

Calcolo delle prestazioni termiche di murature e solai

Il vantaggio derivante dall'applicazione del metodo di calcolo agli elementi finiti per la determinazione delle prestazioni termiche di una struttura perimetrale, comunque complessa, eliminando l'incertezza dell'interpretazione e confronto dei certificati sperimentali

La norma UNI 10355 In assenza di una specifica normativa nazionale avveniva (e tuttora avviene, nonostante nel frattempo sia entrata in vigore la UNI 10355 "Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodi di calcolo") che i valori di trasmittanza K di pareti in laterizio venissero determinati in laboratorio tramite prove su pannello secondo la norma americana A.S.T.M. C 236-66.

La norma A.S.T.M. prevede, in sostanza, la misurazione del flusso di calore che si trasmette da un lato all'altro di una parete, facendo riferimento ad un'area di misura di circa $0,25 \text{ m}^2$. Una volta determinato il flusso termico Q , tenendo conto della differenza di temperatura imposta tra lato interno ed esterno del pannello, si calcolano i valori della conduttanza C , dei coefficienti liminari interno ed esterno (indicati nei certificati, a seconda del laboratorio, con i simboli " h_i " o " α_i " ed " h_0 " o " α_e ") e di trasmittanza K . Dal valore di trasmittanza si può successivamente ricavare il valore della conducibilità equivalente λ_{eq} della parete.

Questa metodologia di prova presenta tuttavia una serie di aspetti negativi e poco controllabili, che portano spesso ad avere risultati anche molto diversi per prove eseguite su strutture sostanzialmente confrontabili. Ciò si verifica per i seguenti motivi:

- le condizioni di umidità del pannello possono essere molto diverse a seconda del tempo che è intercorso dal confezionamento dello stesso al momento in cui esso viene sottoposto alla prova;
- quasi mai viene fornita una specifica relativa alle modalità di confezione del pannello, né sui materiali utilizzati (tipo di malta impiegato, spessore e tipo dei giunti realizzati, tipo di intonaco, caratteristiche dei blocchi in laterizio, peso specifico, ecc.), consentendo in tal modo l'introduzione di una serie di

variabili che restano di fatto sconosciute al prescrittore ed all'utilizzatore di quel certificato;

- le temperature di prova all'interno ed all'esterno del pannello sono sempre diverse da una prova ad un'altra, così come il gradiente termico imposto; questo comporta l'assunzione di coefficienti liminari che differiscono di volta in volta.

Ne consegue che, di fatto, ogni prova non presenta carattere di riproducibilità. Pertanto è assai probabile che una parete, seppure apparentemente realizzata con gli stessi materiali e con le stesse modalità di posa, sottoposta a prova in tempi diversi dia risultati diversi.

Dal 1994 il "vuoto" normativo preesistente è stato colmato con il recepimento, in data 6 agosto 1994, di una serie di norme UNI attuative del D.P.R. 26/8/1993, n. 412 (facente parte dei decreti attuativi della Legge 10/1991).

Nella grande confusione generata dalla enorme massa di carta e di formule introdotte da tali normative si è purtroppo persa anche la norma UNI 10355 che rappresenta l'elemento nuovo introdotto per disciplinare il "mercato dei K ".

La UNI 10355 rappresenta la prima norma italiana che stabilisce precise modalità per la determinazione dei valori di resistenza termica per murature e solai.

Ma l'aspetto più interessante sta nel contenuto della norma: il criterio introdotto infatti non è basato su prove di laboratorio soggette od assoggettabili a tutte le variabili di cui si è detto, ma su un metodo di calcolo "teorico" ben definito in tutti i suoi elementi.

Ciò vuol dire che se si calcola con la UNI 10355 la trasmittanza di due pareti costituite da materiali con le stesse caratteristiche fisiche, geometriche e di posa in opera il risultato deve essere uguale!

Istruzioni per l'uso L'essenza della norma UNI 10355 è facilmente spiegabile e comprensibile. Infatti, data una parete composta di materiali non omogenei, per esempio un blocco forato in laterizio formato da una parte piena e da fori riempiti di aria, posto in opera con giunti di malta cementizia di 1 cm di spessore, è possibile determinare il valore di resistenza termica della muratura partendo dalla reale geometria della parete e dalle caratteristiche termiche di base dei materiali che la compongono, opportunamente certificate con prove di laboratorio e con modalità, in questo caso, ben definite.

In altre parole gli elementi base per il calcolo sono dati dalla conducibilità termica dell'impasto cotto del laterizio (valore misurato), delle "lame d'aria" presenti all'interno dei fori (valore ricavabile con i criteri specificati nella norma) e della malta utilizzata per la confezione (valore misurato o comunque ricavabile in letteratura - UNI 10351).

L'operazione di calcolo può, a prima vista, sembrare complicata in quanto prevede l'impiego del metodo degli elementi finiti. In realtà, disponendo di un adeguato programma di analisi, si possono ottenere, in un tempo ragionevolmente limitato, risultati molto precisi e confrontabili. L'efficacia dell'analisi agli elementi finiti risiede proprio nella possibilità di studiare e schematizzare qualsiasi tipo di geometria. È bene precisare subito che i valori che si ricavano dall'applicazione della norma sono mediamente peggiorativi e comunque non confrontabili con quelli derivanti da prove di laboratorio per le diverse condizioni poste come ipotesi di base per il calcolo. È da tenere presente, inoltre, che i valori riportati nella norma sono sempre riferiti a materiali in condizioni di esercizio, tenendo conto tra l'altro del contenuto di umidità. Questa precisazione è contenuta nella norma stessa ove essa afferma: "Ne consegue che il confronto delle resistenze termiche indicate con valori sperimentali o calcolati deve fare riferimento alle stesse condizioni di esercizio (in particolare temperatura e contenuto di umidità) ...".

La UNI 10355 può essere applicata sostanzialmente nei due modi seguenti:

- a) utilizzando i valori di resistenza termica già calcolati per alcune tipologie di murature e solai e riportati in una serie di prospetti all'interno della norma stessa: i prospetti contengono, per ciascuna tipologia proposta, la rappresentazione dell'elemento e della struttura realizzata con tale elemento, l'indicazione di tutte le caratteristiche geometriche dell'elemento (dimensioni, percentuale di foratura), la massa volumica e superficiale della struttura, le caratteristiche dei giunti di malta ed il valore di resistenza termica calcolato.

I valori di resistenza termica predeterminati contenuti nella norma possono essere utilizzati anche per strutture (intendendo per strutture le diverse tipologie di murature e solai) non presenti tra quelle riportate dalla norma, utilizzando in tal caso i dati relativi alla struttura più simile a quella considerata (con massa superficiale uguale o superiore); la similitudine deve essere valutata in base al tipo di materiale costituente, alla

sua massa volumica, al numero di fori ed alla loro geometria e distribuzione. La norma stessa precisa che "quando si confrontano elementi forati è fondamentale che il numero dei fori disposti nella direzione dello spessore sia uguale nei due elementi". Questa affermazione è estremamente importante e dovrebbe già portare ad intuire che la resistenza termica di una muratura è fortemente legata alla geometria e disposizione dei fori presenti nei blocchi. In altre parole se l'elemento presenta 15 file di fori nella direzione dello spessore non può essere confrontato con uno avente analoghe dimensioni, peso ecc., ma che presenta solo 10 file di fori nello stesso spessore;

- b) svolgendo il calcolo con il metodo degli elementi finiti secondo la procedura indicata nell'appendice della norma. In alternativa al criterio della similitudine con le tipologie predefinite è infatti consentito eseguire il calcolo sulla specifica tipologia di cui interessa definire la prestazione termica.

Il calcolo della resistenza termica secondo la UNI 10355

Come è noto una struttura muraria non si presenta omogenea nelle tre direzioni (lunghezza, larghezza e spessore). E' tuttavia possibile ricondurre il calcolo ad una struttura non omogenea bidimensionale. Le ipotesi principali considerate dalla UNI 10355 come base per il calcolo sono dunque le seguenti:

- il calcolo della resistenza termica con il metodo degli elementi finiti va eseguito su una sezione piana bidimensionale della struttura, parallela alla direzione macroscopica del flusso termico ed equidistante dai letti di malta che separano corsi successivi di elementi;
- le conducibilità termiche dei materiali costituenti gli elementi devono essere desunte dalla norma UNI 10351 (la UNI 10351 ha sostituito il FA 101 alla UNI 7357/74 e contiene tutti i valori di conducibilità termica e di permeabilità al vapore dei materiali da costruzione);
- tutte le caratteristiche delle strutture devono essere riferite alla temperatura di 293 K (20°C);
- la differenza di temperatura fra aria interna ed esterna alla struttura si assume pari a 20°C;
- per strutture perimetrali di spessore elevato, come previsto dalla UNI 10351, i 10 cm esterni devono essere calcolati con le caratteristiche che competono alle pareti esterne (cioè applicando un opportuno coefficiente di maggiorazione della conducibilità di calcolo), conteggiando detti 10 cm a partire dalla superficie esterna degli elementi (escludendo quindi gli intonaci);
- le cavità degli elementi (i fori nel caso dei blocchi in laterizio) devono essere valutate come se fossero riempite di un materiale di conducibilità equivalente λ_c pari a quella che competerebbe allo spazio compreso tra due lastre piane, parallele ed indefinite poste ad una distanza pari allo spessore della cavità; la norma indica la procedura per il calcolo di λ_c ;
- il valore λ_c così ottenuto deve essere maggiorato del 15% per tenere conto di porosità e fessurazioni del materiale;

- nel determinare la conducibilità equivalente delle cavità si ipotizza che gli scambi di calore siano dovuti all'effetto combinato di conduzione, convezione e radiazione;
- la malta di allettamento fra i corsi di elementi viene messa in conto sommando alla potenza termica trasmessa da un corso della struttura (data dal modello bidimensionale prima citato), la potenza termica trasmessa dallo spessore di malta (da 5 mm a 12 mm), supponendo identiche le differenze di temperatura sulla porzione di struttura e sulla malta (malta e struttura in "parallelo");
- per strutture di spessore superiore a 15 cm il giunto di malta è ipotizzato interrotto da una cavità d'aria intermedia di spessore pari ad un terzo dello spessore della muratura;
- poiché si verifica normalmente una penetrazione della malta nei fori degli elementi, è necessario considerare una maggiorazione della potenza termica scambiata che tenga conto di una penetrazione di 10 mm della malta nei fori;
- si ipotizza la presenza di intonaci, sia sul lato esterno che su quello interno, di spessore pari ad 1 cm e con caratteristiche identiche a quelle della malta;
- per i coefficienti liminari interno ed esterno si assumono i valori: $h_i = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $h_e = 23 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Quanto detto può far apparire l'applicazione della norma come qualcosa di estremamente complesso; in pratica il calcolo risulta abbastanza semplice, come si evincerà dall'esempio illustrato nel seguito.

La conducibilità termica dell'argilla cotta Il dato fondamentale necessario per svolgere il calcolo della resistenza termica di una muratura secondo la UNI 10355 è la conoscenza della conducibilità termica λ dell'impasto cotto. È quindi opportuno soffermarsi ad illustrare i criteri con i quali si procede alla determinazione di questo dato.

La UNI 10355 fa riferimento per la determinazione del valore di conducibilità da assegnare al laterizio, così come per la malta, alla UNI 10351. Ma mentre nel caso della malta la UNI 10351 fornisce un valore di "conducibilità utile di calcolo", λ , che è riferito ad un materiale omogeneo (la malta appunto), nel caso dei laterizi forati la conducibilità non è né definibile, né misurabile direttamente, proprio perché dipende da tutti quei parametri geometrici di cui si è accennato in precedenza e che solo un'analisi agli elementi finiti può permettere di tenere in debito conto.

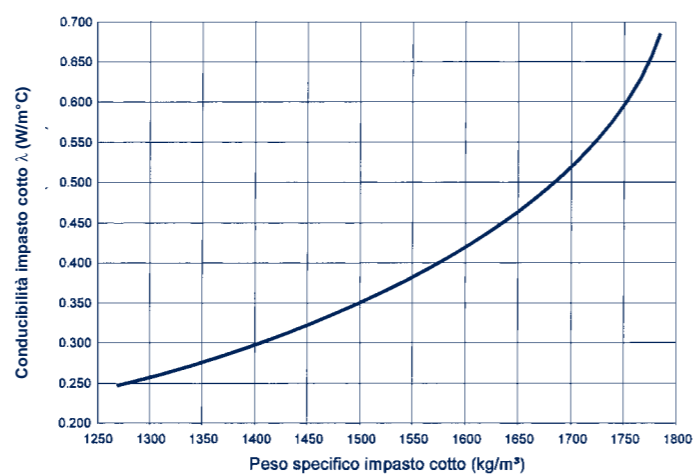
Per questo motivo la UNI 10351 fornisce un valore di "conducibilità indicativa di riferimento", λ_m , riferita al laterizio (incluso nel suo volume fori e porosità). La stessa norma afferma testualmente che le indicazioni riportate "... sono necessariamente di prima approssimazione; dati più rigorosi possono essere valutati conoscendo il tipo di laterizio e il tipo di malta che compongono la muratura."

Data l'estrema varietà di tipologie esistenti sul mercato e tenuto conto dell'altrettanto numerosa serie di argille di diversa

composizione mineralogica e granulometrica utilizzate nella produzione di laterizi, appare obiettivamente logico determinare il valore di conducibilità dell'impasto con una prova di laboratorio eseguita su un campione di impasto avente le caratteristiche di peso e di composizione dell'argilla proprie della produzione di laterizi effettuata in quel determinato stabilimento. Questa misura di laboratorio, le cui modalità di esecuzione sono ben definite dalla UNI 7745/77, consente di ricavare un valore di conducibilità relativo ad un materiale omogeneo (l'impasto cotto del laterizio) che è esattamente il dato necessario per eseguire il calcolo agli elementi finiti previsto dalla UNI 10355; tale prova risulta molto più semplice e "stabile" della misurazione in camera calda del valore di trasmittanza su pannello non omogeneo. Al risultato così ottenuto verranno poi applicate tutte le maggiorazioni previste per tenere conto delle condizioni di umidità presenti nella muratura in fase di esercizio (tab. 1).

Se si analizzano i risultati di prove di conducibilità su impasti di diverso peso, si evidenzia immediatamente la diretta correlazione esistente tra il valore di conducibilità ed il peso dell'impasto. In pratica, al crescere del peso dell'impasto aumenta il valore di conducibilità termica (e quindi decresce la prestazione termoisolante del materiale). Osservando, per esempio, i dati sperimentali ottenuti su campioni di peso specifico compreso tra 1400 e 1500 kg/m³, si è constatato che i valori variano tra 0,27 e 0,37 W/m²°C; la UNI 10351 propone, per laterizi di questo peso, valori della "conducibilità indicativa di riferimento", λ_m , compresi tra 0,40 e 0,45 W/m²°C, a conferma dell'assoluta approssimazione dei valori della norma rispetto ai dati "reali".

Si può concludere il discorso sulla conducibilità dell'impasto



Andamento della conducibilità termica dell'impasto cotto riscontrato con prove sperimentali su impasti di diverso peso e diversa provenienza.

1 Coefficienti di maggiorazione m della conducibilità in funzione del peso dell'impasto

peso impasto cotto (kg/m ³)	maggiorazione m (%)
600	90
800	65
1000	48
1200	35
1400	25
1600	18
1800	14
2000	12

del laterizio con una ulteriore osservazione: la UNI 10351 prescrive che per accertare le caratteristiche di un prodotto si disponga di documentazione che attesti che i valori utilizzati siano significativi, e cioè riferibili ad almeno il 90% della produzione di quel prodotto. Nel momento in cui un'azienda sottopone a prova il proprio cotto, per verificare la corrispondenza di un determinato prodotto alle caratteristiche certificate per un determinato impasto è sufficiente "pesare" i blocchi. Si tratta del più semplice ed immediato dei controlli che chiunque può fare e che non richiede sofisticati sistemi di qualità. La verifica del peso dei blocchi è infatti una delle operazioni di fornace che sistematicamente vengono svolte al termine del processo produttivo.

È possibile dunque affermare che, per tutti i blocchi costituiti da un impasto con quelle stesse caratteristiche (peso, ecc.), il dato certificato è sicuramente significativo per quel tipo di produzione di quell'azienda. E' evidente che un'azienda diversa non potrà ritenere significativo per la sua produzione un valore di conducibilità certificato da altri.

È il caso di ricordare, inoltre, che questa procedura di assunzione dei dati da utilizzare per il calcolo agli elementi finiti è praticata da diversi laboratori autorizzati. Il calcolo della trasmittanza di murature con il metodo degli elementi finiti secondo la UNI 10355 è infatti previsto nel listino di molti laboratori ed è attuato dagli stessi insieme alla determinazione sperimentale della conducibilità dell'impasto cotto.

Un esempio di calcolo secondo la UNI 10355 Si riporta ora un semplice esempio di applicazione. Si ipotizza di dover determinare la trasmittanza (e conseguentemente la resistenza termica) di una parete esterna in muratura, non prevista tra le tipologie tabellate nella UNI 10355, costituita dai seguenti materiali:

- blocchi a fori verticali (foratura pari a circa il 47%) in laterizio alleggerito, di dim. 30x25x25 cm, aventi impasto di peso specifico pari a 1400 kg/m³;
- malta cementizia tipo M2 di p. spec. pari a 1800 kg/m³;
- intonaco a base di calce e cemento di p. spec. pari a 1800 kg/m³.

Schematizzazione dell'elemento e conducibilità di calcolo dei materiali Il blocco viene schematizzato, ai fini del calcolo, come un elemento bidimensionale dato da una sezione del blocco parallela alla direzione del flusso termico. Tale sezione risulta comunque disomogenea in quanto costituita da parti in laterizio e da cavità d'aria di varie dimensioni.

La mesh eseguita sulla sezione deve consentire di assegnare ad ogni materiale la conducibilità corrispondente. Nel caso in esame ogni tipo di foro viene identificato da un colore diverso e così avviene anche per la parte in laterizio; in relazione al blocco va considerata una differenziazione tra i 10 cm esterni e la parte restante.

Per determinare le conducibilità da assegnare ai materiali la-

terizio, malta e intonaco la UNI 10355 fa riferimento alla UNI 10351; per l'impasto cotto del laterizio si ipotizza di avere determinato la conducibilità termica λ con l'esecuzione di una prova di laboratorio su piastra con anello di guardia secondo la UNI 7745/77 e di avere ottenuto, con una densità di 1400 kg/m³ del provino, il valore $\lambda = 0,30 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

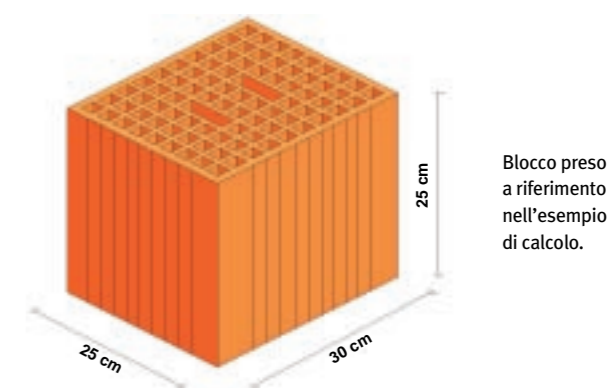
Esso non rappresenta tuttavia il valore da attribuire all'impasto laterizio nel calcolo in quanto, sempre secondo la UNI 10351, esso deve essere maggiorato per tenere conto "... delle effettive condizioni di esercizio, del contenuto di umidità, ...".

La maggiorazione m indicata per laterizi di peso pari a 1400 kg/m³ è del 25% (tab. 1).

La parete di cui si vuole determinare la trasmittanza è, evidentemente, una parete esterna. La UNI 10355 precisa che i 10 cm esterni vanno considerati con le caratteristiche che competono a pareti esterne, vale a dire, secondo la UNI 10351, con un maggiore contenuto di umidità, da mettere in conto raddoppiando il valore del coefficiente di maggiorazione m , ponendo quindi $m = 50\%$ per i 10 cm esterni.

Si ottengono in definitiva le seguenti conducibilità di calcolo dei materiali costituenti la muratura:

- impasto laterizio (10 cm esterni): $\lambda = 0,30 \times 1,50 = 0,450 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- impasto laterizio (parte restante): $\lambda = 0,30 \times 1,25 = 0,375 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- malta cementizia, peso 1800 kg/m³: $\lambda = 0,90 \text{ W/m}^2\text{°C}$
- intonaco calce-cemento, peso 1800 kg/m³: $\lambda = 0,90 \text{ W/m}^2\text{°C}$

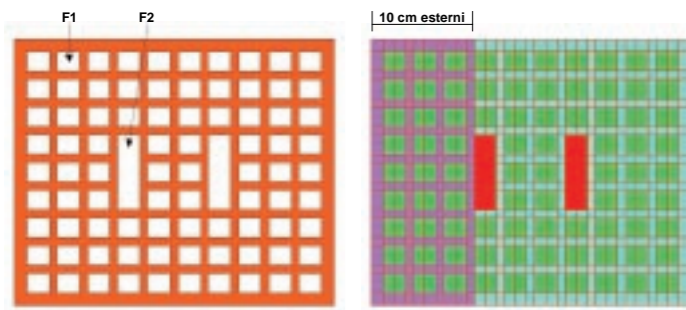


Determinazione della conducibilità equivalente "λ_e" delle cavità d'aria Per le cavità il valore λ_e viene determinato, come indicato dalla UNI 10355, attraverso la relazione $\lambda_e = s (h_c + h_r)$ dove s è lo spessore della cavità in direzione parallela a quella prevalente di trasmissione del calore.

I termini h_r ed h_c sono definiti nel modo seguente:

$$h_r = \frac{22,68 \cdot 10^{-8} \cdot T_m^3}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \quad (\text{W/m}^2\text{°C})$$

rappresenta gli scambi per radiazione e per la sua determinazione si assume un'emissività ϵ_1 ed ϵ_2 pari a 0,93; T_m rappresenta la temperatura media della cavità da assumere pari a 20°C. La temperatura dell'aria nell'ambiente interno viene posta



Mesh della sezione del blocco da esaminare: i diversi colori identificano materiali di conducibilità diversa. Inoltre i 10 cm esterni del blocco sono differenziati per applicare la maggiorazione prevista dalla norma.

pari a 303 K (30°C), mentre per l'esterno si ipotizza un valore di temperatura di 283 K (10°C). Ne consegue che la temperatura media della struttura risulta pari a 293 K (20°C).

Il termine h_c ha le stesse dimensioni di h_f e rappresenta il coefficiente di scambio termico che tiene conto dell'effetto combinato della conduzione e convezione; esso dipende dalla configurazione della cavità e deve essere calcolato attraverso la relazione:

$$Nu = h_c \cdot \frac{s}{\lambda_a}$$

dove:

Nu = numero di Nusselt;

s = spessore della cavità in direzione parallela a quella prevalente di trasmissione del calore;

λ_a = conducibilità termica dell'aria (pari a 0,025 W/m°C per il campo dei valori di temperatura considerato).

La UNI 10355 fornisce le relazioni da usarsi per il calcolo di "Nu" nei casi di cavità verticali e di cavità orizzontali con flusso termico, rispettivamente, verso l'alto o verso il basso, condizioni, queste ultime, da considerare nel calcolo delle resistenze termiche dei solai.

Nel caso in oggetto per calcolare "Nu" si applica la seguente relazione, valida per cavità verticali:

$$Nu = 1 + 0,014 \cdot Ra^{0,39} \cdot (L/S)^{0,18}$$

dove:

L = lunghezza della cavità nella direzione del suo asse;

Ra = numero di Rayleigh, dato dalla seguente relazione generale:

$$Ra = s^3 \rho \beta g \Delta T_s c_p / (v \lambda_a)$$

dove:

ρ = densità dell'aria (in kg/m³);

v = viscosità cinematica dell'aria (in m²/s);

ΔT_s = differenza di temperatura fra le due superfici affacciate della cavità (in K);

β = coefficiente di dilatazione cubica;

g = accelerazione di gravità (9,81 m/s²).

Tale relazione, nelle condizioni di aria a 293 K (20°C), si semplifica nella seguente:

$$Ra = 1,13 \cdot 10^8 \cdot s^3 \cdot \Delta T_s$$

dove:

ΔT_s = diff. di temp. fra le due superfici affacciate della cavità;
 s = spessore della cavità.

In altre parole il numero di Rayleigh assume valori diversi in funzione della temperatura dell'aria, in quanto al variare di questa cambiano la viscosità, la densità ed il coefficiente di dilatazione dell'aria; tuttavia, poiché i vari parametri sopra riportati subiscono variazioni non significative nel campo delle temperature di esercizio cui normalmente sono sottoposte le strutture (0÷40°C), risulta sufficientemente corretto il riferimento alla temperatura di 293 K (20°C).

Per il calcolo di ΔT_s si presuppone una differenza di temperatura fra aria interna ed esterna alla struttura pari a 20°C. Di conseguenza la differenza di temperatura tra le superfici che delimitano la cavità può essere determinata con buona approssimazione tenendo conto del numero di file di fori disposte nello spessore dell'elemento. Nell'esempio in questione l'elemento dispone di 10 file di fori in direzione ortogonale al flusso termico prevalente; si può quindi assumere:

$$\Delta T_s = 20/10 = 2^\circ C$$

Per le cavità del blocco considerato nell'esempio si ricavano in definitiva i valori di conducibilità riportati in tab. 2, in cui sono indicati anche i valori di calcolo, maggiorati del 15% come prescritto dalla norma. Dai numeri esposti emerge subito una prima osservazione: la conducibilità equivalente dei fori dipende sostanzialmente dallo spessore medio del foro ed in maniera marginale dalla sua lunghezza.

La fase di calcolo con il metodo degli elementi finiti

Il calcolo è stato svolto con il metodo degli elementi finiti utilizzando un programma per l'analisi termica in regime stazionario applicato alla sezione piana bidimensionale del blocco, assegnando ai materiali ed alle cavità i valori di conducibilità definiti in precedenza.

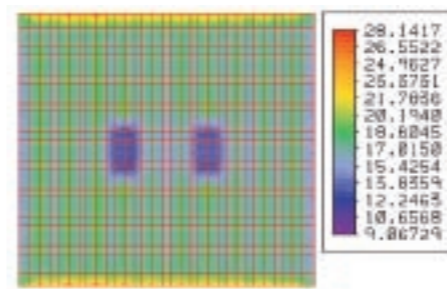
La potenza termica Q_1 trasmessa dalla struttura considerata, riferita ad un'area di 0,25 m², nel caso in esame è risultata pari a: $Q_1 = 3,8515$ W

La stessa mesh è stata utilizzata al fine di determinare l'effetto dovuto alla penetrazione della malta nei fori del blocco, ottenendo come potenza termica scambiata, sempre in riferimento ad una superficie di 0,25 m², il valore:

$$Q_2 = 7,3394$$
 W

Combinando "in parallelo" i valori Q_1 e Q_2 , tenuto conto nel valutare l'incidenza dei giunti di malta che il blocco di lateri-

2 Conducibilità delle cavità d'aria del blocco secondo la UNI 10355								
spessore medio cavità (m)	lunghezza cavità (m)	Rayleigh (Ra) (adm.)	Nusselt (Nu) (adm.)	h_c (W/m²K)	h_f (W/m²K)	λ_a (W/mK)	$\lambda_{a+15\%}$ (W/mK)	Tipo di foro
0,0209	0,0185	2063,228	1,2687	1,5176	4,9584	0,135	0,156	F1
0,0209	0,0705	2063,228	1,3419	1,6051	4,9584	0,137	0,158	F2



Andamento del flusso termico nella sezione piana bidimensionale dell'elemento.

zio considerato presenta un'altezza pari a 25 cm, si ricava la potenza termica scambiata, comprensiva della maggiorazione per una penetrazione della malta nei fori di 1 cm, con la seguente relazione:

$$Q = \frac{Q_1 \cdot 24 + Q_2 \cdot 1}{25} = \frac{3,8515 \cdot 24 + 7,3394 \cdot 1}{25} = 3,9910$$
 W

Calcolo della resistenza termica, della trasmittanza e della conducibilità equivalente della struttura

Nel calcolo della potenza termica scambiata dalla struttura, i coefficienti superficiali di scambio (coefficienti liminari) sono stati assunti pari a: $h_i = 8$ W/m²°C ed $h_e = 23$ W/m²°C (rispettivamente per il lato interno ed esterno).

Partendo dal valore "Q" della potenza termica scambiata dal blocco risulta agevole calcolare la conducibilità equivalente del blocco stesso (λ_{blocco}) tramite la relazione:

$$Q = K_{blocco} S \Delta T$$

dove:

S = superficie in riferimento alla quale è stata calcolata la potenza termica scambiata (0,25 m²);

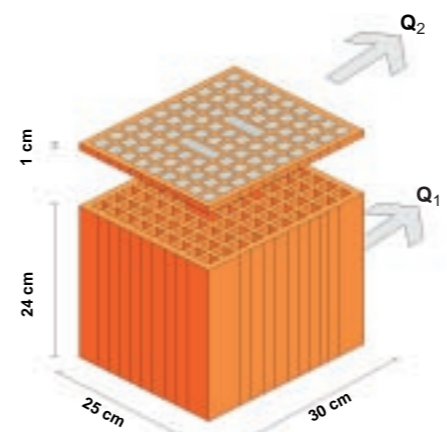
ΔT = differenza tra temperatura interna ed esterna (20°C);

dalla quale risulta:

$$K_{blocco} = \frac{Q}{S \cdot \Delta T} = \frac{3,9910}{0,25 \cdot 20} = 0,798$$
 W/m²°C

e tenendo conto che:

$$K_{blocco} = 0,798 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda_{blocco}} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,30}{\lambda_{blocco}} + \frac{1}{23}}$$



Maggiorazione della potenza termica trasmessa dovuta alla penetrazione della malta nei fori del blocco.

si ricava:

$$\lambda_{blocco} = 0,277$$
 W/m°C.

Si può quindi calcolare la conduttanza del blocco (C_{blocco}) con la relazione:

$$C_{blocco} = \frac{1}{\frac{s}{\lambda_{blocco}}} = 0,922$$
 W/m²°C

dove s è lo spessore dell'elemento.

La conduttanza dei corsi di malta è stata calcolata con le usuali relazioni della fisica tecnica. In particolare, per i giunti interrotti si ha, secondo le ipotesi descritte in precedenza:

$$C_{giunto} = \frac{1}{\frac{2}{3} \cdot \frac{s}{\lambda_{malta}} + \frac{1}{3} \cdot \frac{s}{\lambda_{aria}}}$$

dove si è assunto per l'intercapedine d'aria il valore $\lambda_{aria} = 0,3$ W/m°C, ricavando:

$$C_{giunto} = \frac{1}{\frac{2}{3} \cdot \frac{0,30}{0,9} + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,30}{0,3}} = 1,800$$
 W/m²°C

A questo punto è possibile calcolare la conduttanza equivalente (C_{eq}) della parete (blocchi + giunti di malta) semplicemente mettendo "in parallelo" le conduttanze del blocco e dei giunti, ipotizzando che al blocco siano associati un giunto orizzontale ed uno verticale. Considerando uno spessore dei giunti di malta pari a 12 mm (0,012 m) si ottiene:

$$C_{eq} = \frac{(0,25 \cdot 0,25 \cdot 0,922) + (0,25 \cdot 0,012 \cdot 1,8) + (0,262 \cdot 0,012 \cdot 1,8)}{(0,25 \cdot 0,25) + (0,25 \cdot 0,012) + (0,262 \cdot 0,012)} = 1,000$$
 W/m²°C

La trasmittanza della parete si ricava aggiungendo i coefficienti liminari di scambio secondo la relazione:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{C_{eq}} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{1,000} + \frac{1}{23}} = 0,856$$
 W/m²°C

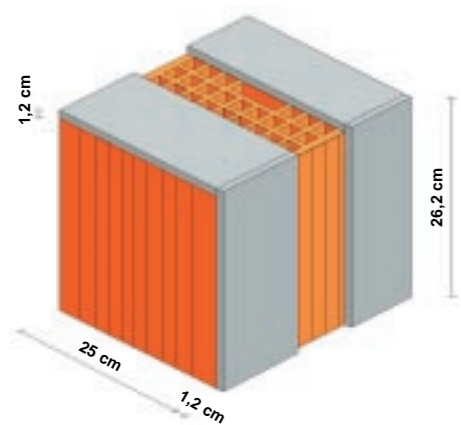
Si perviene dunque alla conducibilità equivalente della parete (λ_{eq}), essendo:

$$K = 0,856 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda_{eq}} + \frac{1}{h_e}}$$

da cui:

$$\lambda_{eq} = 0,300$$
 W/m°C.

Infine, secondo le indicazioni della norma, il calcolo deve essere eseguito ipotizzando anche la presenza di intonaci, sia sul lato interno che su quello esterno, di spessore pari ad 1 cm e con caratteristiche identiche a quelle delle malte interstiziali.



Schema per la valutazione della conduttanza equivalente della parete considerando malta e struttura "in parallelo".

Si ottiene pertanto, per la parete intonacata:

$$K_{\text{intonacato}} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda_{\text{eq}}} + \frac{1}{h_e} + \frac{s_{\text{int}}}{\lambda_{\text{int}}}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,30}{0,300} + \frac{1}{23} + \frac{0,02}{0,9}} = 0,839 \text{ W/m}^2\text{C}$$

La resistenza termica della muratura, che corrisponde in pratica all'inverso della conduttanza, si deduce dalla trasmittanza della parete intonacata ($K_{\text{intonacato}}$) escludendo i coefficienti di scambio convettivo ed il contributo dell'intonaco mediante la seguente relazione:

$$R = \frac{1}{K_{\text{intonacato}}} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_e} - \frac{s_{\text{int}}}{\lambda_{\text{int}}}$$

dove:

s_{int} = spessore totale dell'intonaco (interno + esterno);

λ_{int} = conduttività termica dell'intonaco.

Ne consegue, pertanto, una resistenza termica della parete pari a:

$$R = \frac{1}{0,839} - \frac{1}{8} - \frac{1}{23} - \frac{0,02}{0,9} = 1,001 \text{ m}^2\text{C/W}$$

Considerazioni sul metodo di calcolo della UNI 10355

La procedura di calcolo descritta risulta solo apparentemente complessa in quanto, di fatto, essa può essere facilmente implementata in un foglio elettronico dove, forniti una serie di dati di "input" (dimensioni del blocco, spessore dei giunti di malta, spessore dell'intonaco, conducibilità di malta ed intonaco, potenza termica Q ricavata dal calcolo con il metodo degli elementi finiti), si ottengono automaticamente tutti i risultati desiderati.

Il vantaggio derivante dall'applicazione del metodo degli elementi finiti sta nel fatto di poter studiare qualsiasi elemento non omogeneo, cioè composto da materiali di natura e proprietà termiche diverse, attribuendo ad ogni porzione le proprie caratteristiche termofisiche e riconducendo il tutto ad un valore equivalente che può essere successivamente combinato con altri elementi (malta, intonaco, ecc.) per loro natura omogenei e con proprietà termiche ben identificabili.

Vale la pena di sottolineare inoltre che, una volta eseguito il calcolo su un certo elemento, si possono facilmente determi-

nare le proprietà termiche di tutte le murature costituite con tale elemento al variare, per esempio, del tipo di malta, dello spessore dei giunti, del tipo e spessore di intonaco e di quant'altro venga utilizzato nel realizzare la struttura muraria. Se si volesse, per esempio, conoscere la resistenza termica della muratura analizzata, realizzata con uno spessore dei giunti di malta diverso da quello prima considerato (12 mm), questo sarebbe possibile semplicemente "sostituendo" un numero (lo spessore del giunto di malta) in una delle formule precedenti. I vantaggi derivanti dall'uso della UNI 10355 sono dunque evidenti. A parità di condizioni il calcolo svolto, per esempio, ad Aosta fornisce gli stessi risultati del calcolo svolto a Siracusa. Se si pensa a quanto succede con le misure sperimentali in camera calda su pannelli di muro si tratta di un grande passo in avanti. Chiunque, sulla base di pochi dati (la conducibilità e la geometria dei materiali), può determinare il valore K di una parete. Ecco perché la UNI 10355 mette tutti sullo stesso piano, in quanto consente ad imprese, tecnici e produttori di materiali di utilizzare lo stesso metro di misura, annullando il problema dell'interpretazione dei certificati.

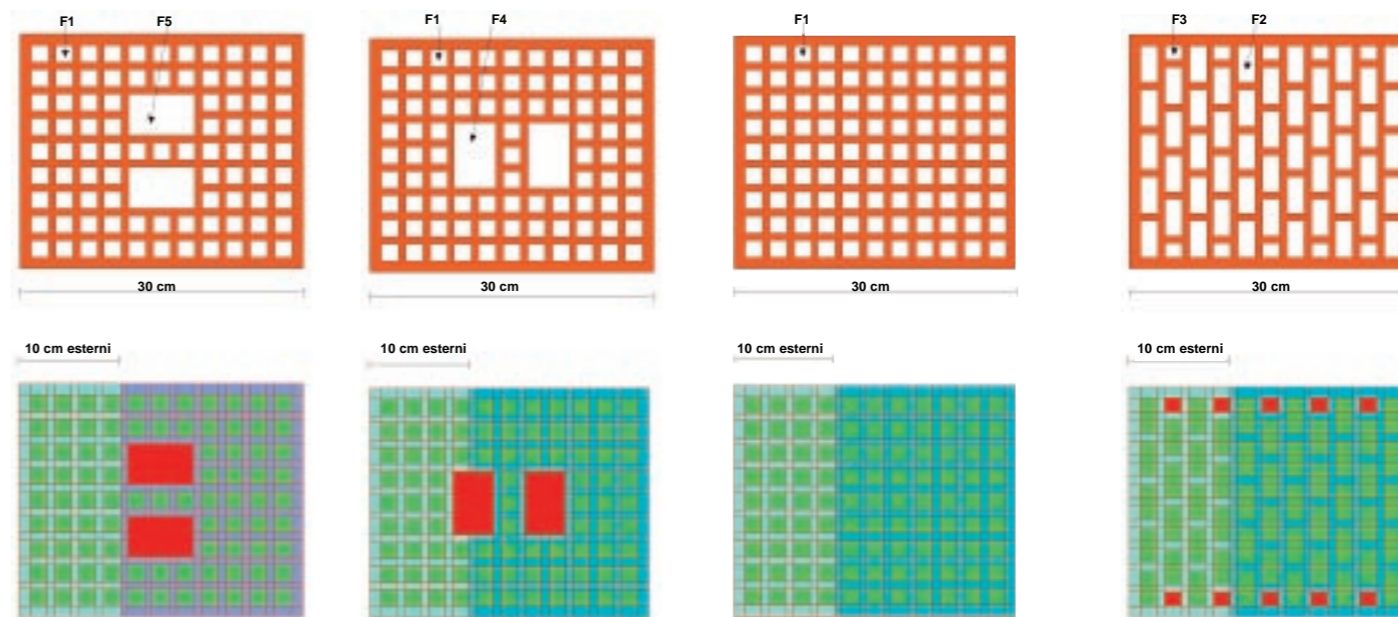
L'influenza della geometria dei blocchi sulla trasmittanza della muratura

Dopo aver esposto in maniera estesa il procedimento di calcolo della resistenza termica secondo la UNI 10355 si cercherà di evidenziare ora, ricorrendo ad alcuni semplici esempi, il ruolo svolto dalla geometria dei blocchi in laterizio sulle prestazioni termiche della muratura.

È bene precisare che, in generale, i parametri fisico-geometrici dei blocchi che intervengono ad influenzare le caratteristiche termiche della muratura finita sono molteplici. In questi esempi ci si limiterà, per semplificare al massimo l'esposizione, a svolgere alcune considerazioni qualitative in merito soprattutto alla geometria ed alla disposizione dei fori, senza addentrarsi in confronti tra tipologie caratterizzate da diverso numero di file di fori, diverse caratteristiche dell'impasto, ecc. che metterebbero in gioco ulteriori variabili.

Per giungere a risultati facilmente interpretabili e confrontabili è comunque necessario porre come costanti alcuni parametri. Negli esempi che seguono sono state considerate le seguenti ipotesi, comuni a tutti i casi esaminati.

3 Conducibilità equivalente λ_e per i fori dei blocchi oggetto di analisi								
spessore medio cavità (m)	lunghezza cavità (m)	Rayleigh (Ra) (adim.)	Nusselt (Nu) (adim.)	h_c (W/m²K)	h_r (W/m²K)	λ_e (W/mK)	$\lambda_{e+15\%}$ (W/mK)	Tipo di foro
0,0180	0,0180	1186,2288	1,2213	1,6963	4,9584	0,120	0,138	F1
0,0180	0,0388	1186,2288	1,2542	1,7419	4,9584	0,121	0,139	F2
0,0180	0,0154	1186,2288	1,2152	1,6878	4,9584	0,120	0,138	F3
0,0438	0,0700	34182,457	1,8932	1,0806	4,9584	0,265	0,304	F4
0,0696	0,0440	205731,09	2,5222	0,9060	4,9584	0,408	0,469	F5



Blocco A: sezione e mesh.

Blocco B: sezione e mesh.

Blocco C: sezione e mesh.

Blocco D: sezione e mesh.

Blocco in laterizio alleggerito:

dimensioni: cm 30 x 25 x 20
 file di fori disposte nello spessore: 11
 peso specifico dell'impasto: $\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$
 conducibilità dell'impasto: $\lambda = 0,30 \text{ W/m}^2\text{C}$
 maggiorazioni: secondo UNI 10351

Malta di allettamento cementizia tipo M2:

peso specifico: $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$
 conducibilità: $\lambda = 0,90 \text{ W/m}^2\text{C}$
 spessore giunti: $s = 12 \text{ mm}$

Con le ipotesi sopra menzionate le forme dei blocchi di seguito analizzate risultano utili per valutare, almeno a livello qualitativo, l'influenza dei seguenti parametri:

- presenza dei fori di presa;
- orientamento dei fori di presa;
- sfalsamento dei fori (cartelle passanti o non passanti nello spessore del muro).

Le analisi termiche, elaborate con il metodo di calcolo previsto dalla UNI 10355 "Murature e solai - Valori della resistenza

termica e metodi di calcolo", riguardano quattro tipi di blocchi in laterizio alleggerito (di seguito contraddistinti con le lettere A, B, C, D). Si è presa in considerazione una muratura realizzata con un blocco base liscio di dimensioni 30x25x20 cm, caratterizzato dalla presenza di 11 file di fori disposte in direzione ortogonale alla direzione del flusso termico (quindi nello spessore di 30 cm), con una trama di foratura che si potrebbe definire "classica" per blocchi in laterizio di questo tipo (blocco C).

Per valutare l'influenza dei fori di presa, della loro posizione, della presenza di cartelle passanti e dello sfalsamento delle file dei fori, sono state poi analizzate le ulteriori configurazioni di blocco A, B, D.

Le caratteristiche dei blocchi posti a confronto sono:

- blocco A: fori di presa disposti con la dimensione maggiore nel senso dello spessore del muro;
- blocco B: con fori di presa disposti con la dimensione maggiore ortogonale allo spessore del muro;
- blocco C: senza fori di presa;
- blocco D: senza fori di presa e con fori sfalsati.

Le conducibilità di calcolo utilizzate per i diversi materiali sono le stesse dell'esempio già illustrato, tenendo conto che la muratura si ipotizza essere una parete esterna.

I dati esposti in tabella 4 permettono di valutare, almeno a livello qualitativo, l'influenza della diversa disposizione della foratura all'interno dei diversi blocchi esaminati.

Le migliori prestazioni si hanno, come era logico attendersi, sfalsando i fori ed evitando di inserire fori di presa; qualora i fori di presa debbano essere realizzati è bene che essi vengano disposti con la dimensione minore nel senso dello spessore della parete, in modo da ottenere una cavità d'aria più sottile e, quindi, con minore conducibilità. ¶

4 Risultati delle analisi con differenti blocchi

Tipo di blocco	λ_{eq} muratura (W/m²C)	K muratura (s = 30) senza intonaco (W/m²C)	K muratura (s = 30) con intonaco (W/m²C)
Blocco A	0,322	0,909	0,891
Blocco B	0,313	0,887	0,870
Blocco C	0,306	0,870	0,853
Blocco D	0,278	0,801	0,787