



GONÇALO PINTO SARAIVA BRAVO  
Licenciado em Engenharia Civil

# Moisture Buffering of Buildings Materials: Revisão da Literatura

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL DE CONSTRUÇÃO  
Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade NOVA de Lisboa  
setembro, 2023





# Moisture Buffering of Buildings Materials: Revisão da Literatura

**GONÇALO PINTO SARAIVA BRAVO**  
Licenciado em Engenharia Civil

**Orientador:** Professor Doutor Fernando M. A. Henriques,  
Professor Catedrático, Universidade NOVA de Lisboa

**Júri:**

**Presidente:** Professor Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo,  
Professor Associado, FCT-NOVA

**Arguentes:** Professor Doutor Daniel Aelenei,  
Professor Associado, FCT-NOVA

**Orientador:** Professor Doutor Fernando Manuel dos Anjos Henriques,  
Professor Catedrático, FCT-NOVA



## **Moisture Buffering of Building's Materials: Revisão da literatura**

Copyright © Gonçalo Pinto Saraiva Bravo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Doutor Fernando Henriques pela disponibilidade, paciência e orientação que me ofereceu neste trabalho, sem contar com todos os outros restantes trabalhos no decorrer do meu percurso na faculdade.

Quero agradecer também a todos aqueles que sempre me incentivaram para a finalização deste trabalho, que se mostrou difícil de alcançar com todos os obstáculos que a vida ofereceu, em especial à minha família, por todo o apoio e carinho que me deram ao longo de todo este percurso.

Não me esqueço também de agradecer a todos os meus amigos próximos por nunca desistirem de me motivar e, assim, tornar o trabalho mais fácil.



## **RESUMO**

Os materiais higroscópicos, conhecidos pela sua capacidade de adsorver e desadsorver humidade em resposta à alteração dos níveis de humidade interior, surgiram como componentes essenciais para melhorar a qualidade de conforto, salubridade e eficiência energética de um ambiente. A estratégia de atenuar os níveis máximos e mínimos da humidade relativa, a partir da capacidade de armazenamento de vapor de água por materiais utilizados como revestimento das superfícies, no interior dos edifícios, é ainda uma abordagem por aperfeiçoar e, conseqüentemente, muitas vezes desconsiderada no domínio da construção.

A presente dissertação apresenta uma revisão exaustiva da literatura que engloba os fundamentos teóricos, o desenvolvimento histórico e as aplicações práticas dos materiais capazes de amenizar a humidade. Atendeu-se também à análise da investigação de materiais inovadores, assim como métodos de avaliação dos respetivos materiais, incluindo experiências laboratoriais, simulações numéricas e aplicações em edifícios reais. O estudo explorou também aferir e resumir os modelos mais utilizados pela comunidade científica, com o fim de esclarecer o conceito da capacidade dos materiais para amenizar a humidade relativa interior.

A revisão identifica lacunas no conhecimento existente e áreas que requerem mais investigação, como o domínio de todos os fatores simultâneos e influentes ao comportamento dos materiais, o impacto de alguns materiais na saúde e bem-estar dos ocupantes, na importância da histerese, entre outras. Por fim, foram discutidas novas perspectivas e futuras direções que se requerem para o avanço da compreensão e implementação desta estratégia.

O objetivo desta revisão é fornecer um recurso valioso para investigadores e profissionais da construção interessados na utilização de materiais com capacidade de amenizar a humidade relativa interior de forma a criar ambientes interiores mais saudáveis, confortáveis e energeticamente eficientes. Serve como base para futuros trabalhos de investigação e contribui para o avanço da compreensão e utilização destes materiais no contexto da ciência da construção.

### **Palavras-chave:**

Humidade relativa, Materiais higroscópicos, Capacidade de regularizar a humidade relativa interior, Conforto higrotérmico, MBV.



# ABSTRACT

Hygroscopic materials, known for their ability to adsorb and desorb moisture in response to changes in indoor humidity levels, have emerged as essential components for improving the quality of comfort, health and energy efficiency of an environment. The strategy of attenuating the maximum and minimum levels of relative humidity, based on the water vapor storage capacity of materials used as surface coverings inside buildings, is still an approach that has yet to be perfected and, consequently, is often overlooked in the field of construction.

This dissertation presents an exhaustive literature review that covers the theoretical foundations, historical development and practical applications of materials capable of mitigating humidity. It also looked at research into innovative materials, as well as methods for evaluating the respective materials, including laboratory experiments, numerical simulations and applications in real buildings. The study also explored and summarized the models most commonly used by the scientific community, with the aim of clarifying the concept of the ability of materials to mitigate indoor relative humidity.

The review identifies gaps in existing knowledge and areas that require further research, such as the mastery of all the simultaneous factors influencing the behaviour of materials, the impact of some materials on the health and well-being of occupants, the importance of hysteresis, among others. Finally, new perspectives and future directions that are required to advance the understanding and implementation of this strategy were discussed.

The aim of this review is to provide a valuable resource for researchers and building professionals interested in the use of materials with the ability to mitigate indoor relative humidity in order to create healthier, more comfortable and energy-efficient indoor environments. It serves as a basis for future research and contributes to advancing the understanding and use of these materials in the context of building science.

## **Keywords:**

Relative humidity, Hygroscopic materials, Ability to regulate indoor relative humidity, Hygrothermal comfort, MBV.



# ÍNDICE GERAL

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Finalidade e desígnio da revisão da literatura .....	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
<b>2. NOÇÕES ELEMENTARES.....</b>	<b>3</b>
2.1. Ar húmido .....	3
2.2. Transmissão de humidade nos materiais porosos.....	5
2.3. Transmissão de humidade nos edifícios .....	10
2.4. Conforto higrotérmico .....	11
<b>3. MODELOS EMPÍRICOS.....</b>	<b>13</b>
3.1. Experimentação em laboratório.....	13
3.1.1. Literatura .....	13
3.1.2. Análise.....	19
3.2. Relação do laboratório para a escala real .....	20
3.2.1. Literatura .....	20
3.2.2. Análise.....	21
3.3. Experimentação em escala real .....	21
3.3.1. Literatura .....	21
3.3.2. Análise.....	24
<b>4. MODELOS TEÓRICOS.....</b>	<b>25</b>
4.1. Literatura .....	25
4.2. Análise.....	30
<b>5. MODELOS NUMÉRICOS.....</b>	<b>33</b>
5.1. Literatura .....	33
5.1.1. Modelos simplificados .....	34
5.1.2. Modelos com base nas leis da física.....	37
5.2. Análise.....	40
<b>6. INVESTIGAÇÃO.....</b>	<b>41</b>
6.1. Abordagens experimentais e numéricas .....	41
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>47</b>
7.1. Desenvolvimentos futuros .....	48
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>



# ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Resumo de especificidades dos protocolos passo-reposta.....	15
Quadro 3.2 – Condições de teste para o protocolo UMBV [56]. .....	16
Quadro 3.3 – Classificação do Ultimate Moisture Buffering Value [56].....	17
Quadro 3.4 – Resumo dos testes em laboratório. ....	19
Quadro 3.5 – Resumo dos trabalhos de investigação em escala real. ....	24
Quadro 4.1 – Resultados do cálculo da difusão de vapor de água no betão celular autoclavado (adaptado de [78]).....	26
Quadro 4.2 – Cálculo do MBV pelos diferentes métodos (adaptado de [80]). ....	27
Quadro 4.3 – Resumo dos ensaios teóricos. ....	30
Quadro 5.1 – Sumário do software mais usual para simulação higrotérmica. ....	39



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama psicrométrico.....	5
Figura 2.2 – Principais curvas de adsorção isotérmica, de acordo com Brunauer et al. [19]. ....	7
Figura 2.3 – Curva característica do fenómeno de adsorção em condições isotérmicas (adaptado de [3]) .....	7
Figura 2.4 – Esquema de nomenclatura do teor de humidade nos materiais (adaptado de [10], [20])....	8
Figura 2.5 – Diferença de ângulos nos meniscos para adsorção e desadsorção [16]. ....	9
Figura 2.6 – Difusão de vapor no processo de secagem de um poro [20]. ....	9
Figura 2.7 – Representação genérica da histerese num material poroso em condições isotérmicas (adaptado de [24]). ....	10
Figura 2.8 – Representação esquemática das trocas de humidade nas paredes exteriores originadas pela dinâmica dos parâmetros higrotérmicos e as suas alterações diárias ou sazonais, de acordo com a ASHRAE [27]. ....	11
Figura 3.1 – Princípio de funcionamento da câmara climática de Padfield [46]. ....	13
Figura 3.2 – Ciclos de variação de humidade com onda quadrada e onda sinusoidal. ....	14
Figura 3.3 – Evolução temporal dos níveis de humidade relativa, medidos em diferentes divisões, de uma habitação localizada em Nieuwpoort, Bélgica (adaptado de [55]). ....	15
Figura 3.4 – Câmara climática de Gómez et al. [57]. ....	18
Figura 3.5 – Ideia-base para a infraestrutura de Ramos [22]. ....	19
Figura 3.6 – Efeito do mobiliário na humidade relativa interior (adaptado de [74]). ....	22
Figura 4.1 – Influência do coeficiente de transferência de vapor superfície-ar na resposta higroscópica de uma amostra de painel de aglomerado de madeira (adaptado de [79]). ....	26
Figura 4.2 – Representação esquemática do conceito MBC - variação de massa de um material higroscópico quando exposto a uma variação dinâmica de humidade relativa interior (adaptado de [87]). ....	28
Figura 4.3 – Representação do MBC máximo e espessura ótima para a argamassa argilosa, em condições de ambiente interior controlado (adaptado de [87]). ....	29
Figura 5.1 – Esquema das transferências de vapor e capacidades dos nós para (a) modelo EC e (b) modelo EMPD (adaptado de [95]). ....	35
Figura 5.2 – Modelo do processo da transferência de vapor (adsorção) entre um material e o ar adjacente (adaptado de [102]). ....	37
Figura 6.1 – Direções ou eixos principais no corte da madeira (adaptado de [140]). ....	42
Figura 6.2 – Comparação de humidade relativa interior entre as 3 habitações de teste a uma taxa de ventilação de 2 (dm <sup>3</sup> /s)/m <sup>2</sup> (adaptado de [141]). ....	42
Figura 6.3 – Variação de massa de uma placa de gesso cartonado, num intervalo de humidade relativa	

de 33-75%, temperatura constante a 23°C, sem pintura e com 4 tipos de pintura diferentes (adaptado de [143]).....	43
Figura 6.4 – Esquema de princípio de uma estrutura MOF (adaptado de [164]). .....	45

# LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Abreviatura	Significado
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CFD	Computational Fluid Dynamics (Dinâmica dos Fluidos Computacional)
EC	Effective Capacitance (Capacitância Efetiva)
EMPD	Effective Moisture Penetration Depth (Profundidade Efetiva de Penetração da Humidade)
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologias
HAMT	Combined Heat, Air and Moisture Transfer (Transferência combinada de Calor, Ar e Humidade)
OSB	Oriented Strand Board
UNL	Universidade Nova de Lisboa
WUFI®	Wärme und Feuchte Instationär (Transitoriedade de Calor e Humidade)

## Simbologia [alfabeto romano]

Símbolo	Unidade	Designação
$A$	$m^2$	Área
$b_m$	$kg/(m^2 \cdot Pa \cdot s^{1/2})$	Efusividade hídrica
$d_{EMPD}$	$m$	Profundidade efetiva de infiltração da humidade
$G$	$g/m^2$	Quantidade de vapor de água adsorvido ou desadsorvido
$g$	$kg/m^2 \cdot s$	Fluxo de vapor de água
$H$	%	Nível de humidade relativa alto na expressão do $MBV_{basic}$
$HR$	%	Humidade Relativa
$HIR$	$kg/(m^3 \cdot \%HR)$	“Hygic Inertia of Room” – inércia hídrica por metro cúbico de uma zona em função do MBV dos materiais e mobiliário presentes na zona
$HIR^*$	$kg/(m^3 \cdot \%HR)$	“Production Interval Adapted Hygroscopic Inertia” – inércia hídrica por metro cúbico de uma zona em função do MBV, adaptado aos intervalos de produção de vapor, dos materiais e mobiliário presentes na zona
$L$	%	Nível de humidade relativa baixo na expressão do $MBV_{basic}$
$m_h$	kg	Massa húmida
$m_s$	kg	Massa seca
$MBC$	$g/m^2$	“Moisture Buffering Capacity” – valor representativo para quantificar o desempenho de um material para amenizar a humidade relativa
$MBE$	kg/kg	“Moisture Buffering Effect” – valor representativo da capacidade de um conjunto de materiais presentes numa zona para amenizar a humidade relativa
$MBV$	$kg/(m^2 \cdot \%HR)$	“Moisture Buffering Value” – valor representativo da capacidade de armazenamento de vapor de água por um material ou elemento num ciclo diário

MBV*	kg/(m <sup>2</sup> ·%HR)	“Production Interval Adapted MBV” – MBV adaptado aos diferentes intervalos de produção de vapor numa habitação
MBV <sub>basic</sub>	kg/(m <sup>2</sup> ·%HR)	“Moisture Buffering Value Basic” – MBV adaptado aos intervalos de tempo atribuídos para cada uma das fases de adsorção e desadsorção
$P_v$	Pa	Pressão parcial de vapor de água
$P_s$	Pa	Pressão parcial do “ar seco
$p_{sat}$	Pa	Pressão de saturação
$r$	m	Raio médio dos poros
$R_D$	m <sup>2</sup> ·s·Pa/kg	Resistência à difusão
$S$	Pa	Pressão de sucção
$T$	°C	Temperatura
$t$	s	Tempo
$u$	kg/kg	Teor de humidade em massa
UMBV	g/(m·%HR@12/8/4h)	“Ultimate Moisture Buffering Value” – MBV adaptado a condições climáticas adversas
$v$	kg/m <sup>3</sup>	Concentração de vapor no ar
$v_s$	kg/m <sup>3</sup>	Limite de saturação
$w$	kg/m <sup>3</sup>	Teor de humidade em volume aparente
$Z_p$	m/s	Resistência superficial à difusão

### Simbologia [alfabeto grego]

Símbolo	Unidade	Designação
$\alpha$	adim.	Coefficiente correspondente à relação de horas a considerar de um ciclo na expressão do MBV <sub>basic</sub>
$\alpha_i$	adim.	Coefficiente de ponderação correspondente ao intervalo de produção adotado
$\beta$	adim.	Fator de correção de onda quadrada para sinusoidal na expressão do MBV <sub>basic</sub>
$\beta_p$	s/m	Coefficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão
$\delta_p$	kg/(m·s·Pa)	Permeabilidade ao vapor de água
$\delta_{total}$	kg/(m·s·Pa)	Coefficiente de transferência total de vapor de água concentrado
$\theta$	°	Ângulo de contacto
$\xi_u$	kg/kg	Capacidade de retenção de vapor de água
$\xi_w$	kg/kg	Capacidade higroscópica específica
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Massa volúmica
$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	Massa volúmica seca
$\omega$	kg/kg	Teor de humidade
$\sigma$	N7m	Tensão superficial

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

O aumento do controlo do consumo energético tem vindo a submeter os países à implementação de regulamentos mais exigentes em relação às eventuais perdas energéticas dos edifícios. De forma a reduzir o gasto de energia para aquecimento ou arrefecimento dos ambientes interiores, tem-se vindo a praticar intervenções de reabilitação com maiores espessuras de isolamento térmico ou com materiais mais eficientes no isolamento [1]. Contudo, as intervenções de melhoria da componente térmica resultam na redução das taxas de renovação do ar interior, particularmente quando se procura a diminuição das infiltrações de ar exterior. Consequentemente, sucede-se a subida dos níveis de humidade relativa em ambientes habitados [1], [2]. O aumento da humidade relativa, no interior de um espaço habitado, é provocado não só pela produção de vapor de água a partir do metabolismo dos seres vivos presentes, mas também pelas atividades domésticas (banhos, lavagens, confeção de alimentos, etc.) [3]. Vários estudos demonstraram que os níveis de humidade relativa altos provocam a diminuição da perceção de qualidade do ar [4] e causam sensações de desconforto na pele [5] e na respiração [6]. Por outro lado, a redução do consumo de energia pode ser conseguida pela implementação de estratégias ativas e passivas. As melhorias na eficiência da iluminação elétrica, dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado são categorizadas como estratégias ativas. As estratégias passivas alcançam-se pelas melhorias da geometria dos edifícios, na ventilação dos espaços interiores, na procura da iluminação natural e, entre outros, nas escolhas dos materiais utilizados na construção [7], [8].

Estudos demonstraram que a capacidade dos materiais porosos para adsorverem vapor de água contribui para a degradação dos mesmos, assim como na proliferação de fungos e outros organismos [1]. No entanto, esta capacidade pode ser encarada numa perspetiva proveitosa: quando o nível de humidade relativa é alto, os materiais adsorvem vapor de água, diminuindo a concentração de vapor de água nesse espaço, e, conseqüentemente, o nível de humidade relativa diminui. Para condições de humidade relativa mais reduzida, o comportamento do material inverte-se e larga vapor de água para o ar. Por conseguinte, pode-se assumir que este comportamento demonstra ser benéfico para atenuar a variação da humidade relativa desse espaço. [9]

Com o objetivo de melhorar a compreensão do comportamento de adsorção e desadsorção dos materiais, propriedades como a capacidade de armazenamento e permeabilidade ao vapor de água foram propostos para representar, respetivamente, a capacidade dos materiais para reter e transportar humidade. Mais tarde, definiram-se também os conceitos da difusividade e efusividade de vapor água. [10] Contudo, ao escolher uma destas propriedades para representar a capacidade de reter e largar humidade, notam-se diferenças bastante significativas e incoerentes comparativamente às outras [11]. A dificuldade na caracterização da capacidade higroscópica dos materiais, a partir dos parâmetros mencionados, está nos resultados dos ensaios que são necessariamente medidos em condições de ambiente estável e, portanto, não satisfazem a representação do processo em condições reais dinâmicas. Por conseguinte, para melhorar esta caracterização têm sido desenvolvidos estudos a partir de métodos experimentais, teóricos e numéricos [12].

## **1.2. Finalidade e desígnio da revisão da literatura**

A estratégia passiva de atenuar os níveis máximos e mínimos da humidade relativa, a partir da capacidade de armazenamento de vapor de água por materiais utilizados como revestimento das superfícies, no interior dos edifícios, é ainda uma abordagem por aperfeiçoar e, conseqüentemente, muitas vezes desconsiderada no domínio da construção. Esta revisão explora e analisa os métodos de avaliação dos materiais utilizados pela comunidade científica e pesquisas inovadoras das propriedades higroscópicas dos materiais de revestimento. Por fim, são discutidas novas perspectivas e futuras direções que se requerem para o avanço da compreensão e implementação desta estratégia.

## **1.3. Estrutura da dissertação**

A presente dissertação é composta por seis capítulos, incluindo o presente capítulo de enquadramento do tema e apresentação da finalidade da presente dissertação. Em seguida são apresentados os restantes capítulos da dissertação:

O segundo capítulo consiste numa descrição de noções elementares, onde se abordam aspetos essenciais à compreensão deste trabalho.

O terceiro capítulo consiste na revisão de literatura dos modelos empíricos mais relevantes utilizados para o estudo da capacidade higroscópica dos materiais, compreendendo a enumeração e descrição dos métodos laboratoriais e dos ensaios realizados à escala real, assim como a relação e transição entre ambos.

O quarto capítulo consiste na revisão dos modelos teóricos mais relevantes utilizados para o estudo da capacidade higroscópica dos materiais.

O quinto capítulo consiste na revisão dos modelos numéricos mais relevantes utilizados para o estudo da capacidade higroscópica dos materiais, incluindo métodos simplificados e com base nas leis da física.

O sexto capítulo consiste na revisão das principais abordagens experimentais e numéricas realizadas até à atualidade para o desenvolvimento do estudo da capacidade dos materiais para regularizar a humidade relativa interior.

O sétimo capítulo consiste no resumo das conclusões alcançadas ao longo da presente dissertação e na apresentação de algumas sugestões para trabalhos de investigação futuros.

## 2. NOÇÕES ELEMENTARES

### 2.1. Ar húmido

A água encontra-se no ar em estado gasoso, i.e., na forma de vapor de água. O conceito de “ar húmido” consiste numa mistura de “ar seco” (cerca de 78% em volume de azoto, 21% de oxigénio e 1% de outros gases) e vapor de água. Considerando que os intervenientes se comportam como gases ideais, é possível aplicar a lei geral dos gases:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (2.1)$$

Onde,

$P$  Pressão parcial [Pa];

$V$  Volume [ $\text{m}^3$ ];

$m$  Massa [kg];

$R$  Constante dos gases [J/kg.K];

$T$  Temperatura [Kelvin].

Atendendo a que os constituintes do ar seco não reagem com o vapor de água, a lei de Dalton define que, numa mistura gasosa ideal, a pressão total é igual à soma das pressões parciais de cada componente:

$$P = P_v + P_s \quad (2.2)$$

Onde,

$P$  Pressão total ou Pressão atmosférica [Pa];

$P_v$  Pressão parcial do vapor de água [Pa];

$P_s$  Pressão parcial do “ar seco” [Pa].

Ao valor máximo de quantidade de vapor de água que o ar pode conter, dá-se o nome de limite de saturação. Em outros termos, se este limite fosse ultrapassado, o vapor de água passaria ao estado líquido. O valor de limite de saturação pode ser calculado através das seguintes expressões presentes na norma DIN 4108-3 [13]:

$$v_s = 0,6257 \cdot \left( \frac{1,098 + \frac{T}{100}}{T + 273,15} \right)^{8,02}, \quad \text{para } 0 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 30 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.3)$$

$$v_s = 0,01016 \cdot \left( \frac{1,486 + \frac{T}{100}}{T + 273,15} \right)^{12,3}, \quad \text{para } -20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T < 0 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.4)$$

Onde,

$v_s$  Limite de saturação [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$T$  Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ].

Na forma de pressão, este valor é descrito como pressão de saturação e pode ser calculado pelas seguintes expressões presentes na norma ISO 13788 [14]:

$$P_{sat} = 610,5 \cdot e^{\left( \frac{21,875 \cdot T}{265,5 + T} \right)}, \quad \text{para } T \leq 0 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

$$P_{sat} = 610,5 \cdot e^{\left( \frac{17,269 \cdot T}{237,3 + T} \right)}, \quad \text{para } T > 0 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.6)$$

Onde,

$P_{sat}$  Pressão de saturação [Pa];

$T$  Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ].

O conceito de humidade relativa é dado em percentagem e considera-se o mais utilizado entre outras possíveis formas de expressar a humidade no ar. Define-se como humidade relativa o quociente da quantidade efetiva de vapor de água presente numa massa de ar,  $v$ , pela quantidade máxima de vapor de água que essa massa suportaria,  $v_s$ . Por outro lado, também pode ser calculada pelo quociente da pressão parcial do vapor de água,  $P_v$ , pela pressão de saturação,  $P_{sat}$ , de um determinado espaço:

$$HR = \frac{v}{v_s} = \frac{P_v}{P_{sat}} \times 100 \quad (2.7)$$

A relação entre a pressão parcial de vapor de água, a temperatura, a humidade relativa e a concentração de vapor de água é dada pelo diagrama psicrométrico, conforme representado na Figura 2.1. Para maior detalhe do diagrama, é possível aceder ao *Hands Down Software* [15], desenvolvido pela HVAC SOFT.

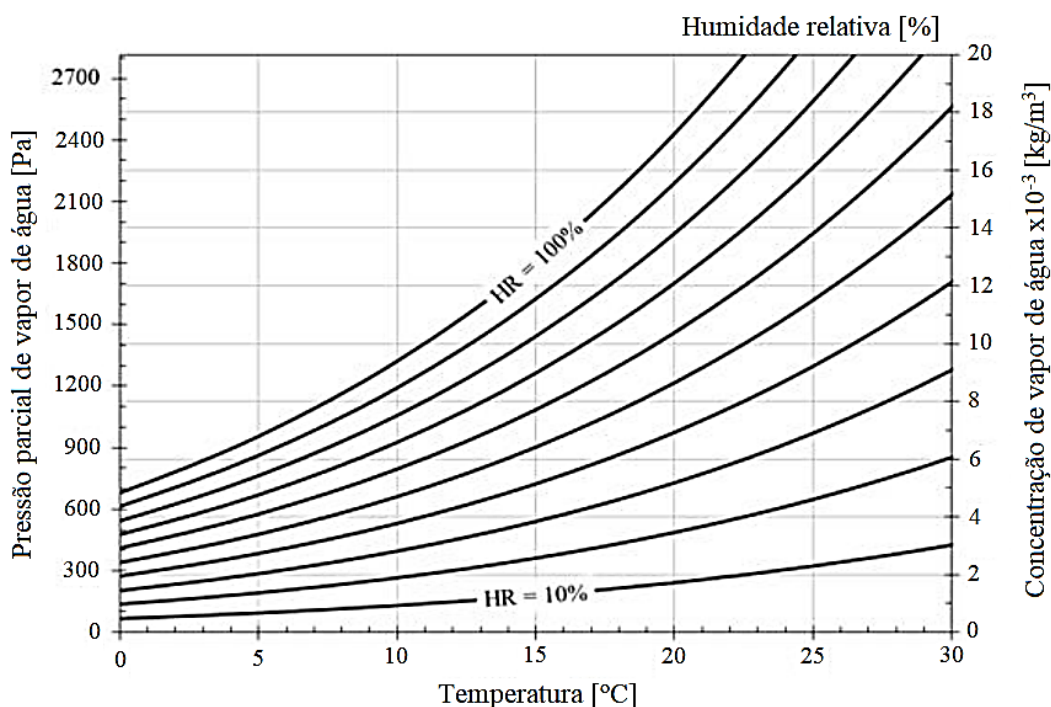


Figura 2.1 – Diagrama psicrométrico

## 2.2. Transmissão de umidade nos materiais porosos

Na construção são utilizados materiais porosos com vários propósitos, como para isolamento térmico e acústico e drenagem. Contudo, para o enquadramento desta dissertação, a função mais relevante destes materiais encontra-se na respetiva capacidade para atenuar os picos de umidade relativa num espaço interior, a partir do seu comportamento hidrófilo. Esta propriedade ocorre pela presença de espaços interconectados ou poros entre as partículas constituintes do material, os quais, quando abertos na superfície do material, permitem a ligação e infiltração de moléculas de água presentes no ambiente.

Os materiais porosos estão em constante troca com o clima envolvente, i.e., se a umidade relativa altera, o material adapta-se ao adsorver ou desadsorver vapor de água. A quantidade de água adsorvida depende de vários fatores, como a temperatura e umidade relativa do ambiente envolvente, a constituição do material e o tamanho e geometria dos poros. [3], [16]

Para caracterizar a quantidade de água que o material contém é utilizado o conceito do teor de umidade, expresso em massa por massa,  $u$ , ou através da relação massa por volume,  $w$ . De acordo com a norma ISO 9346 [17], o teor de umidade pode ser calculado segundo as expressões representadas em adiante.

Relação entre massas:

$$u = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (2.8)$$

Relação entre massa e volume:

$$w = \frac{m_h - m_s}{V} \quad (2.9)$$

Onde,

- $u$  Teor de humidade expresso em massa por massa [kg/kg];
- $w$  Teor de humidade expresso em massa por volume [kg/m<sup>3</sup>];
- $m_h$  Massa húmida do material [kg];
- $m_s$  Massa seca do material [kg];
- $V$  Volume do material [m<sup>3</sup>].

A relação entre as duas grandezas depende apenas da massa volúmica seca do material,  $\rho_s$ , como demonstrado na seguinte equação:

$$\rho_s = \frac{w}{u} \quad (2.10)$$

Onde,

- $\rho_s$  Massa volúmica seca do material [kg/m<sup>3</sup>]
- $u$  Teor de humidade expresso em massa por massa [kg/kg];
- $w$  Teor de humidade expresso em massa por volume [kg/m<sup>3</sup>].

Com o aumento da humidade relativa de um ambiente, um material poroso apresenta geralmente uma adsorção progressivamente maior. O traçado deste efeito resulta em curvas de armazenamento de humidade que podem ser classificadas de acordo com a Figura 2.2, onde o eixo das coordenadas representa o teor de humidade e o eixo das abcissas representa a humidade relativa entre 0 e 100%. Os materiais porosos existentes em edifícios apresentam maioritariamente o comportamento da curva II, em forma de “S” [18].

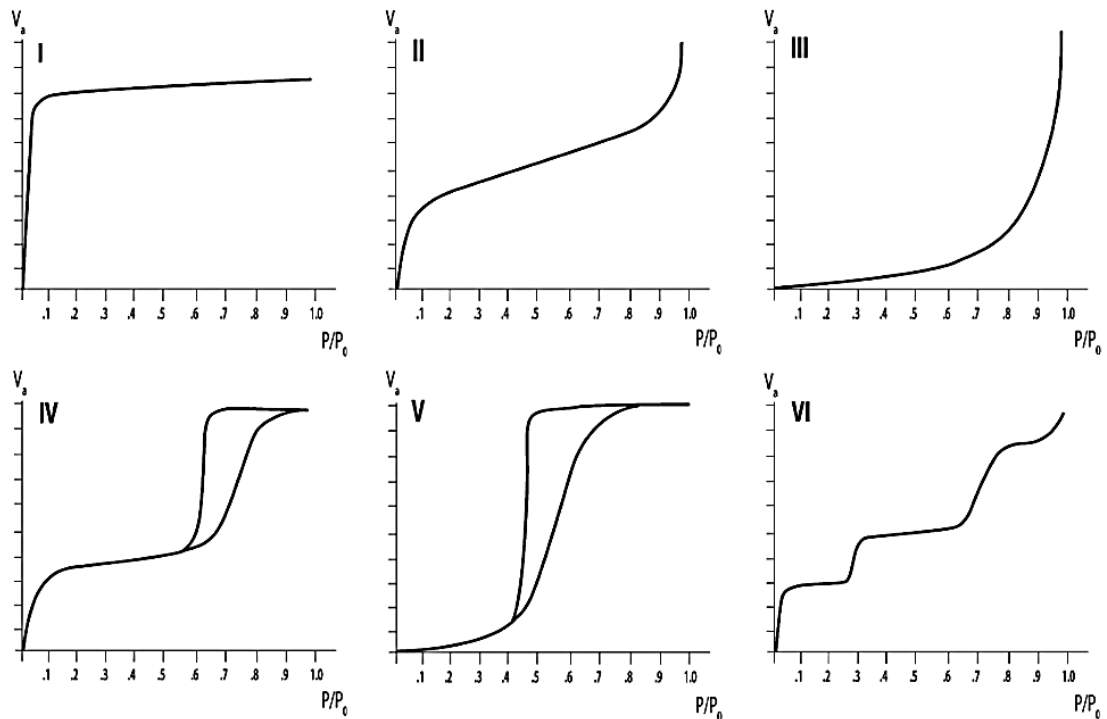


Figura 2.2 – Principais curvas de adsorção isotérmica, de acordo com Brunauer et al. [19].

A curva do tipo II é demonstrada com maior pormenor na Figura 2.3, onde se desenvolve inicialmente com um declive acentuado, representando um aumento pronunciado do teor de água no material. Seguidamente, observa-se a diminuição do declive e um novo incremento na fase final.

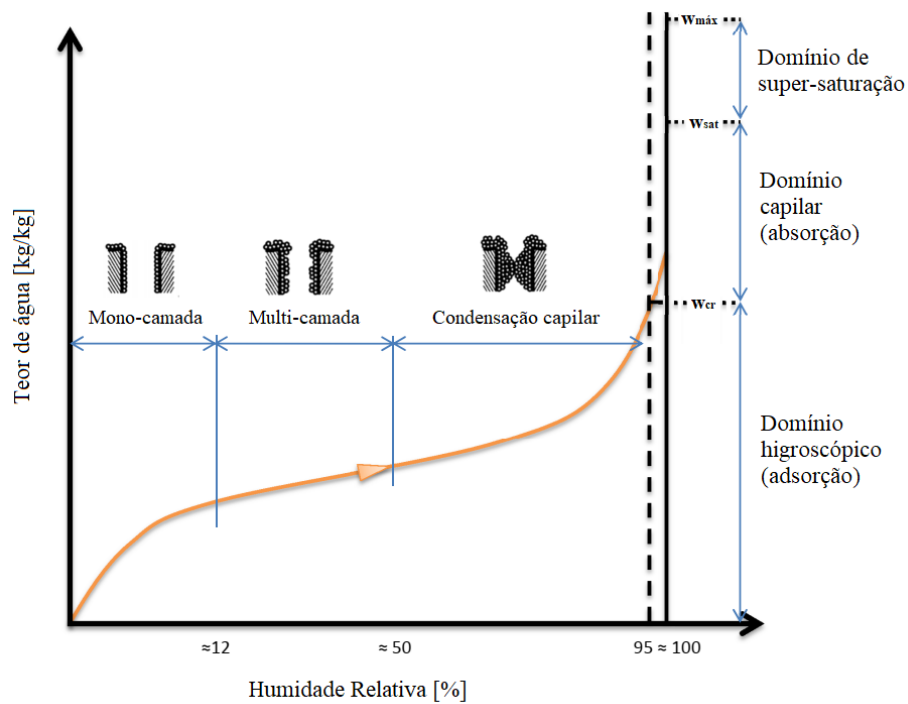


Figura 2.3 – Curva característica do fenómeno de adsorção em condições isotérmicas (adaptado de [18], [20], [21])

O domínio higroscópico ocorre para valores de humidade relativa entre 0% e 95%, onde é limitado superiormente pelo teor de água crítico,  $\omega_{cr}$ . Neste regime são evidenciadas três zonas distintas onde as transferências de humidade ocorrem por difusão gasosa. Inicialmente, a adsorção ocorre pela deposição de uma só camada molecular de água na superfície dos poros, através de forças intermoleculares existentes na ligação sólido-líquido. Posteriormente, de forma similar, mas na interface líquido-líquido, ocorre a sobreposição de várias camadas moleculares. Por fim, a zona da condensação capilar caracteriza-se pela união entre as camadas presentes em paredes opostas do poro, dando origem à formação de meniscos.

Para níveis de humidade relativa superiores a 95% a difusão de humidade ocorre por absorção, i.e., por difusão em meio líquido. O domínio capilar ocorre para valores de humidade relativa entre 95% e 98%, onde é limitado inferiormente pelo teor de água crítico,  $\omega_{cr}$ , e superiormente pelo teor de água saturado,  $\omega_{sat}$ . Este regime caracteriza-se pela saturação parcial dos poros, onde ainda existem algumas bolsas de ar no interior dos mesmos. Posteriormente, para valores de humidade relativa superiores a 98%, ocorre a saturação total do material,  $\omega_{máx}$ . No entanto, em condições normais de pressão, é praticamente impossível os materiais porosos alcançarem este nível de saturação. Do mesmo modo, a secagem completa do material apenas é alcançada artificialmente. Na Figura 2.4 é representado o esquema de nomenclatura para o teor de humidade de um material.

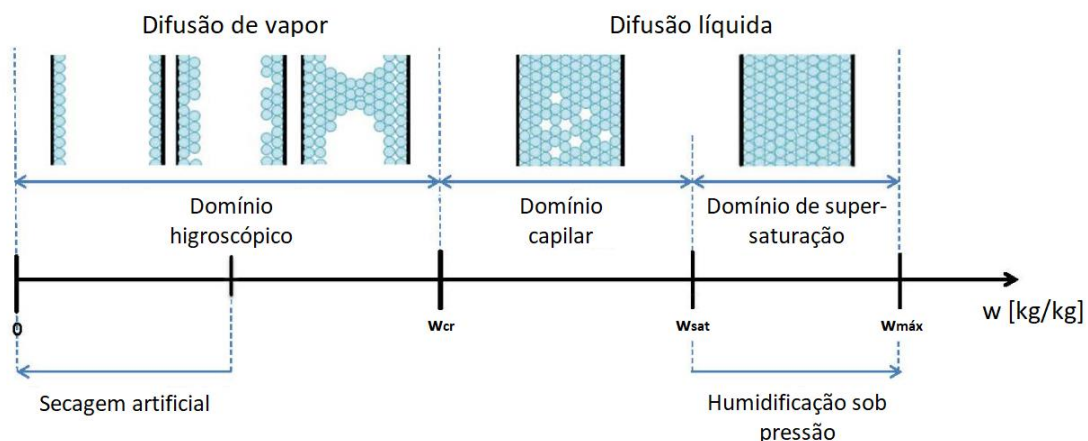


Figura 2.4 – Esquema de nomenclatura do teor de humidade nos materiais (adaptado de [10], [21]).

Inversamente ao fenómeno de adsorção, o decréscimo de humidade relativa origina a desadsorção. Em condições ideais, para o mesmo material, o traçado do gráfico de ambos fenómenos seria análogo. No entanto, verifica-se que para a maioria dos materiais de construção, o traçado do gráfico da desadsorção é diferente da adsorção. Esta discrepância de comportamento entre fases designa-se como histerese e não tem um motivo exato, contudo na literatura é evidente a influência da porometria e morfologia dos poros [22].

Uma das hipóteses para justificar este efeito consiste no ângulo do menisco na fase de condensação capilar ser menor em relação ao menisco durante a secagem. Esta diferença deve-se às forças de atrito causadas pelo humedecimento das paredes durante a fase de adsorção [23]. Por outras palavras, no processo de adsorção, as paredes inicialmente secas facilitam a entrada da água, ao passo que, no processo de desadsorção, as forças de atrito são maiores e retardam a saída da água. Na Figura 2.5 apresenta-se o caso de adsorção à esquerda e de desadsorção à direita.

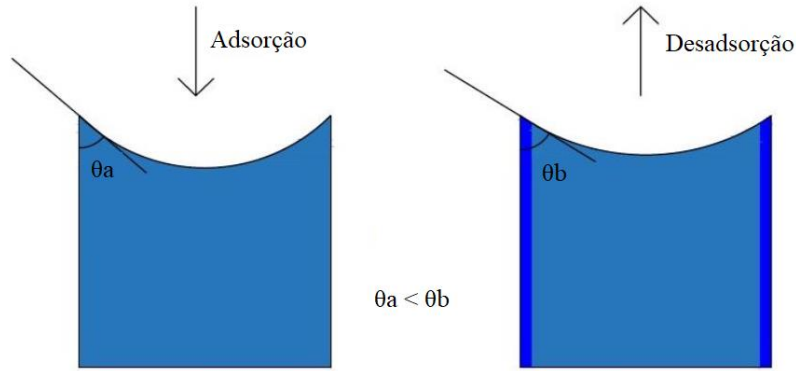


Figura 2.5 – Diferença de ângulos nos meniscos para adsorção e desadsorção [16].

Outra hipótese para explicar o efeito de histerese corresponde à existência de diferentes secções nos poros tipo tinteiro, onde, no processo de desadsorção, a sucção é determinada pela seguinte equação:

$$S = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} \quad (2.11)$$

Onde,

- $S$  Pressão de sucção [Pa];
- $\sigma$  Tensão superficial do fluido [N/m];
- $\theta$  Ângulo de contacto [°];
- $r$  Raio médio do poro [m].

Pela análise da equação, constata-se que as secções com menor raio apresentam maiores pressões no processo de secagem e, conseqüentemente, maior facilidade de desadsorção. Contudo, no interior dos poros, ocorre também difusão de vapor por equilíbrio físico. Conforme demonstrado na Figura 2.6, verifica-se troca de vapor do menisco presente na secção maior do poro (zona  $D_2$ ) para o menisco na secção menor (zona  $D_1$ ). Esta troca de vapor de água entre meniscos do mesmo poro, durante o processo de secagem, pode justificar o fenómeno da histerese entre as fases de adsorção e desadsorção de vapor por parte de um material poroso.

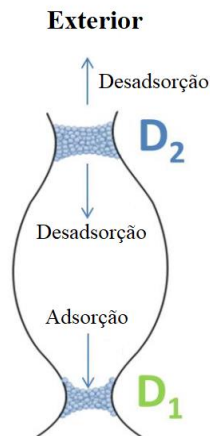


Figura 2.6 – Difusão de vapor no processo de secagem de um poro [21].

Por fim, a histerese depende também do teor de humidade presente nos materiais, pelo que para diferentes níveis de teores de humidade as respetivas curvas de desadsorção serão díspares [24]. Na Figura 2.7 é demonstrado em gráfico o fenómeno da histerese que ocorre genericamente nos materiais porosos para condições isotérmicas.

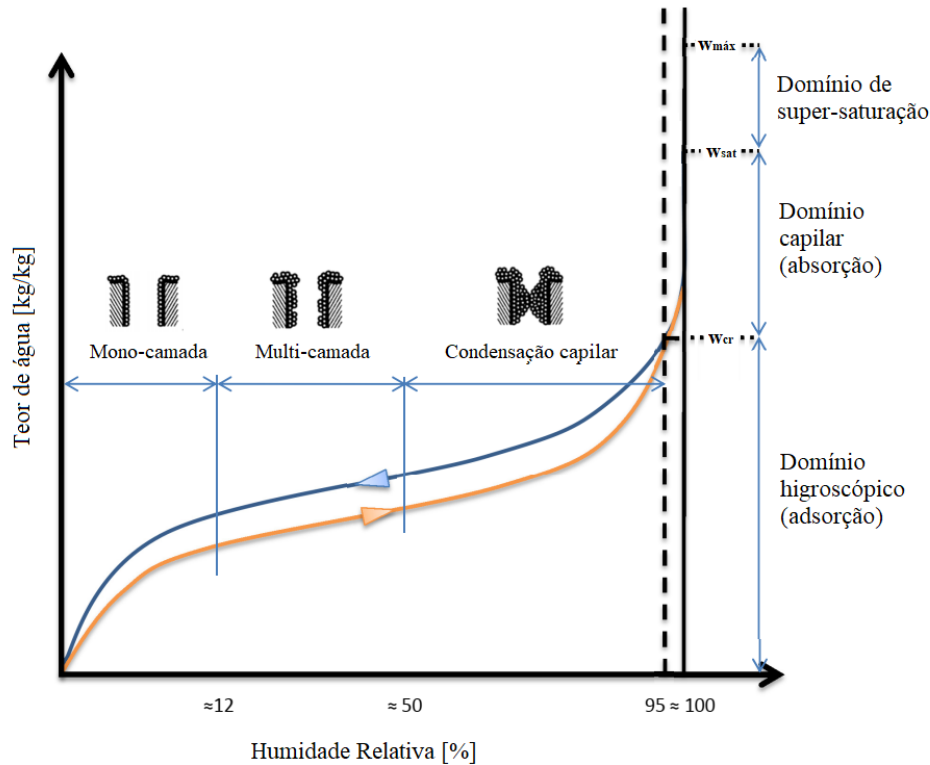


Figura 2.7 – Representação genérica da histerese num material poroso em condições isotérmicas (adaptado de [18], [20], [21]).

### 2.3. Transmissão de humidade nos edifícios

A principal função de um edifício é moderar o calor e a humidade interior em resposta ao clima do local, uma vez que as condições higrótérmicas podem variar substancialmente durante um dia ou durante uma época sazonal. Essas alterações propagam-se para o interior por meio da envolvente exterior do edifício.

O transporte de humidade num elemento da envolvente do edifício é controlado a partir de mecanismos complexos que ocorrem simultaneamente [25]:

- Em fase líquida, por capilaridade, gravidade e diferenças de pressão;
- Em fase de vapor, por difusão e convecção;

Estes mecanismos são originados pelas condições do ambiente interior e pelas condições do ambiente exterior, como a temperatura, humidade relativa, chuva incidente, radiação solar e também pressões exercidas pelo vento [26]. Na Figura 2.8 é representado esquematicamente as trocas originadas pela dinâmica dos parâmetros higrótérmicos numa parede da envolvente exterior do edifício.

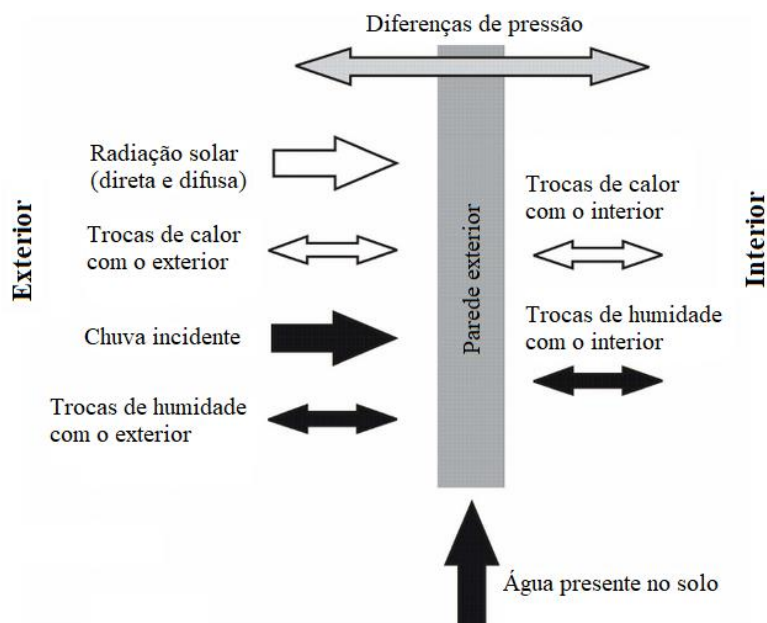


Figura 2.8 – Representação esquemática das trocas de umidade nas paredes exteriores originadas pela dinâmica dos parâmetros higrotérmicos e as suas alterações diárias ou sazonais, de acordo com a ASHRAE [27].

## 2.4. Conforto higrotérmico

Os parâmetros higrotérmicos (temperatura e humidade relativa) do ar em ambientes interiores são fatores fundamentais no que diz respeito à avaliação da qualidade do ar e do conforto das pessoas, uma vez que têm um impacto significativo na forma como as pessoas percecionam a qualidade do ar interior. [28]

A qualidade do ar interior em edifícios é um aspeto importante para o bem-estar e saúde das pessoas que ocupam esses espaços [29]. Por conseguinte, a má qualidade do ar pode ter impactos negativos na saúde e conforto dos utilizadores do edifício, causando problemas respiratórios, alergias, irritação nos olhos e na pele, dores de cabeça, fadiga e outros sintomas relacionados [4], [5], [6], [30].

A ventilação adequada é um fator-chave para manter uma boa qualidade do ar interior em edifícios, permitindo a entrada de ar fresco e a saída de poluentes [31]. Por outro lado, também ajuda no controlo da humidade, tanto em termos de humidade excessiva como de humidade reduzida.

Os níveis altos de humidade podem ser prejudicial à qualidade do ar interior de um edifício por diversos motivos, entre os quais se destacam os seguintes [1], [5], [6], [30], [31], [32], [33], [34]:

- Proporciona condições favoráveis para a proliferação de fungos e outros organismos em superfícies, como paredes, tetos, pavimentos e mobiliário. Estes organismos podem libertar esporos no ar que causam problemas respiratórios, alergias e irritações na pele e olhos;
- Materiais de construção como madeira, gesso e metal podem-se deteriorar pela manifestação de podridão, corrosão ou deformação por dilatações excessivas;

- Causa odores desagradáveis, resultantes da decomposição de materiais orgânicos, como papel, tecidos e alimentos, ou mesmo de reações químicas que podem ocorrer em ambientes húmidos;
- Origina condensação abundante de água em superfícies frias, como vidros de janelas, espelhos e paredes exteriores;

Em oposição, níveis baixos de humidade relativa também podem ter efeitos negativos na qualidade do ar interior, dos quais se destacam os seguintes [35], [36], [37], [38]:

- As mucosas das vias respiratórias tendem a ressequecer, o que pode resultar em sintomas como irritação das fossas nasais e da garganta;
- A pele tende a secar e descamar;
- Os olhos, quando mais secos, podem ficar vermelhos e irritados;
- As partículas aerossóis dos vírus e bactérias tendem a permanecer suspensas por mais tempo no ar, o que pode aumentar o risco de infeções respiratórias, como constipações, gripes e outras infeções do trato respiratório superior;
- Objetos sensíveis como obras de arte, instrumentos musicais, livros, documentos e mobiliário de madeira podem sofrer retrações excessivas e, assim, originar danos irreversíveis aos materiais que os constituem.

Além destas repercussões na qualidade do ar interior, mesmo com temperaturas moderadas, a humidade relativa também pode afetar a sensação de conforto térmico nos ocupantes. A norma internacional ISO 7730 (2005) [39] e a norma americana ASHRAE 55 (2020) [27], desenvolvidas para a avaliação do conforto dos ambientes interiores, quantificam o conceito de conforto a partir dos índices *Predicted Mean Vote* (PMV) e *Predicted Percentage Dissatisfied* (PPD). O PMV baseia-se nas quantidades mensuráveis dos parâmetros físicos do ambiente (velocidade do ar, temperatura, temperatura média radiante e humidade relativa) e nos parâmetros expectáveis pessoais (vestuário e atividade). Posteriormente, o PPD estabelece uma previsão da percentagem de ocupantes insatisfeitos. No entanto, para espaços residenciais, alguns destes parâmetros são difíceis de apurar, dada a extensa variedade de vestuário, modo de utilização das janelas, etc. Consequentemente, a abordagem adaptativa adequa-se melhor para a avaliação do conforto em espaços residenciais.

A abordagem adaptativa baseia-se nos resultados das pesquisas de conforto realizadas *in situ*. As pesquisas de campo procuram coletar dados sobre o ambiente e a resposta simultânea de pessoas em situações reais. Sendo as intervenções do pesquisador minimizadas, o objetivo é prever as temperaturas ou combinação de variáveis, como a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar, que serão confortáveis. No entanto, estes modelos falham na precisão das medições das condições de ambiente e na dificuldade de generalizar a partir de análises estatísticas. Em outros termos, os resultados de uma pesquisa nem sempre se adaptam com os dados de outra pesquisa, mesmo que em circunstâncias semelhantes [40]. Visto isso, as condições de temperatura e humidade relativa de conforto são, portanto, resultado da interação entre os sujeitos e o edifício, ou outro meio ambiente que estejam a ocupar. Assim, esta interação reflete-se na oportunidade de adaptar as condições de conforto às necessidades e requerimentos de cada ser individual.

### 3. MODELOS EMPÍRICOS

#### 3.1. Experimentação em laboratório

##### 3.1.1. Literatura

Em 1965, Künzel [41] começou por considerar exclusivamente o processo de adsorção entre um material de acabamento e a humidade relativa interior. O método consistiu na aplicação de ciclos de 12 horas com alterações nos níveis de humidade relativa, entre os 50 e os 80%, sendo o resultado alcançado pela diferença de massa percentual, do material, entre os dois níveis de humidade relativa. Künzel [41] definiu esta propriedade como capacidade de adsorção de vapor de água e, em 1968, o estudo foi admitido na norma alemã DIN-18,947 [42], com a finalidade de normalizar a capacidade higroscópica de argamassas de terra.

Em 1989, Fauconnier *et al.* [43], Dalicieux *et al.* [44] e, alguns anos mais tarde, Duforestel [45], a partir da comparação de medições reais com simulações numéricas, desenvolveram o conceito de inércia higroscópica com o fim de descrever o efeito consequente da porosidade e da capacidade de adsorção de um material no balanço da humidade relativa interior.

Em 1998, Padfield [46] inovou a investigação do impacto da porosidade das materiais na estabilização da humidade relativa interior com a apresentação de uma câmara climática (vd. Figura 3.1). O dispositivo dispunha de um sistema de controlo de fluxo de vapor de água que, simulando a atividade humana, permitiu testar a variação de humidade relativa em função do material colocado no interior da câmara. O método adotou uma função de onda sinusoidal para definir a variação de humidade relativa, entre os 50 e 60%, e ventilação controlada entre 0,2 e 1,2 m/s. Em oposição aos métodos anteriores, este procedimento não avalia diretamente a capacidade de adsorção de um material, mas determina o efeito higroscópico dos materiais, na variação da humidade relativa interior, a partir do cálculo da diferença da quantidade de água utilizada durante o ciclo de adsorção pela quantidade de água recolhida na fase de desadsorção. [23], [47]

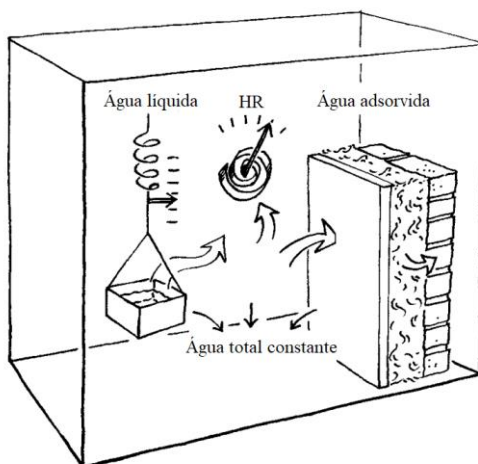


Figura 3.1 – Princípio de funcionamento da câmara climática de Padfield [46].

Mais tarde, outros protocolos retomaram o método passo-resposta, cujo princípio consiste em avaliar a variação da massa dos materiais quando sujeitos a flutuações cíclicas de humidade relativa, no formato de onda quadrada, conforme anteriormente proposto por Kunzel [41] (vd. Figura 3.2). [48]

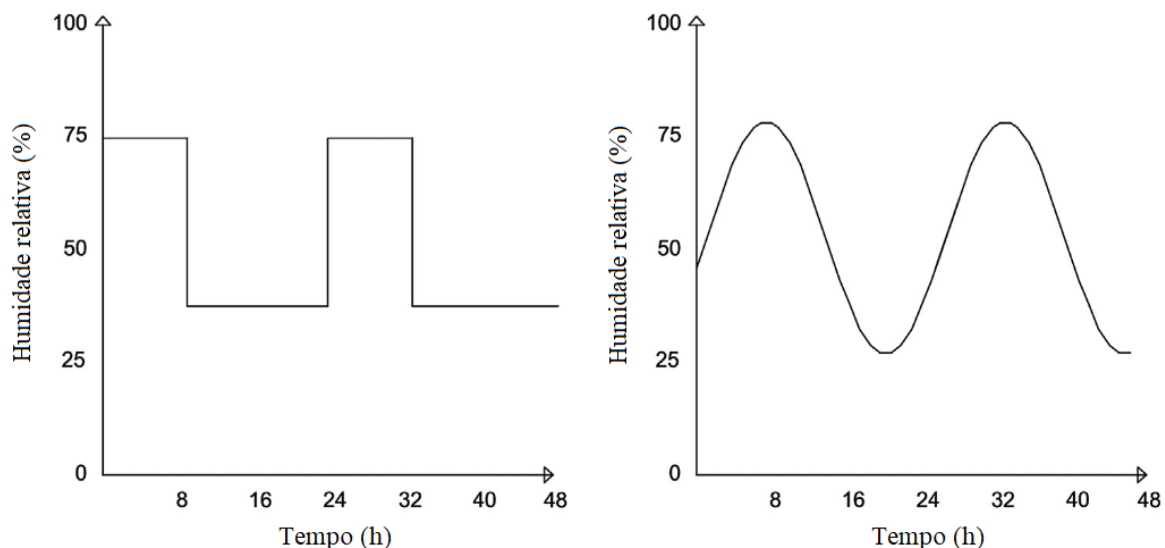


Figura 3.2 – Ciclos de variação de humidade com onda quadrada e onda sinusoidal.

A *Japanese Industrial Standard* (JIS A 1470-1) [49], em 2002, propôs um ensaio com intervalo de exposição de 24 horas para cada patamar de humidade relativa: 33–53%, 53–75% e 75–93%. O resultado obtido com esta norma permitiu estabelecer coeficientes para adsorção e desadsorção, mas também avaliar a resposta do material em relação ao tempo.

O protocolo da norma ISO 24353 [50], semelhante ao anterior, considera os intervalos de humidade relativa adotados de 33-55%, 55-75% e 75-95%. A norma indica que devem ser realizados 4 ciclos, a temperatura e humidade relativa constante, durante 12 h para a fase de adsorção e outras 12 h para a fase de desadsorção, sendo que apenas os 2 últimos ciclos são considerados para a demonstração de resultados.

Em 2005, uma equipa da empresa Nordtest desenvolveu e propôs o conceito *Moisture Buffering Value* (MBV) que indica a quantidade de vapor de água adsorvida e desadsorvida por um material quando é exposto a uma variação bidirecional de humidade relativa [51]. O método para a determinação do MBV consiste em duas exposições climáticas, do material a ser ensaiado, em turnos de 8 horas + 16 horas. Durante as primeiras 8 horas, referentes ao período de adsorção, a humidade relativa será mantida nos 75%. Nas restantes 16 horas, referentes ao período de desadsorção, a humidade relativa será reduzida até aos 33%. [52] O MBV é calculado pela medição de massa do material exposto a variações de humidade relativa, como demonstrado na seguinte equação:

$$MBV = \frac{G}{\Delta HR} \quad (3.1)$$

Onde,

*MBV* *Moisture Buffering Value* [kg/(m<sup>2</sup>·%HR)];

$G$  Quantidade de vapor de água adsorvido ou desadsorvido [ $\text{kg/m}^2$ ];  
 $\Delta HR$  Variação de humidade relativa [%].

Para validação deste projeto, foram realizados ensaios interlaboratoriais comparativos que, apesar das divergências nos métodos utilizados por cada laboratório, como na medição da massa das amostras de modo digital ou manual ou até nas espessuras das amostras, mostraram que o protocolo apresenta resultados consistentes. Por conseguinte, o modelo MBV tem sido o protocolo mais adotado pela comunidade científica no progresso do estudo da capacidade de armazenamento da humidade dos materiais de construção.

No entanto, o formato de onda quadrada para os ciclos de humidade relativa e os intervalos de tempo de 8-16h foram comprovados que raramente se encontram em condições climáticas reais [53]. Além disso, foi demonstrado que a utilização do MBV em cenários reais origina resultados diferentes dos ensaios laboratoriais que, por sua vez, são realizados em câmaras climáticas dificilmente reproduzidas ou financeiramente impraticáveis por muitos laboratórios, dada a complexidade da sua composição.

Quadro 3.1 – Resumo de especificidades dos protocolos passo-reposta.

Protocolos	Intervalos de HR	Intervalos de tempo
NORDTEST (2005)	75%-33%	8 h – 16 h
ISO 24353 (2008)	55%-33%	12 h – 12 h
	75%-55%	
	95%-75%	
JIS A 1470-1 (2002)	53%-33%	24 h – 24 h

Face às limitações do MBV, Roels *et al.* [54] empregaram uma campanha de estudos [55] para demonstrar a existência de divergências nos níveis de temperatura e humidade relativa para cada uma das divisões de uma habitação. Na Figura 3.3 é dado um exemplo de uma das habitações estudadas em Nieuwpoort, na Bélgica.

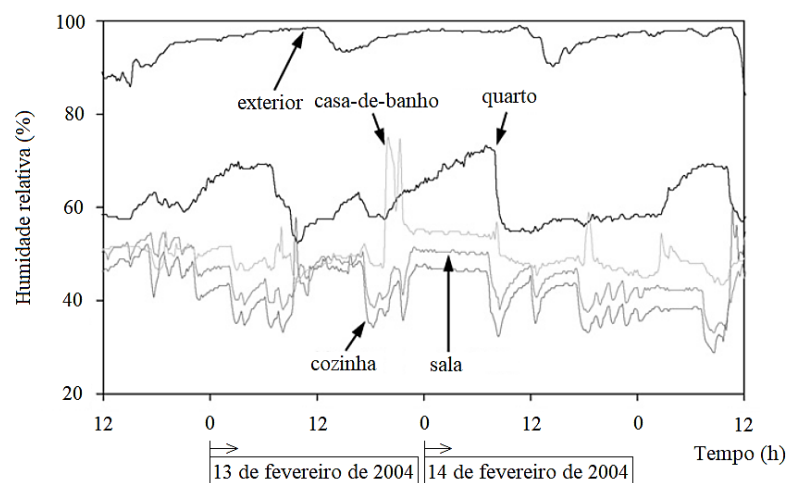


Figura 3.3 – Evolução temporal dos níveis de humidade relativa, medidos em diferentes divisões, de uma habitação localizada em Nieuwpoort, Bélgica (adaptado de [55]).

Pela análise da figura, os intervalos de adsorção e desadsorção no quarto estão em conformidade com o esquema de 8 e 16 horas adotado pelo projeto da Nordtest [51]. Por outro lado, na casa-de-banho, sala e cozinha, os intervalos de tempo variam: na casa-de-banho verificam-se picos de humidade relativa com pouca duração, enquanto na cozinha e sala verificam-se intervalos de produção de vapor de água de 1 a 5 horas. Assim sendo, Roels *et al.* [54] consideraram três regimes diferentes de produção de vapor de água:

- Longo, para os quartos, onde é produzido vapor de água num intervalo de 8 horas;
- Curto, para salas de estar e cozinhas, onde é produzido vapor de água num intervalo de 1 a 5 horas;
- Pico, para casas-de-banho, onde é produzido vapor de água num intervalo de 1 hora.

Perante este esquema, para aprimorar a caracterização dos materiais em relação à potencialidade para amenizar a humidade relativa interior de uma habitação, foi proposta a seguinte equação:

$$MBV^* = \alpha \cdot MBV_{8h} + (1 - \alpha) \cdot MBV_{1h} \quad (3.2)$$

Onde,

$MBV^*$  *Production-Interval Adapted MBV* [kg/(m<sup>2</sup>·%HR)];

$\alpha$  Coeficiente de ponderação correspondente ao intervalo de produção adotado [-];

$MBV_{8h}$  *Moisture Buffering Value* em regime de longa duração (8h) [kg/(m<sup>2</sup>·%HR)];

$MBV_{1h}$  *Moisture Buffering Value* em regime de curta duração (1h) [kg/(m<sup>2</sup>·%HR)].

Para o coeficiente de ponderação,  $\alpha$ , foram considerados os seguintes valores de acordo com os diferentes intervalos de produção de vapor de água:

- 0 h < intervalo de produção ≤ 2 h:  $\alpha = 0,0$ ;
- 2 h < intervalo de produção ≤ 6 h:  $\alpha = 0,5$ ;
- 6 h < intervalo de produção ≤ 10 h:  $\alpha = 1,0$ .

Mais tarde, de forma a considerar as condições climáticas adversas e extremas, em relação a temperatura e humidade relativa das quatro estações de um ano, Wu *et al.* [56] propôs o protocolo *Ultimate Moisture Buffering Value* (UMBV).

Quadro 3.2 – Condições de teste para o protocolo UMBV [56].

Etapa	Temperatura (°C)	HR (%)	Tempo (horas por dia)
I	23 ± 0,3	50 ± 2	12
II	40 ± 0,3	98 ± 2	8
III	18 ± 0,3	3 ± 2	4

Considerando o Quadro 3.2, o UMBV demonstra as capacidades dos materiais em relação à resistência à humidade (Etapa I+II), à adsorção (Etapa II), à desadsorção (Etapa III) e à resposta imediata (Etapa I+III), através dos resultados da seguinte equação:

$$UMBV = \sum_{i=I}^{III} \alpha_i \cdot MBV_i \quad (3.3)$$

Onde,

- UMBV* Ultimate Moisture Buffering Value [g/(m<sup>2</sup>·%HR)];  
*I, II, III* Etapas do protocolo UMBV  
*MBV<sub>i</sub>* Moisture Buffering Value calculado na etapa *i* [g/(m<sup>2</sup>·%HR)];  
*α<sub>i</sub>* Coeficiente de tempo da etapa *i* [-].

O coeficiente de tempo é definido pela seguinte equação:

$$\alpha_i = \frac{t_i}{24} \quad (3.4)$$

Onde,

- α<sub>i</sub>* Coeficiente de tempo da etapa *i* [-];  
*t<sub>i</sub>* Intervalo de tempo [h], definido no Quadro 3.2, para a etapa *i*.

Por fim, o objetivo do protocolo passa também por avaliar a capacidade de os materiais moderarem o ambiente interior, a uma temperatura de 23°C e humidade relativa a 50%. Consequentemente, o material com maior capacidade de adsorção e desadsorção será ideal, i.e., com o maior valor de MBV<sub>I</sub> e menores valores de MBV<sub>II</sub> e MBV<sub>III</sub>, conforme demonstrado no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Classificação do Ultimate Moisture Buffering Value [56].

Classes	UMBV [g/(m <sup>2</sup> ·%HR@12/8/4 h)]
Ótimo	0-5
Favorável	5-10
Bom, mas com risco ao desenvolvimento de bolores	10-15
Moderado	15-20
Ineficiente	>20

Contudo, apesar de todo o desenvolvimento realizado a partir do método passo-resposta, continuam a existir limites ao tentar alcançar resultados realistas, tais como a desconsideração da dinâmica no movimento do ar e o coeficiente de transferência de vapor superfície-ar.

Por esse motivo, Gómez *et al.* [57] construíram uma instalação para reproduzir o efeito do movimento do ar, tanto para convecção natural como forçada, na superfície de um material. A instalação consiste na colocação de uma amostra dentro de um túnel de vento (vd. Figura 3.4). Para assegurar um regime

laminar, o fluxo de ar, natural ou forçado por uma ventoinha, atravessa uma câmara de estagnação e um guia de fluxo antes de atingir a amostra. Por fim, para controlo da humidade relativa dentro da câmara hermética foi colocada uma solução salina no fundo ( $MgCl_2$  ou  $NaCl$ ). Posteriormente, a partir do protocolo da Nordtest [51], verificou-se a influência do coeficiente de transferência de vapor superfície-ar e a velocidade do ar nos resultados do ensaio, os quais demonstraram existir uma forte correlação entre as correntes de convecção e o MBV. No entanto, este equipamento compreende uma conceção precisa e exigente pelo que dificulta a sua reprodução. Além disso, não considera nem relaciona os diferentes tempos de exposição e níveis de humidade relativa juntamente com a velocidade do ar.

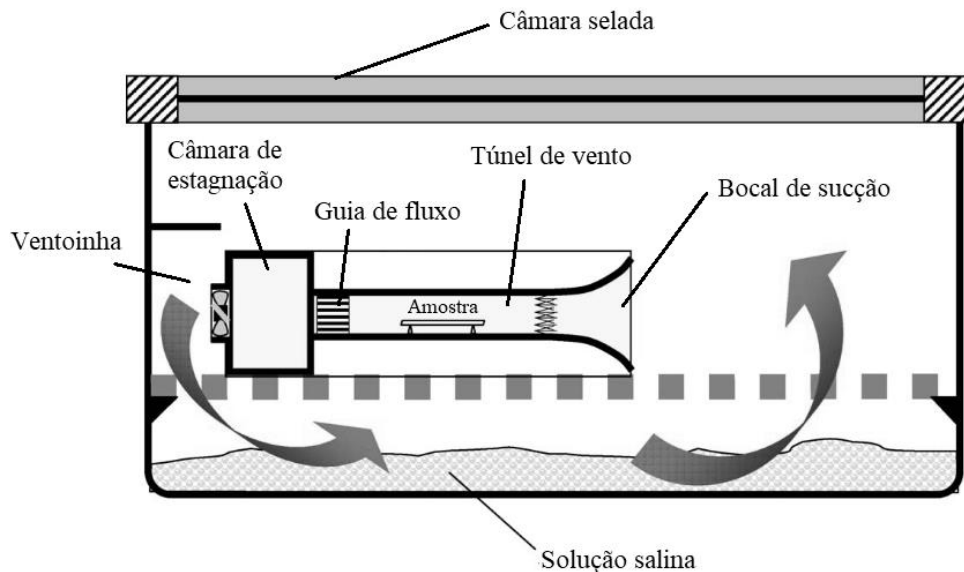


Figura 3.4 – Câmara climática de Gómez et al. [57].

Numa outra perspetiva, Ramos [23] desenvolveu um equipamento similar que possibilita o controlo da temperatura e humidade relativa do ar introduzido na câmara climática, assim como a produção de vapor no seu interior (vd. Figura 3.5). Desse modo, a instalação permitiu a realização de ensaios diversificados pela escolha de diferentes combinações dos parâmetros. Por conseguinte, realizaram-se ensaios com e sem amostras de materiais higroscópicos no interior da câmara e, com os resultados obtidos, verificou-se a potencialidade dos materiais em regularizar a humidade do ambiente. Num modo geral, a câmara climática reproduziu aproximadamente um quarto em pequenas dimensões, contudo apresentou alguns fatores, particularmente em escala real, que são desconsiderados ou assumidos constantes, como o transporte de humidade através das paredes, as condições climáticas exteriores e a velocidade do ar.

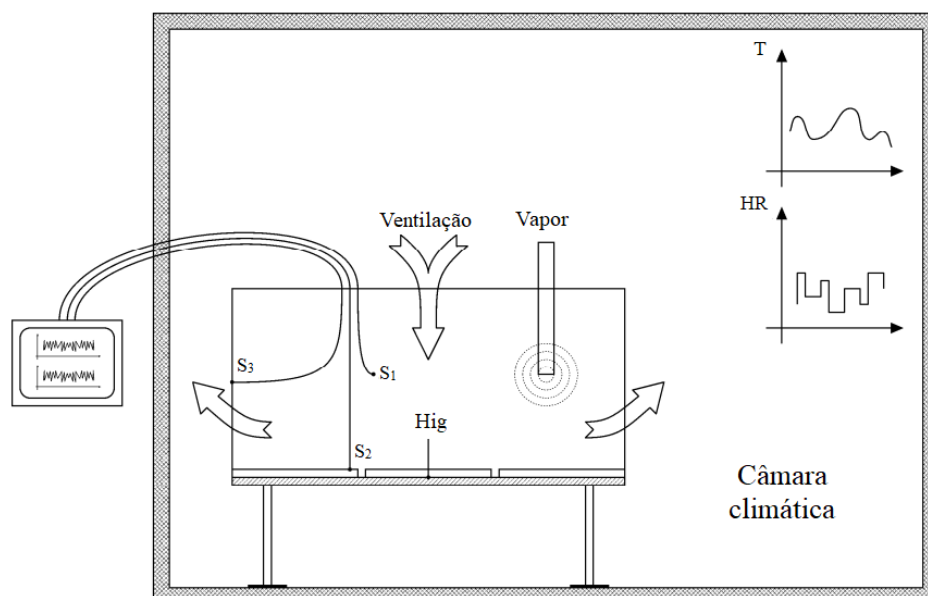


Figura 3.5 – Ideia-base para a infraestrutura de Ramos [23].

### 3.1.2. Análise

Os testes em laboratório mencionados no subcapítulo anterior são apresentados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Resumo dos testes em laboratório.

Autor	Designação	Unidade
Künzel [41]	Capacidade de adsorção de vapor de água	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$
Padfield [46]	Efeito higroscópico do material	$\text{g}/\text{m}^3$
JIS A 1470-1 [49]	Capacidade do material para amenizar a humidade relativa	$\text{g}/\text{m}^2$
ISO 24353 [50]	Capacidade do material para amenizar a humidade relativa	$\text{g}/\text{m}^2$
Nordtest [51]	<i>Moisture Buffering Value</i>	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$
Roels <i>et al.</i> [54]	<i>Production-Interval Adapted Moisture Buffering Value</i>	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$
Wu <i>et al.</i> [56]	<i>Ultimate Moisture Buffering Value</i>	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR}@12/8/4\text{h})$

Esta revisão evidencia a falta de um método consensual para a caracterização do comportamento higroscópico dos materiais. Os ensaios em laboratório são realizados sob diferentes condições e ajustes, o que dificulta a comparação de resultados entre os diferentes métodos. Consequentemente, os dados obtidos podem depender da configuração dos ensaios e das interpretações dos autores ao conceito. Contudo, é importante analisar continuamente os resultados obtidos pelas vários trabalhos de investigação realizadas ao longo dos últimos anos. Por esse motivo, apesar de não ser possível a comparação direta dos resultados, Ranesi *et al.* [58] desenvolveram uma base de dados, permitindo assim obter uma melhor perceção da capacidade higroscópica dos materiais de construção.

Em suma, os ensaios laboratoriais atrás mencionados foram desenvolvidos, na sua maioria, com o objetivo de estabelecer um indicador da capacidade dos materiais para amenizar a humidade relativa interior. Todavia, devido às limitações impostas pela dinâmica do comportamento higroscópico, a definição real dessa capacidade é dificilmente alcançada em laboratório.

## 3.2. Relação do laboratório para a escala real

### 3.2.1. Literatura

Conforme mencionado no capítulo anterior, a maioria dos protocolos laboratoriais são realizados com algumas variantes estáticas, como a temperatura e a velocidade do ar. Visto isso, os resultados podem não representar o comportamento real dos materiais em edifícios, uma vez que as condições climáticas são dinâmicas. Além disso, nos edifícios existem outros mecanismos que dificultam a análise isolada do processo de adsorção e desadsorção dos materiais, como a ocupação e comportamento dos utilizadores, a taxa de renovações do ar e a higroscopicidade de todas as superfícies presentes no ambiente interior [59].

Vários autores [60], [61], [62], [63], [64] demonstraram a importância de combinar e comparar resultados de ensaios em laboratório com ensaios *in situ*, de forma a melhor compreender os princípios físicos que correlacionam as propriedades dos materiais e as suas influências num clima interior. Em laboratório, o recurso a propriedades dos materiais definidas em condições estáticas e de equilíbrio, assim como a temperaturas e níveis de humidade relativa específicos, pode não representar a resposta dinâmica do material às condições do ambiente. Estes parâmetros são regularmente considerados constantes para as diversas condições climáticas possíveis, o que pode potenciar equívocos [65].

Em virtude de uma melhor relação das propriedades dos materiais com as condições dinâmicas dos climas nos edifícios, Cascione [66] constatou recentemente que, para materiais como a cal, argila, gesso e gesso cartonado, a capacidade para amenizar a humidade relativa demonstrou ser inversamente proporcional à massa volúmica do material e diretamente proporcional à porosidade. Contudo, McGregor *et al.* [67] evidenciaram que a massa volúmica não deve ser diretamente relacionada com esta capacidade dos materiais, nomeadamente em materiais argilosos, visto que, na observação do comportamento destes materiais com massas volúmicas similares, a dimensão, quantidade e distribuição dos poros influenciam significativamente mais o desempenho do material. McGregor *et al.* [67] identificaram também que quanto maior a capacidade de retenção de vapor de água, maior o desempenho do material para amenizar a humidade relativa, todavia a correlação também depende do tamanho e distribuição dos poros. Os mesmos autores apresentaram uma correlação inversa entre permeabilidade ao vapor de água e a capacidade em assunto dos materiais, porém Kreiger e Srubar III [47] demonstraram a ausência de relação quando vários estudos são comparados, devido às diferentes condições de fronteira e métodos de ensaio aplicados.

Segundo alguns estudos, foi também demonstrado que as variações da velocidade do ar interior influenciam a propriedade higríca dos materiais [68], [69]. Yoshino *et al.* [15] salientaram o impacto da ventilação na humidade relativa ao observarem que quanto maior for a velocidade e taxa de renovações do ar, menor é quantidade de vapor de água adsorvida pelos materiais. Este comportamento mantém-se até a uma determinada taxa de renovações de ar onde a capacidade dos materiais para amenizar a humidade relativa de uma zona se torna insignificante [70]. Por um lado, ficou evidente que a ventilação e as infiltrações de ar participam para a regularização da humidade relativa, por outro, Cascione *et al.* [71] demonstraram que os materiais porosos têm um maior impacto neste efeito do que a ventilação, salientando a importância da presença de materiais porosos em habitações com ventilação minimizada, como no caso de habitações situadas em ambientes frios.

### **3.2.2. Análise**

Em locais onde se encontrem condições climáticas exteriores mais húmidas, a ventilação dos espaços interiores resulta na transferência de humidade do exterior para o interior. Inversamente, em condições climáticas exteriores mais secas, o vapor de água produzido no interior é transferido para o exterior. Visto isso, é evidente que as condições climáticas no exterior dos edifícios influenciam o ambiente interior de uma habitação [72], [73]. A temperatura e a humidade relativa são as condições de fronteira que influenciam ambos os lados de uma parede exterior. Consequentemente, conclui-se que a localização geográfica de um edifício deve ser considerada na análise do efeito de regularização da humidade relativa interior. Diante estes aspetos, é necessário analisar o comportamento dos materiais em contextos reais de forma a melhor compreender a influência dos respetivos na regularização da humidade relativa.

## **3.3. Experimentação em escala real**

### **3.3.1. Literatura**

A definição do comportamento higroscópico dos materiais em edifícios existentes permite obter melhor informação da potencialidade dos mesmos em condições reais. No entanto, é extremamente complexo isolar todos os fatores influentes ao clima interior, como a ocupação e comportamento dos habitantes, taxa de renovações do ar e a higroscopicidade de todas as superfícies [59].

No seguimento de uma investigação iniciada em 2004 [74], onde se demonstrou a evolução da humidade relativa perante a introdução e remoção de mobiliário numa zona (vd. Figura 3.6), Svennberg [29] propôs a divisão da definição do conceito MBV num esquema de três níveis espaciais:

- Propriedades do material em condições de equilíbrio, i.e., incluir a definição de capacidade de armazenamento de vapor de água;
- Propriedades de um componente em condições dinâmicas, i.e., incluir a introdução da variável temporal;
- Desempenho do conjunto ao nível integral de uma zona, i.e., incluir a introdução de alguns fatores, como a relação entre os MBV de cada material e a respetiva área de exposição desse material ao ambiente interior.

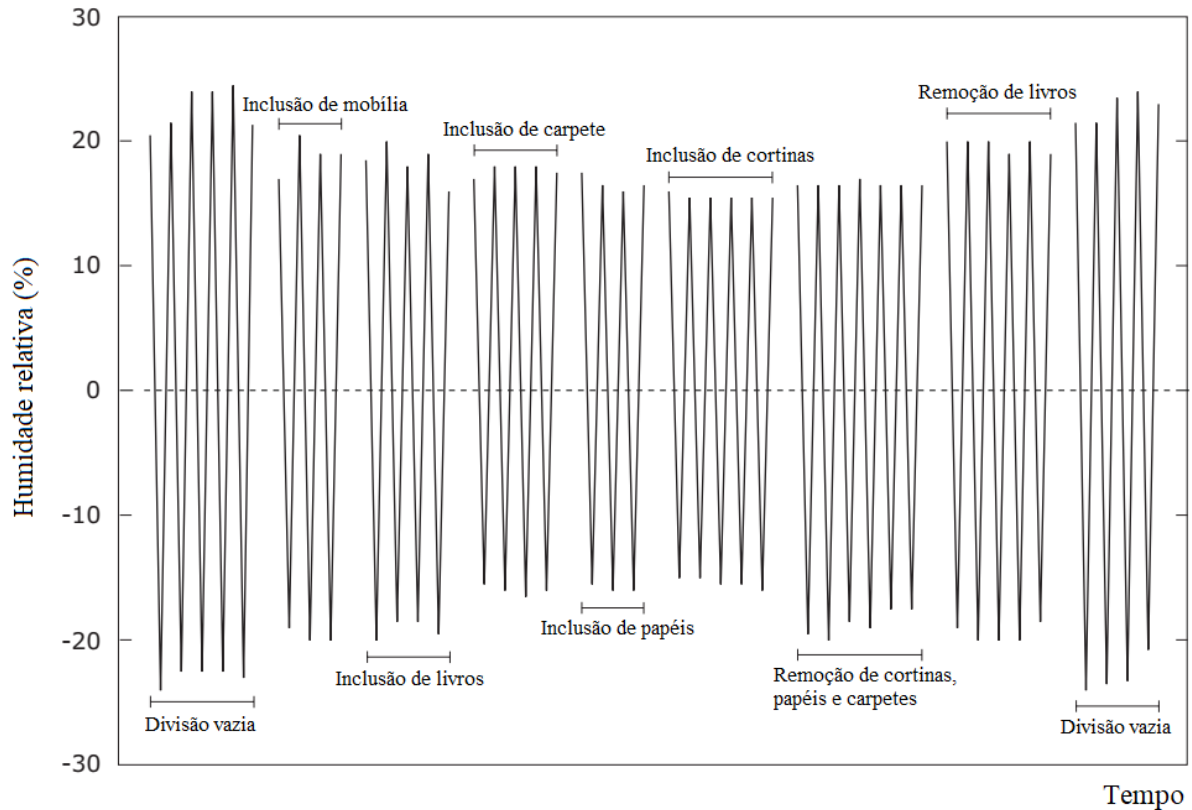


Figura 3.6 – Efeito do mobiliário na umidade relativa interior (adaptado de [74]).

Considerando este esquema, Zhang *et al.* [75] avaliaram o comportamento da umidade relativa, ao nível de uma zona habitada, pela relação da variação de umidade sob a influência da higroscopicidade dos materiais presentes com a mesma variação sem qualquer influência desses materiais. Com base no projeto da Nordtest [51], foram propostos os seguintes índices:

$$MBE_a = \frac{\int_0^{t1} (X_0(t) - X(t)) dt}{\int_0^{t1} (X_0(t) - X(0)) dt} \quad (3.5)$$

$$MBE_d = \frac{\int_{t1}^{t2} (X(t) - X_0(t)) dt}{\int_{t1}^{t2} (X(t1) - X_0(t)) dt} \quad (3.6)$$

Onde,

$MBE_a$  Moisture Adsorption Effect [kg/kg];

$MBE_d$  Moisture Desorption Effect [kg/kg];

$X$  Média da variação de umidade relativa no interior da zona [-];

$X_0$  Média da variação de umidade relativa desconsiderando a influência dos materiais [-].

Com o mesmo objetivo, Ramos e de Freitas [76] apresentaram o conceito da inércia higroscópica de forma a demonstrar que a redução dos picos de umidade relativa, dentro de uma habitação, ocorre em função da higroscopicidade dos materiais presentes nesse ambiente interior. Mais tarde, desenvolveram

e apresentaram o conceito da inércia higríca da zona, *Hygric Inertia of Room* (HIR) [77], que se refere à capacidade de uma zona armazenar humidade, quando se apresenta em níveis elevados, e devolvê-la à atmosfera, quando a humidade relativa está reduzida. O HIR é definido em função do MBV dos materiais e mobiliário presentes na zona, de acordo com a seguinte equação:

$$HIR = \frac{\sum (A_k \cdot MBV_k) + \sum MBV'_l}{V} \quad (3.7)$$

Onde,

$HIR$	<i>Hygric Inertia of Room</i> [g/(m <sup>3</sup> ·%HR)];
$A_k$	Área de exposição do material $k$ [m <sup>2</sup> ];
$MBV_k$	<i>Moisture Buffering Value</i> do material $k$ [g/m <sup>2</sup> ·%HR];
$MBV'_l$	<i>Moisture Buffering Value</i> equivalente do objeto de mobiliário $l$ [g/m <sup>2</sup> ·%HR];
$V$	Volume da zona [m <sup>3</sup> ].

Posteriormente, Vereecken *et al.* [63] combinaram o conceito *Hygric Inertia of Room*, demonstrado na Eq. (3.7), com o conceito *Production-Interval Adapted MBV*, apresentado na Eq. (3.2), originando a seguinte equação:

$$HIR^* = \frac{\sum (A_k \cdot MBV_k^*) + \sum MBV'_l}{V} = \alpha_i \cdot HIR_{8h} + (1 - \alpha_i) \cdot HIR_{1h} \quad (3.8)$$

Onde,

$HIR^*$	<i>Production Interval Adapted Hygroscopic Inertia</i> [g/(m <sup>3</sup> ·%HR)];
$A_k$	Área de exposição do material, $k$ [m <sup>2</sup> ];
$MBV_k^*$	<i>Production Interval Adapted MBV</i> do material, $k$ [g/m <sup>2</sup> ·%HR];
$MBV'_l$	<i>Production Interval Adapted MBV</i> equivalente do objeto de mobiliário $l$ [g/m <sup>2</sup> ·%HR];
$HIR_{8h}$	<i>Hygric Inertia of Room</i> em regime de longa duração (8h) [g/(m <sup>3</sup> ·%HR)];
$HIR_{1h}$	<i>Hygric Inertia of Room</i> em regime de curta duração (1h) [g/(m <sup>3</sup> ·%HR)];
$\alpha_i$	Coefficiente de ponderação correspondente ao intervalo de produção adotado [-].

No entanto, a quantidade abundante de materiais existentes numa habitação resulta na impraticabilidade deste estudo. Visto isso, Vereecken *et al.* [63] propõe uma metodologia mais realista para determinar a inércia higríca com recurso a medições *in situ*, em alternativa ao cálculo da inércia higríca de todos os componentes singulares que contribuem para o equilíbrio da humidade relativa de uma habitação. Em vez de se utilizar a Eq. (3.8) para cada material, todos os materiais presentes numa zona podem ser aglomerados numa camada equivalente. Para tal, a taxa de renovações por hora é assumida constante e a determinação da inércia higríca equivalente realiza-se a partir de um gráfico de curvas, com recurso às medições *in situ* da humidade relativa. Consequentemente, este valor possibilitou uma caracterização compreensível da inércia higríca de uma habitação, uma vez que todos os materiais de acabamento, mobiliário, carpetes, livros, etc., são considerados.

### 3.3.2. Análise

Os trabalhos de investigação em escala real mencionadas no subcapítulo anterior são apresentadas no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Resumo dos trabalhos de investigação em escala real.

Autor	Designação	Unidade
Zhang et al. [75]	Moisture Buffering Effect (MBE)	kg/kg
Ramos e de Freitas [76]	<i>Hygric Inertia of Room</i>	$g/(m^3 \cdot \%HR)$
Vereecken et al. [63]	<i>Production Interval Adapted Hygroscopic Inertia</i>	$g/(m^3 \cdot \%HR)$

A abordagem da temática à escala real permitiu desenvolver o conceito da capacidade dos materiais para amenizarem a humidade relativa interior, uma vez que a comparação de resultados com os dos métodos laboratoriais possibilita o ajuste de dados por validação. Dependendo do comportamento real dos materiais, é possível modificar as condições e variáveis de introdução em laboratório.

Por outro lado, ainda existem incertezas na experimentação à escala real. Os níveis de humidade relativa em edifícios reais são influenciados por outros mecanismos de transporte que tornam difícil isolar o processo de adsorção de vapor e, conseqüentemente, quantificar a influência dos materiais no ambiente. Contudo, verifica-se que a investigação, nos tempos atuais, permanece com o objetivo de identificar os fatores principais que contribuem para o balanço da humidade relativa e analisar a respetiva influência isolada e combinada.

Um dos fatores mais importantes é a ventilação e a infiltração do ar no ambiente interior. Os autores dos estudos têm considerado a taxa de ventilação como um fenómeno de grande influência no atenuar da humidade relativa, mas a relação entre os dois conceitos ainda não foi bem estabelecida. A ventilação pode ser analisada sob dois enfoques: como contributo para a regularização da humidade relativa, a partir da troca direta do ar interior com o ar exterior, ou como movimentação do ar na superfície dos materiais, resultando na diminuição do desempenho e intervenção dos materiais no processo.

Além dos fatores de incerteza, a questão do tempo necessário para a experimentação real é um assunto a ter em conta. Todos os modelos de abordagem experimental implicam ensaios morosos, uma vez que a medição à escala real é dinâmica e de longa duração. Por esse motivo, justifica-se a necessidade de recorrer a modelos teóricos e numéricos.

## 4. MODELOS TEÓRICOS

### 4.1. Literatura

De acordo com a definição concedida pela Nordtest [51], a avaliação da capacidade de um material para adsorver e desadsorver vapor de água pode ser adquirida pelo *Moisture Buffering Value* (MBV), o qual pode ser estimado por ensaio experimental ou por ensaio teórico. O MBV teórico é definido como a quantidade de água adsorvida e desadsorvida de materiais através de 1 m<sup>2</sup> de superfície exposta a uma determinada variação de humidade relativa, durante um certo intervalo de tempo, de acordo com a seguinte equação:

$$MBV_{teór} \approx 0,00568 \cdot p_s \cdot b_m \cdot \sqrt{t_p} \quad (4.1)$$

Onde,

$MBV_{teór}$  *Moisture Buffering Value* teórico [kg/(m<sup>2</sup>·%HR)];  
 $p_s$  Saturação da pressão de vapor de água [Pa];  
 $b_m$  Efusividade higríca [kg/(m<sup>2</sup>·Pa·s<sup>1/2</sup>)];  
 $t_p$  Intervalo de tempo [s].

Por cálculo teórico, a efusividade higríca é obtida pela seguinte equação:

$$b_{m,teór} = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \xi_w}{p_s}} \quad (4.2)$$

Onde,

$b_{m,teór}$  Efusividade higríca por cálculo teórico [kg/(m<sup>2</sup>·Pa·s<sup>1/2</sup>)];  
 $\delta_p$  Permeabilidade ao vapor de água [kg/(m·s·Pa)];  
 $\xi_w$  Capacidade de retenção de vapor de água [kg/m<sup>3</sup>];  
 $p_s$  Saturação da pressão de vapor de água [Pa].

Contudo, existem algumas limitações a este ensaio teórico. Peuhkuri e Rode [78] demonstraram a discrepância do MBV pelo cálculo teórico da efusividade higríca ( $b_m$ ), através da Eq. (4.2), e pela determinação experimental, seguindo o modelo prático do MBV. Conforme demonstrado no Quadro 4.1, o  $b_m$  experimental resulta ser inferior ao teórico, visto que o  $b_m$  teórico não considera a dinâmica e a quantidade de vapor trocada entre o material e o ambiente envolvente.

Quadro 4.1 – Resultados do cálculo da difusão de vapor de água no betão celular autoclavado (adaptado de [78]).

Método	$b_m$ [kg/(m <sup>2</sup> ·Pa·s <sup>1/2</sup> )]
Teórico	$2,66 \times 10^{-7}$
Experimental	$1,96 \times 10^{-7}$

No mesmo sentido, Roels e Janssen [79] demonstraram que, apesar da efusividade hídrica ter maior relevância [78], a influência da resistência superficial à difusão não deve ser desconsiderada. Através de simulações numéricas, estabeleceram um intervalo para o coeficiente de transferência de vapor superfície-ar,  $\beta_p$ , entre  $3,10^{-6}$  s/m (valor exageradamente alto que praticamente desconsidera o efeito da resistência superficial) e  $1,10^{-8}$  s/m (valor extremamente baixo, até para ambientes interiores, que praticamente corresponde à inexistência de movimento de ar na superfície do material). Após várias simulações, os autores apresentaram os resultados da concentração de vapor em função do valor considerado para o coeficiente, conforme demonstrado na Figura 4.1. Pela análise da figura, notoriamente se verifica o decréscimo da concentração de vapor com a diminuição do coeficiente.

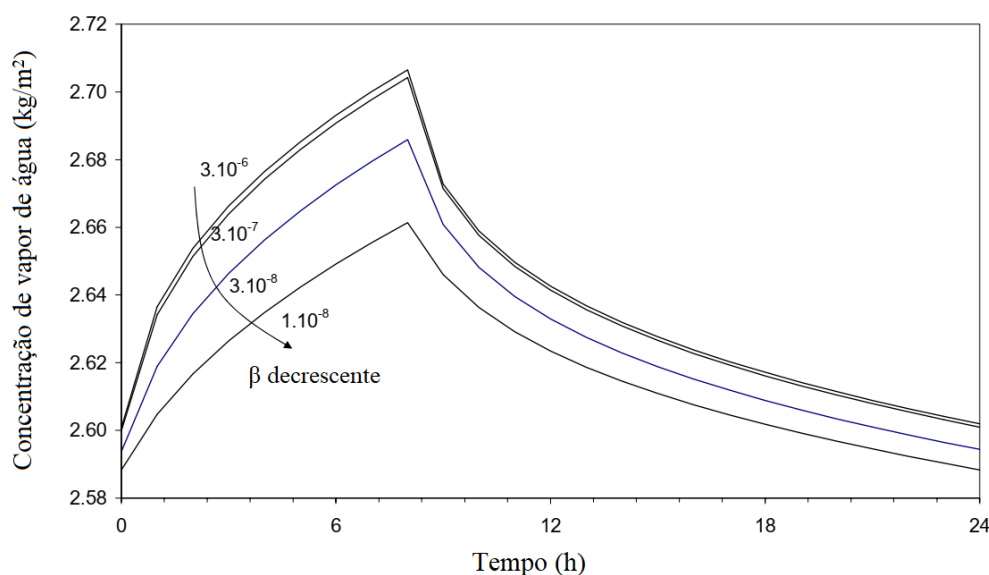


Figura 4.1 – Influência do coeficiente de transferência de vapor superfície-ar na resposta higroscópica de uma amostra de painel de aglomerado de madeira (adaptado de [79])

Face a esta questão, Zu K. *et al.* [80] desenvolveram o coeficiente de transferência total de vapor de água concentrado ( $\delta_{total}$ ), de forma a incluir a resistência superficial à difusão no cálculo teórico. Este coeficiente combina a transferência de vapor de água superficial e a difusão do vapor de água pelo material, sem desconsiderar o ar, de forma a tornar o coeficiente um valor concentrado. De seguida, como demonstrado no Quadro 4.2, foi calculado o MBV teórico, a partir da Eq. (4.1), com a substituição deste novo coeficiente no lugar do  $\delta_p$ . Pela análise do quadro, é evidente a aproximação ao MBV experimental.

Quadro 4.2 – Cálculo do MBV pelos diferentes métodos (adaptado de [80]).

	Onda quadrada	Onda sinusoidal
MBV medido experimentalmente [g/(m <sup>2</sup> ·%HR)]	11,9	8,3
MBV calculado usando $\delta_{total}$ [g/(m <sup>2</sup> ·%HR)]	13,1	9,1
MBV calculado usando $\delta_p$ original [g/(m <sup>2</sup> ·%HR)]	20,8	13,7

Paralelamente, verifica-se outra limitação do modelo teórico do MBV relativamente ao uso de propriedades físicas dos materiais que, para além de serem definidas em condições estáticas e de equilíbrio, são também aferidas em níveis de temperatura e humidade relativa específicos. Em muitos casos estas propriedades são consideradas equivalentes e válidas para todas as condições de ambiente, o que nem sempre é realístico, conforme demonstraram Reuge *et al.* [65].

Da mesma forma, a definição teórica de profundidade de penetração do vapor de água no material é também baseada em características estimadas em condições de equilíbrio. Esta profundidade representa a distância entre a superfície e a profundidade do material onde a amplitude da variação de vapor é igual a 1% da variação à superfície [81]. Segundo Rode *et al.* [52], para otimizar a capacidade de um material para amenizar a humidade relativa interior, é crucial conhecer a profundidade de penetração que ocorre nesse material. Por conseguinte, uma vez conhecida a profundidade de penetração, é possível estabelecer a mínima espessura necessária para obter a melhor potencialidade do material. Porém, a adsorção nos materiais porosos revelou ser uma propriedade que difere no seu comportamento para cada tipo de material. Roels e Janssen [82] estimaram o desempenho de alguns materiais higroscópicos convencionalmente utilizados na construção de acordo com várias espessuras, onde se aferiu que o desempenho de uma argamassa à base de gesso diminuiria acentuadamente se a espessura do material fosse inferior a 1/e (cerca de 37%) da profundidade teórica de penetração do vapor. Maskell *et al.* [83] demonstraram que a capacidade de adsorção das argamassas argilosas incide apenas nos primeiros milímetros do material, enquanto nos materiais compósitos, Rahim *et al.* [84] verificaram o aumento continuado do MBV com o acréscimo da espessura. Por outro lado, a quantificação da profundidade de penetração também complica quando se trata de sistemas de materiais agregados. Como Kaczorek [85] demonstrou, a humidade penetra numa parede dependendo das propriedades singulares dos materiais e das suas respetivas posições no sistema.

Em contraste com a espessura mínima necessária, Wan *et al.* [86] analisaram a espessura máxima recomendada para materiais de construção com grande poder de adsorção, como o gesso, o cimento e o betão. No caso das paredes em contacto com o ambiente exterior, a espessura máxima recomendada consiste numa relação do tempo necessário para que a humidade atravessasse o material e alcance o ambiente interior. Se a espessura do material for excessiva, a humidade pode ficar retida dentro do material, dando origem à proliferação de fungos e redução da eficácia do material para atenuar a humidade relativa interior. Visto isso, Wan *et al.* [87] apresentaram um modelo teórico para determinar a espessura ótima de uma camada de material higroscópico em edifícios,  $L_{opt}$ , com o objetivo de otimizar esta capacidade dos materiais.

De forma a determinar a espessura ótima de um material para amenizar a humidade relativa, Wan *et al.* [87] recorreram ao conceito *Moisture Buffering Capacity* (MBC), inicialmente introduzido por Osanyintola *et al.* [88]. O MBC representa a humidade acumulada por adsorção ou por desadsorção de um material higroscópico durante uma variação periódica de humidade relativa, como demonstrado na Figura 4.2. Este índice pode ser obtido pela seguinte equação:

$$MBC = \max(m) - \min(m) \quad (4.3)$$

Onde,

*MBC* *Moisture Buffering Capacity* [g/m<sup>2</sup>];

*m* Massa da amostra de material por unidade de área [g/m<sup>2</sup>].

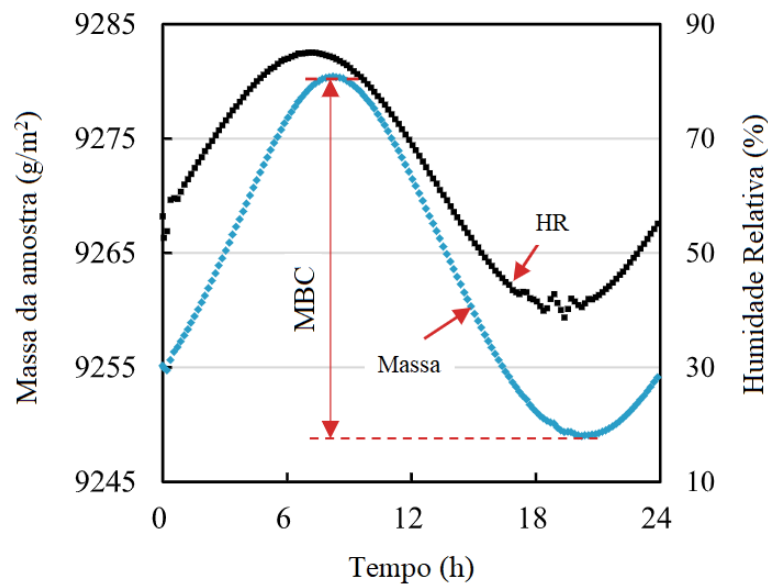


Figura 4.2 – Representação esquemática do conceito MBC - variação de massa de um material higroscópico quando exposto a uma variação dinâmica de humidade relativa interior (adaptado de [87]).

A partir deste conceito e de técnicas matemáticas para a resolução de equações diferenciais, Wan *et al.* [87] aferiram um modelo teórico capaz de determinar a espessura ótima de vários materiais utilizados convencionalmente na construção, como a da argamassa argilosa (vd. Figura 4.3), para condições de ambiente interior onde a temperatura é igual a 23 °C e a humidade relativa varia de acordo com uma função sinusoidal, iniciando-se a 50% com amplitudes de 10%. O estudo demonstrou que a espessura ótima de um material higroscópico depende de alguns fatores importantes, tais como a temperatura e o nível de humidade relativa do ambiente interior, assim como as próprias propriedades do material. Os autores também verificaram que aumentar a espessura de um material além de um certo valor não traz resultados significativos no desempenho do material para amenizar a humidade relativa. Visto isso, é fundamental a seleção de uma espessura apropriada da camada de material.

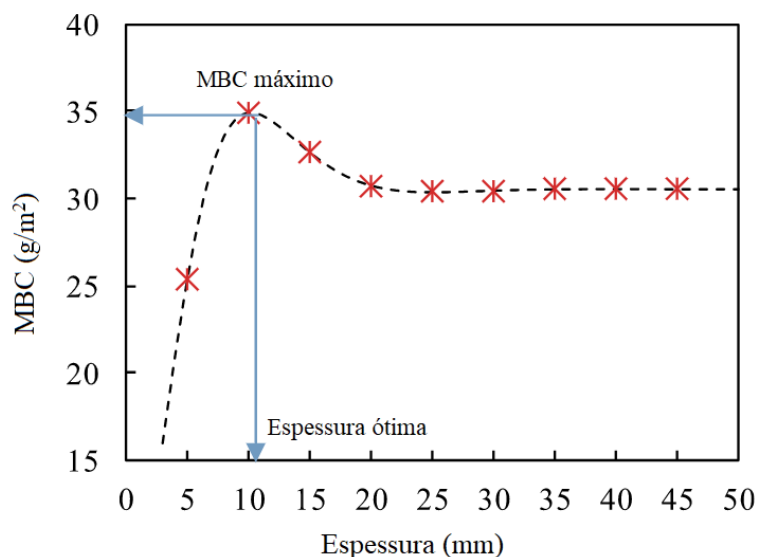


Figura 4.3 – Representação do MBC máximo e espessura ótima para a argamassa argilosa, em condições de ambiente interior controlado (adaptado de [87]).

Com o objetivo de considerar todos os níveis de humidade relativa ocorrentes em situações reais, Yang *et al.* [89] contribuíram, por via experimental, com o desenvolvimento do índice *Maximum Accumulated Moisture Buffering Value* (MAMBV). Este índice representa a quantidade máxima de vapor de água transferida pelos materiais, tanto por adsorção como por desadsorção, permitindo dessa forma comparar o desempenho higroscópico dos materiais em diferentes cenários de teste. Seguidamente, Ge *et al.* [90] concluíram que quanto maior for a permeabilidade de um material ao vapor de água e maior a capacidade de retenção de vapor de água, mais facilmente o vapor se desloca para o interior e, conseqüentemente, maior a profundidade de infiltração no material.

Mais tarde, Zhang *et al.* [12] desenvolveram o conceito *basic Moisture Buffer Value* ( $MBV_{basic}$ ), de modo a considerar os intervalos de tempo atribuídos para cada uma das fases de adsorção e desadsorção, em que a humidade relativa é mantida elevada durante  $\alpha \cdot t_p$  horas e reduzida durante  $(1-\alpha) \cdot t_p$  horas, definido pela seguinte equação:

$$MBV_{basic} = 1,27 \cdot [\alpha(1-\alpha)]^{0,535} \cdot \sqrt{\delta_p \cdot \rho \cdot \xi_w} \cdot \sqrt{t_p} \quad (4.4)$$

Onde,

- $MBV_{basic}$  *basic Moisture Buffer Value* [kg/(m<sup>2</sup>·%HR)];
- $\alpha$  Coeficiente correspondente à relação de horas a considerar de um ciclo [-];
- $\delta_p$  Permeabilidade ao vapor de água [kg/(m·s·Pa)];
- $\rho$  Massa volúmica [kg/m<sup>3</sup>];
- $\xi_w$  Capacidade de retenção de vapor de água [kg/kg];
- $t_p$  Número total de horas de um ciclo [h].

Contudo, a Eq. (4.4) é apenas aplicável para ondas quadradas de humidade relativa (vd. Figura 3.2). Para adaptá-la a ondas sinusoidais, foi introduzido um fator de correção  $\beta$  de acordo com a seguinte equação:

$$\beta = 0,888 \cdot \frac{[\alpha(1-\alpha)]^{-0,035}}{\sqrt{\alpha} + \sqrt{1-\alpha}} \quad (4.5)$$

Onde,

- $\beta$  Fator de correção de onda quadrada para sinusoidal [-];  
 $\alpha$  Coeficiente correspondente à relação de horas a considerar de um ciclo [-].

Dessa forma, a humidade acumulada pode ser descrita pela seguinte equação:

$$G = \beta \cdot MBV_{basic} \cdot (H - L) \quad (4.6)$$

Onde,

- $G$  Quantidade de água adsorvida [kg/m<sup>2</sup>];  
 $\beta$  Fator de correção de onda quadrada para sinusoidal [-];  
 $MBV_{basic}$  *basic Moisture Buffer Value* [kg/(m<sup>2</sup>·%HR)];  
 $H$  Nível de humidade relativa alto [%];  
 $L$  Nível de humidade relativa baixo [%].

## 4.2. Análise

Os ensaios teóricos mencionados no subcapítulo anterior são apresentados no Quadro 4.3.

*Quadro 4.3 – Resumo dos ensaios teóricos.*

Autor	Designação	Unidade
Nordtest [51]	<i>Moisture Buffering Value</i> teórico	kg/(m <sup>2</sup> ·%HR)
Zu K. <i>et al.</i> [80]	<i>Moisture Buffering Value</i> com $\delta_{total}$ no lugar de $\delta_p$	g/(m <sup>2</sup> ·%HR)
Osanyintola <i>et al.</i> [88]	<i>Moisture Buffering Capacity</i>	g/m <sup>2</sup>
Yang <i>et al.</i> [89]	<i>Maximum Accumulated Moisture Buffering Value</i>	–
Zhang <i>et al.</i> [12]	<i>basic Moisture Buffer Value</i>	kg/(m <sup>2</sup> ·%HR)]

Os modelos teóricos baseiam-se em experiências laboratoriais e em condições controladas. Dessa forma, a efetividade teórica da capacidade dos materiais depende da sua aplicação específica e da localização do edifício em termos de condições climáticas. Por exemplo, um material que tenha um bom desempenho num clima seco pode não ser tão eficiente num ambiente húmido, e vice-versa. Adicionalmente, o desempenho dos materiais é também afetado por fatores presentes fora de um ambiente controlado, como infiltrações de ar, taxas de ventilação e a presença de outros materiais no mesmo espaço.

Apesar da evolução dos modelos teóricos, ainda não existe um modelo normalizado para avaliar a capacidade dos materiais na amenização da humidade relativa. Uma das principais razões é a

dependência desta capacidade em vários fatores como o tipo de material, a sua espessura, massa volúmica, porosidade e área de exposição, assim como a temperatura e humidade relativa do ambiente em que se inserem. Devido à complexidade e alta variabilidade destes fatores, o desenvolvimento de um modelo teórico normalizado que possa ser aplicado universalmente para todos os edifícios e locais torna-se um desafio difícil de alcançar. Contudo, o trabalho dos investigadores continua a progredir nesse sentido até aos dias de hoje.



## 5. MODELOS NUMÉRICOS

### 5.1. Literatura

Os modelos experimentais e teóricos têm vindo a alcançar um equilíbrio no que diz respeito a resultados. No entanto, estes protocolos não conseguem precisar rigorosamente a capacidade de amenização dos picos de humidade, por parte dos materiais, em edifícios reais devido à influência da ventilação, comportamento dos ocupantes, e outros fatores na troca de vapor de água entre um material e o ambiente interior, incluindo a influência do sistema construtivo das paredes onde se insere o material de acabamento, a presença de pintura e de mobiliário [91]. Visto isso, é necessário observar o efeito destes fatores em condições reais dos edifícios. Contudo, ensaios experimentais em edificações reais são morosos e, muitas vezes, inexequíveis dada a significativa quantidade de variáveis atuantes, pelo que as simulações numéricas podem ser úteis [92].

No contexto deste trabalho, de forma a se obter uma avaliação detalhada das variações de humidade relativa de um ambiente interior, sob um regime variável (condições variáveis como a produção de vapor e ventilação no interior e, no ambiente exterior, p.e, a pressão atmosférica), a influência dos materiais porosos precisa de ser incluída nos modelos de simulação numérica. Contudo, é necessário assumir algumas simplificações para se reduzir o consumo de memória de acesso aleatório (RAM) no decorrer da análise, visto que, caso contrário, o processo torna-se exageradamente extenso e moroso. Dessa forma, cada modelo numérico atribui diferentes simplificações e, por esse motivo, precisam de ser previamente categorizados, de modo a se compreender o critério no desígnio das respetivas simplificações. Os modelos de simulação higrotérmica podem ser divididos em três categorias, distintas pela abordagem implementada ao respetivo desenvolvimento [71]:

- Modelos empíricos;
- Modelos semi-empíricos;
- Modelos com base nas leis da física.

Em suma, os modelos empíricos recorrem aos resultados experimentais como instrumento do seu desenvolvimento, enquanto os modelos com base na física utilizam os princípios da física. Os modelos semi-empíricos estão entre os dois grupos anteriores, onde se trata de modelos, com fundamento nas leis da física, desenvolvidos com a introdução de dados obtidos experimentalmente. Contudo, geralmente, esta classificação é resumida e dividida apenas em modelos de simulações simplificadas (empíricas e semi-empíricas) e modelos com fundamento nas leis naturais.

Estas categorias ajudam a compreender se o desenvolvimento de um modelo decorre pela introdução de dados experimentais ou por equações fundamentais da física, o que, posteriormente, terá influência na validação e avaliação desses modelos. Porém, devido à insuficiente coleção de dados experimentais, dada a dificuldade da respetiva recolha, os modelos recentes concentram-se mais em abordagens baseadas na física - computacionalmente limitante quando os modelos são relevantes em questão de tamanho, definição e complexidade. Kreiger e Subar [47] argumentam que, em prol do avanço científico,

deve ser alcançado um equilíbrio entre os dois principais tipos de modelo, de forma a obter resultados de simulação produtivos e validáveis.

### 5.1.1. Modelos simplificados

Os modelos simplificados são desenvolvidos pela introdução de fatores de correção obtidos experimentalmente. Contudo, este método pode ser considerado incerto pela premissa de que os fatores podem ser aplicados a qualquer edifício, quando na verdade eles são calculados a partir de um número de amostras relativamente reduzido.

Designado como *Effective Capacitance* (EC), o modelo inicialmente desenvolvido por Stehno [93] relaciona a capacidade do material de acabamento e do ar interior para armazenarem humidade. Os fundamentos do modelo são reproduzidos na Figura 5.1a, que demonstra como apenas um nó retrata a capacidade de armazenamento de um ambiente interior e os materiais nele contidos. Perante essa definição, o modelo pode ser representado pela seguinte equação:

$$\rho_{ar} \cdot V_{zona} \cdot \frac{d\omega_{zona}}{dt} = \sum_{i=1}^N \dot{m}_{v,i} \quad (5.1)$$

Onde,

$\rho_{ar}$	Massa volúmica do ar [kg/m <sup>3</sup> ];
$V_{zona}$	Volume da zona [m <sup>3</sup> ];
$\omega_{zona}$	Teor de humidade no ar [kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>ar</sub> ];
$t$	Tempo [s];
$\dot{m}_{v,i}$	Taxas de fluxo de vapor de cada fonte de produção ou de perdas $i$ .

Segundo o modelo, a capacidade de armazenamento de humidade do ar da zona e dos materiais são combinadas, i.e., um edifício com EC=15 significa que os materiais, em conjunto com o ar da zona, conseguem adsorver 15 vezes mais vapor de água que o ar da zona sozinho. Alguns exemplos de fontes,  $i$ , encontram-se nos ganhos e perdas por ventilação, perdas para os equipamentos AVAC e ganhos pela presença de seres vivos.

Por outro lado, o modelo EC simplifica nos dados de entrada, inclusive admite o ar como bem misturado e uniforme, o que não vai de acordo com a realidade. Além disso, a combinação do ar e materiais num nó singular implica que a resistência à transferência de vapor de água entre o ar e os materiais é desconsiderada. [94], [95]

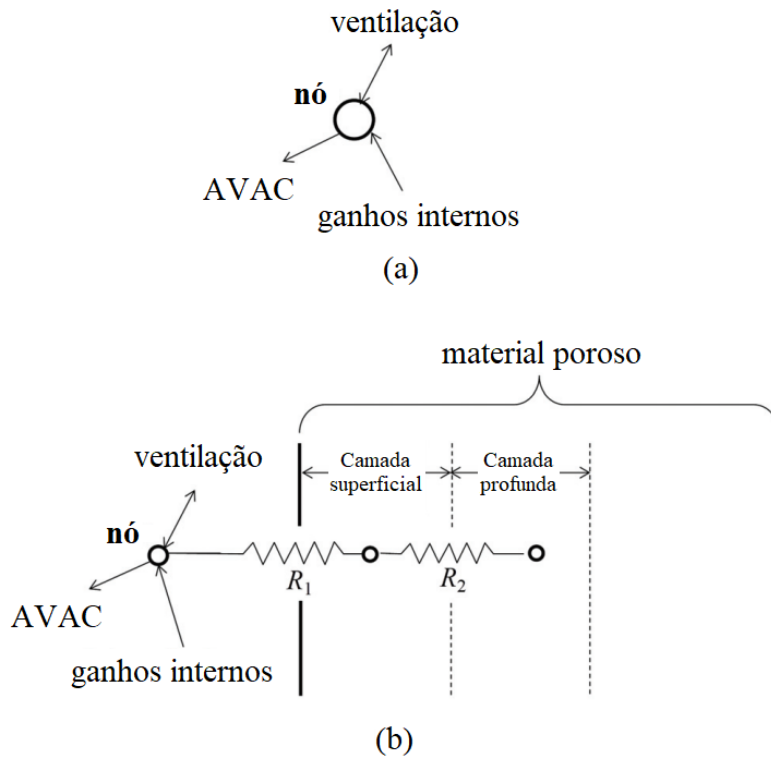


Figura 5.1 – Esquema das transferências de vapor e capacidades dos nós para (a) modelo EC e (b) modelo EMPD (adaptado de [95]).

Inicialmente elaborado por Cunningham [96], e, mais tarde, melhorado e validado com o incremento de dados retirados de diferentes edifícios por Woods *et al.* [64], [94], [97], [98], o modelo *Effective Moisture Penetration Depth* (EMPD) inclui as mesmas fontes de produção e de perdas de umidade do modelo EC, contudo a capacidade de armazenamento do ar da zona não se altera e, assim sendo, considera que a capacidade de armazenamento de um material provém do trabalho combinado de uma camada superficial, responsável pelas oscilações de umidade em curta duração, e de uma camada profunda, responsável pelas oscilações de longa duração.

Conforme demonstrado na Figura 5.1b, o ar da zona está separado do material pela resistência à transferência de massa e, no interior do material, a resistência à difusão separa a camada superficial da profunda. [95] A seguinte equação demonstra o equilíbrio referente ao vapor de água de um ambiente interior:

$$\rho_{ar} \cdot V_{zona} \cdot \frac{d\omega_{zona}}{dt} = \sum_{i=1}^N \dot{m}_{v,i} - \sum_{j=1}^N \frac{\omega_{zona} - \omega_{sup,j}}{R_{1,j}} \quad (5.2)$$

Onde,

- $\rho_{ar}$  Massa volúmica do ar [kg/m<sup>3</sup>];
- $V_{zona}$  Volume da zona [m<sup>3</sup>];
- $\omega_{zona}$  Teor de umidade no ar [kg<sub>vapor</sub>/kg<sub>ar</sub>];
- $t$  Tempo [s];
- $\dot{m}_{v,i}$  Taxas de fluxo de vapor de cada fonte de produção ou de perdas  $i$ ;
- $\omega_{zona}$  Teor de umidade no ar da zona [kg<sub>vapor</sub>/kg<sub>ar</sub>];

$\omega_{sup,j}$	Teor de humidade na superfície do material $j$ [ $\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}$ ];
$R_{I,j}$	Resistência à difusão [ $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ].

Para determinar as quantidades adsorvidas e desadsorvidas pelas camadas do material, é necessária a introdução do conceito da profundidade efetiva de infiltração da humidade (EMPD). Esta profundidade é calculada a partir da seguinte equação:

$$d_{EMPD} = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot p_{sat} \cdot t_p}{\rho \cdot \xi_w \cdot \pi}} \quad (5.3)$$

Onde,

$d_{EMPD}$	Profundidade efetiva de infiltração da humidade [m];
$\delta_p$	Permeabilidade ao vapor de água [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ];
$p_{sat}$	Pressão de saturação de vapor de água [Pa];
$t_p$	Intervalo de tempo [s];
$\rho$	Massa volúmica do material [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
$\xi_w$	Capacidade higroscópica específica [ $\text{kg}/\text{kg}$ ].

Porém, as propriedades hígricas, como a capacidade higroscópica específica e a permeabilidade ao vapor de água das camadas são presumidas como constantes, quando na realidade podem variar significativamente consoante a quantidade de humidade [99].

Abadie e Mendonça [100] recorreram ao EMPD na procura de um método para aplicar o MBV experimental em simulações numéricas. Pela correlação do MBV teórico, MBV experimental, humidade relativa e resistência superficial à difusão, os autores converteram a variação de concentração de vapor de água, originalmente em onda quadrada, para uma variação harmónica (vd. Figura 3.2). Contudo, o método utilizado baseia-se em algumas simplificações como a difusão de vapor e a temperatura permanecerem constantes e a espessura dos materiais ser maior que a espessura de infiltração.

Face à premissa adotada que o ar da zona se encontra bem distribuído e homogéneo, Steeman *et al.* [101] introduziram o conceito da dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Deste modo, a distribuição do ar é considerada na interação com os materiais, o que melhorou os resultados, contudo aumentou o tempo de simulação. Visto isso, os autores recomendam a utilização do CFD apenas para casos em que as zonas tenham geometrias atípicas ou para análise detalhada do comportamento higrotérmico. Em suma, conclui-se que o pressuposto estado uniforme e bem misturado do ar concede bons resultados na estimativa da humidade relativa média de uma zona.

Recentemente, Zhang *et al.* [102] otimizaram o modelo ao introduzirem a consideração da velocidade do ar e do perfil de onda na produção de humidade. Conforme demonstrado na Figura 5.2, é proposto um modelo de transferência de humidade em camadas. De cima para baixo, as camadas dividem-se em:

- Camada de ar uniforme da zona (L0);
- Camada fina de ar junto ao material (L1);
- Camada superficial do material onde ocorre transferência de massa por convecção (L2);

- Camada de infiltração efetiva (L3);
- Camada profunda do material onde ocorre transferência de massa por difusão (L4);

A partir da correlação de princípios físicos com o modelo EMPD, os autores desenvolveram uma série de índices de desempenho higroscópico que demonstraram precisão e fiabilidade [102], contudo este modelo baseia-se em algumas premissas que facilitam o problema em questão, como a totalidade da transferência de vapor provir da camada L1, a camada L2 equivaler a um estrato fictício da superfície do material que, na verdade, não tem espessura real, a direção da infiltração ocorrer constantemente para a parte inferior da camada L3 e, por fim, a consideração de uma superfície adiabática e impermeável na base do material.

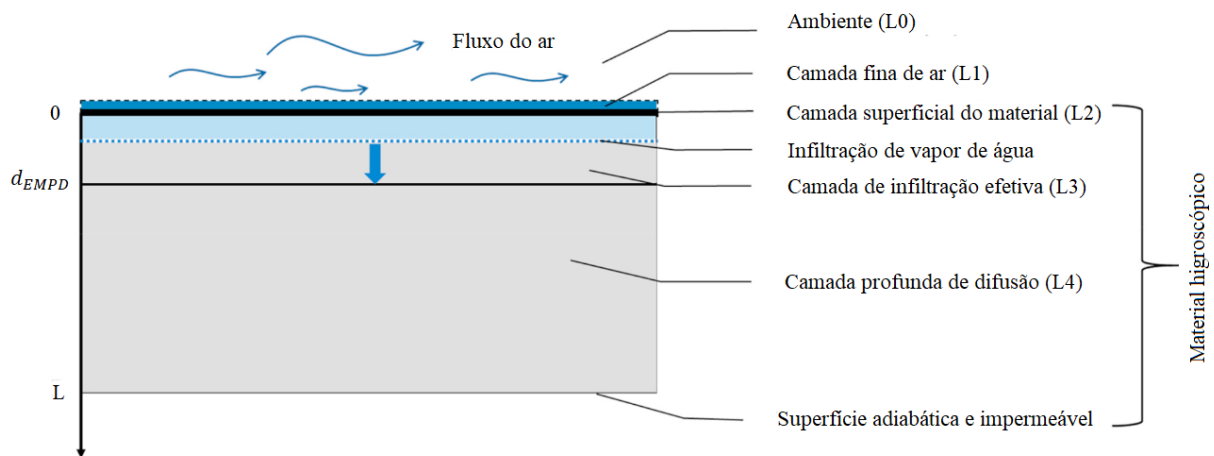


Figura 5.2 – Modelo do processo da transferência de vapor (adsorção) entre um material e o ar adjacente (adaptado de [102]).

### 5.1.2. Modelos com base nas leis da física

Com base nas equações fundamentais utilizadas para retratar fenômenos naturais, estes modelos podem-se tornar mais complexos e, conseqüentemente, computacionalmente morosos à medida que as dificuldades dos problemas físicos aumentam. Na base desta modelação encontra-se a *Lei de Fick* para a formulação da adsorção de humidade [103]:

$$g = -\delta_p \left( \frac{dp_v}{dx} \right) \quad (5.4)$$

Onde,

- $g$  Fluxo de vapor [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ];
- $\delta_p$  Permeabilidade ao vapor de água [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ];
- $p_v$  Pressão do vapor de água [Pa];
- $x$  Espessura [mm].

As diferenças entre cada modelo encontram-se no nível de complexidade abordado na descrição teórica dos fenômenos físicos, assim como na discretização do espaço e tempo [66], [104]. No entanto, a maioria

dos estudos reconhece que isolar a análise dos processos de transferência de calor e de umidade não descreve o comportamento de ambos fenômenos da forma mais precisa. O calor, a umidade e as propriedades dos materiais têm uma relação de simultaneidade importante no processo, sendo assim necessário analisar os respectivos comportamentos em conjunto [105]. Por conseguinte, os modelos *Combined Heat, Air and Moisture Transfer* (HAMT) representam o método teórico mais rigoroso na simulação numérica, uma vez que analisam simultaneamente o impacto da temperatura, umidade e pressão atmosférica na capacidade dos materiais para amenizar as variações de umidade relativa interior. Porém, as transferências de calor e umidade não ocorrem em escalas temporais iguais, i.e., os mecanismos de transferência de umidade são geralmente mais lentos que os de calor. Visto isso, a análise combinada resulta num processo computacional ainda mais complexo e moroso que nos modelos simplificados [106]. Alguns exemplos de modelos HAMT, como o de Künzle [107], o de Janssen e Roels [54] e, mais recentemente, o de Choi *et al.* [108], demonstram a relação entre a combinação das transferências de calor e umidade pela envolvente de um edifício e as condições higrotérmicas do ambiente interior.

Com o avanço da tecnologia, várias ferramentas de *software* têm sido desenvolvidas em prol da simulação higrotérmica em edifícios [109], onde as principais diferenças entre elas verificam-se na complexidade da descrição teórica dos fenômenos físicos, assim como na discretização do tempo e do espaço [66]. Geralmente utilizado pela comunidade científica, o *software* WUFI® [105], elaborado pelo Fraunhofer Institute for Building Physics, permite simular o transporte simultâneo de calor e de umidade em elementos construtivos com várias camadas. Relativamente ao transporte de vapor, o programa considera que o fenômeno da difusão é o principal agente das transferências. Da mesma forma, o *software* DELPHIN® [110] descreve o transporte de vapor pela difusão, contudo retrata o transporte de água, no estado líquido, de forma diferente, i.e., considera a pressão da capilaridade como força motriz do transporte, enquanto o WUFI® considera que a água líquida se movimenta pelo gradiente de concentração de água no material. Nesse sentido, as estratégias diferentes resultam em resultados também divergentes, onde o WUFI® geralmente apresenta maiores quantidades de umidade nas camadas do elemento construtivo comparativamente ao DELPHIN® [111], [112].

O *software* mais usual para simulação higrotérmica é apresentado no Quadro 5.1. Mais informação e detalhe acerca de modelos numéricos utilizados para o estudo da higrotérmica nos edifícios podem ser encontrados nos trabalhos de Kreiger e Srubar [47], Delgado *et al.* [109], Straube e Burnett [113], Woloszyn e Rode [114], Hamdaoui *et al.* [115] e Delgado *et al.* [116].

Quadro 5.1 – Sumário do software mais usual para simulação higrotérmica.

<i>Software</i>	<i>Autor</i>	<i>Data da última atualização</i>
1D-HAM [117]	<i>Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics</i>	—
BSim [118]	<i>Danish Building Research Institute</i>	2020
COMSOL Multiphysics [119]	<i>COMSOL</i>	2022
DELPHIN [110]	<i>Bauklimatik Dresden</i>	2022
EnergyPlus [120]	<i>U.S. Department of Energy com colaboração de NREL, DOE, algumas instituições acadêmicas e empresas privadas</i>	2022
GLASTA [121]	<i>Physibel</i>	2022
hygIRC 1D [122]	<i>NRC Institute for Research in Construction</i>	2003
HAM-Tools [123]	<i>Technical University of Denmark/Chalmers Technical University, Sweden</i>	—
IDA-ICE [124]	<i>EQUA Simulation AB</i>	2020
SPARK [125]	<i>LBNL e Ayres Sowell Associates</i>	2003
TRNSYS [126]	<i>University of Wisconsin-Madison</i>	2019
WUFI [105]	<i>Fraunhofer Institute for Building Physics</i>	2020

Paralelamente, nos últimos anos, têm sido introduzidas inovações ao método HAMT tradicional [80], [127], [128], [129]. Por exemplo, Dubois *et al.* [128] apresentou uma abordagem diferente para estimar as potencialidades hígricas dos materiais de um edifício, por recurso ao MBV experimental. Contrariamente aos modelos anteriores, este método utiliza o MBV como fonte dos parâmetros *input* no programa, permitindo uma estimativa mais precisa das propriedades dos materiais nas condições dinâmicas que realmente se encontram no edifício em análise.

Todavia, dada a numerosa quantidade de abordagens ao modelo HAMT que têm sido introduzidas recentemente, têm sido desenvolvidos dados numéricos de referência para testar a precisão do *software* emergente. Em 2004, foi desenvolvido o projeto europeu HAMSTAD [130] com o objetivo de estabelecer parâmetros de referência aos investigadores para avaliarem a precisão dos seus métodos. Mais tarde, no IEA ECBCS Annex 41 [131], um projeto internacional para desenvolver a modelação HAMT, foram também desenvolvidos parâmetros, baseados em dados recolhidos experimentalmente, para testar o *software* [132].

Adicionalmente, o projeto BESTEST [133] recomenda que no processo de validação dos modelos devem ser respeitadas três classes de testes:

- Verificação analítica;
- Comparação de modelos;
- Validação experimental.

Continuamente atualizado e desenvolvido por Judkoff e Neymark [133], o projeto BESTEST tem sido utilizado como referência para validar modelos como o de Rode e Grau [11], Zhang *et al.* [12] e o de Abadie e Mendonça [100].

## 5.2. Análise

Com base na revisão de literatura, é possível depreender que tanto os modelos EMPD como os modelos HAMT existentes ainda apresentam algumas limitações que precisam ser melhoradas e esclarecidas, tais como a falta de consideração do efeito da heterogeneidade do material, a precisão limitada das medições do teor de humidade e a dificuldade em considerar o impacto das condições de ambiente, como a temperatura e o fluxo de ar, na capacidade de adsorção de humidade do material. Além disso, os modelos requerem muitas vezes que sejam feitas certas suposições sobre o material a ser testado, tais como uma distribuição uniforme da humidade e propriedades constantes do material, o que pode nem sempre ser verdade em condições reais. Por fim, é de salientar que a validação experimental dos modelos é crucial, uma vez que pode haver discrepâncias entre as previsões do modelo e as medições reais.

Atualmente, não existe ainda um modelo numérico universalmente aceite ou normalizado para o cálculo do desempenho dos materiais, sendo necessária uma maior validação dos modelos numéricos através de testes experimentais para garantir a sua precisão e fiabilidade. Além disso, os modelos existentes variam significativamente em termos dos seus pressupostos, condições de fronteira e parâmetros de entrada, o que pode levar a discrepâncias nos resultados obtidos.

## 6. INVESTIGAÇÃO

O avanço científico na avaliação da capacidade higroscópica dos materiais tem proporcionado uma compreensão mais aprofundada sobre como os materiais interagem com a humidade do ambiente. Através dos modelos atrás mencionados e outras técnicas de análise experimental, como espectroscopia e microscopia, viabiliza-se a investigação detalhada dos mecanismos de adsorção e desadsorção de vapor de água nos diversos materiais. Visto isso, vários estudos têm sido desenvolvidos na temática da capacidade higroscópica dos materiais utilizados na construção e a respetiva influência na humidade relativa interior.

### 6.1. Abordagens experimentais e numéricas

Segundo vários investigadores, a presença de mobiliário deve ser também considerada na temática [64], [74], [89], [134]. Yang *et al.* [89] demonstraram que a colocação de mobília na frente de paredes reduz a capacidade higroscópica das mesmas paredes, uma vez que as suas áreas expostas diminuem. No entanto, a mobília em si é higroscópica e, como tal, também capaz de retirar e devolver humidade ao ambiente interior, pelo que deve ser considerada no estudo em conjunto com as paredes [135].

Estudos revelaram que a utilização de madeiras, ou outros materiais à base de madeira, como material de acabamento em paredes, proporciona uma maior atenuação dos níveis de humidade relativa do que outros acabamentos tradicionais, como o estuque [136], [137]. Contudo, salienta-se que o desempenho da madeira pode ser influenciado por outros fatores, como os tratamentos de superfície, taxas de ventilação, temperatura interior e taxas de produção de vapor [138], [139].

Por outro lado, a heterogeneidade e anisotropia da madeira são características que condicionam não apenas a resistência mecânica da madeira, mas também a sua capacidade higroscópica. As várias possibilidades de orientação dos veios, face ao ambiente interior, resultam em comportamentos diversos. Svennberg [29] estabeleceu as taxas de adsorção 1:2:20, respetivamente para as direções tangente, radial e longitudinal às fibras (vd. Figura 6.1). Além da direção em que ocorre a adsorção, outra condicionante no desempenho higroscópico das madeiras é o tipo de lenho que as constitui. A composição diferenciada do tecido lenhoso é a causa do comportamento anisotrópico da madeira e da sua heterogeneidade, quer em relação às várias espécies quer em função da localização no mesmo toro. As árvores como o abeto, o pinheiro e o cedro possuem um lenho resinoso. Geralmente, a madeira proveniente destes lenhos apresenta menor permeabilidade ao vapor de água do que a madeira de lenhos folhosos, como o carvalho, o castanheiro e a faia. Estudos revelaram que a utilização de madeiras, ou outros materiais à base de madeira, como material de acabamento em paredes proporciona uma maior atenuação dos níveis de humidade relativa do que outros acabamentos tradicionais, como o estuque [136], [137]. Contudo, salienta-se que o desempenho da madeira ainda pode ser influenciado por outros fatores, como os tratamentos de superfície, taxas de ventilação, temperatura interior e taxas de produção de vapor [138], [139].

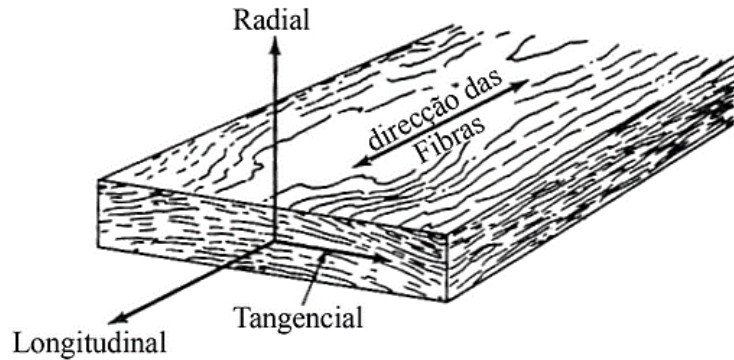


Figura 6.1 – Direções ou eixos principais no corte da madeira (adaptado de [140]).

A partir de ensaios realizados em três casas semelhantes localizadas lado a lado, em Orlando, na Flórida, nos Estados Unidos da América, Xiaoshu *et al.* [141] demonstraram o comportamento higroscópico da madeira utilizada como revestimento interior. Os ensaios foram realizados durante um período de 12 meses, abrangendo as quatro estações do ano, onde as condições climáticas variaram de 20 °C a 35 °C de temperatura e de 30% a 70% de humidade relativa. O estudo consistiu na comparação de resultados obtidos entre a primeira habitação, revestida com madeira maciça, a segunda habitação, revestida com contraplacado de madeira, e a terceira habitação, com gesso cartonado. Conforme demonstrado na Figura 6.2, a madeira maciça apresentou a maior capacidade de amenização de humidade relativa, onde os níveis se mantiveram praticamente constantes durante o decorrer do ensaio.

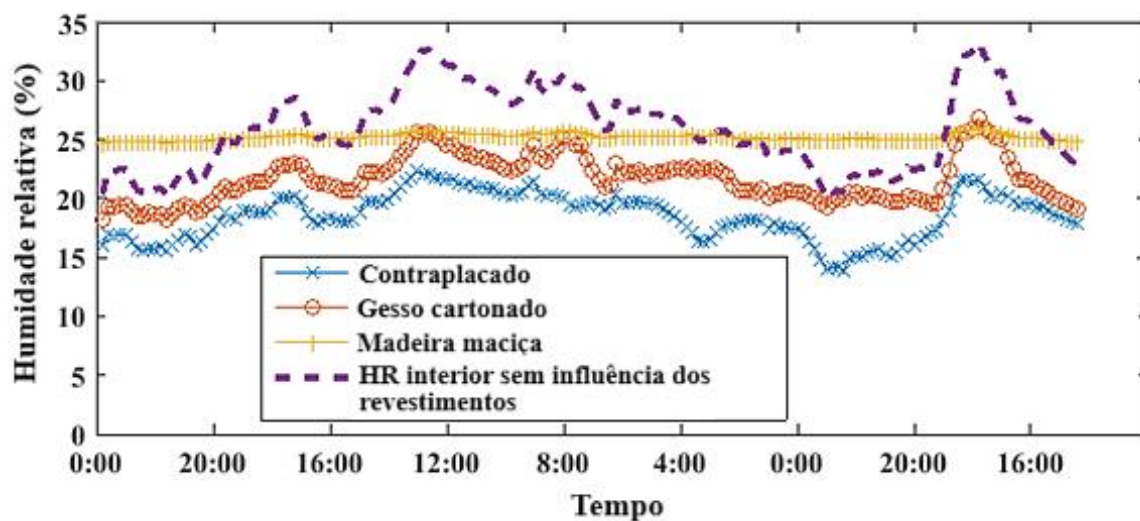


Figura 6.2 - Comparação de humidade relativa interior entre as 3 habitações de teste a uma taxa de ventilação de 2 (dm<sup>3</sup>/s)/m<sup>2</sup> (adaptado de [141]).

Rocha [16] estudou a capacidade higroscópica de argamassas de cimento, de cal hidráulica e de terra argilosa com areia, assim como argamassas pré-doseadas como o estuque e revestimento de celulose e também alguns revestimentos pré-fabricados como o gesso cartonado, placas de celulose reciclada e placas de fibras de madeira e ligante. Na análise de resultados, evidenciou-se o fenómeno da histerese presente em todos os materiais e obteve-se um valor de MBV mais elevado para as placas de fibras de madeira e ligante (O) (2,96 g/(m<sup>2</sup>·ΔHR)), reboco projectado de celulose (N) (2,21g/(m<sup>2</sup>·ΔHR)) e argamassa de terra argilosa (S) (1,83 g/(m<sup>2</sup>·ΔHR)). Em relação às argamassas de terra, Lima *et al.* [142]

concluíram também que quanto maior a quantidade de terra utilizada em relação à areia, melhores são as capacidades de adsorção de humidade dessa argamassa.

Outros materiais utilizados na construção também foram ensaiados por Correia [21], nomeadamente isolamentos térmicos como placas de poliestireno extrudado (XPS), placas rígidas de poliestireno expandido (EPS), aglomerado de cortiça e lã de origem natural. Pela análise de resultados, verificou-se que tanto o XPS como o EPS apresentam variações baixas de teor de água, fato que se reflete no bom desempenho térmico destes materiais.

Ramos *et al.* [143] investigaram a ação de revestimento superficial na capacidade higroscópica dos materiais, onde se concluiu que a aplicação de pintura reduz o desempenho dos materiais para atenuar a humidade relativa de até metade do desempenho dos mesmos materiais sem o revestimento. Salientou-se também que o componente primário da pintura é o principal responsável pela resistência ao vapor de água das pinturas, presentes no tipo de pintura 2 e 4 da Figura 6.3. Além disso, Rocha [16] denotou também o aumento do fenómeno da histerese nos materiais quando revestidos superficialmente.

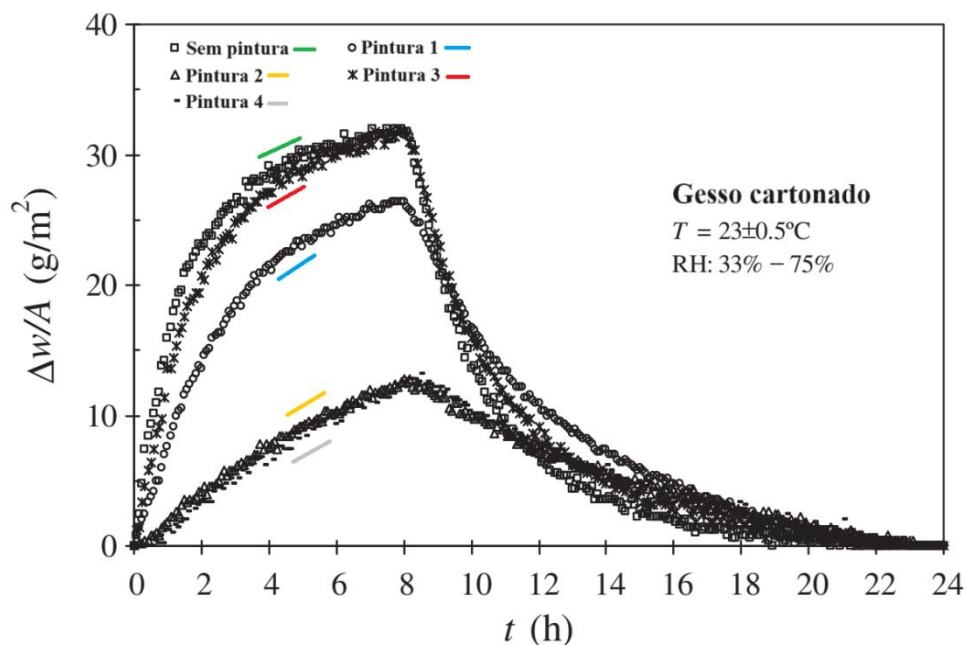


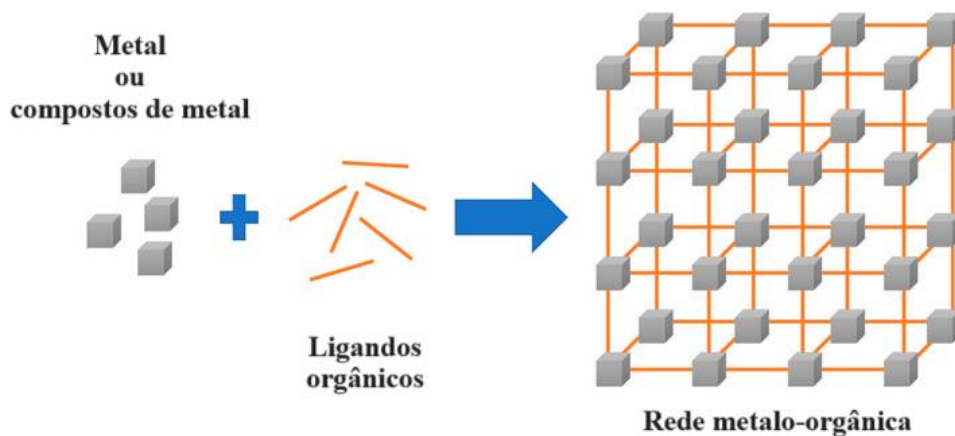
Figura 6.3 - Variação de massa de uma placa de gesso cartonado, num intervalo de humidade relativa de 33-75%, temperatura constante a  $23^\circ\text{C}$ , sem pintura e com 4 tipos de pintura diferentes (adaptado de [143]).

Naylor [144] concluiu que os valores de resistência ao vapor de água de tecidos como a lã, algodão e poliéster são similares, i.e., independentes do tipo de material têxtil. Nesse sentido, foi possível deduzir que as fibras naturais e sintéticas têm comportamentos equivalentes na adsorção ao vapor de água em condições de equilíbrio. Na mesma temática, Ghali *et al.* [145] investigaram a utilização de cortinas junto das janelas como um meio de amenizar a humidade relativa de um ambiente interior. O estudo demonstrou que uma cortina de algodão foi capaz de restringir a humidade relativa entre os 44 e 65% em comparação com o intervalo de 40 a 70% apresentado no caso sem cortina. Contudo o desempenho da cortina não dependeu apenas da sua capacidade higroscópica, mas também do perfil de produção de vapor na zona e do sistema de ar condicionado. Mais tarde, Ghali *et al.* [146] estudaram a influência da incidência da energia solar nas janelas. Concluiu-se que a radiação solar acelera os processos de adsorção e desadsorção nas cortinas, contudo provoca o aumento da temperatura no interior da zona.

Nos últimos anos, a utilização de materiais de mudança de fase (PCM – *Phase Change Material*) como reguladores de umidade tem sido um assunto de grande interesse. Estes materiais têm como principal característica o armazenamento de energia latente sob a forma de calor, distinguindo-se dos materiais de construção mais convencionais [147]. Como principal característica, absorvem calor quando fundem e libertam calor quando solidificam, sendo estas mudanças de fase realizadas a uma temperatura quase constante. O processo de transformação das propriedades físicas é designado de processo de mudança de fase, que ocorrem do estado sólido-sólido, sólido-líquido, líquido-gasoso e sólido-gasoso [148]. Recentemente, alguns investigadores combinaram PCMs com materiais porosos, como a diatomite, vesuvianite, sepiolite, zeolite, entre outros, para regular simultaneamente a temperatura e umidade relativa num edifício [149], [150], [151]. Com o objetivo de adaptar estes materiais a uma inovação passiva para redução do consumo energético nos edifícios, Wu *et al.* [152] preconizaram os materiais de controlo de umidade por mudança de fase (PCHCM – *Phase Change Humidity Control Material*). Um estudo demonstrou que os PCHCM conseguem regular a temperatura e umidade interior, com resultados de até 18% de energia latente economizada [153].

Alguns materiais sintéticos apresentam taxas altas de adsorção e têm sido também considerados como materiais auxiliares à regularização de ambientes interiores [154]. Os materiais dessecantes, como a sílica-gel, são substâncias químicas que conseguem adsorver e desadsorver vapor de água consoante a pressão do vapor entre o material e o ambiente envolvente [155]. Enquanto a pressão do vapor à superfície do material for inferior à do ambiente, a umidade é transferida do ar para o material dessecante. Posteriormente, quando o material entra na saturação e alcança o equilíbrio com o ambiente envolvente, a transferência de umidade é interrompida. Após esta interrupção, de forma a se inverter o sentido de transferência de umidade, o material exige um fenómeno de regeneração. Esta regeneração pode ser realizada através de vários processos, como pelo aumento de temperatura ou por transformação química ou física. [156] Além dos materiais sintéticos, também alguns sais inorgânicos podem ser utilizados como materiais higroscópicos, tais como o cloreto de lítio (LiCl), o cloreto de sódio (CaCl), o cloreto de amónio (NH<sub>4</sub>Cl), o nitrato de sódio (NaNO<sub>3</sub>) e o nitrato de chumbo (Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), entre outros [157].

Nos últimos tempos, materiais como as redes metalo-orgânicas (MOF – *Metal-Organic Frameworks*), têm apresentado resultados promissores no controlo da umidade relativa devido às suas propriedades únicas, tanto físicas como químicas, sendo considerados compostos híbridos orgânicos-inorgânicos (vd. Figura 6.4) [158]. Estes materiais representam uma classe de sólidos cristalinos, de estrutura maioritariamente micro ou mesoporosa, e apresentam alguns atributos como forte ligação química, elevada porosidade e área superficial e estrutura bem definida [159]. Vários estudos têm demonstrado o desempenho da utilização de MOFs na regularização da umidade relativa de ambientes interiores em edifícios [160], [161], [162], [163].



*Figura 6.4 - Esquema de princípio de uma estrutura MOF (adaptado de [164]).*

Concluindo, é notório o avanço na investigação do desempenho dos materiais para amenizar a humidade. Estudos identificaram e testaram vários materiais, tais como revestimentos higroscópicos, materiais de mudança de fase, entre outros, que mostraram ser promissores na regularização da humidade interior e na melhoria do conforto. Também foi demonstrado que o comportamento destes materiais pode contribuir para a redução de consumo energético ao diminuir a necessidade de funcionamento de sistemas mecânicos para o mesmo efeito. Contudo, a poupança energética pode variar significativamente consoante o clima e arquitetura do edifício. Por último, a divulgação e sensibilização do tema continua a ser relativamente limitada fora do meio académico e da indústria especializada. Visto isso, a adoção de soluções construtivas no mundo da construção continua restringida da maioria da informação.



## 7. CONCLUSÃO

Desta revisão de literatura evidencia-se que apesar do interesse na compreensão da capacidade higroscópica dos materiais ter aumentado nos últimos anos, ainda não existe uma interpretação consensual na comunidade científica. Conforme já mencionado, as transferências de humidade entre o ar e um material dependem da capacidade higroscópica do material. No entanto, o desempenho do comportamento de adsorção e desadsorção de vapor de água é também influenciado por fatores como a taxa de renovações do ar, velocidade do ar, volume de produção de vapor de água, relação entre a área de superfície do material, volume do ar, etc. Por fim, é também fundamental ter em consideração a heterogeneidade de materiais num sistema, como o caso de uma amostra com mais de um material na sua constituição. [52] Dada a abundância de particularidades influentes e a complexidade do mecanismo de transferência de vapor de água entre os materiais e o ar, torna-se difícil e moroso o alcance do domínio e ponderação de todos os fatores para a caracterização da capacidade higroscópica do material.

Relativamente ao avanço na caracterização a partir de modelos empíricos, os trabalhos de investigação em laboratório foram realizados sob diferentes condições e disposições de ensaio, o que resulta na difícil comparação de resultados entre os diferentes métodos. Consequentemente, os dados obtidos para a caracterização da capacidade higroscópica de um material podem variar dependendo da configuração do ensaio e interpretações dos autores. Além disso, devido às limitações impostas pela dinâmica do comportamento higroscópico, a definição real dessa capacidade dificilmente é alcançada por ensaios laboratoriais.

A correlação dos ensaios realizados em laboratório com a escala real desenvolveu a caracterização higroscópica dos materiais, uma vez que possibilitou a adaptação do laboratório para o comportamento real dos materiais em edifícios. A partir dessa ligação, verificou-se, p.e., que o método passo-resposta, cujo princípio consiste em avaliar a variação da massa dos materiais quando sujeitos a flutuações de humidade relativa no formato de onda quadrada, não representa efetivamente a realidade. Como tal, sucedeu-se a necessidade de adotar outro perfil de variação mais próximo da dinâmica real, como a onda sinusoidal. No mesmo seguimento, alguns investigadores mencionaram a importância da velocidade do ar nos resultados do MBV. A utilização de um túnel de vento nas câmaras climáticas permitiu o controlo da velocidade e distribuição do ar. Contudo, a aplicação deste método demonstrou ser dispendiosa, pelo que se compreende a inviabilidade da sua replicação nos demais laboratórios.

Os ensaios à escala real também apresentaram algumas incertezas. A amenização da humidade relativa no interior de uma zona não se dá apenas pela capacidade dos materiais para adsorver e desadsorver vapor de água, mas também a partir de outros mecanismos originados pelas diferenças de pressão entre o clima interior e exterior, como as infiltrações de ar e o transporte de humidade pelas paredes exteriores, pelo que dificulta o estudo isolado do comportamento dos materiais e o respetivo impacto no ambiente interior.

Relativamente aos modelos teóricos, salienta-se a limitação na definição das propriedades físicas dos materiais, as quais são definidas em condições estáticas e de equilíbrio, o que não corresponde às condições dinâmicas reais.

Com o fim de resolver as ressalvas dos modelos empíricos e teóricos, assim como agilizar a compreensão de todos os agentes no processo, foram desenvolvidas ferramentas computacionais que permitiram simular as condições de ambiente existentes e, dessa forma, obter resultados mais próximos

da realidade. Resumidamente, vários métodos de modelo categorizados como empíricos, semi-empíricos e baseados nas leis da física têm sido utilizados para modelar o comportamento da umidade relativa nos edifícios. Contudo, cada método também apresenta compromissos relativos à precisão e eficiência, mas o contínuo desenvolvimento das ferramentas certamente levará ao aperfeiçoamento destes métodos.

## 7.1. Desenvolvimentos futuros

Além do progresso no domínio de todos os fatores influentes à capacidade higroscópica dos materiais para amenizar a umidade relativa, conforme já mencionado, salienta-se um assunto pouco abordado: o efeito da histerese, nomeadamente na diferença temporal e comportamental entre a fase de adsorção e de desadsorção num designado material. Uma investigação elaborada por Promis *et al.* [165] permitiu concluir que a histerese deve ser considerada na análise da higroscopicidade do material em condições de clima dinâmico, sendo que, para condições de equilíbrio, apresentou diferenças pouco significativas nos resultados. Visto isso, a consideração do efeito da histerese deverá ser um tema a aprofundar, de forma a melhor correlacionar a capacidade dos materiais com o comportamento efetivo do clima dinâmico real.

No teor desta dissertação, todas as soluções e tecnologias de inovação referidas conseguiram melhorar a qualidade do ar e conforto dos ocupantes das habitações, contudo o impacto na saúde e bem-estar dos mesmos não foi esclarecido. Visto isso, considera-se necessário o aprofundamento do tema de forma a desenvolver orientações para as utilizações das respetivas soluções inovadoras de forma segura.

Por fim, na plenitude do conceito da inércia higroscópica, é necessário atender tanto às propriedades dos materiais como às características do edifício. Dada a dificuldade no atendimento à simultaneidade de todos os fatores influentes, ainda não se encontrou um método interpretativo aceite por toda a comunidade científica. Por esse motivo, é necessário desenvolver um procedimento consensual que englobe todos os principais fatores para avaliar o verdadeiro impacto dos materiais na regularização da umidade relativa num edifício e, dessa forma, estimular o desenvolvimento e melhoria de novos materiais higroscópicos, assim como promover o seu uso na construção para melhorar o conforto higrotérmico e reduzir consumos energéticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Cerolini, M. D’Orazio, C. Di Perna, and A. Stazi, “Moisture buffering capacity of highly absorbing materials,” *Energy Build*, vol. 41, no. 2, pp. 164–168, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.08.006.
- [2] C. Craven and R. Garber-Slaght, “Exterior insulation envelope retrofits in cold climates: Implications for moisture control,” in *HVAC and R Research*, Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc., May 2014, pp. 384–394. doi: 10.1080/10789669.2014.887028.
- [3] F. M. A. Henriques, *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. UNL - Faculdade de Ciências e Tecnologias, 2016.  
URL: [http://livraria.lnec.pt/php/livro\\_ficha.php?cod\\_produc\\_tirag=5374365](http://livraria.lnec.pt/php/livro_ficha.php?cod_produc_tirag=5374365)
- [4] L. Fang, G. Clausen, and P. O. Fanger, “Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality,” *Indoor Air*, vol. 8, pp. 80–90, 1998.
- [5] J. Toftum, A. S. Jørgensen, and P. O. Fanger, “Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin,” 1998.
- [6] J. Toftum, A. S. Jørgensen, and P. O. Fanger, “Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort,” 1998.
- [7] S. B. Sadineni, S. Madala, and R. F. Boehm, “Passive building energy savings: A review of building envelope components,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8. Elsevier Ltd, pp. 3617–3631, 2011. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.014.
- [8] L. F. Cabeza and M. Chàfer, “Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: A systematic review,” *Energy Build*, vol. 219, pp. 0–09, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110.
- [9] R. E. Diasty, P. Fazio, and I. Budaiwi, “Modelling of indoor air humidity: the dynamic behaviour within an enclosure,” 1992.
- [10] C.-E. Hagentoft, “Introduction to building physics,” *Bauphysik*, vol. 23, Mar. 2001.
- [11] C. Rode and K. Grau, “Moisture buffering and its consequence in whole building hygrothermal modeling,” in *Journal of Building Physics*, Apr. 2008, pp. 333–360. doi: 10.1177/1744259108088960.
- [12] M. Zhang, M. Qin, C. Rode, and Z. Chen, “Moisture buffering phenomenon and its impact on building energy consumption,” *Appl Therm Eng*, vol. 124, pp. 337–345, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.173.
- [13] DIN. German National Standard, “DIN 4108-3 Thermal protection and energy economy in buildings - Part 3: Protection against moisture subject to climate conditions - Requirements, calculation methods and directions for planning and construction,” 2018
- [14] ISO. International Standard, “ISO 13788:2012 Hygrothermal performance of building components and building elements — Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation — Calculation methods,” 2012

- [15] “Hands Down Software.” HVAC SOFT, INC, 2022. Accessed: Apr. 19, 2023. [Online]. Available: <http://www.handsdownsoftware.com>
- [16] Rocha D, “Análise das potencialidades de utilização da inércia higroscópica em edifícios,” *Dissertação para a obtenção de Grau Mestre em Engenharia Civil na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa*, 2016.
- [17] ISO. International Standard, “ISO 9346:2007 Hygrothermal permance of buildings and building materials — Physical quantities for mass transfer — Vocabulary,” 2007
- [18] K. K. Hansen, “Sorption isotherms: A catalogue,” Lyngby, 1986.
- [19] S. Brunauer, P. H. Emmett, and E. Teller, “Adsorption of Gases in Multimolecular Layers,” *J Am Chem Soc*, vol. 60, no. 2, pp. 309–319, Feb. 1938, doi: 10.1021/ja01269a023.
- [20] P. Slanina, “Moisture transport in compact flat roofs,” Czech Technical University - Faculty of Civil Engineering, Praga, 2009.
- [21] J. Correia, “Avaliação da higroscopicidade de materiais correntes,” *Dissertação para a obtenção de Grau Mestre em Engenharia Civil na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa*, 2013.
- [22] M. Krus, “Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. Theoretical Principles and New Test Methods.,” Fraunhofer IRB Velag, Estugarda, 1996.
- [23] N. M. M. Ramos, “A importância da inércia higroscópica no comportamento higrotérmico dos edifícios,” 2007.
- [24] D. Derome, H. Derluyn, W. Zillig, and J. Carmeliet, “Model for hysteretic moisture behaviour of wood,” 2008.
- [25] G. Carpentier, “Comportement a l’humidite des elements de construction. Application aux toitures,” *Revue du centre scientifique et technique de la construction*, no. 1, pp. 1–50, 1982.
- [26] V. P. De Freitas, V. Abrantes, and P. Crausse, “Moisture migration in building walls—Analysis of the interface phenomena,” *Build Environ*, vol. 31, no. 2, pp. 99–108, Mar. 1996, doi: 10.1016/0360-1323(95)00027-5.
- [27] ASHRAE. American National Standard, “ASHRAE 55 Thermal environmental conditions for human occupancy,” 2020
- [28] A. Ranesi, M. Posani, M. Veiga, and P. Faria, “A study on hygrothermal conditions in intermittently heated or unheated bedrooms in southern europe,” Coimbra, Oct. 2021.
- [29] K. Svennberg, *Moisture buffering in the indoor environment*. Building Physics, LTH, Lund University, 2006.
- [30] A. V Arundel, E. M. Sterling, J. H. Biggin, and T. D. Sterling, “Indirect health effects of relative humidity in indoor environments.,” *Environ Health Perspect*, vol. 65, pp. 351–361, Mar. 1986, doi: 10.1289/ehp.8665351.
- [31] P. K. Nag, “Sick Building Syndrome and Other Building-Related Illnesses,” 2019, pp. 53–103. doi: 10.1007/978-981-13-2577-9\_3.

- [32] L. M. Reinikainen and J. J. K. Jaakkola, “Significance of humidity and temperature on skin and upper airway symptoms,” *Indoor Air*, vol. 13, no. 4, pp. 344–352, Dec. 2003, doi: 10.1111/j.1600-0668.2003.00155.x.
- [33] I. Andersen and J. Korsgaard, “Asthma and the indoor environment: Assessment of the health implications of high indoor air humidity,” *Environ Int*, vol. 12, no. 1–4, pp. 121–127, Jan. 1986, doi: 10.1016/0160-4120(86)90022-X.
- [34] H. Viitanen *et al.*, “Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures,” *J Build Phys*, vol. 33, no. 3, pp. 201–224, Jan. 2010, doi: 10.1177/1744259109343511.
- [35] P. Wolkoff, “Indoor air humidity, air quality, and health – An overview,” *Int J Hyg Environ Health*, vol. 221, no. 3, pp. 376–390, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.ijheh.2018.01.015.
- [36] B. Salah, A. Dinh Xuan, J. Fouilladieu, A. Lockhart, and J. Regnard, “Nasal mucociliary transport in healthy subjects is slower when breathing dry air,” *European Respiratory Journal*, vol. 1, no. 9, pp. 852–855, Oct. 1988, doi: 10.1183/09031936.93.01090852.
- [37] M. Egawa, M. Oguri, T. Kuwahara, and M. Takahashi, “Effect of exposure of human skin to a dry environment,” *Skin Research and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 212–218, Nov. 2002, doi: 10.1034/j.1600-0846.2002.00351.x.
- [38] R. E. Davis, E. Dougherty, C. McArthur, Q. S. Huang, and M. G. Baker, “Cold, dry air is associated with influenza and pneumonia mortality in Auckland, New Zealand,” *Influenza Other Respir Viruses*, vol. 10, no. 4, pp. 310–313, Jul. 2016, doi: 10.1111/irv.12369.
- [39] ISO. International Standard, “ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria,” 2005
- [40] J. F. Nicol and M. A. Humphreys, “Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings,” *Energy Build*, vol. 34, no. 6, pp. 563–572, 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00006-3.
- [41] H. Künzle, “Die ‘klimaregelnde Wirkung’ von Innenputzen,” *Gesund Ing*, vol. 81, no. 7, pp. 196–201, 1960.
- [42] DIN. German National Standard, “DIN 18947 Earth plasters—Terms and definitions, requirements, test methods,” 2013
- [43] R. Fauconnier, M. H. Martinon, and P. Dalicieux, “Modélisation des échanges d’humidité avec les parois et le mobilier d’une pièce d’habitation (approche de validation expérimentale),” *Moret-sur-Loing, EDF*, 1989.
- [44] P. Dalicieux, H. Boia, and E. Bonnet, “L’humidité relative a l’intérieur d’un logement,” *Moret-sur-Loing, EDF*, 1989.
- [45] T. Duforestel, “Etude sur la modélisation de l’inertie hygroscopique des locaux,” *Moret-sur-Loing, CSTB-EDF*, 1994.
- [46] T. Padfield, “The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity,” *Department of Structural Engineering and Materials, Lyngby, Technical University of Denmark*, vol. 150, 1998.
- [47] B. K. Kreiger and W. V. Srubar, “Moisture buffering in buildings: A review of experimental and numerical methods,” *Energy Build*, vol. 202, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109394.

- [48] H. Künzel, “Die Feuchtigkeitsabsorption von Innenoberflächen und Inneneinrichtungen,” *Berichte aus der Bauforschung*, pp. 101–116, 1965.
- [49] JIS. Japanese Industrial Standard, “JIS A 1470-1 Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity-Part 1: Response method of humidity,” 2002
- [50] ISO. International Standard, “ISO 24353:2008 Hygrothermal performance of building materials and products-Determination of moisture adsorption/desorption properties in response to humidity variation,” 2008.
- [51] C. Rode and R. Peuhkuri, “The concept of moisture buffer value of building materials and its application in building design,” *HB 2006 - Healthy Buildings: Creating a Healthy Indoor Environment for People, Proceedings*, vol. 3, pp. 57–62, Feb. 2006.
- [52] C. Rode *et al.*, “Moisture Buffer Value of Building Materials,” *J ASTM Int*, vol. 4, Feb. 2007, doi: 10.1520/JAI100369.
- [53] V. Cascione, D. Maskell, A. Shea, and P. Walker, “The moisture buffering performance of plasters when exposed to simultaneous sinusoidal temperature and RH variations,” *Journal of Building Engineering*, vol. 34, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.job.2020.101890.
- [54] H. Janssen and S. Roels, “Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures,” *Energy Build*, vol. 41, no. 4, pp. 382–394, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.11.007.
- [55] Belgian Building Research Institute, “Moisture problems in roofs—impact of the actual boundary conditions and construction types in Belgium (in Dutch), Final Report CC CIF–966,” 2004.
- [56] Y. Wu, G. Gong, C. W. Yu, and Z. Huang, “Proposing ultimate moisture buffering value (UMBV) for characterization of composite porous mortars,” *Constr Build Mater*, vol. 82, pp. 81–88, May 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.058.
- [57] I. Gómez, S. Guths, R. Souza, J. A. Millan, K. Martín, and J. M. Sala, “Moisture buffering performance of a new pozzolanic ceramic material: Influence of the film layer resistance,” *Energy Build*, vol. 43, no. 4, pp. 873–878, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.12.007.
- [58] A. Ranesi, M. R. Veiga, and P. Faria, “Laboratory characterization of relative humidity dependent properties for plasters: A systematic review,” *Constr Build Mater*, vol. 304, p. 124595, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124595.
- [59] T. Kalamees, M. Korpi, J. Vinha, and J. Kurnitski, “The effects of ventilation systems and building fabric on the stability of indoor temperature and humidity in Finnish detached houses,” *Build Environ*, vol. 44, no. 8, pp. 1643–1650, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.10.010.
- [60] A. Sagae, H. Wami, Y. Arai, H. Kasai, T. Sato, and H. Matumoto, “Study on a New Humidity Controlling Material Using Zeolite for Building,” 1994, pp. 251–260. doi: 10.1016/S0167-2991(08)63264-4.
- [61] Y. Li, P. Fazio, and J. Rao, “An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room,” *Build Environ*, vol. 47, pp. 205–216, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.021.

- [62] S. Hameury, “Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study,” *Build Environ*, vol. 40, no. 10, pp. 1400–1412, Oct. 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.10.017.
- [63] E. Vereecken, S. Roels, and H. Janssen, “In situ determination of the moisture buffer potential of room enclosures,” *J Build Phys*, vol. 34, no. 3, pp. 223–246, Jan. 2011, doi: 10.1177/1744259109358268.
- [64] J. Woods, J. Winkler, D. Christensen, and E. Hancock, “Using Whole-House Field Tests to Empirically Derive Moisture Buffering Model Inputs,” Golden, CO (United States), Aug. 2014. doi: 10.2172/1155109.
- [65] N. Reuge *et al.*, “Hygrothermal effects and moisture kinetics in a bio-based multi-layered wall: Experimental and numerical studies,” *Constr Build Mater*, vol. 240, p. 117928, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117928.
- [66] V. Cascione, “Understanding moisture buffering effects in the indoor environment,” 2021. doi: 10.13140/RG.2.2.27490.45762.
- [67] F. McGregor, A. Heath, A. Shea, and M. Lawrence, “The moisture buffering capacity of unfired clay masonry,” *Build Environ*, vol. 82, pp. 599–607, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.09.027.
- [68] V. Cascione, E. Cavone, D. Maskell, A. Shea, and P. Walker, “The effect of air velocity on moisture buffering,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 282, p. 02007, Sep. 2019, doi: 10.1051/mateconf/201928202007.
- [69] D. Allinson and M. Hall, “Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK,” *Energy Build*, vol. 42, no. 6, pp. 845–852, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.12.005.
- [70] T. Kalamees, M. Korpi, J. Vinha, and J. Kurnitski, “The effects of ventilation systems and building fabric on the stability of indoor temperature and humidity in Finnish detached houses,” *Build Environ*, vol. 44, no. 8, pp. 1643–1650, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.10.010.
- [71] V. Cascione, D. Maskell, A. Shea, P. Walker, and M. Mani, “Comparison of moisture buffering properties of plasters in full scale simulations and laboratory testing,” *Constr Build Mater*, vol. 252, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119033.
- [72] J. L. Nguyen, J. Schwartz, and D. W. Dockery, “The relationship between indoor and outdoor temperature, apparent temperature, relative humidity, and absolute humidity,” *Indoor Air*, vol. 24, no. 1, pp. 103–112, Feb. 2014, doi: 10.1111/ina.12052.
- [73] J. Pan *et al.*, “Correlating indoor and outdoor temperature and humidity in a sample of buildings in tropical climates,” *Indoor Air*, vol. 31, no. 6, pp. 2281–2295, Nov. 2021, doi: 10.1111/ina.12876.
- [74] K. Svennberg, L. G. Hedegaard, and C. Rode, “Moisture Buffer Performance of a Fully Furnished Room,” *Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings IX*, 2004.
- [75] H. Zhang, H. Yoshino, and K. Hasegawa, “Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method,” *Build Environ*, vol. 48, no. 1, pp. 27–34, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.08.012.

- [76] N. M. M. Ramos and V. P. de Freitas, “Hygroscopic inertia as a function of transient behavior of covering materials,” in *Performance of exterior envelopes of whole buildings, IX International Conference*, Clearwater, USA, 2004.
- [77] N. M. M. Ramos, V. P. de Freitas, and J. P. Q. Delgado, “Hygroscopic inertia of a room. Evaluation of finishing materials contribution.,” Montreal, 2005.
- [78] R. Peuhkuri and C. Rode, “Moisture buffer value: Analytical determination and use of dynamic measurements,” *IEA, ECBCS Annex*, vol. 41, 2005.
- [79] S. Roels and H. Janssen, “Is the moisture buffer value a reliable material property to characterise the hygric buffering capacities of building materials?,” Sep. 2005.
- [80] K. Zu, M. Qin, C. Rode, and M. Libralato, “Development of a moisture buffer value model (MBM) for indoor moisture prediction,” *Appl Therm Eng*, vol. 171, May 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115096.
- [81] J. Arfvidsson, “A new algorithm to calculate the isothermal moisture penetration for periodically varying relative humidity at the boundary,” *Nordic Journal of Building Physics*, vol. 2, 1999.
- [82] S. Roels and H. Janssen, “A comparison of the Nordtest and Japanese test methods for the moisture buffering performance of building materials,” *J Build Phys*, vol. 30, no. 2, pp. 137–161, Oct. 2006, doi: 10.1177/1744259106068101.
- [83] D. Maskell, A. Thomson, P. Walker, and M. Lemke, “Determination of optimal plaster thickness for moisture buffering of indoor air,” *Build Environ*, vol. 130, pp. 143–150, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.045.
- [84] M. Rahim, O. Douzane, A. D. Tran Le, G. Promis, and T. Langlet, “Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 102, pp. 679–687, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021.
- [85] D. Kaczorek, “Moisture Buffering of Multilayer Internal Wall Assemblies at the Micro Scale: Experimental Study and Numerical Modelling,” *Applied Sciences*, vol. 9, no. 16, p. 3438, Aug. 2019, doi: 10.3390/app9163438.
- [86] H. Wan, Z. Sun, G. Huang, X. Xu, and J. Yu, “Calculation of the maximum moisture buffering thickness of building wall layer of hygroscopic material,” *Build Environ*, vol. 160, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106173.
- [87] H. Wan, G. Huang, S. Liu, S. Fan, X. Xu, and J. Yu, “Optimal moisture buffering thickness of the hygroscopic material layer: Modeling and derivation,” *Build Environ*, vol. 205, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108257.
- [88] O. F. Osanyintola, P. Talukdar, and C. J. Simonson, “Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact,” *Energy Build*, vol. 38, no. 10, pp. 1270–1282, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.03.026.
- [89] X. Yang, P. Fazio, H. Ge, and J. Rao, “Evaluation of moisture buffering capacity of interior surface materials and furniture in a full-scale experimental investigation,” *Build Environ*, vol. 47, no. 1, pp. 188–196, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.025.
- [90] H. Ge, X. Yang, P. Fazio, and J. Rao, “Influence of moisture load profiles on moisture buffering potential and moisture residuals of three groups of hygroscopic materials,” *Build Environ*, vol. 81, pp. 162–171, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.06.021.

- [91] V. Cascione, D. Maskell, A. Shea, and P. Walker, “A review of moisture buffering capacity: From laboratory testing to full-scale measurement,” *Construction and Building Materials*, vol. 200. Elsevier Ltd, pp. 333–343, Mar. 10, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.094.
- [92] V. Cascione, D. Maskell, A. Shea, and P. Walker, “Full-Scale Simulation of Indoor Humidity and Moisture Buffering Properties of Clay,” 2019, pp. 395–406. doi: 10.1007/978-981-13-5883-8\_34.
- [93] V. Stehno, “Praktische Berechnung der instationären Luftzustandsänderungen in Aufenthaltsräumen zur Beurteilung der Feuchtigkeitsbelastung der raumbegrenzenden,” *Bauteile, Bauphysik*, vol. 4, pp. 128–134, 1982.
- [94] J. Woods, J. Winkler, and D. Christensen, “Evaluation of the Effective Moisture Penetration Depth Model for Estimating Moisture Buffering in Buildings,” Golden, CO (United States), Jan. 2013. doi: 10.2172/1067948.
- [95] J. Woods, J. Winkler, and D. Christensen, “Moisture Modeling: Effective Moisture Penetration Depth Versus Effective Capacitance,” United States: Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 2016. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/1502341>
- [96] M. J. Cunningham, “Effective penetration depth and effective resistance in moisture transfer,” *Build Environ*, vol. 27, no. 3, pp. 379–386, Jul. 1992, doi: 10.1016/0360-1323(92)90037-P.
- [97] J. Woods and J. Winkler, “Field measurement of moisture-buffering model inputs for residential buildings,” *Energy Build*, vol. 117, pp. 91–98, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.02.008.
- [98] J. Woods and J. Winkler, “Effective moisture penetration depth model for residential buildings: Sensitivity analysis and guidance on model inputs,” *Energy Build*, vol. 165, pp. 216–232, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.040.
- [99] Y. Cui, Y. Zhang, and H. Janssen, “EMPD-based moisture buffering quantification with moisture-dependent properties (I): Modelling and simulations,” *Build Environ*, vol. 205, p. 108266, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2021.108266.
- [100] M. O. Abadie and K. C. Mendonça, “Moisture performance of building materials: From material characterization to building simulation using the Moisture Buffer Value concept,” *Build Environ*, vol. 44, no. 2, pp. 388–401, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.03.015.
- [101] H. J. Steeman, A. Janssens, J. Carmeliet, and M. De Paepe, “Modelling indoor air and hygrothermal wall interaction in building simulation: Comparison between CFD and a well-mixed zonal model,” *Build Environ*, vol. 44, no. 3, pp. 572–583, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.05.002.
- [102] H. Zhang, C. Shi, D. Pan, Y. Xuan, and X. He, “Optimization of effective moisture penetration depth model considering airflow velocity for gypsum-based materials,” *Journal of Building Engineering*, vol. 32, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jobee.2020.101539.
- [103] H. M. Künzeli, *Simultaneous heat and moisture transport in building components : one- and two-dimensional calculation using simple parameters*. IRB Verlag, 1995.
- [104] P. Plathner and M. Woloszyn, “Interzonal air and moisture transport in a test house: experiment and modelling,” *Build Environ*, vol. 37, no. 2, pp. 189–199, Feb. 2002, doi: 10.1016/S0360-1323(00)00096-2.
- [105] Fraunhofer IBP, “WUFI® Pro 6,” *Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes*. 2019.

- [106] S. Hameury, “Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study,” *Build Environ*, vol. 40, no. 10, pp. 1400–1412, Oct. 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.10.017.
- [107] H. M. Künzle, “Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters,” *Fraunhofer IBP*, Jan. 1995.
- [108] Y. Choi, W. Cho, A. Ozaki, and H. Lee, “Influence of the moisture driving force of moisture adsorption and desorption on indoor hygrothermal environment and building thermal load,” *Energy Build*, vol. 253, p. 111501, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2021.111501.
- [109] J. M. P. Q. Delgado, E. Barreira, N. M. M. Ramos, and V. P. de Freitas, *Hygrothermal Numerical Simulation Tools Applied to Building Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-35003-0.
- [110] H. Fechner, U. Ruisinger, A. Nicolai, and J. Grunewald, “DELPHIN® 6.” Dec. 2022.
- [111] B. Hejazi, N. R. M. Sakiyama, J. Frick, and H. Garrecht, “Hygrothermal simulations comparative study: Assessment of different materials using WUFI and DELPHIN software,” in *Building Simulation Conference Proceedings*, International Building Performance Simulation Association, 2019, pp. 4674–4681. doi: 10.26868/25222708.2019.211033.
- [112] C. E. Hagetoft, “HAMSTAD—Final report: Methodology of HAM-modeling, Report R-02: 8,” *Gothenburg, Department of Building Physics, Chalmers University of Technology*, 2002.
- [113] J. Straube and E. F. P. Burnett, “Overview of hygrothermal (HAM) analysis methods,” *ASTM Moisture Control Manual*, pp. 81–89, Feb. 2001.
- [114] M. Woloszyn and C. Rode, “Tools for Performance Simulation of Heat, Air and Moisture Conditions of Whole Buildings,” *Build Simul*, vol. 1, pp. 5–24, Feb. 2008, doi: 10.1007/s12273-008-8106-z.
- [115] M. A. Hamdaoui, M. H. Benzaama, Y. El Mendili, and D. Chateigner, “A review on physical and data-driven modeling of buildings hygrothermal behavior: Models, approaches and simulation tools,” *Energy and Buildings*, vol. 251. Elsevier Ltd, Nov. 15, 2021. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111343.
- [116] J. M. P. Q. Delgado, N. M. M. Ramos, E. Barreira, and V. P. de Freitas, “A critical review of hygrothermal models used in porous building materials,” *J Porous Media*, vol. 13, no. 3, pp. 221–234, 2010, doi: 10.1615/JPorMedia.v13.i3.30.
- [117] Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics, “1D-HAM.” Oct. 2000. Accessed: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: [www.blocon.com](http://www.blocon.com)
- [118] Danish Building Research Institute, “Bsim.” 2020. Accessed: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: [https://build.dk/bsim/Pages/BSim\\_Building\\_Simulation.aspx](https://build.dk/bsim/Pages/BSim_Building_Simulation.aspx)
- [119] COMSOL, “COMSOL Multiphysics.” COMSOL, Stockholm, Sweden, Nov. 2022. Accessed: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/release/6.1>
- [120] U.S. Department of Energy, “EnergyPlus.” U.S. Department of Energy, Sep. 30, 2022. Accessed: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <https://energyplus.net/>
- [121] Physibel, “GLASTA.” 2022. Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.physibel.be/en/products/glasta>

- [122] S. Cornick, W. Maref, K. Abdulghani, and D. van Reenen, “1-D hygIRC: a simulation tool for modeling heat, air and moisture movement in exterior walls,” 2003.
- [123] A. S. Kalagasidis, “HAM-Tools - An Integrated Simulation Tool for Heat, Air and Moisture Transfer Analyses in Building Physics,” 2004.
- [124] EQUA Simulation AB, “IDA-ICE.” 2020. Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.equa.se/en/ida-ice>
- [125] LBNL and Ayres Sowell Associates, “SPARK.” 2003. Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: <https://gundog.lbl.gov/VS/spark.html>
- [126] TRNSYS, “TRNSYS.” University of Wisconsin-Madison, 2019. Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.trnsys.com>
- [127] M. Van Belleghem, M. Steeman, H. Janssen, A. Janssens, and M. De Paepe, “Validation of a coupled heat, vapour and liquid moisture transport model for porous materials implemented in CFD,” *Build Environ*, vol. 81, pp. 340–353, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.06.024.
- [128] S. Dubois, F. McGregor, A. Evrard, A. Heath, and F. Lebeau, “An inverse modelling approach to estimate the hygric parameters of clay-based masonry during a Moisture Buffer Value test,” *Build Environ*, vol. 81, pp. 192–203, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.06.018.
- [129] A. Tijssens, S. Roels, and H. Janssen, “Neural networks for metamodelling the hygrothermal behaviour of building components,” *Build Environ*, vol. 162, p. 106282, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106282.
- [130] C.-E. Hagentoft *et al.*, “Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases,” *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 27, no. 4, pp. 327–352, Apr. 2004, doi: 10.1177/1097196304042436.
- [131] H. Hens, “IEA-ECBCS Annex 41: Whole Building Heat, Air and Moisture Response (LO-09-007),” in *ASHRAE Transactions*, Feb. 2009.
- [132] C. Rode and M. Woloszyn, “Common exercises in whole building HAM modelling,” Feb. 2009.
- [133] R. Judkoff and J. Neymark, “International Energy Agency building energy simulation test (BESTEST) and diagnostic method,” Golden, CO (United States), Feb. 1995. doi: 10.2172/90674.
- [134] J. Zemitis and A. Borodinecs, “Determination of Moisture Buffering Capabilities of Common Furniture Materials,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2019. doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012090.
- [135] N. M. M. Ramos and V. P. de Freitas, “The Evaluation of Hygroscopic Inertia and Its Importance to the Hygrothermal Performance of Buildings,” 2012, pp. 25–45. doi: 10.1007/978-3-642-21966-5\_2.
- [136] H. M. Künzeli, A. Holm, K. Sedlbauer, F. Antretter, and M. Ellinger, “Moisture buffering effects of interior linings made from wood or wood based products. IBP Report HTB-04/2004/e.” 2004.
- [137] Y. Li, P. Fazio, and J. Rao, “An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room,” *Build Environ*, vol. 47, pp. 205–216, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.021.

- [138] K. R. Skulberg, A. Q. Nyrud, and K. Nore, “Hygroscopic buffering effects in exposed cross-laminated timber surfaces and indoor climate in a Norwegian primary school,” *Wood Mater Sci Eng*, vol. 17, no. 1, pp. 43–52, Jan. 2022, doi: 10.1080/17480272.2021.2019830.
- [139] S. Hameury, “Influence of coating system on the moisture buffering capacity of panels of *Pinus sylvestris* L.,” *Wood Mater Sci Eng*, vol. 2, no. 3–4, pp. 97–105, Sep. 2007, doi: 10.1080/17480270801906167.
- [140] W. F. Smith, *Principles of Materials Science and Engineering*, 2nd Edt., McGraw-Hill International, 1990.
- [141] X. Lü, T. Lu, C. Kibert, Q. Zhang, and M. Hughes, “A novel methodology and new concept of structural dynamic moisture buffering for modeling building moisture dynamics,” *Build Environ*, vol. 180, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106958.
- [142] J. Lima, P. Faria, and A. Santos Silva, “Earthen Plasters Based on Illitic Soils from Barrocal Region of Algarve: Contributions for Building Performance and Sustainability,” *Key Eng Mater*, vol. 678, pp. 64–77, Feb. 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.678.64.
- [143] N. M. M. Ramos, J. M. P. Q. Delgado, and V. P. De Freitas, “Influence of finishing coatings on hygroscopic moisture buffering in building elements,” *Constr Build Mater*, vol. 24, no. 12, pp. 2590–2597, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.05.017.
- [144] G. R. S. Naylor, “Measurement of the dynamic moisture buffering potential of fabrics,” *Textile Research Journal*, vol. 89, no. 5, pp. 739–747, Mar. 2019, doi: 10.1177/0040517518755784.
- [145] K. Ghali, O. Katanani, and M. Al-Hindi, “Modeling the effect of hygroscopic curtains on relative humidity for spaces air conditioned by DX split air conditioning system,” *Energy Build*, vol. 43, no. 9, pp. 2093–2100, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.04.017.
- [146] K. F. Ghali, S. O. Salloum, and N. K. Ghaddar, “Moisture Buffering Capacity of Hygroscopic Curtains: Theoretical and Experimental Study,” in *13th International Energy Conversion Engineering Conference*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Jul. 2015. doi: 10.2514/6.2015-3817.
- [147] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen, “Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review,” *Energy Build*, vol. 42, no. 9, pp. 1361–1368, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.03.026.
- [148] H. Nazir *et al.*, “Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 129, pp. 491–523, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126.
- [149] Z. Chen, D. Su, M. Qin, and G. Fang, “Preparation and characteristics of composite phase change material (CPCM) with SiO<sub>2</sub> and diatomite as endothermal-hydroscopic material,” *Energy Build*, vol. 86, pp. 1–6, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.10.013.
- [150] Z. Chen and M. Qin, “Preparation and hygrothermal properties of composite phase change humidity control materials,” *Appl Therm Eng*, vol. 98, pp. 1150–1157, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.12.096.
- [151] Z. Chen, M. Qin, and J. Yang, “Synthesis and characteristics of hygroscopic phase change material: Composite microencapsulated phase change material (MPCM) and diatomite,” *Energy Build*, vol. 106, pp. 175–182, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.05.033.

- [152] Z. Wu, M. Qin, and Z. Chen, “Phase Change Humidity Control Material and its Application in Buildings,” *Procedia Eng*, vol. 205, pp. 1011–1018, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.162.
- [153] J. Liang, X. Zhang, and J. Ji, “Hygroscopic phase change composite material—A review,” *Journal of Energy Storage*, vol. 36. Elsevier Ltd, Apr. 01, 2021. doi: 10.1016/j.est.2021.102395.
- [154] X. Zhang, M. Qin, and K. Zu, “Recent progress on hygroscopic materials for indoor moisture buffering,” in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/2069/1/012003.
- [155] B. S. Davanagere, S. A. Sherif, and D. Y. Goswami, “A feasibility study of a solar desiccant air-conditioning system—Part II: Transient simulation and economics,” *Int J Energy Res*, vol. 23, no. 2, pp. 103–116, Feb. 1999, doi: 10.1002/(SICI)1099-114X(199902)23:2<103::AID-ER440>3.0.CO;2-I.
- [156] M. Shehadi, “Review of humidity control technologies in buildings,” *Journal of Building Engineering*, vol. 19, pp. 539–551, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jobbe.2018.06.009.
- [157] G. Ge, F. Xiao, and X. Niu, “Control strategies for a liquid desiccant air-conditioning system,” *Energy Build*, vol. 43, no. 6, pp. 1499–1507, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.02.011.
- [158] X. Zhang, M. Qin, and K. Zu, “Recent progress on hygroscopic materials for indoor moisture buffering,” *J Phys Conf Ser*, vol. 2069, no. 1, p. 012003, Nov. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2069/1/012003.
- [159] J. L. C. Rowsell and O. M. Yaghi, “Metal–organic frameworks: a new class of porous materials,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 73, no. 1–2, pp. 3–14, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.micromeso.2004.03.034.
- [160] J. Choi, L.-C. Lin, and J. C. Grossman, “Role of Structural Defects in the Water Adsorption Properties of MOF-801,” *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 122, no. 10, pp. 5545–5552, Mar. 2018, doi: 10.1021/acs.jpcc.8b00014.
- [161] J. A. Staschiak, “Solar Air Conditioning with Metal Organic Frameworks,” The Ohio State University, 2020.
- [162] A. Permyakova *et al.*, “Synthesis Optimization, Shaping, and Heat Reallocation Evaluation of the Hydrophilic Metal-Organic Framework MIL-160(Al),” *ChemSusChem*, vol. 10, no. 7, pp. 1419–1426, Apr. 2017, doi: 10.1002/cssc.201700164.
- [163] X. Feng, M. Qin, S. Cui, and C. Rode, “Metal-organic framework MIL-100(Fe) as a novel moisture buffer material for energy-efficient indoor humidity control,” *Build Environ*, vol. 145, pp. 234–242, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.09.027.
- [164] D. Y. Heo, H. H. Do, S. H. Ahn, and S. Y. Kim, “Metal-Organic Framework Materials for Perovskite Solar Cells,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 9, p. 2061, Sep. 2020, doi: 10.3390/polym12092061.
- [165] G. Promis, O. Douzane, A. D. Tran Le, and T. Langlet, “Moisture hysteresis influence on mass transfer through bio-based building materials in dynamic state,” *Energy Build*, vol. 166, pp. 450–459, May 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.067.







2023

GONÇALO BRAVO

MOISTURE BUFFERING OF BUILDINGS MATERIALS: REVISÃO DA LITERATURA