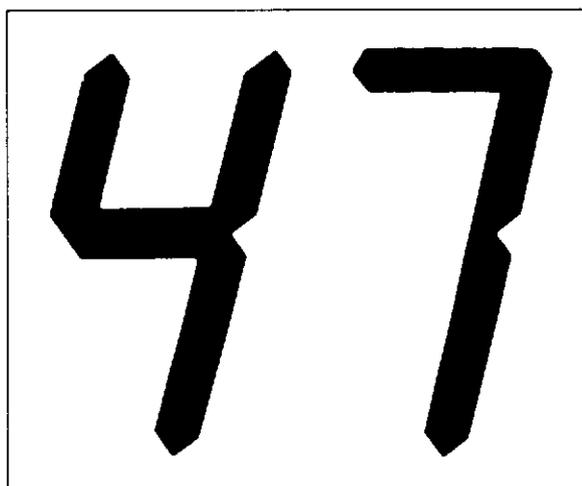


# 47° congresso nazionale ATI

parma 16-18 settembre 1992

---



---

atti del congresso

*estratto*

vol. I

associazione  
termotecnica  
italiana

**SGE** EDITORIALE  
PADOVA

## ANALISI TEORICA E SPERIMENTALE DELLA TRASMISSIONE DI RADIAZIONE TERMICA ATTRAVERSO LASTRE ALVEOLARI

A. Farina<sup>1</sup> - S. Piva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università di Parma - Parma

<sup>2</sup> Istituto di Fisica Tecnica - Facoltà di Ingegneria - Bologna

**Sommario.** Si esamina dal punto di vista sia teorico che sperimentale, la trasmissione della radiazione termica attraverso lastre alveolari di materiale plastico. Al fine di ottenere per via teorica il valore della trasmittanza di queste lastre di sezione complessa, è stato sviluppato un opportuno codice di calcolo, che fa ricorso alla tecnica del Ray-Tracing, accoppiata al Metodo Monte Carlo. Tale codice è stato validato confrontando i risultati ottenuti nel caso di lastra piana omogenea con quelli della soluzione analitica. Infine sono state esaminate alcune lastre alveolari; i risultati ottenuti mostrano un buon accordo con i corrispondenti sperimentali.

### THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THERMAL RADIATION TRANSMISSION THROUGH RIBBED SHEETS

**Abstract.** The transmission of thermal radiation through multilayer plastic ribbed sheets is examined both theoretically and experimentally. With the aim of obtaining theoretical predictions, a computer code, based on the Ray Tracing technique coupled with the Monte Carlo Method, has been developed. The code has been validated comparing the numerical results with the analytical solution for a plane homogeneous slab. Finally, the numerical results obtained for some plastic multilayer ribbed sheets show a good agreement with the corresponding experimental results.

#### 1. Introduzione

L'analisi della trasmissione attraverso superfici trasparenti della radiazione termica, che interessa la parte di spettro compresa tra 0.1 e 100  $\mu\text{m}$ , e che contiene al suo interno le bande corrispondenti alla radiazione visibile, all'ultravioletto e all'infrarosso vicino e lontano [1], presenta da tempo grande interesse teorico e pratico. In particolare, negli ultimi tempi l'attenzione è stata rivolta alle lastre alveolari di materiale plastico, sempre più di frequente utilizzate come chiusure trasparenti di edifici civili e industriali. Con tale dizione ci si intende riferire a lastre a parete multipla, realizzate collegando mediante setti trasversali, con passo tale da conferire una adeguata rigidità all'insieme, due o più lastre di modesto spessore [2]. Per la presenza dei setti trasversali di irrigidimento, esse evidenziano un comportamento anisotropo; ne consegue che la trasmittanza della radiazione termica, cioè il rapporto fra la radiazione trasmessa e quella totale incidente, è funzione di almeno due parametri angolari, utili a tenere conto rispettivamente dell'orientamento della superficie e delle nervature.

Utili informazioni sull'effetto dei setti di irrigidimento possono essere desunte dalle indagini sperimentali di Herrick [3] relative ai collettori solari a tubi evacuati, costituiti da schiere di condotti trasparenti giustapposti, la cui sezione risulta essere simile a quella delle lastre alveolari. Rilievi sperimentali della dipendenza angolare della trasmittanza

della radiazione termica, in particolare per la componente diretta della radiazione solare, sono già disponibili in letteratura per lastre alveolari di produzione commerciale. Per esempio, un apposito apparato sperimentale è stato realizzato presso l'Istituto di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna. Grazie ad esso, la presenza del comportamento anisotropo citato è stata rilevata sperimentalmente in lastre alveolari di policarbonato [4]. L'effetto dovuto alla presenza dei setti di irrigidimento è stato quantificato dal punto di vista energetico sia per quanto riguarda la sola trasmittanza delle lastre [5], che per la componente diretta della radiazione solare [6] e per la componente diffusa e totale [7]; inoltre sono state esaminate le possibilità che tale comportamento anisotropo offre nelle più frequenti applicazioni in edilizia bioclimatica e nell'agricoltura [8]. I risultati ottenuti hanno evidenziato come già con elementi di produzione corrente sia possibile ottenere effetti significativi nel controllo passivo del microclima, favorendo per esempio la riduzione del rischio di surriscaldamento nella stagione estiva grazie all'opportuno orientamento dei setti. Inoltre, sembra possibile, mediante l'opportuna ottimizzazione della foggia della sezione, ottenere una capacità di controllo ancora maggiore. Risulta indispensabile a tal fine disporre delle previsioni teoriche di trasmittanza della radiazione termica anche per lastre alveolari con sezione generica.

I motivi sopra esposti e la complessità della geometria esibita dalle lastre commerciali, che presentano anche setti trasversali ricurvi o a Y, rende poco praticabile, se non impossibile, il ricorso a previsioni teoriche della trasmittanza di tipo analitico, come avviene usualmente per le lastre omogenee e compatte. Una soluzione analitica in tal senso è stata proposta da Russel [9] per lastre alveolari a setti ortogonali, ma la laboriosità del metodo e la scarsa estendibilità a sezioni di foggia più complessa, ha suggerito agli Autori il ricorso a tecniche numeriche. Pertanto, al fine di prevedere teoricamente la trasmittanza di tali lastre, è stato messo a punto un opportuno codice di calcolo numerico, che fa ricorso alla tecnica del Ray Tracing, opportunamente accoppiata al metodo Monte Carlo. Una tecnica simile è stata utilizzata da Window e Zybert [10] e da Theunissen e Beckmann [11] per la previsione teorica delle prestazioni di collettori solari a tubi evacuati. Tale scelta consente anche di rimuovere molte delle ipotesi semplificative usualmente adottate nei conteggi, come in seguito specificato. Dal momento che per le lastre omogenee compatte è disponibile la soluzione analitica esatta, i risultati ottenuti dal codice di calcolo messo a punto allo scopo sono stati validati per confronto. Il codice è stato quindi utilizzato per esaminare lastre di tipo alveolare; in questo caso è stato riscontrato un ottimo accordo fra le previsioni teoriche e i corrispondenti risultati sperimentali, ottenuti mediante l'apparecchiatura già disponibile presso l'Istituto di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna.

## 2. Descrizione del metodo numerico

### 2.1 Il Metodo Monte Carlo - Ray Tracing

In generale, la valutazione della quota parte di radiazione termica che attraversa una struttura trasparente geometricamente complessa è difficilmente ottenibile per via puramente analitica. Risulta pertanto necessario fare ricorso a tecniche numeriche di calcolo. Fra i metodi esaminati, la tecnica del Ray Tracing, opportunamente accoppiata al Metodo Monte Carlo, si è dimostrata la più generale e versatile per il tipo di problema in esame, e pertanto è stata adottata allo scopo. L'implementazione di tale tecnica ha richiesto la stesura di un apposito codice di calcolo, che viene qui brevemente descritto.

Va premesso che la tecnica del Ray Tracing è del tutto generale, e consente di studiare fenomeni di propagazione, in geometrie arbitrariamente complesse, di qualsiasi tipo di "raggi", ivi compresi i fenomeni di natura più propriamente ondulatoria quali le onde sonore, la radiazione termica e luminosa, la radiazione elettromagnetica in generale, le onde sismiche. Affinche' tale tecnica possa essere utilizzata, è necessario che le superfici individuabili nel sistema in esame presentino dimensioni nettamente maggiori rispetto alle lunghezze d'onda del fenomeno propagato, in modo da poter trascurare gli effetti di diffrazione e considerare solamente fenomeni di riflessione speculare o diffusa, rifrazione ed estinzione in mezzi dissipativi.

La radiazione termica viene generata da una o più sorgenti di radiazione. Esse possono essere di vario tipo (puntiforme, lineare, superficiale, volumetrica), ed i raggi da esse emessi possono partire con direzione definita da leggi di emissione arbitrarie (omnidirezionale, a lobi, concentrata).

Sono poi ovviamente definiti uno o più ricevitori, sui quali viene computata l'energia radiante incidente.

La geometria dello spazio circostante il complesso delle sorgenti e dei ricevitori viene descritta numericamente mediante elementi poligonalari. Ciascuna superficie è caratterizzata da opportuni valori delle grandezze fisiche che descrivono le proprietà del materiale di cui essa è costituita. Ogniqualvolta un raggio incide su una di queste superfici, si presentano per esso le seguenti possibilità:

- a) essere assorbito dalla superficie, come nel caso di superficie sporca (coefficiente di assorbimento  $a$ );
- b) essere riflesso in direzione speculare (coefficiente di riflessione  $r$ );
- c) essere riflesso, anche parzialmente, con legge diffusa anziché speculare (coefficiente di riflessione diffusa  $d$ );
- c) essere trasmesso ed entrare nel mezzo restrostante (coefficiente di trasmissione  $t$ ).

Nel caso in cui il raggio incidente venga trasmesso, si assume che la sua direzione venga deviata secondo la Legge di Snell [12], in funzione del rapporto fra gli indici di rifrazione dei due mezzi interessati:

$$\frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

(il raggio passa dal mezzo 1 al mezzo 2). Anche in questo caso è tuttavia possibile che una frazione  $t'$  di questi raggi subisca una redirezione con legge diffusa.

La tecnica del Ray Tracing viene utilizzata per seguire ogni singolo raggio da una sorgente fino al suo completo assorbimento o all'attraversamento di un ricevitore. Il Metodo Monte Carlo invece viene utilizzato per stabilire, secondo criteri probabilistici, il nuovo percorso di un raggio, ogni volta che esso incide su una superficie. La scelta fra uno dei possibili eventi sopra elencati (riflessione, rifrazione, assorbimento o diffusione) viene eseguita confrontando un numero casuale, compreso fra 0 e 1, con i coefficienti relativi al fenomeno esaminato.

Più in dettaglio, l'algoritmo di calcolo dei cammini di propagazione prevede una generazione dei raggi distribuita uniformemente sulla superficie emittente, utilizzando opportuni generatori di numeri casuali. A ciascun raggio viene assegnata un'energia iniziale dipendente dalla particolare legge di emissione della sorgente considerata. Ciascun raggio viene poi seguito nei successivi passaggi finché la sua energia si riduce ad una frazione prestabilita di quella di partenza (di solito 1/1000 dell'energia iniziale), andando ad individuare i punti di incidenza con tutti i piani contenenti i poligoni che descrivono la geometria in esame, verificando poi che ciascun punto di intersezione sia contenuto all'interno delle superfici stesse. Se con tale controllo viene individuato più di un punto di incidenza, si adotta quello più vicino al punto di provenienza del raggio. Una volta identificata la superficie su cui il raggio sta incidendo, è necessario stabilire quale sarà il successivo percorso. Per far ciò si utilizza ancora il generatore di numeri casuali; i coefficienti relativi ai fenomeni  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , e  $d$  considerati, la cui somma è unitaria, vengono mappati nell'intervallo 0-1; il valore del numero casuale generato punta ad una delle zone, indicando così il processo da attivare.

Ad ogni incidenza su una superficie si provvede a calcolare la riduzione di energia dovuta all'assorbimento nel mezzo attraversato, quantificato in funzione del coefficiente di estinzione  $\beta$  secondo la legge di Bouguer [12]:

$$E = E_0 \cdot e^{-\beta s} \quad (2)$$

dove  $E_0$  rappresenta l'energia iniziale e  $s$  la lunghezza del tratto attraversato.

Dopo avere individuato un punto di incidenza su una superficie di contorno, si provvede anche a verificare se nel tratto percorso è stato attraversato un ricevitore: in questo caso l'energia del raggio viene accumulata sul ricevitore attraversato. Alla fine dei conteggi, su ciascun ricevitore viene calcolata l'intensità della radiazione ricevuta, dividendo l'energia complessiva raccolta per la superficie dello stesso.

## 2.2 Applicazione del metodo al problema in esame

Il metodo numerico descritto al paragrafo precedente è stato utilizzato per valutare la trasmittanza di lastre trasparenti, in particolare di lastre alveolari. A tal fine è stata adottata una sorgente superficiale quadrata, avente lato di 100 mm, con emissione dei raggi perpendicolare rispetto alla sorgente nella sola direzione del ricevitore. Tale sorgente viene usualmente indicata come "spot", poichè produce un fascio unidirezionale di raggi paralleli.

Fra la sorgente ed il ricevitore viene collocata la lastra alveolare, di foggia quadrata, con lato di 300 mm. Inizialmente la lastra viene posta ortogonalmente alla direzione dei raggi (angolo di inclinazione  $\theta = 0^\circ$ ) e con angolo di orientamento dei setti  $\varphi = 0^\circ$ ; tale angolo risulta essere definito dalla direzione dei setti e dal piano individuato dalla normale alla superficie e dalla direzione dei raggi. Il codice di calcolo provvede poi automaticamente a ripetere l'elaborazione per valori diversi degli angoli di inclinazione ( $\theta$ ) e di orientamento ( $\varphi$ ).

È stato impiegato un unico ricevitore, costituito da una superficie circolare avente raggio di 25 mm, posizionato esattamente sotto il fascio prodotto dalla sorgente, alla distanza di 1 m dalla stessa. La figura 1 illustra la situazione sopra descritta.

L'impiego di una sorgente significativamente più grande del ricevitore assicura la corretta rilevazione anche di raggi che, pur inizialmente non diretti verso di esso, raggiungano il ricevitore dopo essere stati deviati a causa della complessa geometria della lastra alveolare.

Non è stata impiegata una sorgente di dimensioni pari a quelle della lastra stessa, poichè ciò avrebbe comportato la necessità di lanciare un numero di raggi molto elevato per riceverne un numero sufficientemente alto da rendere valide le ipotesi di uniformità statistica, alla base del metodo Monte Carlo. Con riferimento alla configurazione illustrata, sono stati lanciati 10000 raggi, ricevendone mediamente meno di 2000.

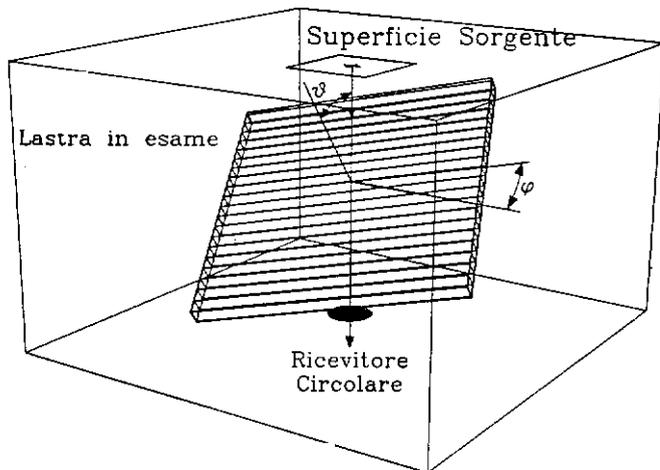


Figura 1 - Geometria assunta per l'esecuzione dei conteggi.

Le ipotesi assunte per il calcolo dei coefficienti di riflessione e trasmissione sono le seguenti:

- Superfici perfettamente pulite ( $a = 0$ );
- Assenza di effetti di diffusione sulle stesse ( $d = t' = 0$ );
- Polarizzazione della sorgente di radiazione su un piano mediamente casuale;
- Riflessione totale nel caso di angolo di incidenza superiore all'angolo limite;
- Valore dei coefficienti di riflessione ( $r$ ) e di trasmissione ( $t$ ) ottenuti come media aritmetica di quelli per luce a polarizzazione normale ( $r_{\perp}$ ) e parallela ( $r_{\parallel}$ ) alla superficie, conformemente a quanto previsto dalla equazione di Fresnel [12]:

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (3)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\text{tg}^2(\theta_1 - \theta_2)}{\text{tg}^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (4)$$

$$r = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2} \quad (5)$$

$$t = 1 - r \quad (6)$$

Tale ipotesi equivale a considerare una polarizzazione della radiazione sempre mediamente casuale, anche dopo che la stessa sia stata riflessa o diffratta. Ciò chiaramente non corrisponde alla realtà considerando la storia di un singolo raggio, ma, dalle prove eseguite, e' emerso che in media, su un elevato numero di raggi, tale ipotesi non produce apprezzabili errori nella valutazione dell'energia complessivamente trasmessa attraverso la lastra.

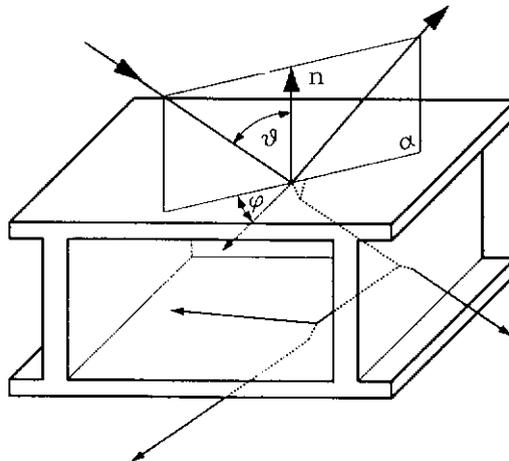


Figura 2 - Schema di una cella alveolare con possibili percorsi di un raggio.

Il codice di calcolo è attualmente implementato sia in versione BASIC (su PC MS-DOS), che in versione C-ANSI (su workstation UNIX); inoltre è in fase di messa a punto la versione "parallela" sul supercomputer "Connection Machine 2". La generazione di un numero prefissato di raggi richiede un tempo di calcolo in prima approssimazione direttamente proporzionale al numero di superfici che descrivono la geometria in prova. Ad esempio, per una lastra in policarbonato dello spessore di 16 mm sono 136 le superfici necessario a descrivere la geometria, e la generazione di 10000 raggi richiede circa 2.5 ore su un personal computer IBM PS2-286 a 10 MHz con coprocessore matematico.

Stante la natura intrinsecamente parallela dell'algoritmo di calcolo, è possibile accelerare la soluzione eseguendo in contemporanea l'elaborazione su più macchine. Ovviamente tale processo di parallelizzazione verrà ulteriormente velocizzato, non appena sarà disponibile la versione per Connection Machine, che dispone di 8192 processori in parallelo.

### 3. Commento e Discussione dei Risultati

#### 3.1 Validazione del metodo numerico

Al fine di verificare la messa a punto del metodo numerico adottato per il calcolo della trasmittanza di lastre di geometria complessa, i risultati ottenuti sono stati validati per confronto con i corrispondenti ricavati dalla soluzione analitica esatta, disponibile in letteratura per lastre compatte omogenee. Il test è stato eseguito per una lastra di vetro normale dello spessore di 2.81 mm, indice di rifrazione  $n = 1.47$  e coefficiente di estinzione  $\beta = 36.43 \text{ m}^{-1}$ . I risultati del confronto fra soluzione analitica e soluzione numerica, nel caso di emissione di 4000 raggi, sono riportati in figura 3. I valori ricavati con il metodo numerico manifestano un andamento che trova un ottimo riscontro in quello ricavato analiticamente; ciò ha consentito di ritenere validi i risultati ottenuti.

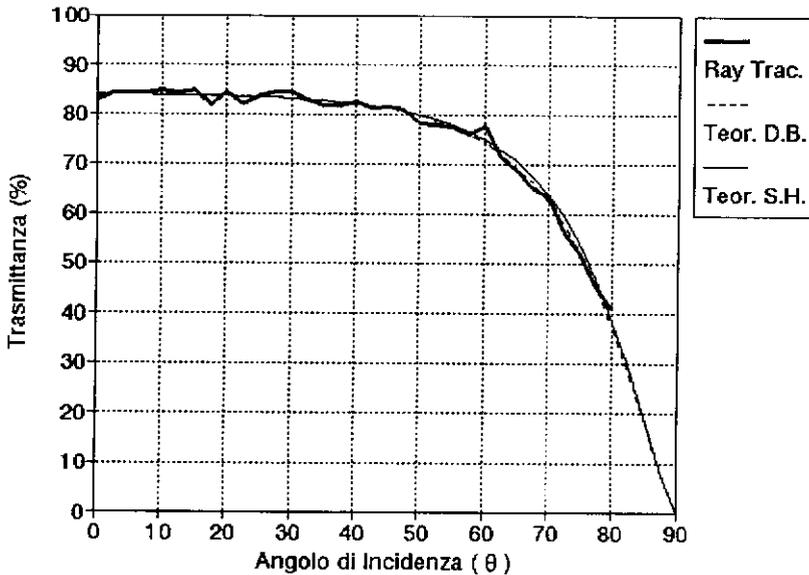


Figura 3 - Confronto fra risultati numerici e analitici per lastra piana omogenea (S.H. soluzione [12] - D.B. soluzione [13])

La convergenza del metodo e' stata valutata lanciando, per la lastra in esame, un numero di raggi crescente (400, 2000 e 4000 raggi). Lo scarto dei risultati rispetto alla soluzione analitica e' riportato in figura 4. Appare evidente come esso si riduca all'aumentare del numero di raggi, e come, per 4000 raggi, il risultato possa essere considerato valido. Lo scarto quadratico medio rispetto alla soluzione analitica dei valori calcolati è pari a 4.42 per 400 raggi, scende a 1.66 per 2000 raggi e si attesta su 1.04 per 4000 raggi.

Durante la fase di validazione del metodo, è stato verificato anche l'effetto dell'ipotesi semplificativa introdotta di eseguire tutti i calcoli tenendo conto di un coefficiente di riflessione pari alla media aritmetica dei valori corrispondenti alle polarizzazioni nel piano parallelo e perpendicolare a quello della lastra (vedi equazione 5). A questo proposito si segnala che in letteratura, se la radiazione incidente è non polarizzata, viene suggerito di calcolare la trasmittanza secondo due possibilità: da un lato, secondo Siegel e Howell [12], la trasmittanza è pari alla media dei valori calcolati separatamente utilizzando i valori di  $r_{\perp}$  e di  $r_{\parallel}$ ; in modo semplificato invece secondo Duffie e Beckman [13], la trasmittanza è pari al valore calcolato in funzione del valore medio  $r_m$  dei contributi dovuti alle due diverse polarizzazioni. Come anticipato, nello sviluppo del metodo numerico, per accelerare i tempi di calcolo, è stata seguita quest'ultima possibilità.

Dai risultati riportati in figura 3 si può vedere che tale scelta porta a risultati di poco discosti fra di loro. Inoltre, l'effetto dell'ipotesi semplificativa introdotta diventa apprezzabile solo per valori dell'angolo di incidenza maggiori dell'angolo di Brewster, che per il materiale in esame è pari a  $55.77^{\circ}$ .

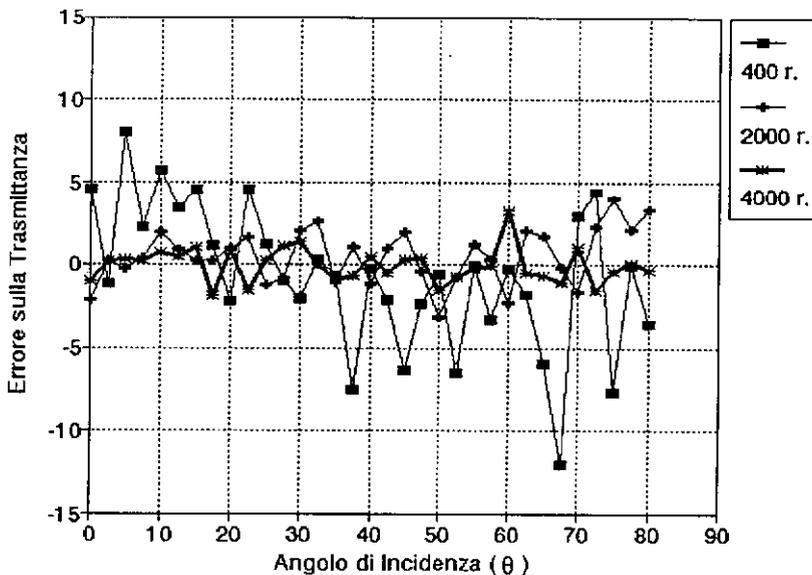


Figura 4 - Andamento dell'errore rispetto alla soluzione analitica per valori diversi del numero di raggi emessi.

### 3.2 Trasmissanza di lastre alveolari: analisi teorica e sperimentale

Al fine di valutare le capacità di previsione del codice di calcolo numerico sviluppato, sono stati eseguiti alcuni confronti fra risultati teorici e sperimentali per alcune lastre alveolari di policarbonato di produzione commerciale.

Per l'esecuzione delle misure è stato utilizzato l'apparato sperimentale già disponibile presso l'Istituto di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna, ampiamente descritto in [4]. Se ne riporta pertanto solamente una breve descrizione, rimandando al lavoro citato per ulteriori dettagli. L'apparato risulta essere costituito da un telaio metallico a prevalente sviluppo verticale, cui sono rigidamente collegate le tre parti principali dell'apparato, costituite rispettivamente da: 1) la sorgente di radiazione termica; 2) il telaio portacampione orientabile; 3) il sensore di radiazione termica, collegato ad un sistema esterno di acquisizione dati. Le misure di trasmissanza della radiazione termica vengono eseguite rilevando, per le diverse orientazioni del campione, l'intensità della radiazione in presenza ed in assenza della lastra e calcolandone poi il rapporto.

Sono stati esaminati lastre di tre diversi spessori, che consentono di inquadrarne il comportamento. Nel corso di precedenti lavori sperimentali [4-8], è stato riconosciuto che le caratteristiche geometriche più significative per caratterizzare, per quanto riguarda la trasmissanza, il comportamento delle lastre alveolari, sono rispettivamente, il passo dei setti e il fattore di forma, cioè il rapporto tra l'altezza e la larghezza della cavità alveolare (entrambi i parametri valutati ortogonalmente alla direzione dei setti). Il valore di tali parametri, per le tre lastre in esame, è riportato in Tabella 1.

Spessore (mm)	Passo Setti (mm)	Fattore di Forma
6	5.8	0.81
10	9.8	0.92
16	14.9	0.93

Tabella 1 - *Caratteristiche geometriche delle lastre alveolari esaminate.*

I conteggi sono stati eseguiti per tre diversi valori dell'angolo di orientamento, rispettivamente  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , e per valori dell'angolo di incidenza compresi fra  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , con incrementi di  $2.5^\circ$ . Per il policarbonato alveolare sono stati desunti dalla letteratura i seguenti valori delle proprietà fisiche: indice di rifrazione  $n = 1.585$ ; coefficiente d'estinzione  $\beta = 13 \text{ m}^{-1}$ .

I risultati dei conteggi e delle misure sono riportati nelle figure 5, 6 e 7. Complessivamente è possibile dire che i risultati teorici mostrano un buon accordo con quelli sperimentali, sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo; in particolare, l'accordo risulta essere molto buono per le lastre da 10 e da 16 mm. L'effetto della presenza dei setti appare molto evidente in tutti i casi esaminati, e si manifesta con una sensibile riduzione della trasmissanza per angoli di orientamento diversi da  $\varphi = 90^\circ$ . Infatti, per tale valore, l'effetto della presenza dei setti è poco sensibile, in quanto essi risultano essere sempre attraversati dai raggi nel loro piano, e pertanto la lastra si comporta come una lastra omogenea a doppia parete.

L'esame dei risultati relativi alla lastra da 6 mm, riportati in figura 5, evidenzia come il codice numerico calcoli una trasmissanza per radiazione normale leggermente inferiore a quella sperimentale. L'andamento dei risultati per  $\varphi = 90^\circ$  appare essere in ottimo accordo con quello sperimentale; invece, per angoli di orientamento minori ( $\varphi = 0^\circ$  e  $\varphi = 45^\circ$ ) il codice numerico sembra sovrastimare l'effetto dell'anisotropia dovuto alla presenza dei setti. Infatti, sperimentalmente si osserva che la trasmissanza diminuisce in modo progressivo al diminuire dell'angolo di orientamento, per tutti gli angoli di incidenza; numericamente invece, si osserva che la trasmissanza manifesta un valore pari a quello corrispondente a  $\varphi = 90^\circ$  fino ad angoli di incidenza di circa  $10^\circ$ , dopo di che diminuisce bruscamente e le due curve diventano praticamente coincidenti.

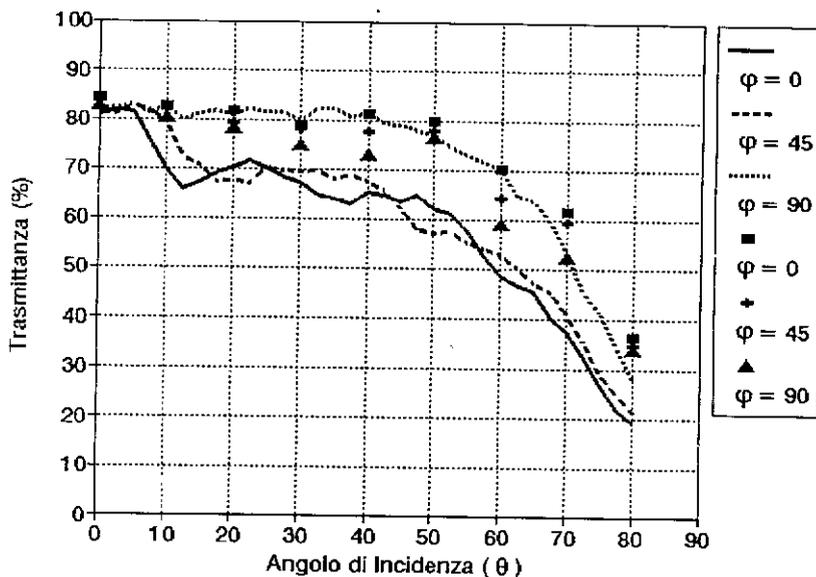


Figura 5 - Confronto fra risultati numerici e sperimentali per una lastra alveolare di policarbonato dello spessore di 6 mm.

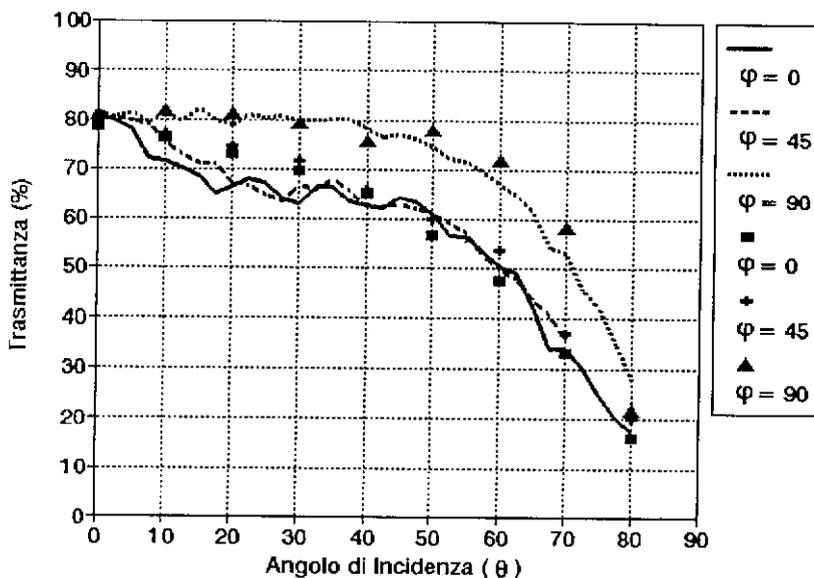


Figura 6 - Confronto fra risultati numerici e sperimentali per una lastra alveolare di policarbonato dello spessore di 10 mm.

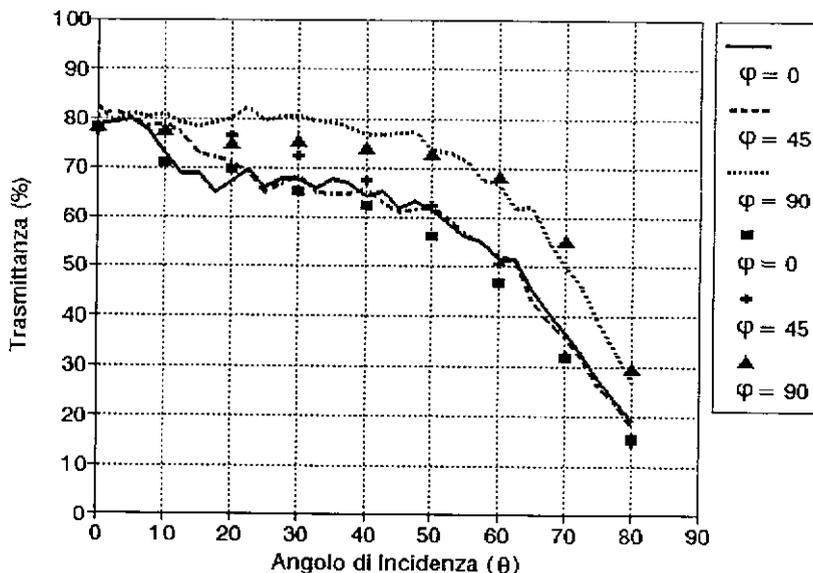


Figura 7 - Confronto fra risultati numerici e sperimentali per una lastra alveolare di policarbonato dello spessore di 16 mm.

Esaminando i risultati relativi alla lastra da 10 mm, riportati in figura 6, appare evidente che il codice numerico, oltre a calcolare una trasmittanza per radiazione normale in ottimo accordo con quella sperimentale, individua, per i tre diversi angoli di orientamento presi in esame, andamenti in buon accordo con quelli sperimentali. Per angoli di orientamento pari a 0° e 45°, la lastra presenta valori di trasmittanza sempre molto vicini fra di loro. Le curve teoriche relative a  $\varphi = 0^\circ$  e  $\varphi = 45^\circ$  evidenziano un certo scostamento per angoli di incidenza compresi fra 0° e 20°, che non è presente invece nei risultati sperimentali. Tuttavia, l'entità dello scostamento è tanto modesto da essere paragonabile all'errore sperimentale.

Infine, l'esame dei risultati relativi alla lastra da 16 mm, riportati in figura 7, mette in evidenza un ottimo accordo tra valori teorici e sperimentali di trasmittanza. Per radiazione ortogonale al piano della lastra i valori teorici e sperimentali coincidono, come pure coincidono i valori corrispondenti al caso di angolo di orientamento  $\varphi = 90^\circ$ . Per valori diversi di angolo di orientamento, gli andamenti previsti presentano valori di trasmittanza decisamente più bassi e poco diversi fra di loro. Andamento del tutto analogo presentano i valori rilevati sperimentalmente.

#### 4. Considerazioni Conclusive

Per fare fronte alla carente disponibilità di dati tecnici relativi alle prestazioni termoenergetiche dei nuovi materiali plastici trasparenti a strati plurimi e con rinforzi e nervature interne, è stato messo a punto un codice di calcolo numerico che consente la previsione teorica della trasmittanza della radiazione termica. Sia le prove di validazione che il confronto con risultati sperimentali, per lastre alveolari di policarbonato di produzione commerciale, hanno fornito risultati particolarmente incoraggianti. Grazie allo strumento di previsione sviluppato sarà possibile anche prendere in esame sezioni di foggia

tale da esaltare o controllare l'effetto energetico dell'anisotropia dovuta alla presenza dei setti, che ha costituito uno degli obiettivi della ricerca. Inoltre, la generalità del metodo adottato consente l'esame di casi più complessi di quelli esaminati nel presente lavoro, quali, per esempio, quelli in cui risulta necessario tenere conto della dipendenza spettrale delle proprietà dei materiali, degli effetti superficiali dovuti sia alle tecnologie produttive che allo sporcamento, della reale geometria dei profili, spesso poco regolare.

## 5. Nomenclatura

a	coefficiente di assorbimento superficiale
d	coefficiente di riflessione diffusa
E	energia radiante
n	indice di rifrazione
r	coefficiente di riflessione (3-5)
t	coefficiente di trasmissione (6)
t'	coefficiente di trasmissione diffusa
$\beta$	coefficiente di estinzione
$\tau$	trasmittanza
$\theta$	angolo di incidenza
$\varphi$	angolo di orientamento

## 6. Riferimenti Bibliografici

- [1] Guglielmini G. e Pisoni C., *Elementi di Trasmissione del Calore*, Ed. Veschi Milano (1990).
- [2] Maffei P.L. e Marchetti M., *Le Materie Plastiche nell'Edilizia*, CIDA Ed., Milano (1989).
- [3] Herrick C.S., Optical transmittance measurements on a solar collector cover of cylindrical glass tubes, *Solar Energy*, 28, 5-11 (1982).
- [4] Raffellini G. e Piva S., Sulla misura del coefficiente di trasmissione dell'energia solare per lastre di materiali trasparenti diversi, Atti del 6° Congresso Nazionale sulla Trasmissione del Calore, Bari 9/11 giugno 1988, 513-524.
- [5] Raffellini G., Piva S. e Mingozzi A., Sulla determinazione sperimentale del coefficiente di trasmissione della radiazione solare in lastre piane alveolari, Atti del 43° Congresso Nazionale ATI, Ancona 20/23 settembre 1988, IV 207-216.
- [6] Raffellini G. and Piva S., The utilization of different transparent plastic sheets in buildings: experimental results and correlations about the transmission coefficient, Proc. 2° CLIMA 2000, Sarajevo (YU) 27 august/1 september 1989, 38-43.
- [7] Di Luzio N., Piva S. and Raffellini G., The transmission of solar radiation through transparent alveolar plastic sheets for bioclimatic buildings, Proc. of the ISES Int. Conf. on Evolution of External Perimetral Components in Bioclimatic Architecture, Milan 5/6 april 1990, 47-50.
- [8] Raffellini G. and Piva S., Plastic multilayer ribbed sheets for bioclimatic buildings, Proc. of the IX PLEA Conference, Seville (E) 24/27 september 1991, 555-560.
- [9] Russel R.W.J., An analysis of the light transmittance of twin walled materials, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 31, 31-53 (1985).
- [10] Window H. and Zybort J., Optical collection efficiencies of arrays of tubular collectors with diffuse reflectors, *Solar Energy*, 26, 325-331 (1981).
- [11] Theunissen P.H. and Beckman W.A., Solar transmittance characteristics of evacuated tubular collectors with diffuse back reflectors, *Solar Energy*, 35, 311-320 (1985).
- [12] Siegel R. and Howell J.R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, Sec.Ed., Hemisphere Publ.Corp., N.Y. (1990).
- [13] Duffie J.A and Beckman W.A., *Solar Energy Thermal Processes*, J. Wiley & Sons, N.Y. (1974).