



P.G. Mura  
M. Sanna



# Metodologia di verifica delle proprietà radiative di una parete di vetro-camera

## 1. Introduzione

Nel primi anni ottanta si verificò l'opportunità di poter applicare al caso della realizzazione di un nuovo quartiere residenziale i principi ed il metodo della progettazione energetica del "Sistema Edificio-Impianto" [1].

Dopo la realizzazione di questi edifici, tra i quali di particolare rilievo sono le torri costituite da facciate continue di alluminio-vetro, si è presentata la possibilità di effettuare una verifica sperimentale delle proprietà termotecniche e radiative dei materiali, delle strutture e degli impianti messi in opera nelle condizioni reali di esercizio.

Pertanto, nel 1982 presso l'Istituto di Fisica Tecnica dell'Università di Cagliari fu predisposto un programma pluriennale di ricerca le cui finalità principali sono:

- 1) la verifica sperimentale delle proprietà radiative delle pareti trasparenti;
- 2) la verifica sperimentale della conduttanza e trasmittanza delle facciate continue;
- 3) il comportamento passivo dell'edificio;
- 4) l'analisi sperimentale del bilancio di energia degli impianti di climatizzazione a pompa di calore ed a recupero entalpico a portata d'aria variabile.

In questa memoria riferiamo i risultati della prima fase della ricerca inerente la verifica sperimentale delle proprietà radiative delle pareti trasparenti.

## 2. Descrizione della parete dell'edificio

L'edificio sul quale sono state eseguite le misure di radiazione è illustrato dalle fotografie delle figure 1 e 2. La parete esterna è costituita da una facciata

continua di elementi portanti di alluminio estruso anodizzato, da un pannello opaco e termoisolante nella fascia inferiore presso il pavimento, posto dietro un vetro semplice semiriflettente, e da una vetrata trasparente nella fascia superiore. I criteri del progetto termotecnico della parete sono riportati nella memoria [1] alla quale si rinvia per ulteriori particolari.

Descriviamo in dettaglio la vetrata trasparente che, avendo il maggior rilievo nel bilancio di energia radiante, è oggetto dell'indagine sperimentale di cui si riferisce in questa memoria; si veda in proposito la figura 3.

La vetrata è costituita da pannelli di "vetro-camera", costituiti da due vetri aventi spessore di 6 mm e la camera d'aria di spessore di 12 mm (fig. 3a).

Nella fase della progettazione l'analisi del sistema "edificio-impianto", tesa a minimizzare il fabbisogno di energia per il condizionamento compatibilmente con le esigenze espresse dai progettisti edili, aveva condotto ad adottare un vetro "semiriflettente" con superficie riflettente a film d'argento depositato sulla faccia interna all'intercapedine del vetro esterno [1].

Schematicamente si può dire che le proprietà di un "vetro-camera" da adottare in un edificio destinato ad uffici devono essere:

- 1) bassa conduttanza;
- 2) bassa emissività per la radiazione infrarossa ad onda lunga ( $\lambda > 3 \mu\text{m}$ );
- 3) buona trasparenza alla radiazione del campo visibile (intorno a  $0,5 \mu\text{m}$ );
- 4) elevata riflettività verso l'ambiente esterno per la radiazione infrarossa ad onda corta (da  $0,7$  a  $3 \mu\text{m}$ ).

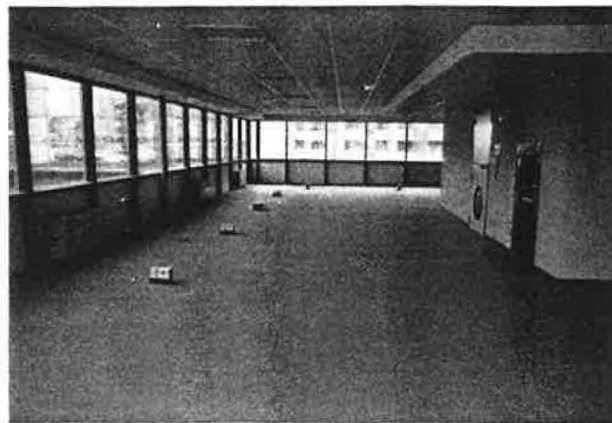
Per i pannelli di vetro-camera adottati negli edifici a torre (fig. 1 e 2) la società italiana produttrice ha fornito le proprietà termiche e radiative riassunte nella tabella I, ove  $\tau_L$  e  $\rho_L$  sono la trasmittività e riflettività del flusso luminoso,  $\tau_s$  e  $\rho_s$  sono riferite al flusso di energia connesso con la radiazione solare,  $f_s$  è il fattore solare che viene definito nel paragrafo seguente; il valore della trasmittanza K fornito dal costruttore è riferito ad una temperatura esterna di

*Prof. ing. Paolo Giuseppe Mura*  
Professore di Energetica, Istituto di Fisica Tecnica,  
Università di Cagliari

*dott. ing. Marco Sanna*  
Collaboratore dell'Istituto di Fisica Tecnica, Università di Cagliari



**figura 1** - Panoramica degli edifici a facciata continua alluminio-vetro su cui sono state effettuate le misure di radiazione



**figura 2** - Vista interna dell'edificio su cui sono state effettuate le misure di radiazione

-18°C, interna di +21°C, ad una velocità del vento di 6,7 m/s e radiazione solare nulla.

Le proprietà radiative del vetro-camera in esame sono completate efficacemente dal diagramma spettrale della trasmittività in funzione della lunghezza d'onda (fig. 4). Come si vede, il valore del fattore solare dichiarato dal costruttore è pari a 0,17; nell'analisi termodinamica del progetto si assunse prudentialmente per il fattore solare il valore 0,30 [1], perché nei primi anni '80 erano appena apparsi sul mercato europeo e italiano i vetri doppi dotati di bassa conduttanza e basso fattore solare.

### 3. Bilancio di energia per la parete di vetro

L'importanza e la difficoltà di conoscere le proprietà radiative dei materiali è messa in evidenza nel Rapporto Finale n. 6 del CNR-PFE (1981) [2].

Riteniamo pertanto opportuno fondare la metodologia sperimentale su una appropriata analisi termodinamica del problema.

Poiché il vetro-camera è montato sulla struttura di alluminio mediante guarnizioni di gomma che evitano il contatto diretto del vetro con l'alluminio (fig. 3c) e tenuto conto delle dimensioni di ciascun pannello (1,4 m x 1,4 m), si può trascurare l'effetto di bordo e considerare, con buona approssimazione, uniforme la distribuzione di temperatura del vetro.

Considerando come sistema termodinamico un singolo pannello di vetro-camera, montato sulla facciata continua alluminio-vetro (fig. 5), si può applicare il primo principio della termodinamica, nella forma estesa contenente la radiazione come ente distinto dal calore [3]:

$$\Sigma \phi + \Sigma Q + \Sigma L = \Delta U \quad (1)$$

Indicando con G l'irraggiamento e con la J la radiosità, con S<sub>e</sub> e S<sub>i</sub> le superfici esterna ed interna

della parete la (1) si può scrivere:

$$G_e S_e + G_i S_i - J_e S_e - J_i S_i + \Sigma Q + \Sigma L = \Delta U \quad (1')$$

avendo assunto positive le grandezze energetiche entranti e negative quelle uscenti dal sistema.

Il sistema non scambia lavoro con l'ambiente circostante perché è libero da vincoli meccanici, non contiene elementi fotovoltaici né giunzioni termoelettriche; perciò:

$$\Sigma L = 0$$

Se, per motivi di semplicità, si suppone che i flussi di energia ed il sistema siano in condizioni quasi stazionarie e che la temperatura lungo la superficie del vetro sia uniforme e lungo lo spessore stazionaria, si può scrivere:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

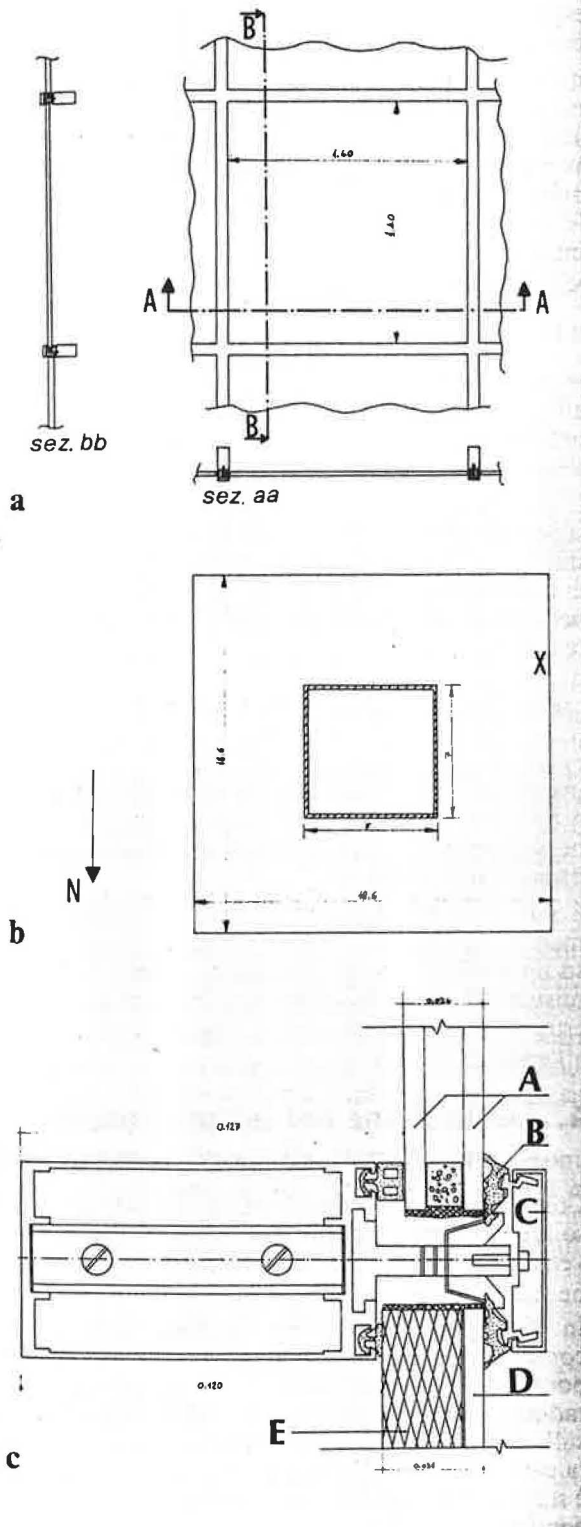
$$\frac{dU}{dt} = c_p \frac{\delta T}{\delta t} \cdot m_v = 0$$

Inoltre, per effetto dell'isolamento termico del bordo del pannello di vetro doppio si può trascurare il calore Q<sub>b</sub> trasmesso dal bordo del pannello alla struttura metallica.

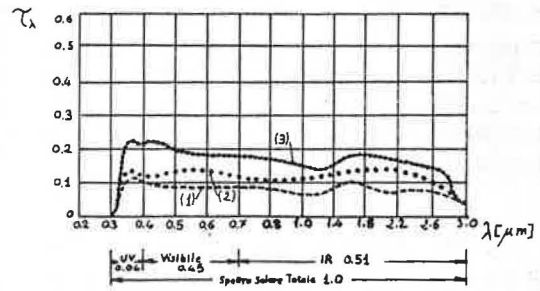
Tenendo conto di queste ipotesi e con riferimento

**tabella I** - Proprietà termiche e radiative per pannelli vetro-camera adottati negli edifici a torre

$\tau_L$	0,13
$Q_L$	0,29
$\tau_s$	0,08
$Q_s$	0,24
$f_s$	0,17
K [W/m <sup>2</sup> K]	2,32



**figura 3** - Pannello di vetro-camera costituente la facciata continua e planimetria dell'edificio a torre: **a)** sezione verticale e orizzontale e prospetto di un elemento di parete; **b)** planimetria dell'edificio a torre; **c)** incastro del vetro-camera sui profilati di alluminio:  
**A)** vetro-camera (6+12+6 mm); **B)** guarnizione di gomma isolante; **C)** coprigiunto in alluminio; **D)** vetro semplice semiriflettente; **E)** pannello opaco isolante



**figura 4** - Trasmissività spettrale di diversi vetri dotati di superficie semiriflettente di argento: il vetro oggetto dell'indagine si riferisce alla curva (2)

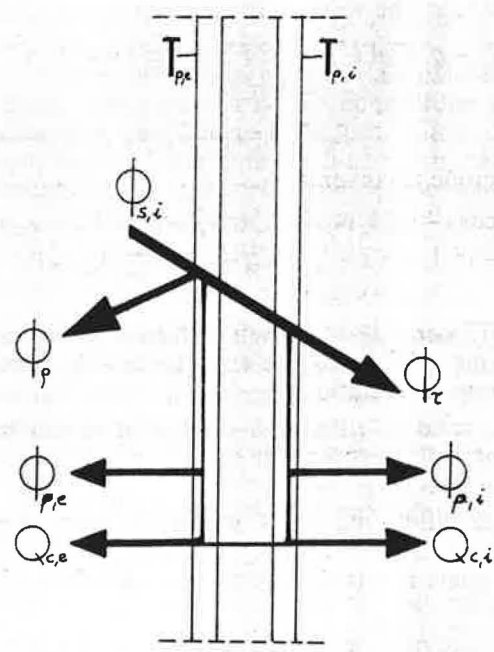
ad un'area unitaria sulla parete l'equazione (1') assume la forma:

$$G_e - J_e + G_i - J_i + q_{ce} + q_{ci} = 0 \quad (2)$$

L'irraggiamento sul lato esterno della parete è costituito dalla radiazione solare diretta e diffusa di intensità  $I_s$  ( $0,3 < \lambda < 3 \mu\text{m}$ ), dalla radiazione di corpo nero dell'ambiente esterno  $E_{n,e}$  ( $\lambda > 3 \mu\text{m}$ ), trascurando la radiazione proveniente dal suolo o da edifici circostanti, si ha:

$$G_e = I_s \cos i + E_{n,e} (T_e^*) = I_s \cos i + \sigma T_e^{*4} \quad (3)$$

avendo supposto che la radiazione solare sia tutta diretta secondo la direzione  $i$  rispetto alla normale



**figura 5** - Schematizzazione del bilancio di energia in un vetro doppio semiriflettente

al vetro, approssimazione accettabile nelle condizioni di cielo sereno ed atmosfera limpida.

L'irraggiamento  $G_i$  sul lato della parete interna all'edificio è costituito dai contributi di flusso di radiazione proveniente dalle diverse pareti dell'ambiente [4]:

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^k A_j F_{ji} J_j \quad (4)$$

Se l'ambiente interno si può considerare come una cavità isoterma la cui temperatura di corpo nero  $T_i^*$  può essere misurata col globotermometro, si può semplificare la (4) scrivendo:

$$G_i = E_n(T_i^*) = \sigma T_i^{*4} \quad (4')$$

La radiosità  $J_e$  della superficie esterna della parete è data dalla radiazione solare riflessa e dalla radiazione termica emessa dalla superficie esterna della parete di vetro:

$$J_e = \rho_s I_s \cos i + \rho_e^* E_n(T_e^*) + E_{pe}(T_{pe}) \quad (5)$$

La radiosità di  $J_i$  della superficie interna della parete di vetro è costituita dalla radiazione solare ( $0,3 < \lambda < 3 \mu\text{m}$ ) trasmessa, dalla radiazione dell'ambiente interno [eq. (4')] riflessa, dalla radiazione termica emessa dalla superficie interna del vetro ( $\lambda > 3 \mu\text{m}$ ):

$$J_i = \tau_s I_s \cos i + \rho_i^* E_n(T_i^*) + E_{pi}(T_{pi}) \quad (6)$$

Sostituendo le espressioni (3), (4'), (5), (6) nell'equazione (2) del primo principio della termodinamica si ottiene:

$$I_s \cos i + E_n(T_e^*) - \rho_s I_s \cos i - \rho_e^* E_n(T_e^*) + E_{pe}(T_{pe}) + q_{ce} + E_n(T_i^*) - \tau_s I_s \cos i + \rho_i^* E_n(T_i^*) - E_{pi}(T_{pi}) + q_{ci} = 0 \quad (7)$$

Ricordando che valgono le relazioni

$$E_n(T^*) - \rho^* E_n(T^*) = E_n(T^*) (1 - \rho^*) = a^* E_n(T^*) = a^* \sigma T^{*4} \quad (7')$$

$$E_p(T_p) = \varepsilon_p \sigma T_p^4 \quad (7'')$$

l'equazione (7) diventa:

$$I_s \cos i - (\rho_s I_s \cos i - a_e^* \sigma T_e^{*4} + \varepsilon_{pe} \sigma T_{pe}^4 - q_{ce}) + -(\tau_s I_s \cos i + \varepsilon_{pi} \sigma T_{pi}^4 - a_i^* \sigma T_i^{*4} - q_{ci}) = 0 \quad (8)$$

dove:

$T_e^*$  e  $T_i^*$  sono le temperature termodinamiche di corpo nero dell'ambiente circostante all'esterno ed all'interno dell'edificio;

$\rho_s$  e  $\tau_s$  sono la riflettività e la trasmittività totali della parete di vetro per la radiazione solare avente  $0,3 < \lambda < 3 \mu\text{m}$ ;

$\rho^*$  è la riflettività della parete di vetro per la radiazione termica di lunghezza d'onda  $\lambda > 3 \mu\text{m}$ , per la quale il vetro si comporta come corpo opaco e diffuso;

$T_{pe}$  e  $T_{pi}$  sono le temperature termodinamiche della superficie esterna ed interna della parete di vetro (fig. 5).

L'equazione (8) del bilancio d'energia per una pare-

te di vetro è di validità generale nelle condizioni estive, invernali, notturne e diurne, purché il sistema sia in stato di equilibrio termodinamico [3], [4].

$q_{ce}$  e  $q_{ci}$  rappresentano il flusso di calore trasmesso per convezione dal vetro all'aria esterna e dal vetro all'aria interna rispettivamente e sono espressi in  $W/m^2$ . Il segno di  $q_{ce}$  e  $q_{ci}$  dipende dal segno delle differenze  $(T_{pe} - T_{ae})$  e  $(T_{pi} - T_{ai})$  essendo  $T_{ae}$  e  $T_{ai}$  le temperature a bulbo secco dell'aria esterna ed interna.

Nell'ipotesi che valgano le condizioni:

$$T_{pe} - T_{ae} > 0 \quad \text{e} \quad T_{pi} - T_{ai} > 0$$

le quantità di calore trasmesse dalla parete di vetro all'ambiente circostante,  $q_{ce}$  e  $q_{ci}$ , che compaiono nell'equazione (8) sono da assumere con segno negativo.

Il flusso del calore scambiato per convezione tra la superficie esterna ed interna del vetro e l'aria circostante,  $q_{ce}$  e  $q_{ci}$ , nelle condizioni estive più gravose di calma di vento, si può calcolare con una equazione teorico-empirica valida per la convezione naturale [5]:

$$q_c = (T_p - T_a) \bar{h}_c = 0,555 \frac{k}{L} (G_{rL} \cdot P_r)^{1/4} \cdot (T_p - T_a) \quad (9)$$

ove  $k$  è la conducibilità termica dell'aria,  $L$  la dimensione della parete di vetro secondo la direzione verticale,  $G_{rL}$  è il numero di Grashof e  $P_r$  è il numero di Prandtl.

Come si vede dall'equazione (8) la verifica sperimentale del bilancio di energia su un vetro montato su un edificio è assai complesso, perché richiede la misura di tutte le grandezze riguardanti il lato esterno e tutte le grandezze relative al lato interno all'edificio.

#### 4. Definizione del fattore solare di una parete di vetro composta

Come è noto, è consuetudine definire il fattore solare  $f_s$  come il rapporto tra l'energia ceduta dal vetro all'ambiente interno e l'energia della radiazione solare incidente sul vetro dall'ambiente esterno.

In effetti, il diffondersi dell'impiego delle facciate continue di alluminio-vetro negli edifici più recenti pone anche il problema della valutazione della radiazione solare riflessa dal vetro verso l'esterno sulle facciate degli edifici contigui, causando talvolta carichi energetici "imprevisti"; questo fenomeno è stato anche osservato sul complesso di dieci edifici contigui simili a quello illustrato dalla figura 1. Ciò rende utile definire il fattore solare anche con riferimento all'energia rinviata dal vetro verso l'ambiente esterno.

Sulla base di queste osservazioni sperimentali riteniamo utile proporre le seguenti definizioni del fattore solare interno  $f_{si}$  e del fattore solare esterno  $f_{se}$ , che tengono conto anche dell'irraggiamento dif-

fuso dell'ambiente circostante alla temperatura equivalente  $T^*$ .

Con riferimento alla figura 5 ed alle equazioni (7) e (8) si può pertanto scrivere:

$$f_{si} = \frac{\tau_s I_s \cos i + [E_{p,i}(T_{p,i}) - a_i^* E_n(T_i^*)] - q_{c,i}}{I_s \cos i} \quad (10)$$

$$f_{si} = \frac{\tau_s I_s \cos i + \varepsilon_{pi} \sigma (T_{pi}^4 - T_i^{*4}) - q_{ci}}{I_s \cos i} \quad (10')$$

$$f_{se} = \frac{q_s I_s \cos i + [E_{p,e}(T_{p,e}) - a_e^* E_n(T_e^*)] - q_{c,e}}{I_s \cos i} \quad (11)$$

$$f_{se} = \frac{q_s I_s \cos i + \varepsilon_{pe} \sigma (T_{pe}^4 - T_e^{*4}) - q_{ce}}{I_s \cos i} \quad (11')$$

essendo la radiazione emessa dalle superfici della parete alle temperature  $T_{pe}$  e  $T_{pi}$  e la radiazione dell'ambiente alle temperature  $T_e^*$  e  $T_i^*$  di valore significativo solo per  $\lambda > 3 \mu\text{m}$ , si può ritenere valida la relazione [4]:

$$\varepsilon(T) = a(T, T^*) \quad (12)$$

Ricordiamo che per un corpo come il vetro, che riflette, trasmette e assorbe diverse frazioni della radiazione incidente a seconda della sua distribuzione spettrale, la riflettività e l'assorbività per le radiazioni di lunghezza d'onda per le quali il vetro è trasparente sono il risultato di un processo che interessa tutto lo strato di vetro e non solo una superficie esterna come nel caso dei corpi opachi.

Osserviamo che nelle condizioni termodinamiche che sono state ipotizzate alla fine del paragrafo 3, quella frazione della radiazione solare incidente  $I_s \cos i$  che non viene riflessa ( $q_s I_s \cos i$ ) o trasmessa ( $\tau_s I_s \cos i$ ) viene assorbita attraverso un processo complesso che interessa tutta la struttura del vetro composto e viene riemessa sotto forma di radiazione termica e calore sia verso l'ambiente esterno, sia verso l'ambiente interno.

Dal punto di vista del comportamento macroscopico del vetro è conveniente definire l'assorbività  $a_c$  complessiva del vetro doppio e, inoltre, l'assorbività interna  $a_i$  e l'assorbività esterna  $a_e$  rispetto alla radiazione solare:

$$a_i = \frac{E_{p,i}(T_{p,i}) - a_i^* E_n(T_i^*) - q_{ci}}{I_s \cos i} \quad (13)$$

$$a_e = \frac{E_{p,e}(T_{p,e}) - a_e^* E_n(T_e^*) - q_{ce}}{I_s \cos i}$$

Introducendo le definizioni (10) e (11), nell'equazione (7) si ha:

$$1 - f_{se} - f_{si} = 0 \quad (14)$$

Poiché, come si è detto, il fattore solare esterno su una facciata continua in opera comporta notevoli difficoltà di misura, esso può essere calcolato dall'equazione (14) dopo aver valutato sperimentalmente  $f_{si}$ :

$$f_{se} = 1 - f_{si} \quad (15)$$

Introducendo le definizioni (13) nelle equazioni (7) e (8), dividendo per la radiazione solare entrante nel sistema si ha:

$$1 - (q_s + a_e)_e - (\tau_s + a_i)_i = 0 \quad (16)$$

che rappresenta una forma adimensionale del primo principio della termodinamica per il vetro doppio.

La distinzione tra assorbività interna ed esterna non è una finzione matematica; infatti, nei vetri doppi va sempre più affermandosi l'attribuzione di diverse proprietà al vetro esterno rispetto a quello interno. Non si deve tuttavia dimenticare che  $a_e$  ed  $a_i$  sono interdipendenti a causa dei complessi processi di conversione della radiazione che avvengono all'interno del vetro doppio e degli scambi di calore che avvengono tra il vetro interno e quello esterno attraverso l'intercapedine riempita di aria secca (o altro gas). Le definizioni (13) e l'equazione (16) descrivono le proprietà del vetro doppio rispetto alla radiazione solare se

$$T_{ai} = T_{ae} \text{ e } T_i^* = T_e^*$$

condizioni che nelle situazioni reali difficilmente si verificano.

Un'altra proprietà radiativa importante è l'emissività globale  $\varepsilon$  o monocromatica  $\varepsilon_\lambda$ ; anche per essa è utile distinguere l'emissività interna  $\varepsilon_i$  dalla emissività  $\varepsilon_e$ .

Ad esempio, è utile che il vetro interno abbia un basso valore di  $(\varepsilon_\lambda)_i$  per  $\lambda > 3 \mu\text{m}$  onde ridurre la radianza  $E_{p,i}(T_{p,i})$  del vetro verso l'ambiente interno, che nella stagione estiva è fastidiosa per le persone antistanti.

Dalle definizioni (13) si vede che, a parità di valore di  $a$  totale, la diminuzione di  $\varepsilon_\lambda$  (per  $\lambda > 3 \mu\text{m}$ ) viene compensata da un aumento del calore scambiato dal vetro con l'aria per convezione  $q_c$ ; ciò implica che per ridurre il fattore solare interno bisogna agire sul meccanismo di assorbimento della radiazione che avviene nell'attraversamento dei due vetri, riducendo  $(a_\lambda)_i$  e  $(a_\lambda)_e$  nel campo ( $0,38 < \lambda < 3 \mu\text{m}$ ); infatti, dalle equazioni (14) e (16) si ha:

$$f_{si} = (\tau_s + a_i)_i = 1 - (q_s + a_e)_e \quad (17)$$

Tenuto conto delle esigenze della illuminazione diurna, che comporta anch'essa implicazioni sull'uso razionale dell'energia e della distribuzione spettrale della radiazione solare, si può dire, con riferimento alla (17), che  $\tau_\lambda$  deve avere un valore alto per  $0,38 < \lambda < 0,68 \mu\text{m}$  ed un basso valore per  $0,7 < \lambda < 3 \mu\text{m}$ ; in questo intervallo deve essere piccolo anche  $(a_\lambda)_i$ . Queste sono le vie corrette per ottenere un basso valore di  $f_{si}$ .

Inoltre, se si vuole migliorare la prestazione del vetro camera nelle condizioni invernali notturne è necessario dotare il vetro doppio di un basso valore della emissività verso l'ambiente esterno  $(\varepsilon_\lambda)_e$  nel campo  $\lambda > 3 \mu\text{m}$ , cioè per la radiazione emessa dai corpi a temperatura dell'ordine di 290 K.

Come è noto, il problema è complesso; ci limitiamo in questa memoria alle considerazioni fin qui fatte perché sufficienti a chiarire il metodo sperimentale da adottare per verificare il fattore solare interno del vetro-camera ed i valori dei flussi di energia che lo costituiscono.

### 5. Metodologia di misura del fattore solare e strumentazione impiegata

L'analisi sperimentale delle proprietà radiative di un pannello vetro-camera montato in opera su grandi superfici, sperimentando su un elemento di parete scelta a caso su una superficie totale montata di 4000 m<sup>2</sup>, riveste una notevole utilità nel campo ingegneristico ed un particolare valore metodologico nel campo delle misure di collaudo.

Poiché, come si è detto, il vetro-camera è montato sulla facciata dell'edificio (fig. 1), la misura delle grandezze relative al lato esterno all'edificio è più difficoltosa. In particolare, le misure preliminari e l'osservazione ottica hanno consentito di verificare la difficoltà insita nella misura della radiazione solare riflessa dal vetro verso l'esterno; infatti, a causa delle inevitabili deformazioni della superficie del vetro semiriflettente rispetto alla superficie piana teorica, sono state osservate zone di concentrazione della radiazione e zone di divergenza, per di più variabili per effetto delle deformazioni termiche o dovute alla pressione dinamica del vento.

Pertanto, si è deciso di limitare l'analisi sperimentale alle grandezze relative al lato interno del vetro; ciò è in pratica di maggiore importanza per la verifica delle prestazioni del vetro-camera e del bilancio di energia dell'edificio. In particolare, è importante verificare il fattore solare interno ed i flussi di energia che ne determinano il valore.

Dalle equazioni (8), (9), (10) e (10') si evince che per valutare il fattore solare interno  $f_{si}$  è necessario misurare le seguenti grandezze:

$I_s$  intensità della radiazione solare totale (diretta + diffusa) [W] all'esterno dell'edificio, nel campo  $0,38 < \lambda < 3 \mu\text{m}$  [W/m<sup>2</sup>];

$T_{ae}$  temperatura a bulbo secco dell'aria esterna [K];

$W_{a,e}$  velocità del vento sulla facciata dell'edificio sede delle misure [m/s];

$T_{ai}$  temperatura a bulbo secco dell'aria interna all'edificio [K];

$T_i^*$  temperatura di corpo nero dell'ambiente interno confinante col vetro [K];

$T_{p,i}$  temperatura superficiale del vetro sul lato interno all'edificio [K];

$E_{p,i}(T_{p,i})$  la radianza della superficie interna del vetro verso l'ambiente interno, nel campo  $\lambda > 3 \mu\text{m}$  [W/m<sup>2</sup>];

$I_t$  intensità della radiazione solare trasmessa dal pannello di vetro nel campo  $(0,38 < \lambda < 3 \mu\text{m})$  [W/m<sup>2</sup>].

La misura delle grandezze sopraelencate richiede l'impiego di diversi strumenti di misura, alcuni dei quali destinati a diversi scopi sono stati adattati opportunamente alle esigenze del caso, avendo cura di rispettare le prescrizioni della metrologia. L'insieme della strumentazione sperimentale impiegata è schematizzato nella figura 6 ed è illustrato nella figura 8.

L'intensità della radiazione solare  $I_s$  all'esterno e l'intensità solare trasmessa  $I_t$  sono stati misurati mediante un solarimetro (A) del tipo a termopila Kipp & Zonen con doppia calotta di vetro, montato su un supporto di bronzo orientabile manualmente secondo l'angolo azimutale e la distanza zenitale mediante viti micrometriche; il segnale in uscita normalizzato è pari a 10 mV per 1000 W/m<sup>2</sup> ± 0,03.

La radiosità della superficie interna del vetro  $J_i$  data dall'equazione (6) viene misurata mediante un radiometro differenziale a termopila con elemento sensibile nero protetto da una calotta di polietilene sottile avente  $\tau_i = 1$  per tutti i valori di  $\lambda$ .

Il radiometro differenziale tipo CN2 costruito dalla

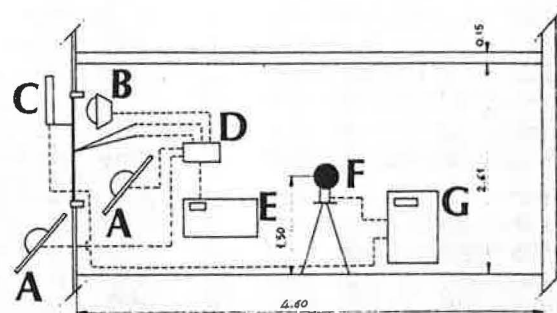


figura 6 - Schema della strumentazione impiegata per la misura delle proprietà radiative della parete vetro-camera:

A) solarimetro; B) radiometro; C) termosonda ventilata e schermata; D) deviatore-commutatore segnali; E) millivoltmetro; per termocoppie; F) globotermometro; G) registratore grafico

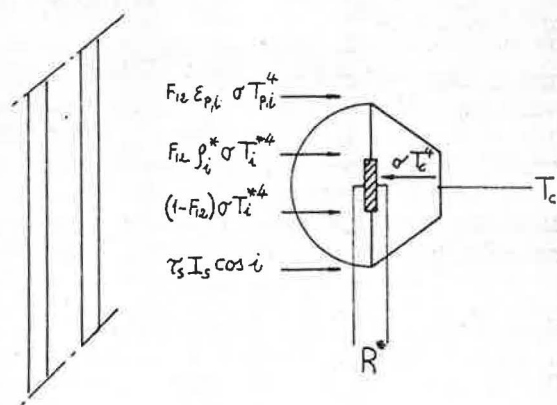


figura 7 - Schema dell'elemento sensibile del radiometro differenziale con la cavità schermante posteriore



figura 8 - Il radiometro tipo CN2 in posizione di misura parallelamente alla facciata interna del vetro-camera

Middleton Instruments ha un elemento sensibile formato da 250 giunzioni di rame-costantana saldate su ciascuna delle due piastre nere esterne captatrici della radiazione. La costante di taratura del radiometro è pari a 0,0395 mV/Wm<sup>-2</sup>.

Per la misura dell'irraggiamento totale che arriva sulla superficie del radiometro opposta al vetro, il radiometro deve essere munito, nel lato opposto a quello rivolto al vetro, di una apposita cavità "nera" dotata di una termocoppia rame-costantana per la misura della temperatura della cavità.

Per effettuare una misura corretta di J<sub>i</sub> è necessario trovare la correlazione tra l'irraggiamento complessivo G<sub>1c</sub> che arriva sul radiometro e J<sub>i</sub>. Per valutare correttamente l'irraggiamento complessivo diffuso e diretto G<sub>1c</sub> che arriva alla superficie A<sub>i</sub> del radiometro si deve tener conto:

- della radiazione diffusa emessa dal vetro E<sub>pi</sub> (T<sub>pi</sub>);
- della quota parte della radiazione ambiente riflessa (in modo diffuso) dal vetro;
- della quota parte della radiazione ambiente E<sub>n</sub> (T<sub>i</sub>) che arriva direttamente su A<sub>i</sub> proveniente dalla superficie laterale del sistema vetro-radiometro (fig. 7);
- della radiazione solare che attraversa il vetro τ<sub>s</sub> I<sub>s</sub> cos i.

Tenendo conto della configurazione geometrica del sistema vetro-radiometro mediante il metodo dei fattori di vista, supponendo che per λ > 3 μm il vetro si comporti come corpo opaco, "grigio" e diffuso, si ottiene [4]:

$$G_{1c} = \frac{A_1 F_{12}}{A_1 - \varrho_1 \varrho_2 \frac{A_1^2}{A_2} F_{12}^2} \left[ E_2 + \varrho_2 \sigma T_i^{*4} \left( 1 - \frac{A_1}{A_2} F_{12} \right) \right] + \sigma T_i^{*4} (1 - F_{12}) + \tau_s I_s \cos i \quad (18)$$

avendo posto il pedice 2 alla superficie interna del vetro (E<sub>pi</sub> = E<sub>2</sub>; T<sub>pi</sub> = T<sub>2</sub>) ed il pedice 1 alla superficie del radiometro.

Se si schematizza il radiometro ed il vetro come due superfici circolari di raggi r<sub>1</sub> ed r<sub>2</sub> posti alla distanza d, il fattore di vista F<sub>12</sub> è dato dalla seguente espressione [4]:

$$F_{12} = \frac{1}{2} (x - \sqrt{x^2 - 4 E^2 D^2}) \quad (19)$$

dove

$$x = 1 + (1 + E^2) D^2 \quad E = r_2/d \quad D = d/r_1$$

Tenendo conto che nelle misure di cui riferiamo in questa memoria la configurazione del sistema presenta i seguenti valori:

$$r_1 = 0,025 \text{ m} \quad r_2 = 0,70 \text{ m} \quad d = 0,10 \text{ m}$$

dall'equazione (19) si ricava F<sub>12</sub> = 0,988 e l'equazione (18) si riduce a:

$$G_{1c} = F_{12} (E_2 + \varrho_2 \sigma T_i^{*4}) + \sigma T_i^{*4} (1 - F_{12}) + \tau_s I_s \cos i \quad (18')$$

Se si indica con R\* la lettura del radiometro differenziale e con T<sub>c</sub> la temperatura della cavità del radiometro si può scrivere:

$$R^* + \sigma T_c^4 - \tau_s I_s \cos i = F_{12} (E_2 + \varrho_2 \sigma T_i^{*4}) + \sigma T_i^{*4} (1 - F_{12})$$

da cui si ricava per la emissività del vetro la seguente espressione:

$$\varepsilon_2 = \frac{R^* + \sigma T_c^4 - \tau_s I_s \cos i - \sigma T_i^{*4}}{F_{12} \sigma (T_2^4 - T_i^{*4})} \quad (20)$$

che, nell'ipotesi che la cavità del radiometro e l'ambiente siano in equilibrio termodinamico, potendosi porre T<sub>c</sub> = T<sub>i</sub><sup>\*</sup>, si riduce a:

$$\varepsilon_2 = \frac{R^* - \tau_s I_s \cos i}{F_{12} \sigma (T_2^4 - T_i^{*4})} \quad (20')$$

La temperatura della superficie del vetro all'interno dell'edificio T<sub>pi</sub> = T<sub>2</sub> è stata misurata con una termocoppia miniaturizzata (diametro dei fili 0,10 mm) tipo Omega.

La temperatura di corpo nero dell'ambiente interno T<sub>i</sub><sup>\*</sup> è stata misurata col globotermometro tipo L.S.I.; le temperature a bulbo secco e a bulbo umido dell'aria interna ed esterna e la velocità dell'aria sono state misurate con le termosonde a ventilazione forzata e schermate e con gli appositi strumenti di lettura e registrazione grafica della L.S.I.

## 6. Analisi delle misure effettuate

La parete verticale sulla quale sono state effettuate le misure è orientata ad ovest; si è scelto questo orientamento in modo che nelle giornate estive, effettuando le misure dopo le ore 16, l'inclinazione della radiazione solare rispetto alla normale alla

superficie del vetro sia piccola e quindi la riflettività sia minima; queste, infatti, sono le condizioni di massimo carico termico per la facciata ovest e le condizioni più severe per la verifica del bilancio di radiazione della parete di vetro.

### Calcolo della emissività globale e del fattore solare

Le misure sono state effettuate durante numerose giornate dal mese di maggio al mese di luglio del 1986. Dopo le prove preliminari di adattamento dell'apparecchiatura alla situazione locale, le necessarie verifiche, la messa a punto delle procedure di misura e le tarature, sono state eseguite le misure delle grandezze elencate nel paragrafo precedente con lettura diretta da parte dell'operatore.

Particolare attenzione è stata posta nella verifica delle condizioni di stazionarietà del processo; perciò le misure sono state effettuate soltanto in giornate con cielo limpido e calma di vento.

Osserviamo che quando la temperatura  $T_{pi}$  della superficie interna del vetro per effetto della radiazione assorbita è maggiore della  $T_{ai}$  non si può avere una trasmissione del calore attraverso il vetro dall'ambiente interno a quello esterno anche se è  $T_{ai} > T_{ae}$ ; cioè, la parete di vetro in stato stazionario può comportarsi come sorgente di calore, alimentata dalla radiazione solare, sia verso l'ambiente esterno che verso quello interno. I valori delle suddette temperature influenzano i valori di  $f_{si}$  e  $f_{se}$ ; la ripercussione di ciò sull'errore di misura di  $f_{si}$  è minima quando  $T_{ai} = T_{ae}$ .

Il verificarsi di queste condizioni nella stagione estiva facilita la misura delle proprietà radiative della parete di vetro, perché consente di trascurare il calore trasmesso attraverso il vetro dall'aria esterna all'aria interna o viceversa.

Tra i diversi rilevamenti che riteniamo soddisfacenti riportiamo quelli della giornata del 25 luglio 1986, che sono riassunti nella tabella II.

I valori delle grandezze misurate sono stati elaborati utilizzando le seguenti equazioni: (20) del radiometro, per il calcolo della radiazione infrarossa a onda lunga emessa dal vetro verso l'ambiente interno; (9) per il calcolo del calore  $q_{c,i}$  scambiato per convezione naturale tra la superficie del vetro e l'aria dell'ambiente interno; (10) e (10') per il calcolo del fattore solare interno  $f_{si}$ .

I valori dell'intensità della radiazione solare perpendicolare alla superficie del vetro sono stati calcolati utilizzando le note equazioni trigonometriche ed astronomiche.

Durante la campagna di misure si è notato che è difficile ottenere che  $T_c = T_i^*$  perché la distribuzione della radiazione nell'ambiente interno non è uniforme. Conviene pertanto utilizzare l'equazione (20) e tener conto del termine  $\sigma(T_c^4 - T_i^{*4})$  nel calcolo di  $\epsilon_2$ .

I risultati ottenuti sono riassunti nella tabella III. Si è calcolato il valore dell'emissività della superficie interna del vetro nel campo dell'infrarosso con

**tabella II** - Valori delle grandezze misurate il 25 luglio 1986 su vetro-camera (6+12+6 mm) con superficie riflettente d'argento

Misure interne lato ovest

Ora solare	cos i	$T_{p,i}$ [°C]	$T_c$ [°C]	$T_i^*$ [°C]	$R^*$ [W/m <sup>2</sup> ]	$I_r$ [W/m <sup>2</sup> ]
16,40	0,883	39,5	32,5	31,5	83,04	57,72
16,50	0,900	39,5 (1)	32,3	31,4	82,78 (1)	53,66
17,00	0,915	40,0	32,2	31,4	80,25	52,03
17,10	0,929	40,0 (2)	32,3	31,3	74,43 (2)	46,34

Misure esterne ottenute col solarimetro Kipp & Zonen

Ora solare	$I_s$ [W/m <sup>2</sup> ]
16,46	573,98
17,15	469,92

Misure di temperatura di bulbo secco dell'aria [°C]

Ora solare 16,50 ÷ 17,00	T aria Interno	T aria Esterno
Est	30,4	
Ovest	30,7	
Esposto al vento		26,7
Non esposto al vento		27,4

(1), (2) Valori utilizzati nel calcolo delle grandezze indicate con gli stessi indici nella tabella III.

$\lambda > 3 \mu\text{m}$ ; si è ottenuto il valore medio  $\epsilon_2 = 0,70$ . È importante osservare che il valore della trasmittività  $\tau_s$  della radiazione solare pari a 0,09 ed il valore del fattore solare interno  $f_{si} = 0,20$ , includente il calore  $q_{c,i}$ , sono in buon accordo con le proprietà dichiarate dal costruttore e riportate nella tabella I.

### Considerazioni sulla precisione delle misure

La misura dell'irraggiamento complessivo  $G_{1c}$  che arriva sulla superficie del radiometro ha una precisione di  $\pm 5 \text{ W/m}^2$  se la differenza di temperatura  $\Delta T$  tra l'elemento radiometrico e la cavità non supera  $\Delta T = 20 \text{ K}$  e l'emissività è  $\epsilon \geq 0,96$ . In condizioni diverse il termine correttivo da aggiungere è:

$$4 \sigma \Delta T \cdot T_c^3 (1 - \epsilon)$$

Tenuto conto che il solarimetro Kipp & Zonen ha una precisione dell'ordine di  $\pm 0,05$ , che la radianza del vetro  $E_{pi}$  è misurata con una precisione dell'ordine di  $\pm 0,10$ , che le temperature  $T_{pi} = T_2$  e  $T_i^*$  vengono misurate con un errore dell'ordine di 0,5 K e del piccolo valore della differenza di temperatura  $T_{pi} - T_i^*$  (tab. II), l'emissività calcolata con la relazione (20) non può avere una precisione migliore di 0,25. Poiché le temperature del vetro e dell'ambiente nelle condizioni reali di funzionamento



**tabella III - Valori delle grandezze calcolate**

Valori relativi al lato interno del vetro

Ora solare	cos i	$I_{\tau} \cos i$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma (T_c^4 - T_i^{*4})$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\sigma (T_{pi}^4 - T_i^{*4})$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{pi}$ da eq. (20)
16,40	0,883	50,97	6,48	53,64	0,730
16,50	0,900	48,29 (1)	5,82	54,28 (1)	0,755 (1)
17,00	0,915	47,61	5,17	57,77	0,665
17,10	0,929	43,05 (2)	6,47	58,42 (2)	0,662 (2)

Valori della radiazione all'esterno

Ora solare	$I_s \cos i$ [W/m <sup>2</sup> ]
16,46	511,99 (1)
17,15	439,85 (2)

Calore scambiato per convezione, eq. (9) per  $T_{a,i} = 30,7^\circ C$  e  $T_{p,i}$  come da tabella II

$h_c$ [W/m <sup>2</sup> K]	$q_{c,i} = h_c (T_{pi} - T_{a,i})$ [W/m <sup>2</sup> ]
2,27 (1)	19,98
2,30 (2)	21,39

Valori del fattore solare e della trasmittività;  $(f_{si})_R =$  fattore solare che tiene conto solo della radiazione

Ora solare	$(f_{si})_R$	$f_{si}$	$\tau_s$
16,46	0,174 (1)	0,213 (1)	0,094 (1)
17,15	0,186 (2)	0,234 (2)	0,098 (2)

(1), (2) Valori utilizzati nel calcolo delle grandezze indicate con gli stessi indici nella tabella II.

dell'edificio, e perciò nelle condizioni di collaudo, sono molto prossime, è difficile ottenere una precisione di  $\epsilon$  migliore di 0,20 anche con misure di laboratorio (con le stesse temperature delle condizioni di funzionamento) come è dimostrato chiaramente in [2].

Essendo la misura di  $\epsilon_p$  così difficoltosa, non si può trascurare il fatto che  $T_c \neq T_i^*$  che, come si vede dalla tabella III, nel nostro caso può dar luogo ad errori sistematici dell'ordine di 0,10.

Poiché riteniamo che sia necessario poter verificare le proprietà radiative delle pareti di vetro mediante

una operazione di collaudo dei materiali messi in opera, possiamo concludere che la precisione di misura conseguita con la metodologia utilizzata è accettabile, anche in rapporto alla semplicità della strumentazione impiegata.

Una più dettagliata analisi degli errori di valutazione di  $\epsilon_{pi}$  ed  $f_{si}$  è presentata nella memoria [6].

## 7. Conclusioni

L'analisi teorica dei processi che hanno sede nella parete di vetro-camera è stata condotta fondandosi sui principi ed i metodi della termodinamica applicati alla radiazione come entità distinta dal calore. Questa analisi teorica ha indicato la strada da seguire nell'analisi sperimentale.

L'analisi sperimentale effettuata ha consentito di acquisire esperienza sulle misure delle proprietà radiative delle pareti vetrate messe in opera.

I risultati ottenuti sono in buon accordo con i valori delle proprietà radiative dichiarate dal costruttore del pannello vetro-camera, come si evince dal confronto della tabella III con i valori riportati nella tabella I.

Si può concludere che questo lavoro indica che è possibile effettuare il collaudo in opera delle proprietà radiative di pareti vetrate complesse utilizzando strumentazioni di misura di costo non elevato e particolari metodologie che dovranno essere regolate da apposite norme tecniche.

## Bibliografia

- [1] C. Bernardini, P.G. Mura: "Criteri di progettazione termotecnica di un edificio a facciata continua alluminio-vetro" (in corso di pubblicazione su "Atti della Facoltà di Ingegneria di Cagliari", 1989)
- [2] CNR-PFE, Rapporto finale n. 6, Roma, ottobre 1981 (a cura di Tincolini)
- [3] C. Bernardini, P.G. Mura: "Sulla termodinamica dei processi di conversione della radiazione" - Atti Fac. Ing. Cagliari, Vol. 15 bis, anno IX, n. 1, dic. 1980
- [4] J.H. Wiebelt: "Engineering Radiation heat transfer" - Holt, Rinehart and Winston, New York 1966
- [5] F. Kreith: "Principi di trasmissione del calore" - Liguori editore, 1974
- [6] P.G. Mura, M. Sanna, A. Salin: "Analisi metrologica per la verifica in opera del fattore solare di una parete di vetro" (in corso di pubblicazione su "Atti della Facoltà di Ingegneria di Cagliari", 1989)