

MISURE SPETTROFOTOMETRICHE SU MATERIALI TRASPARENTI PER CHIUSURE PERIMETRALI IN EDILIZIA

Francesco Asdrubali – Cinzia Buratti – Giorgio Baldinelli

Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Perugia
Via G. Duranti 1-A/4 – 06125 Perugia

SOMMARIO

Lo studio delle chiusure perimetrali trasparenti riveste un'importanza fondamentale in edilizia, per effetto della duplice influenza che esse hanno sia sulle esigenze di comfort illuminotecnico, sia sulle esigenze di risparmio energetico. La normativa relativa alla certificazione energetica degli edifici, tuttavia, affronta il problema in maniera semplificata, fornendo il coefficiente di trasparenza solare medio per un numero molto limitato di tipi di vetro [1], [2] e rimandando alle certificazioni degli specifici materiali per altri valori. Nel presente lavoro si sono misurate le proprietà di trasparenza spettrale di un elevato numero di materiali per applicazioni in edilizia e nel settore delle fonti rinnovabili; le misure sono state eseguite per mezzo di uno spettrofotometro il cui range di misura va da 185 a 3152 nm. Una prima fase del lavoro è consistita nella messa a punto dello strumento, mediante taratura del sistema di misura effettuata con campioni di proprietà ottiche note, procedendo quindi ad una valutazione dell'errore e della ripetibilità delle misure stesse. Successivamente si sono indagate le caratteristiche spettrali di materiali trasparenti sia vetrosi (tradizionali, riflettenti e bassoemissivi) sia plastici (polycarbonato, plexiglass); per tali materiali le proprietà di trasparenza sono state valutate anche al variare dell'angolo di incidenza della radiazione, al fine di poterne simulare il comportamento reale.

ABSTRACT

Lo studio delle chiusure perimetrali trasparenti riveste un'importanza fondamentale in edilizia, per effetto della duplice influenza che esse hanno sia sulle esigenze di comfort illuminotecnico, sia sulle esigenze di risparmio energetico. La normativa relativa alla certificazione energetica degli edifici, tuttavia, affronta il problema in maniera semplificata, fornendo il coefficiente di trasparenza solare medio per un numero molto limitato di tipi di vetro [1], [2] e rimandando alle certificazioni degli specifici materiali per altri valori. Nel presente lavoro si sono misurate le proprietà di trasparenza spettrale di un elevato numero di materiali per applicazioni in edilizia e nel settore delle fonti rinnovabili; le misure sono state eseguite per mezzo di uno spettrofotometro il cui range di misura va da 185 a 3152 nm. Una prima fase del lavoro è consistita nella messa a punto dello strumento, mediante taratura del sistema di misura effettuata con campioni di proprietà ottiche note, procedendo quindi ad una valutazione dell'errore e della ripetibilità delle misure stesse. Successivamente si sono indagate le caratteristiche spettrali di materiali trasparenti sia vetrosi (tradizionali, riflettenti e bassoemissivi) sia plastici (polycarbonato, plexiglass); per tali materiali le proprietà di trasparenza sono state valutate anche al variare dell'angolo di incidenza della radiazione, al fine di poterne simulare il comportamento reale.

1. INTRODUZIONE

Da alcuni anni a questa parte svariati paesi hanno posto l'accento sulla questione riguardante la diminuzione dei consumi energetici: allo scopo di ridurre l'inquinamento ambientale e, contemporaneamente, risparmiare il più possibile le materie prime, sono stati progettati, proposti ed attuati interventi che riguardano numerosi campi di impiego dell'energia.

Un settore molto importante in tal senso è quello dell'edilizia che, essendo per la gran parte legato alla presenza umana, risente di svariati tipi di consumi, da quello dell'energia necessaria all'illuminazione artificiale, al riscaldamento ed alla refrigerazione degli ambienti, a quello indispensabile per il funzionamento delle apparecchiature di uso comune (elettrodomestici, macchinari industriali, da ufficio etc.). La necessità di tenere sotto controllo tutti questi aspetti ha portato ad una serie di normative fra cui si ricorda, per esempio, la Legge 10/91 che regola i consumi energetici relativi al riscaldamento degli ambienti.

La conoscenza delle caratteristiche ottiche dei materiali è importante non solo come approfondimento fine a se stesso, ma soprattutto perché molto spesso queste proprietà giocano un ruolo importante nel complesso ed articolato problema del risparmio energetico. Nella scelta delle chiusure perimetrali vanno analizzati principalmente due aspetti: l'illuminazione diurna e il risparmio energetico, che nella progettazione di un fabbricato vanno considerati contemporaneamente.

2. DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE

Lo spettrofotometro utilizzato per la campagna sperimentale è il Cary 2300 della ditta VARIAN (fig. 1); lo strumento funziona in un range di lunghezze d'onda compreso tra 185 nm e 3152 nm, con una accuratezza di 0,2 nm nell'ultravioletto e nel visibile e di 0,8 nm nel vicino infrarosso. Il costruttore fornisce il livello di rumore, calcolato come scarto quadratico medio, per una misura a 500 nm; tale valore è pari a $0,00005 \times A$ (A è la grandezza misurata). Lo strumento ha in dotazione due tipi di sorgenti di radiazioni e due diversi sensori che lavorano in differenti intervalli di lunghezze d'onda:

- lampada al deuterio per l'ultravioletto, nell'intervallo 185nm ÷ 340nm.
- lampada al tungsteno/alogeno per il visibile e l'ultravioletto, nell'intervallo 340 nm ÷ 3152 nm;
- tubo fotomoltiplicatore per il visibile e l'ultravioletto, nell'intervallo 185nm ÷ 800nm;
- sensore al solfuro di piombo per l'infrarosso, nell'intervallo 800nm ÷ 3152nm.

Il selettore di lunghezza d'onda di Cary 2300 è un monocromatore a reticolo che come la maggior parte dei monocromatori è provvisto di fenditure con aperture variabili per la corretta selezione della larghezza di banda efficace [4].

Lo strumento possiede due celle, una destinata al campione e l'altra destinata al materiale di riferimento, (aria) rispetto al quale vengono effettuati i calcoli. Si tratta di due contenitori identici (390x200x160mm l'uno) posti affiancati su un lato dello strumento, ai quali è possibile accedere dall'esterno tramite dei coperchi. La cella del campione contiene una torretta su cui viene fissato il materiale da analizzare.



Fig. 1 – Strumentazione spettrofotometrica impiegata.

3. MODALITA' DI EFFETTUAZIONE DELLE PROVE

Le normative prevedono una serie di prescrizioni cui attenersi durante le prove. Per questo motivo, come previsto dalla UNI 7885 [5], il campione viene tagliato in dimensioni tali da coprire abbondantemente l'apertura di passaggio del fascio luminoso; ne viene misurato lo spessore, rientrando nella tolleranza prevista, e viene pulito prima di essere inserito nella cella portacampione. Inoltre, come previsto dalla normativa europea EN 410 [6], le misure sono condotte al variare della lunghezza d'onda tra 300nm e 2500nm, con intervalli di 10nm tra una misura e la successiva.

All'accensione dello strumento è necessario verificare il superamento degli auto test iniziali. Ogni volta che lo spettrofotometro viene avviato si procede al calcolo della cosiddetta baseline, ossia una sorta di taratura iniziale per adattare lo strumento alle condizioni ambientali. Contemporaneamente, sfruttando il fatto che durante la procedura di baseline il campione non deve essere inserito nello strumento, lo si pulisce con etilene, lo si lascia essiccare all'aria e successivamente lo si lucida con cartine ottiche.

A questo punto lo strumento è in grado di effettuare la misura, per cui è possibile inserire il campione nell'apposito contenitore. Aperta la cella preposta, si preleva la torretta di appoggio e vi si fissa il materiale con nastro adesivo, facendo attenzione che il fissaggio non risulti intrusivo per la misura stessa.

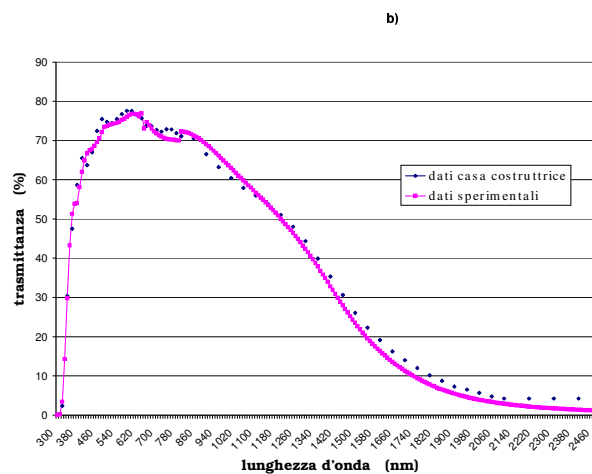
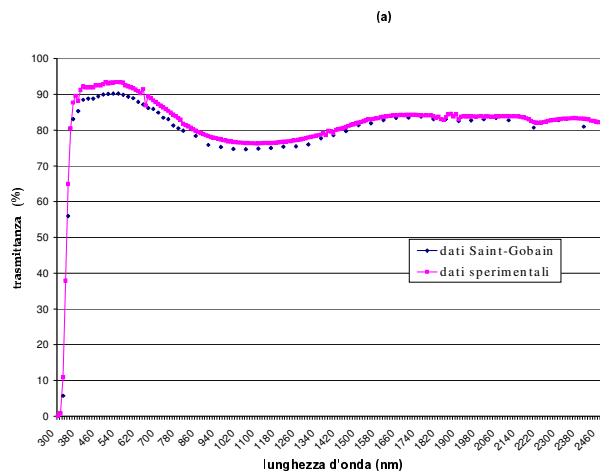
Terminate queste operazioni è possibile predisporre la misura vera e propria impostando, attraverso il pannello di controllo, le condizioni di misura volute.

4. TARATURA DELLO STRUMENTO CON MATERIALI DI CARATTERISTICHE NOTE

Si sono innanzitutto condotte delle prove preliminari al fine di verificare la correttezza dei valori ottenuti dalle misurazioni, con lo scopo di validare le prove future, e stabilire univocamente il metodo di misura da adottare.

Per raggiungere entrambi gli obiettivi si è fatto uso di vetri per i quali erano disponibili delle certificazioni:: PLANILUX CHIARO, COOL LITE SS108 ed EKO PLUS della Saint Gobain, caratterizzati da marcate differenze di proprietà ottiche e di spessore, così da ricoprire una vasta gamma di tipologie di vetri.

Le prove preliminari realizzate hanno consentito di delineare una precisa procedura di misura: per ogni campione risulta necessario procedere a tre misure consecutive, ognuna di esse preceduta da baseline e bilanciamento a 2500 nm, scartando la prima ed utilizzando le altre due per calcolare la media. I risultati ottenuti sono riportati nelle figg. 1, 2 e 3 in cui sono indicati gli andamenti della trasmittanza ricavata dallo strumento insieme all'andamento certificato, fornito dalla casa costruttrice dei vetri, per i 3 campioni sopra citati.



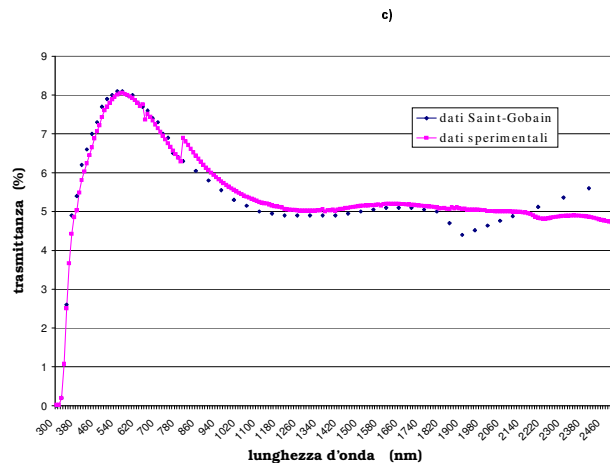


Fig. 2 - Confronti fra l'andamento sperimentale e quello di dati noti; a) Planilux; b) Eko Plus e c) Cool Lite.

Come si vede dalle figure, le differenze ottenute tra i dati sperimentali e quelli certificati sono di piccola entità e consentono di ritenere pienamente attendibile i risultati forniti dallo strumento.

5. INCERTEZZA E RIPETIBILITÀ DELLE MISURE

La UNI 4546 definisce la misura come “un'informazione costituita da un numero, da un'incertezza e da un'unità di misura”.

Seguendo le indicazioni della norma UNI CEI 9 [7], sono state eseguite 10 misurazioni per ogni campione; per ogni valore λ nell'intervallo 300nm÷2500nm si è calcolato lo scarto tipo sperimentale della media, espresso dalla seguente relazione:

$$s(\bar{q}) = \sqrt{\frac{n \sum_{k=1}^n q_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n q_k \right)^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

dove q_k è il valore di ogni singola osservazione ed n è il numero totale di osservazioni.

Il massimo scarto tipo tra tutti quelli calcolati per ogni singola lunghezza d'onda è stato scelto come valore rappresentativo dell'incertezza della misura; tale procedura è stata sviluppata separatamente per ognuno dei tre vetri di riferimento (tab. 1). Per il significato attribuito allo scarto tipo è possibile affermare che il valore medio, stima il corrispondente valore atteso della trasmittanza con un'incertezza massima dello 0,369528% per il Planilux, dello 0,042279% per il Cool Lite e dello 0,294522% per l'Eko Plus.

Si può dunque osservare che gli scarti tipo massimi sono estremamente contenuti, a tutto vantaggio dell'affidabilità e della precisione dello strumento.

Nell'analizzare la correttezza di funzionamento dello strumento si è pensato di affrontare il problema della ripetibilità, cioè si è pensato di verificare che lo spettrofotometro in dotazione avesse l'attitudine a fornire valori poco differenti tra loro in letture diverse, eseguite indipendentemente sulla stessa misura. Questo parametro può essere visto come una sorta di “stabilità” dello strumento.

Per caratterizzare la ripetibilità delle misure effettuate con Cary 2300 si è ricorsi alla UNI 9225, [8] concordante con la ISO 5725-86; tali norme definiscono tale grandezza come il valore al di sotto del quale dovrebbe cadere, con una probabilità del 95%, la differenza assoluta tra due singoli risultati di prova. Vengono

definiti i principi fondamentali per l'impostazione, l'organizzazione e l'analisi di esperimenti, progettati per stimare la ripetibilità r e la riproducibilità. Il calcolo della ripetibilità è stato condotto supponendo di avere a che fare con un solo laboratorio e di effettuare dieci ripetizioni per ogni singolo livello. I valori ottenuti sono riportati sempre in tabella 1.

VETRI DI RIFERIMENTO	$s(\bar{q})$ (%)	RIPETIBILITA' (r)
Planilux (4mm)	0,369528	0,269057%
Eko Plus (4mm)	0,294522	0,142976%
Cool Lite (6mm)	0,042279	0,047462%

Tab. 1 – Incertezza e ripetibilità delle misurazioni sui vetri di riferimento

Per la definizione di ripetibilità ciò significa, per esempio, che due misure consecutive, condotte in maniera identica sul Planilux, producono trasmittanze che differiscono, in valore assoluto, di una quantità inferiore allo 0,269057 %, con una probabilità pari al 95%.

6. MISURE SU MATERIALI TRASPARENTI DI DIVERSO TIPO

Dopo aver messo a punto lo strumento si sono condotte numerose prove per caratterizzare le proprietà di trasparenza di vari tipi di materiali (vetri di diverso genere e qualche polimero). Di seguito sono riportati per ogni materiale una breve descrizione, il grafico della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda ed un commento del risultato.

6.1. Vetri semplici

Sono vetri di base poiché risultano quelli più comunemente impiegati in edilizia; il termine “semplice” è un altro modo con cui chiamare i vetri tirati. Oltre al “Planilux”, già analizzato in fase di taratura dello strumento, sono stati esaminati altri vetri di diverso spessore (fig. 3):

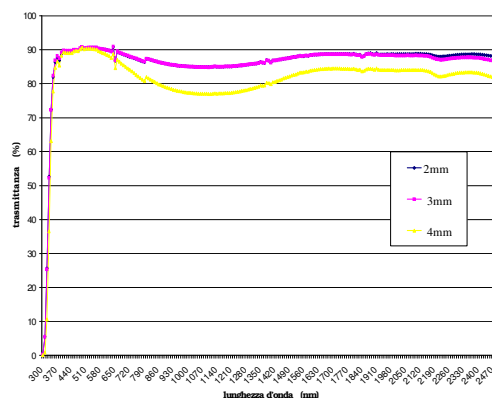


Fig. 3 – Curve di trasmittanza dei vetri semplici per tre diversi spessori.

L'andamento ripercuote fedelmente le curve relative ad un vetro piano incolore, denotando, come previsto, un abbassamento dei valori all'aumentare dello spessore.

Un tipo particolare di vetro semplice è il “float”, un prodotto vetrario di base ottenuto per colata su un bagno metallico di stagno in atmosfera controllata. Le peculiarità dei vetri float sono analoghe a quelle dei precedenti, ma le migliori caratteristiche che il tipo di lavorazione conferisce loro ha fatto sì che, nell'uso comune, i vetri semplici venissero soppiantati quasi totalmente da questi (fig. 4).

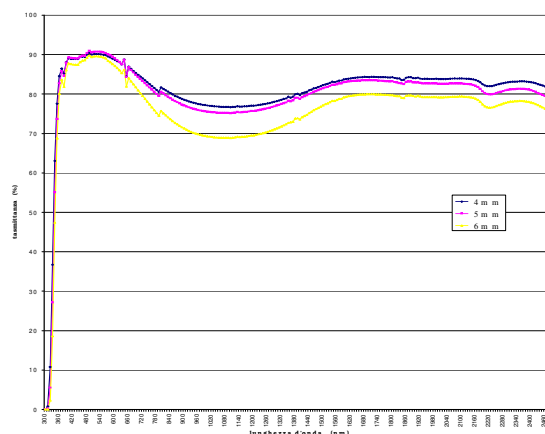


Fig. 4 – Curve di trasmittanza dei vetri float per tre diversi spessori.

6.2. Vetri bassoemissivi

Appartiene a questa categoria il vetro “Eko plus”, un cristallo float chiaro che viene reso bassoemissivo mediante pirolisi. Si tratta di un vetro stabile che è adatto in tutte quelle finestrate in cui si vogliono contenere il più possibile le dispersioni termiche; i valori più bassi della trasmittanza si hanno infatti nell’infrarosso.

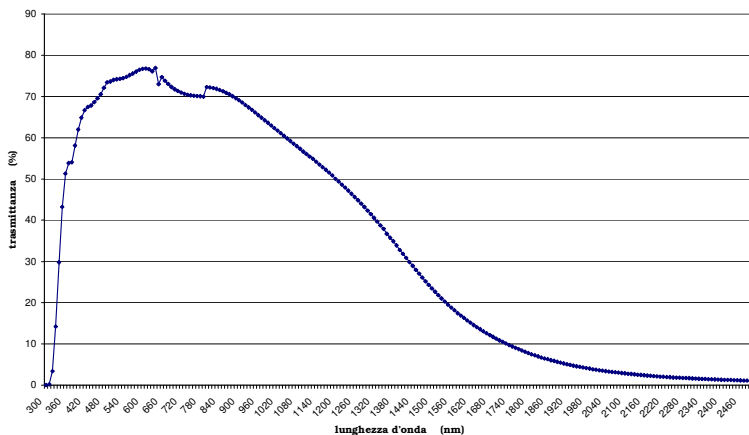


Fig. 5 - Andamento della trasmittanza percentuale dell'Eko Plus da 4mm.

Nel gruppo dei cristalli bassoemissivi selettivi a controllo solare, si sono analizzate le caratteristiche del vetro “Cool Lite” (fig.6): un vetro colorato che viene reso riflettente mediante polverizzazione catodica e che possiede una struttura tale da conferirgli eccellenti capacità di controllo energetico. Le peculiarità che caratterizzano il Cool Lite lo rendono adatto ad essere impiegato in regioni particolarmente soleggiate.

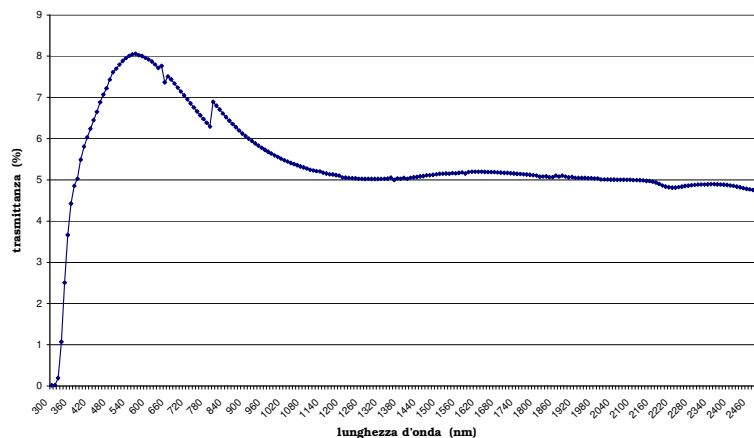


Fig. 6 - Andamento della trasmittanza percentuale del Cool Lite da 6mm.

Si può affermare che, come l'Eko Plus, anche questo vetro risponde all'esigenza di garantire la minima trasmissione nell'infrarosso.

6.3. Vetri riflettenti

Sono stati analizzati un vetro riflettente comune e un vetro tipo “Antelio Steel Gray”. “Antelio” è il nome commerciale di un vetro di tipo riflettente; si tratta di un cristallo ricotto che viene reso riflettente mediante pirolisi a partire da un supporto float colorato. Le specifiche tecniche dell’Antelio sono tali da coniugare le prestazioni dei cristalli assorbenti e di quelli riflettenti, determinando un vetro capace di esercitare un efficace controllo solare accostato ad una trasmissione luminosa buona. Le caratteristiche del campione di vetro riflettente comune sono molto prossime a quelle del vetro Antelio (fig. 7).

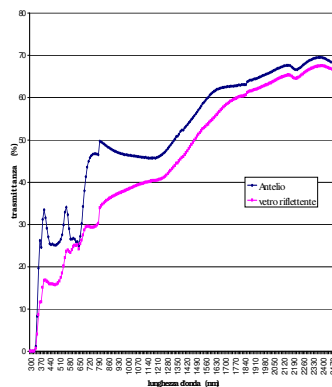


Fig. 7 – Trasmittanza del vetro Antelio Steel Gray e di un vetro riflettente comune, entrambi di spessore 6 mm.

In entrambi i casi la curva della trasmittanza non supera il 70% e, per quanto riguarda il visibile, si evidenziano i fenomeni di assorbimento selettivo dovuti alla particolare colorazione.

6.4. Altri materiali vetrosi

L’analisi si è poi estesa ad altri vetri quali il borosilicato (DURAN 50), la cui caratteristica principale è l’eccezionale resistenza alle alte temperature, il vetro satinato, che ha una faccia resa opaca e bianca mediante lavorazioni superficiali di vario genere e il vetro stampato che ha una faccia (o entrambe) impressa con disegni o motivi ornamentali. Per brevità in tabella 3 sono riportati i coefficienti di trasmissione nel visibile e nel solare ottenuti dalle misurazioni su tali materiali.

6.5. Plexiglass trasparenti

Il Plexiglass è il nome commerciale del polimero polimetil-metacrilato (PMMA) che appartiene alla categoria dei termoplastici tradizionali (è della famiglia degli acrilici).

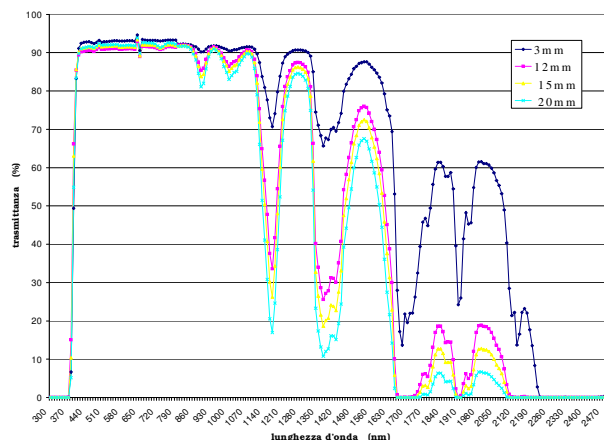


Fig. 8 – Trasmittanza di campioni in plexiglass di vari spessori.

Le curve di trasmittanza dei plexiglass studiati (fig. 8) mettono in evidenza il fatto che, indipendentemente dallo spessore, questo materiale possiede eccellenti proprietà di trasparenza nell'ambito del visibile, mentre nella zona dell'infrarosso è soggetto a fenomeni di oscuramento o assorbimento interno, causati dalla presenza di cavità vuote, di disomogeneità strutturali e di contaminanti i quali danno origine agli accentuati picchi che caratterizzano le più elevate lunghezze d'onda.

6.6. Policarbonato pieno e cellulare

Il policarbonato è un polimero amorfo che appartiene alla categoria dei termoplastici avanzati, i quali possiedono proprietà migliori di quelle dei tradizionali sotto molti punti di vista. Il tipo "pieno" è tale in tutto il suo spessore mentre il "cellulare" è realizzato con una struttura diversa composta da cavità interne, aperte ad entrambe le estremità, aventi la forma di tanti piccoli canali.

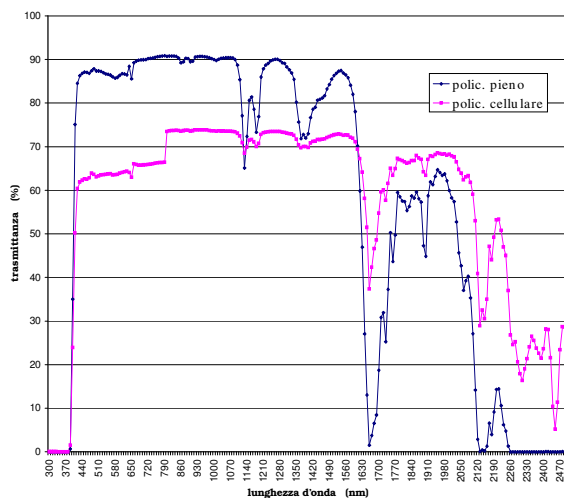


Fig. 9 – Curve di trasmissione del policarbonato pieno e cellulare.

L'andamento della trasmittanza del policarbonato pieno è del tutto analogo a quello dei polimeri termoplastici in generale; il policarbonato cellulare mostra una minore capacità di trasparenza rispetto a quello pieno. La diminuzione della trasmittanza può essere imputata alla particolare configurazione fisica del materiale, nel quale tra una superficie e l'altra si ha una intercapedine contenente aria che attenua la trasmissione luminosa (fig. 9).

7. CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE NEL VISIBILE E DEL FATTORE DI TRASMISSIONE SOLARE DIRETTA

La normativa EN 410 descrive come calcolare i parametri che caratterizzano il comportamento dei materiali trasparenti impiegati in edilizia. Tali parametri sono:

- il fattore di trasmissione della luce τ_v per l'illuminante D_{65} ;
- il fattore di trasmissione solare diretta τ_e .

τ_v è calcolato usando la seguente formula:

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda=380}^{780} D_{\lambda} \tau(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{780} D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (2)$$

dove

D_{λ} è la distribuzione spettrale relativa dell'illuminante D_{65} (parametro che rappresenta la luce del giorno);

$\tau(\lambda)$ è il fattore di trasmissione spettrale della vetrata in esame;

$V(\lambda)$ è l'efficienza spettrale per una visione fototipica definita per l'osservatore standard;

$\Delta\lambda$ è l'intervallo di lunghezza d'onda.

Nella normativa sono tabulati i valori di D_λ , $V(\lambda)$, e $\Delta\lambda$ per intervalli di lunghezza d'onda di 10 nm.

Il fattore di trasmissione solare diretto τ_e di una vetrata si calcola dalla seguente formula:

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{2500} S_\lambda \tau(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{2500} S_\lambda \Delta\lambda} \quad (3)$$

dove S_λ è la distribuzione spettrale relativa dell'energia solare (tabulata dalla norma) ($\tau(\lambda)$ e $\Delta\lambda$ hanno lo stesso significato visto sopra).

I parametri τ_v e τ_e danno indicazioni rispettivamente delle prestazioni illuminotecniche ed energetiche dei campioni in esame; nelle tabelle 2 e 3 sono riportati tali valori calcolati per i materiali oggetto della campagna di misure.

VETRI	COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE NEL VISIBILE (τ_v)	FATTORE DI TRASMISSIONE SOLARE DIRETTA (τ_e)
Planilux 4mm	0,895*	0,834
Eko Plus 4mm	0,750**	0,616
Cool Lite 6mm	0,079***	0,064
Vetro semplice 2mm	0,903	0,875
Vetro semplice 3mm	0,902	0,875
Vetro semplice 4mm	0,896	0,838
Vetro float 4mm	0,895	0,836
Vetro float 5mm	0,892	0,829
Vetro float 6mm	0,885	0,795
Vetro Antelio Steel Gray 5mm	0,289	0,383
Vetro riflettente 6mm	0,214	0,297
Vetro soffiato 5mm	0,910	0,882
Vetro satinato 5mm	0,388	0,381
Vetro stampato 3mm	0,509	0,518

* τ_v certificato = 0,896; ** τ_v certificato = 0,760; *** τ_v certificato = 0,080

Tab. 2- τ_v e τ_e per i vetri analizzati.

MATERIALI PLASTICI	COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE NEL VISIBILE (τ_v)	FATTORE DI TRASMISSIONE SOLARE DIRETTA (τ_e)
Plexiglass 3mm	0,930	0,830
Plexiglass 12mm	0,923	0,784
Plexiglass 15mm	0,922*	0,779
Plexiglass 20mm	0,920*	0,769
Polycarbonato pieno 5mm	0,866	0,784
Polycarbonato cellulare 6mm	0,636	0,621

* τ_v certificato = 0,922 per uno spessore pari a 18 mm

Tab. 3 - τ_v e τ_e per i materiali plastici analizzati.

8. MISURE CON INCIDENZE NON NORMALI

La normativa che si occupa della caratterizzazione dei vetri e che è stata presa come base per le analisi fin ad ora sviluppate, impone che il fascio incida perpendicolarmente sul campione. Tuttavia al fine di una

caratterizzazione più approfondita dei materiali, è interessante valutare il comportamento del vetro e di altri elementi trasparenti nel caso di incidenze non normali. E' stato a tal fine progettato e realizzato un apposito supporto per lo spettrofotometro, dotato di alloggiamenti in cui disporre due campioni identici dello stesso materiale (fig. 10). L'analisi geometrica consente di dimostrare che, inclinando il secondo campione dello stesso angolo con cui è disposto il primo, le due deviazioni dovute alla rifrazione del materiale risultano uguali e contrarie ed il fascio luminoso giunge al sensore indisturbato.

Fig. 10 – Portacampione per misure con incidenze non normali.

Le prove sono state condotte su campioni di vetro semplice, vetro bassoemissivo, vetro riflettente e plexiglass, con inclinazioni di 0°, 45°, 60°, 70° e 80°. La scelta di angoli così ampi è dovuta al fatto che, come si avrà modo di dedurre dai risultati, variazioni significative della trasmittanza si hanno solo a partire da inclinazioni di circa 60°. Nelle figure 11-12-13-14 sono riportati i risultati di tale analisi.

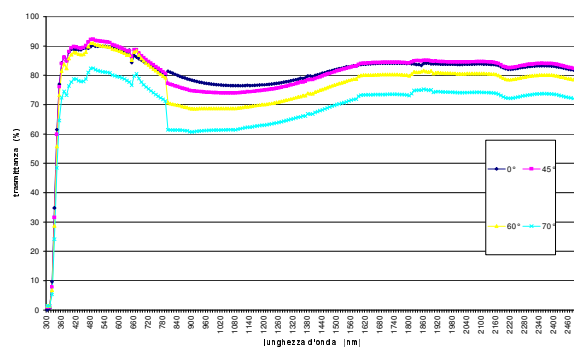


Fig. 11 – Trasmittanze del planilux (vetro semplice) da 4 mm per diversi angoli di inclinazione.

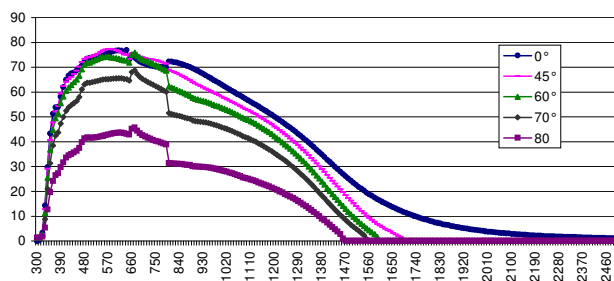


Fig. 12– Trasmittanze dell'Eko Plus (vetro bassoemissivo) da 4 mm per diversi angoli di inclinazione.

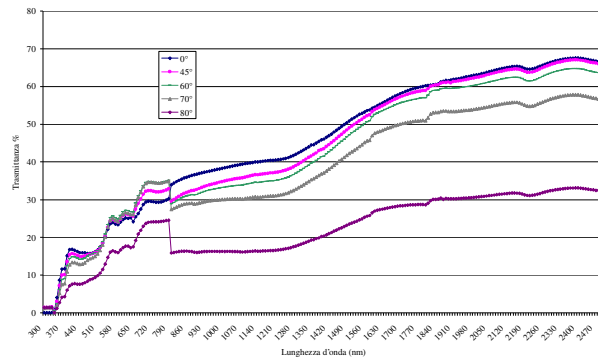


Fig. 13 – Trasmittanze del vetro riflettente da 6 mm per diversi angoli di inclinazione.

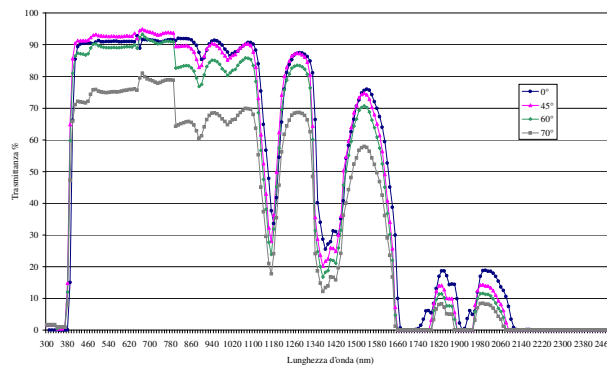


Fig. 14 – Trasmittanze del plexiglass da 12 mm per diversi angoli di inclinazione.

Come indicato in letteratura [9], [10], i risultati evidenziano una diminuzione della trasparenza del vetro a partire da 60° in avanti e tale riduzione cresce insieme all'angolo di incidenza.

9. CONCLUSIONI

Muovendo i passi da una serie di prove preliminari, si è definito il metodo di misura più corretto; la validità delle misure prodotte dallo strumento è stata dimostrata dal confronto con alcuni vetri di caratteristiche note. Le successive analisi hanno confermato tutto questo; in particolare il calcolo del coefficiente di trasmissione nel visibile τ_v ha fornito valori pressoché identici a quelli certificati. L'attendibilità delle misure è stata verificata anche per i materiali plastici tramite alcune prove condotte su campioni certificati. Il calcolo della ripetibilità e dell'incertezza delle misure condotte sui tre vetri di riferimento, ha completato lo studio del comportamento di Cary 2300 avvalorando le conclusioni raggiunte. Lo studio effettuato sulle caratteristiche di funzionamento dello spettrofotometro ha trovato applicazione pratica nelle misure condotte su alcuni tipi di vetri e di polimeri; i risultati ottenuti e riscontrati con i dati bibliografici in possesso hanno confermato le proprietà dei materiali esaminati. In particolare, per quanto riguarda i vetri, si è osservato che le migliori trasmissioni sono garantite dai float e dai vetri semplici che possiedono proprietà equivalenti ai primi. I vetri riflettenti hanno confermato le proprietà di assorbimento selettivo a di scarsa trasmittanza, mentre i bassoemissivi si sono dimostrati altamente riflettenti nell'infrarosso come ci si aspettava. I vetri colorati, infine, hanno evidenziato fenomeni di assorbimento selettivo nel visibile accompagnati da una riduzione globale della trasmittanza. Per quanto concerne i polimeri si è avuto conferma del fatto che nel visibile, indipendentemente dallo spessore, essi sono in grado di garantire trasmissioni leggermente superiori a quelle del vetro float stesso, mentre, nel vicino infrarosso, presentano forti assorbimenti determinati dalla loro struttura chimico-fisica. All'interno di questa categoria il policarbonato cellulare è il polimero che possiede i più bassi valori di trasmittanza a causa, molto probabilmente, della struttura, cava internamente, con cui sono realizzati. Le caratteristiche di trasmissione dei materiali analizzati sono state sintetizzate in due parametri, il coefficiente di trasmissione nel visibile τ_v , e il fattore di trasmissione solare diretta $\tau_{e,s}$, calcolati secondo quanto previsto dalla EN 410. Infine, l'approfondimento delle

caratteristiche di trasparenza dei vetri, effettuato mediante misure ad incidenze non normali, ha evidenziato che diminuzioni sensibili di queste proprietà si hanno a partire da angoli di inclinazione di circa 60°.

BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI 10344, novembre 1993: Riscaldamento degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia.
- [2] EN 832: Performance thermique des batiments – Calcul de besoins d’énergie pour le chauffage – Batiments
- [3] Risparmio energetico edifici.....
- [4] Skoog - Leary: *Chimica analitica strumentale*, Ed. ISES, Napoli, 1995
- [5] UNI 7885, dicembre 1978: Prove sul vetro. Determinazione dei fattori di trasmissione dell’energia solare. residenziels, CEN, Bruxelles, settembre 1998.
- [6] EN 410, Glass in building – Determination of luminous and solar characteristics of glazing, CEN, Bruxelles, aprile 1998.
- [7] UNI CEI 9, giugno 1997: Guida all’espressione dell’incertezza di misura.
- [8] UNI 9225, aprile 1988: Determinazione della ripetibilità e riproducibilità di un metodo di prova normalizzato mediante esperimenti interlaboratorio.
- [9] I. Barducci: *Trasmissione del calore*, Collana di fisica Tecnica, vol. 1, ESA Editrice, Roma, 1996
- [10] J.P. Holman: *Heat transfer*, Mc Graw Hill, New York, 1989.