

STUDIO DELL' IMPATTO DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA VARIABILE SULLA PERFORMANCE TERMICA DI PARETI IN LEGNO

di

* Maja Danovska, Giovanni Pernigotto, Paolo Baggio, Andrea Gasparella

Premessa

La spinta verso un settore edilizio a basso impatto ambientale sta portando sempre più frequentemente all'adozione di materiali organici come legno e dei suoi derivati. È noto che in questi materiali avviene un complesso scambio di calore e massa, il quale influenza le proprietà termiche. Infatti, la conducibilità termica apparente varia con la temperatura, ma anche con il contenuto di umidità. Nonostante ciò, alcuni programmi di simulazione dinamica come EnergyPlus e TRNSYS adottano ancora proprietà termiche costanti nella simulazione dei flussi energetici, portando a possibili imprecisioni nella stima dei consumi energetici. Lo scopo di questo lavoro è di valutare da un punto di vista sperimentale e numerico l'impatto che la temperatura e il contenuto di umidità hanno sulla performance termica di una parete massiccia in Cross-Lam e di una a telaio.

Introduzione

Ultimamente il legno e i suoi derivati stanno prendendo piede nel settore edilizio italiano per via del loro basso impatto ambientale. I materiali che si utilizzano comunemente in edifici in legno sono il Cross-Lam o CLT (Cross Laminated Timber) in abete, pannelli di OSB (definiti anche "Oriented strand board") e isolanti lignei come fibra di legno. La corretta caratterizzazione di questi materiali consente una più accurata stima della performance energetica degli edifici che li impiegano quali elementi di involucro. Il parametro che influenza principalmente la performance termica di un materiale è la conducibilità termica. Software commerciali per la simulazione dinamica degli edifici come EnergyPlus o TRNSYS, adottano,

nella stima dei flussi termici, valori di conducibilità termica costanti pari ai valori nominali definiti dalla normativa EN ISO 10456:2007. Tuttavia, quando i materiali sono messi in opera sono soggetti a gradienti termici e di umidità. In queste condizioni reali, la conducibilità termica assume valori diversi da quelli nominali. Per quanto riguarda il legno, lavori come [1] mostrano che la conducibilità termica dipende dalla temperatura, evidenziando un aumento del + 2 – 3 % per ogni 10 °C. Mentre per quanto riguarda l'umidità, si nota un aumento lineare fino ad un + 20 % rispetto al valore nominale. Per quanto riguarda altri materiali utilizzati nelle strutture in legno, specialmente quelle a telaio, l'OSB è di fondamentale importanza.

Studi sulla conducibilità termica di questi pannelli mostrano come la dipendenza dalla temperatura e dall'umidità è lineare. Invece, passando a materiali isolanti, e quindi con maggiore porosità come la fibra di legno, l'influenza della temperatura sulla proprietà termica è maggiore. Passando da 10 a 40 °C si ha un + 10 % in entrambi gli stati secco e ad alto contenuto di umidità [2]. L'aumento in funzione dell'umidità è del + 15 % passando da 0 a 24 % di contenuto di umidità. La dipendenza dalla temperatura è lineare mentre per quanto riguarda l'umidità, si intravede un andamento quadratico. I materiali di derivazione organica presentano una loro variabilità intrinseca che può influenzare le proprietà termiche e quindi impattare sul flusso termico scambiato attraverso pareti. Studi di questo tipo, come [3], sono già presenti in letteratura ma sono stati condotti prevalentemente su stratigrafie composte da materiali minerali o non organici.

Scopo

Per questo motivo, il lavoro verte in primo luogo ad ottenere sperimentalmente delle curve di conducibilità termica, in particolare del legno, e successivamente a sviluppare un modello mono-dimensionale di scambio di calore e massa. Sono state modellate due pareti in legno, ovvero, una parete massiccia in CLT isolata ed una con tecnologia a telaio per climi dell'Italia settentrionale. Implementando nel modello la funzione precedentemente ottenuta per il legno con l'attività sperimentale e per gli altri materiali da letteratura, è stato possibile valutare l'impatto che la variabilità della conducibilità termica ha sul flusso termico in pareti in legno, massicce e a telaio. Le simulazioni sono state eseguite in due condizioni differenti: la prima di riferimento una conducibilità termica dei materiali nominale, ovvero costante, mentre la seconda, in condizioni di proprietà "variabili", implementando le funzioni sopramenzionate.

Metodologia sperimentale

Durante l'attività sperimentale si sono effettuate misure di conducibilità termica a diversi valori di temperatura ed umidità su un provino in legno con il fine di ottenere una curva di conducibilità termica in funzione dei due parametri. Il materiale analizzato è stato legno di abete poiché utilizzato principalmente nel Cross-Lam. L'attività è stata svolta nel Laboratorio di Fisica Tecnica Ambientale presso la Libera Università di Bolzano e gli strumenti che sono stati adottati sono un flussimetro Netzsch HFM 436/3/1 LambdaTM secondo le seguenti normative ISO 8301:1991, EN 12664:2001 ed EN 12667:2001 per la misura della conducibilità termica. L'accuratezza dello strumento è 1 - 3 %. Per variare il contenuto di umidità del provino, è stata utilizzata una camera climatica ATT Angelantoni DM340 in accordo con la EN ISO 12571:2013. Il condizionamento in camera climatica è stato effettuato a 23 °C e a due umidità relative, 10 % ed 80 %. Un processo di essiccazione è stato eseguito a 105 °C come suggerito dalla norma EN ISO 12570:2000 per ottenere il peso secco del legno.

Modellazione numerica

Affinché si possa valutare l'impatto della funzione di conducibilità termica sul flusso termico

attraverso le componenti in legno, è stato sviluppato un modello mono-dimensionale dinamico di scambio di calore e massa. Per quanto riguarda la trasmissione del calore, i meccanismi considerati sono la conduzione termica interna e la convezione termica sulle superfici. Invece, in termini di trasporto di massa, la diffusione di vapore considerando come potenziale la pressione parziale di vapore.

Calibrazione e validazione del modello di trasferimento di massa

Essendo non nota la permeabilità al vapore del provino in legno, è stata effettuata una calibrazione del modello di trasporto di massa con i dati sperimentali di condizionamento in camera climatica. In particolare, per la calibrazione sono stati utilizzati i dati delle curve di desorbimento partendo da 23 °C/ 80 % ed arrivando a 23 °C/ 10 % di umidità relativa, mentre viceversa, i dati di assorbimento, sono stati utilizzati per la procedura di verifica del modello. Eseguendo delle simulazioni con il modello di trasferimento di massa e facendo variare il fattore di resistenza al vapore del legno, è stata verificata la corrispondenza con i valori sperimentali.

Implementazione

Il modello accoppiato di trasporto di calore e massa è stato implementato in MATLAB® adottando lo schema numerico alle differenze finite. Le equazioni alla base del modello sono state discretizzate nel tempo adottando un intervallo temporale di 1 h e nello spazio sono state discretizzate con passo di 1 cm.

Sul lato interno le condizioni al contorno sono state mantenute costanti pari a 26 °C/ 50 % in estate ed in inverno pari a 20 °C/ 50 % di umidità relativa, mentre all'esterno sono state assunte condizioni al contorno con variabilità oraria.

In particolare, la pressione parziale di vapore è stata presa dal sito del Comitato Termotecnico Italiano (CTI) <https://try.cti2000.it/>, mentre come forzante esterna di temperatura è stata calcolata la temperatura sole-aria, la quale considera anche l'irradianza solare sul lato esterno.

Il coefficiente di assorbimento esterno è stato assunto pari a 0.3 secondo la UNI 10375:2011.

Le pareti studiate sono state orientate verso sud al fine di studiare la configurazione maggiormente soggetta all'impatto della radiazione solare incidente. Come accennato precedentemente, la simulazione è stata effettuata in due condizioni:

- 1) In primo luogo, considerando una conducibilità termica apparente nominale λ_{nom} costante misurata secondo la norma EN ISO 10456:2007. In particolare, per questo lavoro è stata scelta la condizione 10 °C e basso contenuto di umidità o secco.
- 2) Successivamente, considerando la variazione di conducibilità λ_{att} chiamata anche "attuale" ottenuta sperimentalmente per il legno, mentre presa da letteratura per la fibra di legno [2] e per il pannello di OSB [4].

Le pareti modellate (vedi figura 1) sono una parete massiccia composta da 10 cm CLT ed isolante in fibra di legno di spessore variabile posto sul lato esterno (a) e una struttura a telaio composta da due pannelli di 2 cm di OSB e nell'intercapedine 15 cm di isolante in fibra di legno (b). Anche in questo caso lo spessore della fibra di legno è stato fatto variare.

Lo spessore esterno dell'isolante è stato calcolato coerentemente con la trasmittanza termica

massima ammissibile secondo il DM 26.06.2015 Requisiti Minimi per località situate nel nord Italia e appartenenti alle fasce climatiche E ed F. In particolare, per la fascia E, lo spessore esterno di isolante richiesto è pari a 200 mm per la parete in CLT e 100 mm per la parete a telaio. Per quanto riguarda la fascia F, 240 mm e 150 mm rispettivamente per parete massiccia e a telaio.

L'impatto sul flusso termico è stato valutato calcolando le seguenti grandezze:

- Variazione percentuale del flusso termico $\Delta_{\%}$ (%) misurata come deviazione del flusso termico specifico convettivo attuale sul lato interno rispetto caso di riferimento. La quantità è stata ottenuta mettendo in un diagramma i flussi orari termici in condizioni di riferimento e con conducibilità variabile e valutando la pendenza della distribuzione rispetto alla bisettrice. È stata valutata la media delle città per ogni fascia climatica.
- Variazione assoluta delle dispersioni termiche ($Wh\ m^{-2}$) rispetto al caso di riferimento calcolata come differenza tra la media oraria di energia cumulata sull'anno tra caso di riferimento e con conducibilità variabile. Inoltre è stata effettuata una distinzione tra flusso positivo, verso l'esterno $\Delta_{ass,p}$, e flusso negativo diretto verso l'interno $\Delta_{ass,i}$.

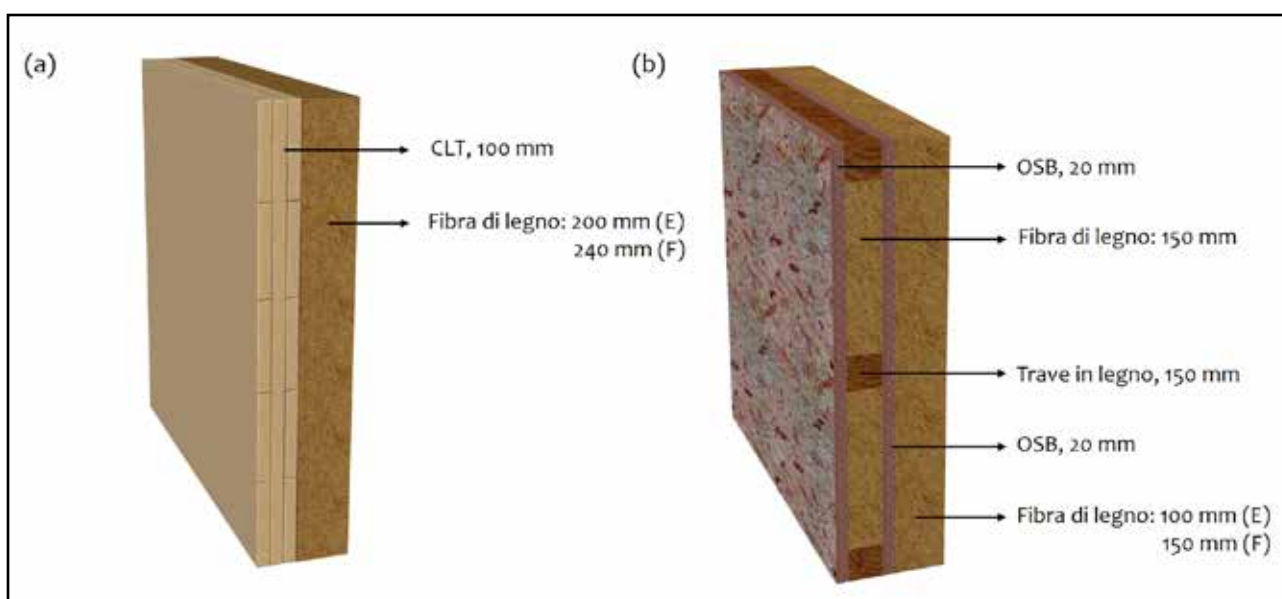


Figura 1

Risultati e commenti

Attività sperimentale

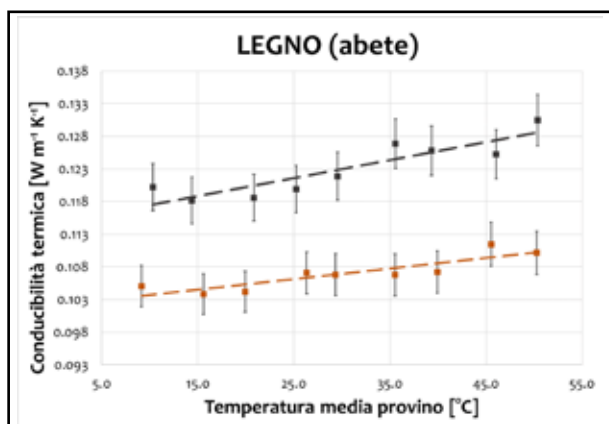


Figura 2

Figura 2 mostra i dati sperimentali misurati sulla conducibilità termica del legno con la relativa interpolazione lineare. Le barre di errore indicano la precisione dello strumento ($\pm 3\%$). Si evince che la conducibilità termica aumenta con la temperatura per ogni contenuto di umidità. In termini di temperatura, l'aumento è dovuto al contributo radiativo al processo totale di scambio di calore. L'aumento registrato è del $+6.1\%$ passando da $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un contenuto di umidità pari a 3.5% , mentre ad un contenuto di umidità pari a 13.2% si ha un $+10.2\%$. Questo può essere spiegato da un trasporto di umidità interno come già evidenziato da [5] nel legno. In termini assoluti l'aumento di conducibilità in funzione della temperatura è di $0.005\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ a bassi contenuti di umidità, mentre ad alto contenuto di umidità si ha uno $0.012\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$. Per quanto riguarda l'impatto dell'umidità, la conducibilità termica aumenta con l'aumento dell'umidità nel materiale coerentemente con il fatto che la conducibilità termica dell'acqua è maggiore di quella dell'aria. Ad una temperatura di $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, passando da basso contenuto di umidità ad alto, la conducibilità termica aumenta del $+11.9\%$ e in termini assoluti di un $+0.013\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$. Da questi dati è possibile ricavare il valore nominale λ_{nom} pari a $0.104\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ il quale è un dato di input per la simulazione in condizione di riferimento. Successivamente, utilizzando i dati di conducibilità termica, è stata ottenuta la funzione di conducibilità termica con dipendenza lineare sia dalla temperatura che dalla pressione parziale di vapore. Anche se la normativa EN ISO 10456:2007 suggerisce variazioni esponenziali in funzione di temperatura e umidità, in questo lavoro è stato deciso di

adottare una funzione lineare in entrambe le quantità poiché il provino ha mostrato un comportamento lineare nel range di temperatura studiato perciò l'approssimazione è risultata coerente. In termini di umidità invece, solamente due punti di condizionamento in camera climatica sono stati utilizzati. In uno sviluppo futuro, si andranno a definire più punti di condizionamento per caratterizzare precisamente la dipendenza dall'umidità. Per quanto riguarda la fibra di legno ed il pannello in OSB, sono stati rielaborati dati sperimentali presi da letteratura, rispettivamente [2,4]. Le interpolazioni considerate sono tutte lineari tranne per quanto riguarda la fibra di legno, dove si è adottata una correlazione quadratica in funzione del contenuto di umidità. Utilizzando i risultati del condizionamento del legno, è stata effettuata la calibrazione del modello di trasporto di massa, e facendo variare il fattore di resistenza al vapore secondo i dati sperimentali, è stato ottenuto un valore di 32. Questo valore è concorde con i dati presenti nella normativa EN ISO 10456:2007 dove i valori proposti variano da 20 a 50 in base al contenuto di umidità. Per gli altri due materiali i fattori di resistenza al vapore sono stati presi da letteratura dagli stessi autori.

Impatto sulla performance termica delle pareti

	Fascia	$\Delta\%$ (%)	$\Delta_{\text{ass,p}}$ (Wh m ⁻²)	$\Delta_{\text{ass,n}}$ (Wh m ⁻²)
Massiccia CLT	E	12	2531	10
	F	11	2478	-8
Telaio	E	15	2835	12
	F	14	2731	-5

Tabella 1

La Tabella 1 mostra la deviazione percentuale del flusso termico considerando lo scambio convettivo interno ($^{\circ}\%$), la variazione delle perdite termiche positive dirette verso l'esterno e negative, dirette verso l'interno espresse in Wh m⁻², rispettivamente per la parete massiccia e la parete a telaio orientate a sud per località situate a nord ed appartenenti alle fasce climatiche E ed F. Adottando nella simulazione una conducibilità termica costante, anziché una che consideri lo stato effettivo della parete, si ha una sottostima dei flussi termici. Infatti, considerando la funzione di conducibilità termica, nelle pareti in CLT massicce si registra un $+12\%$ (fascia E) e un $+11\%$ (fascia F) rispetto al caso di riferimento. Questo valore minore in fascia F dove la temperatura esterna è in media più bassa è spiegato


dal flusso termico maggiore attraverso queste pareti. Nel caso di pareti a telaio le percentuali sono leggermente maggiori poiché la struttura è più soggetta alle condizioni climatiche esterne. Lo stesso trend della parete massiccia in funzione della fascia climatica è stato registrato anche per quella a telaio. L'adozione della conducibilità termica variabile porta ad avere anche un aumento in termini assoluti di perdite positive, quindi rivolte verso l'esterno, le quali accadono di solito in inverno. Nel caso di parete massiccia in CLT, si registra un + 2531 e + 2478 Wh m⁻² rispettivamente per fascia E ed F. Il valore minore in fascia F è spiegato dal maggiore isolamento della parete. Mentre nel caso del telaio le deviazioni aumentano leggermente fino ad un + 2835 Wh m⁻². La parete a telaio è più soggetta a questa variabilità della conducibilità termica, essendo composta da più materiale isolante. In termini di variazione di perdite termiche negative, cioè verso l'interno, rispetto al caso nominale, si nota che l'effetto della conducibilità termica variabile è praticamente nullo per pareti situate nel nord Italia e in entrambe le tecnologie costruttive. Infatti i valori sono prossimi allo zero.

Conclusioni

Lo scopo del lavoro presentato è stato valutare l'incertezza introdotta nelle simulazioni del flusso termico in seguito all'utilizzo di proprietà termiche costanti. Il lavoro si è focalizzato su materiali organici come legno e dei suoi derivati, come fibra di legno frequentemente utilizzati in strutture massicce in tecnologia Cross-Lam e a telaio. I metodi utilizzati sono stati una prima attività sperimentale volta alla determinazione di una funzione di conducibilità termica nella temperatura e umidità per il legno, e successivamente, le curve ottenute sia sperimentalmente che da letteratura, sono state implementate in un modello monodimensionale di scambio di calore e massa in ambiente MATLAB®. Sono state modellate due pareti i) la prima massiccia in Cross-Lam e ii) una con tecnologia a telaio, entrambe isolate esternamente in fibra di legno con spessore variabile secondo quanto richiesto dalla normativa vigente, situate nel nord Italia. Sono state eseguite simulazioni annuali. Considerando i risultati sperimentali e quelli provenienti dalle simulazioni si evince che:

- Dal punto di vista sperimentale, il legno aumenta la sua conducibilità termica con la temperatura, ovvero + 10 % passando da 10 a 50 °C ad alti contenuti di umidità, e con l'umidità, ovvero + 12 % rispetto al caso secco a 23 °C.
- Considerando questa variabilità nei modelli di

simulazione del flusso termico attraverso le strutture in legno, si nota che la conducibilità termica nominale porta ad una sottostima del flusso termico di un - 12 % per la parete massiccia, e per quella intelaiata si ha un - 15 % rispetto al caso in cui si considerino le condizioni effettive delle pareti. La maggiore sottostima nel caso della parete a telaio è spiegata dalla maggior presenza dell'isolante che è più sensibile alle condizioni climatiche esterne rispetto alla parete massiccia in CLT.

- In termini assoluti, l'adozione di una conducibilità termica variabile che consideri lo stato effettivo della parete porta ad un aumento di perdite termiche positive stimate verso l'esterno in entrambe le pareti, ovvero + 2531 Wh m⁻² ed un + 2835 Wh m⁻², rispettivamente per la parete massiccia e per quella a telaio. Mentre, questa variabilità non influenza apprezzabilmente le perdite termiche negative verso l'interno (guadagni), che si verificano usualmente in estate. 

* *Maja Danovska, Giovanni Pernigotto, Andrea Gasparella,
Libera Università di Bolzano – Bozen.
Paolo Baggio,
Università degli studi di Trento.*

Riconoscimenti

Questa ricerca è stata finanziata dal progetto “Klimahaus e Produzioni Energetiche” nell'ambito della convenzione programmatico-finanziaria della Provincia Autonoma di Bolzano di Research Capacity Building.

Riferimenti

1. Forest Products Laboratory. Wood handbook - Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 508 p. 2010.
2. Troppová Eva, Matej Svehlik, Jan Tippner, and Rupert Wimmer. “Influence of Temperature and Moisture Content on the Thermal Conductivity of Wood-Based Fibreboards.” *Materials and Structures* 40(12) (2015), 4077–83. url: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0467-4>.
3. Ferroukhi, M. Y., et al. 2017. Impact of Coupled Heat and Moisture Transfer Effects on Buildings. *THERMAL SCIENCE*. Vol. 21, No. 3, pp. 1359-1368.
4. Oly Vololonorina, Marie Coutand and Bernard Perrin. “Characterization of hygrothermal properties of wood-based products – Impact of moisture content and temperature.” *Construction and Building Materials* 63 (2014), pp. 223–233.
5. Avramidis S, Siau JF. 1987. An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood. *Wood Sci Technol* 21:249–256.