

## Capitolo settimo

### Scambio termico per meccanismi combinati.

#### 7.1 Introduzione

Per semplificare l'esposizione e la comprensione dello scambio termico, per quanto d'interesse nel settore dell'architettura e dell'edilizia, in precedenza sono stati esaminati separatamente i tre meccanismi. Tuttavia, nella maggior parte dei casi l'energia termica fluisce secondo più meccanismi che agiscono contemporaneamente.

Si consideri ad esempio l'edificio, schematicamente mostrato nella Fig.7.1.. Una delle sue pareti perimetrali rappresentate in sezione nella stessa figura è costituita da tre strati disposti in serie. Nell'ipotesi che la temperatura dell'aria interna sia maggiore di quella dell'aria all'esterno, lo scambio di energia, secondo la modalità calore avviene nel verso che va dall'interno verso l'esterno. I meccanismi attivi sono però diversi a seconda della zona di parete presa in considerazione; la potenza termica, nel caso in esame, essendo  $T_i > T_e$  dall'ambiente interno viene trasferita

- sulle superficie interna della parete sia per convezione che per l'irraggiamento. Il meccanismo convettivo è da attribuirsi ai moti dell'aria presente in ambiente che lambisce la superficie interna della parete; l'irraggiamento alla differente temperatura delle superfici che delimitano l'ambiente, rispetto a quella considerata, ed alla presenza di sorgenti che irradiano energia termica: ad esempio un radiatore di un impianto per riscaldamento. Questi due contributi, sommati, forniscono la potenza termica che dall'interno dell'ambiente si trasferisce alla superficie interna della parete perimetrale considerata.

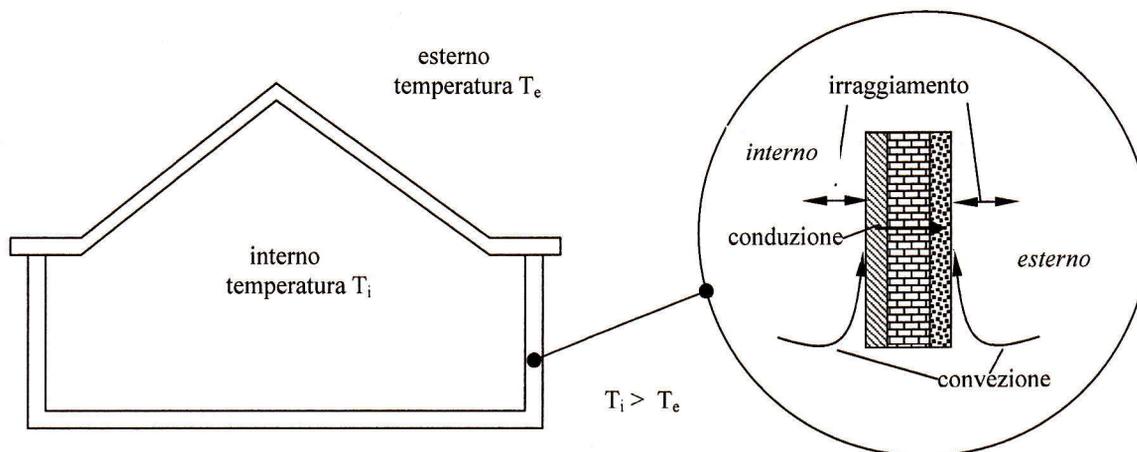


Fig.7.1 – I meccanismi di scambio termico combinato. La temperatura interna  $T_i$  è considerata maggiore di quella esterna  $T_e$

- tale potenza termica viene quindi trasferita dalla superficie interna a quella esterna, attraverso gli strati d'intonaco e muratura con l'ausilio di un solo meccanismo, quello conduttivo;
- infine, sulla superficie esterna della parete, in base alle stesse considerazioni esposte in precedenza, per irraggiamento e convezione la potenza termica viene trasferita all'ambiente esterno.

Non sempre i meccanismi radiativo e convettivo hanno lo stesso peso nel determinare l'entità della potenza termica scambiata. Ad esempio, allorché le temperature delle superfici sono elevate e si è in presenza di convezione naturale, il contributo radiativo, essendo legato alla

quarta potenza della temperatura assoluta può diventare prevalente, mentre se tali temperature sono prossime a quella ambiente, e la convezione è forzata, prevale il meccanismo convettivo.

Ai fini pratici, per un caso come quello illustrato, può risultare utile disporre di una relazione che consenta il calcolo della potenza termica che attraversa la parete conoscendo il valore della temperatura dell'aria all'interno dell'edificio ed all'esterno, e le caratteristiche della parete (numero di strati, spessori e caratteristiche dei materiali che li costituiscono).

### 7.2 Calcolo della potenza termica scambiata per meccanismi combinati

In base alle precedenti considerazioni, ed osservando lo schema di Fig. 7.2, partendo dall'interno dell'edificio, lo scambio termico tra l'ambiente interno e la superficie interna della parete perimetrale sarà somma dei contributi convettivi e radiativi

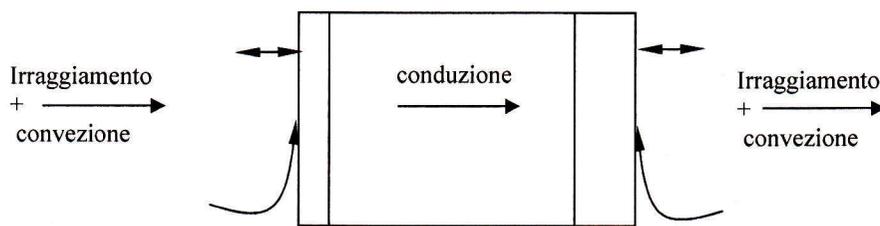


Fig. 7.2

$$\dot{Q} = \left( \dot{Q}_{\text{conv.}} + \dot{Q}_{\text{irr.}} \right)_{\text{ambiente int.} - \text{sup. int.}}$$

Questa stessa potenza attraversa la parete per conduzione trasferendosi dalla superficie interna e quella esterna

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{cond.}}$$

Infine sulla superficie esterna la  $\dot{Q}$  verrà trasferita all'ambiente attraverso i contributi convettivi e radiativi

$$\dot{Q} = \left( \dot{Q}_{\text{conv.}} + \dot{Q}_{\text{irr.}} \right)_{\text{sup. est.} - \text{ambiente est.}}$$

Si tratta ora di valutare i termini delle relazioni precedenti tenendo conto del particolare meccanismo di scambio in gioco per una qualunque parete come ad esempio quella della Fig. 7.3.a) costituita da tre strati disposti in serie, mostrata in sezione in Fig. 7.3.b).

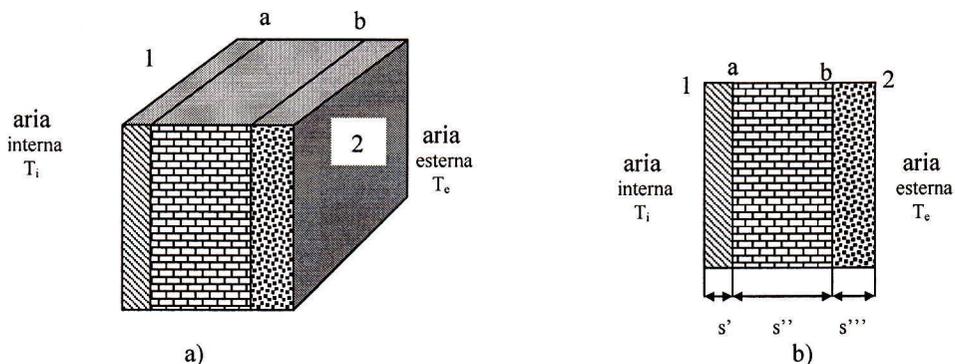


Fig. 7.3

La potenza termica convettiva  $\dot{Q}_{conv}$  tra l'aria ambiente e la superficie interna della parete può esprimersi semplicemente, tenendo conto della (6.1):

$$\dot{Q}_{conv} = h_c \cdot A(T_i - T_1) \quad (7.1)$$

Nella precedente relazione  $h_c$  rappresenta la conduttanza unitaria superficiale per convezione naturale misurata in  $W/m^2K$ ,  $A$  è la superficie della parete,  $T_i$  la temperatura dell'aria all'interno dell'edificio, e  $T_1$  quella della superficie interna della parete perimetrale considerata.

La potenza  $\dot{Q}_{irr}$  scambiata per irraggiamento tra la superficie interna della parete e l'ambiente interno non sarebbe calcolabile con i modelli presentati nel capitolo sull'irraggiamento. In quel caso infatti tali modelli erano molto semplificati sia per le caratteristiche radiative delle superfici considerate che per la geometria del sistema: superfici nere o grigie piane parallele indefinite, superfici sferiche concentriche, etc.. Per superare questa difficoltà, sperimentazioni in laboratorio e verifiche effettuate sul campo in situazioni diverse hanno consentito di valutare attraverso una sola relazione lo scambio termico radiativo, nel caso di pareti verticali o orizzontali, per tipologie che caratterizzano prevalentemente l'edilizia residenziale, attraverso una procedura semplificata che viene brevemente illustrata nel seguito.

La potenza termica scambiata per irraggiamento tra la superficie della parete e l'ambiente circostante viene espressa attraverso la relazione:

$$\dot{Q}_{irr} = h_r \cdot A \cdot (T_r - T_1)$$

dove con  $T_r$  rappresenta una *temperatura di riferimento* e con  $h_r$  si indica una *conduttanza media unitaria radiativa* misurata in  $W/m^2K$ . Tale conduttanza è legata alla emissività e della superficie considerata, alla sua temperatura ed ai fattori di configurazione della superficie con quelle circostanti.

Se si fa l'ipotesi che la temperatura di riferimento coincida con la temperatura dell'aria all'interno dell'ambiente, sarà  $T_r = T_i$  e quindi la potenza termica complessivamente scambiata tra l'ambiente interno e la superficie 1, risulterà:

$$\dot{Q} = \left( \dot{Q}_{conv.} + \dot{Q}_{irr.} \right)_{ambienteint.-sup.int.} = h_c \cdot A (T_i - T_1) + h_r \cdot A (T_i - T_1)$$

$$\dot{Q} = h_c \cdot A (T_i - T_1) + h_r \cdot A (T_i - T_1) = (h_c + h_r) \cdot A (T_i - T_1)$$

ponendo ora

$$h_{int} = h_c + h_r$$

si avrà in definitiva

$$\dot{Q} = A h_{int} (T_i - T_1) = A \frac{T_i - T_1}{\frac{1}{h_{int}}} = A \frac{T_i - T_1}{r_{int}} \quad (7.2)$$

avendo indicato con  $h_{int}$  ( $W/m^2K$ ) la conduttanza media unitaria superficiale interna, somma delle conduttanze medie unitarie per convezione ed irraggiamento. La procedura illustrata è utile per

comprendere la logica che è alla base della definizione di una conduttanza convettiva unitaria per irraggiamento e convezione. Il suo valore numerico infatti deriva esclusivamente da indagini teorico sperimentali, che conducono alle indicazioni presenti nelle normative italiane che sono riportate nella seguente tabella

Valori della conduttanza unitaria media superficiale per convezione ed irraggiamento (UNI 10344)

Componenti opachi (qualunque giacitura)	conduttanza unitaria media superficiale W/m <sup>2</sup> K
Esterno	25
Interno	7,7
Componenti trasparenti (qualunque giacitura)	
Esterno	25
Interno	$3,6 + 4,4 \frac{\varepsilon^{(*)}}{0,837}$

(\*) Il valore di  $\varepsilon$ , per il vetro normale è pari a 0,837, quindi h risulterà 8,0 W/m<sup>2</sup>K

Se ora si considerano i tre strati di cui è costituita la parete la potenza termica che si è trasferita dall'ambiente interno alla superficie 1 per irraggiamento e convezione sarà trasmessa per conduzione dalla superficie 1 alla 2. La relazione di calcolo della  $\dot{Q}$  è stata ricavata nello studio della conduzione (4.11) e viene qui riscritta

$$\dot{Q} = A \frac{T_1 - T_2}{(r' + r'' + r''')} = \frac{T_1 - T_2}{r_{tot}} \quad (7.3)$$

Infine la potenza termica che raggiunge la superficie 2 sarà trasferita all'ambiente esterno per convezione ed irraggiamento, come accadeva all'interno dell'edificio. Per valutarla si potrà semplicemente riscrivere la (7.2)

$$\dot{Q} = Ah_{est}(T_2 - T_e) = A \frac{T_2 - T_e}{\frac{1}{h_{est}}} = A \frac{T_2 - T_e}{r_{est}} \quad (7.4)$$

tenendo conto che la superficie esterna è a temperatura maggiore dell'aria esterna per l'ipotesi iniziale che definiva  $T_i > T_e$ . La  $h_{est}$  rappresenta la conduttanza media unitaria superficiale esterna, somma delle conduttanze medie unitarie per convezione ed irraggiamento relative allo scambio termico superficie esterna-ambiente esterno.

Con una procedura analoga a quella utilizzata per la parete costituita da più strati disposti in serie è possibile ricavare la  $\dot{Q}$  trasmessa per meccanismi combinati dall'interno dell'edificio verso l'esterno. Si ha

$$\dot{Q} = A \cdot \frac{T_i - T_e}{\left( \frac{1}{h_{int.}} + \frac{s'}{\lambda'} + \frac{s''}{\lambda''} + \frac{s'''}{\lambda'''} + \frac{1}{h_{est}} \right)} \quad (7.5)$$

Indicando con  $K$  il termine:

$$K = \frac{1}{\left( \frac{1}{h_{\text{int.}}} + \frac{s'}{\lambda'} + \frac{s''}{\lambda''} + \frac{s'''}{\lambda'''} + \frac{1}{h_{\text{est}}} \right)} \quad (7.6)$$

che rappresenta il *coefficiente globale di trasmissione*, definito anche *trasmittanza unitaria* della parete, misurata in W/m<sup>2</sup>K la (7.6) si può scrivere:

$$\dot{Q} = K \cdot A \cdot (T_i - T_e)$$

Il flusso termico sarà quindi:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = K \cdot (T_i - T_e)$$

Generalizzando le relazioni riportate in precedenza ad un parete con n strati disposti in serie, la trasmittanza termica unitaria K è:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{int}}} + \sum_{k=1}^n \frac{s_k}{\lambda_k} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{C_j} + \frac{1}{h_{\text{est}}}} \quad (7.7)$$

in cui n è il numero di strati che compongono la parete;

s<sub>k</sub> è lo spessore del generico strato k;

λ<sub>k</sub> è la conduttività utile di calcolo del generico strato k, W/mK (kcal/hm<sup>2</sup>°C); per un notevole numero di materiali il valore di λ è riportato in Appendice – Proprietà termofisiche.

Le precedenti considerazioni e le relazioni ricavate sono applicabili a pareti costituite da più strati comunque orientate.

Si noti ancora che nella (7.7) compare la sommatoria  $\sum_{j=1}^m \frac{1}{C_j}$  che fa riferimento alla presenza,

all'interno della parete, di intercapedini d'aria o strati non omogenei, come ad esempio alcuni tipi di solai; con m si indica il numero di tali strati e con C<sub>j</sub> la conduttanza termica unitaria del generico strato j, W/m<sup>2</sup>K (kcal/hm<sup>2</sup>°C);

h<sub>i</sub> ed h<sub>e</sub> sono le conduttanze unitarie superficiali interna ed esterna i cui valori sono riportati nella Tabella a pag. 5.

Si noti infine che spesso, in edifici con struttura portante in cemento armato, le pareti di tamponamento verso l'esterno o verso ambienti non riscaldati, sono realizzate con muratura a doppia fodera. Un muro esterno, un'intercapedine d'aria ed un muro interno. La sezione della parete è mostrata in Fig.7.4. La parete è quindi costituita da più strati disposti in serie ma uno di questi strati è rappresentato da una zona che, in generale, non ha comunicazione con l'esterno e con l'interno, in cui è presente dell'aria. La resistenza termica di questo strato **non può essere calcolata secondo la relazione** ;

$$r = \frac{S_{aria}}{\lambda_{aria}}$$

poiché, anche se l'aria nell'intercapedine fosse immobile, *i meccanismi di scambio termico attivi sarebbero comunque due: conduzione ed irraggiamento.*

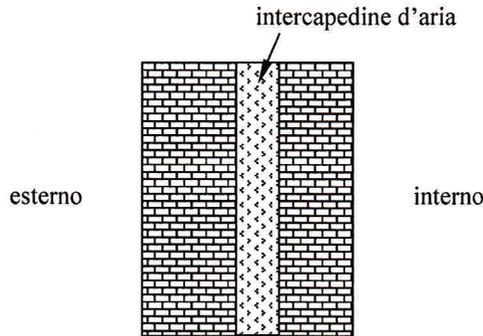


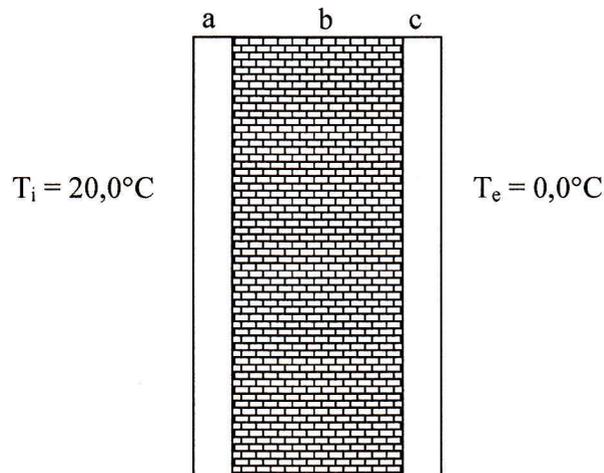
Fig. 7.4

Per tale motivo nelle applicazioni tecniche si calcola, per questo tipo di elemento, una conduttanza o una resistenza termica unitaria, secondo delle procedure che, basate sullo studio teorico del problema, sono state verificate sperimentalmente sugli elementi edilizi di più diffusa utilizzazione. Le procedure sono illustrate in Appendice C dove è possibile ricavare inoltre indicazioni sulla resistenza termica di numerose murature e solai di copertura e calpestio. Si noti infine che i termini a denominatore della (7.7) sono delle resistenze termiche quindi *al termine  $1/C_j$  si dovrà sostituire il valore numerico ottenuto dalla procedure illustrate in appendice se queste conducono alla determinazione della resistenza termica dello strato  $j$ -esimo, oppure il suo inverso se, dalle procedure o dalle tabelle, si ottiene una conduttanza.*

#### ESERCIZI SUI MECCANISMI COMBINATI IN REGIME STAZIONARIO

Es.1

Si calcoli la potenza termica trasmessa per unità di superficie attraverso una parete piana verticale costituita dai seguenti strati:



- a) intonaco di cemento e calce
  - spessore 20 mm
  - massa volumica 1800 kg/m<sup>3</sup>
- b) muratura di mattoni pieni
  - spessore 120 mm
  - massa volumica 1800 kg/m<sup>3</sup>
- c) intonaco di cemento
  - spessore 20 mm
  - massa volumica 2000 kg/m<sup>3</sup>

La parete separa due ambienti che sono rispettivamente alla temperatura di 0,0°C e di 20,0°C.

Es.2

Si calcolino la trasmittanza unitaria e la potenza termica trasmessa per unità di superficie attraverso una parete vetrata verticale che separa due ambienti a temperatura di 20,0°C e di 2,0°C nelle ipotesi che essa sia realizzata con:

- a) vetro singolo con spessore di 4,0mm;
- b) vetro doppio dallo spessore di 4,0 mm con intercapedine d'aria di 8,00 mm (si assuma per l'aria in quiete  $\lambda = 0,026 \text{ W/mK}$ )

Si utilizzino per le superfici vetrate i valori delle conduttanze unitarie superficiali forniti per i componenti opachi.

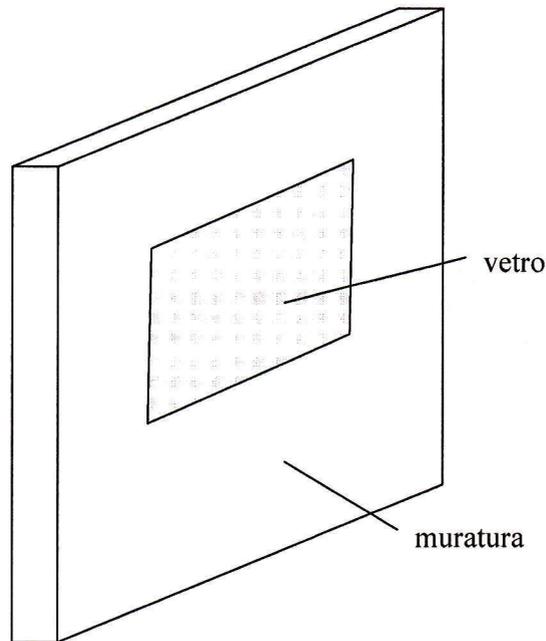
Es.3

Una parete piana verticale, alta 3,0 m e larga 5,0 m, è realizzata in muratura e vetro. La zona in muratura è costituita dai seguenti strati:

- a) intonaco di cemento: spessore 20mm, massa volumica 2000 kg/m<sup>3</sup>
- b) muratura di laterizio forato: spessore 120 mm, massa volumica 1000 kg/m<sup>3</sup>
- c) intercapedine d'aria non ventilata, spessore 15,0 mm
- d) muratura di laterizio forato, spessore 80 mm, massa volumica 1000 kg/m<sup>3</sup>
- e) intonaco di calce e gesso, spessore 20 mm, massa volumica 1400 kg/m<sup>3</sup>

La zona vetrata, dalle dimensioni di 2,50 x 1,50 m, è realizzata con vetro dallo spessore di 4,0 mm.

La parete considerata separa due ambienti che sono alla temperatura di 20,0°C e di 0,0°C.



Si calcolino:

- La potenza termica dispersa attraverso la parete
- La percentuale di tale potenza che viene ceduta all'esterno attraverso la zona vetrata.

Es.4

Una parete piana verticale costituita dai seguenti strati:

- a) intonaco di calce e gesso: spessore 30,0 mm, massa volumica  $1400 \text{ kg/m}^3$ ;
- b) muratura di laterizio forato: spessore 60,0 mm, massa volumica =  $800 \text{ kg/m}^3$ ;
- c) intercapedine d'aria parzialmente ventilata, spessore 50 mm
- d) muratura di laterizio forato: spessore 50,0 mm, massa volumica  $1500 \text{ kg/m}^3$ ;
- e) intonaco di cemento: spessore 35,0 mm, massa volumica =  $2000 \text{ kg/m}^3$ ;

separa due ambienti alla temperatura di  $20,0 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $-8,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Si calcoli la conduttanza globale di trasmissione e la potenza termica trasmessa per unità di superficie attraverso la parete.

Per migliorare l'isolamento termico della parete viene iniettata nell'intercapedine della perlite espansa in granuli (massa volumica =  $100 \text{ kg/m}^3$ ). Si ricalcoli la conduttanza globale di trasmissione così ottenuta e la potenza termica dispersa.

Es.5

Una parete piana verticale che separa due ambienti alla temperatura di  $18,0 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  è costituita dai seguenti strati, dall'interno verso l'esterno:

- a) intonaco di calce e gesso: spessore 30,0 mm, massa volumica  $1400 \text{ kg/m}^3$ ;
- b) pannello isolante in fibra di vetro rigida: spessore 20,0 mm, massa volumica =  $100 \text{ kg/m}^3$ ;
- c) muratura di mattoni pieni: spessore 120,0 mm, massa volumica  $1600 \text{ kg/m}^3$ ;
- d) intonaco di cemento: spessore 35,0 mm, massa volumica =  $2000 \text{ kg/m}^3$ ;

Si calcoli la temperatura all'interfaccia isolante-muratura (b-c).

Es.6

Una parete piana costituita da tre strati omogenei disposti in serie, separa un ambiente interno a  $20,0 \text{ }^\circ\text{C}$  dall'esterno a  $4,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Gli strati hanno le seguenti caratteristiche (dall'interno verso l'esterno):

- A) intonaco interno di gesso puro, densità  $1200 \text{ kg/m}^3$ , spessore 2,50 cm;
- B) muratura in mattoni, densità  $1400 \text{ kg/m}^3$ , spessore 60 cm;
- C) intonaco esterno di malta di cemento, densità  $2000 \text{ kg/m}^3$ , spessore 3,00 cm.

Calcolare il flusso termico che attraversa la parete e la temperatura sulla superficie di interfaccia tra l'intonaco interno e la muratura.

Es.7

Una parete piana verticale costituita da strati disposti in serie, separa un ambiente interno a  $23,0^\circ\text{C}$  dall'esterno a  $-3,0^\circ\text{C}$ . Gli strati hanno le seguenti caratteristiche (dall'interno verso l'esterno):

- A) intonaco interno di gesso puro, densità  $1200 \text{ kg/m}^3$ , spessore 1,50 cm;
- B) muratura in mattoni, densità  $1000 \text{ kg/m}^3$ , spessore 15,0 cm;
- C) Intercapedine leggermente ventilata, spessore 5,0 cm;
- D) muratura in mattoni, densità  $1600 \text{ kg/m}^3$ , spessore 10,0 cm;
- E) intonaco esterno di malta di cemento, densità  $2000 \text{ kg/m}^3$ , spessore 3,00 cm.

Calcolare il flusso termico che attraversa la parete.

Es.8

Una parete piana costituita da tre strati omogenei disposti in serie, separa un ambiente interno a  $22,0^\circ\text{C}$  dall'esterno a  $2,0^\circ\text{C}$ . Gli strati hanno le seguenti caratteristiche (dall'interno verso l'esterno):

- A) intonaco interno di gesso puro, densità  $1200 \text{ kg/m}^3$ , spessore 2,00 cm;
- B) muratura in mattoni, densità  $1800 \text{ kg/m}^3$ , spessore 40,0 cm;
- C) intonaco esterno di malta di cemento, densità  $2000 \text{ kg/m}^3$ , spessore 3,50 cm.

Calcolare il flusso termico che attraversa la parete.

Per ridurre il flusso ad un terzo di quello precedentemente calcolato si inserisce uno strato di polistirene espanso sinterizzato in lastre dalla densità di  $20 \text{ kg/m}^3$ . Calcolare lo spessore dello strato di isolante.

Es.9

Una parete piana costituita da tre strati omogenei disposti in serie, separa un ambiente interno a  $20,0^\circ\text{C}$  dall'esterno. La temperatura della superficie interna è di  $17,5^\circ\text{C}$ . Gli strati hanno le seguenti caratteristiche (dall'interno verso l'esterno):

- A) intonaco interno di gesso puro, densità  $1200 \text{ kg/m}^3$ , spessore 1,0 cm;
- B) muratura in mattoni, densità  $1200 \text{ kg/m}^3$ , spessore 45 cm;
- C) intonaco esterno di malta di cemento, densità  $2000 \text{ kg/m}^3$ , spessore 2,40 cm.

Calcolare il flusso termico che attraversa la parete e la temperatura dell'ambiente esterno.

Es.10

Una parete piana costituita da quattro strati omogenei disposti in serie, separa un ambiente interno a  $22,0^\circ\text{C}$  dall'esterno. La temperatura della superficie esterna è di  $5,0^\circ\text{C}$ . Gli strati hanno le seguenti caratteristiche (dall'interno verso l'esterno):

- A) intonaco interno di gesso puro, densità  $1200 \text{ kg/m}^3$ , spessore 1,0 cm;
- B) muratura in mattoni, densità  $1200 \text{ kg/m}^3$ , spessore 45 cm;
- C) lastra di cloruro di polivinile espanso rigido, densità  $30 \text{ kg/m}^3$ , spessore 2,0 cm;
- D) intonaco esterno di malta di cemento, densità  $2000 \text{ kg/m}^3$ , spessore 2,40 cm.

Calcolare il flusso termico che attraversa la parete, la temperatura dell'ambiente esterno e le temperature in corrispondenza delle interfacce tra i vari strati.

Es.11 Una parete piana costituita da tre strati omogenei disposti in serie, separa un ambiente interno a  $22,0^\circ\text{C}$  dall'esterno. La temperatura della superficie della parete rivolta verso l'ambiente interno è di  $20,7^\circ\text{C}$ . Gli strati hanno le seguenti caratteristiche, dall'interno verso l'esterno:

- A) intonaco interno di gesso puro, densità  $1200 \text{ kg/m}^3$ , spessore 2,00 cm;

B) muratura in mattoni, densità  $1800 \text{ kg/m}^3$ , spessore  $65,0 \text{ cm}$ ;

C) intonaco esterno di malta di cemento, densità  $2000 \text{ kg/m}^3$ , spessore  $2,50 \text{ cm}$ .

Nelle ipotesi di regime stazionario e flusso termico monodimensionale, calcolare il flusso termico che attraversa la parete, la trasmittanza della parete e la temperatura dell'ambiente esterno.

Es.12 Una parete piana costituita da tre strati omogenei disposti in serie, separa un ambiente interno alla temperatura di  $21,0^\circ\text{C}$  da quello esterno, alla temperatura di  $3,0^\circ\text{C}$ . Gli strati hanno le seguenti caratteristiche:

A) spessore  $2,0 \text{ cm}$ , conduttività termica  $= 0,65 \text{ W/mK}$

B) spessore  $15,0 \text{ cm}$ , conduttività termica  $= 0,90 \text{ W/mK}$

C) spessore  $3,0 \text{ cm}$ , conduttività termica  $= 1,2 \text{ W/mK}$

Calcolare la potenza termica trasmessa e la temperatura della superficie rivolta verso l'ambiente interno.

Calcolare inoltre lo spessore dello strato di isolante ( $\lambda = 0,042 \text{ W/mK}$ ) da aggiungere alla parete sopra descritta in modo che, a parità di temperature degli ambienti, il flusso termico si riduca del 30%.