



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Scuola di Ingegneria

**Corso di Laurea Triennale in
Ingegneria Civile, Edile, Ambientale**

Anno Accademico 2015-2016

**Studio sperimentale del contenuto di umidità
in materiali edili porosi**

**Experimental study of the moisture content of porous
building materials**

Primo Relatore

Prof. Carla Balocco

Secondo Relatore

Ing. Giacomo Pierucci

Relatore Esterno

Dott.ssa Barbara Sacchi

Candidato

Andrea Bertino

INDICE

1. Premessa
2. Introduzione
 - 2.1 Prestazioni energetica edifici
 - 2.2 Edifici impermeabili o traspiranti?
 - 2.3 Umidità negli ambienti
 - 2.4 Influenza dell'umidità negli ambienti interni
 - 2.4.1 igienico sanitario
 - 2.4.2 qualità dell'aria
 - 2.4.3 degrado componenti edilizi
 - 2.5 sistemi attivi
 - 2.6 sistemi passivi
3. Stato dell'arte
 - 3.1 Studi e metodi di tipo sperimentale
4. Materiali
5. Protocollo e strumentazione
 - 5.1 Nord test
 - 5.2 Scantronik
6. Risultati
7. Conclusioni
8. Bibliografia
9. Ringraziamenti

Introduzione

La prestazione termica dell'involucro edilizio è di fondamentale importanza per la realizzazione di edifici ad "energia quasi zero" come definiti dalla recente direttiva del parlamento europeo sull'efficienza energetica 2010/31/UE. Gli edifici infatti sono responsabili del 40% del consumo globale di energia nell'Unione europea (UE). Il settore è in espansione, pertanto anche il consumo energetico è destinato ad aumentare. Limitando il consumo energetico, l'UE ridurrà la sua dipendenza energetica e le emissioni di gas serra, per raggiungere il suo obiettivo di limitare il consumo globale di energia del 20 % entro il 2020.

Per ridurre quindi le emissioni di CO₂ e i consumi energetici degli edifici negli ultimi anni molti paesi hanno reso più restringenti i requisiti di tenuta all'aria e resistenza termica di tutti i componenti edili opachi e trasparenti, di fatto definendo ed aggiornando gli standard oggi vigenti in materia.

L'impossibilità di smaltire, attraverso l'involucro, il carico di vapore prodotto all'interno degli ambienti determina un aumento dei livelli di umidità relativa interna specie in ambienti di lavoro come gli uffici ma anche in abitazioni, cui si aggiunge il clima locale tipico delle medie e basse latitudini che comporta valori di temperatura dell'aria esterna relativamente alte e basse, rispettivamente per l'estate e l'inverno, cui tuttavia si associano valori di entalpia dell'aria dovuti in particolare al titolo dell'aria, anche molto elevati.

Temperatura e umidità dell'aria sono due parametri di fondamentale importanza per la definizioni del comfort all'interno di un abitazione. L'umidità relativa dell'aria provoca una sensazione di benessere se compresa tra il 30 e il 65%, in concomitanza con un valore di temperatura di $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Tassi di umidità più alti, soprattutto se accompagnati da temperature elevate possono generare discomfort.

L'umidità è inoltre un importante parametro anche per la IAQ (Indoor Air Quality): La qualità dell'aria negli ambienti confinati è strettamente connessa ai requisiti di igiene e salute delle persone.

Le conseguenze di un ambiente poco salubre possono manifestarsi attraverso un quadro sintomatologico ben definito come la Sick-Building Syndrome (SBS), non una vera e propria malattia quanto una serie di disturbi come mal di testa, irritazioni naso e gola, pelle disidratata e affaticamento. (Fang 1998;Toftum 1998)

Il comfort respiratorio e la percezione della qualità dell'aria possono essere migliorati

anche attraverso un corretto utilizzo di materiali igroscopici finalizzati a ridurre i picchi di umidità. (Salonvara, Kunzel, Karagiozis, 2006).

Livelli di umidità relativa troppo bassi o troppo alti possono provocare fenomeni di degrado dei componenti edilizi, dei rivestimenti e delle finiture dovuti a fenomeni di condensa superficiale e/o interstiziale. Problemi e disagi legati alla formazione della condensa e alla conseguente comparsa di macchie di umidità sono una delle patologie più comuni e diffuse nell'ambiente delle costruzioni. Le cause ancora una volta vanno ricercate in errori progettuali legati all'impiego di materiali non traspiranti.

Livelli elevati di umidità sono inoltre condizioni determinanti per lo sviluppo e la proliferazione e la crescita di organismi biologici come muffe, batteri e funghi che in alcuni casi possono essere anche dannosi per la salute dell'uomo e contribuire in maniera significativa al peggioramento della qualità dell'aria percepita dagli occupanti.

Per ridurre questi effetti si può ricorrere a sistemi attivi come gli impianti HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) tuttavia non sembra essere una buona soluzione soprattutto in piccole abitazioni in cui esso può significare un consumo energetico elevato e quindi anche economico nonché fonte di rumore. Inoltre la loro installazione non è sempre possibile nelle vecchie costruzioni.

Possiamo altrimenti fare affidamento su sistemi passivi come i materiali porosi e igroscopici di origine organica o naturale che consentono, oltre ai vantaggi sopra citati, una riduzione del consumo energetico e delle emissioni inquinanti nell'atmosfera anche attraverso l'assorbimento di CO₂ nella fase di crescita delle colture.

Tali materiali, capaci di assorbire e rilasciare vapore acqueo e quindi di ridurre i picchi di umidità relativa interna, data la loro bassa resistenza meccanica sono spesso associati a strutture portanti in legno o cemento armato. Possono essere usati per isolare tetti e solai o come rivestimento superficiale delle pareti interne.

In questa tesi di impostazione prettamente sperimentale attraverso misurazioni in laboratorio sarà analizzato, facendo uso di una camera climatica, frutto di una collaborazione ed accordo per lo sviluppo di attività di ricerca basate su queste tematiche, tra il Dipartimento di Ingegneria Industriale di Firenze (DIEF) e l'Istituto per la conservazione e la valorizzazione dei beni culturali del CNR di Firenze (ICVBC-CNR) il comportamento di alcuni materiali come il legno e la calce-canapa sottoposti a

variazioni cicliche di umidità.

Per quanto riguarda il legno oltre al metodo così detto della “pesata” in riferimento al NordTest, sarà condotta anche una misurazione attraverso uno strumento elettronico denominato Scanntronik Moisture Gigamodule capace di calcolare il contenuto di acqua in diversi materiali utilizzando due sensori inseriti all’interno del materiale con l’obiettivo di rilevare la resistenza elettrica seguendo la metodologia indicata nel NORDTEST.

Nel capitolo successivo viene presentato lo stato dell’arte in materia ponendo in evidenza studi effettuati su materiali Bio-edili e di tipo convenzionale ed i relativi risultati.

Stato dell'arte

A fronte di una riduzione della permeabilità all'aria dell'involucro edilizio, frutto di utilizzo di materiali non igroscopici e estremamente isolanti, nasce quindi l'esigenza di studiare strategie alternative che consentano di smaltire il vapore acqueo prodotto dallo svolgimento delle normali attività quotidiane in ogni abitazione senza per questo avere ricadute dal punto di vista delle prestazioni energetiche.

Nell'edilizia tradizionale spesso è prevalso l'utilizzo di rivestimenti e materiali pressoché impermeabili, avendo come obiettivo principale quello di creare uno schermo con l'ambiente esterno, non considerando invece l'interazione esistente tra le pareti e i benefici sul clima interno.

Una strategia promettente in tal senso sembra essere quella, peraltro già usata nell'ambito della conservazione di beni culturali, di utilizzare materiali con capacità di accumulo igroscopico (moisture buffer capacity) come *sistemi passivi* di regolazione igrometrica capaci di ridurre i picchi di umidità relativa interna e da integrare nell'involucro edilizio come rivestimento di pareti e soffitti o da introdurre negli ambienti come arredamenti (Svennberg, Rode, 2004).

La Moisture buffer capacity (MBC) riflette l'abilità dei materiali di smorzare i picchi di umidità così da ridurre le sue variazioni di umidità che si verificano negli ambienti.

Dal punto di vista matematico tale capacità è definita come la derivata dell'isoterma di assorbimento.

$$\xi(\varphi) = \frac{\partial w}{\partial \varphi}$$

con $w(\varphi)$ isoterma di assorbimento che descrive il rapporto tra il contenuto igrico di un materiale w (massa d'acqua assorbita per unità di volume del materiale) e l'umidità relativa dell'aria φ a contatto con questo a temperatura costante. Materiali porosi e assorbenti assorbono vapor d'acqua quando l'umidità negli ambienti aumenta rilasciandola nel tempo quando l'umidità decresce. Il processo non è reversibile totalmente a causa dell'isteresi nell'assorbimento: fenomeno fisico che corrisponde al decadimento nel tempo delle proprietà di assorbimento.

Studi e Metodi di tipo sperimentali

Negli ultimi decenni, molti ricercatori hanno approfondito la possibilità di utilizzare differenti materiali igroscopici per mitigare le variazioni dell'umidità interna. Attività sperimentali sono indispensabili per la misura delle proprietà igroscopiche dei materiali fondamentali poi per la calibrazione e impostazione di modelli numerici per il trasferimento HAM (Heat Air and Moisture) in ambienti interni in modo da valutare ad un così detto "room level" l'influenza dei materiali igroscopici sul clima interno e sulla eventuale climatizzazione.

Tim Padfield e Steve Jensen del dipartimento di conservazione del Museo Nazionale di Danimarca, hanno iniziato a sperimentare le proprietà di moisture buffering di alcuni materiali da costruzione.

Sono stati valutati i valori di tamponamento all'umidità relativa agli spazi interni di questi materiali :mattoni di argilla cruda (forati e interi), legno e calcestruzzo cellulare. E' stata misurata la loro risposta a variazioni cicliche di umidità relativa (RH) ed essa viene espressa in una nuova unità per descrivere la capacità tampone: il B-value [m^3]. Questo è definito come la quantità di vapore acqueo scambiato con il materiale espresso come il volume di spazio che registri la stessa variazione di umidità quando esposto allo stesso trasferimento di vapore d'acqua. Per i materiali da costruzione questo valore è riferito ai m^2 della superficie esposta.

Lo svolgimento di queste prove è avvenuto in una camera climatica, la cui realizzazione, finanziata dalla Danish Energy Agency fu affidata a ricercatori dell' Dipartimento di Ingegneria Civile dell' Università civile di Danimarca. Essa è costituita da un pozzo cilindrico con una superficie interna di acciaio inossidabile, che è un materiale inerte all'umidità. Il campione del materiale viene posato orizzontalmente sopra la parte superiore. Il campione, può essere un singolo strato di materiale poroso o una completa sezione di parete o tetto. La trasmissione del vapore acqueo è limitata alla zona del campione in prova, che può essere fino a 800 mm di diametro. La temperatura della camera è controllata da aria che circola, spinta da ventilatori, nello spazio anulare formato dalla parete della camera, la parte superiore e inferiore. Il riscaldamento avviene tramite una resistenza elettrica e il raffreddamento avviene grazie ad acqua circolante in una bobina.

Il regolatore di umidità è interamente all'interno del pozzo. L'umidità relativa, o il flusso di vapore acqueo, viene generato tramite evaporazione di acqua da un piccolo serbatoio

di rame con fianchi coibentati, la cui temperatura è controllata da un dispositivo termoelettrico fissato sotto il serbatoio.

I materiali sono esposti ad una variazione di RH tra il 50% e 60% e poi sono misurate le variazioni del loro peso dovute allo scambio di vapore con lo spazio circostante. La curva di assorbimento è determinata per cicli di umidità dal 40 al 60% RH per ottenere il valore massimo teorico di acqua scambiata, salvo poi confrontarlo con lo scambio avvenuto in regime dinamico.

Il valore B aumenta con l'aumentare dei cicli di RH fino ad un valore di equilibrio, poiché nel tempo strati più profondi dei materiali vengono coinvolti nel processo di diffusione del vapore acqueo.

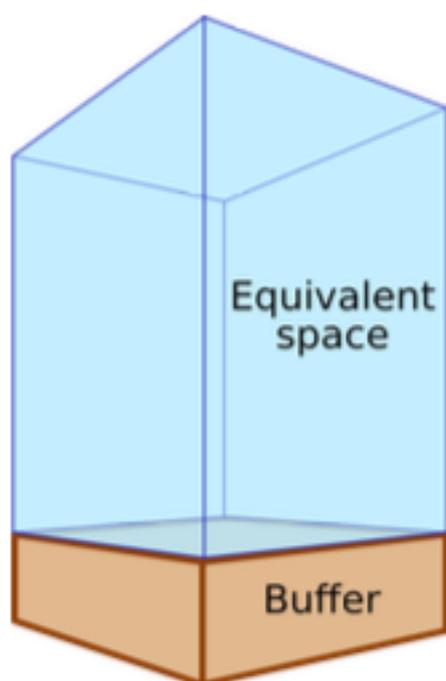


FIG.1 Viene mostrato graficamente il concetto del B-value. Supponendo che l'umidità relativa aumenti di 1% il materiale tende ad assorbire fino ad arrivare all'equilibrio. Il volume della colonna è definito come il volume che registra lo stesso aumento di umidità quando viene immessa la stessa quantità di vapore d'acqua.

La capacità tampone di umidità dei mattoni crudi, usati come materiale della parete, o rivestimento della parete, è sufficiente per moderare il corso della RH in una casa. Esso viene influenzato dalla ventilazione in ambiente e dai carichi endogeni prodotti all'interno di cucine e camere.

Salonvaara e al. (2004) hanno studiato la capacità di alcuni materiali edili nel controllo dell'umidità interna. La capacità tampone e la risposta a variazioni di umidità è stata valutata utilizzando un laboratorio per testare i provini (small-scale) e una stanza (full scale). La produzione di vapore e il tasso di ventilazione sono stati impostati facendo riferimento a valori tipici che si verificano nelle abitazioni residenziali. Le misure hanno riguardato materiali di rivestimento come legno, pannelli di legno poroso, pannelli di

gesso con isolamento igroscopico, compensato forato e come caso di riferimento un foglio di alluminio.

A misurazioni in laboratorio hanno associato anche una simulazione numerica di una stanza per approfondire le performance di un ambiente e valutare l'impatto che materiali igroscopici hanno nei confronti dell'umidità interna. Le misure hanno mostrato che l'umidità interna ha delle notevoli oscillazioni quando i materiali utilizzati non hanno capacità di assorbimento. In un ambienti con un tasso di ventilazione pari a 0,5 /h (tasso minimo di igiene in ambienti non ventilati artificialmente) i picchi di umidità possono essere ridotti dal 70% al 50%. Questo risultato mostra le potenzialità di alcuni materiali nel controllo dell'umidità interna.

Svennberg (2006) ha condotto una serie di esperimenti in una Room Test per dimostrare la capacità tampone di alcuni materiali edili e rivestimenti superficiali. L'esperimento è effettuato in una cella ermetica di acciaio con una superficie calpestabile di 13,8 m² e un'altezza di 2,75 m e un volume quindi pari a 38m³.

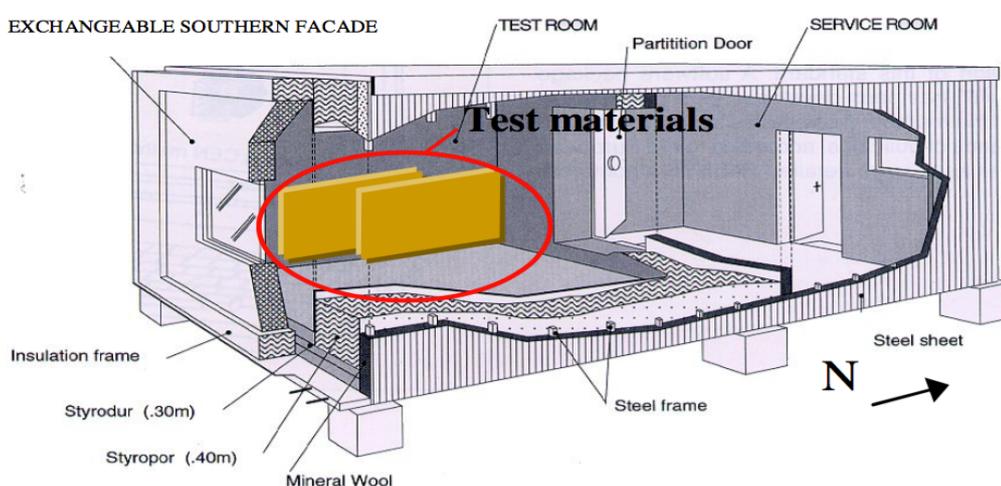


FIG. 2. Un'immagine della Test Room (K.Svennberg 2006, Technical University of Denmark)

Le pareti sono isolate con 0.5 m di poliestere e lana minerale e racchiuse da una superficie in acciaio. Una particolarità della room test in questione risiede nella possibilità di intercambiare la parete rivolta a sud in modo da valutare l'influenza che hanno differenti materiali come rivestimenti in legno, lana minerale, mattoni. In questo esperimento per misurare l'effetto moisture buffering dei materiali la stanza è soggetta ad una variazione controllata di umidità. L'umidificazione interna, che simula la produzione di umidità di una stanza abitata (33g/h; Svennberg), è prodotta tramite evaporazione di acqua posta in un serbatoio. L'umidità viene estratta attraverso un

impianto di deumidificazione. Un'altra simile cella è posta sopra un supporto tramite cui viene misurato costantemente il peso di alcuni campioni durante il test.

Per quanto riguarda la test room sono stati studiati 9 casistiche differenti partendo da una stanza vuota e inserendo via via oggetti di arredamento come sedie, divani, libri, tavoli e tappeti per valutare l'apporto che ognuno di essi offre in termini di moisture buffer. I risultati hanno come previsto mostrato che una stanza arredata presenta una variazione di umidità minore rispetto ad una stanza vuota. Osservando le variazioni di un giorno la stanza arredata ha un picco di umidità più basso del 10% rispetto alla stanza vuota.(Svennberg, Hedegaard 2004)

Secondo Osanyintola O.F, Simonson (2006) inoltre, l'utilizzo di materiali igroscopici può contribuire a ridurre i consumi energetici degli edifici: risparmi diretti sui consumi di climatizzazione, e risparmi indiretti definiti come risparmi derivanti dalla regolazione del tasso di ventilazione e della temperatura interna, pur mantenendo un'adeguata qualità dell'aria interna e comfort.

I potenziali risparmi indiretti per il riscaldamento sono dell'ordine del 5%, mentre si va dal 5 al 20% per il raffreddamento.

I potenziali risparmi energetici diretti sono modesti per riscaldamento (2-3% dell'energia totale per il riscaldamento), ma significativi per il raffreddamento (5-30% dell'energia totale per raffreddamento). Questi risparmi richiedono l'integrazione di materiali igroscopici e un sistema HVAC ben controllata.

La necessità di trovare una quantità standardizzata per caratterizzare la capacità tampone di umidità dei materiali, che ad esempio possa essere utilizzata in fase di progettazione per confrontare i diversi materiali, ha portato 30 università nordiche e altre università internazionali ad un confronto durante NORDTEST workshop organizzato dal dipartimento di ingegneria civile dell'università della Danimarca (project leader) nell'agosto del 2003 (Rode C.).

Il progetto NORDTEST ha proposto un protocollo che porta alla definizione di un nuovo indice per caratterizzare la capacità dei materiali di assorbire e rilasciare umidità in ambiente con il fine di smorzare i picchi di umidità interna: il *Moisture Buffer Value (MBV)*.

Il practical Moisture Value (MBV_{practical}) indica la quantità di acqua che è trasportata dentro e fuori il materiale per area superficiale, durante un certo periodo di tempo, quando è soggetto a variazioni di umidità relativa. Lo scambio di umidità durante questo periodo è riportato per Area superficiale e per variazioni percentuale di RH si ottiene il MBV_{practical}.

L'unità di misura per MBV_{practical} è [g/(m²%RH)].*

In particolare il metodo NORDTEST prevede cicli ripetuti di esposizione di 24 ore ciascuno di cui 8 ore con umidità relativa al 75 % e 16 ore al 33% e sono ripetuti fino a quando il cambiamento di massa ΔM calcolato per ogni ciclo come la media tra la variazione di pesi nelle 8 ore di assorbimento e la media tra le variazioni di peso nel desorbimento durante le 16 ore successive risulti inferiore del 5% del ΔM del ciclo precedente.

Il concetto di Moisture Buffer è in questo modo reso facilmente comprensibile, misurabile e confrontabile poiché esso può essere espresso tramite un valore numerico e rappresentare una misura diretta della quantità di umidità trasportata all'interno e all'esterno del materiale.

Nella tabella sottostante è riportata la classificazione dei materiali in funzione del valore assunto dall'MBVpratico.

Classe di MBVpratico	Livello minimo (g/(m ² *%rh))	Livello massimo (g/(m ² *%rh))
Trascurabile	0	0,2
Limitato	0,2	0,5
Moderato	0,5	1,0
Buono	1,0	2,0
Eccellente	2,0	...

Tabella 1. Classi di MBV per i materiali.(Rode 2005)

Per valutare la validità del protocollo redatto, all'interno del progetto Nordtest è stato effettuato un Round Robin test che, utilizzando quattro differenti laboratori, ha testato diversi materiali utilizzati in edilizia.

L'obiettivo era anche quello di verificare se fosse possibile ottenere valori simili e confrontabili nonostante fossero ottenuti in laboratori differenti con strumentazioni differenti e operazioni di routine differenti.

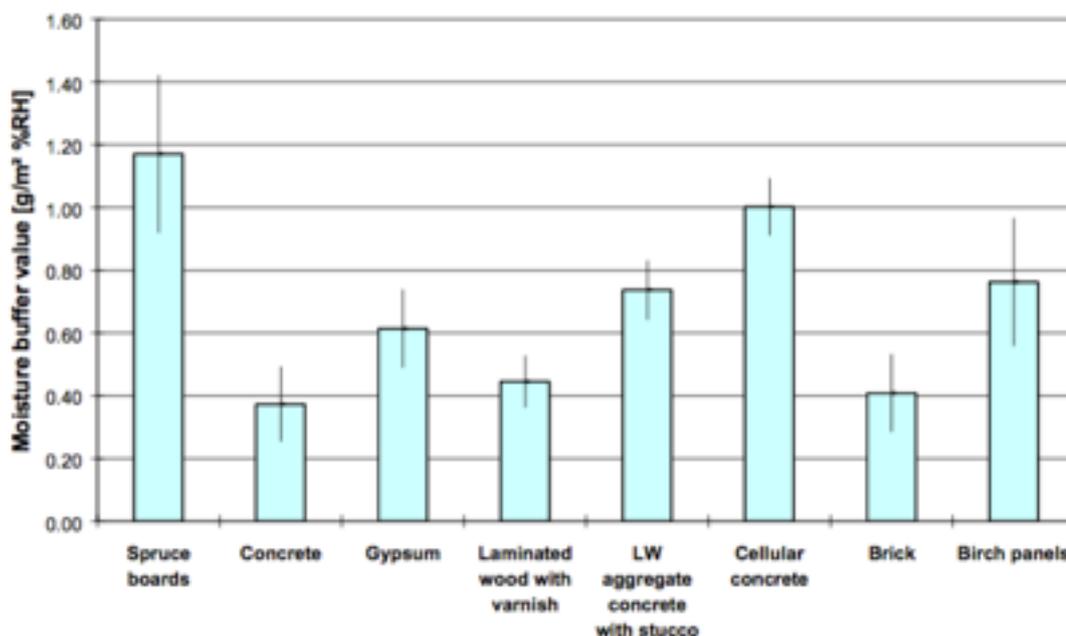


Tabella 2. The Moisture Buffer Values ($MBV_{\text{practical}}$) come una media dei valori ottenuti nelle diverse misurazioni effettuate nei laboratori su materiali di edilizia tradizionale. (Round Robin Test, Rode 2005)

Altre metodi sperimentali per la valutazione delle proprietà di assorbimento e desorbimento di umidità dei materiali a seguito delle variazioni di umidità dell'aria sono state proposte dalla JIS A1470-1:2002 ("test method of ad/desorption performance of building materials to regulate indoor humidity") e nella ISO 24353:2008 (Hygrothermal performance of building materials and products) di cui riporto in tabella i cicli di esposizione in modo tale da avere un confronto diretto con il Nordtest.

La normativa UNI EN ISO 12571:2013 fornisce invece le indicazioni per la determinazione della curva di (de)assorbimento sottoponendo un minimo di tre provini ad una variazione di umidità relativa in camera climatica o attraverso l'utilizzo di un essiccatore. I provini sono pesati continuamente finché non viene raggiunto l'equilibrio con l'ambiente circostante il quale assume valori di umidità relativa, crescente in fase di assorbimento e decrescente nella fase di desorbimento nell'intervallo tra 30 e 95%RH. Il contenuto di acqua u , è calcolato attraverso questa espressione: $\frac{u=(m-m_0)}{m_0}$.

Dopo il calcolo del contenuto di umidità di ogni provino all'equilibrio per ogni valore di umidità relativa è possibile tracciare la curva di (de)assorbimento.

PROTOCOLLO	LIVELLI DI UMIDITÀ RELATIVA ALTO/ BASSO (%)	Tempo di esposizione al livello alto/ basso (h)	Temperatura in camera climatica (°C)	Spessore del provino	Risultati Test
JIS A170-1:2002	53/33 75/53 95/75	24/24	23°C	Pari a quello in opera	Massa di umidità assorbita/ desorbita.
ISO 24353:2008	53/33 75/53 95/75	12/12	23°C	Pari a quello in opera	Moisture Buffer Capacity (g/m ²)
Nordtest	75/33	8/16	23°C	Spessore > spessore di penetrazione	MBV (kg/ m ² %RH)
UNI EN ISO 12571:2013	da 30 a 95%	24	23°C	/	Curva di assorbimento

Tabella3. Confronto tra normative e protocolli per caratterizzare il comportamento igrometrico dei materiali.

Analisi sperimentali su materiali Bio-edili

Riscaldamento globale, risparmio energetico e la riduzione delle emissioni sono alcuni dei motivi che hanno contribuito alla rapida espansione di materiali e base di colture per la costruzione di edifici che difatti sono considerati eco-sostenibili. Materiali organici come la canapa, lino, paglia e fibra di cocco vengono associati a leganti minerali sono generalmente molto porosi, con una bassa densità e una complessa struttura ad elevata porosità.

Queste caratteristiche geometriche corrispondono ad una buona capacità fonoisolante e un'elevata capacità igro-termica.

Anche l'utilizzo del legno in ambito edilizio contribuisce attivamente a questi propositi ed essendo un materiale naturale, duttile, leggero e resistente ha permesso la sua diffusione e il suo utilizzo da secoli. Anch'esso contribuisce alla sottrazione di CO₂ all'atmosfera alleggerendo il così detto effetto serra e contrastando quindi il riscaldamento anomalo del clima terrestre.

A fronte di tutto ciò molti professori e ricercatori hanno effettuato prove in laboratorio e simulazioni numeriche per testare la risposta dei materiali porosi alle fluttuazioni di umidità relativa caratteristica degli ambienti interni. Attraverso la simulazione numerica con software dedicati, nella maggior parte degli studi è stato valutato l'impatto che materiali porosi con varie tipologie di rivestimento hanno sui consumi per la climatizzazione e sul confort termo-igrometrico.

Stefanizzi e al. (2015) hanno valutato il comportamento igrometrico di alcuni materiali da rivestimento interno attraverso la determinazione del MBV seguendo il protocollo NORDTEST.

I materiali sottoposti a prova sono: fibra di legno, terra cruda, terra paglia, terra calce, tufo e gesso. La terra cruda è costituita dalle seguenti componenti: argilla(15%), limo(25%), sabbia(58%), pietrischetto(2%). A questo composto sono state aggiunte delle fibre di paglia con una percentuale del 4 % del peso totale per realizzare la miscela di terra paglia.

Sia la fase di preconditionamento a 50%RH e 23°C che la fase di variazione ciclica di umidità (8ore a 75%RH e 16 ore a 33%) sono effettuate in Camera climatica Perani AC250.

L'MBVpratico che caratterizza ciascun materiale è stato ottenuto come media degli MBV in fase di umidificazione a 75%rh e in fase di essiccamento al 35%rh dei diversi provini dello stesso materiale a temperatura costante. Nella tabella si mostrano i dati dei materiali e risultati.

Materiale	Densità [kg/m³]	Area superficie esposta [cm²]	Spessore [cm]	MBV [g/(m²*%RH)]	Classe
Wood MDF(Medium Density Fiberboard)	257	194	1,6	2,36	eccellente

Terra-Cruda	1980	176	4,8	1,88	buono
Terra-Calce	1726	160	5,3	1,84	buono
Terra-Paglia	1384	176	5,3	1,80	buono
Gesso	693	180	1,7	0,75	moderato
Tufo	1830	185	3,2	0,65	moderato

Tabella 4. Tabella caratteristiche campioni e risultati MBV

Il legno Mdf è risultato essere il materiale con il miglior moistur buffer value, mentre i materiali meno performanti risultano essere il gesso e il tufo.

David Allison e Matthew Hall (2011) hanno studiato la capacità di assorbire e rilasciare umidità di materiali ricavati da terra battuta e stabilizzata (Stabilised rammed earth, SRE) basata sul concetto del Moisture Buffer Value (MBV). SRE è una tecnica tradizionale di costruzione in cui materiale proveniente da compattazione di materiali proveniente dal sottosuolo con aggiunta di cemento pari al 10% della massa. E' una tecnica comprovata e usata in tutto il mondo ed è considerato un materiale sostenibile specialmente quando la materia prima è recuperata in loco.

Sono stati sottoposti a prova tre tipologie di campioni identificati attraverso un numero in base alle proporzioni di sabbia, ghiaia e argilla limosa: 433,613 ,703. Quindi 433 corrisponde a 40 % di argilla, 30 % di ghiaia, 30% di argilla limosa (massa secca).

Il Moisture Buffer Value dei SRE è stato calcolato utilizzando il protocollo NordTest che, come già detto, prevede 8 ore al 75% di umidità relativa e 16 ore al 33% RH.

Questo è stato possibile utilizzando due piccole scatole climatiche contenenti soluzioni sature di cloruro di sodio (NaCl) cloruro di magnesio (MgCl₂) per raggiungere i livelli di umidità rispettivamente del 75%rh e 33%rh. Entrambe le camere sono poste all'interno di un'altra camera isolata più grande in cui la temperatura viene mantenuta costante a 23°C. Una limitazione per quanto riguarda questo metodo può essere identificata nel fatto che entrambe le camere non rispondono immediatamente alle variazioni di umidità quando i campioni sono trasferiti da un'ambiente all'altro.

Materiali	Densità [kg/m³]	Area superficiale [cm²]	Spessore [mm]	MBV_{practical} [g/(m²%rh)]
613 SRE	2020	86,6	40	0,68
433 SRE	2120	86,6	40	0,61
703 SRE	1980	86,6	40	1,29

Tabella 5. Caratteristiche, dati geometrici campioni e Risultati. (Istitution of civil Engineers, Allison and Hall, 2011)

I risultati dimostrano che SRE hanno un ampio range di valori di MBV, tra moderato e buono secondo la classificazione di Rode (2005). Ovviamente i campioni non posso essere estremamente rappresentativi e perciò lavorando sulla mineralogia e sulla manifattura del materiale sarà possibile ottenere un range ancora differente.

Un vantaggio aggiuntivo nell'utilizzo di questi materiali è l'usanza di lasciare le loro superfici esposte all'aria interna a differenza del calcestruzzo, mattoni, gesso e legname che normalmente vengono intonacati e verniciati, riducendo la loro permeabilità al vapore e le loro performances.

M.Rahim e al. (2015) hanno invece svolto degli esperimenti su materiali derivanti da colture: il primo è un nuovo bio-materiale chiamato paglia-calce, il secondo è la calce-canapa, e il terzo è fibra di lino-calce. I materiali sono caratterizzati da un'elevata porosità che determina un'elevata capacità di assorbimento e una buona diffusione del vapore.

I test sono volti alla determinazione dell'isoterma di assorbimento, permeabilità al vapore, assorbimento capillare e moisture buffer value(MBV).

Materiale	Spessore provino [cm]	Densità secca [kg/m³]	Area Superficiale esposta [cm²]	MBV [g/(m²*%RH)]
HLC (Hemp-lime-concrete)	3	478	100	1,84
	5		//	1,86
	7		//	2,02
SLC (Straw-Lime-concrete)	3	487	100	2,29
	5		//	2,45
	7		//	2,59
FLC(Flax-Lime-concrete)	3	598	100	2,16
	5		//	2,24
	7		//	2,27

Tabella 6. Confronto in tabella tra i vari materiali utilizzati in laboratorio. E'interessante notare come il MBV aumenti con l'aumentare dello spessore. Infatti per Hemp-Lime-Concrete il MBV aumenta da 1,84 a 2,02 (aumento del 9,7%), Straw-Lime-Concrete da 2,29 a 2,59 (aumento del 13,1%) e Flax-Lime-Concrete da 2.16 a 2,27 (aumento del 5,1%). (Rahim 2015)

In accordo con il protocollo Nordtest lo spessore dei campioni deve essere quello in opera ma comunque non inferiore alla *profondità di penetrazione*, definita come la profondità dove il valore delle variazioni del contenuto di umidità non supera l'1% del valore in superficie.

La profondità di penetrazione è calcolata tramite una variazione sinusoidale di umidità mentre il Nordtest utilizza variazioni a gradino, perciò essa può essere considerata solo come un'approssimazione del reale valore e l'aumento del MBV con l'aumentare dello spessore può essere dovuto a questo fatto.

Materiali porosi ad elevata igroscopicità utilizzati nella costruzione di tramezzi e muri esterni garantiscono buona capacità tampone per smorzare i picchi di umidità negli ambienti. Tuttavia è importante sottolineare come le finiture superficiali delle pareti

interne hanno un ruolo incisivo sulle caratteristiche igroscopiche.

Holcroft e Shea (University of Bath UK, 2014) hanno condotto uno studio sperimentale per paragonare le prestazioni di tre materiali isolanti ricavati da fibre naturali (calce-canapa, fibra di canapa, lana di pecora, fibra di vetro) sia con che senza finiture superficiali (calce, argilla).

In accordo con la ISO 24353 i campioni sono stati esposti a variazioni di umidità tra 53% e 75% con cicli di 12 ore a temperatura costante.

E' stata valutata la Moisture buffer capacity [g/m^2] misurando i pesi dei campioni alla fine dei processi di assorbimento e desorbimento in rapporto all'area superficiale dei provini. I campioni di calce canapa senza finitura hanno mostrato avere la maggiore capacità : circa il doppio della lana di pecora e della fibra di canapa.

Tuttavia questa capacità è notevolmente ridotte dai rivestimenti superficiali: l'argilla sulla calce canapa comporta una riduzione del 65% mentre la calce una riduzione del 78%.

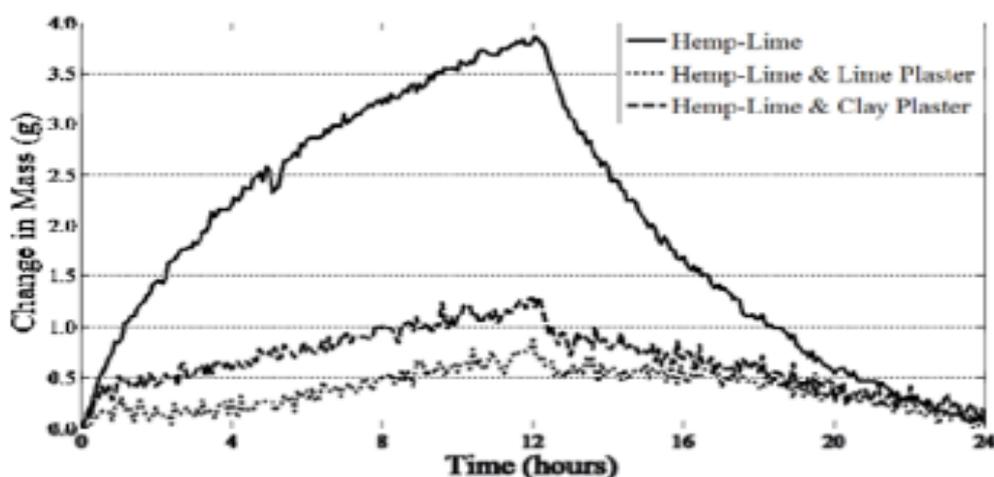


Figure 3. Moisture adsorption and desorption for the hemp-lime samples.

Fig. 3 Curve di assorbimento e desorbimento dei campioni in calce canapa con rivestimento in calce e argilla. (Holcroft e Shea;2014)

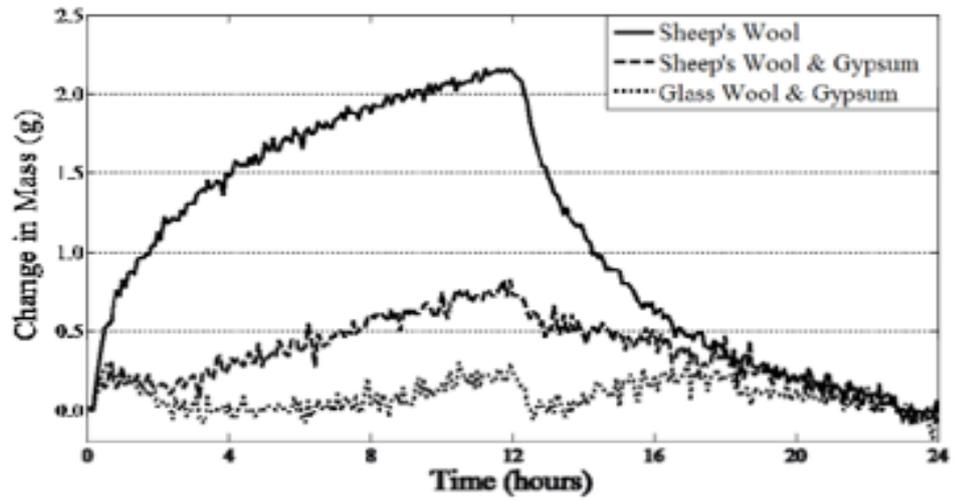


Figure 4. Moisture adsorption and desorption for the sheep's wool samples.

FIG 4. Curve di assorbimento e desorbimento dei campioni in lana di pecora e fibra di vetro con rivestimento in gesso. (Holcroft e Shea ; 2014)

Campagna di misure sperimentali- Protocollo NORDTEST

Per valutare il contenuto di vapor d'acqua all'interno di campioni di materiali porosi abbiamo deciso di seguire le indicazioni fornite nel protocollo NordTest, redatto da Carsten Rode della Technical University of Denmark(DTU).

Lo scopo di questo metodo NORDTEST è di valutare il “moisture buffer value”. Il Moisture Buffer Value è riferito alla massa di acqua assorbita e rilasciata quando il materiale è esposto ad una variazione a gradino di umidità relativa tra il 75% RH per 8 ore e il 33%RH per 16 ore a temperatura costante (23°C). Il valore è poi normalizzato dividendolo per l'area superficiale esposta e la variazione di umidità. Il comportamento igrometrico dei materiali viene in questo caso studiato effettuando misure in condizioni transitorie/dinamiche che consentono poi di ricavare l' $MBV_{pratico}$ in grado di descrivere le capacità igrometriche di tutti i tipi di materiali.

Come detto prima si definisce $MBV_{pratico}$ la quantità di acqua trasportata dal/al materiale attraverso la superficie esposta durante un certo periodo di tempo in presenza di variazioni di umidità relativa dell'aria circostante, quindi:

$$MBV_{pratico} = \frac{\Delta m}{A(\phi_{alta} - \phi_{bassa})} \quad \left[\frac{kg}{m^2 \Delta \%RH} \right]$$

Dove Δm è la media della massa di acqua adsorbita/ceduta dal materiale ed A è la superficie esposta del provino. Il protocollo fornisce inoltre una classificazione dei materiali in funzione del valore assunto dall' $MBV_{pratico}$.

Classe di $MBV_{pratico}$	Livello minimo ($g/(m^2 \cdot \%rh)$)	Livello massimo ($g/(m^2 \cdot \%rh)$)
Trascurabile	0	0,2
Limitato	0,2	0,5
Moderato	0,5	1,0
Buono	1,0	2,0
Eccellente	2,0	...

Tabella 7. Classi di $MBV_{pratico}$ dei materiali. [Rode, 2005]

Si è scelto di utilizzare il protocollo Nordtest poiché rispetto alla JIS [11] e alla ISO[12]

:

- Utilizza cicli di 24 ore corrispondenti alle ore di un intero giorno. Questo facilita i tempi di accesso ai locali in cui è posta la camera climatica in dotazione al CNR presso cui sono state svolte queste misure e soprattutto riduce i tempi di misura che per alcuni materiali come il legno a meno di sollecitazioni estreme impiegherebbero molto più tempo per assorbire/rilasciare umidità.
- Il ciclo è diviso in 8 ore di massima umidità e in 16 ore di minima umidità per riprodurre lo stesso andamento di umidità negli ambienti interni ad occupazione saltuaria. che come nelle residenze e in particolare nelle camere da letto o negli uffici sono caratterizzati da circa 8 ore di massimo carico interno.
- Definisce un unico valore, l' $MBV_{pratico}$ per la caratterizzazione igrometrica dei materiali permettendo così una classificazione e un paragone con altri materiali.

Strumentazione

Per il corretto svolgimento della prova è necessario reperire o costruire una camera climatica in cui i campioni del materiale scelto subiscono variazioni di umidità a temperatura costante di 23°C come precedentemente detto e in cui fosse anche possibile monitorare l'andamento dell'umidità e della temperatura all'interno di essa.



L'aria all'interno della camera dovrebbe circolare ad una velocità di circa 0.10+/- m/s come in un normale ambiente interno.

Fig 5. Camera climatica nel laboratorio

I campioni devono essere pesati alla fine di ogni esposizione di umidità e per farlo è richiesta una bilancia analitica capace di pesare con una precisione dell'1% della variazione di peso. Perciò se un provino cambia il proprio peso di 1g durante l'assorbimento o il desorbimento la bilancia deve avere una risoluzione di 0.01g o migliore.

Le nostre misure sono state effettuate presso i laboratori dell'Istituto per la Conservazione e la Calorizzazione dei Beni Culturali (ICVBC) del Consiglio nazionale per le ricerche (CNR), con il quale il Dipartimento di Ingegneria Industriale ha stipulato una Convenzione-Accordo di collaborazione e ricerca, quindi all'interno di una camera climatica Angelantoni CH500. Le misure/pesate invece sono state effettuate con una bilancia digitale KERN & Sohn modello EG620-3NM con risoluzione $d=0.001g$.

Ricordiamo che l'umidità del legno è definita come la quantità di acqua contenuta in un campione rapportata al peso dello stesso campione anidro (completamente secco, senza acqua). Viene espressa in percentuale e può assumere valori da 0% a oltre il 100%: in questo caso il peso dell'acqua presente in un campione è maggiore di quello del legno anidro.

Il metodo per la determinazione dell'umidità del legno è noto come metodo per pesata e trova applicazione nella pratica di laboratorio. Prevede di misurare il peso del campione prima e dopo la completa essiccazione in stufa a 103°C. Il campione viene considerato

anidro quando due pesate successive, a distanza di due ore, danno lo stesso valore. Il metodo per pesata è quello di riferimento per la determinazione dell'umidità di un campione di legno ed è descritto nella normativa tecnica di settore nel documento UNI EN 13183-1: Umidità di un pezzo di legno segato - Determinazione tramite il metodo per pesata. Gli svantaggi di questa procedura sono dovuti alla lunghezza temporale del processo di essiccazione del legno fino a peso costante (24 ore circa per un campione di 2x2x3 cm), alle attrezzature necessarie e all'impossibilità di riutilizzare il campione disidratato in stufa. Questi problemi hanno reso necessario lo sviluppo di metodi per la misura dell'umidità del legno di semplice applicabilità e in grado di fornire un risultato immediato, come gli igrometri a contatto ed elettronici .

In questa ottica è stato impiegato uno strumento elettronico utilizzato per valutare il contenuto di umidità all'interno dei materiali, lo Scanttronik Mugrauer GmbH con il relativo modulo di estensione nominato Material Moisture Gigamodule collegato al Data logger Termofox Universal per la registrazione di tutti i dati in continuo in uscita dai sensori.



Questo sensore universale (modulo di estensione) Material Moisture Gigamodule è stato sviluppato in particolare per l'analisi dell'umidità di diversi materiali (ad esempio legno, calcestruzzo etc.)

Esso fa parte degli strumenti di misura detti igrometri elettrici. I misuratori elettrici non misurano direttamente la quantità d'acqua contenuta nel legno, ma la resistenza elettrica che dipende, a sua volta, (secondo leggi note ed empiricamente verificabili), dalla quantità di acqua presente nel legno. Consentono una misura indiretta dell'umidità del legno. Esistono due tipi di strumenti basati su proprietà: proprietà elettriche del legno al passaggio di corrente (misuratori a resistenza); proprietà dielettriche del legno in un campo elettrico ad alta frequenza (misuratori dielettrici). Gli strumenti basati sulle proprietà dielettriche del legno in un campo elettrico ad alta frequenza possono essere basati su: costante dielettrica (relazione tra contenuto di umidità e costante dielettrica) (misuratori a capacità); fattore di perdita dielettrica (relazione tra contenuto di umidità e fattore di perdita dielettrica)

(misuratori a dissipazione). Lo scantronik appartiene alla categoria dei misuratori elettrici e quindi è provvisto di igrometro elettrico a resistenza. Lo strumento indica il valore di umidità più elevato del legno che si trova a contatto con gli elettrodi (in genere chiodi e/o viti). Per tenere conto degli eventuali gradienti di umidità, gli elettrodi possono avere il gambo isolato, le punte vengono infisse fino a $1/4 \div 1/5$ dello spessore del segato ($1/6$ nel caso di assortimenti tondi).

La resistenza elettrica del legno varia molto in funzione del suo contenuto d'acqua, in particolare nell'intervallo di umidità compreso fra 0% ed il punto di saturazione delle pareti cellulari (circa 30%). In questo intervallo di umidità del legno (noto come campo igroscopico) esiste una relazione matematica quasi lineare fra il logaritmo della conduttanza e il logaritmo dell'umidità del legno. In pratica, al decrescere dell'umidità del legno dal valore del punto di saturazione delle pareti cellulari la conduttanza decresce di un fattore superiore a 10 milioni, quindi con un'ampia variazione.

Il sistema è dotato di 8 ingressi permettendo così l'analisi simultanea di otto diversi materiali.

Questo strumento ha la possibilità per una varietà di legni di misurare direttamente ed in continuo il contenuto di umidità, altrimenti si ha la possibilità di selezionare come dato in uscita la resistenza elettrica del campione la quale, in seguito ad un aumento del contenuto di umidità diminuirà e viceversa aumenterà. Tutto ciò è possibile grazie a due elettrodi metallici inseriti dentro al materiale a cui successivamente vengono collegati i cavi in uscita dal Material Moisture Gigamodule.

Grazie al suo campo di misura straordinariamente grande può misurare sia materiali secchi (legno inferiore al 6%Wg (percentuale umidità in percentuale in peso) cioè resistenza materiale elettrico > 100 GOhm) che materiali molto umidi (legno oltre il 90%Wg cioè resistenza materiale elettrico < 10 kOhm) in modo rapido e affidabile. Lo

strumento ammette un errore dell'1% su fondo scala. Se viene collegato il modulo di estensione per esempio al data-logger Thermofox Universal c'è anche la possibilità di registrare la temperatura superficiale dei campioni tramite sensori di temperatura con cavo (rosso). Nel nostro caso abbiamo inserito un sensore di temperatura sulla superficie di un campione alternativo di legno all'interno della camera climatica in cui sono posti tutti gli altri campioni.



Provini e fase di condizionamento

Le dimensioni dei campioni non sono imposte dal protocollo tuttavia ci sono alcune limitazioni riguardo l'area superficiale, lo spessore e consigli sul metodo per sigillare il campione.

Sono consigliati campioni quadrati o rettangolari pur che la lunghezza minima di uno dei lati della superficie esposta sia almeno 100 mm, mentre l'area superficiale minima esposta deve essere di 100mm².

Per garantire che l'assorbimento avvenga solo attraverso una faccia del campione è opportuno sigillare con un nastro adesivo di alluminio cinque facce delle sei disponibili. Per quanto riguarda lo spessore esso deve essere uguale o maggiore della profondità di penetrazione definita nel NordTest come $d_{p1\%}$ ossia come la distanza dalla superficie del materiale in corrispondenza della quale la variazione di umidità relativa è pari all' 1% della variazione di umidità relativa superficiale.

Qualora non si possa calcolare direttamente tale quantità, ci possiamo riferire a dati disponibili in letteratura.

Materiali testati

I materiali sottoposti a prova sono: un multistrato in pioppo, multistrato marino okuomè e campioni di calce-canapa di cui riportiamo dati in tabella.

Il compensato è un pannello a base di legno, composto da un insieme di sfogliati, solitamente dispari, disposti con fibre perpendicolari tra loro e resi solidali mediante incollaggio con resine sintetiche termoindurenti e pressatura a caldo.

Il procedimento per ottenere pannelli di legno compensato consiste infatti nello "sfogliare" il tronco d'albero con un apposito tornio in grado di tagliare uno strato molto sottile di legno (1-3 mm), incollando poi i fogli fra loro in modo da "incrociare le venature".

Questo incrocio fa sì che la resistenza del materiale sia uniforme in tutte le direzioni, perché la resistenza del legno lungo le venature non si manifesta ugualmente in tutte le direzioni.

L'incrocio delle venature fa sì che le caratteristiche meccaniche del legno, tipicamente unidirezionali, vengano "compensate" in una direzione ortogonale, da cui il nome. Quando gli strati sono più di tre, i pannelli vengono chiamati multistrati.

Il multistrato perciò non è altro che un certo numero di compensati, pressati tra loro in fabbrica, con colle a caldo, che formano pannelli con spessori differenziati.

Sono stati selezionati due differenti tipi di campioni di multistrato: il primo è un campione di multistrato in Pioppo che gode di ottima facilità di lavorazione e versatilità negli impieghi (dal settore del mobile agli impieghi strutturali in alternativa ad altri materiali o nella finitura di interni per porte, finestre, pareti interne), il secondo è un Compensato Marino in Okoumè ad incollaggio fenolico o melamminico il quale si distingue per le ottime caratteristiche di durabilità e le elevate prestazioni di resistenza meccanica, pur avendo un peso specifico contenuto. Il Compensato Marino in Okoumè risulta essere impiegato molto nel settore nautico e nell'uso esterno, in quanto è in grado di resistere egregiamente alle condizioni limite di esercizio (ottima durabilità in ambienti con alto grado di umidità anche salina).

Sulla superficie esposta di tutti e tre i campioni in legno sono stati praticati dei fori ad una distanza di 3cm lungo una delle due diagonali e inseriti fino alla profondità di 7 mm, un valore tra $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{5}$ dello spessore di 2,5 cm . All'interno sono stati inseriti gli elettrodi necessari per collegare lo strumento Scantronik e i relativi cavi per l'analisi della resistenza offerta dal materiale.

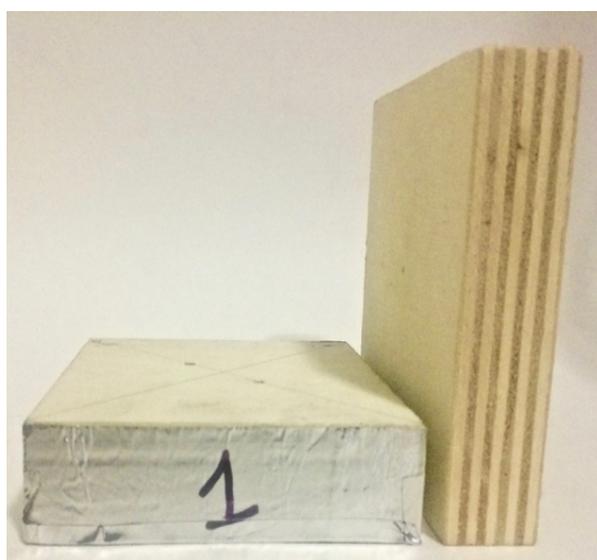


Fig 6. Primo campione multistrato in Pioppo



Fig 7. Secondo campione compensato marino, Okoumè

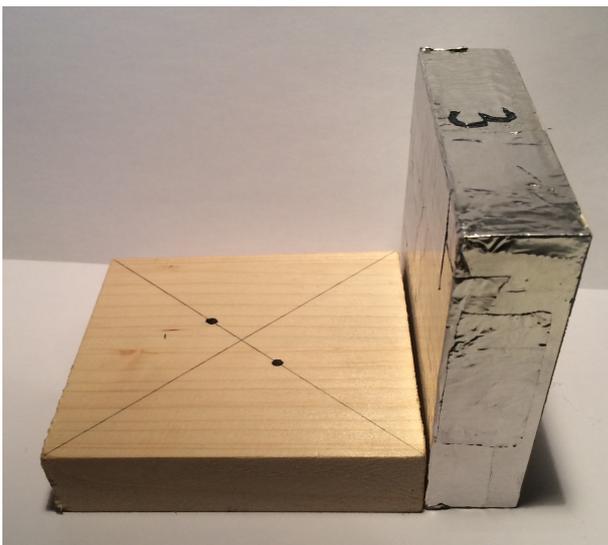


Fig 8. Terzo campione massello Abete

La calce-canapa è un materiale biocomposito ottenuto dalla combinazione della parte legnosa dello stelo di canapa, conosciuto come canapulo ed un legante a base di calce idraulica naturale e grassello di calce magnesiaco. La canapa fa da materiale riempitivo leggero (100 kg/m^3), detto aggregato, mentre la calce da legante e conservante.

I campioni sono stati ricavati da un blocco prefabbricato in calce e canapa, gentilmente concesso dall'azienda La Banca della Calce - CalceCanapa®, tagliandolo al fine di ricavare un parallelepipedo a base quadrata di $100 \times 100 \text{ mm}$ di area superficiale esposta e uno spessore di 50 mm .



Fig 9. Campione B CalceCanapa

Sono stati realizzati 4 campioni delle stesse dimensioni e sono stati tutti sigillati con nastro adesivo in alluminio per cinque delle sei facce in modo tale da concentrare lo scambio di vapor d'acqua esclusivamente attraverso una superficie come avviene poi anche nella realtà. Il materiale ha una bassa densità pari a 300 kg/m^3 e una elevata disomogeneità che dipende

dalla grandezza dei canapuli e dalla disposizione casuale di essi all'interno della struttura che si viene a formare.

Data l'elevata porosità e igroscopicità del materiale CalceCanapa oltre ad una superficie irregolare e disomogenea, ci si aspetta un maggior assorbimento di vapore rispetto a quelli in legno, tuttavia è importante sottolineare come in uso comune i prefabbricati in calce e canapa sono rivestiti con intonaci e vernici, che ne riducono notevolmente la permeabilità al vapore e quindi anche la capacità di interagire con l'ambiente interno, al fine di smorzarne i picchi di umidità. Perciò in fase di progettazione sarà importante evitare intonaci poco porosi cementizi o a base di gesso, né a bassa traspirabilità.

Campioni	Densità[kg/m^3]	Area superficiale[cm^2]	Spessore[cm]
Multistrato Pioppo	400-420*	110	2,5
Multistrato Okoumè	450*	110	2,5
Abete	420*	110	2,5
CalceCanapa A	300	100	5
CalceCanapa B	300	100	5
CalceCanapa C	300	100	5
CalceCanapa D	300	100	5

la descrittiva dei materiali. * valori medi riferiti ad umidità del 12%

Fase di Precondizionamento

Prima di essere sottoposti al test i campioni devono essere all'equilibrio con l'aria a 23°C e 50% RH all'interno della camera climatica. Per questo si effettua una fase di precondizionamento all'interno della camera climatica. Le condizioni di equilibrio sono raggiunte quando due successive misure di peso dei campioni a distanza di 24 ore differiscono al massimo dello 0,1%. I campioni di legno dopo quattro giorni erano al di sotto dell'0,1% mentre per i campioni in canapa non avendo la possibilità di pesare i provini durante il fine settimana nel calcolo della differenze di peso abbiamo fatto riferimento alla misura del venerdì. Perciò le misure del peso dei provini in calce-canapa tra il venerdì e il lunedì discostano di un valore compreso tra il 0,48% e 0,69%.



Fig 10. Campioni di legno e CalceCanapa in camera climatica durante la fase di precondizionamento.

Tuttavia per questioni di tempo e disponibilità della camera abbiamo deciso di iniziare la prova comunque.

	PESI[g]		
	04-nov	04-nov	07-nov
ORA	11.00	17.00	8.30
Multistrato Pioppo	131,725	131,724	131,672
Multistrato Okoumè	148,326	148,317	148,274
ABETE	120,139	120,13	120,077
CalceCanapa A	201,773	201,963	202,938
CalceCanapa B	208,099	208,352	209,649
CalceCanapa C	223,048	223,293	224,784
CalceCanapa D	205,939	210,703	212,176

Tabella 9. Variazione peso provini durante le 72h di

A partire dalla fase di preconditionamento sono stati collegati tre cavi dello strumento Scanntronik da una parte nel modulo Material Moisture Gigamodule e dall'altra agli elettrodi inseriti all'interno dei campioni in legno iniziando così a monitorare la presenza di umidità all'interno del campione anche in fase di equilibrio.

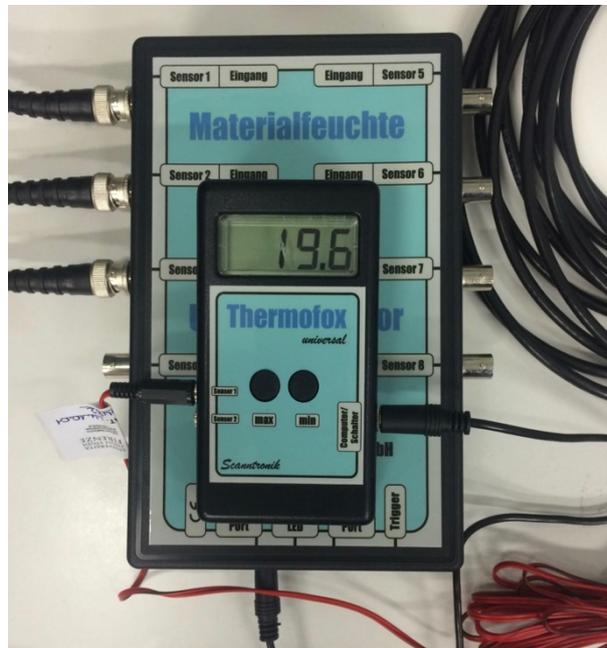


Fig 11. Scanntronik, Material Moisture Gigamodule, Thermofox data logger.

I dati sono trasferiti dal modulo Material Moisture Gigamodule al data logger Thermofox con un intervallo di misura che abbiamo fissato ogni 15 minuti. Collegando il data logger al computer è stato possibile visualizzare le variazioni di resistenza elettrica dei campioni collegato in funzione del tempo. Lo strumento come già detto è stato impostato per monitorare e registrare l'andamento della resistenza elettrica all'interno del materiale sottoposto al test dando come dato in uscita un valore detto "Reading" che corrisponde a :

$$\text{Reading}=10*\log(R) \quad \text{quindi} \quad R=10^{(\text{Reading}/10)} \text{ [Ohm]}$$

Dove il valore R corrisponde quindi alla resistenza misurata in Ohm. La resistenza elettrica è una grandezza fisica che misura la tendenza di un componente elettrico di opporsi al passaggio di una corrente elettrica quando è sottoposto ad una tensione

Una volta caricati i dati sul computer è possibile convertire direttamente il valore della resistenza nel contenuto di umidità in percentuale di peso $W_g\%$ per un certo numero di materiali preimpostati in memoria. La percentuale di umidità in peso del materiale è definita come: $W_g\% = \text{Percent by weight}[in \%] = \frac{ww-dw}{dw}$.

Dove ww è il peso umido del materiale e dw è il peso secco del materiale

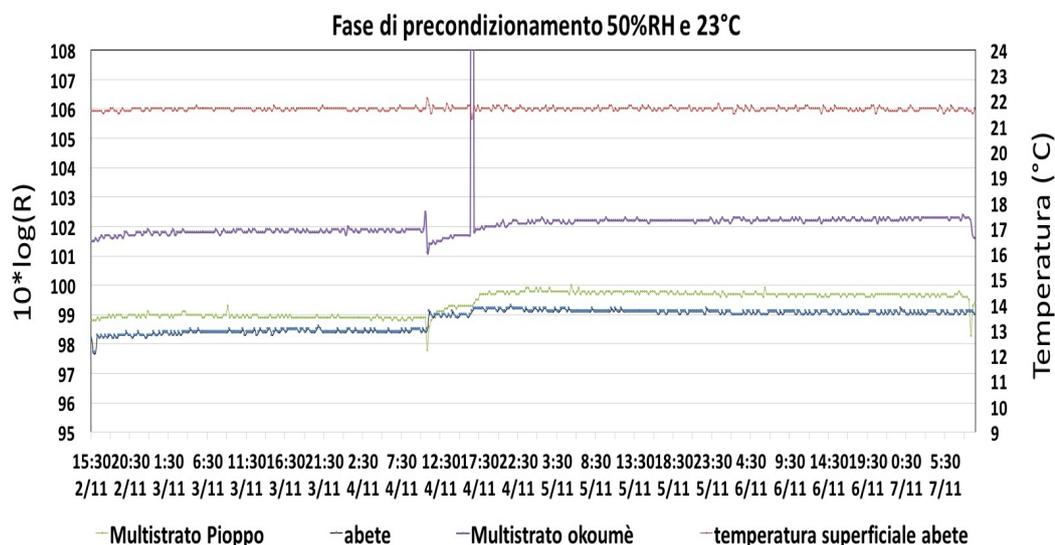


Fig 12. Andamento della resistenza ($10 \cdot \log(R)$) in funzione del tempo durante la fase di preconditionamento a 50%RH e 23°C

Osservando i valori del logaritmo della resistenza (READING) insieme ai dati derivanti dalle pesate effettuate ogni 24 ore si osserva come dopo circa 56 ore i campioni in legno avevano già raggiunto un equilibrio nei confronti delle condizioni al contorno in fase di preconditionamento con valori di Reading che variano da un valore minimo nell'abete, pari a 99 ovvero circa 8,13 Gohm ottenuto come media dei valori durante le ultime 24 ore, ad un valore massimo per il campione in multistrato di Okoumè di Reading 102,3 pari a 16,95 [Gohm] sempre calcolato come la media dei valori nelle ultime 24 ore.

La temperatura superficiale del campione di abete, misurata applicando un sensore sulla superficie legnosa, anch'esso collegato al data logger Thermofox ha registrato valori oscillanti attorno ai 22°C.

Esposizione ciclica alle variazioni di umidità

I provini preconditionati sono stati sottoposti, in camera climatica Angelantoni CH500 alle variazioni cicliche di umidità relativa come imposte dal NordTest. Ogni ciclo è durato 24 ore, diviso in 8 ore di umidità a 75% e 16 ore di umidità al 33% a temperatura costante di 23°C. I cicli compiuti sono stati in totale 4.

Per ogni ciclo, alla fine sia delle 8 che delle 16 ore, i provini sono stati prelevati dalla camera climatica e pesati al di fuori di essa. Questo ha comportato una leggera perturbazione della macchina per il livello di umidità più alto.

Gli esperimenti sono stati effettuati fino a quando il comportamento ciclico dei campioni si è stabilizzato e quindi quando si è verificato che il cambiamento della massa Δm calcolato per ogni ciclo come la media tra la variazione dei pesi nelle 8 ore di assorbimento e la variazione dei pesi nelle 16 ore di essiccamento, risultasse inferiore al 5% del Δm del ciclo precedente per almeno gli ultimi tre cicli.

$$\Delta m = \frac{(m_8 - m_0) + (m_8 - m_{16})}{2} \quad [g]$$

La verifica del raggiungimento della stabilizzazione dei cicli è risultata positiva per tutti i materiali dopo 4 cicli di 24 ore sia per i provini in legno che per quelli in CalceCanapa.

Risultati

Al raggiungimento dell'equilibrio, necessario perché l'influenza dello spessore del provino sia del tutto trascurabile e quindi sia nullo il gradiente di umidità tra strati interni ed esterni, sono stati estratti i dati contenuti nel DataLogger Thermofox per i campioni in multistrato e il campione di abete.

E' stato costruito un grafico che riporta la variazione di resistenza dei materiali in funzione del tempo. Assieme a questi valori sono riportati anche i dati relativi alla temperatura superficiale di un campione di abete (linea blu) e della temperatura esterna alla camera climatica (linea rossa).

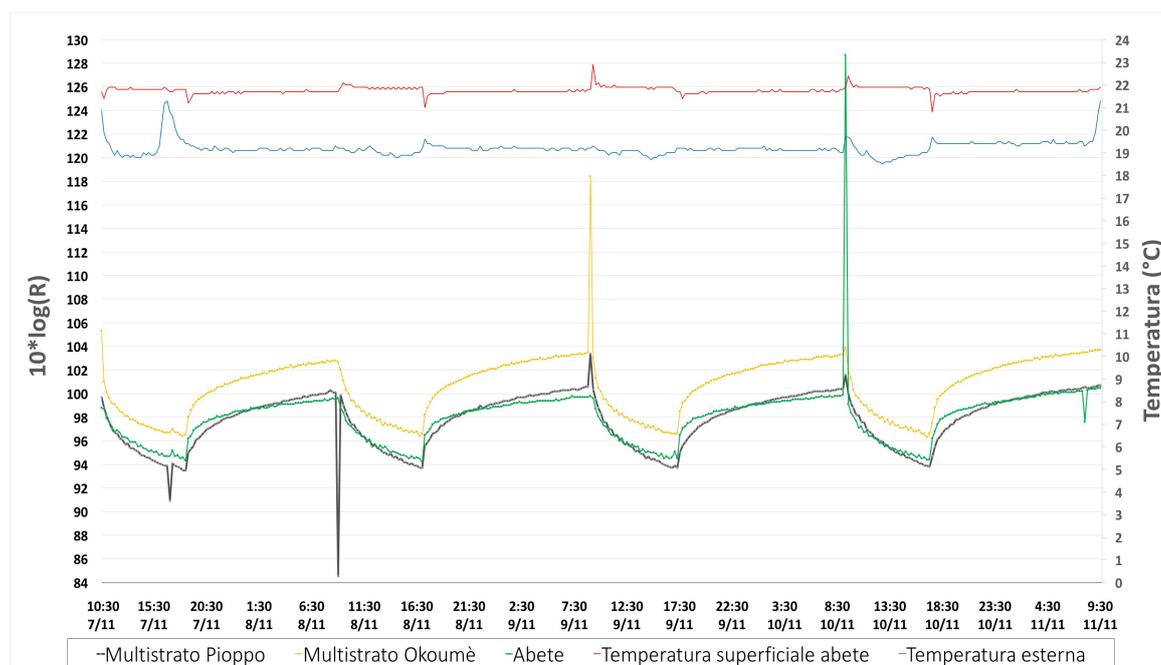


Fig 13. Temperatura interna ed esterna alla camera e variazione Resistenza in scala logaritmica dei campioni.

Questo strumento è risultato molto utile in quanto ci ha permesso di monitorare costantemente nel tempo i valori della resistenza dei campioni soggetti a variazione di umidità. L'obiettivo è quello di osservare e caratterizzare la capacità dei materiali testati di assorbire e rilasciare vapore d'acqua al variare delle condizioni di umidità al contorno utilizzando due procedure di misura in riferimento al metodo validato a livello internazionale del NordTest, ovvero quella derivante dall'impiego dello strumento Scanntronik e quella basata sulle pesate dei campioni alla fine di ogni ciclo.

Dai grafici è facilmente visibile come al decrescere dei valori di resistenza si registri difatti un aumento del contenuto di umidità in percentuale di peso all'interno dei campioni, mentre al crescere dei valori di resistenza si ha una diminuzione in percentuale di peso del contenuto di umidità.

In particolare, per il legno in genere l'effetto dell'umidità è maggiore rispetto a quello degli altri fattori. Il legno allo stato anidro è un materiale altamente isolante assimilabile alla porcellana ed alla paraffina: $3 \times 10^{14} \Omega \text{m}$. All'aumentare dell'umidità la resistenza elettrica si riduce ed il legno saturo si comporta come l'acqua. I cambiamenti di resistenza elettrica (e di conduttività elettrica) sono notevoli nell'intervallo di umidità tra lo stato anidro e il punto di saturazione delle pareti cellulari, passando $\rho = 3 \times 10^{15} \div 3 \times 10^{15} \Omega \text{m}$ a $\rho = 3 \times 10^4 \div 3 \times 10^4 \Omega \text{m}$. Al di sopra del punto di saturazione delle pareti cellulari le variazioni si fanno più ridotte. Nella regione tra lo stato anidro e il punto di saturazione la resistenza si riduce di oltre un miliardo di volte, mentre tra il punto di saturazione e l'umidità massima la riduzione è solo di circa 50 volte. Inoltre nel legno allo stato anidro la resistenza elettrica aumenta al diminuire della temperatura, infatti, raddoppia per ogni calo di temperatura pari a $12,5^\circ\text{C}$

Non conoscendo la relazione che lega la resistenza al contenuto di umidità per i due campioni in multistrato ma solo quella relativa al massello di abete, delle curve in questione è possibile fare solo un'analisi comparativa tra la variazione della resistenza elettrica: ciò che risulta più evidente sono i valori di resistenza del compensato marino in Okoumè più elevati rispetto agli altri legni. Alla fine di ogni ciclo di assorbimento e desorbimento i provini sono stati pesati, per cui è stato possibile. A parità di condizioni al contorno si può osservare quale sia il materiale che scambia un maggior quantitativo di umidità. Il compensato in Okoumè è il legno che assorbe il minor quantitativo di umidità dall'ambiente esterno con un valore medio di massa di acqua assorbita e desorbita nei cicli stabili pari a 0,31g.

Il Multistrato di pioppo presenta invece dei valori di resistenza durante le fasi di assorbimento e desorbimento prossimamente vicini a quelli dell'abete ma con un'ampiezza maggiore nell'intervallo tra i picchi di resistenza. tuttavia non è possibile dire che è stato scambiato un maggior quantitativo di umidità. Anzi se si fa riferimento ai dati relativi alle pesate si osserva che la media tra la massa assorbita e desorbita all'interno di un intero ciclo risulta inferiore al massello di abete (0,36 g) e circa uguale a quella del multistrato in Okoumè (0.31g).

	07-nov	07-nov	08-nov	08-nov	09-nov	09-nov	10-nov	10-nov	11-nov
ORA	8.30	17.30	9.00	17.00	9.00	17.00	9.00	17.00	9.00
Multistrato Pioppo	131,672	131,86	131,569	131,857	131,528	131,818	131,504	131,804	131,479
Multistrato okoumè	148,274	148,466	148,159	148,458	148,118	148,419	148,094	148,395	148,06
ABETE	120,077	120,313	119,968	120,313	119,929	120,282	119,908	120,275	119,897
CAMPIONE A	202,938	203,741	202,958	203,958	203,009	203,995	203,061	204,068	203,085
CAMPIONE B	209,649	210,466	209,67	210,775	209,795	210,842	209,872	210,954	209,938
CAMPIONE C	224,784	225,718	224,885	226,053	225,007	226,123	225,089	226,189	225,169
CAMPIONE D	212,176	213,014	212,395	213,365	212,568	213,49	212,713	213,632	212,827

Tabella 10. Misure di peso effettuate alla fine di ogni ciclo di assorbimento e desorbimento per i campioni in calce-canapa e legno.

Si riportano i valori Δm degli ultimi tre cicli ottenuti come la media tra il peso acquisito in fase di alta umidità e perso in fase di bassa umidità di tutti i campioni.

I cicli terminano quando lo scostamento tra una variazione di massa e quella precedente risulti inferiore al 5% per almeno gli ultimi 3 cicli.

	Δm_2	Δm_3	Δm_4
Multistrato Pioppo	0,3085	0,302	0,3125
Multistrato Okoumè	0,3195	0,313	0,318
Abete	0,3645	0,3635	0,3725
CalceCanapa A	0,9745	0,96	0,995
CalceCanapa B	1,0425	1,0085	1,049
CalceCanapa C	1,107	1,052	1,06
CalceCanapa D	0,8835	0,8495	0,862

Tabella 11.. Media tra la massa assorbita e desorbita nei vari cicli.

Confrontando invece i dati relativi ai campioni in CalceCanapa si osserva che la media tra la massa assorbita e desorbita durante i cicli è in media tre volte superiore a quella cambiata dai campioni in legno sottoposti a test.

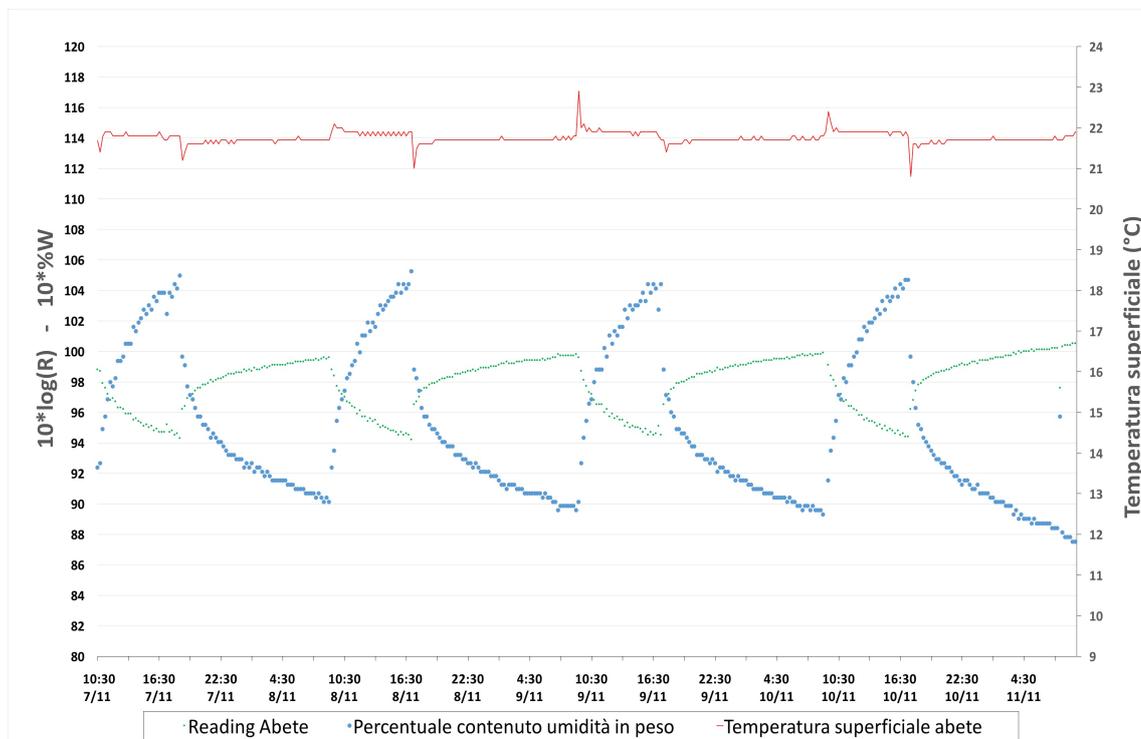


Fig 13. Temperatura superficiale abete, resistenza abete[ohm], percentuale variazione umidità in peso del campione in Abete.

Per quanto riguarda esclusivamente il campione in abete è stato possibile convertire direttamente il valore della resistenza in contenuto di umidità in percentuale rispetto al peso secco. Dal grafico si può osservare l'andamento del contenuto di umidità in percentuale di peso nel tempo. Dove la curva (azzurra) cresce si registra un aumento di peso corrispondente alla fase di assorbimento, dove decresce, una diminuzione di peso dovuta al desorbimento.

E' stata quindi ricavata una curva esponenziale di calibrazione che mette in relazione direttamente il contenuto di umidità con la resistenza calcolata con lo strumento Scanntronik utilizzando tutti i rispettivi valori assunti dal campione di abete:

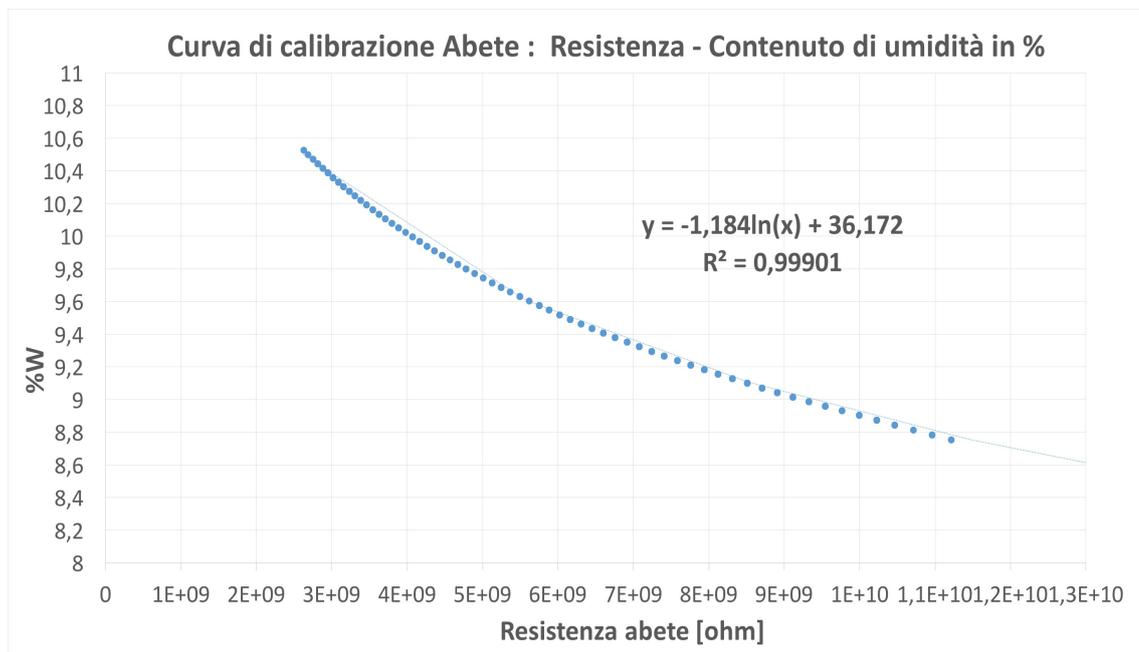


Fig 14. Curva di calibrazione abete. Resistenza- contenuto di umidità in percentuale di peso.

Inoltre facendo riferimento ai valori delle pesate effettuate alla fine di ogni ciclo di alta e bassa umidità è possibile confrontarli con i valori in uscita dallo strumento in termini di variazioni in percentuale di peso.

Esprimere però il contenuto di acqua presente nel tessuto legnoso in valore assoluto non darebbe alcun parametro coerente di valutazione. Si ricorre perciò alla quantificazione dell'acqua contenuta, mediante la percentuale di umidità riferita al "peso anidro", cioè al peso del legno assolutamente secco, applicando il metodo descritto nella vigente normativa tecnica di riferimento (UNI EN 13183-2 "Umidità di un pezzo di legno segato-Determinazione tramite il metodo per pesata"). Il campione è stato posto in stufa a 103° finché la differenza tra una pesata e l'altra a distanza di 24 risultasse inferiore allo 0,1%.

L'aumento in percentuale di peso come già detto viene ricavata tramite la seguente equazione: $W_g\% = Percent\ by\ weight[in\ \%] = \frac{ww-dw}{dw}$

Dove:

ww rappresenta il peso umido legno cioè il peso del legno al momento in cui se ne vuole determinare il contenuto di umidità, ricavato come media dei pesi del campione dopo la fase di assorbimento $ww=120,294\ g$

dw= peso anidro del campione $dw=110,683g$

Quindi utilizzando i dati provenienti dalle pesate registrate alla fine di ogni fase si può perciò dire che la percentuale di umidità in peso (rispetto al peso anidro) dopo la fase di assorbimento assume un valore pari a :

$$\%W = \frac{120,294 - 110,683}{110,683} = 8,68\%$$

Osservando invece i dati in uscita dallo Scantronik ed effettuando una media tra i valori di picco delle percentuali di umidità dopo la fase di assorbimento si osserva che il contenuto di umidità riferito al peso secco è pari a :

$$\%W = 10,45 \%$$

Confrontando i dati provenienti dallo Scantronik e dalle pesate effettuate, si può osservare come lo strumento elettronico in realtà misuri un peso medio dopo la fase di assorbimento 1,55 % più alto di quello effettivo misurato con la bilancia.

Questo può essere dovuto sia alla taratura dello strumento che utilizza curve di calibrazione ottenute a 25°C o anche in parte alle perturbazioni della camera e del provino in fase di misura e dal fatto che comunque la corrente scorre parallela alla fibratura per valori di umidità superiori al 20%. In letteratura poi non sono ben chiari gli effetti tra la massa volumica e la resistenza elettrica: in genere viene in più casi riportato che a parità di umidità esiste un'analogia tra massa volumica della specie legnosa e resistenza elettrica, ovvero quando la massa volumica raddoppia la resistenza elettrica si dimezza.

Infine abbiamo inserito gli elettrodi e collegato allo strumento elettronico Scantronik anche due campioni in CalceCanapa e nuovamente nel massello di abete in modo tale da poterne confrontare i valori di resistenza per 4 cicli consecutivi in cui però la camera climatica è rimasta sempre chiusa senza perturbazioni.

I campioni in CalceCanapa data la loro disomogeneità e discontinuità presentano valori di assorbimento maggiori rispetto ai campioni in legno: in media le variazioni di massa sono circa 3 volte superiori a quelle del legno. Nell'immagine sottostante sono posti a confronto le due resistenze dei campioni in CalceCanapa e in massello di abete.

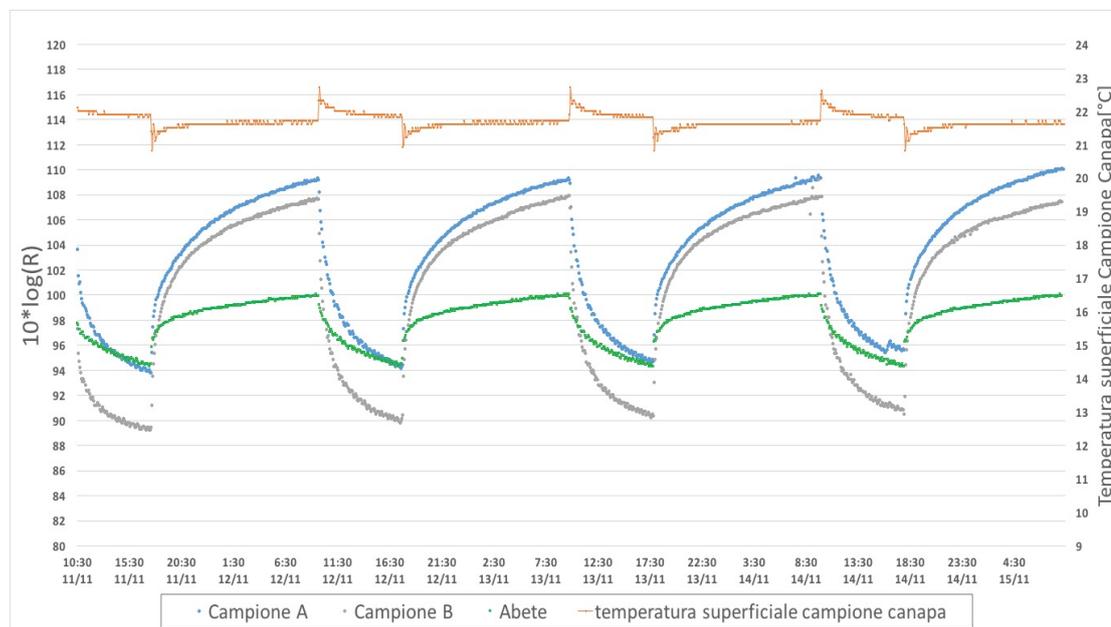


Fig. 15. Variazione $\log(R)$ in funzione del tempo di due campioni in canapa e un campione in abete

Per quanto riguarda invece le variazioni di resistenza il primo campione in calce canapa A ha una variazione di resistenza media pari a 78,74 [gohm] mentre il campione B ha una variazione di circa 57,29[Gohm]. Il campione in massello di abete invece presenta variazioni di resistenza ridotte rispetto ai campioni in calcecanapa che si attestano attorno ai 6,9 [Gohm]

Determinazione $MBV_{pratico}$

Il protocollo infine, una volta raggiunto l'equilibrio in termini di massa scambiata con l'ambiente esterno durante i cicli, ci porta a calcolare un valore $MBV_{pratico}$ che caratterizza ciascun materiale, il quale è stato ottenuto come media degli MBV calcolati per ogni ciclo. La variazione della massa Δm è intesa come media tra la massa assorbita e la massa persa nella fase di desorbimento mentre il MBV è calcolato come segue facendo riferimento anche all'area superficiale A del singolo campione e la variazione di umidità.

$$MBV_{pratico} = \frac{\Delta m}{A(\phi_{alta} - \phi_{bassa})} \quad \left[\frac{kg}{m^2 \Delta \%RH} \right]$$

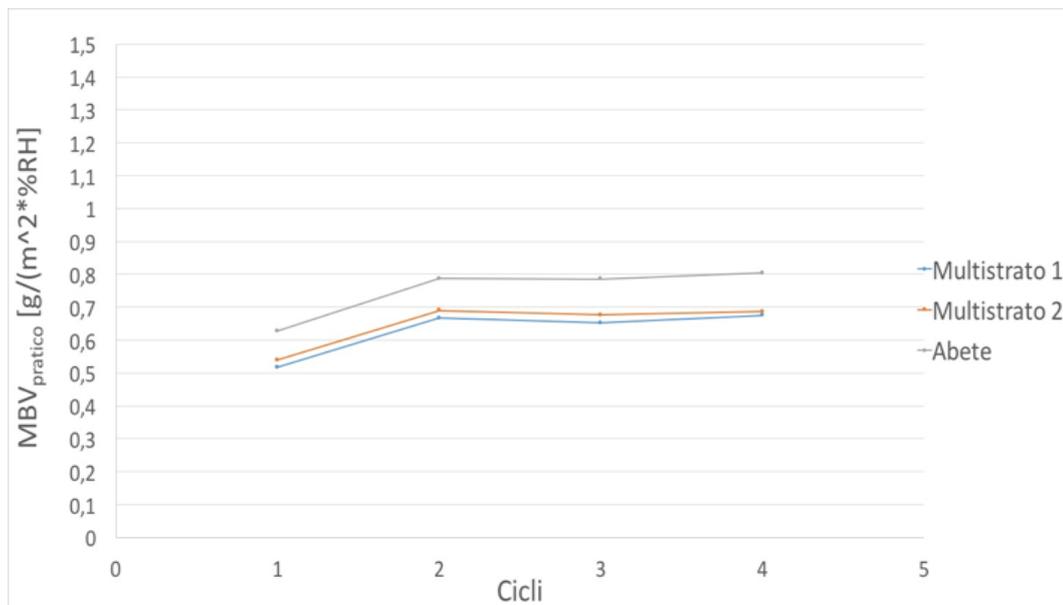


Fig 16. Andamento MBV dei campioni in legno durante i cicli.

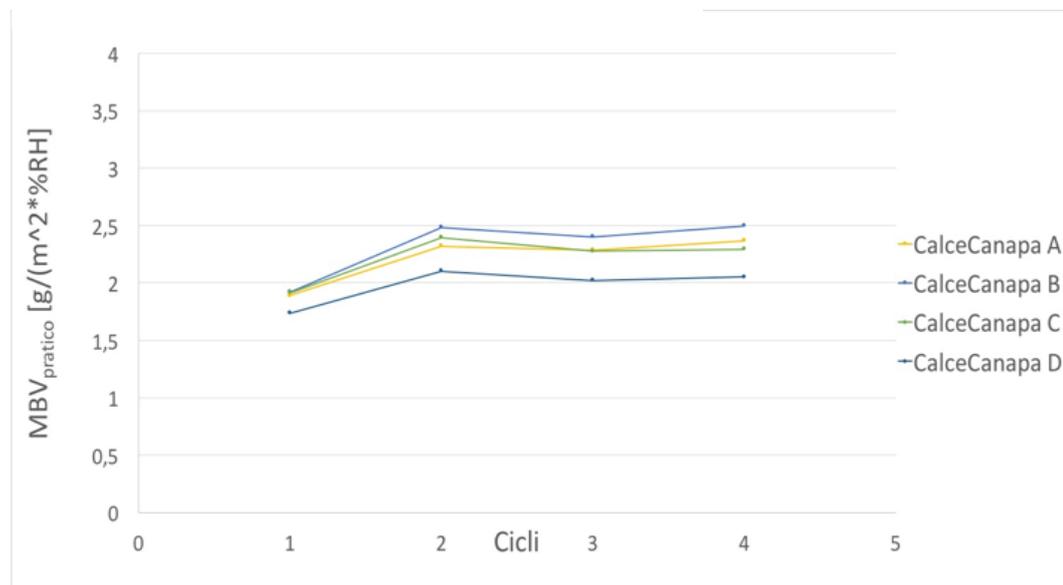


Fig 17. Andamento MBV dei campioni in canapa durante i cicli.

Diagrammando questi valori per ogni provino si è notato come gli ultimi 3 cicli sono in condizioni quasi stazionarie perché si portano all'equilibrio in cui le quantità assorbite e rilasciate tendono ad uguagliarsi e a rimanere costanti nel tempo.

Per caratterizzare la CalceCanapa, vista la sua disomogeneità strutturale, abbiamo analizzato quattro campioni differenti ed è stata fatta una media tra i valori di Moisture Buffer Value ($MBV_{\text{practical}}$) in modo da avere un risultato più attendibile che non dipendesse dalla singola struttura del campione.

	$MBV_{\text{pratico}} \left[\frac{kg}{m^2 \%RH} \right]$	Classe
Multistrato Pioppo	0,75	moderato
Multistrato Okoumè	0,73	moderato
Abete	0,87	moderato
CalceCanapa	2,25	eccellente

Tabella 12. Classificazione dei materiali secondo il NordTest, in funzione dell' MBV_{pratico}

Tra i campioni analizzati quello in CalceCanapa risulta essere il materiale con il miglior comportamento igrometrico, ad esso seguono il legno ed in particolare in ordine decrescente i campioni di abete e i due campioni in Multistrato.

Conclusioni

Questo lavoro di tesi è di carattere prettamente sperimentale. Si basa fundamentalmente sulla necessità di investigare il comportamento termo fisico e termo igrometrico di materiali ampiamente diffusi in edilizia oggi e definiti come eco-biosostenibili. Si sono dunque presi in esame alcuni dei più impiegati materiali edili “naturali” come il legno e la calce-canapa al fine di caratterizzarne il comportamento termo-igrometrico. Sono state condotte diverse serie di misure basate sul metodo della pesata e utilizzando un elettronico misuratore elettrico dell’umidità sono state caratterizzate le curve di adsorbimento e desorbimento dei materiali sottoposti a variazioni cicliche con valori estremi di umidità. Il materiale capace di scambiare un maggior quantitativo di vapore d’acqua con l’ambiente esterno e le relative condizioni al contorno è risultato essere la CalceCanapa, seguito dal campione di Abete e dai multistrati in Pioppo e Okoumè. Il comportamento della calcecanapa è dovuto in particolar modo alla propria natura fisica ovvero alla disomogeneità, anisotropia e discontinuità a livello strutturale e di composizione.

Questo lavoro di tesi rappresenta la base ed il primo passo cruciale cui fa riferimento il progetto di ricerca avviato tra il Dipartimento di Ingegneria Industriale di Firenze e l’Istituto CVBC del CNR di Firenze per studiare l’efficacia dell’impiego di materiali porosi con capacità igroscopiche nel sistema edificio, come effetto buffer e/o damping sui picchi di carico latente all’interno di ambienti con diverse destinazioni d’uso e profili temporali di utilizzo. Difatti, in ambito edilizio questa scelta potrebbe costituire un valida strategia per la progettazione energetica degli edifici producendo effetti importanti sulla riduzione del consumo di energia dei sistemi impiantistici HVAC finalizzati al trattamento dell’aria, sul benessere termoigrometrico e sulla qualità dell’aria.

Ringraziamenti

Si ringraziano l'Ing Fischnaller Peter della Azienda Volta di Bolzano e l'Ing T. Mugrauer dell'Azienda Scanntronik Mugrauer GmbH Zorneding – Germany, per i consigli e suggerimenti utili allo svolgimento delle misure.

Ringrazio inoltre LaBancadellaCalce-Calcecanapa, in particolar modo il Prof.Rattazzi Andrea per i campioni di calce e canapa utili allo svolgimento delle prove e per la disponibilità sempre dimostrata.

Ringrazio la professoressa Carla per il rapporto instaurato e la sua disponibilità nell'ascoltare le mie bizzarre idee

Ringrazio tutto il personale incontrato presso i laboratori dell'Istituto della Conservazione e la Valorizzazione dei beni Culturali del C.N.R di Sesto Fiorentino, in particolar modo la dott.ssa Barbara Sacchi , il tecnico Luciano Scaletti, disponibili e sempre pronti a risolvere insieme ogni problema, “uno alla volta”.

Infine ringrazio Giacomo per la collaborazione continua durante le misure e dopo di esse, per i suoi consigli indispensabili e per le più svariate conversazioni avute durante i nostri incontri.

Non sono mai stato un abile scrittore ma in questi casi le parole vengono quasi da sole.

Ringrazio la mia famiglia, tutti quanti, che mi hanno supportato e sopportato in questi anni. A chi non è più tra noi e so che da lassù un sorriso gliel'ho strappato. E' anche grazie a voi che sono qui quest'oggi.

Infine un grazie ai miei amici, a coloro che mi hanno davvero visto crescere in questo percorso, a chi mi è stato vicino nei momenti in cui avevo bisogno di un confronto e a chi era sempre pronto a condividere con me i momenti di estrema felicità, che poi parliamoci chiaro, le cose più belle che ricorderò per sempre sono proprio quelle condivise insieme. Notti intere a fare festa con gli amici di sempre o a lavorare in garage con il socio per questa Arpion Sub che è nata con tanto sacrificio e amore. Bei momenti, sicuramente indelebili.

Un pensiero infine anche alle persone che ho perso durante questo percorso, quelle che ho incontrato ultimamente e che mi stanno regalando emozioni che prima erano sconosciute a me. Senza di voi non sarei quello che sono. GRAZIE

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sofiane Amziane, Mohammed Sonebi: Overview on bio-based building materials, RILEM technicals letters(2016) 1: 31-38
- [2] DIRETTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia; Gazzetta ufficiale dell'unione europea.
- [3] J.Toftum, A.S Jorgensen, P.O. Fanger, Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort, Energy and Building 28(1998) 15-23
- [4] J.Toftum, A.S Jorgensen, P.O. Fanger, Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin; Energy and Building 28(1998) 1-13
- [5] L.Fang, G.Clausen, P.O.Fanger; Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality, Indoor Air 8 (1998) 80-90
- [6] David Alisson, Matthew Hall (2012); Humidity buffering using stabilised rammed earth materials; Proceedings of the Institution of Civil Engineers
- [7] Tim Padfield and Lars Aasbjerg Jensen (2010); Humidity buffering by absorbent materials
- [8] Martin Vol, Jakub Divis (2015); Thermal, moisture and biological behaviour of nature insulating materials. Energy Progedia
- [9] S. Cerolini, M. D'Orazio, C. Di Perna, A. Stazi moisture buffering capacity of highly absorbing materials; Energy and building 41(2009) 164-168
- [10] O.F. Osanyintola, C.J. Simonson, Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: experimental facilities and energy impact, Energy and Buildings 38 (10) (2006) 1270–1282.
- [11] JIS A 1470-1 (2002) Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate – Determination of moisture adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate indoor humidity- Part 1: Response method of humidity.
- [12] ISO 24353 (2008). Hygrothermal performance of building materials and products- determination of moisture adsorption/desorption properties in response to humidity variation.
- [13] C.Rode, Moisture Buffering of Building Materials Report, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2005,
- [14] Mikael Salonvaara Tuomo Ojanen Andreas Holm, Achilles N. Karagiozis, Ph.D. Hartwig M. Künzle; (2004) Moisture Buffering Effects on indoor Air Quality experimental and simulation results.
- [15] C.Rode, R.Peuhkuri, Svennberg, T.Ojanen; (2006) Moisture buffer value of building materials.
- [16] Stefanizzi, IX congresso nazionale AIGE 2015, Il moisture buffer value come indice di prestazione termoigrometrica.
- [17] Roels, Staf; Janssen, Hans. (2006) A comparison of the Nordtest and Japanese test methods for the moisture buffering performance of building materials
- [18] Kaisa Svennberg (2006) Moisture buffering in the indoor environment

- [19] Kaisa Svennberg (2004) Moisture Buffer Performance of a Fully Furnished Room
- [20] Tim Padfield, PhD Ruut Peuhkuri, MSc Carsten Rode, Kurt Kielsgaard Hansen. Non-Isothermal Water Vapour Transmission through Porous Insulation. Part 1: The Climate Chamber
- [21] David Allison, Matthew Hall (2011) Humidity buffering using Stabilised Rammed Earth materials
- [22] Calce Canapa www.bancadellacalce.it/bdc/calcecanapa/

