



UNIVERSITY OF  
**BATH**

**Lawrence, M., Fodde, E., Paine, K. and Walker, P. (2012)**

**Prestazioni termoigrometriche di una costruzione sperimentale in canapa-calce.  
Materiali ingegneristici fondamentali, 517. pp. 413-421.**

**Link all'URL ufficiale (se disponibile):** <http://www.ttp.net/978-3-03785-435-8.html>

**Opus: University of Bath Online Publication Store**

<http://opus.bath.ac.uk/>

Questa versione è resa disponibile in conformità con le politiche editoriali.  
Si prega di citare solo la versione pubblicata con il riferimento di cui sopra.

Per le politiche di utilizzo è possibile consultare il sito <http://opus.bath.ac.uk/>

Per visualizzare il documento si prega di scorrere verso il basso.

# PRESTAZIONI TERMOIGROMETRICHE DI UNA COSTRUZIONE SPERIMENTALE IN CANAPA-CALCE

Dr. Mike Lawrence\*, Dr. Enrico Fodde,

Dr. Kevin Paine, Prof. Pete Walker

BRE Centre for Innovative Construction Materials,

University of Bath, Bath, BA2 7AY, United Kingdom

[M.Lawrence@bath.ac.uk](mailto:M.Lawrence@bath.ac.uk), [E.Fodde@bath.ac.uk](mailto:E.Fodde@bath.ac.uk),

[K.Paine@bath.ac.uk](mailto:K.Paine@bath.ac.uk), [P.Walker@bath.ac.uk](mailto:P.Walker@bath.ac.uk)

\*autore corrispondente

**Parole chiave:** canapa-calce, prestazione termoigrometrica, sfasamento, cambiamento di fase, smorzamento termoigrometrico.

**Sommario.** L'utilizzo della tecnica di costruzione in canapa-calce rappresenta un nuovo approccio che combina materiali rinnovabili a basse emissioni di carbonio ed un'eccellente prestazione termoigrometrica. La pianta della canapa può raggiungere i 4 metri di altezza in quattro mesi, con un uso minimo di irrigazione e fertilizzanti, rendendo così efficiente l'impiego di risorse e riducendo lo spreco di tempo. Si possono utilizzare tutte le parti della pianta – il seme per cucinare, la fibra che circonda lo stelo per produrre carta, vestiti e rinforzare la resina, mentre il nucleo resistente dello stelo viene impiegato nelle lettiere per animali e come aggregato nelle costruzioni in canapa-calce. La particolare struttura porosa del nucleo conferisce una bassa conduttività termica e uno smorzamento igrico alla combinazione canapa-calce. Questa tecnica favorisce una buona resistenza all'aria e minimizza i ponti termici all'interno della costruzione. Tutti questi fattori contribuiscono a produrre basse emissioni di carbonio, edifici termoigrometricamente efficienti e a basso consumo energetico, sia in fase di costruzione che di utilizzo, offrendo anche opportunità di riciclaggio a fine vita.

Questo articolo fornisce un resoconto sulle prestazioni termoigrometriche di una costruzione sperimentale in canapa-calce e sullo sviluppo di un modello ambientale computerizzato che consideri gli effetti dei cambiamenti di fase osservati nel composto canapa-calce.

## Introduzione

L'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) è un gas serra considerato come il principale responsabile del riscaldamento globale. Per questo motivo, si stanno facendo sforzi a livello internazionale al fine di ridurre l'emissione di gas serra in generale (anidride carbonica inclusa) e riportarla sotto i livelli del 1990, come dettato dal protocollo di

Kyoto. Le emissioni di CO<sub>2</sub> nel Regno Unito nel 2008 sono ammontate a circa 525 milioni di tonnellate (Mt) (1990 – 590Mt) [1]; di questa cifra, la fase di costruzione è stata responsabile per 298.4Mt [2]. La tabella 1 mostra un elenco completo riguardante il contributo dell'industria edile nelle emissioni di carbonio nel Regno Unito.

## Edilizia

Il settore edilizio incide maggiormente sulle emissioni di carbonio (56,7%) rispetto a tutti gli altri settori messi insieme. All'interno di quest'area, l'utilizzo degli edifici (riscaldamento, illuminazione, aria condizionata) è responsabile per circa il 47% del totale delle emissioni di CO<sub>2</sub> in Gran Bretagna, mentre la produzione (materiali da costruzione, ecc..) lo è quasi per il 9%. È proprio in questi due ambiti che si concentra l'attenzione per ridurre l'emissione di anidride carbonica (e di carbonio in generale). La diminuzione del carbonio utilizzato è associata a miglioramenti tecnici nell'isolamento, a sistemi d'illuminazione, riscaldamento e raffreddamento più efficienti e ad una riduzione delle perdite a causa di ponti termici e scarsa resistenza all'aria. Per quanto riguarda la produzione, invece, la diminuzione è dovuta al fatto che si immette meno energia nel processo produttivo grazie a cementi a basso contenuto di carbonio e alla sostituzione dei materiali con un'alta concentrazione di carbonio in favore di altri con un livello inferiore. Altro motivo di interesse è rappresentato dai materiali da costruzione che isolano CO<sub>2</sub>, ovvero quei materiali naturali che assorbono l'anidride carbonica tramite la fotosintesi, trattenendola così all'interno delle proprie fibre finché l'edificio esisterà. A questo punto, una volta avvenuto lo smantellamento, alcuni di questi materiali naturali offrono la possibilità di essere riutilizzati per nuove costruzioni o riciclati, ad esempio, per scopi agricoli; non a caso negli ultimi anni, in risposta a questa esigenza, è cresciuto molto l'interesse verso materiali come legno, paglia e canapa.

Sotto-settore	CO <sub>2</sub> (Mt)	% del totale
<b>Edilizia</b>		
Design	1,3	0,25
Costruzione	45,2	8,61
Distribuzione	2,8	0,53
In uso	2,6	0,5
Operazioni in loco	246,4	46,93
Ristrutturazione/Demolizione	1,3	0,25
<b>Totale Edilizia</b>	<b>298,4</b>	<b>56,84</b>
<b>Altri settori</b>	<b>226,6</b>	<b>43,46</b>
<b>Totale Regno Unito</b>	<b>525</b>	<b>100</b>

Tabella 1: emissioni di CO<sub>2</sub> nel 2008 nel settore edile [2]

## Composto canapa-calce

Il composto canapa-calce (*Hemp-Lime*) è un materiale da costruzione spesso definito in inglese come *Hemcrete* o anche *Lime-Hemp* (calce-canapa). Esso è stato originariamente concepito in sostituzione al riempimento di paglia e fango degli edifici a struttura di legno in Francia, dove veniva chiamato *Chaux-Chanvre*. Questo composto si ricava mescolando piccoli pezzetti del nucleo legnoso degli steli di canapa (*cannabis sativa*), detto anche canapulo, con un legante a base di calce aerea con pozzolanica, si aggiunge della calce idraulica o cementizia e in alcuni casi anche una piccola quantità di altri additivi (per esempio i tensioattivi). Il risultato ottenuto potrà formare involucri edilizi in due modi: tramite fusione con (o gettandolo contro) casseforme temporanee o permanenti in sito, oppure prefabbricando dei pannelli o dei blocchi di costruzione. Tipicamente i muri vengono eretti con uno spessore di circa 300mm. Il nucleo della canapa può essere utilizzato anche come elemento isolante nell'intonaco in calce.

L'interesse per l'uso di canapa-calce è determinato dai seguenti fattori:

- è un materiale a bassa densità e quindi con una bassa conducibilità termica
- la sua struttura porosa permette di attenuare le variazioni di calore e l'umidità ambientale
- l'elevata percentuale di materiali biologici favorisce un maggiore assorbimento (tramite fotosintesi) della quantità di CO<sub>2</sub> rispetto ad altri materiali da costruzione tradizionali
- il nucleo della canapa resiste di più al decadimento naturale di altri materiali da costruzione biologici (ad esempio la paglia)
- il canapulo, così come altri materiali biologici, è una risorsa rinnovabile e quindi offre la possibilità di essere riciclato
- la coltivazione della canapa richiede minor concimazione e irrigazione rispetto al frumento e ad altri materiali biologici e di conseguenza si ottengono livelli di eutrofizzazione più bassi
- la pianta di canapa cresce molto rapidamente e può arrivare fino a 4m di altezza in quattro mesi; ciò le conferisce la possibilità ottimizzare i rendimenti della coltura primaria poiché impiegata come “raccolto di stacco”, ovvero un raccolto secondario che interrompe una semina ripetuta di cereali come parte della rotazione delle colture.

La densità, la conducibilità termica e la resistenza alla compressione della canapa-calce sono prevalentemente controllate dalle relative proporzioni di canapulo e legante. Queste caratteristiche sono elencate nella tabella 2.

Il nucleo della canapa assorbe 2,1kg di CO<sub>2</sub> equivalente per kg [3], quindi un muro di 1m<sup>2</sup>, spesso 300mm, composto da pannelli di legno e da intonaco in calce e realizzato con una miscela di 1:2 può trattenere l'equivalente di 75,7kg di CO<sub>2</sub> [3], con un netto di tutte le emissioni (inclusi trasporto, fabbricazione e costruzione) pari a -35,5kg [3] – ovvero l'impronta di carbonio va in “negativo” rispetto al totale della costruzione

grazie all'elemento parete.

Applicazione	Canapulo: proporzioni del legante (rispetto alla massa)	Densità da raggiungere ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Resistenza tipica alla compressione ( $\text{N.mm}^{-2}$ )	Tipica conducibilità termica $\lambda$ ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
Isolamento del tetto	1:1	220	0,05	0,06
Costruzione del muro	1:1,5	275	0,11	0,06 – 0,09
Costruzione del muro	1:2	330	0,22	0,09 – 0,115
Costruzione del muro	1:2 (compresso)	440	0,35	0,12
Pavimento	1:3	500	0,8	0,13
Pavimento	1:4	600	1,15	0,14
Prefabbricati strutturali	1:4 (compresso)	600 – 1000	2 – 6	0,14 – 0,27

**Tabella 2:** caratteristiche meccaniche e termiche del composto canapa-calce [4]

Le persone che vivono in case costruite in canapa-calce riportano alti livelli di comfort – temperature uniformi nelle varie stanze, livelli di umidità gradevoli – e l'utilizzo di energia è inferiore a quanto ci si potrebbe aspettare da una valutazione puramente scientifica sul valore U dell'involucro edilizio. Se ci si basa infatti sulla classificazione SAP e sui calcoli del valore U, le case in canapa-calce del Progetto Haverhill [5] dovrebbero usare molta più energia rispetto alle case in mattoni dello stesso progetto; tuttavia ciò non accade [5]. Le ragioni di questo fenomeno non sono ancora chiare, però sono state proposte diverse spiegazioni:

- gli occupanti possono impostare abitualmente i termostati a livelli inferiori rispetto agli edifici tradizionali perché le superfici delle pareti risultano meno fredde
- le pareti in canapa-calce potrebbero avere una massa termica più efficace (massa termica virtuale) del previsto grazie ad un'interazione tra gli effetti dei cambiamenti di fase che si verificano all'interno delle mura e la singolare struttura porosa del nucleo della canapa. Ciò rallenterebbe il ritmo con cui il calore viene trasferito attraverso il muro, riducendo così la necessità di riscaldamento o raffreddamento interno.

## Design sperimentale

Per analizzare queste caratteristiche, è stata costruita una serie di pannelli campione, sottoposti poi a delle condizioni ambientali controllate. A questi pannelli sono stati incorporati dei sensori di umidità e temperatura (RH/T) a livelli di profondità diversi

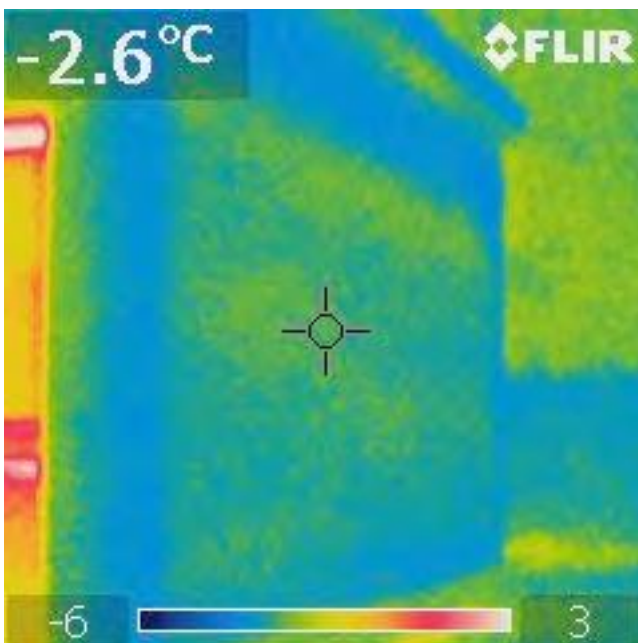
nello spessore, permettendo così di misurarne i profili attraverso il muro nonostante i flussi termici e di umidità con diversa ampiezza e frequenza prodotti in tutto lo spessore del pannello. Questi esperimenti hanno permesso di descrivere le prestazioni termoigrometriche dei pannelli e il risultato di tale lavoro verrà pubblicato altrove.

L'altro ambito di ricerca comprendeva l'investigazione della prestazione termoigrometrica di un effettivo edificio in canapa-calce (sia per quel che riguarda le condizioni interne, sia attraverso lo spessore delle pareti). A tal fine, un edificio sperimentale ("HemPod", Fig. 1) è stato costruito nel campus dell'Università di Bath, nell'ovest dell'Inghilterra; posizionato sopra un pavimento truciolare sospeso e rifinito con 200mm di isolante a celle chiuse ( $\lambda=0.023\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Anche il soffitto è costituito dallo stesso tipo di isolamento posto dietro 9mm di cartongesso; si stima che sia il pavimento che il soffitto abbiano un valore U pari a  $0.15\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ .

La pianta dell'edificio è di 5,86m x 4,64m e le pareti sono formate da supporti in legno 75x50mm a centri di 600mm; questi ultimi sono stati posizionati sul lato interno dei muri e rivestiti con una cassaforma composta da una tavola in silicato di magnesio spessa 9mm. Successivamente, utilizzando una cassaforma temporanea, è stata eretta una parete in canapa-calce spessa 200mm che supera il livello del soffitto coibentato. Porte e finestre sono formate da pannelli di legno e da vetro camera a bassa emissione di argon; la porta (rivolta a sud) ha un valore U di  $0,79\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , mentre le finestre rispettivamente di  $0,97\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  (rivolta a nord) e di  $1,05\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  x2 (rivolta a sud). Le giunzioni tra pareti e pavimento, tra pareti e soffitto e tra pareti e porte/finestre sono state sigillate con del nastro permeabile al vapore; sotto lo strato di cartongesso del soffitto è stata posta una membrana Intello<sup>®</sup> che controlla il vapore, sigillata alle pareti. La tenuta all'aria degli interni dell'edificio risulta eccezionalmente buona ( $0,55\text{m}^3\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ) superando anche lo standard di PassivHaus ( $0,6\text{m}^3\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Un'indagine termografica ha stabilito che non vi sono ponti termici in una situazione in cui l'interno è riscaldato a 20° C e la temperatura esterna è di -3° C (Fig. 2).



**Figura 1:** edificio sperimentale in canapa-calce (HemPod) dell'Università di Bath



**Figura 2:** immagine termografica con elevazione ad Oriente

L'interno delle pareti in ogni elevazione possiede dei sensori Hygrotrac<sup>®</sup> (RH/T) incorporati ad intervalli di 40mm (Fig. 3), una sonda che misura l'umidità del legno posizionata in un montante al centro della parte divisoria e delle termocoppie sulle superfici intere ed esterne (Fig. 3). I sensori sono situati nel centro geometrico di ciascuna parete. La miscela utilizzata era composta con una proporzione 1:1,5 da

nucleo di canapa Tradical® HF e da legante Tradical® HB, applicando una pressione minima per raggiungere la densità desiderata di  $275\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Tabella 2).



**Figura 3:** sensori incorporati nella parete in canapa-calce durante la costruzione

La costruzione dell'HemPod è iniziata del giugno del 2010 e dopo 10 è stata rimossa la cassaforma esterna; i muri sono stati lasciati asciugare per 8 settimane prima che fosse applicato l'intonaco esterno. Durante il periodo autunnale l'edificio è stato lasciato asciugare e gli esperimenti venivano condotti sugli effetti della deumidificazione artificiale; in questo lasso di tempo il tasso di umidità dei muri è stato monitorato utilizzando diverse tecniche e per gennaio 2011 i suoi livelli all'interno dell'edificio si sono adattati all'ambiente esterno.

### **Dati sulle prestazioni**

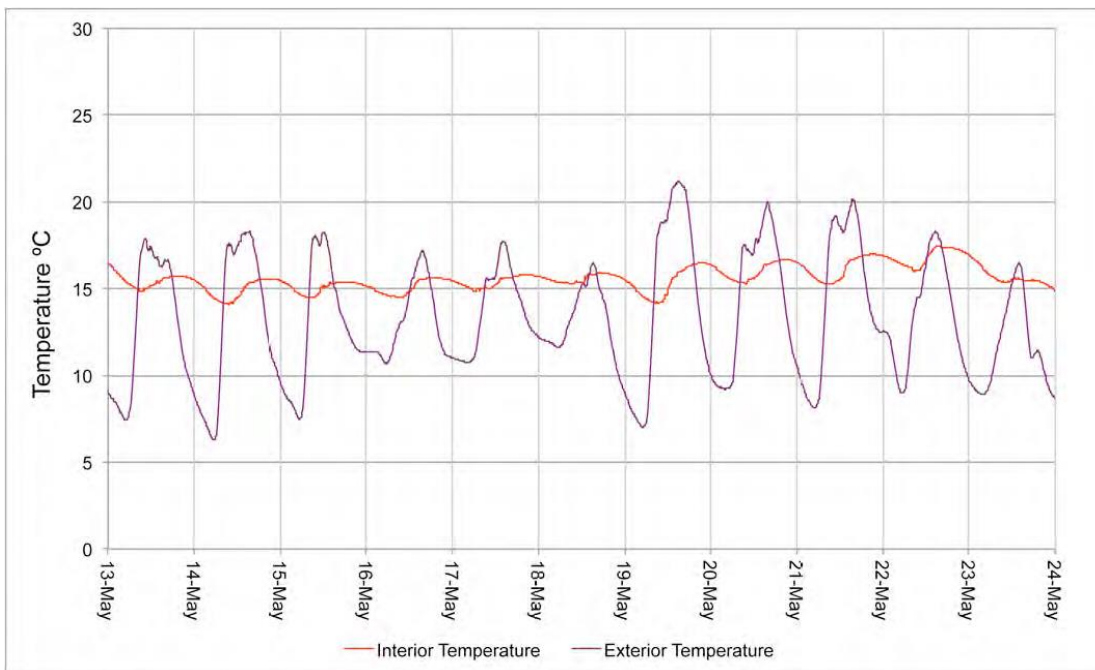
I dati presentati in questo documento si riferiscono al periodo tra il 13 e il 24 maggio 2011. Le temperature, ove fornite, sono quelle della parete est dell'HemPod; a fini comparativi, vengono presentati anche dei dati riguardanti un ufficio non riscaldato a Liskeard, Cornovaglia. Questo edificio è composto da pannelli di legno e i muri sono ricoperti da uno strato di 150mm di isolante in lana minerale e da 12mm di *oriented strand board* (OBS), ovvero da un pannello in truciolato lavorato i cui strati sono compressi e orientati specificatamente, con uno schermo antipioggia esterno in legno. Viene utilizzato come ufficio e internamente misura 10m x 5,6m x 2,4m, spazio in cui sono contenute attrezzature, libri, mobili che ne aumentano la massa termica rispetto a quella dell'HemPod che è vuoto. Le condizioni interne ed esterne sono state acquisite attraverso una stazione meteo Davis Vantage Pro® e l'ufficio è rimasto inutilizzato durante quel periodo. Il suo volume è circa il doppio di quello



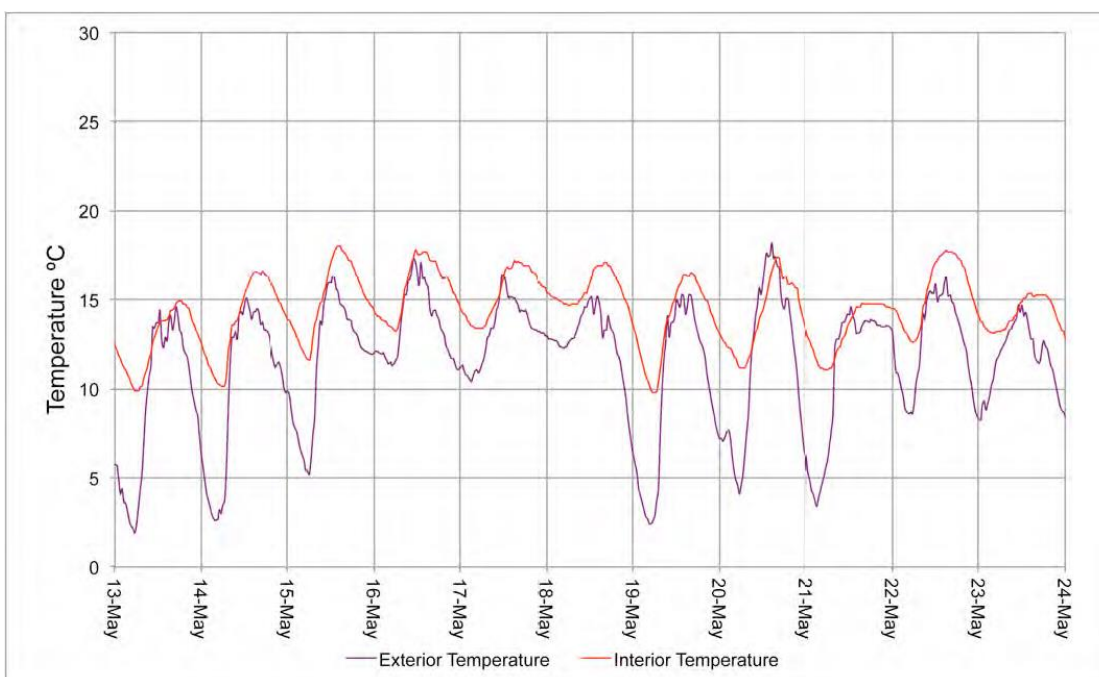
dell'HemPod, ciò significa che le condizioni interne avranno maggiore inerzia e bisognerebbe opportunamente tenerne conto in sede di paragone. I due siti si trovano a 200km di distanza l'uno dall'altro e sono quindi soggetti a diverse condizioni atmosferiche: l'ufficio si trova in un luogo la cui temperatura è variabile, mentre l'HemPod deve sopportare mutevoli condizioni di umidità.

## Temperatura

Le figure 4 e 5 mostrano la temperatura interna ed esterna dell'HemPod e dell'ufficio.



**Figura 4:** temperatura interna ed esterna dell'HemPod

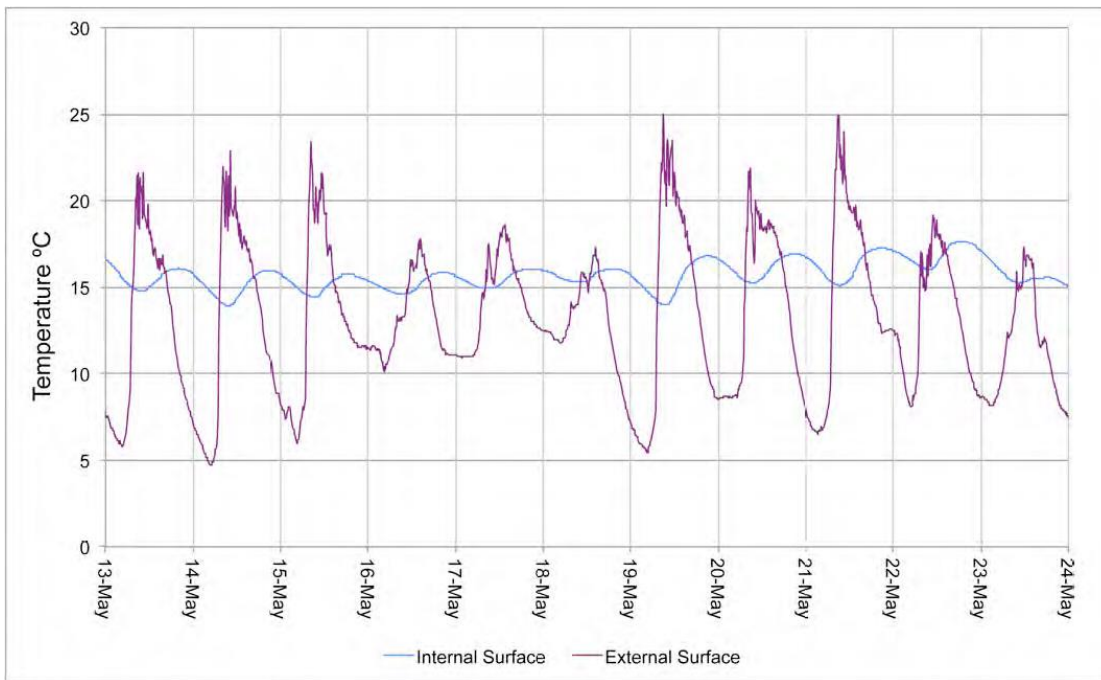


**Figura 5:** temperatura interna ed esterna dell'ufficio

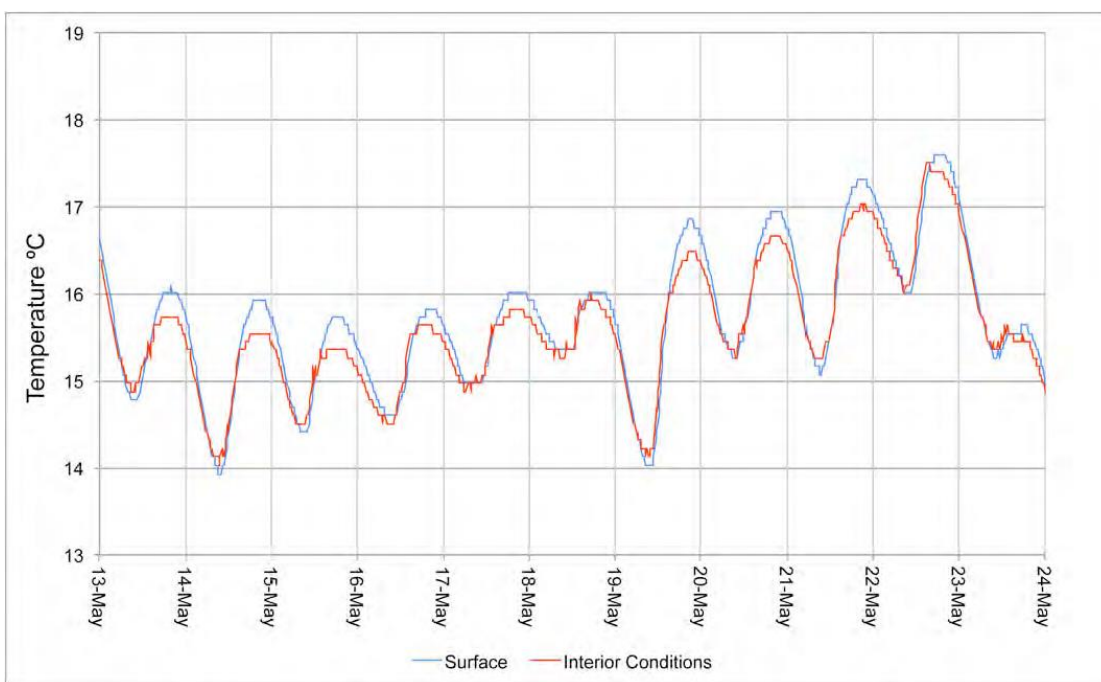
Le variazioni della temperatura esterna dell'HemPod venivano significativamente

moderate internamente, paragonate alla prestazione dell'ufficio. La variazione media giornaliera della temperatura interna dell'HemPod era di  $2,3^{\circ}\text{C}$ , contro una esterna di  $11,6^{\circ}\text{C}$  (equivalente ad un effetto di smorzamento della temperatura dell'80%); nell'ufficio invece c'era una variazione media giornaliera interna di  $6,8^{\circ}\text{C}$  ed esterna di  $13,5^{\circ}\text{C}$  (effetto smorzamento al 49%).

La Fig. 6 mostra la differenza tra la temperatura della superficie della parete esterna dell'HemPod e quella sulle superfici interne.



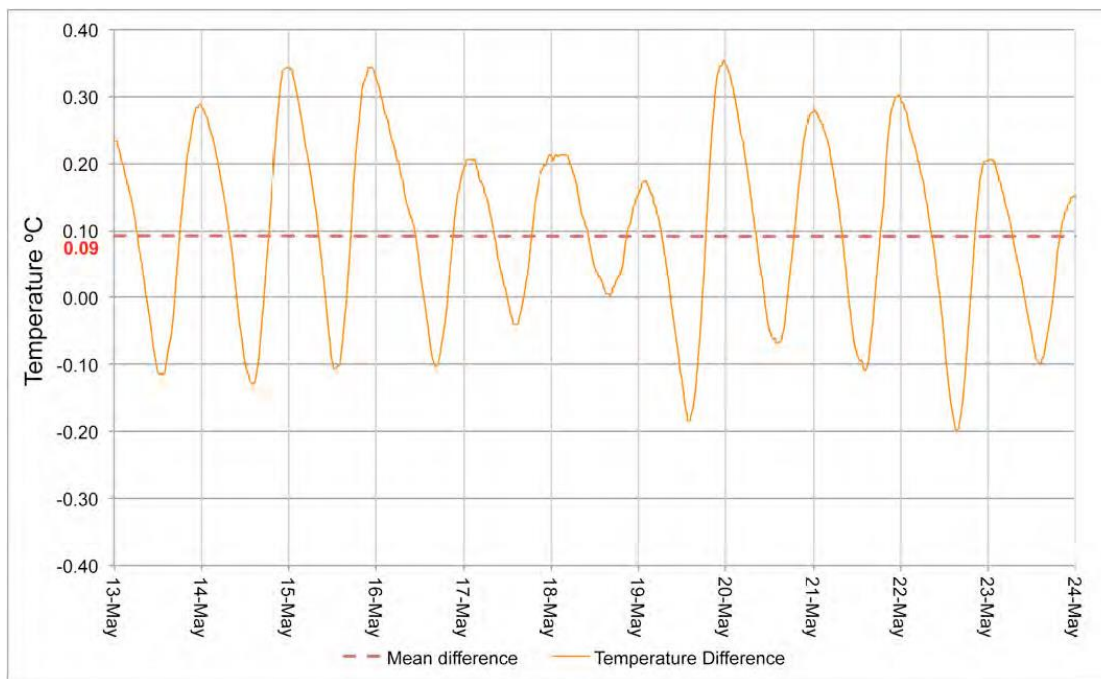
**Figura 6:** confronto delle temperature superficiali interne ed esterne dell'HemPod



**Figura 7:** confronto tra la temperatura ambientale interna e la temperatura superficiale della parete dell'HemPod

Come per la temperatura ambientale, le temperature esterne sono state considerabilmente moderate nel passaggio verso l'interno. La Fig. 7 mostra la relazione tra la temperatura della superficie interna e la temperatura ambientale interna.

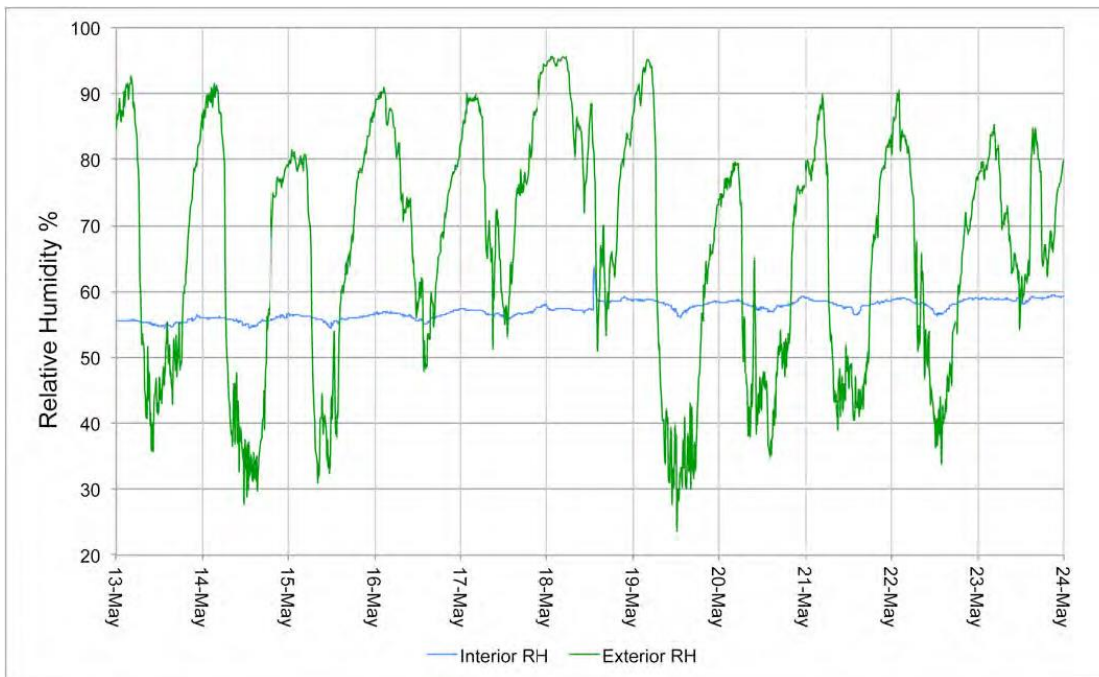
Si può notare come la temperatura superficiale sia generalmente di poco superiore alle condizioni interne e, come mostra la Fig. 8, la temperatura superficiale sia in media  $0,09^{\circ}\text{C}$  superiore alla temperatura dell'aria interna, anche se va osservato che differenze così minime vadano oltre la risoluzione delle termoresistenze.



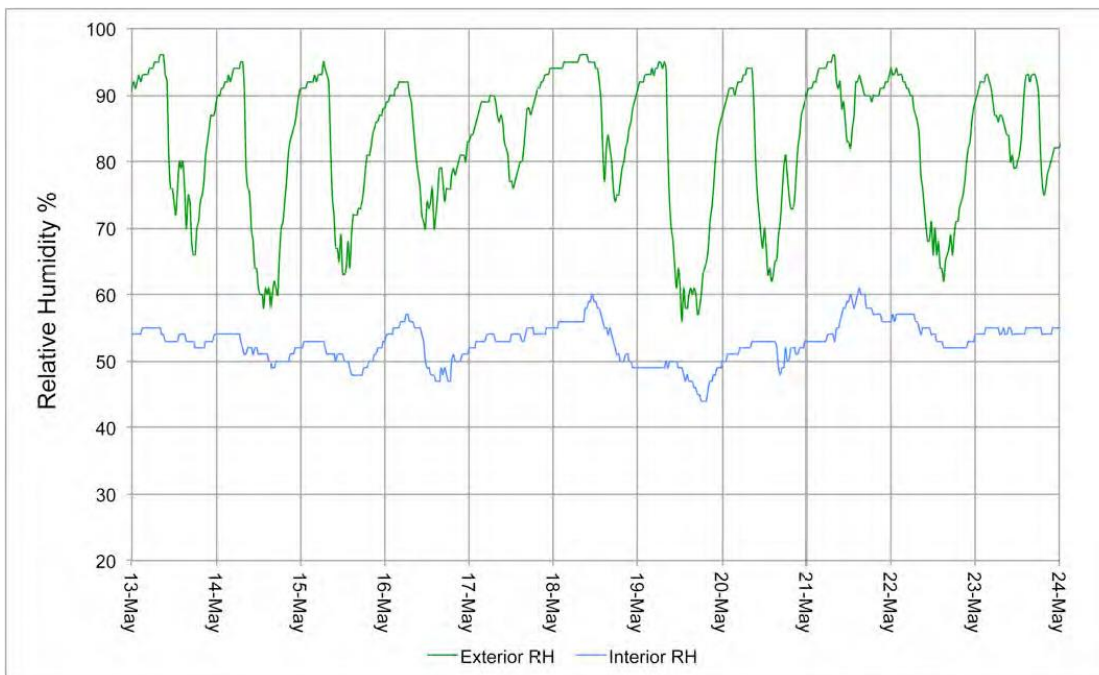
**Figura 8:** differenza di temperatura tra la superficie e la temperatura dell'aria dell'HemPod

## Umidità

Le figure 9 e 10 mostrano l'umidità interna ed esterna dell'HemPod e dell'ufficio. Come nel caso della temperatura, l'umidità all'interno dell'HemPod è molto più moderata che nell'ufficio, infatti la variazione periodica è di  $\pm 2\%$  paragonata al  $\pm 25\%$  di quella esterna; il risultato è un'umidità relativa interna incredibilmente stabile.



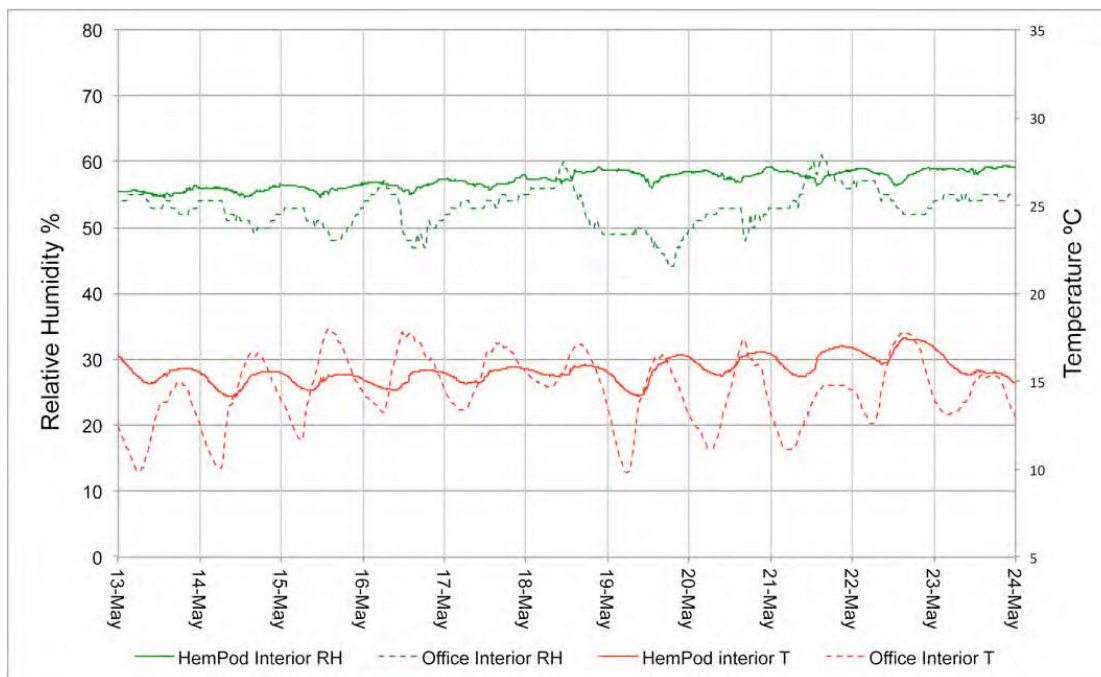
**Figura 9:** umidità relativa interna ed esterna dell'HemPod



**Figura 10:** umidità relativa interna ed esterna dell'ufficio

Nell'ufficio l'umidità varia di  $\pm 7\%$ , mentre esternamente di  $\pm 20\%$ . Questa variazione è notevolmente maggiore di quella osservata nell'HemPod e va tenuto presente che il volume d'aria è doppio rispetto all'HemPod e che la stanza contiene una quantità considerevole di materiali assorbenti (es. Carta, legno, moquette), quindi entrambi questi fattori potrebbero conferire agli interni un'inerzia di umidità superiore, paragonandola all'HemPod vuoto.

La Fig. 11 mostra le condizioni ambientali all'interno dell'HemPod.



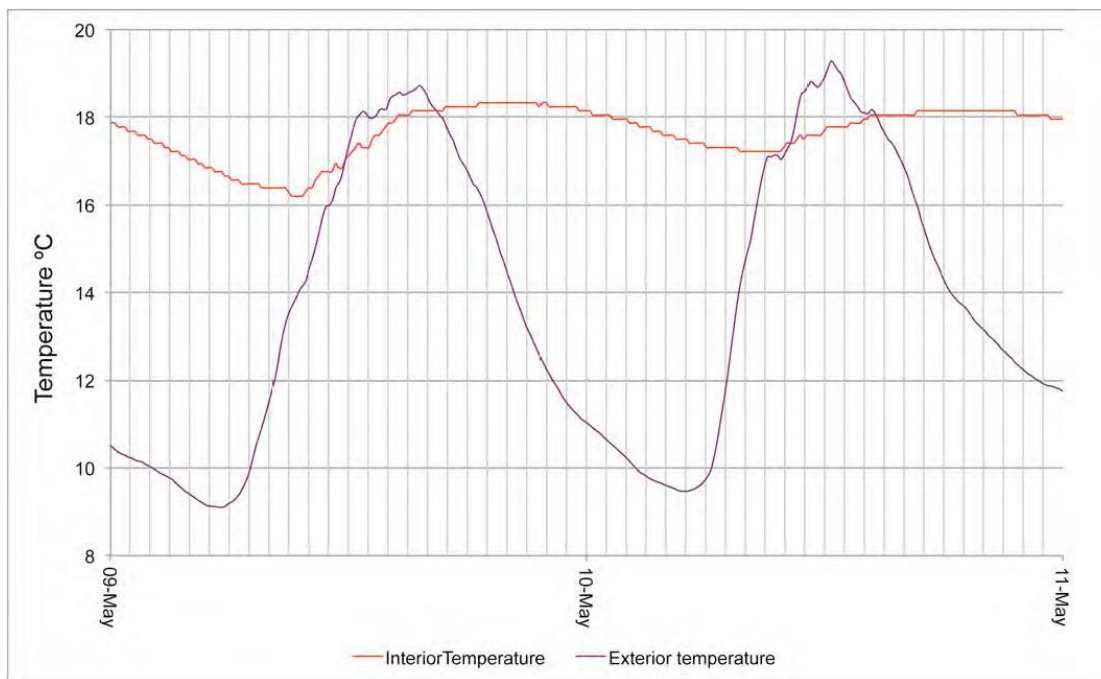
**Figura 11:** temperatura e umidità relativa all'interno dell'ufficio (linee tratteggiate) e dell'HemPod (linee continue)

Ciò dimostra la notevole stabilità delle condizioni mantenute all'interno dell'HemPod, avvalendosi delle caratteristiche di assorbimento/dissorbimento termoigrometrico del composto canapa-calce, a fronte dell'edificio costituito con pannelli di legno e isolato con lana minerale.

## Analisi dei dati

### Smorzamento termico

Come si può vedere dalla Fig. 4, le variazioni di temperatura all'interno dell'HemPod sono significativamente più attenuate che le variazioni della temperatura esterna; inoltre, vi è un cambiamento di fase nelle variazioni interne rispetto a quelle esterne, associato al tempo impiegato dagli impulsi termici per passare attraverso il muro (Fig.12).



**Figura 12:** sfasamento termico attraverso i muri dell'HemPod

Per la parete dell'HemPos spessa 200mm, lo sfasamento termico è ~ 5 ore e lo smorzamento termico è ~ 80%. Evrard e De Herde [6], utilizzando un software WUFI<sup>®</sup>, riportano uno sfasamento simulato di 15 ore ed uno smorzamento termico del 92% per un muro in canapa-calce spesso 300mm, basato su una conducibilità termica  $\lambda$  di  $0,115\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , una densità  $\rho$  di  $440\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  e una capacità termica a secco  $c_o$  di  $1560\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Il loro modello, sfruttando uno shock termico di  $20^\circ$ , fornisce un flusso di calore  $Q_{s-s}$  stazionario pari a  $371,2\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$  per il loro muro intonacato che ha un valore  $U$  di  $0,44\text{Wm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ; tuttavia, questo flusso in realtà non si verifica prima che siano trascorse 68 ore. Dopo 12 ore la quantità di calore trasferito attraverso la superficie interna della parete è di  $6,1\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , ovvero solo l'1,6% del flusso stazionario di calore. Lo stesso modello mostra un trasferimento di calore di 12 ore attraverso un muro in lana minerale spesso 284,5mm (con un valore  $U$  di  $0,14\text{Wm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) pari a  $31,1\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$  rispetto ad un trasferimento stazionario di calore di  $116,9\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$  (equivalente al 26,6%).

La performance dell'HemPod sembra seguire le tendenze previste dal modello Evrard & De Herde, ma esso richiede correzioni per evidenziare le differenze nella densità e contenuto di legante, dal momento che questi cambieranno i presupposti per quanto riguarda conducibilità termica, permeabilità al vapore, assorbimento/dissorbimento di vapore e valori di anticondensa. Tutto ciò cambierà il funzionamento del modello. Si sta lavorando per confermare i dati necessari al fine di definire la prestazione termoigrometrica ID e 2D di un composto canapa-calce a bassa densità tramite il software WUFI<sup>®</sup>, mentre per le prestazioni 3D si usano i modelli TAS<sup>®</sup> e IES VE<sup>®</sup>.

### Comfort termico

Le caratteristiche della superficie di una parete contribuiscono al comfort termico, il quale, a sua volta, subisce l'influenza di conduzione, convezione e irraggiamento. La temperatura di contatto tra il materiale della parete e la pelle umana dipende in

parte dalle relative temperature e in parte dai loro coefficienti di contatto. I materiali capacitivi con un alto coefficiente di contatto (es. calcestruzzo) si possono percepire come caldi o freddi, viceversa, materiali con un coefficiente basso risultano piacevolmente caldi perché la superficie di contatto si adatta alla temperatura della pelle; il composto canapa-calce, come tutti i materiali vegetali, ha un coefficiente di contatto basso, perciò sarà caldo al tatto.

Il valore del flusso di calore convettivo si misura nel seguente modo:

$$q_c = h_c (\theta_{fl} - \theta_s)$$

dove  $h_c$  indica il coefficiente dello strato superficiale convettivo ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $\theta_{fl}$  è la temperatura dell'aria indisturbata e  $\theta_s$  è la temperatura superficiale. Nelle superfici verticali, il valore standard del coefficiente dello strato superficiale interno per il trasferimento convettivo di calore è  $\sim 3,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  [7]; ciò significa che sulle superfici di pareti lunghe, il flusso termico convettivo è  $4,43\text{W}$ , ossia un livello relativamente basso che a malapena può essere percepito dagli occupanti.

L'indice del flusso radiante di calore  $q_r$  è indicato come:

$$q_r = h_r (\theta_{sl} - \theta_r)$$

in cui  $\theta_{sl}$  rappresenta la temperatura superficiale,  $\theta_r$  è la temperatura radiante dell'ambiente come visto dalla superficie e  $h_r$  è il coefficiente dello strato superficiale per radiazione; nelle superfici interne verticali, il valore del coefficiente  $h_r$  (in  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) è  $\sim 7.7$  (EN standard) [7].

Pertanto:

$$q_r = 7.7 (\theta_{sl} - \theta_r)$$

$(\theta_{sl} - \theta_r)$  nell'HemPod è  $+0,09^\circ$ , quindi sulla superficie di pareti lunghe il tasso del flusso radiante di calore è  $9,75\text{W}$ ; ciò produrrà l'effetto di un lieve calore radiante per gli occupanti, migliorando così la sensazione di comfort.

Tutte e tre queste caratteristiche – temperatura di contatto, calore convettivo e calore radiante – sono relativamente neutrali all'interno dell'HemPod, poiché non emettono o assorbono particolare calore, creando un'atmosfera confortevole per gli occupanti.

### **Smorzamento igrometrico**

Come per il trasferimento di calore, così il trasferimento di umidità attraverso i muri viene considerabilmente moderato dalla canapa-calce. Il modello WUFI [6] di Evrard e De Herde usa un valore anticondensa alto, ma non corrisponde alle prestazioni reali nel breve periodo. Il composto canapa-calce è in grado di trasferire rapidamente i liquidi, trattenere umidità e permeare vapore acqueo, permettendo così di evitare condensazione e di mantenere delle condizioni ambientali interne confortevoli. La prestazione termoigrometrica viene complicata dalla insolita struttura porosa del

composto canapa-calce, il quale si presenta tri-modale, con pori di 50 $\mu$ m collegati a pori di 10 $\mu$ m tramite pori di connessione di 1 $\mu$ m, come mostrato nella Fig. 13. Il passaggio di aria umida dai pori grandi a quelli intermedi, passando per quelli piccoli, comporta differenze parziali di pressione tra i due pori più grandi che possono provocare evaporazione e/o condensazione con i corrispondenti effetti del calore latente. Il calore latente della condensazione dell'acqua  $L$  può essere espresso come (kJ.kg<sup>-1</sup>) [8]:

$$L_{acqua} = -0.2222614342\theta^3 + 0.00158927\theta^2 - 2.36418\theta + 2500.79$$

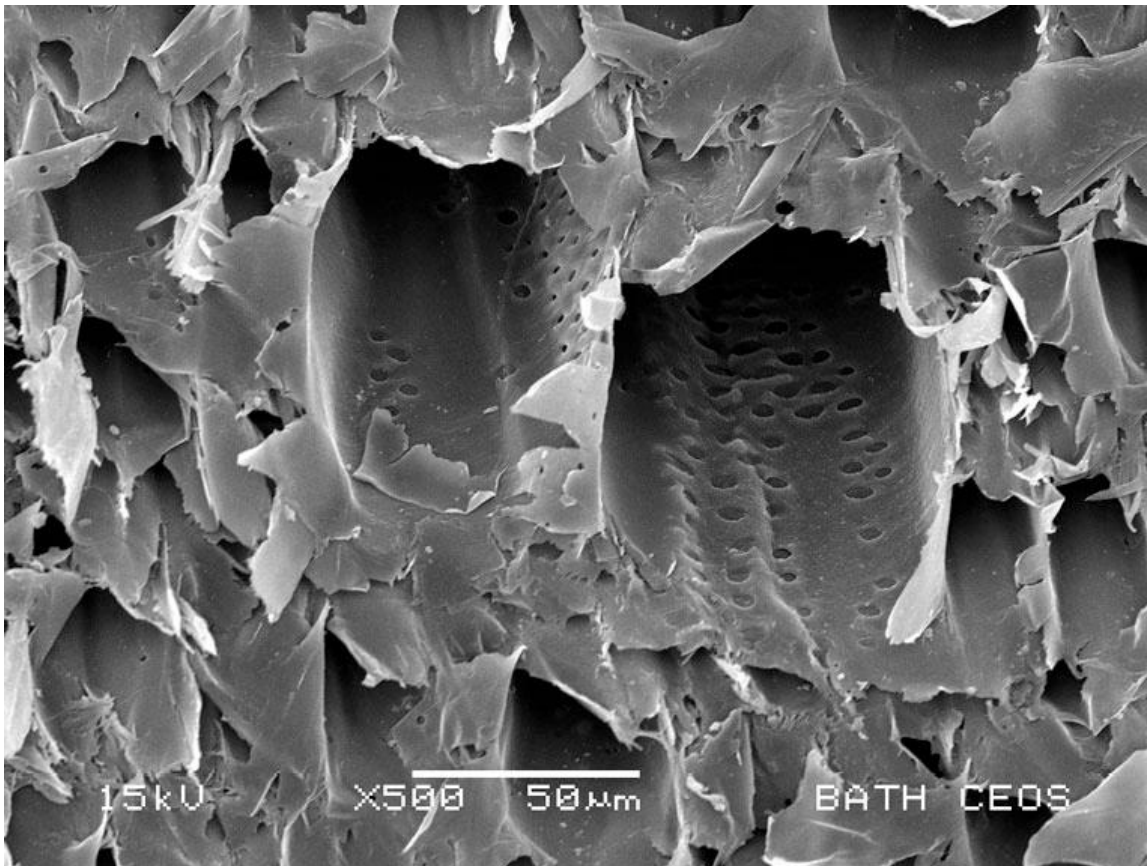
e l'energia potenziale  $Q$  rilasciata da una variazione nella densità del vapore acqueo  $\Delta\rho_{wvd}$  (J) è:

$$Q = L_{acqua} * \Delta\rho_{wvd}$$

Questa energia ha il potenziale di cambiare la temperatura della canapa-calce  $\Delta T_{hemp-lime}$  secondo l'espressione:

$$\Delta T_{hemp-lime} = Q/c * \rho_{hemp-lime}$$

dove  $c$  è il calore specifico della canapa-calce e  $\rho_{hemp-lime}$  è la sua densità.



**Figura 13:** struttura dei pori interconnessi del nucleo di canapa (microfotografia x500)

In questo modo il movimento di aria umida attraverso al parete può provocare effetti sulla temperatura, che a loro volta ricadono sul modello di trasferimento termico. Si



sta lavorando per incorporare questo effetto di cambiamento di fase con il modello termoigrometrico e per calibrarlo sugli effetti misurati. Gli effetti del cambiamento di fase possono essere significativi, producendo variazioni di temperatura all'interno della canapa-calce fino a 8° C. Le Tran et al [9] ha realizzato un modello che simula il comportamento di calore-aria-umidità (HAM, *heat-air-moisture*) di un edificio con muri in canapa-calce, dimostrandone quindi la capacità anticondensante, in linea con la prestazione misurata nell'HemPod, ma anche evidenziando una maggiore ampiezza delle variazioni. Si sostiene inoltre che il fabbisogno energetico per la ventilazione di un edificio in canapa-calce sia circa del 12-17% inferiore a quella necessaria ad un edificio in calcestruzzo cellulare.

## **Conclusioni**

I risultati provvisori ricavati dall'HemPod mostrano che l'umidità relativa interna viene mantenuta ad un livello notevolmente stabile, fornendo così buoni livelli di comfort agli occupanti. La temperatura rimane ragionevolmente stabile e in media è di circa 4° C superiore rispetto alle condizioni esterne. Questi dati vengono combinati con quelli su pannelli sperimentali per sviluppare un modello termoigrometrico computerizzato per gli edifici in canapa-calce; è evidente che non esiste una sola ragione particolare per la quale utilizzare il composto canapa-calce, ma piuttosto una serie di vantaggi differenti. L'impiego di materiali a basso contenuto di carbonio contribuisce alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> causate dalla costruzione di edifici (8,61% del totale delle emissioni nel Regno Unito). La conducibilità termica ragionevolmente bassa della canapa-calce, unita allo sfasamento, agli effetti del cambiamento di fase, all'elevato comfort termico interno, alla bassa velocità del trasferimento iniziale di energia, al controllo passivo dell'umidità e all'inferiore fabbisogno energetico per la ventilazione, contribuiscono alla riduzione di emissioni "in uso" di CO<sub>2</sub> (46,93% del totale delle emissioni del Regno Unito).

## **Ringraziamenti**

Il programma di ricerca è finanziato dal DEFRA nel loro programma LINK e supportato dai seguenti partner industriali: Lhoist (UK) Ltd, BRE, Hanson Ltd, Lime Technology Limited, Hemp Technology Limited, Wates Construction Ltd, studi Feilden Clegg Bradley, NNFCC. Riconosciamo inoltre l'aiuto e il sostegno del personale e degli studenti di BREICM, Dipartimento di Architettura e Ingegneria Civile presso l'Università di Bath e la donazione di porte e finestre ad alte prestazioni da parte di Janex Ltd.

## **Riferimenti**

[1] Department of Energy and Climate Change (DECC) Statistical release, UK climate change sustainable development indicator: 2010 greenhouse gas emissions, provisional figures and 2009 greenhouse gas emissions, final figures by fuel type and end-user, 31st March 2011

[2] Innovation and Growth Team, Low Carbon Construction – Final Report, Department for Business Innovation and Skills, London (2010)

- [3] Boutin, M-P. Flamin, C. Quinton, S. and Gosse, G. Analyse du cycle de vie de mur en béton chanvre banché sur ossature en bois (Life cycle analysis of a cast hemp-lime timber framed wall), INRA, Lille. (2005)
- [4] Cérézo, V. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. PhD Thesis, ENTPE, Lyon, (2005)
- [5] Yates, T. Final Report on the construction of the hemp houses at Haverhill, Suffolk, Client report 209-717 Rev2, BRE, Watford (2002)
- [6] Evrard, A. and De Herde, A. Hygrothermal performance of lime-hemp wall assemblies, Journal of Building Physics 34 (1) (2010) 5-24
- [7] Hens, H. Building Physics - Heat, Air and Moisture Ernst & Sohn, Berlin, 2007
- [8] Rogers, R.R. and Yau, M.K. A short course in cloud physics, Pergamon Press, London, 1989
- [9] Le Tran, A.D. Maalouf, C. Mai, T.H. Wurtz, E. and Collet, F. Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope, Energy and Buildings 42 (2010) 1797-1806