NORMA UNI 10355 - “Murature e solai - valori della resistenza termica e metodi di calcolo”. (versione commentata)

1. Premessa

Dal 1994 il “vuoto” normativo esistente nel campo della determinazione dei valori di resistenza termica di murature e solai è stato colmato con il recepimento, in data 6 agosto 1994, di una serie di norme UNI attuative del DPR 26/08/93 n. 412 (facente parte dei decreti attuativi della “famosa” legge 10/91 per il contenimento dei consumi di energia).

La UNI 10355 rappresenta la prima norma italiana che stabilisce il criterio di 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 o assoggettabili ad una serie incontrollabile di variabili, 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!

2. La UNI 10355: modalità d’uso

La UNI 10355 si basa sul calcolo della resistenza termica con il metodo degli elementi finiti secondo le ipotesi e le procedure in essa definite. E’ 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.

Si tenga presente che i valori riportati dalla 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.

b) svolgendo il calcolo con il metodo degli elementi finiti secondo la procedura indicata nell’appendice della norma.

Caso a)

I prospetti contengono, per ciascuna tipologia proposta, la rappresentazione dell’elemento e della struttura realizzata con tali elementi, l’indicazione di tutte le caratteristiche geometriche degli elementi (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 le stesse dimensioni, lo stesso peso ecc., ma che presenta solo 10 file di fori nello stesso spessore.

Caso b)

La norma precisa comunque che, in alternativa al criterio della similitudine con le tipologie predefinite, si possono eseguire i calcoli secondo lo schema riportato in appendice.

3. Ipotesi e procedure per il calcolo

Come è noto una struttura muraria non presenta omogeneità nelle tre direzioni (lunghezza, larghezza e spessore). E' tuttavia possibile ricondurre il calcolo ad una struttura non omogenea bidimensionale.

Le ipotesi principali introdotte 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 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 di spessore elevato, come previsto dalla UNI 10351, i 10 cm esterni devono essere calcolati con le caratteristiche che competono alle pareti esterne, conteggiando i 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 "le" 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 "le";

- il valore "le" 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 (12 mm o 5 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 seguenti valori:

$$h_i = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$h_e = 23 \text{ W/m}^2\text{°C}.$$

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

4. Un esempio di calcolo secondo la UNI 10355

Consideriamo ora un semplice esempio di applicazione. Supponiamo di dover determinare la trasmittanza di una parete esterna in muratura costituita dai seguenti elementi:

- blocchi a fori verticali (foratura pari al 47.2%) in laterizio alleggerito di dimensioni cm 30 x 25 x 25 (vedi fig. 1) aventi impasto di peso specifico pari a 1400 kg/m³;
- malta cementizia tipo M2 di peso specifico pari a 1800 kg/m³;
- intonaco a base calce e cemento di peso specifico pari a 1800 kg/m³.

Figura 1 - Blocco utilizzato nell'esempio di calcolo

4.1. 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 su tale sezione deve consentire di assegnare ad ogni materiale la conducibilità corrispondente (vedi fig. 2). Nel nostro caso ogni tipo di foro viene identificato da un colore diverso e così avviene anche per la parte in laterizio; su quest'ultima parte va considerata una differenziazione tra i 10 cm esterni e la parte restante.

Figura 2 - Mesh della sezione da esaminare; i diversi colori identificano materiali di conducibilità diversa. Inoltre i 10 cm esterni del laterizio sono differenziati per applicare la maggiorazione prevista dalla norma

Per determinare le conducibilità da assegnare ai materiali laterizio, malta, intonaco la UNI 10355 fa riferimento alla UNI 10351; per l'impasto cotto del laterizio, come consentito dalla stessa UNI 10351, si ipotizza di avere determinato la conducibilità termica "l" con l'esecuzione di una prova di laboratorio su piastra con anello di guardia secondo la UNI 7745, ottenendo, con una densità di 1400 kg/m³ del provino, il seguente valore:

$$l = 0.30 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Esso non rappresenta tuttavia il valore da attribuire all'impasto laterizio nel nostro 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 indicata dalla norma per laterizi di peso pari a 1400 kg/m³ è pari a:

$$m = 25\%$$

Ma attenzione! La parete di cui vogliamo 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:

$$m = 50\% \text{ (per i 10 cm esterni)}$$

Si ottengono in definitiva le seguenti conducibilità di calcolo:

$$\text{impasto laterizio (10 cm esterni): } l = 0.30 \times 1.50 = 0.450 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\text{impasto laterizio (parte restante): } l = 0.30 \times 1.25 = 0.375 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\text{malta cementizia peso 1800 kg/m}^3: l = 0.90 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\text{intonaco calce cemento peso 1800 kg/m}^3: l = 0.90 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

4.2 Determinazione della conducibilità equivalente "le" delle cavità

Per le cavità il valore "le" viene determinato, come indicato dalla UNI 10355, nel seguente modo:

$$le = s (h_c + h_r)$$

dove:

s = 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:

$$h_r = \text{INCORPORA Equation.2 (W/m}^2 \text{ K)}$$

rappresenta gli scambi per radiazione e per la sua determinazione si assume un'emissività e_1 ed e_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 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_T 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 nel modo seguente:

$$Nu = h_c \cdot s$$

dove:

Nu = numero di Nusselt;

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

l_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:

r = densità dell'aria (in kg/m³);

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

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

b = coefficiente di dilatazione cubica;

$$Ra = 1.13 \cdot 10^8 \cdot r^3 \cdot DT_s \quad (\text{per aria a 293 K});$$

dove:

s = spessore della cavità.

In altre parole il numero di Rayleigh assume valori diversi in funzione della temperatura dell'aria, in quanto al variare della temperatura stessa 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°C - 40°C), risulta sufficientemente corretto il riferimento alla temperatura di 293 K (20°C).

Per il calcolo di DT_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. Nel nostro esempio l'elemento dispone di 10 file di fori in direzione ortogonale al flusso termico prevalente; si può quindi assumere:

I valori di calcolo, maggiorati del 15% come prescritto, sono evidenziati nella colonna colorata. Dai numeri esposti in tabella emerge subito una prima osservazione: la conducibilità equivalente dei fori dipende sostanzialmente dallo spessore medio del foro ed in maniera marginale dalla sua lunghezza.

4.3 La fase di calcolo con il metodo degli elementi finiti

La potenza termica "Q₁" trasmessa dalla struttura considerata, riferita ad un'area di 0.25 m², nel nostro caso è risultata pari a:

$$Q_1 = 3.8515 \text{ W}$$

Figura 3 - Andamento del flusso termico nella sezione piana bidimensionale dell'elemento

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 scambio di 0.25 m², il valore:

$$Q_2 = 7.3394 \text{ W}$$

$$Q = \text{INCORPORA Equation.2} = 3.9910 \text{ W}$$

Figura 4 - Maggiorazione per penetrazione della malta nei fori dell'elemento: essa viene valutata considerando una penetrazione della malta pari ad 1 cm nei fori del blocco

Nel calcolo della potenza termica scambiata dalla struttura, i coefficienti superficiali di scambio (coefficienti liminari) sono stati assunti pari a: $h_i = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ed $h_e = 23 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (rispettivamente per il lato interno ed esterno).

A partire dal valore "Q" della potenza termica scambiata dall'elemento risulta agevole calcolare la conducibilità equivalente del blocco (k_{blocco}) tramite la relazione:

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

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);

che fornisce:

$$K_{\text{blocco}} = \text{INCORPORA Equation.2} = 0.798 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

e tenendo conto che:

$$K_{\text{blocco}} = \text{INCORPORA Equation.2} = \text{INCORPORA Equation.2} = 0.798$$

si ricava:

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

$$C_{\text{blocco}} = \text{INCORPORA Equation.2} = 0.922 \text{ W/m}^2\text{C}$$

dove:

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:

$$C_{\text{giunto}} = \text{INCORPORA Equation.2}$$

dove si è assunto, per l'intercapedine d'aria il valore $l_{\text{aria}} = 0.3 \text{ W/m}^2\text{C}$, ricavando:

$$C_{\text{giunto}} = \text{INCORPORA Equation.2} = 1.800 \text{ W/m}^2\text{C}$$

A questo punto è possibile calcolare la conduttanza equivalente (C_{eq}) della parete (blocchi + giunti di malta) semplicemente mettendo "in parallelo" le conduttanze dell'elemento e dei giunti, ipotizzando che a ciascun elemento siano associati un giunto orizzontale ed uno verticale (vedi figura 5). Ipotizzando uno spessore dei giunti di malta pari a 12 mm (0.012 m) si ottiene:

$$C_{\text{eq}} = \text{INCORPORA Equation.2} = 1.000 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Figura 5 - Calcolo della conduttanza equivalente della parete considerando malta e struttura "in parallelo"

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

$$K = \text{INCORPORA Equation.2} = \text{INCORPORA Equation.2} = 0.856 \text{ W/m}^2\text{C}$$

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

$$K = \text{INCORPORA Equation.2} = 0.856$$

da cui:

$$l_{\text{eq}} = 0.300 \text{ W/m}^2\text{C}$$

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. Si ottiene pertanto, per la parete intonacata:

$$K_{\text{intonacato}} = \text{INCORPORA Equation.2} = \text{INCORPORA Equation.2} = 0.839 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$R = \text{INCORPORA Equation.2}$$

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

l_{int} = conduttività termica dell'intonaco.

Ne consegue pertanto una resistenza termica della parete pari a:

$$R = \text{INCORPORA Equation.2} = 1.001 \text{ m}^2\text{C/W}$$

5. Conclusioni

La procedura di calcolo sopra descritta risulta complessa solo in apparenza 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 immediatamente tutti i risultati desiderati.

In definitiva la nostra parete, realizzata con i blocchi di fig. 1 e con giunti di malta orizzontali e verticali di spessore 12 mm, presenta una conducibilità equivalente pari a:

$$l_{\text{eq}} = 0.300 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$K = 0.856 \text{ W/m}^2\text{C}$$

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, è facilmente possibile determinare le proprietà termiche di tutte le murature costituite con l'elemento esaminato 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 conoscere la resistenza termica della muratura studiata nel nostro esempio, realizzata con uno spessore dei giunti di malta diverso da quello prima considerato, questo sarebbe possibile semplicemente "sostituendo" un numero (lo spessore del giunto di malta) in una delle relazioni precedenti.