medição do índice MBV.

4.2.1 Medição da massa

A massa total (MT) da célula teste é o somatório das massas das três células de cargas utilizadas (C_1, C_2 e C_3). A incerteza de medição das células de carga da massa total é a propagação dos erros das três células de carga, que são correlacionadas por serem calibradas com os mesmos instrumentos, o cálculo para a incerteza correlacionada é realizando utilizando na Equação (17).

$$\frac{IM_{MT}}{MT} = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{IM_{C1}}{MT}\right) + \left(\frac{IM_{C2}}{MT}\right) + \left(\frac{IM_{C3}}{MT}\right)\right]^2} \quad (17)$$

onde: IM_{MT} é a incerteza de medição da massa total [kg];

MT é a massa total da célula teste [kg];

IM_{Ci} é a incerteza de medição da célula de carga.

Para a incerteza de medição de cada célula de carga é considerado a incerteza das massas e da balança utilizada na calibração, além da incerteza do polinômio já apresentada anteriormente. Desta forma, é utilizado a Equação (18) para o cálculo da incerteza de medição de cada célula de carga.

$$\frac{IM_{Ci}}{MCi} = \pm \sqrt{\left(\frac{IM_{polinômio}}{MCi}\right)^2 + \left[\left(\frac{IM_{p1}}{MCi}\right) + \dots + \left(\frac{IM_{p20}}{MCi}\right)\right]^2} \quad (18)$$

Realizando os cálculos da Equação (18) para cada célula de carga obtêm-se a incerteza de medição, apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Incerteza de medição da célula de carga.

Célula de carga	Número de série	IM_{MCi} [kg]
C1	31241262H	$\pm 0,014$
C2	31241268H	$\pm 0,005$
C3	31241275H	$\pm 0,008$

Com a incerteza de medição de cada célula de carga é possível calcular a incerteza de medição da massa total utilizando a Equação (17). O valor da massa total é a média da massa da última hora do primeiro ciclo, onde a massa do material tende a estabilizar quando a umidade relativa interior é de 50% ao longo de 24 horas. A Figura 29 mostra a variação da massa dos três materiais na última hora do primeiro ciclo.

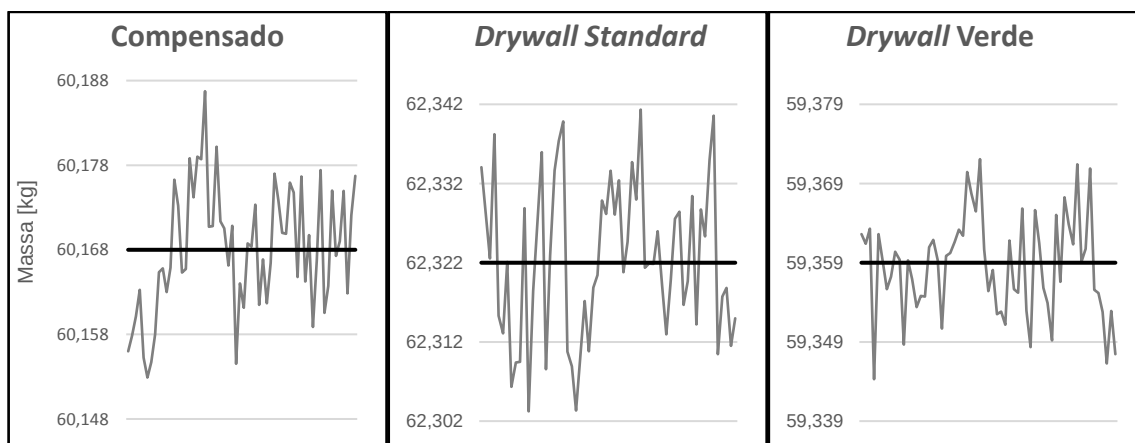


Figura 29 – Variação da massa da célula teste com duração de 1 hora

Substituindo os valores da incerteza de medição das células de carga da Tabela 9 e as massas da Tabela 11 na Equação (17) obtêm-se a incerteza de medição da massa total da célula teste, apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Incerteza de medição da massa total.

Material	Massa total [kg]	IM_{MT} [kg]
Compensado	60,168	$\pm 0,017$
<i>Drywall standard</i>	62,322	$\pm 0,017$
<i>Drywall verde</i>	59,359	$\pm 0,017$

4.2.2 Medição da umidade relativa

Para a incerteza de medição da umidade relativa, são considerados os erros do transmissor e do sistema de aquisição de dados, ambos apresentados no capítulo anterior, com um valor de $\pm 1,5\%$ UR, para o sistema de aquisição de dados é considerado o erro crítico que é $\pm 0,4$ mV e a umidade relativa considerada é a do pior caso, com 100% UR.

Para o cálculo da propagação do erro da medição da umidade relativa é utilizado a Equação (19).

$$\frac{IM_{UR}}{UR} = \pm \sqrt{\left(\frac{(IM_{Trans})}{UR}\right)^2 + \left(\frac{(IM_{SAD})}{UR}\right)^2} \quad (19)$$

onde: IM_{UR} é a incerteza de medição da umidade relativa do ar [%];

UR é a umidade relativa do sistema [%];

IM_{Trans} é a incerteza de medição do transmissor [%];

IM_{SAD} é a incerteza de medição do sistema de aquisição de dados [mV];

A incerteza de medição da umidade relativa é de $\pm 1,5\%$ UR, a mesma do transmissor, o erro do sistema de aquisição de dados é muito baixo e quando comparado com o erro do transmissor e pode ser desconsiderado.

4.2.3 Medição da área das paredes da célula teste

Para o cálculo da área de transferência de massa da célula teste, é utilizado a mesma trena para medir todos os lados das paredes da célula teste. Isso aumenta a chance de um erro sistemático.

Como a área é uma função quadrada dos lados da célula teste, para o cálculo da incerteza de medição é necessário derivar a função em relação a grandeza medida (Flash, 1990). As equações da área para o compensado e o *drywall* são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Área da célula teste em função do lado.

Material	Equação da área [m²]
Compensado	$A = 6 \cdot L^2$
<i>Drywall standard</i>	$A = 4 \cdot L^2$
<i>Drywall verde</i>	$A = 4 \cdot L^2$

Para o cálculo da propagação do erro da medição da área total de transferência de massa é utilizado a Equação (20), que é relacionada com o erro de medição das dimensões dos lados da célula teste.

$$\frac{IM_{\hat{A}rea}}{A} = \pm \sqrt{\left(\frac{(IM_A)L}{A}\right)^2} \quad (20)$$

A incerteza de medição das dimensões dos lados das paredes é calculada através da derivada da equação da área em função do lado, conforme Equação (21).

$$\frac{(IM_A)L}{A} = \pm \frac{\partial A}{\partial L} \cdot \frac{IM_L}{A} \quad (21)$$

A Tabela 13 apresenta a derivada das equações da Tabela 11 e os valores da incerteza de medição da trena e a área para o compensado e o *drywall*.

Tabela 13 – Valores para cálculo da incerteza de medição da área total.

Material	Derivada da equação [m]	IM_L [m]	Área [m ²]
Compensado	$\frac{\partial A}{\partial L} = 12 \cdot L$	$1 \cdot 10^{-3}$	3,20
<i>Drywall standard</i>	$\frac{\partial A}{\partial L} = 8 \cdot L$	$1 \cdot 10^{-3}$	2,13
<i>Drywall verde</i>	$\frac{\partial A}{\partial L} = 8 \cdot L$	$1 \cdot 10^{-3}$	2,13

Substituindo os valores da Tabela 13 na Equação (21) é obtido a incerteza de medição da área total de transferência de massa para cada material, apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Incerteza de medição da área.

Material	IM_A [m ²]
Compensado	$\pm 0,009$
<i>Drywall standard</i>	$\pm 0,006$
<i>Drywall verde</i>	$\pm 0,006$

4.2.4 Incerteza de medição do índice MBV

O índice MBV é uma grandeza dependente da massa da célula teste, umidade relativa do ar e da área de transferência de massa, apresentados anteriormente neste capítulo. Para o cálculo da incerteza de medição do índice MBV, primeiramente é necessário calcular a incerteza de medição do MBV em relação a cada grandeza

envolvida derivando a equação do MBV em função da grandeza envolvida conforme a Equação (22).

$$\frac{(IM_{MBV})G_i}{MBV} = \pm \frac{\partial MBV}{\partial G_i} \cdot \frac{IM_{G_i}}{MBV} \quad (22)$$

Com a incerteza de medição do MBV em relação a cada variável, é calculado a incerteza de medição do índice MBV através da Equação (23).

$$\frac{IM_{MBV}}{MBV} = \pm \sqrt{\left(\frac{(IM_{MBV})\Delta m}{MBV}\right)^2 + \left(\frac{(IM_{MBV})UR}{MBV}\right)^2 + \left(\frac{(IM_{MBV})A}{MBV}\right)^2} \quad (23)$$

A Tabela 15 apresenta a derivada da equação do MBV em relação a cada variável independente e a incerteza de medição da variável calculada anteriormente.

Tabela 15 – Valores para cálculo da incerteza de medição do MBV.

Grandeza	Derivada da equação MBV	IM_{G_i}
Massa	$\frac{\partial MBV}{\partial m} = \frac{1}{A \cdot \Delta UR}$	$\pm 0,017 \text{ kg}$
Umidade relativa	$\frac{\partial MBV}{\partial UR} = \frac{-\Delta m}{A \cdot \Delta UR^2}$	$\pm 1,5 \%UR$
Área compensado	$\frac{\partial MBV}{\partial A} = \frac{-\Delta m}{A^2 \cdot \Delta UR}$	$\pm 0,009 \text{ m}^2$
Área <i>drywall</i>	$\frac{\partial MBV}{\partial A} = \frac{-\Delta m}{A^2 \cdot \Delta UR}$	$\pm 0,006 \text{ m}^2$

Com as derivadas da equação do índice MBV e as incertezas de medições de cada grandeza apresentadas na Tabela 15 é possível calcular a incerteza de medição do índice MBV conforme a Equação (23). Os valores calculados são apresentados Tabela 16 a seguir.

Tabela 16 – Incerteza de medição do índice MBV.

Material	$IM_{MBV} \left[\frac{g}{m^2 \cdot \% UR} \right]$
Compensado	$\pm 0,26$
<i>Drywall standard</i>	$\pm 0,22$
<i>Drywall verde</i>	$\pm 0,21$

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as medições realizadas com a nova configuração de bancada implementada neste trabalho em relação ao trabalho do Meissner (2008). Três diferentes materiais (compensado, *drywall standard* e *drywall verde*) foram testados e determinado o índice MBV das células de teste.

As apresentações dos resultados são separadas por material, um para o compensado e outro para o *drywall*, onde são apresentados gráficos dos controles no interior da célula teste, como, temperatura, umidade relativa e variação da massa. Isso garante que os ensaios respeitaram as condições propostas pelo protocolo Nordtest, assim como, as variações do protocolo.

Os ensaios realizados com o compensado são para analisar a influência que o teor de umidade inicial exerce na determinação do índice MBV, são apresentados os ensaios com o material seco, úmido e o ensaio padrão do Nordtest, os resultados dos três ensaios são comparados, assim como os resultados obtidos por Meissner (2008).

Os ensaios efetuados com o *drywall* são para comparar um material *standard* com outro que apresenta uma película de revestimento isolante de vapor d'água e analisar a influência que esse revestimento exerce sobre índice MBV do material da célula de teste.

5.1 COMPENSADO

Para o compensado foram realizados 3 ensaios com duração de 6 dias, o primeiro dia é para a massa do material estabilizar com o meio, nos outros 5 dias a umidade relativa varia ciclicamente com 8 horas com 75% UR e 16 horas com 33% de umidade relativa.

O primeiro ensaio seguiu o protocolo de teste Nordtest proposto por Rode (2005) e o mesmo utilizado por Meissner (2008). A célula teste permaneceu as primeiras 24 horas com 50% UR no seu interior. A seguir, são mostrados os gráficos de controle e monitoramento da temperatura, umidade relativa e massa gerados pelo software supervisor.

A Figura 30 mostra um exemplo padrão do controle da temperatura realizada pelo software supervisor no interior da célula teste. O sensor de controle para o software é o PT-100 posicionado na entrada da célula teste, além de outros três

termopares para monitoramento, um posicionado junto ao PT-100, um no centro e outro na saída.

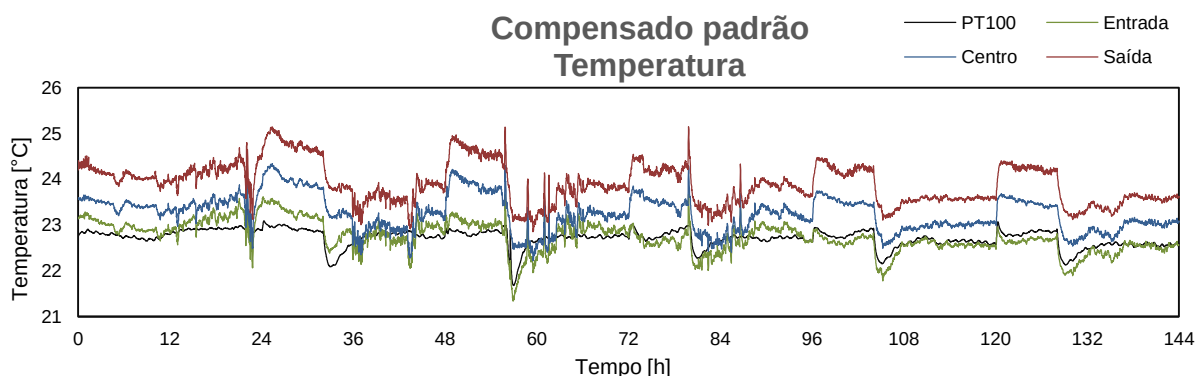


Figura 30 – Controle da temperatura do compensado, primeiro ensaio

Embora a temperatura no interior da célula teste devesse ser isotérmica, a Figura 30 demonstra que há um degrau de temperatura sempre que ocorre mudança no ciclo da umidade relativa, que é aceitável por ser uma variação em um único instante. Para aumentar a umidade insuflada na célula teste, o software aciona a resistência para geração de vapor, o que faz com que a temperatura interior aumente. Como o controle da temperatura é efetuado pelas medições realizadas pelo PT-100, esta variação não é captada tão bem quanto pelos termopares em função de sua inércia térmica maior.

A Figura 31 mostra o controle da umidade relativa realizado na entrada da célula teste, onde a umidade varia ciclicamente respeitando a variação proposta pelo Nordtest. É possível observar que tanto no centro quanto na saída a variação da umidade relativa é mais baixa, atingindo no máximo 60% UR, essa diferença em relação à umidade relativa na entrada, pode ser pelo fato de que parte da umidade insuflada na célula teste é adsorvida pelo material, outro ponto a ser questionado é o aumento da temperatura tanto no centro quanto na saída que fazem com que a umidade relativa também diminua.

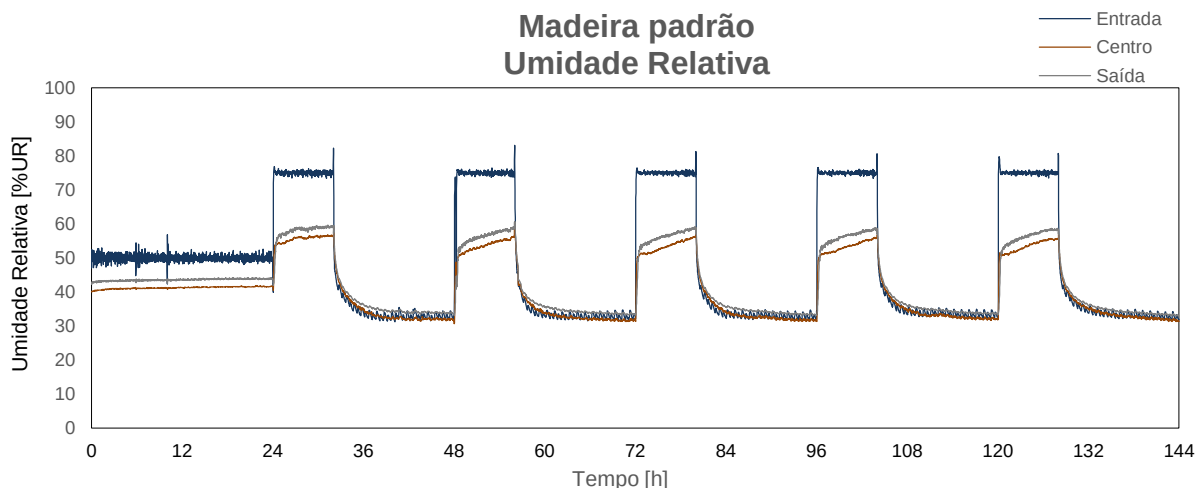


Figura 31 – Controle da umidade relativa do compensado, primeiro ensaio

Na Figura 32 é possível ver a variação da massa da célula teste de acordo com a adsorção/dessorção da umidade conforme a variação cíclica da umidade relativa interna.

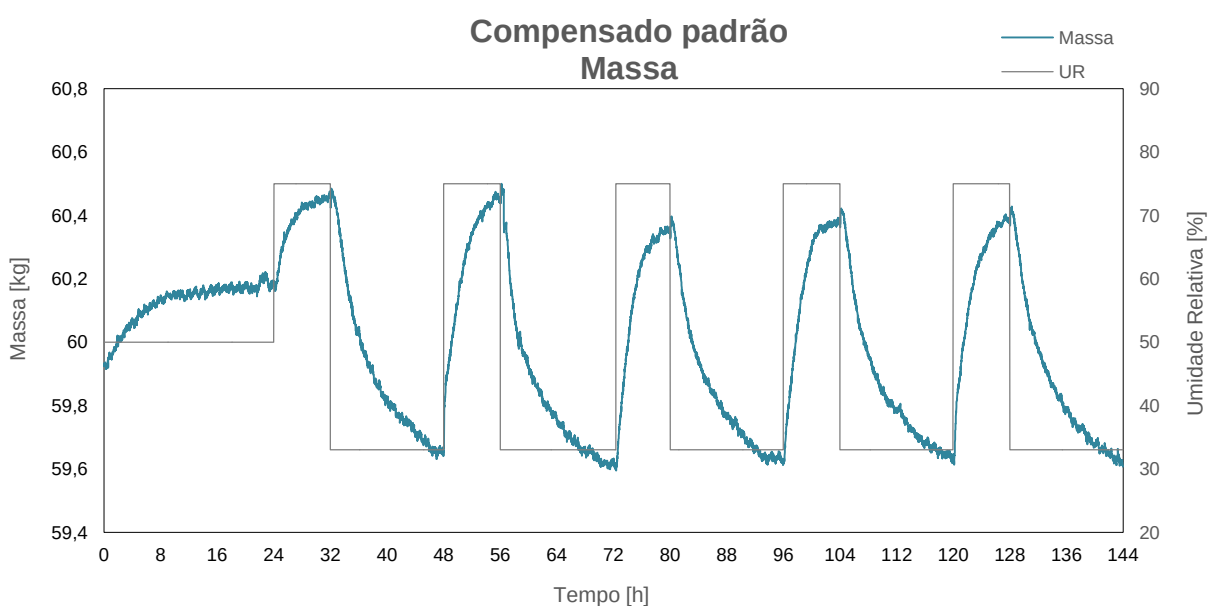


Figura 32 – Variação da massa da célula teste do compensando, primeiro ensaio

É possível observar uma baixa variação da massa da célula teste nas primeiras 24 horas onde a umidade relativa foi mantida constante de 50% UR, quando iniciou a variação da umidade relativa conforme o protocolo Nordtest, o processo de adsorção/dessorção ficou semelhante, não ocorrendo ganho de massa pelo material, ou seja, o que foi adsorvido em 8 horas foi dessorvido em 16 horas.

5.1.1 Influência da umidade inicial no índice MBV

O segundo e terceiro ensaios realizados com o compensado foram para verificar a influência que o teor de umidade inicial exerce sobre o índice MBV. No segundo ensaio a célula teste permaneceu 24 horas com 75% UR no seu interior, enquanto que o terceiro permaneceu 24 horas com 33% UR, caracterizando os ensaios com o material inicialmente úmido e seco.

Após a caracterização dos materiais, os ensaios seguiram o protocolo padrão, variando ciclicamente a umidade relativa insuflada na célula teste entre 75% e 33% UR.

Na sequência são apresentados os controles realizados pelo software supervisor para a temperatura, umidade relativa e variação da massa da célula teste. As Figuras 33, 34 e 35 são referentes ao ensaio para o compensado úmido e as Figuras 36, 37 e 38 referentes ao ensaio para o compensado seco.

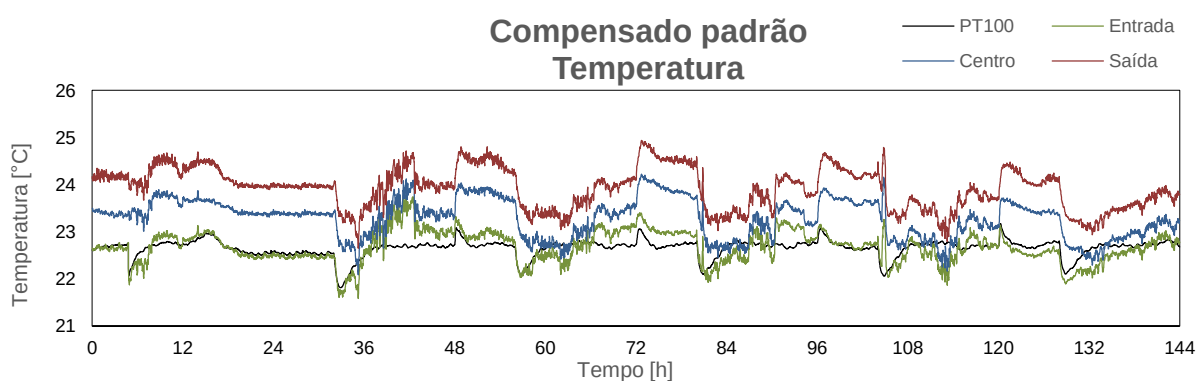


Figura 33 – Controle da temperatura, segundo ensaio

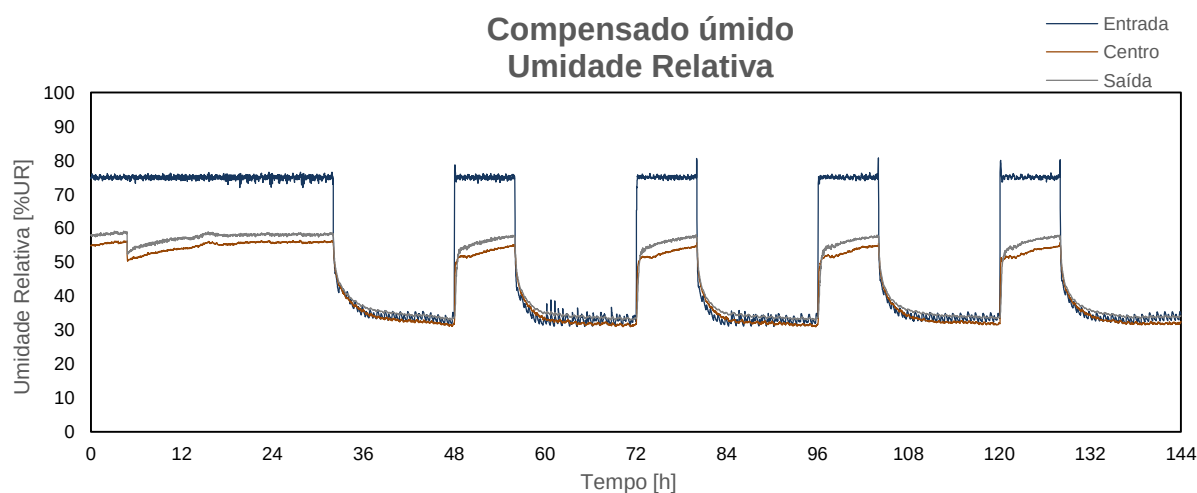


Figura 34 – Controle da umidade relativa segundo ensaio

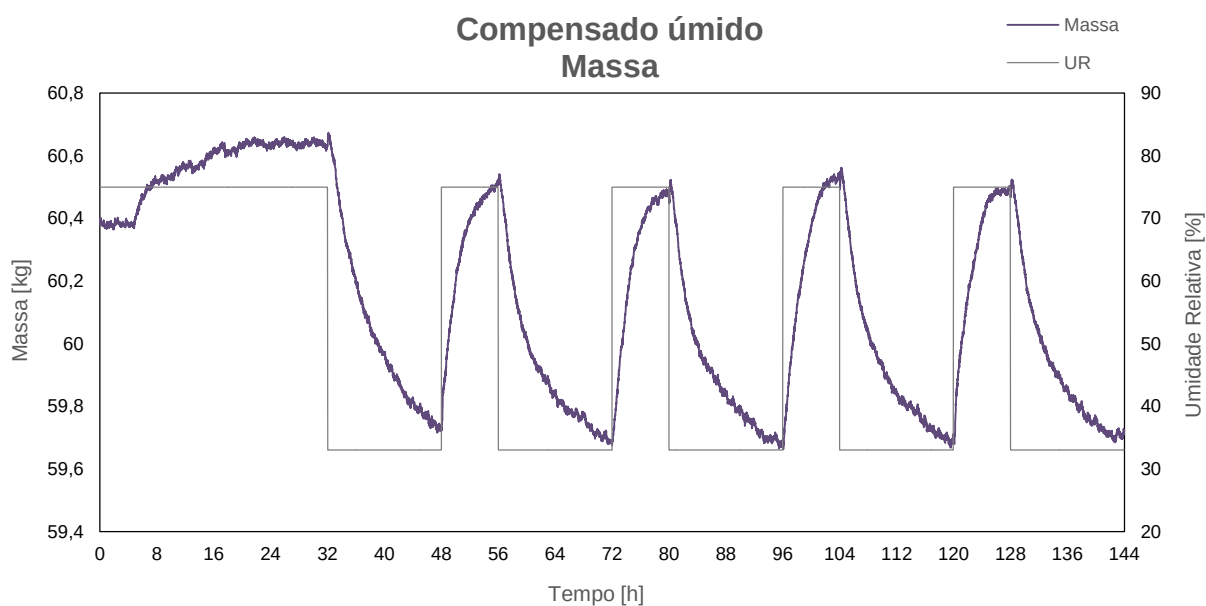


Figura 35 – Variação da massa da célula teste segundo ensaio

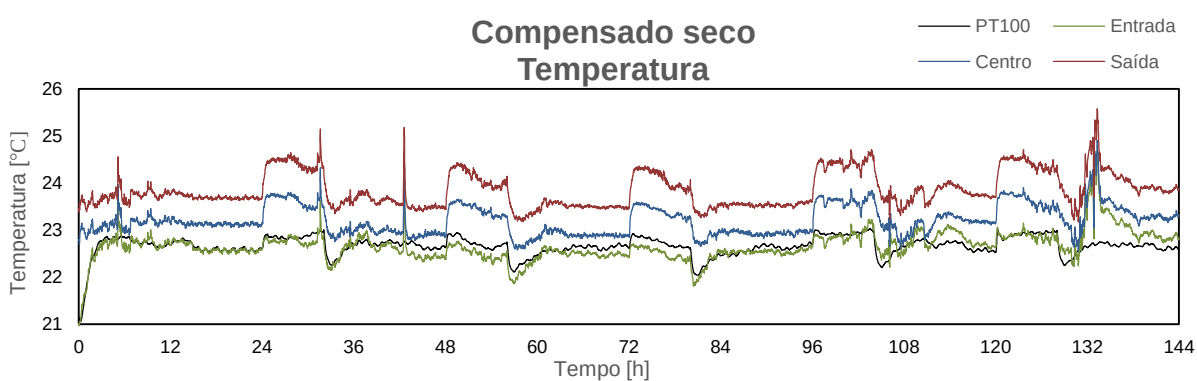


Figura 36 – Controle da temperatura terceiro ensaio

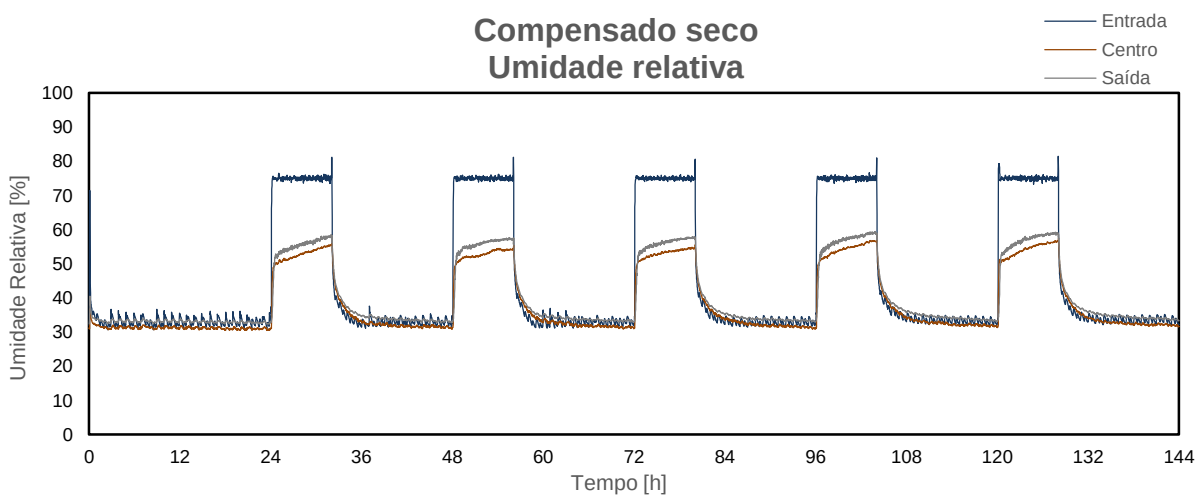


Figura 37 – Controle da umidade relativa terceiro ensaio

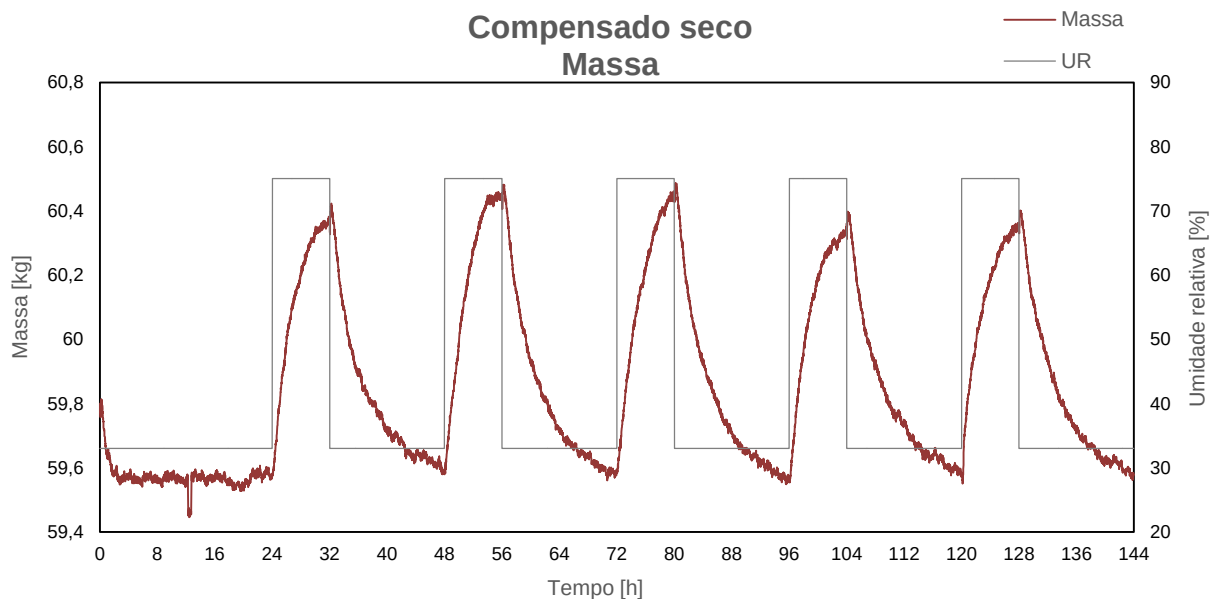


Figura 38 – Variação da massa da célula teste terceiro ensaio

Os controles realizados no segundo e terceiro ensaio mostram um comportamento da célula teste semelhante ao primeiro, seguindo o protocolo Nordtest.

As Figuras 33 e 36, mostram o controle da temperatura, onde apresentaram o mesmo degrau do primeiro ensaio, conforme a umidade relativa insuflada na célula teste.

As Figuras 34 e 37 são as variações da umidade relativa no interior da célula teste, assim como no primeiro ensaio, a umidade no centro e na saída forma menores que a umidade de entrada, devido ao fenômeno de adsorção e dessorção do material.

As Figuras 35 e 38 são referentes a variação da massa da célula teste conforme variação da umidade relativa insuflada. Na Figura 35, a célula teste atinge a massa máxima durante as primeiras 24 horas onde permanece com 75% UR, quando se inicia o ciclo da umidade a massa máxima de cada ciclo fica um pouco a baixo da massa inicial, enquanto que na Figura 38 a célula teste atinge a massa mínima nas primeiras 24 horas onde o material permanece com 33% UR, quando inicia a variação da umidade relativa, a massa mínima fica um pouco acima da massa inicial.

Durante os ciclos de umidade, o material apresentou um comportamento semelhante nos três ensaios, a principal diferença foi no primeiro ciclo devido ao teor de umidade presente no material.

5.1.2 Comparação dos ensaios do compensado

Os três ensaios realizados com o compensado apresentaram resultados muito semelhantes. Os dados obtidos através do software supervisorio para temperatura e umidade relativa mostram o mesmo comportamento no interior da célula teste e que os ensaios respeitaram as condições propostas pelo Nordtest.

A Figura 39 mostra a comparação da variação da massa em cada ensaio. Mesmo com diferentes teores de umidade inicial, a adsorção e dessorção apresentada pelo material são semelhantes em todos os ensaios, a principal diferença é a massa inicial, indicando que esse parâmetro pouco influenciará o valor do índice MBV.

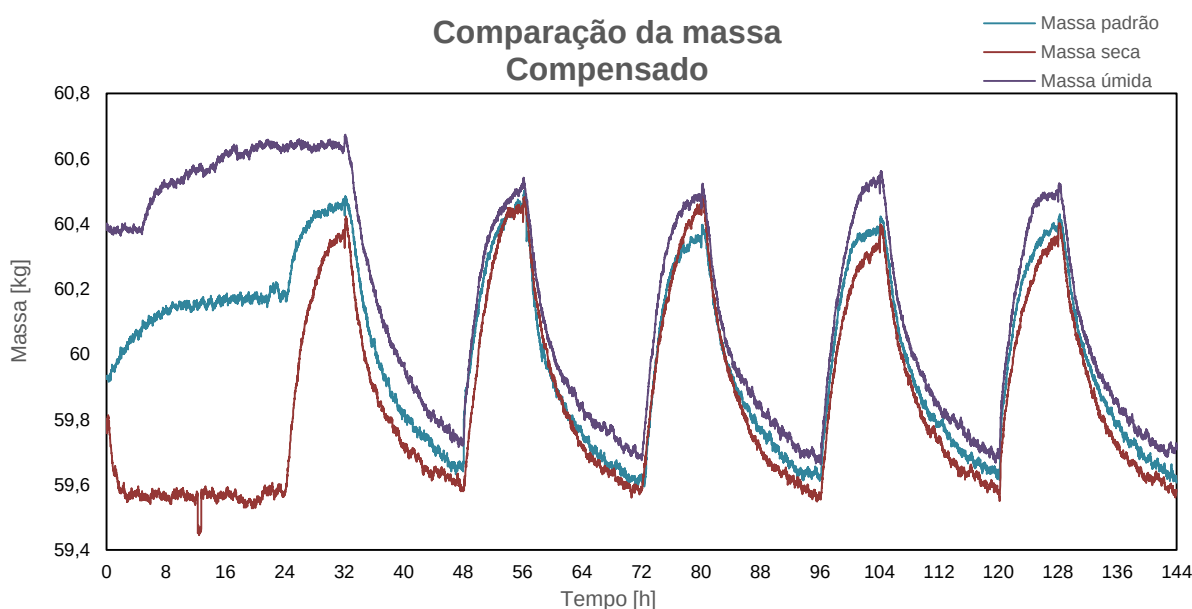


Figura 39 – Variação das massas do compensado

Durante cada ciclo, tanto a adsorção quanto a dessorção do compensado são muito semelhantes, ou seja, o que o material adsorve nas 8 horas de alta umidade ele dessorve no período de 16 horas de baixa umidade. A Tabela 17 mostra o ganho e a perda de massa da célula teste em cada ciclo de adsorção e dessorção de umidade, iniciando com a massa da célula teste após permanecer 24 horas sem variação da umidade relativa.

Tabela 17 – Valores de adsorção/dessorção do compensado.

Ciclo	Padrão		Úmido		Seco	
	Adsorção [kg]	Dessorção [kg]	Adsorção [kg]	Dessorção [kg]	Adsorção [kg]	Dessorção [kg]
Massa Inicial	60,193 kg		60,637 kg		59,575 kg	
01	0,281	-0,818	0,002	-0,916	0,791	-0,787
02	0,804	-0,827	0,785	-0,833	0,873	-0,863
03	0,713	-0,720	0,800	-0,786	0,859	-0,881
04	0,753	-0,747	0,848	-0,836	0,788	-0,777
05	0,758	-0,783	0,794	-0,774	0,786	-0,785
Massa Final	59,607 kg		59,721 kg		59,579 kg	

Durante o processo de adsorção e dessorção em cada ciclo, o material não chega a atingir o equilíbrio com o meio, esse processo levaria muito tempo (HAGENTOFT, 2001), com protocolo Nordtest é possível analisar a tendência de adsorção e dessorção de umidade pelo material. Para facilitar a visualização da Tabela 17, os valores são apresentados num gráfico de barras, conforme a Figura 40, onde são agrupados por ciclos, sendo os ímpares de adsorção e os pares de dessorção. Os valores da dessorção são em módulo para facilitar a comparação.

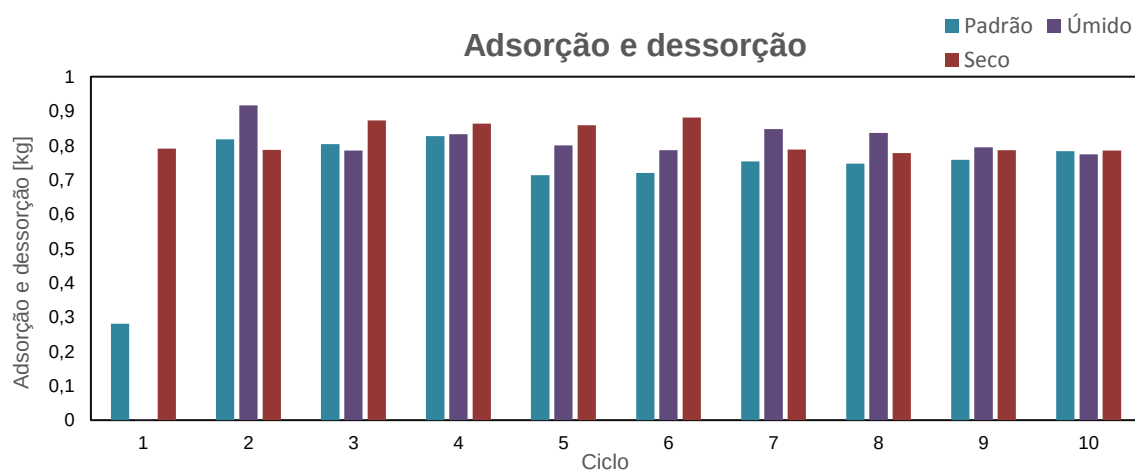


Figura 40 – Adsorção e dessorção do compensado.

Analisando a Figura 40 observamos que a maior diferença está no primeiro ciclo onde quase não ocorre adsorção pelo material úmido, enquanto que o material seco adsorve bastante umidade. Já no último ciclo é possível observar que o material apresenta o mesmo fluxo de vapor independente do teor de umidade inicial. Essas

considerações ficam claras observando a Figura 41, onde é representado a variação da massa apenas no primeiro e no último ciclo.

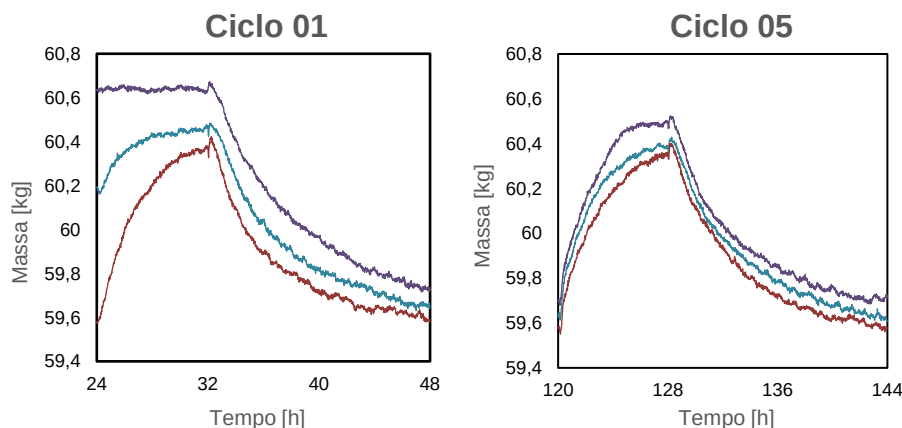


Figura 41 – Variação da massa nos ciclos 01 e 05.

O primeiro ciclo mostra uma grande diferença na massa inicial da célula teste, enquanto que no último ciclo as massas das células testes são muito semelhantes para os três ensaios, independente do teor de umidade inicial, embora as curvas sigam a tendência inicial, com a amostra com maior teor de umidade inicial com a maior massa e a de menor teor de umidade com a menor massa.

5.1.3 Índice MBV - Compensado

Com o objetivo de analisar a influência que o teor de umidade inicial do material exerce sobre resultado final do índice MBV, foram realizados ensaios com o material seco, úmido e seguindo o protocolo de teste Nordtest.

Para a determinação do índice MBV foram utilizados os dados de adsorção e dessorção da umidade, a variação da umidade relativa e a área de transferência de massa dos últimos três ciclos de cada ensaio.

As tabelas a seguir apresentam os dados da massa máxima, mínima e a variação da umidade relativa em cada ciclo, com isso é calculado o MBV final do material em $[g/m^2 \%UR]$.

Tabela 18 – MBV compensado padrão.

Tabela 10 - MBV compensado padrão.									
MBV PADRÃO									
CICLO	MÁX [kg]	MÍN [kg]	Δ UR [%]	ÁREA T. [m²]		CICLO	ADS. [kg]	DES. [kg]	MBV D. [g/(m² %UR)]
1	60,474	59,656	40,389	3,20		3	0,713	0,720	5,73
2	60,460	59,633	40,248			4	0,753	0,747	6,11
3	60,346	59,626	39,096			5	0,758	0,783	6,03
4	60,379	59,632	38,401						
5	60,390	59,607	39,963					MBV	5,96

Tabela 19 – MBV compensado úmido.

MBV ÚMIDO									
CICLO	MÁX [kg]	MÍN [kg]	Δ UR [%]	ÁREA T. [m²]		CICLO	ADS. [kg]	DES. [kg]	MBV D. [g/(m² %UR)]
1	60,639	59,723	39,585	3,20		3	0,800	0,786	6,20
2	60,508	59,675	41,142			4	0,848	0,836	6,82
3	60,475	59,689	39,991			5	0,794	0,774	6,14
4	60,537	59,701	38,611						
5	60,495	59,721	39,929					MBV	6,39

Tabela 20 – MBV compensado seco.

MBV SECO									
CICLO	MÁX [kg]	MÍN [kg]	Δ UR [%]	ÁREA T. [m²]		CICLO	ADS. [kg]	DES. [kg]	MBV D. [g/(m² %UR)]
1	60,366	59,579	40,604	3,20		3	0,859	0,881	6,93
2	60,452	59,589	40,635			4	0,788	0,777	6,36
3	60,448	59,567	39,289			5	0,786	0,785	6,17
4	60,355	59,578	38,497						
5	60,364	59,579	39,815					MBV	6,48

O compensado é um material poroso e muito higroscópico, o índice MBV obtido nos ensaios varia entre 6 e 6,5 (g/m² %UR), desta forma, o material apresenta classificação como um excelente material para diminuir a variação da umidade em interiores. Esses valores são muito mais altos que os materiais testados durante o Nordtest, isso porque o material testado é um aglomerado de cavaco de madeira colado, isso faz com que o material tenha muitos poros e assim consiga reter muita umidade no seu interior. A Figura 42 mostra o índice MBV do material em barras, facilitando a comparação entre os três ensaios.

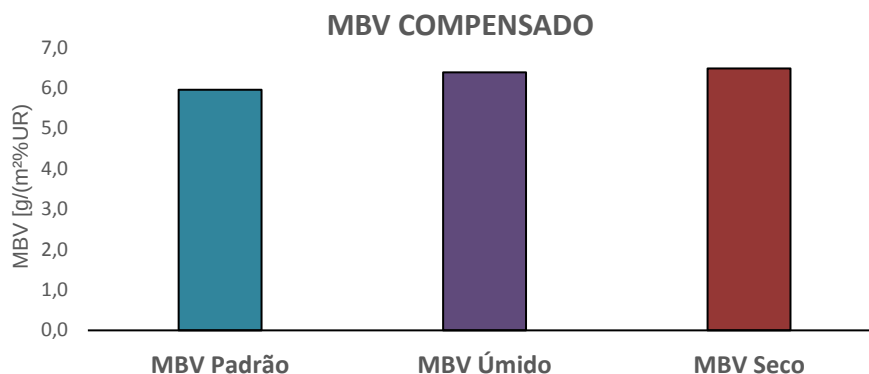


Figura 42 – Análise MBV compensado

Com os ensaios realizados é possível observar que o teor de umidade inicial exerce uma influência nos primeiros ciclos da adsorção e dessorção. Conforme apresentado na Tabela 17, o material com alto teor de umidade inicial não consegue adsorver umidade (2 gramas) enquanto que o com baixa teor de umidade adsorve muita umidade (791 gramas), porém essa diferença só ocorre no primeiro ciclo, conforme vai passando o tempo os três ensaios tendem a apresentar o mesmo comportamento, obtendo um índice MBV muito parecido, independente do teor de umidade.

A Tabela 21 mostra o índice MBV do compensado com diferentes condições iniciais encontrados neste trabalho, além do MBV encontrado por Meissner (2008) com uma célula teste com área de transferência de massa oito vezes maior.

Tabela 21 – MBV compensado.

MATERIAL	MBV [g/m²%UR]	Área de fluxo de massa [m²]	Classificação
Compensado padrão	5,96 ± 0,26	3,20	Excelente
Compensado úmido	6,39 ± 0,26	3,20	Excelente
Compensado seco	6,48 ± 0,26	3,20	Excelente
Compensado célula com isolamento Meissner (2008)	0,58 ± 0,04	24,36	Moderado
Compensado célula sem isolamento Meissner (2008)	1,00 ± 0,04	24,36	Bom
Compensado amostra Meissner (2008)	0,010 ± 0,007	7,82 · 10 ⁻²	Desprezível

Analisando os valores obtidos do índice MBV nos três ensaios com o compensado variando o teor de umidade inicial, concluímos que este parâmetro exerce baixa influência na determinação do MBV final, embora ocorra uma diferença entre os índices, ainda se encontram dentro da faixa da incerteza de medição.

Outro parâmetro a ser analisado é o tamanho da célula teste comparando os índices obtidos neste trabalho com os de Meissner (2008) para uma célula teste quase oito vezes maior. Os resultados obtidos com e sem isolamento externo foram bem inferiores aos índices MBV obtidos neste trabalho para o mesmo material, o mesmo acontece com a amostra que possui um índice MBV ainda menor.

Em comparação aos índices MBV, os obtidos neste trabalho são classificados como excelentes reguladores de umidade com um índice aproximadamente 6 vezes maior que o índice sem isolamento classificado como bom regulador de umidade e quase onze vezes maior que o índice com isolamento classificado como bom regulador de umidade.

Com os resultados obtidos conclui-se que o tamanho da área de exposição do material à umidade, exerce sim influência sobre o índice MBV. Para melhor definir a influência que esse parâmetro exerce, o ideal seria realizar ensaios com variações progressivas na área da célula teste.

5.2 DRYWALL

Foram realizados ensaios em dois tipos de *drywall*, utilizados por empresas da construção civil. O primeiro e mais comum de ser encontrado é o *standart*, utilizado de forma geral em qualquer ambiente. O segundo é denominado *dwywall* “verde” com o uso direcionado para ambientes que tenham um alto teor de umidade, como cozinhas e banheiros, esse material possui uma película de revestimento higroscópico para limitar a adsorção pelo material, essa película é da cor verde, por isso o nome dado ao material.

5.2.1 Ensaio *drywall standard*

O ensaio realizado para o *drywall standard* segue o protocolo de teste Nordtest, com duração de 5 dias, com o primeiro dia para a massa da célula teste entrar em equilíbrio com o teor de umidade inicial em 50 %UR, em seguida são 4 dias com a

umidade relativa variando ciclicamente, com a umidade alta 75 %UR e baixa de 33 %UR.

A seguir são apresentados os controles realizados pelo software supervisorio para temperatura, umidade relativa e variação da massa da célula teste. A Figura 43 é referente à temperatura, apresentando o um comportamento semelhante ao do compensado, com um degrau de temperatura sempre que o sistema de geração de vapor é acionado.

A Figura 44 mostra a variação da umidade relativa no interior da célula teste, a umidade no interior da célula teste é melhor que a da entrada, aumentando gradativamente ao longo do tempo, isso ocorre devido a adsorção de umidade pelo material.

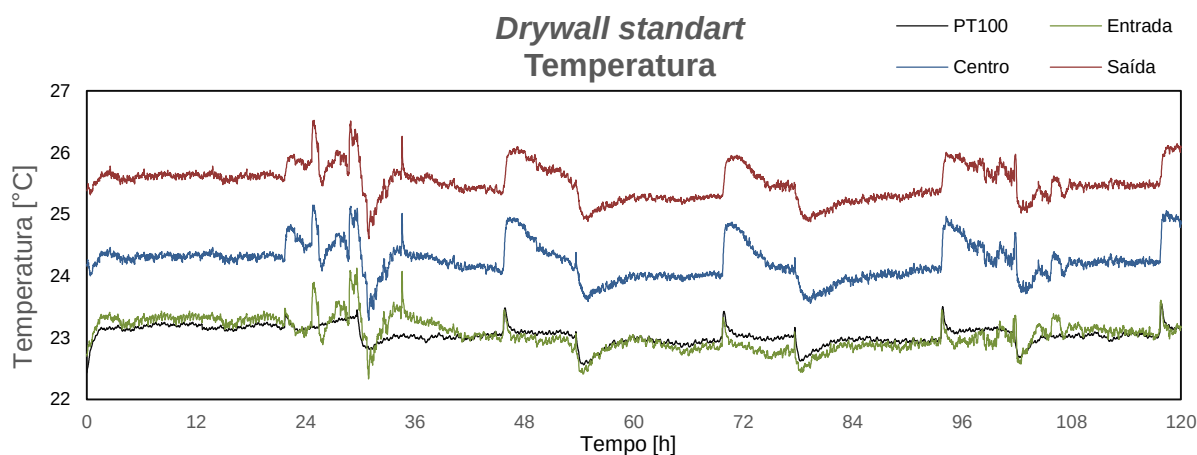


Figura 43 – Controle da temperatura – *drywall standart*

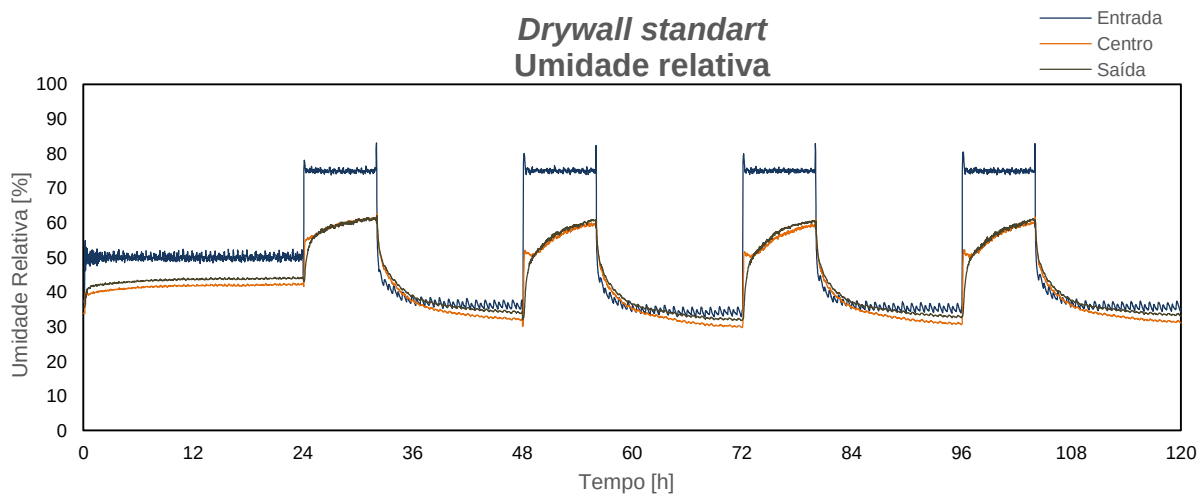


Figura 44 – Controle da umidade relativa – *drywall standart*

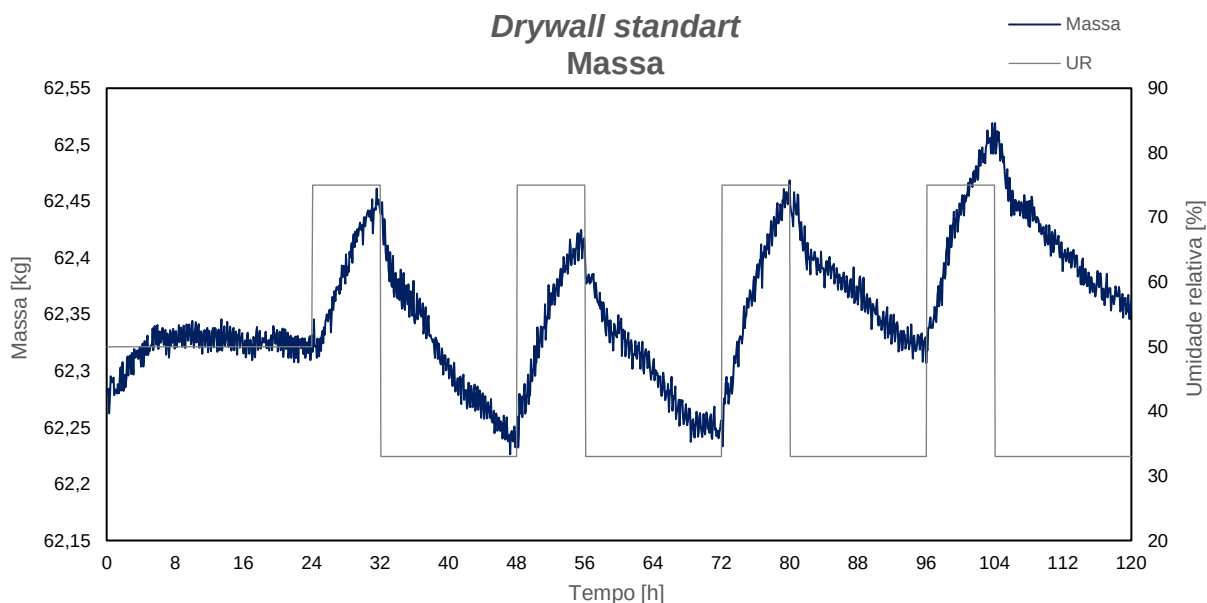


Figura 45 – Variação da massa do – *drywall standard*

A Figura 45 mostra a variação da massa da célula teste conforme variação da umidade relativa, o comportamento do *drywall standart* já é diferente do comportamento do compensado, enquanto o primeiro adsorve e desorve grande quantidade de umidade sem apresentar ganho de massa por ciclo, já o *drywall* apresenta baixo fluxo de vapor, porém um pequeno ganho de massa por ciclo.

5.2.2 Ensaio *drywall verde*

O ensaio realizado para o *drywall* “verde” segue o protocolo de teste Nordtest, com duração de 5 dias, com o primeiro dia para estabilizar a massa da célula teste com o teor de umidade inicial em 50 %UR, em seguida são 4 dias com a umidade relativa variando ciclicamente, com a umidade alta 75 %UR e baixa de 33 %UR.

No final do terceiro dia de ensaio ocorreu um problema no controlador da câmara, fazendo com que a temperatura aumentasse de 15 °C até 50 °C. Apesar da falha ocorrida, foi dado continuidade no ensaio. Este ensaio não pode ser refeito em função que a câmara apresentou este problema recorrentemente e não foi possível realizar a manutenção em tempo hábil.

A seguir são apresentados os controles realizados. A Figura 46 mostra o controle da temperatura, a Figura 47 é o controle da umidade relativa e a Figura 48 é a variação da massa da célula teste.

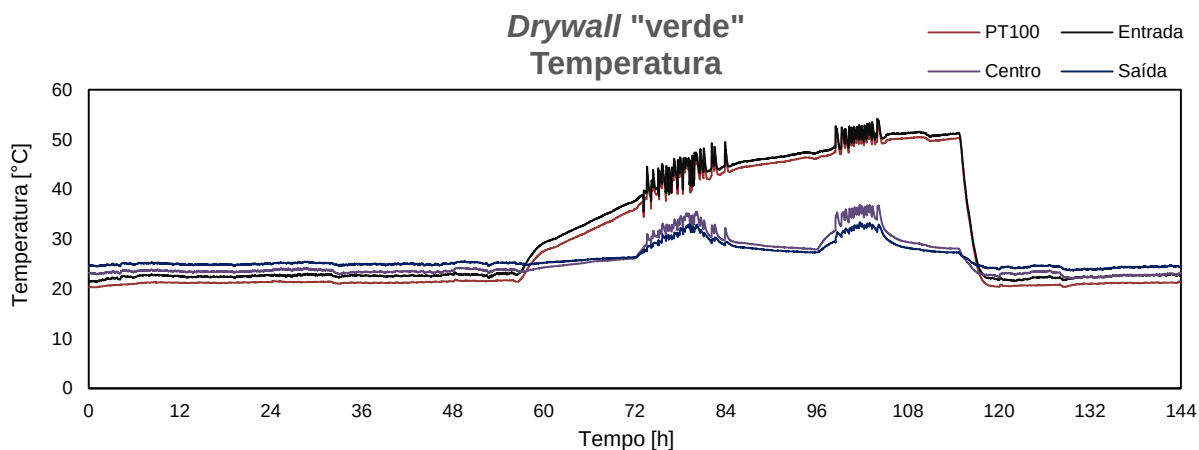


Figura 46 – Controle da temperatura – *drywall* “verde”

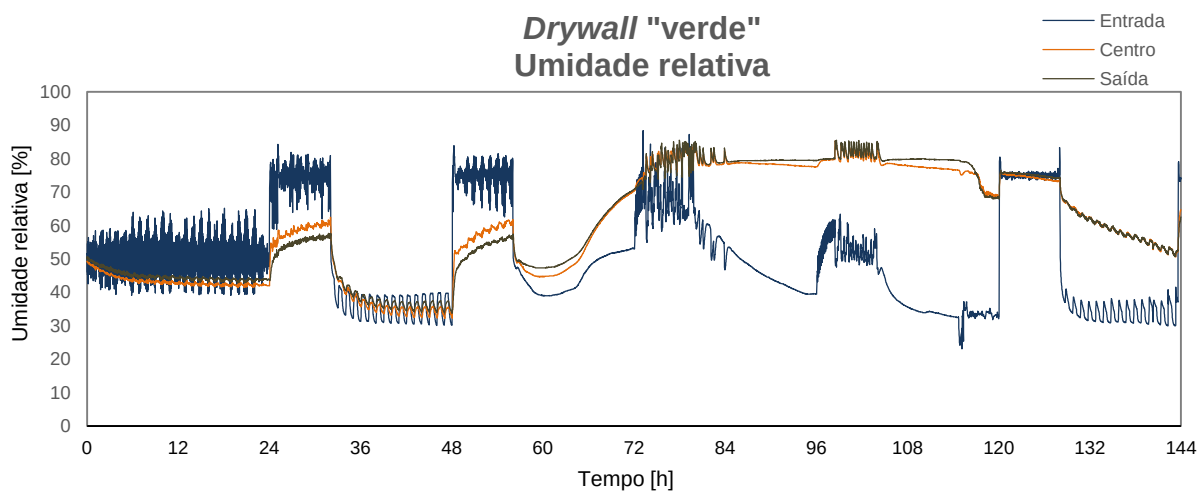


Figura 47 – Controle da umidade relativa – *drywall* “verde”

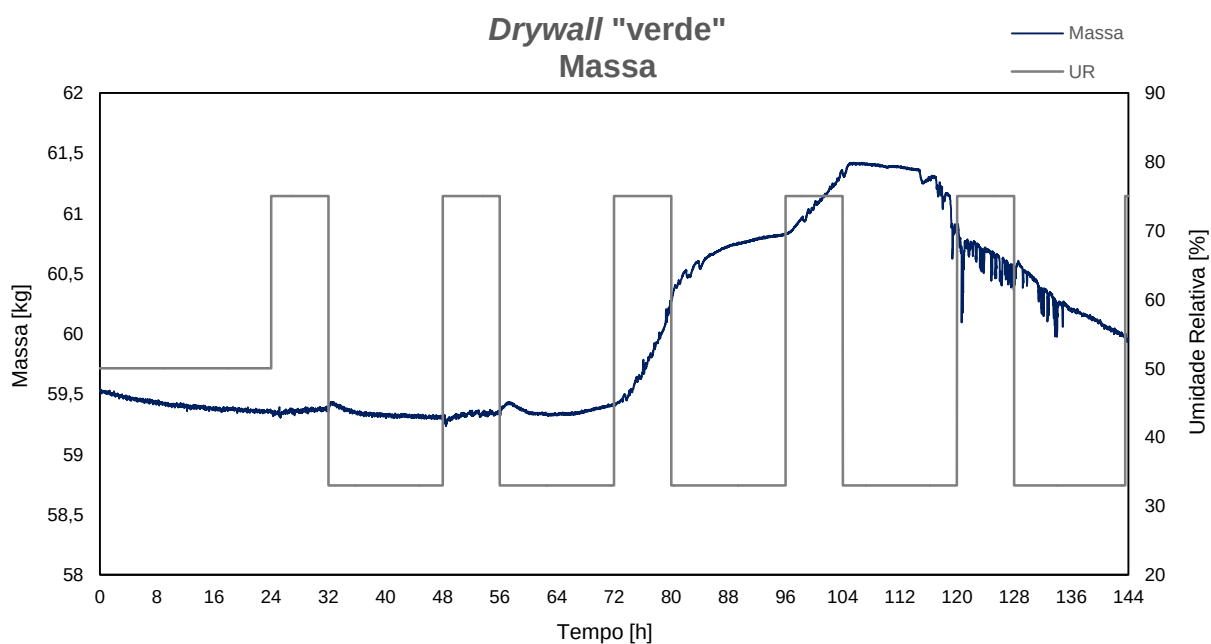


Figura 48 – Variação da massa – *drywall* “verde”

Na Figura 46 é possível observar o momento em que a temperatura da célula teste começa a aumentar, atingindo uma temperatura máxima de 50 °C na entrada e 35 °C no centro e na saída da célula teste.

A instabilidade da temperatura fez com que a bancada psicrométrica não conseguisse controlar a umidade relativa que é insuflada na célula teste, já que, a umidade relativa é uma relação entre a pressão parcial de vapor pela pressão de vapor saturado, que são calculados em função da temperatura, essa instabilidade é observada na Figura 47.

Com a falta de controle da temperatura e umidade relativa, a massa da célula teste também sofreu grandes variações, isso porque a adsorção física também é em função da temperatura. Com a temperatura constante nos ensaios anteriores não foi possível verificar essa interferência, mas analisando a Figura 48 vemos que com o aumento da temperatura a massa da célula teste também aumenta, ou seja, quanto maior a temperatura maior o fluxo de massa para dentro do material.

Apesar do pouco tempo em que os controles funcionaram corretamente, é possível perceber a baixa variação da massa inicial antes do aumento da temperatura. A Figura 49 mostra esta variação da massa para o primeiro ciclo (entre 24 e 48 horas) e um baixo ganho de massa no início do segundo ciclo (entre 48 e 56 horas).

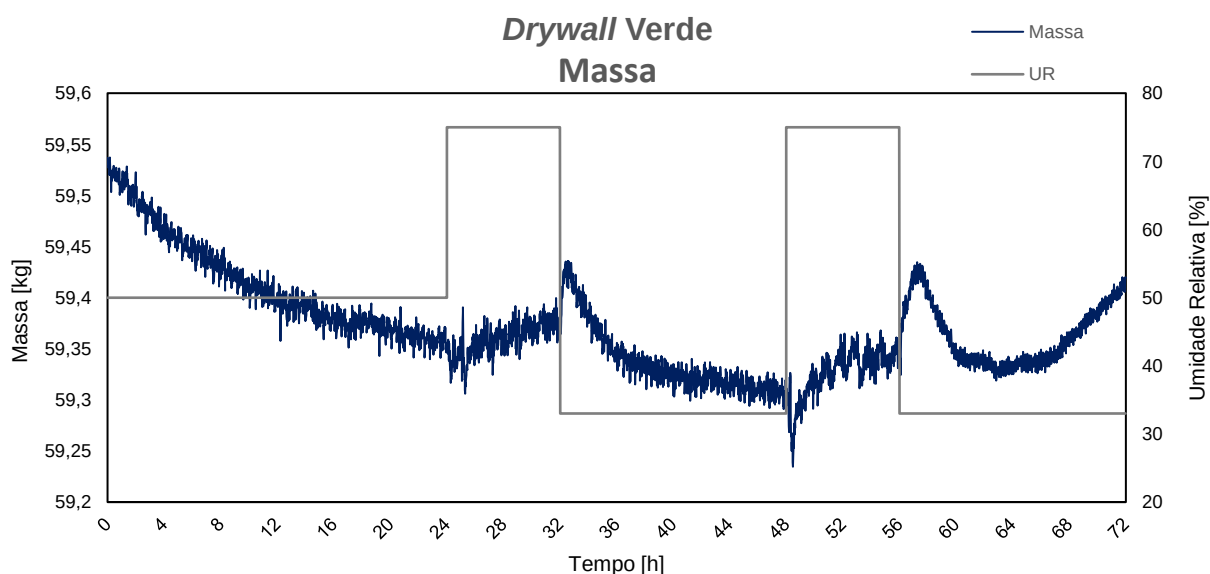


Figura 49 – Variação da massa inicial do *drywall* verde

5.2.3 Índice MBV – *Drywall*

A seguir são apresentados os dados do índice MBV do *drywall standard* e a tendência de comportamento do *drywall* verde, que foi considerado apenas o primeiro ciclo de adsorção e dessorção para comparação com o MBV do *drywall standard*.

Na Tabela 22 temos os dados utilizados para determinação do índice MBV do *drywall standard* para 4 ciclos, a variação média da massa por ciclo é de 167,2 gramas e o índice MBV é de 2,06. Analisando o MBV dos últimos três ciclos é possível observar uma baixa variação entre o primeiro e o terceiro.

Tabela 22 – MBV *drywall standard*.

MBV DRYWALL STANDARD								
CICLO	MÁX [kg]	MÍN [kg]	Δ UR [%]	ÁREA T. [m²]	CICLO	ADS. [kg]	DES. [kg]	MBV D. [g/m² %UR]
1	62,445	62,241	36,902	2,13	2	0,171	0,165	2,03
2	62,413	62,248	38,945		3	0,208	0,132	2,10
3	62,455	62,323	37,981		4	0,180	0,147	2,04
4	62,503	62,356	37,539				MBV	2,06

A Tabela 23 apresenta os dados do *drywall* verde considerando apenas 1 ciclo, neste ciclo a variação da massa foi baixa, de 53 gramas. Os demais ensaios realizados nestre trabalho mostram que não ocorre uma variação significativa no índice MBV em comparação do primeiro para o último ciclo, desta forma, o índice MBV do *drywall* verde é 0,65.

Tabela 23 – MBV *drywall* verde.

MBV DRYWALL VERDE								
CICLO	MÁX [kg]	MÍN [kg]	Δ UR [%]	ÁREA T. [m²]	CICLO	ADS. [kg]	DES. [kg]	MBV D. [g/m² %UR]
1	59,371	59,305	38,15	2,13	2	0,039	0,066	0,65
2	59,344						MBV	0,65

Analisando a classificação do índice MBV dos dois materiais testados, obtemos para o *drywall standard* uma classificação entre bom e excelente enquanto que o *drywall* verde é classificado entre limitado e moderado.

Durante o protocolo Nordtest, foram realizados ensaios com placas de gesso, semelhantes ao *drywall*, na Tabela 24 temos a comparação do MBV entre os dois tipos de *drywall* e o gesso.

Tabela 24 – MBV *drywall*.

MATERIAL	MBV [g/m ² %UR]
<i>Drywall standard</i>	2,06 ± 0,22
<i>Drywall verde</i>	0,65 ± 0,21
Gesso Nordtest	0,61 ± 0,17

O valor obtido para o índice MBV do *drywall verde* é semelhante ao do gesso um material pouco higroscópico, enquanto que o *drywall standard* é um material que adsorve mais umidade. Mesmo com o índice MBV do *drywall verde* sendo obtido com um ensaio incompleto o principal objetivo é verificar a quantidade de umidade adsorvida pelo material, que foi bem inferior ao *standard*.

A diferença entre o gesso e o *drywall* é que o *drywall* é uma placa de gesso revestida por um material semelhante a uma cartolina. A diferença no MBV dos dois materiais é a adsorção realizada por esse material em volta do gesso no *drywall* enquanto que no *drywall verde* esse revestimento possui isolante higroscópico diminuindo o fluxo de massa na superfície do material.

Analisando a falha ocorrida no controle da temperatura do ensaio com o *drywall verde*, vemos que a temperatura exerce grande influência na capacidade dos materiais de adsorver/dessorver umidade, embora não tenha sido realizado ensaios em diferentes temperaturas.

O resultado obtido para os dois tipos de *drywall* já era esperado, uma vez que o *drywall standard* é utilizado em áreas comuns sem a preocupação da umidade o *drywall verde* é utilizado em áreas com alto teor de umidade sendo necessária a presença de isolando higroscópico para diminuir a deteriorização deste material.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi analisado o método experimental desenvolvido no projeto Nordtest para quantificar a capacidade dos materiais higroscópicos em adsorver/dessorver umidade do meio através do índice MBV, para isso foi realizado a variação de alguns parâmetros como área de transferência de massa, teor de umidade inicial, temperatura e isolante higroscópico na superfície do material da célula teste.

Para isso foi utilizado um aparato experimental desenvolvido por Meissner (2008) composto por duas câmaras climatizadas com temperatura e umidade relativa controladas, uma bancada psicrométrica capaz de controlar temperatura, umidade relativa e taxa de renovação de ar.

A célula teste utilizada por Meissner (2008) era de 2 x 2 x 2 m, ocupando quase que totalmente uma das câmaras climatizadas, a célula teste desenvolvida neste trabalho tem dimensões de 0,73 x 0,73 x 0,73 m, bem menor que a utilizada por Meissner (2008), onde é possível realizar a troca do material mantendo a mesma estrutura, assim realizar ensaios com diferentes materiais nas mesmas condições. Ela é posicionada sobre três células de carga que registram a variação da massa conforme uma variação cíclica da umidade relativa insuflada.

O aparato experimental mostrou-se capaz de realizar diferentes ensaios em diferentes condições como foi realizado neste trabalho, para isso é necessário apenas ajustes nos controladores da bancada psicrométrica para controle da temperatura e umidade relativa do ar de acordo com a velocidade que o ar passa pelo duto de insuflamento.

Ao analisar os resultados do índice MBV do compensando da célula teste, nota-se que o teor de umidade inicial exerce baixa influência no MBV onde não ocorreu uma variação significativa. Quanto ao tamanho da célula teste em comparação com uma maior, os índices obtidos neste trabalho foram quase dez vezes maiores que os obtidos por Meissner (2008) para o mesmo material com isolamento externo. O compensado testado foi classificado como um excelente controlador da umidade interior pois apresentou MBV acima de 3,5.

O segundo material analisado o *drywall* é de importância comercial, já que são materiais utilizados na construção civil e a adsorção e dessorção da umidade apresentam grandes impactos. A análise dos dois materiais mostra que o *drywall standard* apresenta alta capacidade de adsorção de umidade sendo classificado entre

bom e excelente enquanto que o *drywall* verde, com um isolante higroscópico é classificado entre limitado e moderado. Neste caso os dois materiais atingem a expectativa, uma vez que o *standard* é para uso comum em diversos ambientes servindo para amortizar a umidade interior e o verde é utilizado em locais com alto teor de umidade, sendo recomendado um baixo fluxo de umidade para não deteriorar o material.

Uma sugestão para trabalhos futuros é analisar a influência que a temperatura exerce no índice MBV, assim como foi feito com o teor de umidade inicial calcular o MBV em temperaturas diferentes, outro ponto é analisar a influência que a taxa de renovação do ar pode exercer.

Um outro trabalho vem sendo realizado em paralelo que é o desenvolvimento de um código numérico para simulação da célula teste, o principal problema é ajustar as propriedades físicas do compensado para implementar no código, sendo necessário uma descrição melhor do material, como permeabilidade ao vapor d'água, porosidade, efussividade, entre outros. Com isso seria possível comparar os dados experimentais deste trabalho com os resultados numéricos, além de outros softwares de simulação como o Domus.

REFERÊNCIAS

ABADIE, M.O.; MENDONCA, K.C. Moisture performance of building materials: from material characterization to building simulation using the moisture buffer value concept. **Building and Environment**. v. 44, p. 388-401, 2009.

AZEVEDO, S.C. **Influência no teor de água no comportamento de materiais de construção**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, 2011.

BASTO, J.E. **Qualidade do ar interno**. Engenharia de Segurança do Trabalho, Itajaí, 2007.

CEROLINI, S.; D'ORAZIO, M.; DI PERNA, C; STAZI, S. Moisture buffering capacity of highly absorbing materials. **Energy and Buildings**. v. 41, p. 164-168, 2009.

COSTA, C.M.P. **Estudo da qualidade do ar interior num edifício departamental da UC**. 2001. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra. 2011.

COUASNET, Y. **Contribution a l'etude du transfert de vapeur d'eau en regime permanent et non stationnaire dans les matériaux poreux hygroscopiques**. Centre scientifique et technique du batimento: France, 1989.

DOMUS - PROCEL EDIFICA. **Software de Simulação Higrotérmica e Energética de Edificações**. Versão 1.9.8, 19 de março de 2013.

FANGER, P.O. (1970). **Thermal Comfort**. McGraw-Hill Inc.: New York, USA, 1970.

FERREIRA, O.P.; ALVES, O.L. Ecomateriais: desenvolvimento e aplicação de materiais porosos funcionais para proteção ambiental. **Química Nova**. v. 30, n. 2, p. 464-467, 2007.

GONÇALVES, B.J.S. **Formulações de argamassas controladoras de humidade ambiente**. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia cerâmica e do vidro, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2011

GONÇALVES, H.; GONÇALVES, B.; SILVA, L.; RAUPP-PEREIRA, F.; SENFF, L.; LABRINCHA, J.A. Development of porogene-containing mortars for levelling the indoor ambient moisture. **Ceramics International**. v. 40, p. 15489 – 15495, 2014.

HAGENTOFT, C.E. **Introduction to buildings physics**. Studentlitteratur: Sweden, 2001.

HENS, H. **Building physics heat, air and moisture**. 2 ed. Somerse: Wiley Drive. 2012.

HURT, R.H.; LEE, S. W. Environmentally motivated materials research. **MRS Bulletin**. nov. 2001.

ISO 5151: **Non-ducted air conditioners and heat pumps** – testing and rating for performance, International Organization for Standardization (ISO), 1994.

JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION, 2002. Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity – Part 1: **Response method of humidity**, JIS A 1470-1:2002.

KIM, H.J.; KIM, S. S.; LEE, Y.G.; SONG, K.D. The hygric performances of moisture adsorbing/desorbing building materials. **Aerosol and Air Quality Research**. v.10, p. 625–634, 2010.

LATIF, E.; LAWRENCE, M.; SHEA, A.; WALKER, P. Moisture buffer potential of Experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. **Building and Environment**. v. 93, p. 199-209, 2015.

MAHMUD, K.; MAHMOOD, G.I.; SIMONSON, C.J.; BESANT, R.W. Performance testing of a counter-cross-flow run-around membrane energy exchanger (ramee) system for hvac applications. **Energy and Buildings**. v. 42, p. 1139-1147, jul. 2010.

MEISSNER, J.W. **Desenvolvimento de um aparato experimental para avaliação da inércia higroscópica de elementos porosos de edificações**. 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2008.

MENDES, N. **Modelos para previsão da transferência de calor e de umidade em elementos porosos de edificações**. 1997. 248 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1997.

NUNES, Z.G.; MARTINS, A.S.; NISHIKAWA, M.M.; LEITE, M.O.; ALTOE, A.L.; AGUIAR, P.F.; FRACALANZZA, S.E.; **Indoor air microbiological evaluation of offices, hospitals, industries, and shopping centers**. Memórias do Instituto Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, v. 100, n. 4, p. 351-357, jan/jul. 2005.

OSANYINTOLA, O.F.; SIMONSON, C.J. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: experimental facilities and energy impact. **Energy and Buildings**. v. 38, p. 1270–1282, 2006.

OSANYINTOLA, O.F.; TALUKDAR, P.; SIMONSON, C.J. Effect of initial conditions, boundary conditions and thickness on the moisture buffering capacity of spruce plywood. **Energy and Buildings**. v. 38, p. 1283-1292, 2006.

ÖSTERBERG, M.; LOZHECHNIKOVA, A.; VAHTIKARI, K.; HUGHES, M. Toward energy efficiency through an optimized use of wood: The development of natural hydrophobic coatings that retain moisture-buffering ability. **Energy and Buildings**. v. 105, p. 37-42, 2015

PADFIELD, T. **Humidity buffering of interior spaces by porous, absorbent insulation**. The Technical University of Denmark, Department of Structural

Engineering and Materials December 1999. Disponível em: <<http://www.natmus.dk/cons/tp/wallbuff/wallbuff.htm>>. Acesso em: 04 de junho de 21014.

PADFIELD, T. On the usefulness of water absorbent materials in museum walls. Conservation Department. **The National Museum of Denmark**. 1999.

PEUHKURI, P. **Moisture dynamics in building envelopes**. Department of Civil Engineering DTU-building: Lyngby, 2003.

QUADROS, M.E.; LISBOA, H.M.; OLIVEIRA, V.L.; SCHIRMER, W.N.; Indoor air quality in hospitals: a case study and a critical review of current standards. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 431-438, jul/set. 2009.

RAMOS, N.M.M. **A importância da inércia hidrocópica no compartimento higrotérmico dos edifícios**. 2007. 486 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2006.

RAMOS N.M.M.; FREITAS, V.P. Hygroscopic behavior of coating materials in transient conditions. **Proceedings of the 6th Symposium, Building Physics in the Nordic Countries**, Trondheim, 2002.

RAMOS, N.M.M.; FREITAS, V.P. Hygroscopic inertia as a function of transiente behavior of covering materials. In: **ASHRAE Buildings IX Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings**, Florida, 2004.

RODE, C. Moisture buffering of building materials, Department of CivilEngineering, Technical University of Denmark, Report R-126, 2005.

RODE, C.; GRAU, K. Moisture buffering and its consequence in whole building hygrothermal modeling. **Journal of Building Physics**. v. 31, n. 333, 2008.

RODE, C.; Peuhkuri, R.; Mortense, L.H.; HANSEI, K.K.; **Moisture Buffering of Building Materials**. Nordic Innovation Centre proj. nr.: 04023. Disponível em: <http://www.byv.kth.se/avd/byte/reykjavik/pdf/art_039.pdf>. 2005. Acesso em: 03/09/2014.

ROELS, S.; JANSSEN, H. A comparison of the Nordtest and Japanese test methods for the moisture buffering performance of building materials. **Journal of Building Physics**. v. 30, n. 2, 2006.

ROELS, S.; JANSSEN, H. **Is the moisture buffer value a reliable material property to characterise the hygric buffering capacities of building materials?** Laboratory of Building Physics, K.U.Leuven, Belgium, 2005.

RONZINO, A.; CORRADO, V. **Measuring the hygroscopic properties of porous media in transient regime. From the material level to the whole building HAM simulation of a coated room**. v. 78, p. 1501-1506, 2015

SANTOS, G. H.; MENDES, N. Heat, air and moisture transfer through hollow porous blocks. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v. 52, p. 2390–2398, 2009.

SVENNBERG, K. **Moisture buffering in the indoor environment report TVBH**. 2006. 211 f. Tese (Doutorado em Building Physics LTH) - Lund University, Sweden, 2006.

SVENNBERG, K.; HEDEGAARD, L, RODE, C. Moisture buffer performance of a fully furnished room, in: **Proceedings (CD) of the Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference**, Clearwater Beach, Flórida, 2004.

TALUKDAR, P.; OLUTMAYIN, S. O.; OSANYINTOLA, O. F.; SIMONSON, C. J. An experimental data set for benchmarking 1-D, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials. Part I: Experimental facility and material property data. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v. 50, p. 4527–4539, 2007.

TREYBAL, R. E. **Mass-transfer operations**. 3 ed. McGraw-Hill Book Company: London. 1980.

XAVIER, A. A. P. **Predição de conforto térmico em ambientes internos com atividades sedentárias- teoria física aliada a estudos de campo**. 2000. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2000.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Programmes and projects**: Guidelines for indoor air quality: dampness and mould, 2009.

YOSHINO, H., MITAMURA, T.; HASEGAWA, K. **Small chamber test** (THU test room) in the climate chamber, Annex 41. Subtask 1 Common Exercise 2 (Whole building heat and moisture analysis). 2006.

YOSHINO, H.; MITAMURA, T.; HASEGAWA, K. Moisture buffering and effect of ventilation rate and volume rate of hygrothermal materials in a single room under steady state exterior conditions. **Building and Environment**. 2008.

ZHANG, H.; YOSHINO, H.; HASEGAWA, K. Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method. **Building and Environment**. v. 48, p. 27-34, 2012.