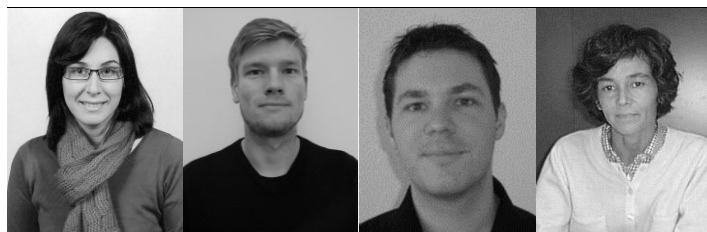


Contributo de betões de cânhamo na regulação passiva da humidade no interior dos edifícios

Tânia Simões⁽¹⁾, Fionn McGregor⁽²⁾, Antonin Fabbri⁽²⁾, Paulina Faria⁽³⁾



(1) *Dep. de Engenharia Civil da Universidade NOVA de Lisboa, Portugal, ts.simoes@campus.fct.unl.pt*

(2) *LGCB-LTDS, UMR 5513 CNRS, École Nationale de Travaux Publics de l'Etat, França, {fionnmcgregor, antonin.fabbri}@entpe.fr*

(3) *CERIS e Dep. de Engenharia Civil da Universidade NOVA de Lisboa, Portugal, paulina.faria@fct.unl.pt*

Resumo

Verifica-se um crescimento no interesse do uso de materiais de construção amigos do ambiente, tais como o betão de cânhamo, devido à necessidade de minimizar o impacto ambiental do sector da construção nas mudanças climáticas. O betão de cânhamo possui reduzida energia incorporada durante o processo de fabrico devido à sua composição: elevado teor de fibras de cânhamo, um ligante e água que formam uma pasta que aglutina as fibras. Este material de construção pode ser utilizado em elementos de alvenaria leves ou, geralmente, em placas de revestimento e isolamento. É muito higroscópico, podendo trazer vantagens a nível de economia energética, bem como da saúde e conforto térmico dos habitantes do espaço onde é aplicado.

Apresenta-se um estudo experimental que teve como objetivo comparar a higroscopicidade de três tipos de betões de cânhamo e a correspondente capacidade de contribuir para a regulação da humidade relativa (HR) no interior dos edifícios. Os betões diferem fundamentalmente no tipo de ligante utilizado nas suas formulações: cal aérea (PF70), cal hidráulica (Calco) e um ligante não identificado produzido pelo Grupo Parex (NL). Pretendeu-se ainda avaliar a contribuição da espessura de material nessa função de regulação passiva da HR.

Provetes com distintas espessuras dos três betões foram sujeitos ao ensaio de determinação do *Moiture Buffering Value* (MBV), com ciclos diários de variação de HR: 8h a 75% de HR e 16h a 33% de HR em condições isotérmicas (23°C).

Registou-se um bom MBV e não foi detetada uma diferença significativa na capacidade higroscópica dos diferentes betões, formulados com os distintos ligantes. A análise dos resultados, feita com o auxílio de modelos teóricos, permitiu destacar que a espessura envolvida na regulação da HR se mantém, na generalidade, limitada a 5cm em todas as formulações em estudo. Contudo, algumas irregularidades da superfície podem ter um forte impacto sobre a espessura ativa.

Palavras-chave: Betão de cânhamo; Humidade relativa; *Moisture Buffering Value*; Espessura de penetração

1. Introdução

De acordo com Dixit et al. (2010) o sector da construção é responsável por aproximadamente 40% das emissões globais de gases de efeitos de estufa. Nos últimos vinte anos, especialmente a Europa e os EUA (Melià et al. 2014) têm demonstrado um crescente interesse no uso de materiais de construção com baixa energia incorporada.

O betão de cânhamo, produzido com o recurso a fibras de cânhamo, um ligante e água, constitui material com baixa energia incorporada e com reduzida pegada ecológica, devido ao facto de ter reduzido processamento industrial e armazenamento de carbono (Dubois 2014; Sassoni et al. 2014). É geralmente usado na construção como material de enchimento de estruturas de madeira, como placas de revestimento pré-fabricadas e na forma de blocos de alvenaria (Evrard 2006; Collet et al. 2013). Devido à sua elevada capacidade higroscópica pode ser utilizado como um regulador passivo da HR, trazendo benefícios para os habitantes a nível de saúde e conforto, e ainda podendo contribuir para a redução do consumo energético do edifício (Melià et al. 2014; Lima & Faria 2016; Mcgregor 2014). Contudo, estes benefícios dependem do clima da região e condições interiores do edifício, uma vez que a exposição do material a HR alta durante um longo período de tempo poderá levar ao desenvolvimento de fungos.

Este estudo experimental assenta na avaliação do comportamento de três formulações distintas de betão de cânhamo. Estes materiais diferem, fundamentalmente, no tipo de ligante utilizado. Tem como objetivo a comparação das suas higroscopicidade e capacidade de regulação passiva da HR no interior dos edifícios. A caracterização baseia-se na determinação das curvas de adsorção, da permeabilidade ao vapor de água e do moisture buffering value (MBV).

2. Materiais e Métodos

2.1. Betões de cânhamo

As condições de produção e proporções utilizadas nas misturas das três formulações em estudo estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Proporções das formulações de betão de cânhamo, massa volúmica húmida, preparação dos provetes e condições de cura

Material	PF70	Calco	NL
Ligante	Ligante à base de cal aérea (Tradical 70)	Ligante à base de cal hidráulica	Formulação desenvolvida por Grupo Parex
Cânhamo/ Ligante (-)	0.33	0.33	0.42
Água/Ligante (-)	0.81	0.88	-
Massa volúmica a fresco (kg/m ³)	780	700	-
Produção	Apilado (no molde)	Apilado (no molde)	Por projeção (no molde)

Os ligantes utilizados em cada betão são os seguintes:

- Tradical 70 (PF70) - É um ligante pré formulado à base de cal aérea (75%), com ligante hidráulico (15%) e pozolanas (10%).
- Calco - É um ligante pré formulado cuja composição é cal hidráulica, cargas calcárias, adjuvantes hidrófugos e adjuvantes reológicos.
- NL - Relativamente a este ligante pouco é conhecido relativamente à sua composição; apenas que é uma formulação desenvolvida pelo Grupo Parex.

Quanto ao modo de preparação dos betões, Calco e PF70 seguiram o mesmo protocolo experimental. A primeira etapa consistiu na mistura do ligante com aproximadamente 90% da água durante 5mins. Seguidamente, a fibra de cânhamo e a restante água foram adicionados progressivamente à pasta formada pelo ligante, durante aproximadamente 10mins. O betão foi vazado para moldes cilíndricos (16cm de diâmetro e 32cm de altura) e apilado em cinco etapas até obter a massa volúmica húmida de $800 \pm 30 \text{kg/m}^3$.

O betão obtido com a formulação NL foi diretamente projetado a húmido nos moldes cilíndricos. Esta técnica consiste em três etapas. Após a mistura do ligante com água, injetam-se as fibras de cânhamo na pasta e então projeta-se o betão de cânhamo fresco utilizando um pulverizador. Todos os provetes foram curados a 50% de HR no respetivo molde. Exceto no que se refere à forma de colocação nos moldes (apilado ou por projeção), a preparação das três formulações é relativamente semelhante.

2.2. Propriedades em regime estacionário

2.2.1. Adsorção isotérmica

As curvas de adsorção isotérmica descrevem as características de armazenamento de moléculas de água no regime higroscópico. Para a determinação desta propriedade foi utilizado o método do exsecador, que usa soluções salinas de modo a criar determinadas condições higrométricas. A vantagem do uso deste método é o número de amostras que podem ser ensaiadas ao mesmo tempo; contudo a baixa precisão e o período de tempo de ensaio necessário são desvantagens.

O procedimento experimental utilizado foi o preconizado pela EN ISO 12571 (CEN 2013). Três amostras representativas de cada betão, com mais de 10g de massa, foram colocadas num recipiente de alumínio, de modo a não sofrerem perdas de material durante o processo (Figura 1). As amostras foram secas numa estufa a 50°C (temperatura inferior à que conduziria à degradação do cânhamo contido nas amostras).



Figura 1: Exemplo de amostras dos betões utilizadas no ensaio de adsorção isotérmica (a - Calco; b - PF70; c - NL)

As amostras foram expostas a seis níveis diferentes de HR (23, 43, 59, 75, 85 e 97%), em caixas herméticas com ambiente estabilizado com soluções salinas. Cada solução salina foi produzida com um tipo diferente de sal, que fornecia determinadas condições higrométricas (Quadro 2). Estas soluções salinas foram preparadas seguindo o Anexo B na EN ISO 12571 (CEN 2013). Devido às dimensões elevadas das caixas utilizadas foi necessária a instalação de sistemas de ventilação, de modo a homogeneizar as condições higrométricas do ar no seu interior. Estas foram acondicionadas numa sala climática a $23 \pm 2^\circ\text{C}$. A HR e a temperatura nas caixas foram monitorizadas por um sensor portátil (Rotronic HygroLog HL-NT). As amostras foram pesadas periodicamente (≈ 5 dias em 5 dias) utilizando uma balança com a precisão de 0.01g. Considerou-se atingido o teor de água de equilíbrio para cada nível de HR quando a mudança de massa entre três medições consecutivas foi menor que 0.1% da massa total. Todos os níveis de HR da curva de adsorção foram ensaiados ao

mesmo tempo. Em cada nível de HR foram necessárias no mínimo três amostras de cada betão para que aumentasse a precisão do ensaio.

Quadro 2: Sais utilizados para cada nível de HR pretendido

HR (%)	Substância
23	Potássio de acetato ($KC_2H_3O_2$)
43	Carbonato de potássio (K_2CO_3)
59	Brometo de sódio (NaBr)
75	Cloreto de sódio (NaCl)
85	Cloreto de potássio (KCl)
97	Sulfato de potássio (K_2SO_4)

O teor de água foi calculado utilizando a eq. 1, onde w é o teor de água (kg/m^3), ρ_0 é a massa volúmica seca (kg/m^3), m a massa (kg) e m_0 a massa seca (kg). Este cálculo foi realizado para todos os níveis de HR, possibilitando a construção da curva de adsorção experimental para todas as amostras em todas as condições de fronteira.

$$w = \rho_0 \frac{m - m_0}{m_0} [kg/m^3] \quad (1)$$

2.2.2. Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água é a propriedade que caracteriza a capacidade de dado material transportar vapor de água sob um gradiente de pressão quando o regime estacionário é alcançado (Rahim et al. 2015). Esta propriedade foi medida de acordo com a EN ISO 12572 (CEN 2001) utilizando o método da “cápsula húmida”.

As amostras de cada betão com 5cm de espessura e 16cm de diâmetro foram colocadas sobre uma cápsula (recipiente de plástico) que continha uma solução salina de cloreto de potássio, e seladas para que no interior se alcançasse 85% de HR. A preparação foi realizada segundo o procedimento utilizado por Mcgregor (2014). Foi aplicada uma pequena camada de silicone de modo a selar a amostra à cápsula e ainda foi colocada uma fita de alumínio, tornando o conjunto lateralmente estanque ao vapor. O uso da fita de alumínio é justificado pelas suas propriedades: completamente impermeável ao vapor de água e sem absorver quantidade significativa de humidade (Svennberg 2006).

As amostras na cápsula foram colocadas numa câmara climática que as manteve a um nível de HR de 50% e 23°C. Estas condições ambientes foram constantemente controladas pela câmara climática. As medições foram realizadas periodicamente, numa balança fora da câmara, até cada uma das amostras alcançar um decréscimo de massa constante.

2.3. Propriedades dinâmicas - Ensaio de MBV

O ensaio de MBV fornece a informação relativa às trocas dinâmicas entre o ar e a amostra, e ainda, caracteriza o contributo do material para o equilíbrio da HR em dado ambiente. Foi realizado seguindo o protocolo Nordtest (Rode et al. 2005).

Os provetes cilíndricos de betão anteriormente referidos foram cortados com diferentes espessuras (5, 10 e 15cm). Em cada amostra foi colocada fita de alumínio em todas as superfícies, exceto uma, para que apenas essa superfície estivesse diretamente sujeita às condições de ambiente. Essas condições foram de 23°C em ciclos de 16 horas a 33% de HR seguidas de 8h a 75% de HR. A massa das amostras foi medida às 0h, 1h, 3h, 5h, 7h, 8h, 9h e 24h, utilizando uma balança com precisão de 0.01g colocada fora da câmara climática.

Após a colocação das amostras na câmara climática foi necessário esperar até que estas estabilizassem nos ciclos de HR consecutivos, o que significa que a amplitude das pesagens não deveria ultrapassar os 5% em ciclos sucessivos. As condições ambientes (HR e temperatura) promovidas pela câmara climática foram automaticamente registadas.

Segundo o método Nordtest (Rode et al. 2007), o MBV quantifica a humidade absorvida (ou libertada) pelo material quando uma área deste está exposta a sucessivos ciclos diários a dois dados níveis de HR. O valor experimental ($MBV_{prático}$) é calculado de acordo com a eq. 2, onde Δm é a variação de massa (g), A é a área exposta (m^2) e ΔHR a amplitude entre humidades relativas (%).

$$MBV_{prático} = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta HR} [g/(m^2 \cdot \%HR)] \quad (2)$$

2.4. Relação entre as propriedades dinâmicas e estacionárias

O modelo teórico da capacidade *moisture buffer* do material, chamado de MBV_{ideal} , é baseado na analogia entre transferência de massa e de calor. A capacidade do material absorver e libertar humidade através da sua superfície, b_m , apesar de ser uma propriedade dinâmica poderá ser obtida através de propriedades em estado estacionário e em condições de equilíbrio (eq.3).

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \xi}{p_{v,sat}}} [kg/(m^2 \cdot Pa \cdot s^{1/2})] \quad (3)$$

Nesta equação δ_p ($kg/(m \cdot s \cdot Pa)$) é a permeabilidade ao vapor de água, ξ (kg/m^3) é a capacidade de retenção de humidade e $p_{v,sat}$ (Pa) é a pressão de saturação de vapor de água, a 23°C. Tanto a permeabilidade ao vapor de água como a capacidade de retenção de humidade são obtidas através dos resultados experimentais. A capacidade de retenção de humidade é obtida através da eq.4.

$$\xi = \rho_0 \left\langle \frac{du}{dHR} \right\rangle [kg/m^3] \quad (4)$$

Nesta equação ρ_0 é massa volúmica seca e $\left\langle \frac{du}{dHR} \right\rangle$ é o declive médio da curva de adsorção isotérmica, tendo em consideração o intervalo de HR em estudo. É um declive médio, porque a curva de adsorção não é linear e daí o declive poder mudar. O modelo teórico (MBV_{ideal}) desenvolvido por Rode et al. (2005) é simplificado para condições isotérmicas. Contudo, a temperatura influencia a capacidade de armazenamento de água no material que, por sua vez, afeta a HR. De acordo com Roels & Janssen (2006) e Peuhkuri (2003) a permeabilidade ao vapor de água varia de acordo com a HR. Então assumir que a permeabilidade ao vapor de água é constante é uma limitação deste modelo teórico. Contudo, é possível ser usado para uma estimativa aplicando a eq. 5, onde t_p é o tempo de um ciclo (24horas).

$$MBV_{ideal} \approx 0.00568 \cdot p_{v,sat} \cdot b_m \cdot \sqrt{t_p} [g/(m^2 \cdot \%HR)] \quad (5)$$

Outra informação que se pretende aferir está relacionada com a espessura de material que está ativa durante os ciclos diários de *moisture buffering*. Esta espessura é designada por profundidade de penetração de humidade e pode ser avaliada através de um modelo analítico assumindo algumas simplificações: o material pode ser considerado um meio semi-infinito unidimensional; a sua superfície é submetida a um ciclo diário sinusoidal de humidade entre 33% e 75% de HR; a relação entre o teor de água e a HR é linear (Rode et

al. 2005). Se for admitido 1% na variação do teor de água, a profundidade de penetração resulta na eq. 6.

$$d_{p,1\%} = 4.61 \sqrt{\frac{D_w t_p}{\pi}} \quad [m] \quad (6)$$

Contudo, alguns estudos detetaram que esta expressão não foi consistente com os resultados experimentais. Portanto, outra expressão foi proposta, baseada numa variação de $1/e \approx 37\%$, e que está em maior conformidade com os valores experimentais. Este valor, denominado por $d_{1/e}$ é obtido pela eq. 7 (Mcgregor 2014), sendo D_w obtida através da eq.8.

$$d_{1/e} = \sqrt{\frac{D_w t_p}{\pi}} \quad [m] \quad (7)$$

$$D_w = \frac{\delta_p p_{v,sat}}{\rho_0 \xi} \quad [m^2/s] \quad (8)$$

3. Resultados e discussão

3.1. Propriedades em regime estacionário

3.1.1. Adsorção isotérmica

O teor de água foi determinado utilizando a eq.1 quando a massa húmida das amostras alcançou o seu equilíbrio. Todos os betões em estudo demoraram, aproximadamente, dois meses para estabilizar em cada nível de HR, exceto a 97% de HR. Para esta HR as amostras estiveram um período de tempo ainda mais prolongado a estabilizar, o que levou ao desenvolvimento de fungos, inviabilizando o equilíbrio destas amostras. Contudo, este facto não é considerado um problema, pois num edifício não é comum a existência de HR tão elevadas durante tão longos períodos de tempo.

As curvas de adsorção dos três betões apresentam a mesma tendência (Figura 2). Contudo, o Calco apresenta teor em água superior para HR superior a 60%. Apesar das diferenças a nível da sua composição, todos os betões em estudo apresentaram maior higroscopicidade comparado com outros betões de cânhamo (Evrard 2006; Collet et al. 2013; Rahim et al. 2015).

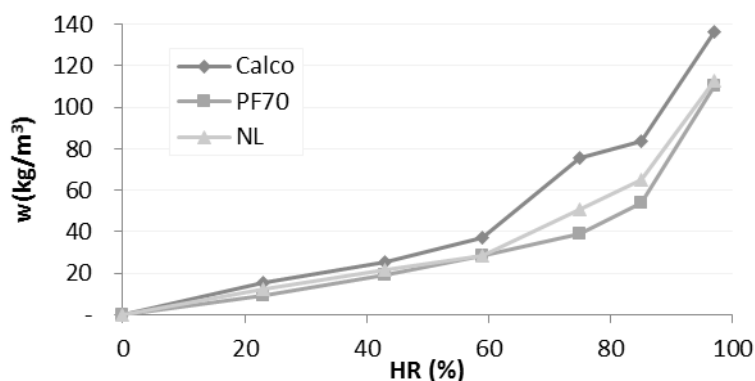


Figura 2: Curvas de adsorção dos betões Calco, PF70 e NL

Embora os três betões caracterizados apresentem grande histerese (Simões 2015), para efeitos de cálculo neste artigo considerou-se unicamente a capacidade de retenção de humidade (eq. 4) calculada através das curvas de adsorção para HR entre 23% e 75%. Portanto, a capacidade de retenção de humidade do Calco, PF70 e NL foi de 110.2 kg/m^3 , 56.5 kg/m^3 e 70.3 kg/m^3 , respetivamente.

3.1.2. Permeabilidade ao vapor de água

Devido ao facto dos betões de cânhamo absorverem uma grande quantidade de vapor de água das soluções salinas, o procedimento foi feito em duas fases, com injeção de água no fim da primeira fase. O procedimento continuou até à estabilização da variação de massa.

O método preconizado na EN ISO 12572 (CEN 2001) não considera o impacto da camada de ar dentro da cápsula. Por isso foi utilizado o método de correção do valor de permeabilidade ao vapor de água sugerido na norma, mesmo com s_d superiores a 0.20, de modo a obter resultados considerados mais realistas (Quadro 3).

Os betões PF70 e NL tiveram comportamento semelhante, enquanto que o Calco foi ligeiramente mais permeável ao vapor de água. Collet et al. (2013) obteve resultados de, aproximadamente, $2.5 \times 10^{-11} \text{kg}/(\text{s.m.Pa})$ de permeabilidade ao vapor de água para betão de cânhamo composto por Tradical 70 e uma maior quantidade de fibras, medido pelo método da “cápsula seca”. Este valor foi semelhante aos obtidos para os betões PF70 e NL.

Quadro 3: Valores médios de permeabilidade ao vapor de água e factor de resistência ao vapor de água dos betões de cânhamo

	δ	μ (-)	
	(kg/s.m.Pa)	Valor médio	Desvio padrão
Calco	3.09E-11	6.15	0.15
PF70	2.36E-11	8.07	0.50
NL	2.38E-11	7.98	0.36

3.2. Propriedades dinâmicas - Ensaio de MBV

Na Figura 3 apresentam-se os resultados de captação e libertação de humidade durante três dias/ciclos para as amostras de Calco, PF70 e NL, respetivamente, com espessuras diferentes (5, 10 e 15cm). NL apresenta uma ligeira diferença entre a amostra de 15cm e as restantes. Contudo, a diferença máxima ocorre no último ciclo entre 15cm e 10cm ($\approx 8\%$). Nos resultados do ensaio de MBV para PF70 a máxima diferença ocorre no último ciclo e foi 13%, aproximadamente, entre 5cm e 15cm. Será importante observar que os resultados obtidos para todas as espessuras ensaiadas de Calco obtiveram valores de captação de humidade distintos. Como se poderá observar no Quadro 4 o MBV (eq.2) obtido para o Calco foi superior em relação às restantes formulações. A espessura que obteve maior MBV foi a maior e este foi diminuindo com a redução das espessuras. O Quadro 4 faz o resumo dos MBV obtidos para todas as formulações com diferentes espessuras e pode observar-se que a espessura não tem impacto significativo nos betões PF70 e NL.

Em publicações anteriores foram observados os seguintes resultados: $2.15 \text{g}/(\text{m}^2\% \text{HR})$ (Collet & Pretot 2012) e $1.46 \text{g}/(\text{m}^2\% \text{HR})$ (Mazhoud et al. 2015) com relação cânhamo/ligante igual a 0.5 e 0.15, respetivamente. Uma vez que a relação cânhamo/ligante é igual a 0.42 e 0.33 para NL e PF70, respetivamente, estes resultados poderão sugerir que maior quantidade de cânhamo poderá levar a um $\text{MBV}_{\text{prático}}$ mais elevado. No entanto, mais ensaios seriam necessários para comprovar tal relação.

No Quadro 5 são comparados o $\text{MBV}_{\text{ideal}}$ (eq.5) com o $\text{MBV}_{\text{prático}}$ para todas as formulações. Os valores de $\text{MBV}_{\text{prático}}$ apresentados no Quadro 5 são uma média entre os valores obtidos nas várias espessuras, podendo apenas ser tomados como um valor de referência para o Calco uma vez ter resultados tão distintos. Pode ser observado que o $\text{MBV}_{\text{ideal}}$ foi sobrestimado quando comparado com o $\text{MBV}_{\text{prático}}$ em todas as formulações. Todavia, o $\text{MBV}_{\text{ideal}}$ é um valor aproximado e depende do valor obtido da capacidade de retenção de humidade e permeabilidade ao vapor de água de cada betão. E ainda pode existir uma fonte

de erro ligada aos ensaios de que esta aproximação depende, bem como um problema de modelação associado ao material.

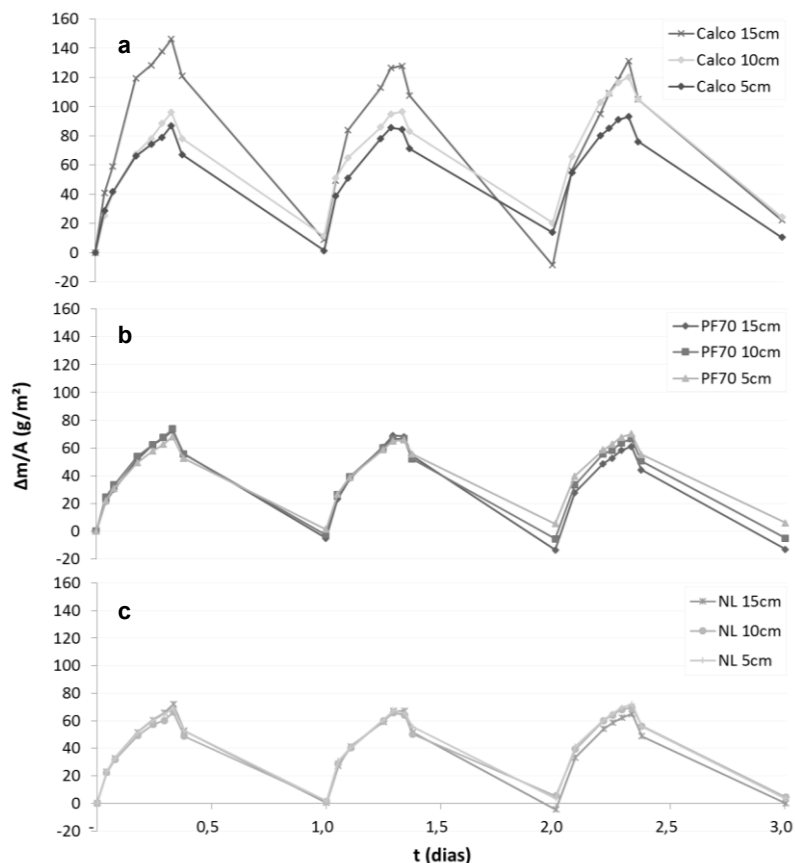


Figura 3: Resultados do ensaio de Moisture Buffering para os betões Calco (a), PF70 (b) e NL (c)

Quadro 4: MBV para cada espessura de betão

Formulações	Espessuras (cm)	MBV ($g/(m^2 \cdot \%RH)$)	
		Valor médio	Desvio padrão
Calco	15	3.21	0.34
	10	2.23	0.18
	5	1.98	0.09
PF70	15	1.75	0.02
	10	1.71	0.05
	5	1.56	0.05
NL	15	1.65	0.07
	10	1.53	0.04
	5	1.60	0.07

Quadro 5: MBV_{ideal} vs $MBV_{prático}$

	Calco	PF70	NL
MBV_{ideal} ($g/m^2/\%$)	5.16	3.23	3.62
$MBV_{prático}$ ($g/m^2/\%$)	2.53	1.66	1.59
Diferença relativa (%)	103.82	94.96	127.09

A espessura de penetração é a espessura necessária de um material sem revestimento para otimizar a sua capacidade de regulação passiva da HR. Simões (2015) desenvolveu um método inovador, nas amostras em estudo, que consta na colocação higrómetros no

interior das amostras durante os ciclos de MBV. Conclui-se que a espessura de penetração experimental foi entre 4cm e 8cm para Calco e inferior a 5cm para as restantes formulações. O valor experimental da espessura de penetração no Calco (Simões 2015) poderá ser explicado pela presença de dois orifícios verticais nas amostras, que resultaram de ensaios anteriormente realizados. Estes orifícios poderão ser responsáveis por maior espessura de penetração e, conseqüentemente, proporcionar valores díspares observados na capacidade de MBV.

Para o cálculo da espessura de penetração foram utilizados os dois modelos teóricos $d_{p,1\%}$ (eq. 6) e $d_{1/e}$ (eq. 7). Os resultados são apresentados no Quadro 6. Nenhuma das aproximações teóricas conduziu a resultados coerentes com os valores experimentais anteriormente referidos. De acordo com Collet & Pretot (2012) a aproximação da espessura de penetração no betão de cânhamo foi 5.8cm utilizando $d_{p,1\%}$, mas em betão com maior quantidade de fibras comparativamente aos betões em estudo. No entanto, o valor teórico da espessura de penetração é estimado assumindo uma variação sinusoidal da HR à superfície das amostras, que não é o que acontece nas condições do ensaio Nordtest. Outra explicação poderá estar relacionada com as condições assumidas para estimar o valor teórico da espessura de penetração (existência de migração de água, sem histerese nas curvas de adsorção-desadsorção, equilíbrio entre água em estado líquido e gasoso, etc...) o que pode não ser válido para o material em estudo. Contudo, mais estudos são necessários para se poderem confirmar tais tendências.

Quadro 6: Espessura de penetração teórica obtida para os modelos $d_{1/e}$ e $d_{p,1\%}$

	$d_{(1/e)}$ (cm)	$d_{p,1\%}$ (cm)
PF70	0.57	2.62
NL	0.51	2.36
Calco	0.47	2.14

4. Conclusão

Neste estudo três formulações de betão de cânhamo, variando o tipo de ligante, foram ensaiadas de modo a observar as suas propriedades hígricas. Foram avaliadas as suas propriedades em regime estacionário (curva de adsorção e permeabilidade ao vapor de água) e propriedades dinâmicas quando expostos a ciclos diários de HR (ensaio de *moisture buffering*). Foram preparadas amostras de cada betão com três espessuras distintas (5, 10 e 15cm) de modo a verificar qual a espessura de penetração, ou seja, qual a espessura mínima necessária para usufruir da regulação passiva da HR proporcionada pelo material.

Os resultados obtidos para as curvas de adsorção são muito próximos para dois dos três betões em estudo: PF70 e NL. A curva de adsorção do Calco obteve maior teor de água que as dos restantes betões, fundamentalmente para HR elevadas (>60%). Independentemente do valor do teor de água alcançado, decorreu um longo período de tempo até o teor de água estabilizar para todos os betões. A permeabilidade ao vapor de água de todos os betões foi elevada (entre 2.36×10^{-11} e 3.09×10^{-11} kg/(s.m.Pa)).

O $MBV_{prático}$ do PF70 e NL apresenta resultados semelhantes para todas as espessuras (entre 1.53 e 1.75g/(m²%RH) a 23°C), o que a nível de regulação passiva da HR está classificado como bom (Rode et al. 2005). O MBV_{ideal} , que é calculado através das propriedades em regime estacionário, apresenta valores sobrestimados para todos os betões comparando com o $MBV_{prático}$. Considera-se ser necessário mais investigação relativamente a este modelo teórico neste tipo de materiais.

De forma a beneficiar da capacidade de regulação passiva da HR em pleno a espessura mínima de PF70 e NL será de 5cm; quanto ao Calco nada se pode concluir devido a um problema nas amostras em estudo. Relativamente aos modelos teóricos adotados para o cálculo da espessura de penetração, também aqui será necessária mais investigação, bem como em relação aos ensaios de que estes dependem.

Agradecimentos

Agradece-se à “Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Energie” pelo financiamento desta investigação através do projeto IBIS.

Referências Bibliográficas

CEN, 2013. EN ISO 12571- Hygrothermal performance of building materials and products Determination of hygroscopic sorption properties.

CEN, 2001. EN ISO 12572 - Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties.

Collet, F. et al., 2013. Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy and Buildings*, 62, pp.294–303.

Collet, F. & Pretot, S., 2012. Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 36, pp.58–65.

Dixit, M.K. et al., 2010. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, 42(8), pp.1238–1247.

Dubois, S., 2014. *Modelling the hygrothermal behaviour of crop-based construction materials*, PhD thesis. Université de Liège- Gembloux Agro-Bio Tech.

Evrard, A., 2006. Sorption behaviour of Lime-Hemp Concrete and its relation to indoor comfort and energy demand. In *23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Geneva, Switzerland, pp. 1553–1557.

Lima, J. & Faria, P., 2016. Eco-efficient earthen plasters . The influence of the addition of natural fibers. *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*. Figueiro, Raul, Rana, Sohel (Eds.). Springer, RILEM Book Series vol. 12, pP. 315-327..

Mazhoud, B., Collet, F. & Pretot, S., 2015. Effect of temperature on thermal and hygric properties of hemp-lime plasters. In *1st International Conference on Bio-based Building Materials*. Clermont-Ferrand, France, pp. 567–574.

Mcgregor, F., 2014. *Moisture buffering capacity of unfired clay masonry*, PhD thesis. University of Bath.

Melià, P. et al., 2014. Environmental impacts of natural and conventional building materials: A case study on earth plasters. *Journal of Cleaner Production*, 80, pp.179–186.

Peuhkuri, R., 2003. *Moisture Dynamics in Building Envelops*, PhD thesis. Denmark Technical University.

Rahim, M. et al., 2015. Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity. *Energy and Buildings*, 88, pp.91–99.

Rode, C. et al., 2007. Moisture Buffer Value of Building Materials. *Journal of ASTM International*, 4(5).

Rode, C. et al., 2005. *Moisture buffering of building materials*. Denmark: Technical University of Denmark.

Roels, S. & Janssen, H., 2006. A comparison of the Nordtest and de japanese test methods for the moisture buffering performance of building materials. *Jornal of buildings physics*, 30, pp.137–161.

Sassoni, E. et al., 2014. Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization. *Energy and Buildings*, 77, pp.219–226.

Simões, T., 2015. *Moisture buffering capacity of earth mortar plasters and hemp concrete Effect of temperature and thickness*, MSc Dissertation. NOVA University of Lisbon.

Svennberg, K., 2006. *Moisture buffering in the indoor environment*, PhD Thesis. Lund University.