

Collana Tecnico-Scientifica

diretta da Giorgio Galli

Quaderno n. 22

FRANCESCO ASDRUBALI, CINZIA BURATTI,
RITA MARIANI, GIORGIO BALDINELLI,
ELISA MORETTI

**MISURE SPETTROFOTOMETRICHE
SU MATERIALI TRASPARENTI:
RECENTI ATTIVITÀ DI RICERCA DEL
LABORATORIO DI TERMOTECNICA
DELL'UNIVERSITÀ DI PERUGIA**

Agosto 2004

CIRIAF

Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici

INDICE

Introduzione	pag. 3
1. Descrizione e messa a punto della strumentazione spettrofotometrica da banco e dei relativi accessori.....	pag. 5
1.1 Generalità sulle strumentazioni spettrofotometriche	pag. 5
1.2 Spettrofotometro Cary 2300	pag. 7
1.2.1 Componenti principali	pag. 7
1.2.2 Principio di funzionamento.....	pag. 9
1.2.3 Metodologia di misura.....	pag. 10
1.2.4 Parametri di ottimizzazione dello strumento	pag. 10
1.2.5 Procedura di baseline.....	pag. 12
1.3 Costruzione e messa a punto di un accessorio per misure di incidenza non normale: il goniometro.....	pag. 12
1.4 La sfera integratrice	pag. 14
2. Descrizione e messa a punto della strumentazione spettrofotometrica portatile e dei relativi accessori.....	pag. 17
2.1 Spettrofotometro portatile S 2000.....	pag. 17
2.1.1 Componenti principali	pag. 17
2.1.2 Metodologia di misura.....	pag. 20
2.2 Costruzione e messa a punto di un accessorio per il posizionamento del campione	pag. 21
3. Normativa di riferimento	pag. 25
3.1 Introduzione.....	pag. 25
3.2 UNI 7885: “Prove sul vetro. Determinazione dei fattori di trasmissione dell’energia solare.”.....	pag. 25
3.3 UNI EN 410: “Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate”	pag. 26
4. Misure e calcolo delle prestazioni di materiali trasparenti di impiego corrente.....	pag. 33
4.1 Il vetro e le sue proprietà ottiche	pag. 33
4.2 Il vetro nell’edilizia.....	pag. 35
4.3 Campioni vetrosi per la messa a punto dello spettrofotometro Cary 2300	pag. 36

4.3.1	Confronto tra l'andamento sperimentale e quello dedotto dai dati noti.....	pag. 36
4.3.2	Incertezza e ripetibilità delle misure.....	pag. 36
4.3.3	Calcolo del fattore di trasmissione nel visibile e nel solare.....	pag. 39
4.4	I polimeri e le loro proprietà ottiche.....	pag. 39
4.5	Campioni plastici per la messa a punto dello spettrofotometro Cary 2300.....	pag. 42
4.5.1	Misure e calcolo del fattore di trasmissione nel visibile.....	pag. 42
4.6	Materiali per la messa a punto dello spettrofotometro portatile S 2000.....	pag. 44
4.6.1	Prove di misura per diverse distanze delle lenti.....	pag. 44
4.6.2	Incertezza e ripetibilità delle misure.....	pag. 47
4.6.3	Confronto tra le prestazioni dello spettrofotometro portatile S 2000 e quelle del Cary 2300.....	pag. 49
5.	Misure e calcolo delle prestazioni di materiali trasparenti innovativi.....	pag. 53
5.1	Generalità.....	pag. 53
5.2	L'aerogel.....	pag. 53
5.3	I geometric media.....	pag. 57
5.4	Descrizione e proprietà ottiche dei campioni.....	pag. 60
5.5	Risultati sperimentali.....	pag. 66
5.6	Confronti tra i campioni analizzati.....	pag. 69
5.7	Considerazioni conclusive.....	pag. 72
6.	Misure e calcolo delle prestazioni di pellicole a controllo solare applicate a campioni di vetro.....	pag. 73
6.1	Introduzione.....	pag. 73
6.2	Le pellicole a controllo solare.....	pag. 73
6.2.1	Le pellicole riflettenti.....	pag. 73
6.2.2	Le pellicole semiriflettenti.....	pag. 75
6.2.3	Le pellicole a controllo UV.....	pag. 75
6.3	Descrizione dei campioni.....	pag. 76
6.4	Risultati sperimentali.....	pag. 77
6.5	Confronti tra i campioni analizzati.....	pag. 84
6.6	Considerazioni conclusive.....	pag. 86
7.	Misure spettrofotometriche su vetri di interesse storico - artistico.....	pag. 89
7.1	Le vetrate artistiche e l'influenza dell'invecchiamento sulle proprietà di trasparenza del vetro.....	pag. 89

7.2 Misure spettrofotometriche su campioni di vetro nuovi e invecchiati con un processo accelerato in camera climatica.....	pag. 90
7.3 Misure spettrofotometriche su campioni decorati con varie tecniche superficiali.....	pag. 96
7.4 Misure spettrofotometriche in situ su alcuni pannelli restaurati della vetrata di San Domenico a Perugia.....	pag. 102
Conclusioni	pag. 113
Elenco dei simboli.....	pag. 115
Bibliografia	pag. 117

Introduzione

Presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Perugia, Sezione di Fisica Tecnica, da tempo si svolgono ricerche sulle proprietà spettrofotometriche di materiali trasparenti, sia di tipo tradizionale e di interesse storico-artistico che di tipo innovativo.

L'intento del quaderno è quello di raccogliere il lavoro svolto fino a questo momento e fornire quindi una panoramica sulle ricerche svolte e in atto presso il Laboratorio.

Viene descritta la strumentazione disponibile e riportata una sintesi delle normative di riferimento per le misure, seguono quattro capitoli dedicati a due filoni principali di ricerca: il primo filone riguarda la misura ed il calcolo delle prestazioni di materiali trasparenti di impiego corrente e innovativi, il secondo riguarda misure spettrofotometriche su vetri di interesse storico – artistico.

Il primo filone di ricerca nasce dalla constatazione che il vetro nel corso degli ultimi decenni ha assunto nell'edilizia un ruolo sempre più importante. Le superfici trasparenti giocano un ruolo fondamentale per quanto riguarda sia i consumi energetici di un edificio che il comfort termico e visivo degli ambienti confinati. Sono stati proposti negli ultimi anni numerosi materiali a carattere innovativo, quali ad esempio i Transparent Insulating Materials (TIM), i vetri elettrocromici, le pellicole a controllo solare, volti a migliorare le condizioni di comfort visivo e a contenere i carichi termici estivi ed invernali degli edifici. Si sono inoltre sviluppati numerosi strumenti matematici ed informatici per la modellazione termica ed illuminotecnica di ambienti confinati, al variare delle condizioni di esposizione e dei materiali impiegati. La normativa tecnica nazionale ed internazionale, tuttavia, tratta il problema in maniera semplificata, fornendo il valore della trasmittanza solo per soluzioni standard (infissi con singolo o doppio vetro) e rimandando ai dati dei produttori per le prestazioni di altri sistemi; nasce pertanto l'esigenza di completare la caratterizzazione sperimentale delle proprietà energetiche ed illuminotecniche di materiali di recente introduzione, di prevedere il comportamento di sistemi vetrati complessi, a partire da dati sui singoli componenti, e di modellare, attraverso simulazioni dinamiche, il comportamento di ambienti confinati standard in cui siano impiegati i materiali trasparenti innovativi.

Il secondo filone di ricerca riguarda lo studio dell'influenza dell'invecchiamento sulle proprietà spettrofotometriche di pareti vetrate. In particolare tale studio si è indirizzato alla caratterizzazione delle vetrate artistiche, in relazione alle quali sono stati studiati campioni di vetro normalmente impiegati per il loro restauro e di composizione simile a quella delle vetrate antiche,

sottoposti a processi di invecchiamento accelerato in camera climatica. Si sono valutate le proprietà illuminotecniche di tali campioni, prima e dopo l'invecchiamento, al fine di valutarne l'influenza. Si sono inoltre effettuate misure su campioni antichi, colorati e decorati con tecniche di diverso tipo, al fine di valutare l'influenza del tipo di tecnica sulla variazione nel tempo delle proprietà ottiche della vetrata.

CAPITOLO 1

DESCRIZIONE E MESSA A PUNTO DELLA STRUMENTAZIONE SPETTROFOTOMETRICA DA BANCO E DEI RELATIVI ACCESSORI

1.1 Generalità sulle strumentazioni spettrofotometriche

Gli spettrofotometri sono strumenti composti da uno spettrometro e da un fotometro e usati per confrontare, radiazione per radiazione, l'intensità luminosa di sorgenti di colore diverso. Lo spettrometro misura l'ampiezza dell'intervallo di lunghezze d'onda, mentre il fotometro traduce la radiazione luminosa in corrente elettrica misurabile su una scala graduata.

Con questi strumenti si realizza essenzialmente la spettrofotometria di assorbimento, cioè la misura delle radiazioni assorbite in regioni diverse e variabili con continuità dello spettro ultravioletto, visibile e infrarosso, quando tali radiazioni passano attraverso un mezzo omogeneo o una soluzione.

I componenti principali di uno spettrofotometro sono una sorgente di radiazioni, un monocromatore, e un ricevente:

- ❑ la sorgente luminosa varia in funzione del campo di studio delle radiazioni emesse/assorbite dai corpi. Nella regione del visibile viene quasi esclusivamente impiegata la lampada a filamento di tungsteno;
- ❑ il monocromatore è un prisma o - più frequentemente - un reticolo di diffrazione; ha il compito di deviare le direzioni dei fronti d'onda di un angolo dipendente dalla lunghezza d'onda. Facente parte del monocromatore sono anche il collimatore e il focalizzatore, posti rispettivamente davanti e dietro al prisma o reticolo; il collimatore porta un fascio di luce collimata al prisma o reticolo; il focalizzatore forma una serie di immagini della fenditura d'ingresso sul piano della fenditura di uscita;
- ❑ i rivelatori di radianza (sensori) sono trasduttori che convertono l'energia raggiante in un segnale elettrico da poter rilevare. Nel caso di presenza di un unico sensore si parla di spettrofotometri monocanale; se invece vi sono più sensori posti in parallelo si parla di spettrofotometri multicanale ("abridged"). Nello spettrofotometro monocanale il reticolo ruota facendo "scorrere" lo spettro davanti alla fenditura di uscita; nel multicanale non vi sono parti in movimento e sul piano di uscita vi è una batteria ("array") di sensori: il sistema di controllo legge in sequenza i segnali generati da ognuno di essi.

Le misure spettrofotometriche possono essere assolute o relative; se la misurazione viene effettuata senza ricorrere a uno standard di riferimento il metodo viene detto assoluto.

Gli spettrofotometri possono essere a singolo o a doppio raggio (Fig.1.1); in quelli a singolo raggio ogni operazione consiste in due operazioni separate nel tempo, una sul campione e una sul riferimento: tali misure sono più semplici ma meno accurate e poco riproducibili, perché nel tempo può cambiare l'intensità della radiazione emessa dalla sorgente. Negli strumenti a doppio raggio il fascio percorre alternativamente un cammino che include l'incidenza sul campione e uno che la esclude; la misura è data dal rapporto dei segnali al rivelatore dovuti ai flussi dei due fasci.

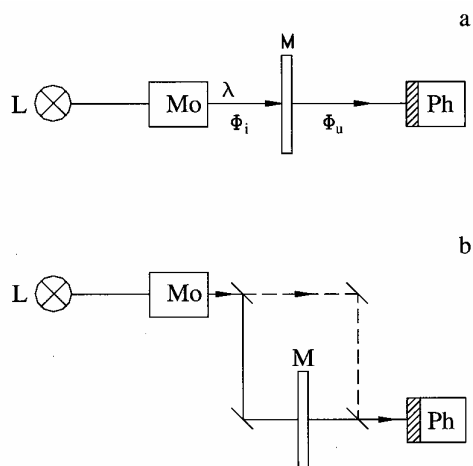


Fig. 1.1: Schema a blocchi di uno spettrofotometro monoraggio (a) e biraggio (b); L =sorgente, M_0 = monocromatore, M =campione, Ph = rivelatore

La strumentazione spettrofotometrica disponibile presso il Laboratorio del Ciriad dell'Università degli Studi di Perugia è costituita da:

- spettrofotometro da laboratorio CARY 2300 prodotto dalla ditta Varian;
- spettrofotometro portatile S 2000 prodotto dalla ditta Ocean Optics.

1.2 Spettrofotometro Cary 2300

1.2.1 Componenti principali

Lo strumento in dotazione (fig. 1.2) al Laboratorio del Ciriad del Dipartimento di Ingegneria Industriale è il modello Cary 2300 della Varian; si tratta di uno strumento fisso, che lavora nel campo di lunghezze d'onda compreso tra 185 e 3152 nm (UV, VIS, NIR). Lo strumento è uno spettrofotometro ad assorbimento; per assorbimento si intende la rimozione selettiva della radiazione in alcuni intervalli di frequenza ad opera di una sostanza.



Fig. 1.2: Spettrofotometro Cary 2300

I componenti principali sono:

- 2 sorgenti luminose;
- 2 sensori;
- 1 monocromatore a reticolo;
- 2 celle gemelle, una portacampione, una per ospitare il riferimento;
- pannello di controllo.

Sorgenti luminose

Per coprire l'intero intervallo di lunghezze d'onda menzionato lo strumento è dotato di due sorgenti di radiazione, in grado di lavorare in maniera ottimale solo in un preciso intervallo di lunghezze d'onda. Lo strumento seleziona automaticamente la lunghezza d'onda a cui cambiare la lampada.

Le due lampade sono:

- lampada al deuterio per l'ultravioletto, nell'intervallo 185 nm – 340 nm;
- lampada al tungsteno/alogeno per il visibile e l'ultravioletto, nell'intervallo 340 nm – 3152 nm.

Sensori

I due sensori sono costituiti da:

- un tubo fotomoltiplicatore per il visibile e l'ultravioletto, nell'intervallo 185 nm – 800 nm;
- un sensore al solfuro di piombo per l'infrarosso, nell'intervallo 800 nm - 3152 nm.

Entrambi sono rivelatori sensibili ai fotoni ma appartengono a due categorie diverse. Il primo è un tubo fotomoltiplicatore in cui la radiazione assorbita causa l'emissione di elettroni e la produzione di una fotocorrente; il secondo appartiene alla categoria dei rivelatori a fotoconducibilità, in cui la radiazione promuove gli elettroni a livelli energetici superiori e la rivelazione è basata sull'aumento di conduzione.

Monocromatore

Il selettore di lunghezza d'onda è un monocromatore a reticolo, che, partendo da una sorgente di radiazione policromatica, consente di ottenere un fascio di radiazione monocromatica e parallela: in teoria una radiazione composta da una sola lunghezza d'onda.

Cella portacampione e per il riferimento

Lo strumento è inoltre dotato di due celle gemelle, delle dimensioni di 390 × 200 × 160 mm, una destinata al campione, l'altra al materiale che si utilizza come riferimento, generalmente aria; le due celle sono affiancate e poste nella parte laterale destra dello strumento. La cella del campione contiene una torretta su cui viene fissato il materiale da analizzare; la struttura è tale che la radiazione incida perpendicolarmente il campione. Le due pareti della cella allineate alla torretta presentano due aperture, una da cui fuoriesce il raggio, l'altra che raccoglie la radiazione uscente dal campione e la invia al sensore.

Pannello di controllo

Sulla parte frontale dello strumento è posizionato un pannello di controllo per mezzo del quale si può intervenire per variare alcuni parametri di misura.

I parametri che caratterizzano la misura possono essere impostati anche attraverso un terminale collegato allo spettrofotometro; dal terminale si possono effettuare tutte le operazioni tranne le procedure iniziali per l'accensione e la preparazione dello strumento.

1.2.2 Principio di funzionamento

Lo spettrofotometro Cary 2300 è del tipo a doppia dispersione e a doppio raggio; per meglio specificare il significato di tali definizioni si consideri il percorso che il raggio compie all'interno dello strumento, secondo lo schema di figura 1.3.

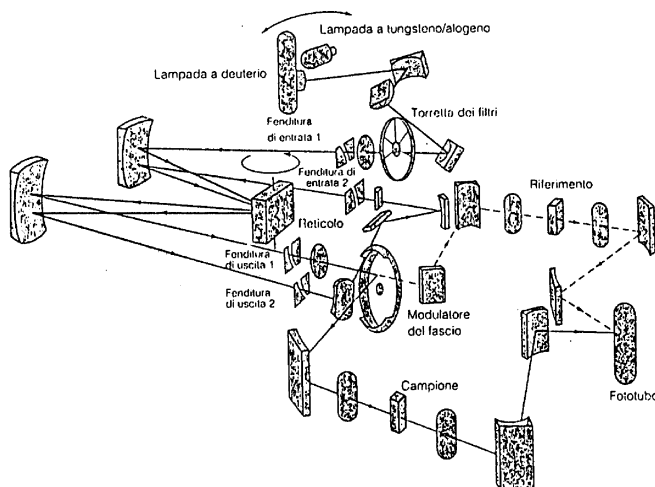


Fig. 1.3: Spettrofotometro a doppia dispersione e a doppio raggio

Il raggio emesso dalla sorgente viene diffratto da un monocromatore a reticolo, che ha lo scopo di effettuare la scansione dello spettro nell'intervallo di lunghezze d'onda considerato; da qui attraversa in successione le fenditure 1 e 2, ed infine viene suddiviso in due parti da una serie di collettori ottici. Tale configurazione, detta a doppia dispersione, offre il vantaggio di ridurre le radiazioni parassite ed aumentare la risoluzione spettrale.

Rispetto alla configurazione tradizionale degli strumenti a doppia dispersione, in cui sono presenti due monocromatori in serie, la Varian ha brevettato un sistema che ne utilizza uno soltanto, come nel caso del Cary 2300.

Il fascio viene successivamente suddiviso in due: uno va a colpire il campione, l'altro passa attraverso una sostanza di riferimento che generalmente è aria.

Infine la parte di raggio che ha attraversato la cella del campione, giunge al sensore il cui segnale viene letto ed elaborato in relazione a quello della cella di

riferimento; lo strumento non va quindi a misurare in maniera assoluta le proprietà ottiche del materiale in esame, ma semplicemente le analizza e le rapporta alla sostanza di riferimento.

Il modo con cui viene realizzata la misura spiega il motivo della presenza di due celle portacampione identiche, in modo tale che sia del tutto indifferente posizionare il campione nell'una o nell'altra dopo aver impostato la strumento.

1.2.3 Metodologia di misura

Lo strumento, dopo l'accensione, esegue una serie di autotest per verificare la funzionalità dei suoi componenti; una volta che i tests sono stati superati, è possibile accedere a tre diverse modalità di misurazione:

- la scansione manuale, con la quale è possibile controllare manualmente una misura a scansione di lunghezza d'onda;
- il metodo rapido, che consente di procedere velocemente con il minimo numero di dati in input necessari; tale metodo è adottabile soltanto per le misurazioni che non coinvolgono lunghezze d'onda superiori ai 900 nm;
- il metodo avanzato, che permette di eseguire misure sull'intero range di lunghezze d'onda e di intervenire su alcuni parametri dello strumento.

Il metodo avanzato, che offre molteplici possibilità di azione, permette di agire su tutti i parametri presenti nei menù di seguito elencati:

- menù dei parametri dello strumento: consiste in un elenco di 11 parametri cui è possibile assegnare il valore voluto attraverso il pannello di controllo;
- menù dei componenti sorgente e sensore: consente di esercitare un controllo sulla sorgente luminosa e sul sensore che ha il compito di rilevare la radiazione passata attraverso il campione durante la misurazione;
- menù dei parametri degli accessori: consente di attivare o disattivare i vari accessori che lo strumento possiede e che sono installati su di esso;
- menù delle modalità di calcolo: consente di accedere direttamente alle possibilità di calcolo che lo strumento offre (concentrazione; cinetica delle reazioni; statistica);
- menù delle operazioni automatiche: consente di preprogrammare lo spettrofotometro per ripetizioni automatiche delle misurazioni.

I principali parametri di ottimizzazione della misura sono descritti nel dettaglio nel paragrafo 1.2.4.

1.2.4 Parametri di ottimizzazione dello strumento

Alcuni parametri presenti nei menù sopracitati sono utili per un uso più efficace dello spettrofotometro Cary 2300; i principali sono:

- larghezza di banda spettrale (SBW): è un termine identificativo della sensibilità totale dello strumento; il suo significato è strettamente legato a quello di risoluzione dello strumento. Si definisce risoluzione di uno strumento la minima variazione in ingresso che lo strumento è in grado di misurare; il legame esistente tra questo parametro e quello della larghezza di banda è che quanto più stretta è la banda tanto più preciso sarà lo spettro da valutare. Quindi, nell'effettuare misure per tracciare lo spettro dell'assorbanza, o del coefficiente di trasmissione, si ha la necessità di definire una larghezza di banda spettrale (SBW) sufficiente a "risolvere" tutte le bande di assorbimento che compongono lo spettro del campione analizzato. Un valore di SBW adeguato a garantire tutto ciò è quello pari ad 1/10 della larghezza della più stretta banda di assorbimento, valutato in corrispondenza della metà del suo picco massimo (larghezza di banda naturale). Si precisa inoltre che ogni qualvolta si assegna un valore alla SBW è necessario effettuare una scelta di compromesso tra due opposte esigenze: la sensibilità dello strumento, da un lato, e la sua risoluzione dall'altro; una buona ripetibilità si ha infatti per larghezze di banda ristrette, ma per quanto indicato in precedenza assegnare elevati valori alla SBW favorisce la sensibilità;

- tempo di risposta (RESPONSE TIME): è il ritardo con cui il monitor visualizza la risposta e rappresenta il tempo necessario allo strumento per filtrare (in maniera digitale) il segnale, allo scopo di ridurre il livello di rumore in esso presente ed ottenere un elevato rapporto segnale-rumore. Generalmente il valore che si assegna è il frutto del compromesso tra due opposte esigenze: da un lato un alto tempo di risposta consente allo strumento di restituire un segnale depurato di gran parte del rumore presente, dall'altro comporta una maggiore lentezza nella presentazione del segnale stesso. Altro aspetto importante da considerare è che un valore troppo elevato può generare delle discontinuità nella risposta, sia all'inizio della scansione che ad ogni cambio della sorgente durante questa ultima;

- SCAN RATE: è il passo di scansione quando l'ascissa è la lunghezza d'onda; anche in questo caso occorre valutare molto bene la scelta del valore numerico da attribuire: più lo scan rate è alto e più rapida è la misura, ma ciò ha un limite perché, per valori eccessivi dello scan rate lo spettro registrato potrebbe risultare distorto rispetto alla forma del picco ed alla posizione;

- bilanciamento automatico: attiva un processo elettronico che calcola e registra nella memoria dello strumento un fattore di correzione da usare come riferimento ad una data lunghezza d'onda, per riportare al 100% il valore della trasmittanza percentuale, o a 0 quello dell'assorbanza, prima di ogni misura. Particolare attenzione va posta sul fatto che il bilanciamento genera un termine di riferimento specifico per una data lunghezza d'onda, perché ciò significa che l'intero procedimento dipende strettamente da essa.

1.2.5 Procedura di baseline

La procedura di baseline permette di tarare lo strumento rispetto alle condizioni ambientali; le proprietà ottiche di un materiale sono infatti funzione anche della temperatura e soprattutto dell'umidità relativa dell'ambiente in cui si svolge la misura.

La baseline consiste semplicemente in una prova di misura senza posizionare il campione sulla torretta; il raggio, nell'attraversamento delle due celle, incontra soltanto l'aria che rappresenta anche il materiale di riferimento utilizzato durante le prove.

Con tale procedura si registrano quindi le condizioni ambientali, o meglio le proprietà di trasmissione del materiale di riferimento (in questo caso aria) nelle condizioni termogravimetriche esistenti. Poiché i parametri ambientali possono variare di volta in volta, è necessario eseguire la baseline ogni volta che si accende lo strumento e quando si variano i parametri con cui si procede alle prove di misura.

1.3 Costruzione e messa a punto di un accessorio per misure di incidenza non normale: il goniometro

La normativa che si occupa della caratterizzazione dei vetri impone che il fascio incida perpendicolarmente sul campione; tuttavia, al fine di caratterizzare in modo più completo il materiale da esaminare, è interessante valutarne il comportamento anche nel caso di incidenze non normali.

A tal fine presso il Laboratorio è stato progettato e realizzato un apposito supporto per lo strumento, dotato di alloggiamenti su cui disporre due campioni perfettamente uguali dello stesso materiale (figura 1.4).

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 sono uguali in modulo, ma con direzioni contrarie, cosicché il fascio luminoso giunge al sensore indisturbato.

Nel caso in cui si impiega il goniometro, il risultato fornito dallo strumento non è direttamente la trasmittanza del materiale, ma è la quantità di energia che giunge al sensore dopo aver attraversato i due campioni. Per determinare la relazione che lega la trasmittanza alla misura con il goniometro ci si può basare su considerazioni teoriche riguardanti il bilancio energetico di ciascun campione (Fig. 1.5); per validare le ipotesi fatte ci si avvale inoltre di una serie di prove sperimentali.

L'analisi ha preceduto la costruzione del goniometro ed è stata elaborata effettuando misure con angolo di incidenza normale.

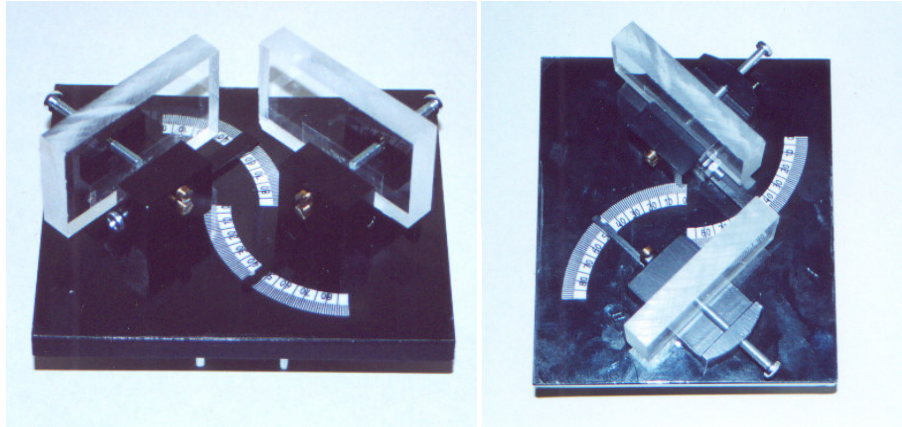


Fig. 1.4: Immagine del goniometro e della disposizione dei campioni

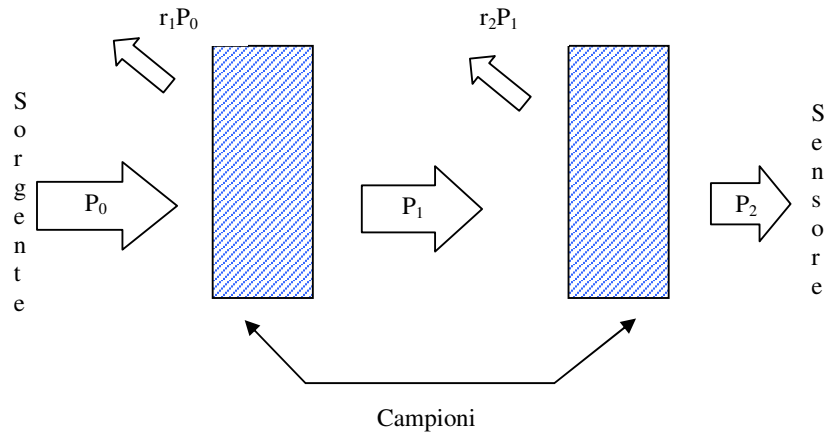


Fig. 1.5: Bilancio energetico dei campioni

Si indichi con:

P_0 = potenza emessa dalla sorgente;

P_1 = quota parte della potenza P_0 che attraversa il primo campione;

P_2 = potenza che giunge al sensore dopo aver attraversato i due campioni.

Le quantità P_0 e P_2 sono note, mentre la potenza P_1 è incognita.

Secondo la disposizione dei campioni di figura 1.4, lo strumento fornisce come uscita la quantità:

$$t_{strum} = \frac{P_2}{P_0} \quad (1.1)$$

Per il primo campione la trasmittanza può essere espressa come:

$$t_1 = \frac{P_1}{P_0} \quad (1.2)$$

Poiché i campioni sono identici, deve essere verificata l'uguaglianza:

$$t_1 = t_2 = t_{camp} \quad (1.3)$$

da cui si ricava che:

$$P_2 = \frac{P_1^2}{P_0} \quad (1.4)$$

Sostituendo nella (1.3) si ottiene che:

$$t_{strum} = \frac{P_2}{P_0} = \frac{P_1^2}{P_0^2} = t_1^2 = t_{camp}^2 \quad (1.5)$$
$$\Rightarrow t_{camp} = \sqrt{t_{strum}}$$

1.4 La sfera integratrice

La funzione della sfera integratrice (Fig. 1.6) è valutare lo spettro di un materiale diffondente, sia nel caso di trasmissione che di riflessione.

Attraverso l'impiego di alcuni specchi, il raggio di luce arriva dal monocromatore al campione posizionato nella parte anteriore o posteriore della sfera (Fig.1.7). Il fascio colpisce lo specchio M1 il quale ne riduce le dimensioni e lo indirizza verso M2; successivamente, il raggio raggiunge la porta di ingresso della sfera P1 con un angolo di $3^\circ 20'$. La lente L1 più lontana mantiene la direzione del raggio senza deviarlo ed è leggermente ruotata per impedire che il raggio riflesso specularmente dal campione posizionato in P2 possa ritornare su di esso. Il raggio riflesso colpisce la superficie interna della sfera che è ricoperta da un materiale altamente riflettente e diffondente (solfato di bario); si ottengono così delle riflessioni multiple e ogni punto della sfera (in particolare la regione occupata dal rilevatore) è illuminato con un'intensità proporzionale al fascio riflesso dal campione. Il rivelatore deve misurare l'illuminamento indiretto



Fig. 1.6: Sfera integratrice

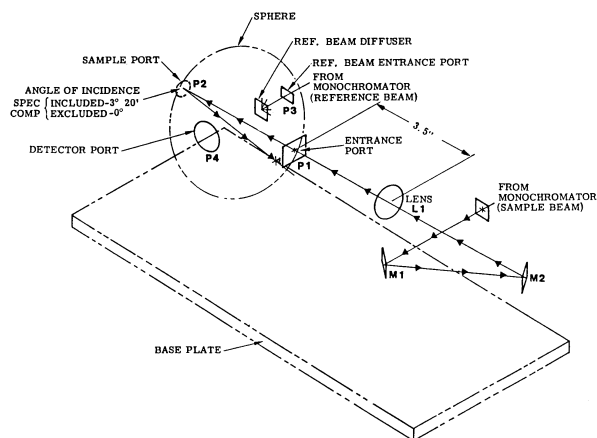


Fig. 1.7: Schema di funzionamento della sfera integratrice

dovuto alle riflessioni multiple; schermi inseriti in modo opportuno all'interno della sfera integratrice impediscono al fascio riflesso proveniente direttamente dal campione di perturbare la misura eseguita dal rivelatore. Il raggio di riferimento entra invece nella sfera attraverso la porta P3 e colpisce anch'esso una piccola zona ricoperta da uno strato di solfato di bario. Il fotomoltiplicatore e il rivelatore di solfuro di piombo rivolti verso l'interno sono montati sulla testa della sfera illuminata, alternativamente, dal raggio proveniente dal campione e dal raggio di

riferimento; grazie all'uso del sistema a doppio raggio, gli errori di misura dovuti alla cattiva geometria della sfera (porte di dimensioni finite, planarità dei campioni, presenza di schermi, ecc.) sono parzialmente ridotti.

Sulla sfera integratrice è possibile posizionare il campione in funzione del tipo di misurazione: nel caso di riflessione, esso viene immobilizzato da un morsetto collegato alla sfera, posto sulla porta P2; nel caso di trasmissione il provino, bloccato come sopra, si trova in P1.

Il coperchio della sfera ha due posizioni specifiche, D e S: quando è orientato in modo tale che la D sia vista dall'alto, la componente speculare della radiazione riflessa dal campione è esclusa dalla luce che giunge al rivelatore. In tal caso, l'angolo d'incidenza tra il raggio e la normale alla superficie del campione è di 90° ; il sistema misura così soltanto riflessione diffusa. Quando invece il coperchio della sfera è orientato sulla S, la componente speculare è inclusa nella misurazione; in questo caso l'angolo di incidenza è di $3^\circ 20'$.

La procedura di installazione prevede il posizionamento della sfera all'interno del vano portacampione dello spettrofotometro. Viene poi eseguita la procedura di baseline facendo attenzione a chiudere la porta P2 con un tappo rivestito di colore bianco, come tutta la parte interna della sfera.

CAPITOLO 2

DESCRIZIONE E MESSA A PUNTO DELLA STRUMENTAZIONE SPETTROFOTOMETRICA PORTATILE E DEI RELATIVI ACCESSORI

2.1 Spettrofotometro portatile S 2000

2.1.1 Componenti principali

Lo spettrofotometro portatile S 2000, prodotto dalla ditta Ocean Optics, è costituito dai seguenti componenti (Fig. 2.1):

- sorgente;
- spettrofotometro;
- fibre ottiche;
- lenti;
- personal computer.

Lo strumento consente di effettuare misure di riflessione e trasmissione nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 300 nm e 1015 nm, comprendendo così tutto il campo del visibile e una piccola parte del vicino infrarosso ed ultravioletto.

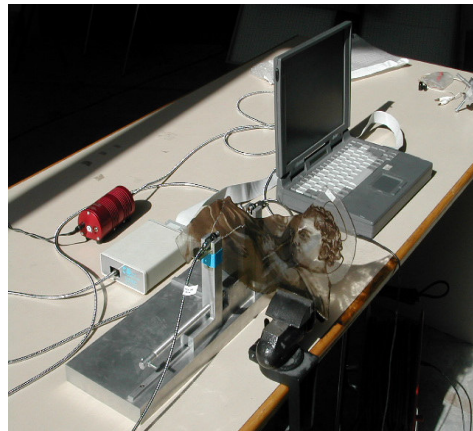


Fig. 2.1: Spettrofotometro portatile S 2000

La sorgente HL-2000 è costituita da una lampada alogena al tungsteno; la caratteristica principale di questo tipo di lampada è di essere una sorgente “continua”, cioè in grado di emettere radiazioni la cui intensità varia lentamente con la lunghezza d’onda.

L’intervallo di lunghezze d’onda coperto dalla lampada in esame va da 360 a 1100 nm e quindi il campo di applicazione è ristretto essenzialmente al visibile e al vicino infrarosso.

Come si può notare, il range di funzionamento della sorgente non è perfettamente sovrapponibile a quello dello spettrofotometro e questo condurrà a degli inevitabili errori nelle rilevazioni per lunghezze d’onda comprese tra i 300 ed i 360 nm.

La trasmissione e la riflessione sono calcolate in modo relativo, al fine di eliminare l’errore dovuto alle condizioni ambientali di illuminamento; si utilizzano pertanto misure che costituiscono due riferimenti, un BIANCO e un NERO. Il BIANCO rappresenta la massima potenza che arriva al ricevitore e si ottiene semplicemente accendendo la sorgente in assenza del campione; tale quantità è circa pari a quella emessa dalla sorgente, a cui si somma la radiazione diffusa dell’ambiente. Sempre in assenza del campione si ricava il secondo riferimento, il NERO, spegnendo la sorgente: in tal modo al sensore giunge solo la radiazione presente in ambiente.

La misura è relativa perché si ricava da questi due riferimenti sottraendo la potenza associata al NERO da quella associata al BIANCO; si perde pertanto la dipendenza dalle condizioni di illuminamento esterno, se naturalmente queste rimangono inalterate durante il tempo della misura.

Le fibre ottiche sono filamenti di silice fusa e sono in grado di trasportare piccole potenze luminose a grandi distanze, da un capo all’altro della fibra. La trasmissione della luce attraverso la fibra ha luogo grazie alla trasmissione interna totale.

Per capirne meglio il principio di funzionamento, si prenda in considerazione la figura 2.2, dove è schematizzata la sezione di una fibra ottica formata da due materiali diversi, che costituiscono rispettivamente l’anima ed il rivestimento.

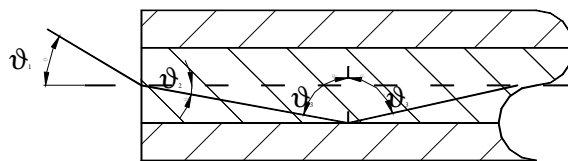


Fig. 2.2: Percorso del fascio di radiazione all’interno di una generica fibra ottica

La radiazione incidente viene rifratta dall'anima della fibra secondo la legge di Snell e penetra all'interno; affinché il raggio possa proseguire il suo cammino è necessario che ci sia riflessione totale e questo è possibile solo se il materiale di rivestimento ha un indice di rifrazione inferiore a quello dell'anima; se questa condizione è verificata, dopo infinite riflessioni, il fascio fuoriesce all'altro estremo della fibra. Oltre alla necessità di avere la riflessione totale, va fatta attenzione all'angolo ϑ_3 in quanto se il suo valore è troppo piccolo non si ha riflessione, il fascio viene trasmesso e quindi disperso all'esterno. Per ovviare a questo inconveniente e garantire sempre valori elevati di ϑ_3 , il diametro della fibra viene mantenuto piccolo.

Lo spettrofotometro presenta due diverse configurazioni, a seconda che si debba eseguire una misura di trasmissione o di riflessione, come mostrato nella figura 2.3.

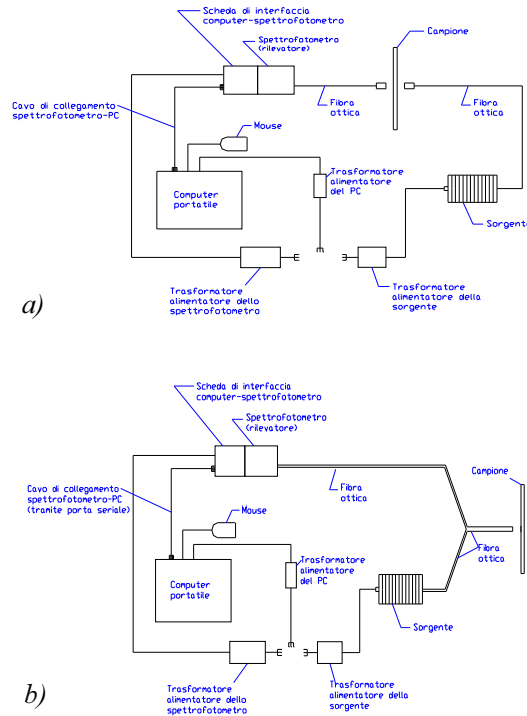


Fig. 2.3: a) configurazione per misure di trasmissione;
b) configurazione per misure di riflessione.

Nel caso di misure di trasmissione sono necessarie due fibre ottiche, perfettamente uguali, da collegare rispettivamente allo spettrofotometro e alla sorgente; alle due estremità libere sono avvitate due lenti ottiche tra le quali deve essere posizionato il campione. La radiazione emessa dalla sorgente attraversa il campione, viene raccolta e inviata attraverso la fibra ottica allo spettrofotometro.

Nel caso di misure di riflessione, invece, si utilizza una unica fibra ottica che indirizza la radiazione emessa dalla sorgente al campione e successivamente riceve la quota parte di energia che è stata riflessa dal campione stesso per inviarla allo spettrofotometro. In questo caso la lente viene posta direttamente a contatto con il campione.

I risultati così ottenuti sono poi visualizzati su un personal computer collegato allo strumento.

2.1.2 Metodologia di misura

Come già spiegato in precedenza, lo strumento è in grado di misurare diverse grandezze in base al tipo di fibra ottica montata ed alla modalità di funzionamento scelta tramite il software; è inoltre in grado di determinare il colore di un oggetto facendo uso delle coordinate tricromatiche dello spazio CIELAB.

Una volta avviato il programma di controllo dello spettrofotometro, si procede all'assegnazione del nome all'esperimento.

Prima di iniziare la misura, è necessario tarare lo strumento rispetto alle condizioni di illuminamento, memorizzando i due riferimenti BIANCO e NERO. Per fare ciò si accende la sorgente dello strumento senza che sia presente il campione, sul monitor del PC appare una curva spettrale rappresentante la quantità di radiazione che giunge al ricevitore; se lo strumento va in saturazione, cioè se l'eccessiva potenza della radiazione della sorgente o particolari condizioni ambientali rendono impossibile la misura, allora è possibile utilizzare degli appositi filtri (che non sono in dotazione allo strumento) o semplicemente aumentare la distanza sorgente-sensore. Esiste anche la possibilità che al sensore non arrivi abbastanza potenza da dare un segnale di uscita: in questo caso è necessario avvicinare il sensore alla sorgente.

Una volta che sullo schermo è stato visualizzato uno spettro idoneo, questo può essere salvato come riferimento BIANCO per il calcolo della trasmittanza.

Come riferimento NERO è invece sufficiente spegnere la sorgente mantenendo inalterata la posizione reciproca sorgente-fibra ottica, in modo che al sensore arrivi solo la radiazione esterna.

Una volta memorizzati i due riferimenti, lo strumento è in grado di fornire il valore della trasmittanza di un qualsiasi campione che venga inserito tra la sorgente e il sensore; infatti, non appena ciò accade, sullo schermo compare una

curva spettrale rappresentante la quota parte della radiazione emessa dalla sorgente che è riuscita ad attraversare il campione.

Il valore della trasmittanza per ogni fissata lunghezza d'onda è calcolato secondo la seguente relazione:

$$T(\lambda)\% = \frac{(campione(\lambda) - NERO(\lambda))}{(BIANCO(\lambda) - NERO(\lambda))} \times 100 \quad (2.1)$$

dove:

λ = lunghezza d'onda;

campione = valore dello spettro del campione alla λ fissata;

BIANCO = valore dello spettro del riferimento BIANCO alla λ fissata;

NERO = valore dello spettro del NERO alla λ fissata.

Il procedimento di misura del coefficiente spettrale di riflessione è analogo al precedente; il riferimento BIANCO è però preso sulla superficie su cui appoggerà il campione, mentre la memorizzazione del NERO si esegue come prima, spegnendo semplicemente la sorgente.

Anche in questo caso può accadere che i valori del riferimento siano troppo alti e quindi tali da saturare la fibra ottica che non riesce ad inviare alcun segnale allo spettrofotometro; per ovviare a questo inconveniente, non avendo a disposizione dei filtri, si allontana la fibra dal campione.

Anche il calcolo della riflettanza è svolto in maniera relativa, secondo la seguente relazione:

$$R(\lambda)\% = \frac{(campione(\lambda) - NERO(\lambda))}{(BIANCO(\lambda) - NERO(\lambda))} \times 100 \quad (2.2)$$

in cui compaiono le stesse grandezze già precedentemente descritte.

2.2 Costruzione e messa a punto di un accessorio per il posizionamento del campione

Lo spettrofotometro portatile S 2000 è dotato di un apposito supporto dove è possibile alloggiare la sonda della fibra ottica per misure di riflessione, mentre non sono disponibili supporti adatti alle lenti per le misure di trasmissione.

Per rendere più ampio il campo di misure realizzabili con questo strumento ed effettuare così anche valutazioni della trasmissione, si è pensato di progettare e costruire due sistemi sui quali collocare le due lenti (figg. 2.4 e 2.5).

La base dell'intero accessorio è la *piastra* di dimensioni $510 \times 150 \times 25$ mm sulla quale sono stati ricavati 8 fori passanti e filettati per il fissaggio dei *binari A e B* e dell'*appoggio*. Lungo i *binari* scorrono sia i due *supporti* sia la *colonnina* destinata ad accogliere il portacampione.

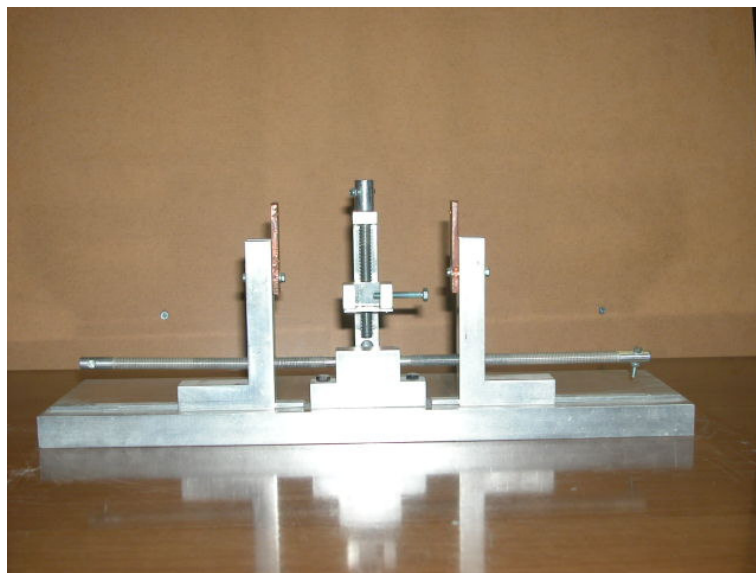


Fig. 2.4: Supporto n.1 per il posizionamento del campione

I *binari* sono di dimensioni $200 \times 10 \times 5$ mm per il *binario A* e $115 \times 10 \times 5$ mm per il *binario B*. Su questi sono ricavati dei fori passanti in cui vengono posizionate delle viti del tipo UNI 6109-67 per il fissaggio alla piastra.

I *binari* sono stati realizzati con una tolleranza piuttosto stretta (G7/h7) che consente agli organi coinvolti di muoversi l'uno rispetto all'altro senza gioco sensibile; questa scelta è stata fatta perché è necessario che i *supporti* e la *colonnina* traslino senza spostarsi lateralmente.

I due *supporti* non sono altro che due componenti a forma di L, con un'altezza complessiva di 135 mm, una lunghezza della base di 75 mm e uno spessore di 25 mm; su di essi sono alloggiati le lenti.

Le lenti e le fibre ottiche sono uguali e possono essere indistintamente collegate allo spettrofotometro o alla sorgente; ciò ha semplificato il progetto dell'accessorio perché è stato possibile realizzare i due supporti in maniera identica.

Sull'ala verticale è ricavato un foro filettato di 10 mm di diametro nel quale è alloggiata la *vite di manovra A* che serve a controllarne la traslazione. Nella parte superiore, invece, è ricavata una scanalatura in corrispondenza della mezzeria nella quale si va ad alloggiare la lente.

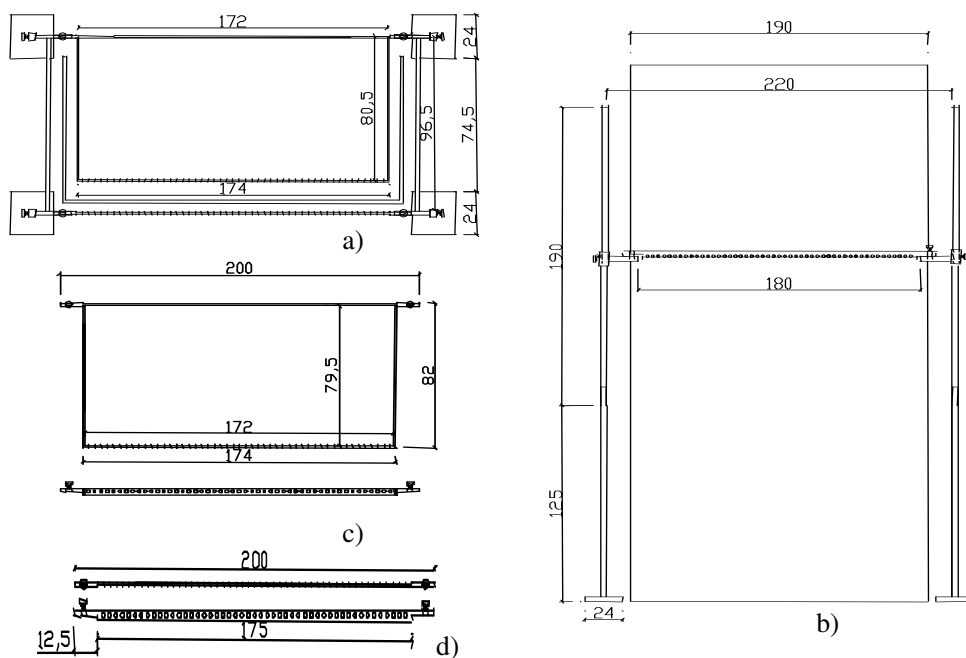


Fig. 2.5: Supporto n.2 per il posizionamento del campione: a) pianta; b) prospetto; c) pianta e prospetto dell'asta orizzontale da posizionare sul fronte dell'accessorio; d) pianta e prospetto dell'asta orizzontale da posizionare sul retro dell'accessorio (quote in cm)

Per evitare che il peso della fibra ottica avvitata alla lente la sposti dalla scanalatura, sulla parte posteriore di ciascun supporto è montata una staffa ad L in grado di sopportare il peso della fibra.

Il *portacampione* vero e proprio è un elemento a forma di U, tale da poter ospitare campioni fino ad uno spessore massimo di 20 mm. La struttura è tale che una faccia del campione poggia proprio su un braccio della U, mentre l'altra è tenuta ferma da una vite. Così facendo il campione risulta essere fissato a sbalzo, perciò esiste la possibilità che tenda a cadere in avanti; per minimizzare questo

problema è applicata una piastrina sulla parte inferiore del portacampione dove appoggia un'altra faccia del campione.

Per come si è progettato il portacampione, è stata rispettata la condizione che le superfici del campione siano perfettamente perpendicolari al fascio luminoso.

Sul *portacampione*, per consentirne lo spostamento verticale, è realizzata una scanalatura che si accoppia con un binario ricavato sulla *colonnina*. Il movimento è controllato dalla vite di manovra B che s'inserisce all'interno di un foro filettato realizzato sul portacampione stesso. Anche per quest'accoppiamento si è scelto una tolleranza del tipo G7/h7.

La *colonnina* ha la struttura a forma di C: lungo il braccio inferiore, per tutta la lunghezza, è realizzata una scanalatura da accoppiare al *binario B* della *piastra*, mentre nella parte superiore, in un foro di 12 mm di diametro, è alloggiata la *vite di manovra C* per controllare il movimento del portacampione.

Tale vite è disposta verticalmente e, per impedire che possa cadere per gravità, il foro in cui viene inserita è realizzato in forma conica. Anche per questo pezzo è necessaria una vite di manovra per garantire il movimento orizzontale e, a tal fine, è realizzato un foro filettato di 10 mm di diametro dove inserire *la vite B*.

Le *viti di manovra A e B* sono del tutto simili e differiscono solo per le dimensioni: entrambe presentano una parte liscia con un foro in cui inserire un perno per facilitare la manovra, una parte filettata ed un'altra parte liscia che va ad inserirsi *nell'appoggio* fissato alla piastra con due viti.

Sull'*appoggio* sono inserite le due *viti di manovra A e B* per fare da punto fisso per poter muovere i diversi pezzi.

La struttura è costituita da quattro montanti verticali identici che fungono da sostegno per due aste orizzontali forate da disporre una sul fronte e una sul retro del pannello, ad una certa distanza da esso e sulle quali alloggiare le lenti dello strumento. Le aste possono traslare verticalmente e, per l'allineamento orizzontale dei fori, esse sono collegate ai bracci tramite dei fori asolati, in modo da permettere la traslazione orizzontale. I fori sulle aste sono realizzati con un interasse di 3,5 cm e sono filettati, per consentire l'avvitamento delle lenti. L'asta orizzontale posteriore presenta una forma ad U e, per limitare l'inflessione verticale che avrebbe compromesso l'allineamento dei fori, è stata costruita in alluminio, mentre i montanti sono stati realizzati in tubolari di acciaio cavo; ciascuna colonna, alta complessivamente 3,5 m, è realizzata in due parti, componibili tra loro con un sistema ad incastro. Infine, durante l'esecuzione delle misure, la messa in piano delle aste orizzontali è stata controllata con l'uso di livelle.

CAPITOLO 3

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

3.1 Introduzione

Le misure condotte fanno riferimento principalmente a due diverse normative:

- UNI 7885: descrizione delle apparecchiature, caratteristiche e preparazione dei campioni;
- UNI EN 410: elaborazione ed analisi dei dati.

3.2 UNI 7885: “Prove sul vetro. Determinazione dei fattori di trasmissione dell’energia solare”

La normativa descrive l’apparecchiatura necessaria alla misura:

- spettrofotometro a funzionamento automatico o manuale, adatto per misure di trasmissione nell’intervallo spettrale da 300 nm a 2150 nm;
- attrezzatura per il taglio del campione;
- attrezzatura per la levigatura e lucidatura del campione nei casi in cui queste operazioni si rendano necessarie;
- micrometro centesimale, che permetta la misura dello spessore con precisione di 5 μm .

Le dimensioni del campione devono essere tali da riempire completamente la finestra portacellette dello strumento.

In tal senso la normativa prescrive, in funzione dello spessore, le tolleranze espresse sotto forma di percentuale dello spessore stesso (tab. 3.1).

Spessore mm	Variazione di spessore %
fino a 2	$\pm 1,5$
oltre 2 fino a 4	$\pm 1,0$
oltre 4 fino a 8	$\pm 0,5$
oltre 8	$\pm 0,3$

Tab. 3.1: Tolleranze dello spessore del campione

Una volta tagliato, il campione deve essere lavato con etanolo e lasciato essiccare, quindi pulito con apposite cartine ottiche. Dopo aver terminato queste

operazioni, il campione deve essere posizionato sulla finestra portacellette in modo che, rispetto ad esso, il fascio luminoso sia perpendicolare.

Per quanto riguarda la modalità di svolgimento della misura si evidenziano differenze in base al tipo di strumento con cui sono effettuate. Se lo strumento è del tipo automatico si effettua semplicemente una misurazione dell'intero spettro di trasmissione da 300 a 2150 nm. Al contrario, se lo spettrofotometro è manuale è necessario eseguire delle misure puntuali in corrispondenza di determinate lunghezze d'onda.

Le misure devono essere, infine, eseguite prendendo come riferimento l'aria.

3.3 UNI EN 410: “Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate”

La norma specifica i metodi per la determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate per edilizia; tali caratteristiche possono costituire una base per considerazioni di tipo illuminotecnico o riguardanti il condizionamento degli ambienti, sono inoltre utili per una comparazione tra differenti tipi di vetrate.

La norma è applicabile alle vetrate convenzionali, alle vetrate assorbenti o riflettenti per il controllo solare, utilizzate come aperture orizzontali o verticali; tale norma può di conseguenza essere applicata a tutti i materiali trasparenti.

Le caratteristiche sono determinate per una radiazione incidente quasi parallela e prossima alla normale e sono:

- il fattore di trasmissione spettrale $\tau(\lambda)$ e di riflessione spettrale $\rho(\lambda)$ nell'intervallo di lunghezze d'onda da 300 a 2500 nm che rappresenta la quantità di radiazione trasmessa dal vetro al variare della lunghezza d'onda;
- il fattore di trasmissione luminosa τ_v e di riflessione luminosa ρ_v per l'illuminante D_{65} che quantificano la radiazione trasmessa e riflessa nell'intervallo di lunghezze d'onda corrispondente al visibile (380 – 780 nm) ;
- il fattore di trasmissione solare diretta τ_c e di riflessione solare diretta ρ_c che quantificano la radiazione trasmessa e riflessa nell'intervallo di lunghezze d'onda corrispondente a 300 – 2500 nm;
- il fattore di trasmissione dell'energia solare totale (fattore solare) g ;
- il fattore di trasmissione di UV τ_{UV} che quantifica la radiazione solare trasmessa nell'intervallo di lunghezze d'onda corrispondente all'ultravioletto;
- l'indice generale di resa dei colori R_a che esprime l'attitudine di una sorgente luminosa a rendere i colori degli oggetti che illumina.

Per la caratterizzazione delle vetrate i parametri principali sono τ_v e g , gli altri forniscono informazioni aggiuntive e pertanto non saranno approfonditi.

Il fattore di trasmissione della luce τ_v di una vetrata è calcolato usando la seguente relazione:

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda=380}^{780} D_\lambda \tau(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{780} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (3.1)$$

dove:

D_λ è la distribuzione spettrale relativa dell'illuminante D_{65} ¹;

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

$V(\lambda)$ è l'efficienza spettrale per una visione fotopica che definisce l'osservatore normalizzato per la fotometria;

$\Delta\lambda$ 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. La tabella è stata ricavata in modo tale che $\sum D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda = 1$ (Tab. 3.2).

Nel caso di vetrate multistrato, i valori di $t(\lambda)$ sono calcolati dai fattori di trasmissione e riflessione di ogni singolo strato.

Per doppi vetri, per esempio, si ha:

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda)}{1 - \rho_1(\lambda) \rho_2(\lambda)} \quad (3.2)$$

dove:

$\tau_1(\lambda)$ è il fattore di trasmissione spettrale della lastra esterna;

$\tau_2(\lambda)$ è il fattore di trasmissione spettrale della seconda lastra;

$\rho_1(\lambda)$ è il fattore di riflessione spettrale della lastra esterna, misurato nella direzione opposta alla radiazione incidente;

$\rho_2(\lambda)$ è il fattore di riflessione spettrale della seconda lastra, misurato nella direzione della radiazione incidente.

Quando si analizzano materiali con luce diffusa è necessario l'uso di una sfera integratrice. In questo caso le dimensioni della sfera devono essere tali da captare tutta la luce diffusa e ottenere proprio i valori medi quando i campi di superficie sono irregolarmente diffusi.

¹ E' un parametro che rappresenta la luce del giorno, con una temperatura di colore prossimale di 5000 K

λ nm	$D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda \cdot 10^2$	λ nm	$D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda \cdot 10^2$	λ nm	$D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda \cdot 10^2$
380	0,0000	520	7,0523	660	0,4612
390	0,0005	530	8,799	670	0,2485
400	0,003	540	9,4427	680	0,1255
410	0,0103	550	9,8077	690	0,0536
420	0,0352	560	9,4306	700	0,0276
430	0,0948	570	8,6891	710	0,0146
440	0,2274	580	7,8894	720	0,0057
450	0,4192	590	6,3306	730	0,0035
460	0,6663	600	5,3542	740	0,0021
470	0,985	610	4,2491	750	0,0008
480	1,5189	620	3,1502	760	0,0001
490	2,1336	630	2,0812	770	0
500	3,3491	640	1,381	780	0
510	5,1393	650	0,807		

Tab. 3.2: Valori di D_λ , $V(\lambda)$ e $\Delta\lambda$ per intervalli di lunghezza d'onda di 10 nm

Il coefficiente di riflessione della luce ρ_v si calcola con la seguente relazione:

$$\rho_v = \frac{\sum_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} D_\lambda \rho(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (3.3)$$

dove D_λ , $V(\lambda)$, $\Delta\lambda$, hanno lo stesso significato e $\rho(\lambda)$ è il fattore di riflessione spettrale del vetro.

Nel caso di vetrate multiple, $\rho(\lambda)$ si calcola dai fattori di riflessione e trasmissione delle singole lastre.

Il fattore di trasmissione totale dell'energia solare g si ricava dalla somma della trasmissione solare diretta τ_v e del fattore di trasferimento secondario di calore q_i del vetro verso l'interno; quest'ultimo si ricava dal trasferimento di calore per convezione e dalla radiazione infrarossa della radiazione incidente totale che è assorbita dal vetro, come descritto nel seguito.

$$g = \tau_v + q_i \quad (3.4)$$

Il flusso radiante incidente è diviso in tre parti:

- una parte trasmessa $\tau_e \phi_e$;
- una parte riflessa $\rho_e \phi_e$;
- una parte assorbita $\alpha_e \phi_e$;

dove:

τ_e è il fattore di trasmissione solare diretto;

ρ_e è il fattore di riflessione solare diretto;

α_e è il fattore di assorbimento solare diretto.

Questi parametri sono tali che:

$$\alpha_e + \tau_e + \rho_e = 1 \quad (3.5)$$

La parte assorbita $\alpha_e \phi_e$ può essere divisa in due parti $q_i \phi_e$ e $q_e \phi_e$ che rappresentano l'energia trasferita, rispettivamente, all'interno e all'esterno:

$$\alpha_e \phi_e = q_i \phi_e + q_e \phi_e \quad (3.6)$$

dove:

q_i è il fattore di trasferimento del calore secondario del vetro verso l'interno;

q_e è il fattore di trasferimento del calore secondario del vetro verso l'esterno.

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

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500} S_\lambda \tau(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500} S_\lambda \Delta\lambda} \quad (3.7)$$

dove:

S_λ è la distribuzione spettrale relativa dell'energia solare (tabulata dalla norma);

$\tau(\lambda)$ è il fattore di trasmissione spettrale del vetro;

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

La norma fornisce i valori di $S_\lambda \Delta\lambda$ in modo tale che $\sum S_\lambda \Delta\lambda = 1$ (Tab. 3.3).

È importante notare che la norma presuppone, per semplicità, che le condizioni atmosferiche (polvericolo, nebbia, contenuto di umidità) non alterino i valori della distribuzione spettrale della radiazione solare. Inoltre, si fa l'ipotesi che la radiazione incida sul vetro perpendicolarmente e con un raggio perfettamente collimato.

λ nm	$S_\lambda \Delta\lambda$	λ nm	$S_\lambda \Delta\lambda$	λ nm	$S_\lambda \Delta\lambda$
300	0,0005	680	0,0246	1450	0,0044
320	0,0069	700	0,0237	1500	0,0095
340	0,0122	720	0,022	1550	0,0123
360	0,0145	740	0,023	1600	0,011
380	0,0177	760	0,0199	1650	0,0106
400	0,0235	780	0,0211	1700	0,0093
420	0,0268	800	0,033	1750	0,0068
440	0,0294	850	0,0453	1800	0,0024
460	0,0343	900	0,0381	1850	0,0005
480	0,0339	950	0,022	1900	0,0002
500	0,0326	1000	0,0329	1950	0,0012
520	0,0318	1050	0,0306	2000	0,003
540	0,0321	1100	0,0185	2050	0,0037
560	0,0312	1150	0,0136	2100	0,0057
580	0,0294	1200	0,021	2200	0,0066
600	0,0289	1250	0,0211	2300	0,006
620	0,0289	1300	0,0166	2400	0,0041
640	0,028	1350	0,0042	2500	0,0006
660	0,0273	1400	0,001		

Tab. 3.3: Valori di S_λ , $V(\lambda)$, e $\Delta\lambda$

Il fattore di riflessione solare diretta ρ_e di un vetro si ottiene dalla seguente formula:

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_\lambda \rho(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_\lambda \Delta\lambda} \quad (3.8)$$

dove:

S_λ è la distribuzione spettrale relativa dell'energia solare (tabulata dalla norma);

$\rho(\lambda)$ è il fattore di riflessione del vetro;

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

Il fattore di assorbimento solare diretto si ricava per differenza da ρ_e e τ_e secondo la relazione (3.5).

Per il calcolo del fattore di trasferimento di calore verso l'interno, q_i , è necessario conoscere il coefficiente di trasferimento del vetro verso l'esterno h_e e verso l'interno h_i . Queste grandezze sono funzione dell'inclinazione del vetro, della velocità del vento, della temperatura interna ed esterna ed inoltre della temperatura esterna del vetro.

Per questo motivo la normativa specifica le condizioni standard a cui effettuare la misura:

- a) vetro verticale;
- b) superficie esterna: velocità del vento di 4 m/s; emissività corretta 0,837;
- c) superficie interna: emissività non necessaria; convezione naturale;
- d) assenza di ventilazione.

In base a tali condizioni i valori normali di h_e e h_i sono:

$$h_e = 23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$h_i = 3,6 + \frac{4,4\epsilon_i}{0,837} \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

dove ϵ_i è l'emissività corretta della superficie interna.

Per vetrate calcaree non ricoperte di soda e per vetri borosilicati, si ha che $\epsilon_i = 0,837$ per cui $h_i = 8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

NOTA: valori più bassi di 0,837 per ϵ_i (dovuto ad un rivestimento superficiale con più alta riflettanza nel lontano infrarosso) sono presi in considerazione solo se la condensa sulle superfici rivestite può essere esclusa.

Di seguito è riportato il calcolo del fattore di trasferimento del calore verso l'interno per varie tipologie di vetro.

- **Vetro singolo**

Si considera la formula seguente:

$$q_i = \alpha_e \frac{h_i}{h_e + h_i} \quad (3.9)$$

dove α_e è il fattore di assorbimento diretto solare calcolato precedentemente e h_i e h_e sono i coefficienti di trasferimento di calore, rispettivamente, verso l'interno e l'esterno.

- **Vetro doppio**

Il fattore di trasferimento di calore di un doppio vetro si calcola dalla seguente formula:

$$q_i = \frac{\left(\frac{\alpha_{e1} + \alpha_{e2}}{h_e} + \frac{\alpha_{e2}}{\Lambda} \right)}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{\Lambda} \right)} \quad (3.10)$$

dove:

h_i e h_e sono i coefficienti di trasferimento di calore, rispettivamente, verso l'interno e l'esterno;

α_{e1} è il fattore di assorbimento diretto della lastra esterna;

α_{e2} è il fattore di assorbimento diretto della lastra interna;

Λ è la conducibilità termica tra la superficie esterna ed interna del doppio vetro.

In particolare α_{e1} e α_{e2} si calcolano con le seguenti formule:

$$\alpha_{e1} = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{2500nm} S_{\lambda} \left\{ \alpha_1(\lambda) + \frac{\alpha_1'(\lambda)\tau_1(\lambda)\rho_2(\lambda)}{1 - \rho_1'(\lambda)\rho_2(\lambda)} \right\} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{2500nm} S_{\lambda} \Delta\lambda} \quad (3.11)$$

$$\alpha_{e2} = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{2500nm} S_{\lambda} \left\{ \frac{\alpha_2(\lambda)\tau_1(\lambda)}{1 - \rho_1'(\lambda)\rho_2(\lambda)} \right\} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{2500nm} S_{\lambda} \Delta\lambda} \quad (3.12)$$

dove:

$\alpha_1(\lambda)$ è il fattore di assorbimento spettrale diretto della lastra esterna, misurata in direzione della radiazione incidente, ricavata da:

$$\alpha_1(\lambda) = 1 - \tau_1(\lambda) - \rho_1(\lambda) \quad (3.13)$$

$\alpha_1'(\lambda)$ è il fattore di assorbimento spettrale della lastra esterna misurata in direzione opposta alla radiazione incidente, ricavata da:

$$\alpha_1'(\lambda) = 1 - \tau_1'(\lambda) - \rho_1'(\lambda) \quad (3.14)$$

$\alpha_2(\lambda)$ è il fattore di assorbimento spettrale diretto della lastra interna, misurata in direzione della radiazione incidente, ricavata da:

$$\alpha_2(\lambda) = 1 - \tau_2(\lambda) - \rho_2(\lambda) \quad (3.15)$$

S_{λ} , $\Delta\lambda$, $\tau_1(\lambda)$, e $\rho_1'(\lambda)$ hanno lo stesso significato.

CAPITOLO 4

MISURE E CALCOLO DELLE PRESTAZIONI DI MATERIALI TRASPARENTI DI IMPIEGO CORRENTE

4.1 Il vetro e le sue proprietà ottiche

Il vetro si ottiene tramite la fusione della silice sotto forma di sabbia, insieme ad un alcalo che può essere la soda o la potassa; inizialmente veniva lavorato direttamente per pressatura della pasta vitrea dentro gli stampi e in un secondo momento, a partire dal I secolo d.C., la tecnica di produzione divenne quella del vetro soffiato e poi ricotto in appositi forni.

Il vetro ha una struttura amorfa e isotropa che, col tempo, può divenire cristallina, in seguito ad un processo denominato “vetrificazione”.

Le caratteristiche di questo materiale variano in base alla percentuale con cui le componenti silicee si combinano con le sostanze fondenti e stabilizzanti (ossido di calcio e ossido di piombo), gli opacizzanti (anidride fosforica o biossido di stagno o ossido di zinco) e i coloranti (ossidi diversi).

Si possono individuare due principali categorie di vetri, quelli tradizionali e quelli di nuova concezione.

I vetri tradizionali sono quelli di maggior impiego e diffusione, che non sono caratterizzati da particolari proprietà; quelli di nuova concezione sono destinati ad applicazioni speciali in quanto la composizione chimica che li caratterizza conferisce loro proprietà peculiari.

Le proprietà ottiche dei vetri sono quelle direttamente coinvolte negli studi spettrofotometrici e quindi di maggior interesse ai fini della seguente trattazione.

La più importante proprietà ottica è la trasparenza nei confronti della luce, cioè la capacità di trasmettere le radiazioni visibili nell'intervallo di lunghezze d'onda 380 – 780 nm; la frazione della radiazione incidente che un vetro è in grado di trasmettere dipende dalle sue caratteristiche fisiche ed anche dalle sue capacità riflettenti ed assorbenti.

Dal punto di vista fisico, per garantire un'adeguata trasparenza un vetro deve essere omogeneo, cioè non deve contenere particelle di composizione diversa da quella della matrice costituente. Infatti, se la radiazione colpisse questi elementi sarebbe dispersa e il vetro perderebbe di trasparenza diventando opaco; se, invece, le particelle in questione fossero poche e il vetro fosse sottile, diventerebbe traslucido.

Generalmente l'opacizzazione di un vetro si consegue introducendo sostanze finemente disperse, che risultano insolubili nel vetro fuso, o che

divengono tali nel corso del raffreddamento, dando origine a particelle microcristalline; il caso più comune si ha con i vetri al fluoro, in cui l'opacità è dovuta a microcristalli di fluoruro di calcio CaF_2 o di fluoruro di sodio NaF (altri agenti opacizzanti sono il biossido di titanio TiO_2 , di zirconio ZrO_2 e di stagno SnO_2).

Se il vetro contiene particelle particolari, l'assorbimento può essere selettivo nei confronti della radiazione a determinate lunghezze d'onda: la presenza di ioni di metalli di transizione (Fe, Co, Ni, Cu, V, Cr, Mn) rende il vetro colorato e fa sì che l'assorbimento riguardi le lunghezze d'onda corrispondenti al colore complementare a quello ottenuto. Nella tabella 4.1 si riportano i colori corrispondenti ai vari elementi che un vetro può contenere.

ELEMENTO CHIMICO	COLORE
Titanio	giallo
Vanadio	verde
Cromo	verde
Manganese	viola
Ferro	giallo-verde/blu-verde
Cobalto	blu
Nichel	giallo-marrone/viola
Rame	verde/blu
Cerio	Giallo/marrone
Praseodimio	verde
Neodimio	viola-rosso/blu
Samario	giallo pallido
Europio	giallo scuro
Terbio	giallo molto pallido
Olmio	color pesca
Erbio	rosa
Tulio	verde

Tab. 4.1: *Corrispondenza tra elementi chimici contenuti nel vetro e colori cui essi danno origine*

Quando la radiazione incide sul materiale, in parte viene assorbita, in parte riflessa ed in parte trasmessa, perciò anche la riflessione contribuisce alla diminuzione dell'entità della radiazione trasmessa dal vetro; per applicazioni specifiche è auspicabile ottenere un elevato valore della riflessione e si parla allora di vetri riflettenti o semiriflettenti.

Altre importanti proprietà ottiche sono la rifrazione della luce e il fenomeno della dispersione; la rifrazione consiste in un cambiamento di direzione di propagazione della radiazione a causa del passaggio attraverso due mezzi diversi, nel caso in esame nel passaggio dall'aria al vetro. La dispersione è legata al concetto di indice di rifrazione poiché misura la sua variazione con la lunghezza d'onda della radiazione.

4.2 Il vetro nell'edilizia

Ormai da molti anni si è diffuso l'impiego di ampie vetrate negli edifici o addirittura di intere facciate ricoperte di vetro; lo sviluppo di questa "architettura di cristallo" è stato favorito o, più ancora, reso possibile dai progressi tecnologici che già negli anni Settanta portarono alla diffusione delle vetrate isolanti, meglio conosciute come vetrocamera, e allo sviluppo di vetri variamente trattati per conseguire un basso fattore solare.

Molto spesso gli edifici così costruiti, pur interessanti dal punto di vista formale, hanno evidenziato difetti anche sostanziali: sensazioni di caldo o freddo in prossimità delle superfici vetrate, cattiva qualità dell'illuminamento naturale interno, deformazioni e rotture delle vetrate stesse.

Tuttavia recentemente si sono verificati notevoli progressi nel settore dei materiali: è migliorato il rapporto tra trasmissione luminosa e trasmissione energetica dei vetri, come conseguenza di nuovi e più efficaci trattamenti superficiali o film selettivi; sono migliorate le prestazioni di isolamento termico del vetrocamera a seguito dei progressi conseguiti nei trattamenti a bassa emissività e nell'uso dei gas di riempimento; sono migliorate le prestazioni acustiche, con l'introduzione di nuovi tipi di vetro stratificato; ultimamente sono apparsi sul mercato i vetri autopulenti, che eliminano o riducono costose operazioni di pulizia sulle facciate.

Parallelamente sono maturati strumenti matematici e informatici per la modellazione e l'analisi dei sistemi termici coinvolti, dai ponti termici localizzati nei nodi strutturali o nei profili, all'edificio nel suo insieme, o al sistema globale edificio – impianto.

Si sono pertanto create le condizioni per la progettazione e la costruzione di edifici più efficienti e funzionali, con impiego di grandi superfici vetrate o di tipologie innovative.

Questo è il motivo per cui gran parte delle applicazioni trattate successivamente riguardano le proprietà dei vetri nei confronti della trasmissione e riflessione.

4.3 Campioni vetrosi per la messa a punto dello spettrofotometro Cary 2300

Le prove condotte nella fase preliminare dello studio hanno avuto lo scopo di verificare la correttezza dei valori ottenuti dalle misurazioni e di stabilire univocamente il metodo di misura da adottare.

A tale scopo sono stati utilizzati tre campioni di vetro (tab. 4.2), di cui si conosce qualitativamente e quantitativamente il comportamento nei confronti della radiazione.

Campione	Tipologia	Spessore (mm)
Planilux Chiaro	Vetro Float	4
Cool Lite SS108	Vetro Bassoemissivo	6
Eko Plus	Vetro Bassoemissivo	4

Tab. 4.2: Campioni utilizzati per la messa a punto dello strumento

4.3.1 Confronto tra l'andamento sperimentale e quello dedotto dai dati noti

La definizione del metodo di misura è avvenuta per gradi, dopo aver condotto una serie di prove; di seguito si riportano i risultati ottenuti (fig. 4.1), conducendo per ognuno dei tre vetri tre prove consecutive, ognuna di esse preceduta da baseline e bilanciamento a 2500 nm, scartando la prima ed utilizzando le altre due per calcolare la media.

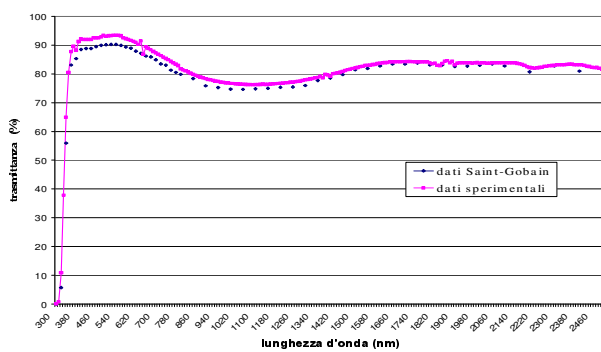
I risultati delle misure sono stati confrontati con gli andamenti della trasmittanza certificati, forniti dalla casa costruttrice dei vetri.

Si può notare come le differenze tra i dati sperimentali e quelli certificati siano di modesta entità e consentano di ritenere pienamente attendibili i dati forniti dallo strumento.

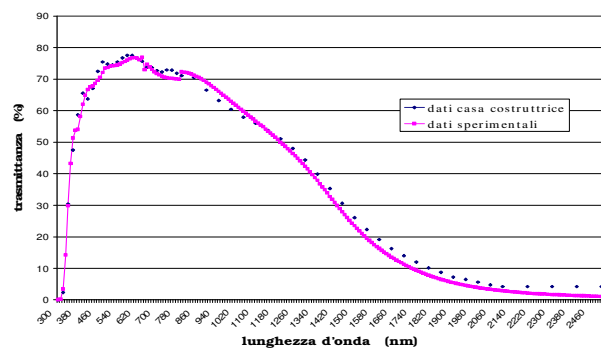
4.3.2 Incertezza e ripetibilità delle misure

La norma UNI CEI 9 fornisce le indicazioni per l'analisi statistica delle misure; per ognuno dei campioni, di cui al paragrafo 4.3.1, la misura è stata ripetuta 10 volte; per ogni valore λ nell'intervallo 300 nm ÷ 2500 nm si è calcolato lo scarto tipo sperimentale della media, espresso dalla seguente relazione:

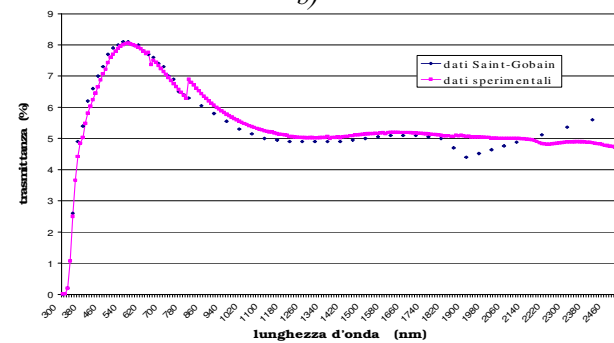
$$s(\bar{q}) = \sqrt{\frac{n \sum_{k=1}^n q_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n q_k \right)^2}{n(n-1)}} \quad (4.1)$$



a)



b)



c)

Fig. 4.1: Confronto tra la trasmittanza misurata con lo spettrofotometro Cary 2300 e l'andamento fornito dalle Ditte produttrici; a) Planilux; b) Eko Plus; c) Cool Lite

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. 4.3). Per il significato attribuito allo scarto tipo, è possibile affermare che il valore medio stima il corrispondente valore atteso della trasmittanza con un'incertezza dello 0,37% rispetto al valore misurato per il Planilux, dello 0,04% per il Cool Lite e dello 0,29% 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 anche 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, concordante con la ISO 5725-86; tali norme definiscono la ripetibilità 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 4.3.

VETRI DI RIFERIMENTO	S(q) (%)	RIPETIBILITA' (r)
Planilux (4mm)	0,37	0,27 %
Eko Plus (4mm)	0,29	0,14 %
Cool Lite (6mm)	0,04	0,05 %

Tab. 4.3: 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 0,27 %, con una probabilità pari al 95%.

4.3.3 Calcolo del fattore di trasmissione nel visibile e nel solare

Per l'elaborazione dei dati si è fatto riferimento alla normativa EN 410 descritta dettagliatamente nel capitolo 3.

Nella tabella 4.4 sono riportati i valori calcolati del coefficiente di trasmissione nel visibile e nel solare ed i corrispondenti valori certificati del coefficiente di trasmissione nel visibile.

Campione	τ_v calcolato	τ_v certificato	τ_e calcolato
Planilux 4 mm	0,895	0,896	0,834
Eko Plus 4 mm	0,750	0,760	0,616
Cool Lite 6 mm	0,079	0,080	0,064

Tab. 4.4: Valori del coefficiente di trasmissione nel visibile e nel solare

Si può notare come i valori calcolati per il coefficiente di trasmissione nel visibile siano prossimi a quelli certificati, con differenze in valore assoluto comprese tra 0,01 e 0,001.

4.4 I polimeri e le loro proprietà ottiche

Per definizione, una plastica destinata ad uso ingegneristico può essere definita come un polimero sintetico capace di essere trasformato in forme portanti e dotato di proprietà che consentono di impiegarlo negli stessi campi in cui si usano i materiali tradizionali. Dal punto di vista chimico, un polimero è un materiale composto da molecole costituite da molte ripetizioni (poli-) di alcune unità elementari, dette monomeri, che sono legate l'una all'altra con legami covalenti di elevata intensità. Le strutture che si possono originare dall'unione dei monomeri sono monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali.

Mentre tra i monomeri si hanno forti legami covalenti, le molecole formatesi dalle loro unioni sono connesse l'una all'altra per mezzo di legami secondari più deboli. Per questo motivo non è agevole rompere i legami tra i monomeri ma è abbastanza semplice rompere quelli dei polimeri.

La configurazione della maggior parte dei polimeri è costruita attorno ad una sorta di colonna vertebrale, costituita da atomi di carbonio, questo è un elemento dotato di un'elevata capacità di originare lunghi e stabili legami covalenti con se stesso. La struttura con cui gli atomi di carbonio si legano l'un

l'altro varia da caso a caso e talvolta si possono avere legami anche con altri elementi.

Tra i polimeri, due dei più noti sono il polimetil-metacrilato (PMMA) e il policarbonato; il primo è un polimero *carbon-chain* contenente ossigeno ed idrogeno (noto con il nome commerciale di Plexiglass), il secondo appartiene alla categoria dei polimeri *heterochain*, i quali contengono nella loro "ossatura" due o più elementi diversi. Questo gruppo spesso è in grado di offrire maggiore resistenza alle alte temperature di quanto non facciano i polimeri carbon-chain.

Tra le possibili classificazioni dei polimeri la più importante è quella che si basa sulla loro risposta al calore ed ai solventi. In tal senso si distinguono due grandi categorie: i polimeri termoplastici e i polimeri termoindurenti. A loro volta i primi possono essere ulteriormente suddivisi in "tradizionali" ed "avanzati".

Le termoplastiche sono polimeri che, rammolliti e fusi o trattati con opportuni solventi in maniera ripetitiva, non subiscono variazioni nella loro composizione chimica; i termoindurenti, al contrario, sono polimeri che, se sottoposti ad elevate temperature, tendono ad indurirsi. Sebbene il termine termoplastico stia ad indicare la capacità di fondere al riscaldamento, esistono polimeri termoplastici che non lo fanno e polimeri che rammolliscono semplicemente se sottoposti a pressione meccanica; analogamente, ci sono termoindurenti in grado di indurirsi anche senza riscaldamento.

La più evidente differenza esistente tra queste due categorie risiede nel fatto che, mentre dopo la formatura i termoplastici conservano la struttura polimerica lineare che li caratterizza, i termoindurenti subiscono una variazione, passando da una struttura tipicamente lineare ad una tridimensionale.

Le caratteristiche ottiche dei polimeri sono funzione sia del tipo di materiale sia del metodo di fabbricazione.

Riguardo alle proprietà ottiche, la trasmissione luminosa è la di gran lunga la caratteristica più interessante dei materiali plastici trasparenti; in determinati range di lunghezza d'onda le capacità di trasparenza di polimeri ben costruiti sono elevate: se il materiale non presenta fenomeni di assorbimento interno o di oscuramento della radiazione, nel visibile e nel vicino infrarosso si arriva ad avere addirittura il 92% di trasmittanza.

Per "oscuramento della radiazione" si intende una dispersione dei raggi estremamente diffusa; questa si verifica qualora nel materiale siano presenti disomogeneità strutturali, come zone a diversa densità, e cavità vuote, oppure elementi di disturbo, come impurità e pigmenti di vario genere.

Probabilmente, questi fenomeni determinano localizzate diminuzioni di trasparenza nel lontano infrarosso.

I materiali plastici presentano sempre fenomeni di assorbimento che si manifestano con diminuzioni della trasmittanza e tendono ad avere una certa

quantità di radiazione diffusa che nella valutazione delle perdite di trasparenza viene proprio indicata con il termine di oscuramento; questi due aspetti aumentano linearmente con lo spessore e , e, per questo motivo, vanno valutati in relazione al suo valore. Un'ulteriore diminuzione alla trasparenza può essere apportata dal fenomeno della riflessione che, a differenza dei due precedenti, non dipende dallo spessore del materiale coinvolto.

Altra caratteristica di molti materiali plastici allo stato naturale è un colore giallognolo; lo stesso tipo di giallo si evidenzia nelle plastiche quando si degradano a causa, per esempio, dell'esposizione prolungata al calore. L'ingiallimento, definito come la deviazione cromatica nell'intervallo di lunghezza d'onda 570 nm – 580 nm del candore tipico dell'acqua, è un fenomeno molto frequente e per questo motivo sono state definite e standardizzate opportune prove per determinarne l'entità.

Il concetto di indice di rifrazione è molto importante per caratterizzare le capacità trasmettenti dei materiali in quanto la sua variazione interferisce con il passaggio della luce. Esistono vari metodi per determinare l'indice di rifrazione dei materiali plastici, ma qui non verranno esposti perché non riguardano da vicino lo studio che ci si propone. Interessante, invece, è valutare le grandezze che influenzano la rifrazione. Anche per i materiali plastici si parla di dispersione quando l'indice di rifrazione varia con la lunghezza d'onda: l'entità di questo fenomeno dipende dal tipo di materiale coinvolto, dalla temperatura e dall'umidità relativa.

La variazione con la temperatura dipende dal fatto che l'indice di rifrazione è legato alla densità, e quindi quando il materiale si dilata a causa di un aumento di temperatura, l'indice diminuisce secondo un andamento quasi lineare.

Per quanto riguarda l'umidità relativa non è possibile quantificare il legame tra una sua variazione e la variazione dell'indice di rifrazione. Il meccanismo è il seguente: quando vapor d'acqua viene assorbito dalla superficie plastica, si generano delle sollecitazioni che determinano un valore più alto dell'indice sulla superficie ed un gradiente interno, nella direzione dei livelli più bassi di umidità; quando la plastica si satura il gradiente si annulla. I valori tipici di questo fenomeno sono piuttosto limitati e per questo motivo spesso non lo si considera.

L'ultima proprietà ottica di rilievo è la birifrangenza, definita come il fenomeno ottico secondo il quale l'indice di rifrazione dipende dalla direzione e dalla polarizzazione della luce (materiali anisotropi). Alcuni materiali, plastici e non, possiedono una struttura cristallina che li rende birifrangenti per natura, mentre altri, come le plastiche amorfe, sono birifrangenti solo se sottoposti a tensione.

4.5 Campioni plastici per la messa a punto dello spettrofotometro Cary 2300

Per mettere a punto lo spettrofotometro Cary 2300 sono stati impiegati anche alcuni campioni di materiale plastico (tab. 4.5), essendo disponibili le certificazioni relative a due spessori diversi di Plexiglass. I dati disponibili per questi elementi sono relativi solo al visibile, a differenza di quelli dei vetri, relativi ad un range più ampio di lunghezze d'onda.

Campione	Spessore (mm)
Plexiglass (PMMA)	3
Plexiglass (PMMA)	12
Plexiglass (PMMA)	15
Plexiglass (PMMA)	20
Policarbonato pieno	5
Policarbonato cellulare	6

Tab. 4.5: Campioni plastici impiegati per la messa a punto dello strumento

4.5.1 Misure e calcolo del fattore di trasmissione nel visibile

Le curve di trasmittanza dei plexiglass studiati (fig. 4.2) mettono in evidenza il fatto che, indipendentemente dallo spessore, questo materiale possiede eccellenti proprietà di trasparenza nel del visibile, mentre nell'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.

L'andamento della trasmittanza del policarbonato pieno è del tutto analogo a quello dei polimeri termoplastici in generale; il policarbonato cellulare mostra una minore 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. 4.3).

Nella tabella 4.6 sono riportati i valori del coefficiente di trasmissione nel visibile e nel solare calcolati secondo la normativa; il coefficiente di trasmissione nel visibile certificato per uno spessore di 18 mm è 0,922, confrontabile con i valori calcolati per gli spessori di 15 e 20 mm.

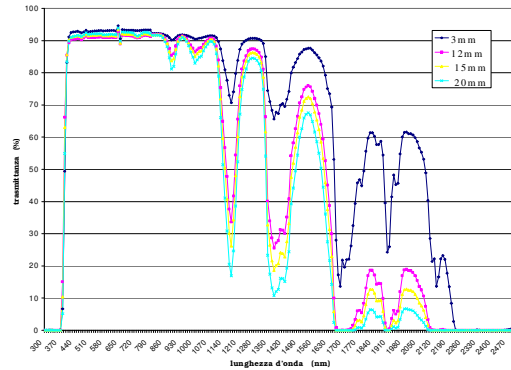


Fig. 4.2: Andamento della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda per vari spessori di plexiglass

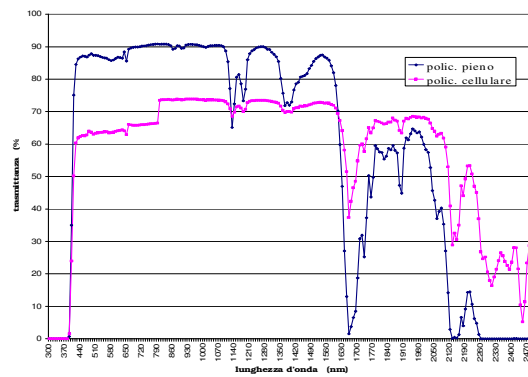


Fig. 4.3: Andamento della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda per il policarbonato pieno e cellulare

MATERIALI PLASTICI	COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE NEL VISIBILE (τ_v)	FATTORE DI TRASMISSIONE SOLARE DIRETTA (τ_s)
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. 4.6: Coefficiente di trasmissione nel visibile e fattore di trasmissione solare diretta per i materiali plastici esaminati

4.6 Materiali per la messa a punto dello spettrofotometro portatile S 2000

Per la messa a punto della strumentazione spettrofotometrica portatile sono stati impiegati gli stessi campioni visti per lo spettrofotometro Cary 2300, questo ha consentito di poter effettuare anche dei confronti tra le prestazioni degli strumenti.

4.6.1 Prove di misura per diverse distanze delle lenti

Lo spettrofotometro S 2000, come detto è in grado di realizzare la scansione per un intervallo di lunghezze d'onda che va da 300 nm a 1015 nm. Tuttavia la risposta dello strumento al di fuori del campo del visibile è molto approssimata: infatti la curva della trasmittanza presenta una serie di picchi e gole che rendono poco attendibili i valori rilevati in questi intervalli di lunghezza d'onda.

Del resto, ad uno spettrofotometro di questo tipo non si richiede di fornire misure puntuali e particolarmente precise, ma di fornire un andamento qualitativo delle proprietà di un certo materiale ed in particolare di valutare le variazioni delle proprietà ottiche nel tempo. Per questo, le analisi condotte con questo strumento si limiteranno al campo del visibile dove i risultati sono accettabili.

Per ciascuno dei vetri certificati sono state effettuate tre prove di misura, al variare della distanza sorgente – campione e sensore – campione.

Di seguito si riportano i parametri caratteristici di ciascuna misura (tab. 4.7), mentre nella figura 4.4 sono rappresentati gli andamenti della trasmittanza ed il confronto con i dati certificati.

Campione	Distanza sorgente – campione (cm)	Distanza ricevitore – campione (cm)
Ekoplus	1,4	1,9
	2,1	2,5
	2,6	3,1
Planilux	0,7	0,7
	1	1,3
	1,5	1,8
Cool Lite	3,9	2,7
	3,2	2,7
	0,4	0,4

Tab. 4.7: Prove di misura per diverse distanze delle lenti

I risultati ottenuti dall'analisi dei tre campioni, in diverse condizioni di misura, non consentono di stabilire quale sia la condizione ideale in quanto le curve di trasmittanza, pur essendo tra loro differenti, rispecchiano comunque l'andamento qualitativo dei dati certificati dalla ditta costruttrice. Quantitativamente i risultati ottenuti sono abbastanza buoni, con differenze tra i valori certificati e sperimentali sempre contenuti, fatta eccezione per gli estremi del campo di misura.

Si può quindi concludere che il funzionamento e la risposta dello strumento sono indipendenti dalle condizioni ambientali di misura e dalla distanza relativa sensore – sorgente.

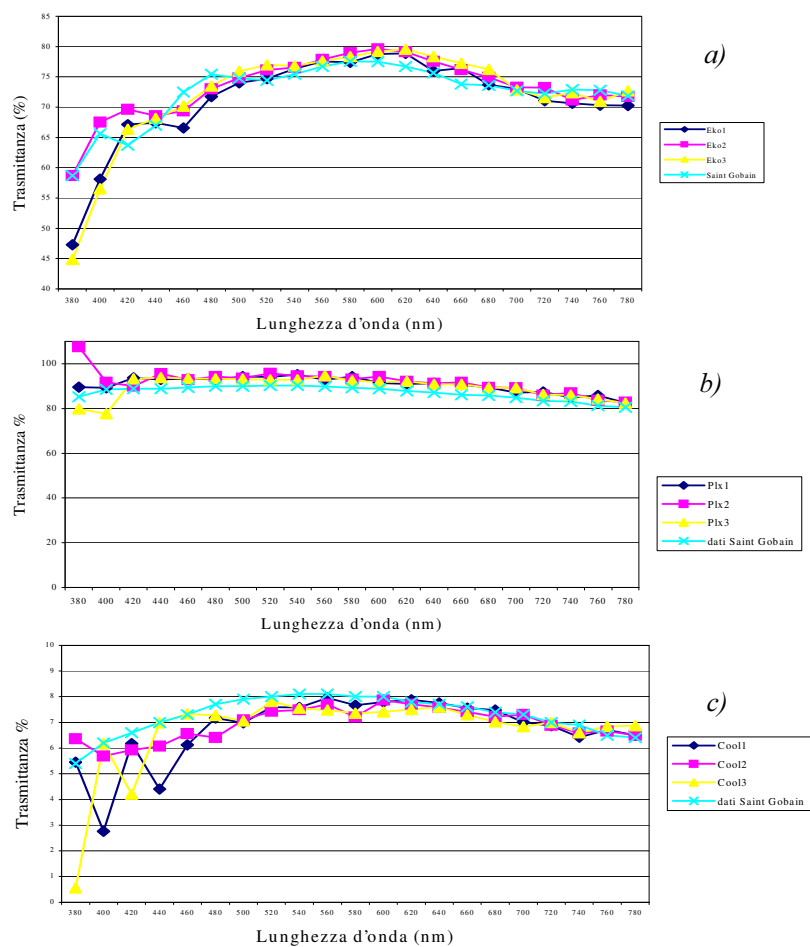


Fig. 4.4: Andamento della trasmittanza dei campioni per diverse distanze delle sonde, a) Ekoplus, b) Planilux, c) Cool Lite

4.6.2 Incertezza e ripetibilità delle misure

Per la valutazione dell'incertezza di misura dello spettrofotometro S 2000 si è fatto riferimento alla UNI CEI 9 che stabilisce le regole generali per la valutazione e l'espressione dell'incertezza di una misura; in particolare l'incertezza dello strumento è stata valutata in base ai valori dello scarto tipo sperimentale della media nell'intervallo di lunghezze d'onda corrispondente al visibile (380 – 780 nm).

Le prove sono state eseguite sui tre vetri impiegati per la messa a punto dello strumento e si è deciso di non eseguire i calcoli in base a una sola prova per ciascun vetro, ma di prendere in considerazione la media dei risultati di cinque prove consecutive, eseguite nelle medesime condizioni, in modo da mediare gli eventuali errori dovuti alle condizioni ambientali.

E' stata posta l'incertezza pari al valore massimo dello scarto tipo nell'intervallo di lunghezza d'onda considerato. In questo modo si agisce in favore di sicurezza perché si assicura che il valore di ogni altra misura sia compreso nell'intervallo così trovato.

Tuttavia questa soluzione tende a sottostimare le prestazioni dello strumento perché si ha una forte instabilità della misura in corrispondenza dell'estremo inferiore del campo di misura, in prossimità del vicino ultravioletto. Procedendo in questo modo, infatti, il valore massimo dello scarto tipo si ha in corrispondenza di $\lambda = 380$ nm e presenta un valore molto alto rispetto a quelli dell'intero intervallo.

Per risolvere il problema si è pensato di dare una caratterizzazione più ampia, anche se meno rigorosa, fornendo, oltre al valore massimo dello scarto tipo, quello minimo e la media calcolata su tutto l'intervallo. I risultati ottenuti sono riportati in tabella 4.8, dove tra parentesi sono indicate le lunghezze d'onda a cui si riferiscono i valori dello scarto tipo.

VETRI DI RIFERIMENTO	$s(\bar{q})$ (%) MASSIMO	$s(\bar{q})$ (%) MINIMO	$s(\bar{q})$ (%) MEDIO
Planilux (4mm)	5,815673 (390 nm)	0,166052 (560 nm)	1,007674
Eko Plus (4mm)	7,268126 (380 nm)	0,269032 (770 nm)	1,206755
Cool Lite (6mm)	7,7477 (380 nm)	0,0595 (720 nm)	0,6570

Tab. 4.8: Valori dello scarto tipo minimo, medio e massimo per i campioni esaminati

Dalla tabella si osserva che il valore dell'incertezza per tutti e tre i vetri è abbastanza alto, variando da un minimo del $\pm 5,82\%$ rispetto al valor medio (per il Planilux) ad un massimo del $\pm 7,75\%$ (per il Cool Lite), ma è sempre verificato in corrispondenza dell'estremo inferiore dell'intervallo di misura. Di contro i valori dell'incertezza minima e media sono molto più bassi.

Pertanto, poiché l'errore massimo è concentrato in una zona ristretta dell'intervallo di misura (porzione iniziale), si può concludere che i risultati globali non sono compromessi dall'entità dello scarto tipo e quindi le prestazioni dello strumento sono accettabili.

Le prove effettuate su materiali presunti identici, nelle stesse circostanze, non portano in genere a risultati identici. I fattori che influenzano la variabilità dei risultati sono molteplici: l'operatore, gli strumenti, l'ambiente, ecc. Per completare l'analisi delle prestazioni dello spettrofotometro, si è pensato di considerare anche quest'aspetto ed allora si è valutata la ripetibilità delle misure. Questa, infatti, può essere intesa come l'attitudine a fornire valori simili in letture consecutive, eseguite con la stessa apparecchiatura, nelle stesse condizioni e dallo stesso operatore.

Per determinare la ripetibilità delle misure si è fatto riferimento alla UNI 9225, che stabilisce i principi fondamentali per l'impostazione, l'organizzazione e l'analisi di esperimenti.

In base a quanto prescritto dalla normativa si procede al calcolo della ripetibilità delle misure supponendo di avere a che fare con un solo laboratorio e di effettuare cinque ripetizioni per ogni singolo livello.

I valori della ripetibilità sono calcolati in base alla relazione 4.2:

$$r = \frac{1}{q} \sum_i r_i \quad (4.2)$$

come media delle singole ripetibilità e sono di seguito riportati:

- Planilux da 4 mm: $r = 2,92\%$
- Eko Plus da 4 mm: $r = 3,62\%$
- Cool Lite da 6 mm: $r = 2,15\%$

Per la definizione di ripetibilità ciò significa che due misure consecutive, condotte in maniera identica, per esempio, sul Planilux, producono trasmittanze che differiscono, in valore assoluto, di una quantità inferiore a $2,92\%$, con una probabilità pari al 95% .

I valori ottenuti sono piuttosto elevati, ma ancora una volta ciò è dovuto alla forte instabilità dello strumento in corrispondenza dell'estremo inferiore dell'intervallo di misura.

4.6.3 Confronto tra le prestazioni dello spettrofotometro portatile S 2000 e quelle del Cary 2300

Per una caratterizzazione completa delle prestazioni dello spettrofotometro S 2000 si vogliono confrontare i risultati con quelli dello spettrofotometro da laboratorio Cary 2300. In tabella 4.9 si riportano i dati relativi all'incertezza e nella 4.10 relativi alla ripetibilità.

VETRO	INCERTEZZA		
		Mobile	Fisso
Planilux	Max	5,815673	0,369528
	Media	1,007674	
Eko Plus	Max	7,268126	0,294522
	Media	1,206755	
Cool Lite	Max	7,7477	0,042279
	Media	0,6570	

Tab. 4.10: Incertezza di misura dello spettrofotometri fisso e portatile

VETRO	RIPETIBILITÀ'	
	Mobile	Fisso
Planilux	2,916127%	0,269057 %
Eko Plus	3,619156 %	0,142976 %
Cool Lite	2,149185%	0,047462 %

Tab. 4.11: Ripetibilità dello spettrofotometro fisso e portatile

Come già accennato in precedenza i valori numerici sono molto diversi tra loro. Nonostante ciò lo spettrofotometro S 2000, pur essendo meno preciso, consente di dare una rappresentazione qualitativa dei risultati più che buona, come mostrato nella figura 4.5.

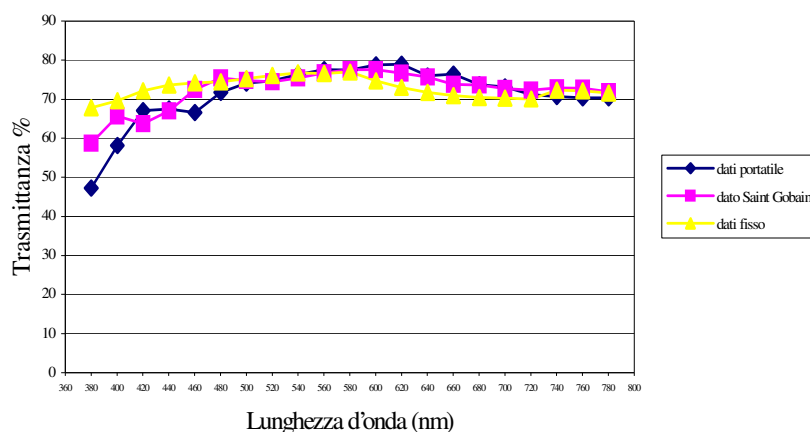


Fig. 4.5: Andamento della trasmittanza di un campione Eko Plus misurata con lo spettrofotometro fisso, quello portatile ed i dati certificati

Nella tabella 4.12 è riportato il confronto tra i valori di τ_v calcolati secondo quanto prescritto dalla norma EN 410 ottenuti con il portatile, il fisso ed infine i dati certificati dalla ditta costruttrice per i tre vetri utilizzati per la messa a punto.

Come si nota, i risultati ottenuti non si discostano molto da quelli certificati, specialmente per il campione di Eko Plus, e l'errore è dovuto principalmente all'instabilità dello strumento in prossimità del campo dell'ultravioletto che ne condiziona il risultato finale.

Dall'analisi dei dati si può notare che l'errore di misura può essere anche abbastanza elevato quando si valuta l'andamento della trasmissione in funzione della lunghezza d'onda, ma ciò in realtà non è molto importante perché lo spettrofotometro S 2000 non è uno strumento da laboratorio ma uno portatile, che in quanto tale deve fornire un'analisi in situ delle caratteristiche ottiche di un materiale. Con questo tipo di strumenti non è quindi rilevante il valore assoluto della misura quanto la variazione delle grandezze misurate nel tempo, in quanto lo scopo principale è dare una valutazione relativa tra due situazioni diverse nel tempo.

VETRO	τ_v sperimentale		τ_v certificato
	Portatile	Fisso	
Planilux	0,925	0,895	0,896
Eko Plus	0,763	0,750	0,76
Cool lite	0,067	0,079	0,08

Tab. 4.12: Valori del coefficiente di trasmissione nel visibile misurati e certificati

CAPITOLO 5

MISURE E CALCOLO DELLE PRESTAZIONI DI MATERIALI TRASPARENTI INNOVATIVI

5.1 Generalità

Nel contesto del complesso ed articolato problema del risparmio energetico nel settore edilizio, si inserisce lo studio delle proprietà ottiche ed energetiche dei materiali trasparenti innovativi.

Gli aspetti principali da analizzare nella realizzazione di fabbricati con l'impiego di superfici trasparenti sono l'illuminazione diurna ed il risparmio energetico.

Se da un lato garantire un'elevata illuminazione naturale consente di ridurre il consumo di energia elettrica, dall'altro comporta un aumento del fabbisogno energetico legato al benessere termoisometrico degli ambienti.

Tra le soluzioni innovative conosciute, anche se ancora scarsamente diffuse, rientrano i materiali trasparenti isolanti (TIM) sui quali sono state effettuate le misure spettrofotometriche. I TIM possono essere suddivisi in *aerogel* e *geometric media*.

5.2 L'aerogel

L'aerogel è un materiale tecnologicamente molto avanzato: esso è costituito per il 96% circa da aria per il restante 4% è una matrice microporosa a struttura aperta di silice (SiO_2 , il principale costituente del vetro). È caratterizzato da interessanti proprietà ottiche, come l'elevata trasmittanza ed è anche un ottimo isolante termico, caratteristiche che lo rendono molto competitivo nell'ottica del risparmio energetico.

La realizzazione del prodotto avviene attraverso più fasi; la prima è la produzione del gel, ottenuto da una miscela di acqua, etanolo e TEOS (tetrametilortosilicato), assieme a catalizzatori come il fluoruro di ammonio. La fase successiva è il processo supercritico, attuato mediante la tecnica della cosiddetta chimica sol – gel; essa si sviluppa in due passaggi: la costituzione di una sospensione colloidale (sol) e la formazione di una struttura solida della sospensione. Alla fine di questo processo si ottiene il cosiddetto alcogel: una struttura solida di catene di silice i cui pori di pochi nm sono riempiti dal solvente liquido. La fase finale, che è anche quella più delicata, consiste nell'estrazione del solvente dall'alcogel; il risultato finale è la struttura prima contenuta nel gel, una matrice solida di particelle silicee del diametro di circa 5 nm, con micropori aperti

di diametro variabile da 10 a 100 nm a seconda delle tecniche di catalisi (la struttura è mostrata in figura 5.1).

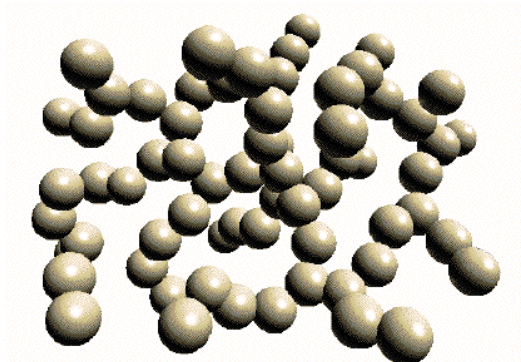


Fig. 5.1: Struttura tridimensionale dell'aerogel

La leggerezza dell'aerogel è proprio data da questa struttura.

L'aerogel può essere di vari colori, in funzione dell'alcolossido usato, del tutto trasparente, caratteristica che fa sì che possa essere impiegato nelle pareti vetrate dell'involucro degli edifici.

Nel campo dell'isolamento termico di superfici trasparenti ci sono due tipi di prodotti commerciali:

- aerogel granulare: costituito da sferette del diametro di 8 – 12 mm, con cui è possibile riempire l'intercapedine dei vetro camera;
- aerogel monolitico: costituito da lastre di spessore variabile da 8 a 20 mm, da inserire come isolante tra due vetri.

Le proprietà ottiche nelle due modalità di impiego dell'aerogel sono molto diverse; nel primo caso la trasmittanza complessiva è ridotta e non è possibile la visione attraverso il componente; nel secondo caso, con il materiale in forma monolitica, questi inconvenienti sono meno marcati.

Le proprietà dell'aerogel lo rendono più vicino ad un aeriforme che ad un solido; ma si tratta di un solido particolare, la cui densità e costante dielettrica sono le più basse mai misurate in un solido.

Per quanto riguarda le proprietà ottiche, sicuramente gli aspetti più studiati sono la trasparenza e la resa cromatica, al fine di poter impiegare l'aerogel come isolante termico, mantenendone le proprietà ottiche paragonabili a quelle dei vetri. Il fenomeno da controllare è lo *scattering*, cioè la diffusione della luce, che provoca alcuni effetti indesiderati. Ad esempio, mentre un oggetto distante può

essere visto anche attraverso uno strato spesso di aerogel, il materiale mostra riflessi bluastri se un oggetto illuminato viene osservato su sfondo scuro e rende rossastra la luce trasmessa.

La diffusione è causata dalla struttura non omogenea del materiale: se le disomogeneità sono dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce visibile (380-780 nm) si ha diffusione. Quando invece i centri di diffusione sono a distanze inferiori rispetto alla lunghezza d'onda della luce incidente, la diffusione è ridotta: la struttura solida con diametri dell'ordine di 5 nm non influenza questo fenomeno. Lo stesso dovrebbe avvenire per i pori di diametro medio di 20 nm, ma la complessità del processo di produzione può provocare pori di dimensioni superiori a 400 nm o gruppi di molecole aggregati in modo irregolare.

La chiave del problema è controllare le disomogeneità nella fase di preparazione del gel: con il processo "two-step" si ottiene una disposizione dei pori più regolare e difficilmente la loro dimensione raggiunge i 50 nm.

Inoltre, tra le proprietà più interessanti, è la straordinaria resistenza termica, che candida questi materiali a diventare nei prossimi anni tra i più impiegati nel campo dell'isolamento termico; considerando la trasmissione di calore per conduzione nel solido, per conduzione nel gas e l'irraggiamento, per un aerogel a semplice struttura di silice si ottengono valori di 0,017 W/mK e, con l'aggiunta di carbonio, fino a 0,013 W/mK.

A tale scopo si possono utilizzare le due forme in commercio: aerogel granulare e aerogel monolitico.

1. Aerogel granulare

La soluzione più efficiente è quella di inserire i granuli tra due fogli sottili di PMMA (polimetilmetacrilato), ottenendo una lastra di 16 mm di spessore. Questo foglio è montato tra due lastre di vetro basso-emissivo, lasciando due intercapedini di 12 mm ciascuna riempite di gas rari come l'Argon o il Krypton. Si possono così ottenere valori del coefficiente di trasmissione del calore di 0.4 W/m²K. Lo schema è riportato nella figura 5.2. Possono essere utilizzati due tipi di aerogel granulare, sfere piuttosto regolari e pezzi di forma irregolare. Usando l'aerogel granulare non è permessa la visione dell'esterno poiché il materiale è lattiginoso, inoltre la trasmissione luminosa non è elevatissima, infatti il materiale risulta traslucido e non trasparente.

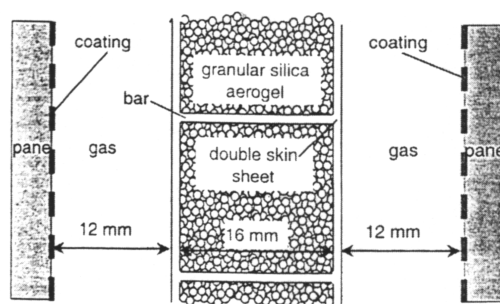


Fig. 5.2: Lastre di vetro con aerogel granulare in intercapedine

2. Aerogel monolitico

Il materiale in questa forma sembrerebbe la soluzione a tutti i problemi di risparmio energetico per gli elementi trasparenti: non solo è altamente isolante, ma presenta anche un'elevata trasmittanza luminosa ed è trasparente alla vista, consentendo la visione dell'esterno. Esso però presenta bassi valori della resistenza a trazione, mentre resiste bene a compressione. Pertanto è possibile inserirlo tra due lastre di vetro per formare un vetro camera.

Ad esempio, inserendo una lastra di circa 2 cm di aerogel monolitico in un vetrocamera è possibile avere un coefficiente di trasmittanza al centro della lastra di $0,5 - 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$; tuttavia questo valore può aumentare anche del 70 % passando a considerazioni energetiche su tutto il componente. Affinché ciò non accada, è necessario porre grande cura nel sigillare i bordi e garantire così:

- resistenza all'acqua;
- resistenza al vapore;
- assenza di ponti termici.

Un sistema innovativo per sigillare il doppio vetro consiste nell'impiego di una plastica laminata con polvere di vetro, che avvolge la lastra di aerogel lungo i bordi ed uno strato di butile applicato sull'aerogel e sul vetro per il fissaggio. Il vuoto viene realizzato attraverso valvole di suzione, lo schema è rappresentato in figura 5.3.

Allo stato attuale lo schema presenta l'inconveniente che deve essere disposto uno strato di silicone, per evitare che la struttura possa rompersi e questo peggiora le proprietà del fissaggio.

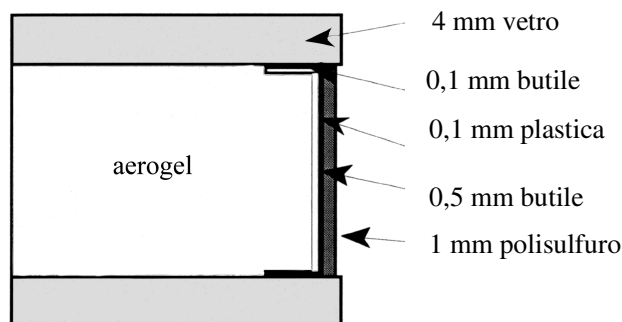


Fig. 5.3: Schema di fissaggio dell'aerogel monolitico in un vetro camera

L'aerogel granulare è ormai standardizzato nella produzione e nelle prestazioni; il suo impiego in intercapedini vetrate presenta un incremento rispetto alle normali finestre di poche decine di euro al metro quadrato, ma non può sostituire una superficie vetrata tradizionale poiché non permette la visione dell'esterno. L'aerogel monolitico, invece, è in grado di assolvere brillantemente tutte le funzioni richieste da una finestra, con prestazioni energetiche paragonabili alle chiusure opache dell'involucro edilizio. I suoi costi sono tuttora molto elevati, il processo di produzione, in piena fase evolutiva, lascia prevedere una significativa penetrazione sul mercato con una notevole riduzione dei costi.

La tabella 5.1 è riassuntiva delle principali proprietà fisiche dell'aerogel.

5.3 I geometric media

Questa categoria di Transparent Insulating Materials utilizza delle strutture geometriche per limitare le dispersioni termiche per convezione e irraggiamento che avverrebbero nell'intercapedine di un vetro camera; ciò avviene per mezzo di un materiale plastico, trasparente nel visibile e nel vicino infrarosso ma opaco oltre i 2500 nm.

L'orientamento dei setti trasparenti può essere verticale o orizzontale; ormai quasi tutti i geometric media adottano lo schema a giacitura parallela alla direzione di propagazione. Con questa configurazione, nel caso ideale di assenza di assorbimento e diffusione, tutta la radiazione incidente raggiunge, dopo successive riflessioni e trasmissioni, l'altra estremità del materiale. Inoltre, lo spessore del materiale non influisce sulle proprietà ottiche e i moti convettivi dell'aria sono ostacolati. Nella realtà, però, l'esistenza di fenomeni di assorbimento e di scattering, anche se minimi, pregiudica le prestazioni di questi

PROPRIETÀ	VALORI
Densità apparente	3-33 kg/m ³ , il valore più comune è 100Kg/m ³
% di solido	0.13-15% ,valore tipico 5%
Diametro medio dei pori	circa 20 nm e varia con la densità
Indice di rifrazione	1.0-1.05, molto basso per un solido
Resistenza alla temperatura	a 500°C comincia il collasso ma il punto di fusione è circa 1200°C
Coefficiente di espansione termica	2.0-4.0 x 10 ⁻⁶ , è determinato con ultrasuoni
Modulo di Young	10 ⁶ -10 ⁷ N/m ² , molto piccolo se comparato con quello del vetro
Costante dielettrica	1.1 per una densità di 100 kg/m ³ ma può arrivare anche a 1.008
Velocità di propagazione del suono attraverso il mezzo	100 m/s
Conduktività termica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0.017 W/m K per struttura semplice a pressione atmosferica ▪ 0.0135 W/m K con aggiunta di carbonio a pressione atmosferica ▪ 0.0092 W/m K a 0.01 atm ▪ 0.0055 W/m K con aggiunta di carbonio a 0.1 atm

Tab. 5.1: Principali proprietà fisiche dell'aerogel

materiali, che sono realizzati con spessori fino a 50 cm. Per elevati spessori, a causa delle successive riflessioni, il materiale non è più trasparente, ma traslucido, e non può più essere utilizzato in sostituzione delle normali finestre (fig. 5.4).

In base alle dimensioni delle celle, i geometric media si dividono in:

- capillari: il diametro è di uno o due millimetri e la sezione può essere quadrata o irregolare;
- a nido d'ape: i diametri sono dell'ordine di qualche centimetro, gli elementi possono essere a sezione esagonale, quadrata o tringolare.

Ai fini delle prestazioni, è importante la scelta del materiale che, deve possedere le seguenti proprietà:

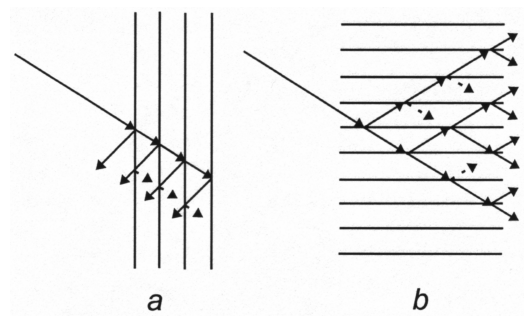


Fig. 5.4: Principio di funzionamento dei geometric media

- elevato valore del coefficiente di trasmissione nel solare, basso nell'infrarosso;
- bassa conducibilità termica;
- resistenza agli UV;
- resistenza alle elevate temperature;
- materiale ignifugo.

A tal fine i materiali di base che costituiscono le celle sono generalmente una serie di polimeri quali il policarbonato (PC), il polimetilmetacrilato (PMMA), il poliacetato (PA) e il polivinilcloruro (PVC).

I geometric media sono inseriti nell'intercapedine di un vetro camera, ottenendo così un sistema trasparente complesso. Il miglioramento dell'isolamento termico è buono, ma per ridurre la trasmittanza termica fino a un valore dell'ordine di 1-1,5 W/m²K occorrono più di 50 mm di spessore del materiale. Per quanto riguarda la distribuzione della luce, le caratteristiche variano fortemente con l'angolo di incidenza della radiazione. Nel caso dei sistemi capillari, se il diametro è inferiore a 1 mm, non è possibile vedere attraverso il materiale, che appare biancastro. La struttura a nido d'ape, d'altro canto, è trasparente se vista perpendicolarmente. La trasparenza dipende anche dal processo di produzione: per le strutture di materiale plastico avviene il taglio e gli elementi sono fusi insieme ottenendo una superficie abbastanza ruvida; per ottenere un prodotto di qualità migliore si ricorre ai capillari di vetro tagliati con il laser e uniti senza colla, che danno una struttura regolare e liscia.

I materiali che costituiscono i geometric media sono composti di polimerici organici e sono soggetti a trasformazioni fisiche e chimiche di tipo irreversibile, con una conseguente alterazione delle prestazioni del componente. Un'adeguata conoscenza delle cause esterne, ed in particolare di quelle climatiche, aiuta la

scelta dei materiali più adatti. La radiazione solare ha un effetto fotodegradante su alcuni materiali come il PC: esso ingiallisce per effetto della frazione ultravioletta della luce solare. È per questo che allo stato attuale si usa il PMMA, che mantiene le sue proprietà ottiche per lungo tempo. Una soluzione alternativa potrebbe essere l'aggiunta di stabilizzatori di tipo chimico o di vetri protettivi, anche se comporta dei costi aggiuntivi.

Le possibilità di impiego questi materiali sono molto interessanti, infatti in paesi come la Germania, l'Austria e la Svizzera cominciano ad avere un certo mercato. Del resto i geometric media sono convenienti in zone fredde, dove è necessario massimizzare gli apporti solari gratuiti. Nell'ultimo periodo, inoltre, i costi aggiuntivi rispetto ad un sistema convenzionale sono diminuiti: una vetrata denominata kapilux-w prodotta dalla OKALUX (Germania), ha un costo di circa 260 euro/m² (fig. 5.5).



Fig. 5.5: Prodotto commerciale della OKALUX: Kapilux-w

I geometric media non consentono, come già accennato, la visione dell'esterno, perciò non possono sostituire le tradizionali finestre, anche perché hanno un notevole spessore, ma possono essere sfruttati in applicazioni di daylighting, quando si hanno grandi spazi da illuminare con ampie superfici vetrate. Inoltre, se usati nelle vetrate, consentono un'ottima diffusione della luce, evitando effetti di abbagliamento, e distribuiscono la luce negli spazi interni in modo migliore rispetto ad un normale doppio vetro.

5.4 Descrizione e proprietà ottiche dei campioni

Per la campagna di misure spettrofotometriche sono stati assemblati alcuni campioni di vetro in differenti abbinamenti, a costituire un vetro camera. Nell'intercapedine, al posto dell'aria, è stato inserito aerogel, nella prima parte

delle prove, e successivamente, per un confronto, materiale isolante trasparente del tipo geometric media.

I campioni di vetro impiegati per le misure sono stati:

1. vetro semplice, spessore 2 mm;
2. vetro float incolore, disponibile in spessore 4, 5, 6 mm;
3. Antelio Steel Grey, spessore 6 mm, prodotto dalla SAINT-GOBAIN VETRO ITALIA;
4. Eko Plus, spessore 4 mm, prodotto dalla SAINT-GOBAIN VETRO ITALIA;
5. Cool lite argento, spessore 6 mm, prodotto dalla SAINT-GOBAIN VETRO ITALIA.

I campioni di vetro del primo e del secondo tipo sono prodotti di base dell'industria vetraria; il vetro semplice, invece, appartiene alla categoria dei vetri tirati, ossia quei vetri ottenuti per tiratura meccanica della massa fusa, senza una perfetta condizione di perpendicolarità e parallelismo delle superfici. Questo gruppo di vetri è stato quasi completamente soppiantato da prodotti vetrari realizzati con tecnologie più evolute (Float).

Gli ultimi tre tipi sono, invece, prodotti speciali e possono essere considerati innovativi, in quanto sono scarsamente diffusi e permettono di ottenere particolari prestazioni; in particolare:

- l'Antelio è una lastra di vetro, chiaro o colorato in pasta, ricotta e resa riflettente tramite deposito a caldo (pirolisi) di ossidi metallici. Appartiene alla categoria dei vetri a controllo solare; l'individuazione della faccia riflettente del campione può essere fatta utilizzando un semplice oggetto, come una matita: posto sulla superficie trattata, la sua immagine si vede specchiata una sola volta, posto sull'altra faccia si ha uno sdoppiamento dell'immagine riflessa.
- il prodotto Cool lite è una lastra di vetro, chiaro o colorato in pasta, resa riflettente mediante deposito di metalli o ossidi di metalli per polverizzazione catodica sotto vuoto spinto e in campo elettromagnetico di elevata intensità; va sempre posto in opera con la faccia trattata rivolta verso l'interno dell'ambiente o del vetro camera e l'individuazione della faccia riflettente è analoga al vetro Antelio;
- l'Eko Plus è costituito da un lastra di vetro chiaro ricotto, resa basso - emissiva tramite pirolisi di depositi metallici; questo vetro appartiene alla categoria delle vetrate isolanti rinforzate.

Nella tabella 5.2 è mostrato un prospetto riassuntivo dei parametri luminosi, energetici e termici dei campioni di vetro descritti.

CAMPIONE DI VETRO	τ_v	ρ_v	τ_e	ρ_e	g	U (W/m ² °K)
Semplice 2 mm	0,90	0,08	0,88	0,08	0,89	5,9
Float 4 mm	0,89	0,08	0,84	0,08	0,86	5,8
Float 5 mm	0,89	0,08	0,83	0,08	0,85	5,8
Float 6 mm	0,89	0,08	0,80	0,08	0,83	5,8
Antelio Steel Grey 6 mm - Face 1	0,37	0,32	0,29	0,26	0,40	5,8
Antelio Steel Grey 6 mm - Face 2	0,37	0,10	0,29	0,10	0,44	5,8
Cool Lite 6 mm - Face 1	0,08	0,44	0,06	0,38	0,19	5,8
Cool Lite 6 mm - Face 2	0,08	0,35	0,06	0,44	0,18	5,8
Eko Plus 4 mm - Face 1	0,76	0,11	0,63	0,10	0,67	4,3
Eko Plus 4mm - Face 2	0,76	0,12	0,63	0,10	0,67	4,3

Tab. 5.2: Parametri luminosi, energetici e termici dei campioni di vetro

L'aerogel utilizzato nelle prove è costituito da una lastra monolitica di silice trasparente. Esso è stato fornito, per scopi di ricerca, dalla AIRGLASS AB, azienda svedese, in 4 campioni di dimensioni pari a circa 70 mm x 70 mm e di spessore 14 mm (fig. 5.6).

Le proprietà di isolamento termico, di leggerezza e di trasparenza sono mostrate nella tabella 5.3.

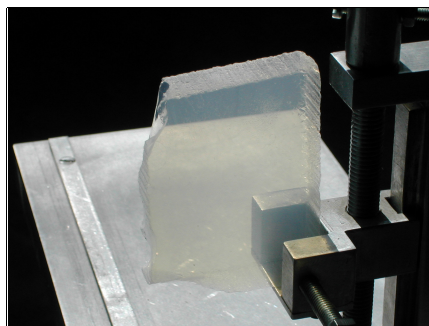


Fig. 5.6: Esempio della visione attraverso la lastra di aerogel monolitico

PROPRIETA	VALORI
Densità	50-200 Kg/m ³
Conducibilità termica	0.021 W/m °C a 20 °C e a pressione atmosferica
Indice di rifrazione	1.02-1.05
Composizione chimica della matrice solida	99.99% SiO ₂
Dimensioni dei pori	10-30 nm
Dimensione standard del prodotto	60 x 60 x 2 cm ³
Deformabilità	Paragonabile al normale quarzo, il collasso inizia al di sopra dei 750 °C
Pericolosità	Non tossico Non infiammabile
Fattore di trasmissione solare diretta	Fino a 85%, valore tipico 75%

Tab. 5.3: Proprietà dell'aerogel certificate dal produttore

Assemblando varie tipologie di vetri con aerogel sono stati ottenuti 11 differenti campioni, ognuno dei quali costituisce un sistema vetrato con tre lastre, di cui quella centrale è sempre il campione di aerogel (fig. 5.7).

Gli undici abbinamenti sono riportati in tabella 5.4. Per ciascun campione è riportata la tipologia delle lastre esterna ed interna e lo spessore totale del campione assemblato.

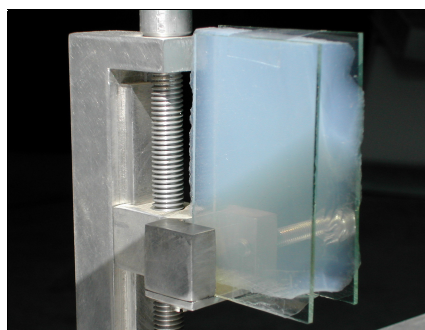


Fig. 5.7: Esempio di campione assemblato con aerogel monolitico in intercapedine

Campione	Nome	Lastra Esterna	Intercapedine	Lastra Interna	Spessore Totale
1	VS-aer-VS	Vetro semplice s = 2mm	Aerogel s = 14 mm	Vetro semplice S = 2mm	18 mm
2	F4-aer-F4	Vetro float s = 4 mm	Aerogel s = 14 mm	Vetro float s = 4mm	22 mm
3	F5-aer-F5	Vetro float s = 5mm	Aerogel s = 14 mm	Vetro float s = 5 mm	24 mm
4	F6-aer-F6	Vetro float s = 6 mm	Aerogel s = 14 mm	Vetro float s = 6 mm	26 mm
5	F5-aer-VBE	Vetro float s = 5mm	Aerogel s = 14 mm	Vetro basso emissivo Eko plus, 4 mm	24 mm
6	ANTE1-aer-F5	Vetro riflettente Antelio Steel Grey faccia 1, s = 6 mm	Aerogel s = 14 mm	Vetro float s = 5 mm	25 mm
7	ANTE2-aer-F5	Vetro riflettente Antelio Steel Grey faccia 2, s = 6 mm	Aerogel s = 14 mm	Vetro float s = 5 mm	25 mm
8	ANTE1-aer-VBE	Vetro riflettente Antelio Steel Grey faccia 1, s = 6 mm	Aerogel s = 14 mm	Vetro Basso- emissivo Eko plus, 4 mm	24 mm
9	ANTE2-aer-VBE	Vetro riflettente Antelio Steel Grey faccia 2, s = 6 mm	Aerogel s = 14mm	Vetro Basso- emissivo Eko plus, 4 mm	24 mm
10	VCL-aer-F5	Vetro riflettente Cool Lite, s = 6 mm	Aerogel s = 14 mm	Vetro float s = 5mm	25 mm
11	VCL-aer-VBE	Vetro riflettente Cool Lite, s = 6 mm	Aerogel s = 14 mm	Vetro Basso- emissivo Eko plus, 4 mm	24 mm

Tab. 5.4: Descrizione dei campioni assemblati con aerogel

Inoltre sono a disposizione per le prove geometric media capillari a sezione quadrata in polycarbonato. Le aperture dei capillari hanno un lato di circa 2 mm e lo spessore totale dello strato risulta pari a 50 mm (fig.5.8). Il materiale è commercializzato dalla OKALUX Kapillarglas GmbH, sotto il nome Okalux.

Il geometric media è stato inserito in un vetro camera con giacitura degli strati parallela alla direzione di propagazione, realizzando così un sistema vetrato di cui sono state misurate le proprietà di trasparenza. Queste soluzioni sono utilizzate in molti edifici ad uso non residenziale nel nord Europa, poiché consentono di ottenere contemporaneamente un ottimo isolamento termico ed una buona diffusione della luce nello spazio interno.

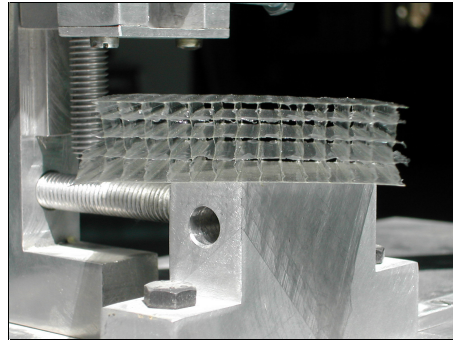


Fig. 5.8: TIM capillare a celle quadrate

In maniera analoga all'aerogel, lo strato di TIM capillare è stato inserito tra due lastre di vetro, dando origine a 5 differenti campioni (fig. 5.9). Per assemblare i campioni, non sono state impiegate come lastre esterne vetri di natura riflettente (Antelio Steel Grey e Cool Lite) poiché non si adattano alle finalità di questi sistemi vetrati complessi, cioè garantire un'ottima penetrazione di luce negli ambienti.

L'elenco delle combinazioni è mostrato in tabella 5.5.

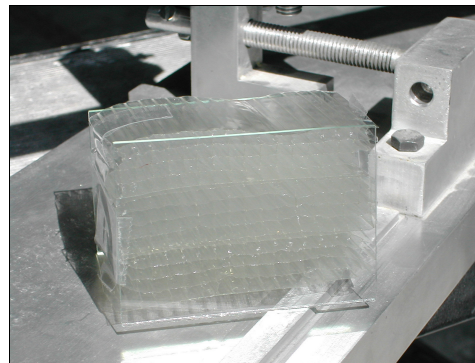


Fig. 5.9: Esempio di campione assemblato con TIM capillare in intercapedine

Di questi campioni sono state valutate le proprietà ottiche, al fine di confrontarli con gli stessi sistemi vetrati con aerogel al posto dei geometric media capillare in intercapedine.

Campione	Nome	Lastra Esterna	Intercapedine	Lastra Interna	Spessore Totale
A	VS-TIM-VS	Vetro semplice s = 2mm	TIM capillare s = 50 mm	Vetro semplice S = 2mm	52 mm
B	F4-TIM-F4	Vetro float s = 4 mm	TIM capillare s = 50 mm	Vetro float s= 4mm	58 mm
C	F5-TIM-F5	Vetro float s = 5mm	TIM capillare s = 50 mm	Vetro float s = 5 mm	60 mm
D	F6-TIM-F6	Vetro float s = 6 mm	TIM capillare s = 50 mm	Vetro float s = 6 mm	62 mm
E	F5-TIM-VBE	Vetro float s = 5mm	TIM capillare s = 50 mm	Vetro basso emissivo Eko plus, 4 mm	59mm

Tab. 5.5: Descrizione dei campioni assemblati con TIM capillare

5.5 Risultati sperimentali

Nelle figure 5.10, 5.11 e 5.12 sono mostrati gli andamenti della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda degli undici campioni assemblati con l'aerogel; poiché l'aerogel è un materiale molto diffondente, tutte le prove sono state realizzate con l'ausilio della sfera integratrice.

Nella figura 5.13 è mostrato l'andamento della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda per i cinque campioni assemblati per mezzo del geometric media capillare.

Seguendo le indicazioni della normativa EN 410 è possibile una valutazione complessiva delle proprietà dei sistemi vetrati esaminati; nelle tabelle 5.6 e 5.7 sono riportati i risultati dell'elaborazione dei dati.

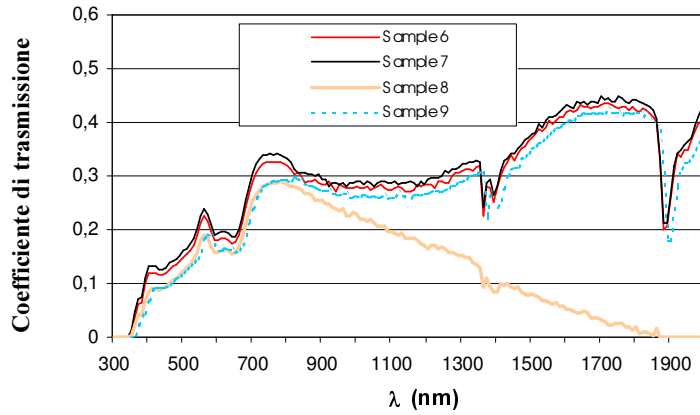


Fig. 5.10: Andamento della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda per i campioni n.1, 2, 3, 4 e 5

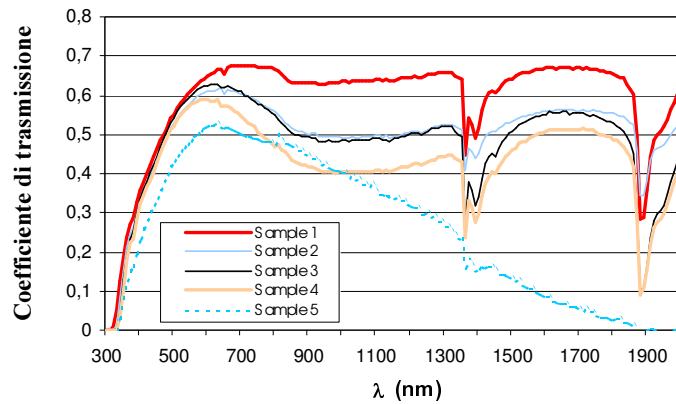


Fig. 5.11: Andamento della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda per i campioni n. 6, 7, 8 e 9

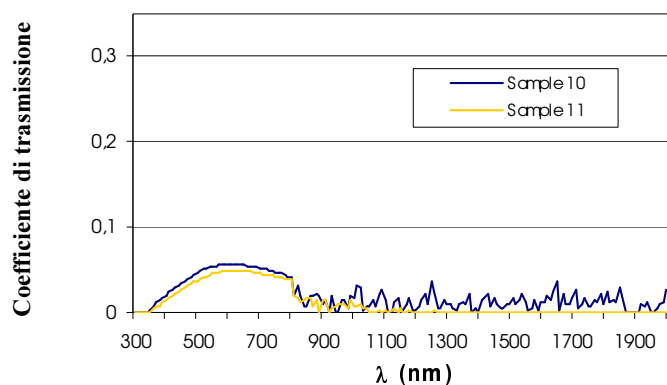


Fig. 5.12: Andamento della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda per i campioni n. 10 e 11

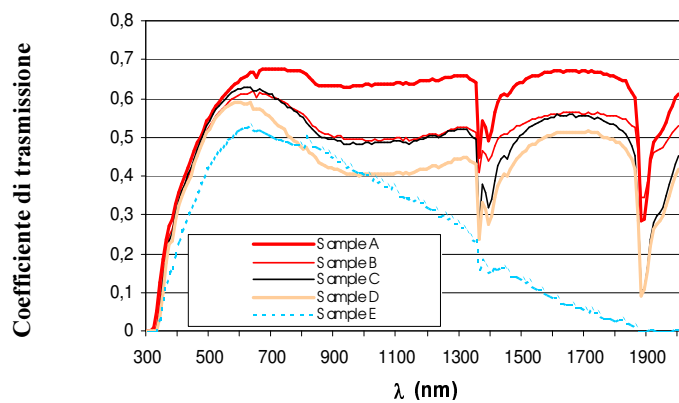


Fig. 5.13: Andamento della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda per i campioni A, B, C, D ed E

Campione	τ_v	ρ_v	τ_e	ρ_e	α_e	g	U(W/m ² K)
1	0.61	0.17	0.59	0.15	0.25	0.65	1.20
2	0.58	0.15	0.51	0.14	0.35	0.60	1.20
3	0.59	0.14	0.51	0.12	0.36	0.60	1.19
4	0.57	0.14	0.46	0.12	0.41	0.56	1.18
5	0.48	0.15	0.39	0.13	0.48	0.46	1.06
6	0.18	0.34	0.23	0.26	0.50	0.35	1.19
7	0.20	0.11	0.24	0.11	0.65	0.40	1.19
8	0.16	0.34	0.17	0.26	0.57	0.25	1.06
9	0.16	0.11	0.21	0.11	0.68	0.31	1.06
10	0.05	0.43	0.03	0.37	0.60	0.18	1.19
11	0.04	0.44	0.02	0.37	0.60	0.12	1.06

Tab. 5.6: Proprietà ottiche e termiche dei campioni assemblati con aerogel

Campione	τ_v	ρ_v	τ_e	ρ_e	α_e	g	U(W/m ² K)
A	0.525	0.109	0.497	0.102	0.401	0.594	1.2-1.5
B	0.535	0.105	0.488	0.095	0.417	0.589	1.2-1.5
C	0.545	0.110	0.502	0.100	0.398	0.598	1.2-1.5
D	0.402	0.106	0.383	0.093	0.524	0.510	1.2-1.5
E	0.386	0.110	0.319	0.100	0.581	0.396	1.2-1.5

Tab. 5.7: Proprietà ottiche e termiche dei campioni assemblati con TIM

5.6 Confronti tra i campioni analizzati

È possibile procedere ad un confronto tra i campioni 1, 2, 3, 4, 5 con aerogel e quelli A, B, C, D, E con geometric media capillare, poiché sono caratterizzati dalle stesse tipologie di lastra interna ed esterna. Come mostrato in fig. 5.14, per tutti i campioni, inserendo geometric media capillare al posto di aerogel in intercapedine, si ha una riduzione della trasmissione luminosa e del fattore solare, mentre la trasmittanza termica risulta superiore. Inoltre lo spessore complessivo è doppio nel caso di TIM e questo comporta limitazioni nelle applicazioni.

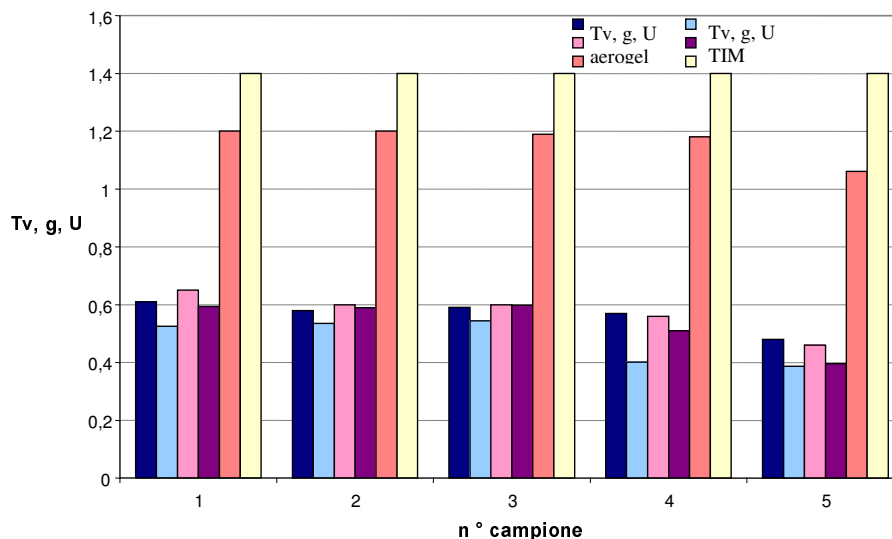


Fig. 5.14: Soluzioni con aerogel e TIM capillare a confronto

E' anche possibile confrontare i sistemi vetrati innovativi che coinvolgono aerogel, con quelli convenzionali, caratterizzati dalla stessa tipologia di lastra interna ed esterna, ma con intercapedine d'aria. Per i vetro-camera convenzionali si è fatto riferimento a dati di Letteratura, tratti dal "Manuale tecnico del vetro" della Saint-Gobain: tali dati sono relativi ad un'intercapedine d'aria di spessore pari a 12 mm. Con buona approssimazione è però possibile valutare la variazione dei parametri energetici e luminosi ottenuta inserendo aerogel, anche se lo spessore di quest'ultimo è 14 mm anziché 12.

Il confronto è mostrato in fig. 5.15, per i campioni 2-11; invece, per il campione 1 non sono stati reperiti dati per il confronto.

Per tutte le soluzioni considerate, l'aerogel in intercapedine comporta una riduzione della trasmissione luminosa e del fattore solare: il fattore di riduzione in % è riportato in fig. 5.16. La trasmissione luminosa si riduce mediamente del 30%, mentre il fattore solare in modo variabile dal 10 al 30 %. Il fatto rilevante è però la notevole riduzione della trasmittanza termica: inserendo aerogel in intercapedine si riduce il coefficiente globale di trasmissione del calore di almeno il 38%, fino a raggiungere il 60 %. In inverno, questo significa che il calore scambiato tra l'interno e l'esterno si riduce di un uguale fattore, consentendo così un notevole risparmio energetico.

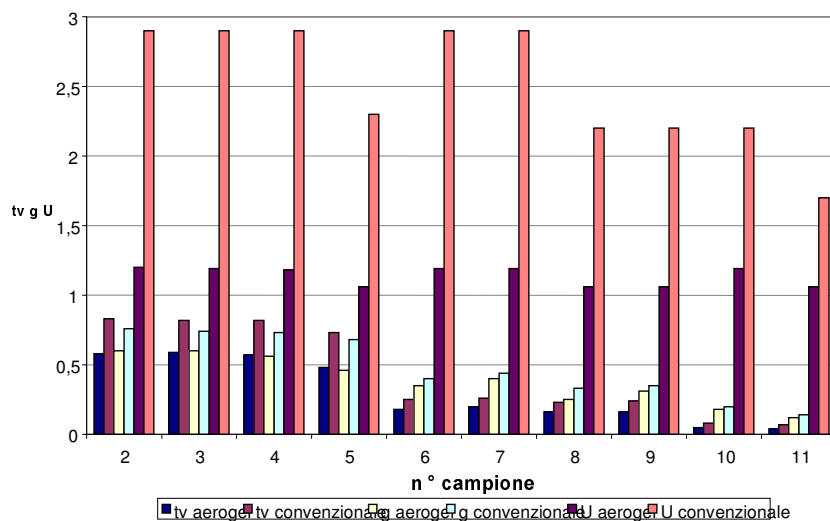


Fig. 5.15: Confronto tra i campioni con aerogel e i relativi sistemi convenzionali

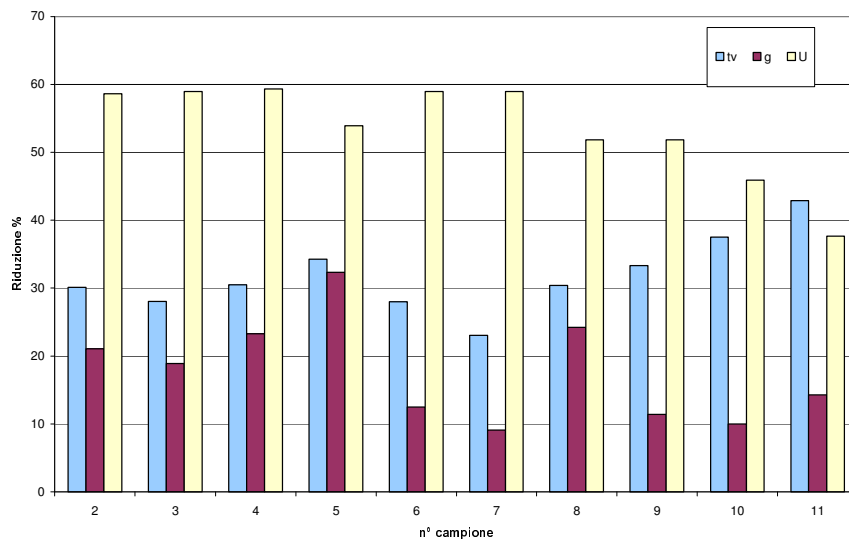


Fig. 5.16: Fattore di riduzione % dei parametri energetici e luminosi dovuto all'inserimento di aerogel in intercapedine

5.7 Considerazioni conclusive

Dalle analisi spettrofotometriche condotte sui campioni a disposizione si può concludere che per i campioni con aerogel i valori di trasmissione luminosa sono compresi tra 0,04 e 0,61, mentre quelli del fattore solare tra 0,12 e 0,65, in funzione della natura delle lastre di contenimento del materiale isolante trasparente; per i campioni con TIM la trasmissione luminosa varia da 0,39 a 0,55, mentre il fattore solare presenta valori compresi tra 0,4 e 0,6.

I dati mostrano inoltre che con i sistemi innovativi si ha una diminuzione del fattore di trasmissione luminosa del 25 – 30 % rispetto ai sistemi tradizionali, d'altra parte però l'adozione di soluzioni innovative consente un maggiore controllo delle dispersioni termiche attraverso l'involucro edilizio.

Dal punto di vista commerciale, il sistema geometrico capillare è prodotto da qualche anno in Germania e trova applicazione nel daylighting di molti edifici pubblici e del terziario e nella realizzazione di muri di Trombe. Per ora le applicazioni sono limitate al nord Europa, dove è più sentito il problema della riduzione dei consumi per il riscaldamento, a causa del clima molto freddo. Le prospettive future sono il miglioramento della durata delle prestazioni e la riduzione dell'assorbimento causato dal sistema geometrico. Tuttavia esso non troverà facilmente applicazione in edifici residenziali a causa dell'elevato spessore e dell'impossibilità della visione attraverso il materiale stesso.

Sistemi vetrati con aerogel hanno buone prospettive di diffusione e si prevede che possano sostituire nel medio termine le tradizionali finestre, tuttavia non esistono ancora vetrate di questo tipo in commercio.

CAPITOLO 6

MISURE E CALCOLO DELLE PRESTAZIONI DI PELLICOLE A CONTROLLO SOLARE APPLICATE A CAMPIONI DI VETRO

6.1 Introduzione

La carenza di dati in Letteratura relativi alle proprietà spettrofotometriche di materiali trasparenti non si concilia con il grado di dettaglio richiesto dagli odierni algoritmi di calcolo per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici. Ad esempio, per il calcolo dei carichi termici degli edifici sono richiesti dati relativi alla trasmittanza di pareti vetrate per diversi angoli di incidenza, mentre in Letteratura spesso è possibile reperire solo dati relativi all'incidenza normale. Inoltre, negli ultimi anni, sono stati proposti numerosi materiali trasparenti innovativi, con marcate prestazioni illuminotecniche ed energetiche, la cui caratterizzazione sperimentale è però molte volte incompleta.

Per mezzo della strumentazione in dotazione presso il Laboratorio, sono state misurate le proprietà di riflessione e trasmissione per diversi angoli di incidenza relative a pellicole a controllo solare applicate a vetri semplici e doppi di differente spessore.

I dati risultanti dalle elaborazioni possono essere implementati in codici di calcolo che sono di ausilio al progettista nella scelta del materiale trasparente ottimale per ogni situazione.

6.2 Le pellicole a controllo solare

6.2.1 Le pellicole riflettenti

Le pellicole riflettenti sono formate da una base di poliestere sulla quale viene posto un rivestimento estremamente sottile di alluminio vaporizzato a densità controllata: in una apposita camera a tenuta stagna l'alluminio viene scaldato, fino a raggiungere l'ebollizione, con conseguente emissione di vapore. Il poliestere viene quindi fatto passare attraverso il vapore all'interno della camera, dove minuscole particelle metalliche, venendo a contatto del materiale, condensano sulla superficie, conferendo così alla pellicola un alto potere di riflessione. Il prodotto finito è così completamente trasparente, nonostante sia rivestito in metallo, grazie al controllo della densità e dello spessore. Per ridurre il forte effetto specchio di color argento, la matrice in polimero è pervasa di pigmenti di colorazione: in questo modo le pellicole sono colorate direttamente e

non sono semplicemente rivestite di colore; si ottiene così la migliore stabilità e resistenza possibile all'abrasione, alla corrosione od infiltrazione di umidità.

Le pellicole riflettenti impiegate nell'indagine spettrofotometrica sono (fig. 6.1):

- pellicola riflettente di color argento;
- pellicola riflettente di color blu;
- pellicola riflettente di color verde.

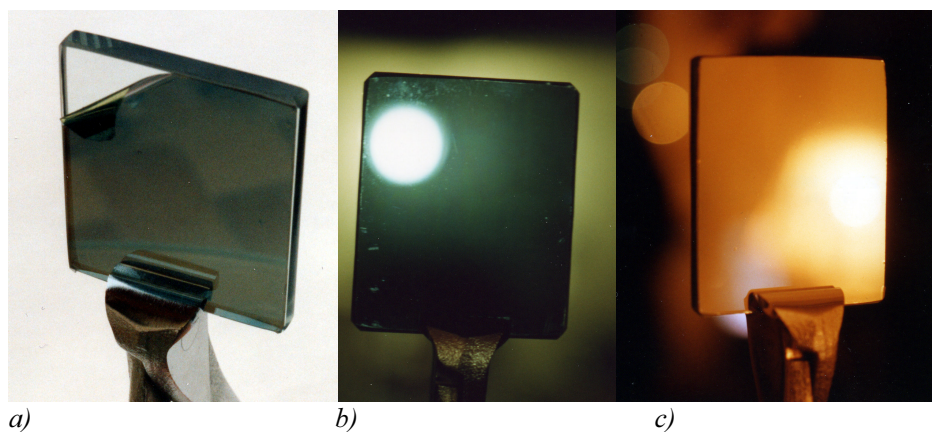


Fig. 6.1: Esempio di pellicola riflettente verde (a), blu (b), argento (c)

La pellicola riflettente blu, rispetto alle altre due, consente di eliminare l'effetto specchio all'interno dell'ambiente durante la notte. Questa infatti ha i pigmenti di colorazione sulla superficie del poliestere più esterno rispetto all'elemento vetrato. Ciò fa sì che la patina argentata, dovuta al deposito di alluminio vaporizzato (strato di metallizzazione), sia visibile dall'esterno grazie alla diversa disposizione del film di PET trasparente. Pertanto la privacy dell'ambiente interno sarà assicurata dall'effetto specchio, comportamento simile alla pellicola riflettente argento, mentre di notte sarà consentita la vista dell'esterno grazie alla colorazione blu.

Le pellicole riflettenti verde e argento, invece, presentano lo strato di PET impregnato con i pigmenti di colorazione e posizionato vicino all'elemento vetrato, mentre lo strato trasparente è più esterno, consentendo così all'edificio di avere una facciata colorata.

6.2.2 Le pellicole semiriflettenti

Le pellicole semiriflettenti sono frutto della ricerca e della sperimentazione nel settore aerospaziale; esse sono prodotte impiegando il processo detto *sputtering*. Si tratta di un procedimento tecnologico basato sulla polverizzazione ionica, in grado di ovviare al problema della bassa energia dell'atomo. La disintegrazione dei metalli, mediante bombardamento ionico, consente di raccogliere ed incorporare nella superficie della pellicola i singoli atomi emessi dal materiale colpito, formando così rivestimenti selettivi molto sottili.

Lo sputtering viene impiegato per depositare sulla pellicola uno strato atomico di diversi tipi di metalli (Al, Au, Ag, Cr, Cu ed altri), assicurando la realizzazione di films con una struttura ed una adesione migliore, quindi più affidabili e resistenti.

Il processo sputtering è di gran lunga il procedimento più sofisticato e più lento, tuttavia ha il potere di produrre pellicole molto durature, con rivestimenti uniformi e sottili che consentono una riduzione dell'effetto specchio del 30 ÷ 40%.



Fig. 6.2: Esempio di pellicola semiriflettente

6.2.3 Le pellicole a controllo UV

Le pellicole a controllo UV sono pellicole neutre dove sul poliestere trasparente viene spalmato un collante miscelato con inibitori UV (fig. 6.3). Queste pellicole consentono di abbattere il 99% delle radiazioni ultraviolette, ma non consentono di ridurre gli apporti di calore in estate in quanto il poliestere non ha subito nessun trattamento con metalli o ossidi metallici.

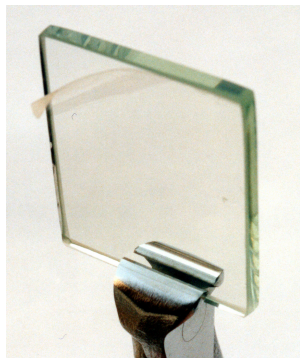


Fig. 6.3: Esempio di pellicola a controllo UV

6.3 Descrizione dei campioni

Tra le tipologie sopra descritte sono stati scelti alcuni campioni oggetto dell'indagine spettrofotometrica:

- pellicola riflettente di colore blu, spessore 0,038 mm;
- pellicola riflettente di colore argento, spessore 0,038 mm;
- pellicola semi – riflettente, spessore 0,035 mm.

Le pellicole sono state fornite dalla Intelligence Solar di Pisa e la loro applicazione è consentita solo sulla faccia interna della vetrata.

I materiali trasparenti sui quali sono state applicate le tre pellicole sono costituiti da 5 campioni di vetro, tutti di fabbricazione Saint-Gobain Vetro Italia:

- vetro float incolore, spessore lastra 4 mm;
- vetro float incolore, spessore lastra 6 mm;
- vetro camera CLIMALIT, costituito da due lastre di vetro planilux da 3 mm e da una intercapedine di aria secca da 6 mm;
- vetro camera CLIMALIT, costituito da due lastre di vetro planilux da 5 mm e da una intercapedine di aria secca da 6 mm;
- vetro camera CLIMALIT, costituito da due lastre di vetro planilux da 6 mm e da una intercapedine di aria secca da 6 mm.

Si sono così ottenuti 15 differenti campioni, ad ognuno dei quali è stato assegnato un codice alfanumerico per una sintetica visualizzazione dei risultati; l'elenco completo dei campioni, comprensivo anche dei vetri senza pellicola, è riportato in tabella 6.1.

Nome	Campione di vetro	Pellicola applicata	Spessore totale (mm)
VF4	Vetro float incolore, 4 mm	nessuna	4.000
VF6	Vetro float incolore, 6 mm	nessuna	6.000
VC3	Vetro camera, 3-6-3 mm	nessuna	12.000
VC5	Vetro camera, 5-6-5 mm	nessuna	16.000
VC6	Vetro camera, 6-6-6 mm	nessuna	18.000
VF4A	Vetro float incolore, 4 mm	Riflettente argento	4.038
VF6A	Vetro float incolore, 6 mm	Riflettente argento	6.038
VC3A	Vetro camera, 3-6-3 mm	Riflettente argento	12.038
VC5A	Vetro camera, 5-6-5 mm	Riflettente argento	16.038
VC6A	Vetro camera, 6-6-6 mm	Riflettente argento	18.038
VF4B	Vetro float incolore, 4 mm	Riflettente blu	4.038
VF6B	Vetro float incolore, 6 mm	Riflettente blu	6.038
VC3B	Vetro camera, 3-6-3 mm	Riflettente blu	12.038
VC5B	Vetro camera, 5-6-5 mm	Riflettente blu	16.038
VC6B	Vetro camera, 6-6-6 mm	Riflettente blu	18.038
VF4S	Vetro float incolore, 4 mm	Semi-riflettente	4.035
VF6S	Vetro float incolore, 6 mm	Semi-riflettente	6.035
VC3S	Vetro camera, 3-6-3 mm	Semi-riflettente	12.035
VC5S	Vetro camera, 5-6-5 mm	Semi-riflettente	16.035
VC6S	Vetro camera, 6-6-6 mm	Semi-riflettente	18.035

Tab. 6.1: Elenco e descrizione dei campioni

6.4 Risultati sperimentali

La campagna sperimentale è stata effettuata utilizzando lo spettrofotometro da banco Cary 2300 (cap. 1); per le misure al variare dell'angolo di incidenza ci si è avvalsi dell'apposito accessorio munito di goniometro (par. 1.2.6, cap. 1).

Il campione viene alloggiato nel supporto e si sceglie come angolo di partenza l'incidenza normale, cioè $\alpha = 0^\circ$; successivamente si interviene manualmente sul supporto e si individua un altro angolo. Si è scelto un $\Delta\alpha$ di 10° fino ad α pari a 80° , ottenendo per ogni campione analizzato nove misure della trasmittanza spettrale, al variare dell'angolo di incidenza.

Per la determinazione della riflessione spettrale è stata impiegata la sfera integratrice e sono state effettuate misure in un range di lunghezze d'onda compreso tra 300 e 2000 nm.

I risultati delle misure di trasmittanza media (%) in funzione della lunghezza d'onda (nm), al variare dell'angolo di incidenza della radiazione, per alcuni angoli significativi, sono mostrati nelle figure 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9.

Per brevità di trattazione si riportano, a titolo di esempio, solo i grafici relativi a due campioni di vetro con le diverse pellicole: il vetro float da 6 mm ed il campione di vetro camera CLIMALIT 3-6-3 mm.

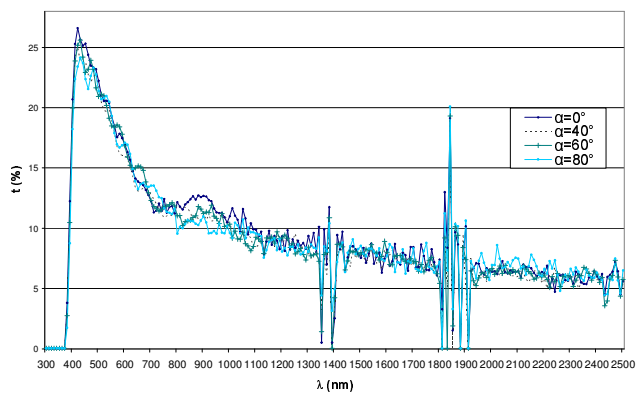


Fig. 6.4: Andamento della trasmittanza spettrale per il campione VF6A

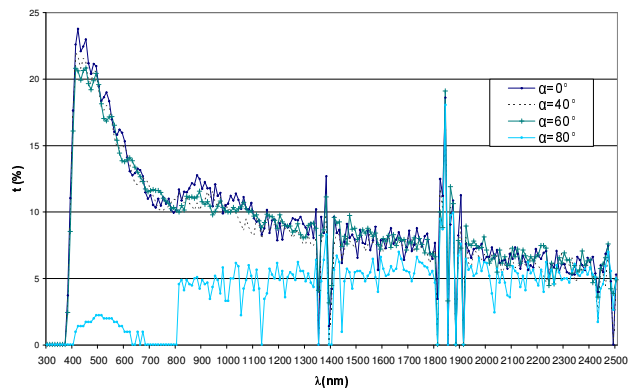


Fig. 6.5: Andamento della trasmittanza spettrale per il campione VC3A

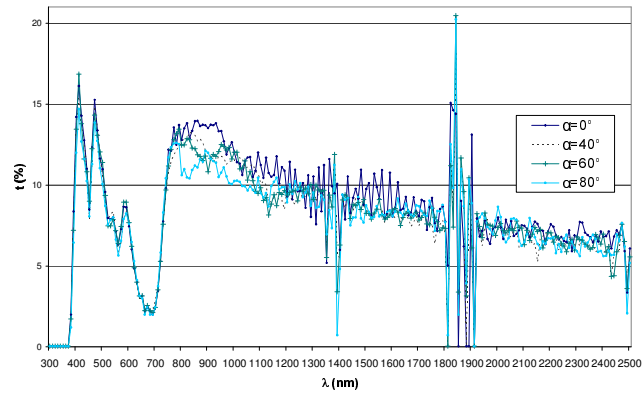


Fig. 6.6: Andamento della trasmittanza spettrale per il campione VF6B

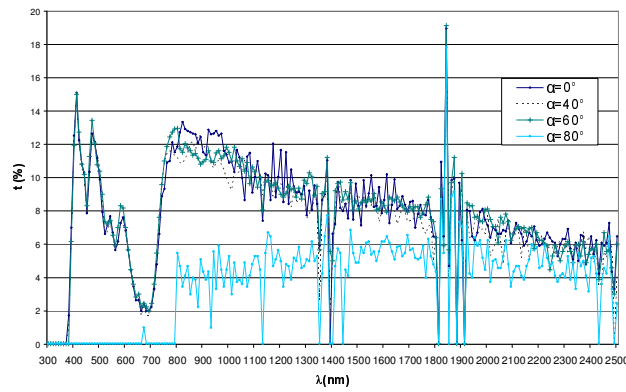


Fig. 6.7: Andamento della trasmittanza spettrale per il campione VC3B

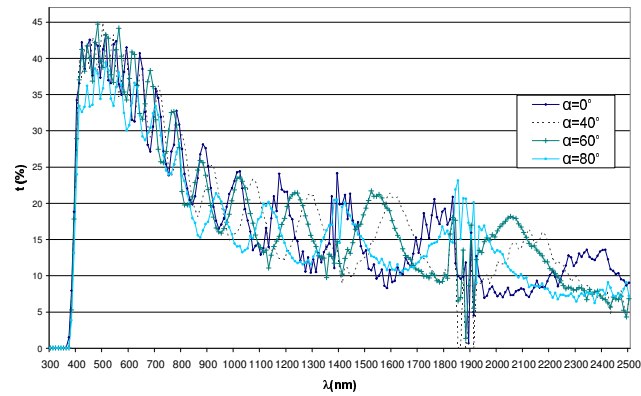


Fig. 6.8: Andamento della trasmittanza spettrale per il campione VF6S

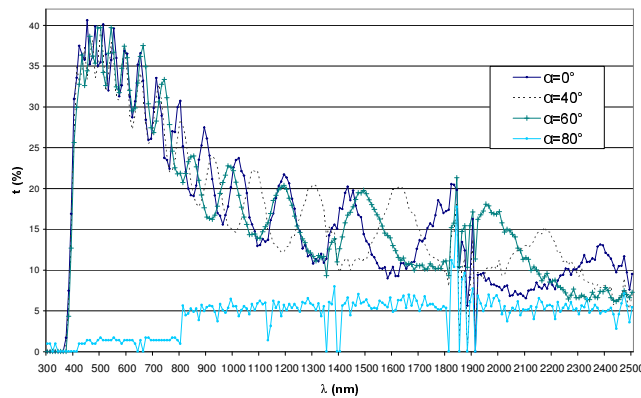


Fig. 6.9: Andamento della trasmittanza spettrale per il campione VC3S

I risultati sperimentali di riflessione spettrale (%) sono mostrati nelle figure 6.10, 6.11, 6.12; in ogni grafico si è scelto di rappresentare l'andamento della riflessione relativo a differenti campioni di vetro, con la stessa tipologia di pellicola antisolare applicata.

A partire dai risultati sperimentali di trasmissione e riflessione spettrale è stato possibile calcolare, seguendo le indicazioni fornite dalla normativa EN 410,

alcuni parametri che caratterizzano il comportamento dei materiali analizzati, ed in particolare:

- il fattore di trasmissione della luce τ_v per l'illuminante D65;
- il fattore di riflessione nel visibile ρ_v ;
- i fattori di trasmissione solare diretta τ_e ;
- il fattore di riflessione solare diretta ρ_e .

I risultati sono mostrati nelle tabelle 6.2, 6.3 e 6.4.

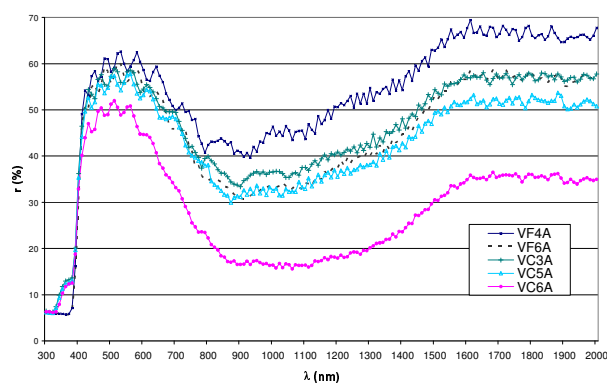


Fig. 6.10: Andamento della riflessione spettrale per i campioni VF4A, VF6A, VC3A, VC5A, VC6A

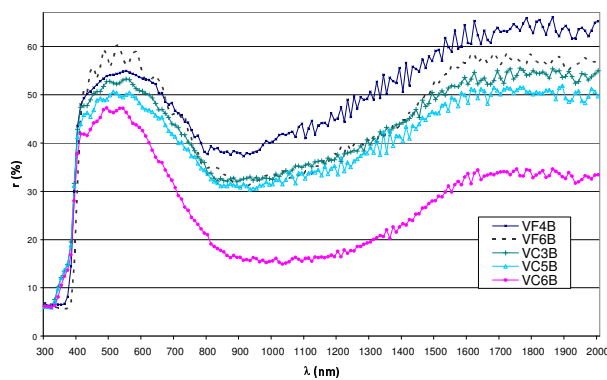


Fig. 6.11: Andamento della riflessione spettrale per i campioni VF4B, VF6B, VC3B, VC5B, VC6B

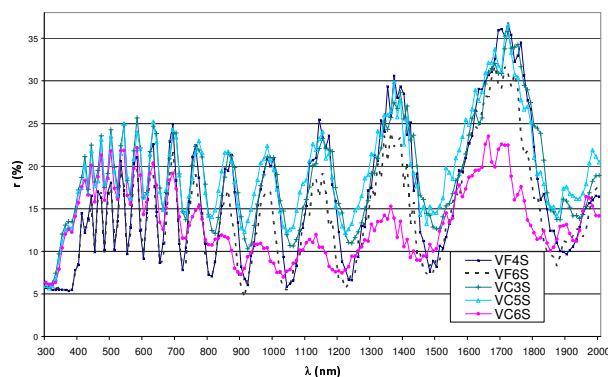


Fig. 6.12: Andamento della riflessione spettrale per i campioni VF4S, VF6S, VC3S, VC5S, VC6S

CAMPIONE	τ_{α}								
	$\alpha=0^{\circ}$	$\alpha=10^{\circ}$	$\alpha=20^{\circ}$	$\alpha=30^{\circ}$	$\alpha=40^{\circ}$	$\alpha=50^{\circ}$	$\alpha=60^{\circ}$	$\alpha=70^{\circ}$	$\alpha=80^{\circ}$
VF4A	0.188	0.168	0.168	0.171	0.176	0.181	0.184	0.182	0.139
VF6A	0.190	0.174	0.175	0.177	0.182	0.188	0.190	0.187	0.180
VC3A	0.169	0.158	0.157	0.159	0.163	0.161	0.162	0.134	0.017
VC5A	0.166	0.157	0.155	0.154	0.156	0.166	0.168	0.044	0.016
VC6A	0.134	0.149	0.148	0.153	0.150	0.157	0.155	0.011	0.001
VF4B	0.075	0.073	0.073	0.074	0.074	0.077	0.077	0.072	0.054
VF6B	0.078	0.076	0.075	0.076	0.076	0.078	0.078	0.074	0.069
VC3B	0.069	0.068	0.066	0.068	0.069	0.072	0.073	0.063	0.001
VC5B	0.070	0.068	0.067	0.065	0.063	0.073	0.072	0.009	0.008
VC6B	0.064	0.063	0.063	0.064	0.064	0.062	0.065	0.034	0.001
VF4S	0.386	0.382	0.383	0.386	0.388	0.399	0.392	0.355	0.222
VF6S	0.383	0.380	0.380	0.381	0.385	0.393	0.385	0.350	0.253
VC3S	0.351	0.346	0.342	0.340	0.339	0.351	0.351	0.203	0.013
VC5S	0.338	0.340	0.346	0.353	0.359	0.375	0.335	0.020	0.001
VC6S	0.328	0.338	0.338	0.341	0.374	0.361	0.344	0.006	0.001

Tab. 6.2: Fattore di trasmissione della luce relativo alle diverse incidenze per i campioni esaminati

CAMPIONE	τ_e								
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=40^\circ$	$\alpha=50^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=70^\circ$	$\alpha=80^\circ$
VF4A	0.141	0.130	0.130	0.131	0.134	0.136	0.138	0.134	0.102
VF6A	0.142	0.131	0.131	0.131	0.134	0.136	0.139	0.134	0.103
VC3A	0.128	0.122	0.122	0.122	0.123	0.122	0.124	0.104	0.022
VC5A	0.127	0.122	0.119	0.119	0.120	0.127	0.126	0.043	0.024
VC6A	0.110	0.105	0.105	0.107	0.105	0.110	0.105	0.020	0.016
VF4B	0.092	0.088	0.088	0.088	0.090	0.092	0.092	0.087	0.066
VF6B	0.092	0.087	0.088	0.086	0.087	0.087	0.088	0.084	0.074
VC3B	0.083	0.080	0.078	0.079	0.081	0.084	0.084	0.074	0.019
VC5B	0.082	0.080	0.079	0.078	0.076	0.085	0.084	0.033	0.019
VC6B	0.067	0.066	0.066	0.065	0.065	0.064	0.066	0.031	0.017
VF4S	0.286	0.285	0.284	0.285	0.289	0.295	0.290	0.260	0.165
VF6S	0.273	0.271	0.269	0.270	0.274	0.276	0.269	0.242	0.179
VC3S	0.256	0.254	0.250	0.247	0.248	0.255	0.252	0.203	0.026
VC5S	0.246	0.248	0.250	0.252	0.258	0.267	0.243	0.039	0.019
VC6S	0.216	0.220	0.219	0.221	0.224	0.229	0.218	0.020	0.016

Tab. 6.3: Fattore di trasmissione solare diretta relativo alle diverse incidenze per i campioni esaminati

CAMPIONE	ρ_v	ρ_e
VF4A	0.599	0.505
VF6A	0.571	0.441
VC3A	0.564	0.456
VC5A	0.551	0.434
VC6A	0.482	0.324
VF4B	0.540	0.462
VF6B	0.524	0.414
VC3B	0.519	0.423
VC5B	0.492	0.403
VC6B	0.447	0.306
VF4S	0.154	0.148
VF6S	0.150	0.134
VC3S	0.201	0.187
VC5S	0.202	0.188
VC6S	0.186	0.145

Tab. 6.4: Fattori di riflessione nel visibile e nel solare per i diversi campioni esaminati

6.5 Confronti tra i campioni analizzati

I risultati sperimentali consentono di evidenziare l'influenza sulle prestazioni energetiche ed illuminotecniche di diversi parametri quali lo spessore del campione, l'angolo di incidenza, il tipo di pellicola, come descritto nel seguito.

Influenza dell'angolo di incidenza della radiazione nelle misure di trasmittanza

Come mostrato nelle fig. 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9, l'andamento qualitativo della trasmittanza non differisce molto al variare dell'angolo di incidenza (α) per i diversi campioni: le curve tendono a traslare poco rispetto alla configurazione originaria ($\alpha=0^\circ$); si evidenziano marcate differenze solo per angoli di incidenza elevati ($\alpha = 70^\circ - 80^\circ$).

Influenza dello spessore del campione nelle misure di trasmittanza

Per ciascun tipo di pellicola antisolare gli andamenti della trasmittanza al variare della tipologia e dello spessore del campione di vetro evidenziano valori simili; i valori dei coefficienti di trasmissione nel visibile e il fattore di trasmissione solare diretta (tabelle 6.2 e 6.3) mostrano invece una modesta diminuzione di tali parametri all'aumentare dello spessore del campione.

Influenza del tipo di pellicola

Lo studio dell'andamento qualitativo della trasmittanza evidenzia alcune peculiarità del materiale: per le pellicole riflettenti nel campo dell'infrarosso si evidenziano fenomeni di assorbimento selettivo, caratterizzati da picchi in corrispondenza di $\lambda=1350\div1400$ nm e $1800\div1900$ nm, dovuti ad impurità presenti durante la fase di deposizione di ossidi metallici sul poliestere (fig. 6.4, 6.5, 6.6, 6.7). Nelle pellicole sputtered, i film sono depositati ad una pressione inferiore a 10^{-2} torr, ottenendo così una minore presenza di impurità; questo comporta dei fenomeni di assorbimento selettivo meno pronunciati che nelle pellicole riflettenti (fig. 6.8, 6.9).

Per effettuare un confronto tra le tre differenti pellicole si considerano solamente le misure relative all'incidenza normale ($\alpha=0^\circ$), poiché, come visto in precedenza, al variare dell'angolo i risultati non si discostano molto. Per le pellicole riflettenti blu ed argento si ha una forte riduzione della trasmittanza nel visibile rispetto ad un vetro chiaro: se da un lato la riduzione del fattore di trasmissione luminosa provoca una diminuzione dell'illuminamento all'interno dell'ambiente, dall'altro l'adozione di tali soluzioni innovative consente un maggiore controllo degli apporti termici (trasmissione della radiazione solare infrarossa), attraverso l'involucro edilizio; infatti le pellicole riflettenti forniscono

valori del coefficiente di trasmissione nell'intervallo dell'infrarosso inferiori al 5÷10%.

Nei campioni con applicata la pellicola sputtered, invece, l'andamento della trasmittanza è differente rispetto alle altre pellicole: la curva ha un andamento sinusoidale caratterizzato da valori massimi nel visibile (circa il 25÷30% di trasmissione in più rispetto alle riflettenti) e da una trasmittanza media nell'IR intorno al 20÷25%.

Per quanto concerne le misure di riflessione, si può notare che le pellicole riflettenti blu ed argento presentano valori dei fattori di riflessione visibile e solare dell'ordine del 40-50%; i grafici mostrano che la percentuale di radiazione riflessa nel campo del visibile supera il 60%, a dimostrazione del forte effetto specchio di tali pellicole.

La pellicola di tipo sputtered presenta invece una marcata riduzione dell'effetto specchio ($\rho_v=15-20\%$), ma risulta penalizzata dal punto di vista delle prestazioni energetiche poiché si ha un decremento della percentuale dell'energia solare riflessa fino a valori del 15%.

Influenza della pellicola

Per una completa valutazione delle prestazioni illuminotecniche ed energetiche delle pellicole antisolari, si sono infine misurati i coefficienti di trasmissione e di riflessione spettrale, relativi alla sola incidenza normale, per i cinque campioni di vetro esaminati senza pellicole; a partire dai dati misurati sono stati calcolati i parametri precedentemente descritti per poter effettuare un confronto per i diversi campioni in assenza ed in presenza delle pellicole a controllo solare (tab. 6.5). A titolo di esempio, il confronto è mostrato in fig. 6.13 per il campione di vetro camera CLIMALIT 3-6-3 mm. Dal grafico si evidenzia che l'applicazione delle pellicole comporta una marcata riduzione della trasmissione luminosa fino a valori di 0,069 per la pellicola riflettente blu; il

CAMPIONE	τ_v	τ_e	ρ_v	ρ_e
VF4	0.902	0.823	0.093	0.071
VF6	0.892	0.776	0.090	0.067
VC3	0.812	0.700	0.157	0.146
VC5	0.790	0.640	0.149	0.120
VC6	0.778	0.620	0.149	0.109

Tab. 6.5: Fattori di trasmissione luminosa τ_v , di trasmissione solare diretta τ_e e fattori di riflessione nel visibile ρ_v e di riflessione solare ρ_e , relativi ad incidenza normale, per i campioni senza pellicola

fattore di trasmissione solare decresce di pari quantità e consente un'efficace riduzione degli apporti solari negli ambienti. La pellicola sputtered, invece, presenta una buona trasmissione luminosa ma è penalizzata dal punto di vista delle prestazioni energetiche: la riflessione dell'energia solare risulta pari a circa la metà rispetto ad altre pellicole riflettenti.

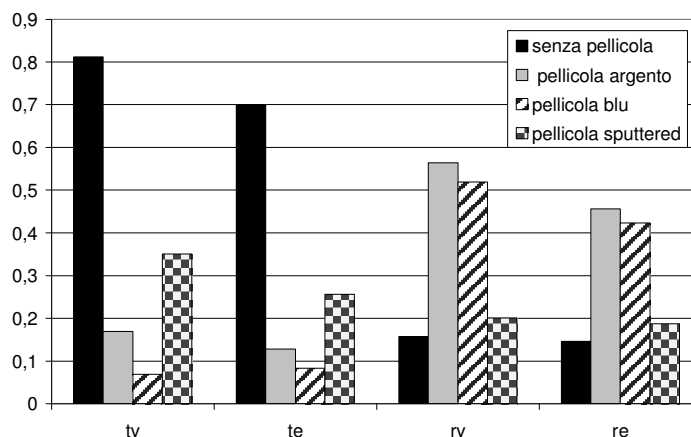


Fig. 6.13: Confronto dei parametri energetici ed illuminotecnici per il campione VC3 in assenza e in presenza di pellicole a controllo solare

6.6 Considerazioni conclusive

Le misure effettuate per la valutazione delle proprietà ottiche di vetri con pellicole a controllo solare consentono di valutare l'influenza sulle prestazioni energetiche e illuminotecniche di diversi parametri quali lo spessore del campione, l'angolo di incidenza ed il tipo di pellicola.

Per quanto concerne l'influenza dell'angolo di incidenza della radiazione, si evidenzia che l'andamento della trasmittanza presenta marcate differenze solo per angoli elevati ($\alpha=70^\circ-80^\circ$); la tipologia e lo spessore del campione di vetro, sul quale è applicata la pellicola, comportano una modesta influenza sui valori delle grandezze misurate. Inoltre, le pellicole riflettenti blu ed argento presentano valori di trasmittanza nell'intervallo dell'infrarosso inferiori al 5÷10%, ma comportano anche una forte riduzione della trasmittanza nel visibile rispetto ad un vetro chiaro; i valori dei fattori di riflessione visibile e solare sono dell'ordine del 40-50% e la percentuale di radiazione riflessa nel campo del visibile supera il 60%, con un conseguente effetto specchio. Le pellicole sputtered evidenziano

invece un differente comportamento dovuto alla minore riflessione dell'energia solare e della luce, ottenendo così una riduzione dell'effetto specchio. Ulteriori sviluppi della ricerca prevedono l'estensione della campagna di misure ad altri campioni di vetri camera disponibili in commercio unitamente all'impiego dei dati ottenuti in codici di calcolo per la valutazione delle prestazioni energetiche ed illuminotecniche degli edifici.

CAPITOLO 7

MISURE SPETTROFOTOMETRICHE SU VETRI DI INTERESSE STORICO - ARTISTICO

7.1 Le vetrate artistiche e l'influenza dell'invecchiamento sulle proprietà di trasparenza del vetro

La corretta conservazione dei beni di interesse storico e artistico può essere assicurata solo nel caso in cui i beni siano collocati in ambienti dove le condizioni termiche, igrometriche e luminose possano essere controllate entro valori tali da limitare i processi di degrado; stabilire quali siano le condizioni ottimali per la conservazione risulta essere piuttosto complesso poiché esse non dipendono solo dalle caratteristiche chimico – fisiche dei materiali, ma anche dalla storia climatica dell'opera, cioè dall'andamento delle condizioni cui è stata sottoposta nel corso dei secoli.

Anche la conservazione delle vetrate rientra in questo contesto ed il loro restauro richiede un adeguato coordinamento delle indagini e degli interventi di ordine tecnico, chimico e fisico.

Le vetrate artistiche, dopo essere state usate nelle grandi chiese rinascimentali, hanno avuto grande fortuna soprattutto dall'inizio del '900, tuttavia sin dai tempi del Vasari la procedura per ottenere una vetrata artistica è rimasta inalterata.

Occorre dapprima predisporre un bozzetto, poi si passa ad un disegno in scala 1:1 in cui si indicano tutti i tipi di vetro da utilizzare; ogni vetro viene poi tagliato a misura sul disegno e si procede all'impiombatura tramite profilati di piombo ad H in cui il vetro viene inserito e i profilati vengono saldati tra loro con delle saldature a stagno. In alternativa, nelle vetrate a disegno geometrico, dove non è necessario l'uso di un materiale malleabile per seguire le diverse linee, si possono usare anche profilati in rame o in ottone.

Nelle grandi vetrate delle cattedrali la trama delle sagome è molto fitta e i telai perimetrali sono in ferro battuto, per sostenere meglio il peso, che è piuttosto notevole.

Come per la maggior parte dei materiali, anche per il vetro le principali forme di degrado sono causate dall'acqua che, sotto forma di umidità, di pioggia o di condensa, innesca un processo di corrosione la cui durata e intensità sono fortemente condizionate dall'equilibrio microclimatico all'interno e all'esterno dell'edificio.

Molto frequentemente si hanno problemi di accumulo di sporco generato all'esterno soprattutto dall'inquinamento, che si deposita sia nel piombo sia nel vetro, in particolar modo ai bordi dei pannelli, mentre all'interno dell'edificio si possono avere le cause più disparate (per esempio il fumo delle candele nelle chiese).

La corrosione determina un effetto di opacizzazione delle lastre, sia all'interno che all'esterno, dove si può avere un primo stadio di microcrateri che si innestano soprattutto in zone dove sono già presenti dei difetti in superficie.

Altre forme di degrado sono determinate da alterazioni che interessano direttamente il piombo dei supporti in cui il vetro è inserito e lo stucco attraverso il quale esso è fissato ai telai. Il vetro è un materiale rigido, con scarsa resistenza a flessione; per evitare che le lastre vengano sottoposte a sforzi eccessivi (soprattutto a causa del vento), questi vengono assorbiti dal piombo della legatura, che è un materiale tenero e flessibile, mentre lo stucco, costituito solitamente da uno o più leganti organici con una carica di polvere, ed eventualmente anche coloranti, completa l'azione evitando che tali sforzi si trasmettano al vetro. Tuttavia mentre con il tempo lo stucco tende a seccarsi e a sgretolarsi, perdendo la sua elasticità, le legature di piombo tendono ad irrigidirsi favorendo così la deformazione e talvolta anche la rottura delle vetrate.

Il Laboratorio di Controlli Ambientali dell'Università di Perugia da molti anni si occupa dello studio delle vetrate antiche realizzate con vetri policromi; gli studi hanno riguardato temi quali il monitoraggio delle condizioni termofotometriche, il controllo della qualità dell'aria, la simulazione delle condizioni di stress dovute a sollecitazioni termiche e l'influenza dell'invecchiamento sulle proprietà spettrofotometriche di trasparenza e riflessione di vetri originali e impiegati per il restauro delle vetrate artistiche. Nei paragrafi che seguono si vuole porre l'attenzione proprio su questo ultimo aspetto.

7.2 Misure spettrofotometriche su campioni di vetro nuovi e invecchiati con un processo accelerato in camera climatica

Lo scopo dell'indagine è definire le proprietà di trasparenza e riflessione di campioni di vetro colorato impiegati nel restauro di vetrate artistiche sia nuovi che sottoposti ad invecchiamento accelerato; i risultati sono utilizzati per una serie di confronti, con l'obiettivo finale di valutare la correlazione esistente tra i processi di invecchiamento e tali proprietà.

I campioni, in numero di 10, sono diversi tra loro per colore, tecnica di colorazione e spessore (tab. 7.1); la colorazione di 7 dei 10 campioni esaminati è effettuata in pasta, uno dei campioni, il n. 2, non presenta colorazione, il

campione n. 5 è un vetro trasparente colorato in bagno ed infine il campione n. 6 è colorato sia in pasta sia superficialmente da un solo lato mediante la tecnica della grisaglia.




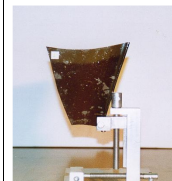
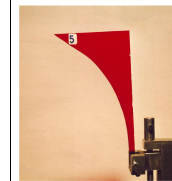
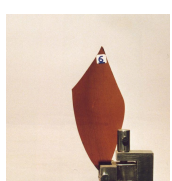
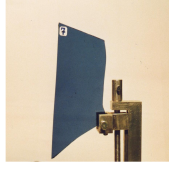
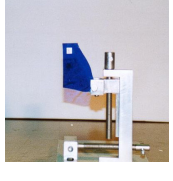
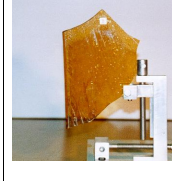

Ciascun vetro è stato tagliato in due parti, una delle quali è stata sottoposta ad un processo di invecchiamento accelerato in camera climatica (fig. 7.1).

Per la definizione del processo di invecchiamento si è fatto riferimento alla normativa UNI 10593 – 2 che riguarda le vetrate isolanti per impieghi in edilizia; tuttavia costituisce l'unico riferimento che è stato possibile reperire in materia.

Il ciclo ha la durata complessiva di 11 settimane e si compone di due parti:

- un periodo di 28 giorni, durante i quali si attuano n. 56 cicli di 12 ore, con temperature variabili tra -18°C e +53°C, con gradiente di 14°C/h e con umidità relativa superiore al 95%;
- un periodo di 49 giorni a temperatura costante, pari a 58°C e umidità relativa superiore al 95%.

Durante il ciclo è stato effettuato il monitoraggio delle temperature superficiali dei vetri; un esempio è riportato in fig. 7.2.

<p>N.1 – viola S = 2.71 mm</p> 	<p>N. 2 - incolore S = 2.71 mm</p> 	<p>N. 3 – viola S = 3.74 mm</p> 	<p>N. 4 - verde S = 2.84 mm</p> 	<p>N. 5 - rosso S = 2.65 mm</p> 
<p>N.6 marrone S = 1.96 mm</p> 	<p>N. 7 - blu S = 3.96 mm</p> 	<p>N. 8 - blu S = 3.39 mm</p> 	<p>N. 9 - ambra S = 3.52 mm</p> 	<p>N. 10 - viola S = 2.38 mm</p> 

Tab. 7.1: Caratteristiche dei campioni di vetro esaminati



Fig. 7.1: Camera climatica impiegata per l'invecchiamento dei campioni di vetro

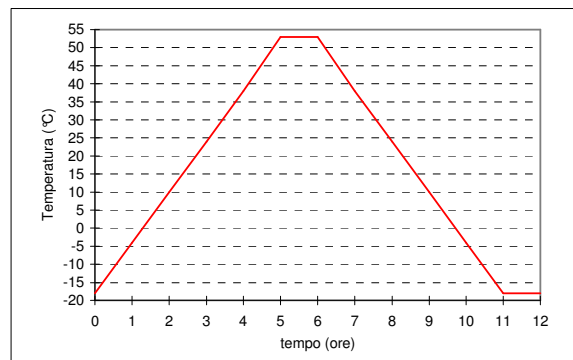


Fig. 7.2: Monitoraggio delle condizioni termoigrometriche durante una porzione del processo di invecchiamento

Le misure spettrofotometriche di trasmissione sono state effettuate con il metodo standard e ripetute con la sfera integratrice, allo scopo di verificare eventuali fenomeni di diffondenza dei campioni; le misure di riflessione sono state effettuate per mezzo della sfera integratrice.

I risultati delle misure di trasmissione sono illustrati in figura 7.3.

Misure spettrofotometriche su materiali trasparenti...

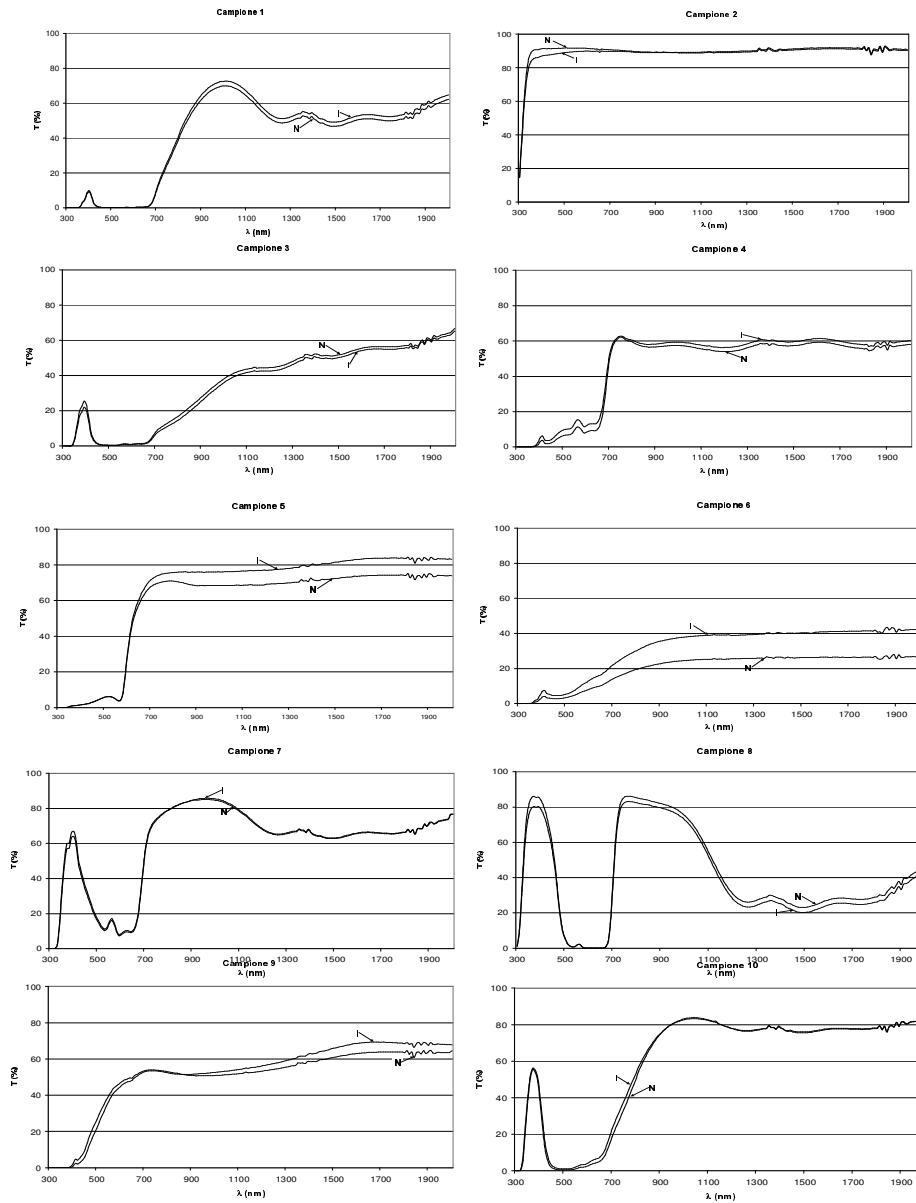


Fig. 7.3: Coefficiente di trasmissione dei campioni nuovi (N) e invecchiati (I)

I campioni colorati in pasta, sia nuovi che invecchiati (nn. 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10), presentano valori tra loro pressoché coincidenti del coefficiente di trasmissione; inoltre, poiché i risultati delle misure eseguite con il metodo standard coincidono con quelli delle misure effettuate con la sfera integratrice, se ne deduce che i campioni stessi non sono diffondenti.

Il campione n. 6 nuovo, colorato con la tecnica della grisaglia, presenta con il metodo standard valori diversi del coefficiente di trasmissione rispetto al corrispondente campione invecchiato. Ripetendo le misure con la sfera integratrice si è riscontrato che entrambi i campioni n. 6 presentano andamenti coincidenti del coefficiente di trasmissione, ma più elevati rispetto alle misure con il metodo standard; i campioni risultano pertanto diffondenti.

Considerazioni analoghe valgono per il campione n. 5, colorato in bagno (fig. 7.4).

Si può pertanto concludere che l'invecchiamento non influenza le proprietà di trasmissione.

Sono state anche valutate le proprietà di riflessione di tutti i campioni a disposizione su entrambi i lati, indicati con x ed y; si è quindi proceduto al confronto tra il lato x di ogni campione nuovo e il lato x del corrispondente invecchiato, così anche per il lato y.

Per i campioni nn. 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 e 10 i valori del coefficiente di riflessione risultano bassi, essendo compresi tra il 4% e l'8%; sia per i vetri nuovi che per quelli invecchiati la riflessione dei lati x ed y assume gli stessi valori; inoltre il processo di invecchiamento non influenza le proprietà di riflessione.

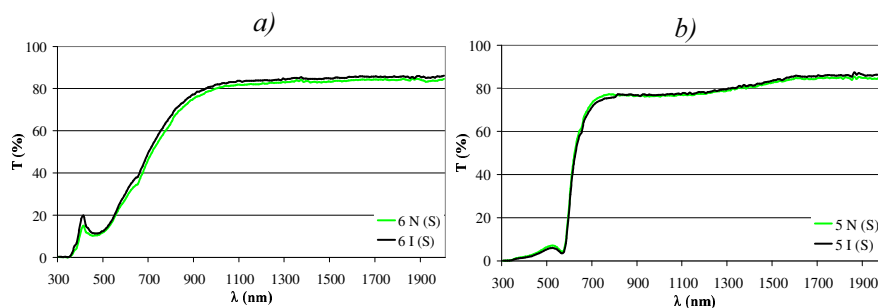


Fig. 7.4: Coefficiente di trasmissione spettrale a) campione n. 6 nuovo (N) e invecchiato (I), b) campione n. 5 nuovo (N) e invecchiato (I)

Solo il campione n. 6, colorato a grisaglia sul lato x, presenta valori di riflessione maggiori nel caso di invecchiamento (fig. 7.5a), mentre il processo di invecchiamento risulta ininfluente sul lato y (fig. 7.5b), non decorato con la tecnica della grisaglia.

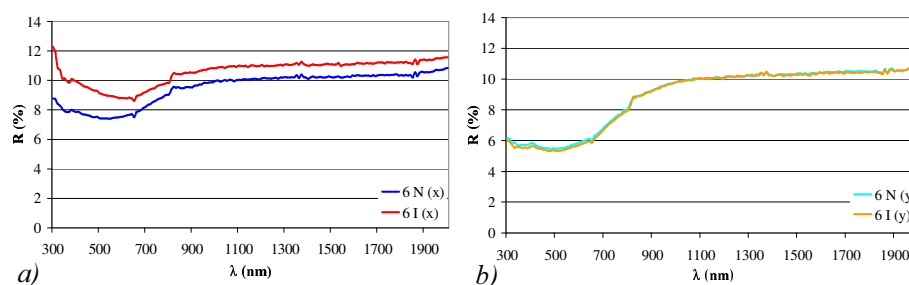


Fig. 7.5: a) Andamento della riflessione del campione n.6 nuovo (N) e invecchiato (I) sul lato x; b) Andamento della riflessione del campione n.6 nuovo (N) e invecchiato (I) sul lato y

Sono inoltre stati calcolati i fattori di trasmissione e riflessione nel visibile, come mostrato nella tabella 7.2; si può notare che il processo di invecchiamento non influenza i fattori di trasmissione e riflessione tranne nel caso del campione n. 6 in cui sul lato x la differenza del fattore di riflessione nel solare tra vetro invecchiato e nuovo è del 14% e del fattore di trasmissione nel visibile dell'87%.

In conclusione, i risultati ai quali si è pervenuti evidenziano che il processo di invecchiamento non incide sulle proprietà spettrofotometriche dei campioni esaminati; solamente per il campione decorato con la tecnica della grisaglia è stato riscontrato un incremento del coefficiente di riflessione nel visibile.

Tale risultato ha reso necessaria una ricerca più approfondita oggetto degli studi seguenti.

Campione		Colore	Metodo di colorazione	Spessore (mm)	τ_v	Differenza I – N (%)	ρ_v	Differenza I – N (%)
1	N	Viola	In pasta	2.71	0.0015	13.33	0.0466	-4.51
	I				0.0017		0.0445	
2	N	Trasparente	In pasta	2.27	0.9159	-2.24	0.0801	1.00
	I				0.8954		0.0809	
3	N	Viola	In pasta	3.74	0.0096	-22.92	0.0450	4.67
	I				0.0074		0.0471	
4	N	Verde bottiglia	In pasta	2.84	0.0861	42.16	0.0456	8.55
	I				0.1224		0.0495	
5	N	Rosso rubino	In bagno	2.65	0.1445	-9.27	0.0511	-0.59
	I				0.1311		0.0508	
6	N	Rosa incarnato	Grisaglia	1.96	0.2121	7.83	0.0479	86.85
	I				0.2287		0.0895	
7	N	Blu	In pasta	3.96	0.1345	-6.77	0.0499	1.00
	I				0.1254		0.0504	
8	N	Blu cobalto	In pasta	3.39	0.0277	-6.14	0.0440	0.45
	I				0.0260		0.0442	
9	N	Ambra	In pasta	3.52	0.3913	-7.90	0.0584	0.17
	I				0.3604		0.0585	
10	N	Viola	In pasta	2.38	0.0168	66.07	0.0428	1.17
	I				0.0279		0.0433	

Tab. 7.2: Fattori di trasmissione e riflessione nel visibile

7.3 Misure spettrofotometriche su campioni decorati con varie tecniche superficiali

Come esposto nel paragrafo 7.2, il processo di invecchiamento influenza le proprietà di riflessione nel campo del visibile dei vetri con colorazione superficiale, ad esempio a grisaglia; in particolare il coefficiente di riflessione spettrale e il fattore di riflessione nel visibile del campione invecchiato colorato a grisaglia risultano superiori ai corrispondenti valori del campione nuovo.

Tale risultato, che può essere interpretato come un aumento della levigatezza superficiale del campione invecchiato per effetto dell'influenza delle condizioni ambientali, ha fornito uno spunto per approfondire la ricerca su campioni con colorazioni superficiali quali smalti, velature a smalto e grisaglia forniti da uno studio di restauro di Roma.

Alcuni dei campioni esaminati sono frammenti di vetrate antiche situate nelle Cattedrali di Arezzo e Cortona, mentre altri sono nuovi, comunemente impiegati negli interventi di restauro.

Sono quindi state misurate le proprietà di trasparenza e riflessione di tali campioni mediante indagini spettrofotometriche, al fine di effettuare un confronto tra campioni nuovi e antichi, colorati a grisaglia o con altre tecniche, e di valutare l'influenza della tecnica di colorazione su tali proprietà.

Degli otto campioni di vetro analizzati quattro sono nuovi (n. 1, 2, 3, 4) e sono colorati sia in pasta sia con tecniche superficiali (smalto, velatura a smalto, grisaglia), mentre gli altri quattro (n. 5, 6, 7, 8) sono antichi, provengono dalle Cattedrali di Arezzo e Cortona e sono tutti decorati con la tecnica della grisaglia (fig. 7.6). Per ciascun campione sono identificate le due facce, nel seguito denominate x (lato decorazione) e y (altro lato).

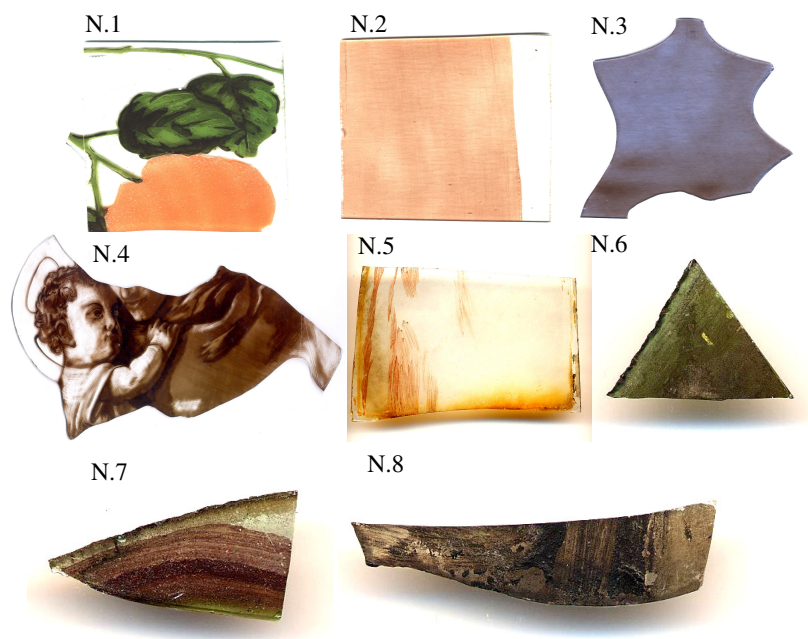
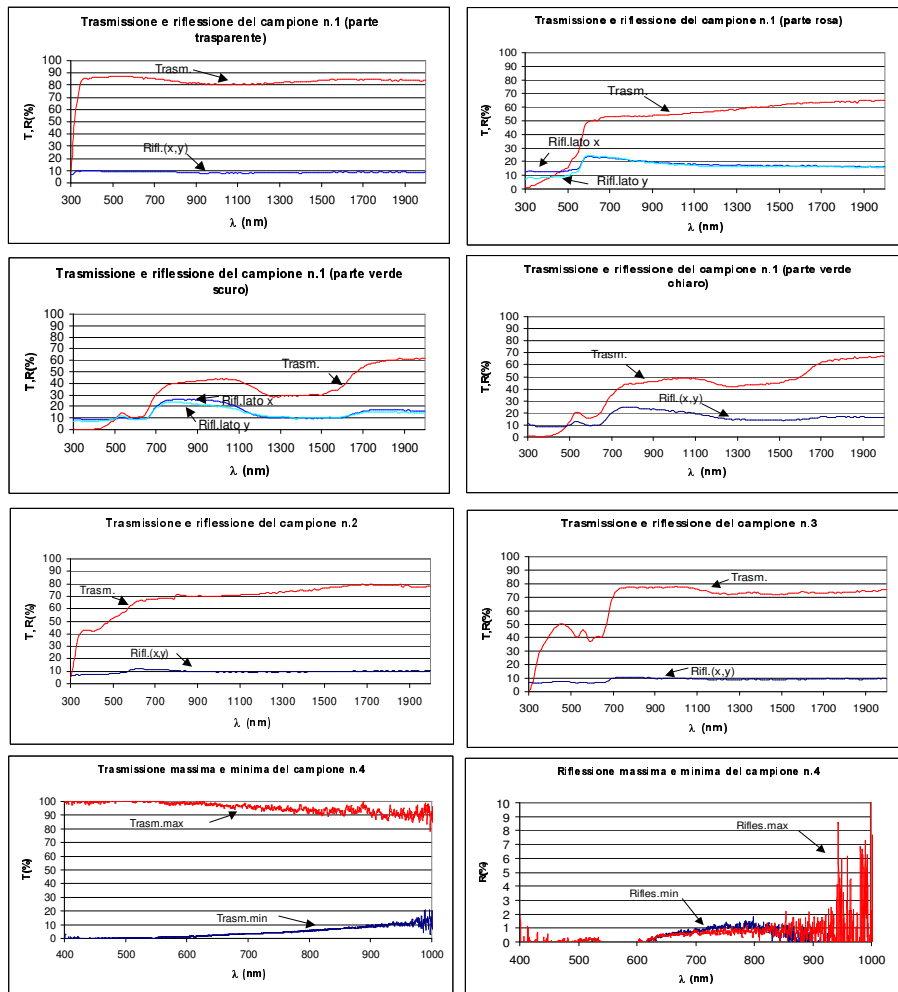


Fig. 7.6: Campioni di vetro oggetto dello studio

La colorazione a smalto consiste nell'applicazione sul vetro di un pigmento di natura vetrosa colorato con ossidi metallici e riscaldato a bassa temperatura (minore della temperatura di fusione del vetro) al fine di fissarlo ad esso in modo

definitivo, mentre la velatura a smalto consiste nell'applicazione di uno strato trasparente di colore su un altro opaco e asciutto al fine di rendere più brillanti le tonalità del vetro dipinto; la grisaglia infine consiste nell'applicazione di una polvere al vetro come nel caso della colorazione a smalto, ma con una ricottura in forno a temperature elevate (circa 600° C).



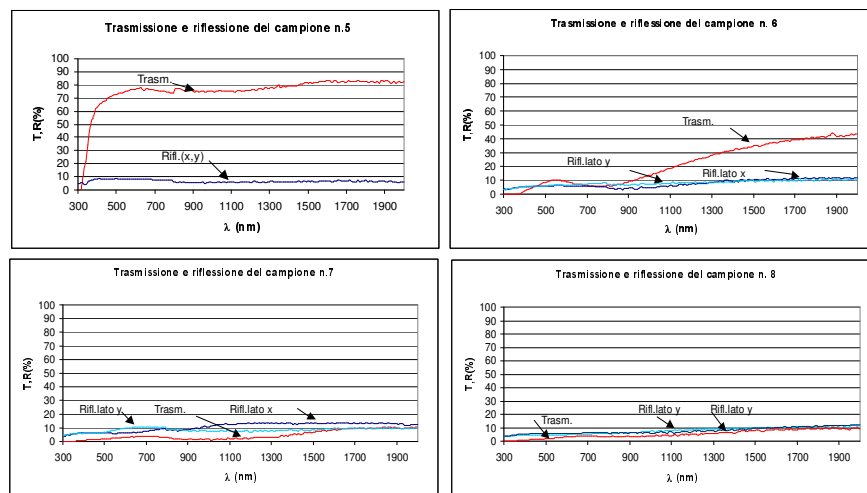


Fig. 7.7: Andamento della trasmissione e riflessione (lati x ed y) in funzione della lunghezza d'onda per i campioni esaminati

Il campione n.1, che presenta parte della superficie x dipinta con smalto di colore verde di diverse tonalità e rosa pesca, è stato analizzato in quattro punti, al fine di evidenziarne le proprietà in corrispondenza delle diverse colorazioni. Il campione n. 2 presenta sul lato x uno smalto di colore rosa chiaro. Il campione n. 3 è colorato sul lato x con velatura a smalto grigio chiaro. Il campione n. 4 raffigura il volto del Bambino e la parte inferiore del volto della Vergine, presenta una colorazione a grisaglia di colore marrone in varie tonalità e per questo motivo è stato analizzato in quindici punti diversi. Il campione n. 5, di colore trasparente, presenta tracce di grisaglia di colore marrone. Il campione n. 6 è colorato a grisaglia di colore verde. Il campione n. 7, colorato in giallo all'argento, ha sul lato x una decorazione a grisaglia e sul lato y una colorazione in bagno. Il campione n. 8, colorato a grisaglia, presenta un doppio strato della stessa di colore nero sul lato x.

Gli andamenti del coefficiente di trasmissione e riflessione in funzione della lunghezza d'onda dei campioni in esame sono riportati nella fig. 7.7; per il campione n. 4, misurato in 15 punti, sono riportati solo gli andamenti nei punti di trasmissione e riflessione massima e minima.

Nelle Tabb. 7.3 e 7.4 sono riportati i valori dei coefficienti di trasmissione e riflessione; per il campione n. 4 non è stato possibile effettuare il calcolo del

fattore di trasmissione e riflessione solare, a causa del limitato intervallo di lunghezza d'onda in cui lavora lo spettrofotometro S 2000.

Per i campioni n. 1, 2, 3, nuovi, colorati in pasta e decorati con la tecnica superficiale dello smalto e della velatura a smalto, i risultati mostrano che:

- il campione n. 1 è caratterizzato da un coefficiente di trasmissione spettrale che varia nel range 0-65% nei punti colorati in rosa e in verde, mentre varia nel range 80-90% dove è trasparente;
- i coefficienti di riflessione spettrale dei tre campioni sono pressoché coincidenti sui lati x ed y e sono caratterizzati da valori indipendenti dalla lunghezza d'onda e dell'ordine del 10%;
- il campione n. 1, nei punti colorati in rosa, presenta il valore più elevato del coefficiente di riflessione sia nel visibile che nel solare, sia sul lato x che y, pari a circa 0,170.

Il campione n. 4, anch'esso nuovo, ma decorato con la tecnica della grisaglia, è caratterizzato da valori più bassi del coefficiente di riflessione nel visibile rispetto agli altri campioni nuovi decorati a smalto o con velatura a smalto; il coefficiente di trasmissione massimo varia nel range 90-99%, quello minimo nel range 0-15%, mentre il coefficiente di riflessione si mantiene al di sotto del 10%.

		τ_e	τ_v
Campione n. 1	Trasp.	0.814	0.868
	Rosa	0.266	0.327
	Verde C.	0.2	0.172
	Verde S.	0.162	0.115
Campione n. 2		0.537	0.584
Campione n. 3		0.517	0.423
Campione n. 4	Max	/	0.994
	Min.	/	0.009
Campione n. 5		0.71	0.75
Campione n. 6		0.11	0.094
Campione n. 7		0.026	0.024
Campione n. 8		0.031	0.024

Tab. 7.3: Coefficienti di trasmissione nel visibile e nel solare dei campioni analizzati

		ρ_v	ρ_e
Campione n. 1/ Trasp.	Lato x	0.093	0.088
	Lato y	0.093	0.089
Campione n. 1/ Rosa	Lato x	0.178	0.145
	Lato y	0.166	0.119
Campione n.1/ Verde C.	Lato x	0.109	0.123
	Lato y	0.101	0.106
Campione n.1/ Verde S.	Lato x	0.095	0.119
	Lato y	0.102	0.108
Campione n. 2	Lato x	0.094	0.085
	Lato y	0.096	0.082
Campione n. 3	Lato x	0.093	0.096
	Lato y	0.068	0.077
Campione n. 4	Max(latox)	0.068	/
	Min(latox)	0.0001	/
Campione n. 5	Lato x	0.056	0,084
	Lato y	0.069	0,082
Campione n. 6	Lato x	0.059	0.062
	Lato y	0.068	0.064
Campione n. 7	Lato x	0.080	0.060
	Lato y	0.079	0.083
Campione n. 8	Lato x	0.062	0.058
	Lato y	0.058	0.048

Tab. 7.4: Coefficienti di riflessione nel visibile e nel solare dei campioni analizzati

Le misure effettuate sui campioni di vetro antichi (n. 5, 6, 7, 8) sono caratterizzate da un coefficiente di trasmissione spettrale che varia nel range 5-80%, mentre il coefficiente di riflessione si mantiene al di sotto del 15%; l'andamento spettrale del coefficiente di riflessione del campione n. 5 coincide sul lato x ed y.

Pertanto si può concludere che:

- i lati x dei campioni antichi n. 5, 6, 7, 8, tutti decorati con la tecnica della grisaglia, hanno valori del coefficiente di trasmissione uguali o minori del massimo valore del campione nuovo n. 4;
- il coefficiente di riflessione dei campioni antichi, sui lati x, è maggiore del massimo valore del campione nuovo.

Da ciò si può dedurre che l'assottigliamento dello strato di grisaglia legato all'invecchiamento può aumentare le proprietà di riflessione del vetro in quanto si ha una maggiore levigatezza della superficie del vetro stesso.

Infine il campione n. 7, colorato in bagno sul lato y, è caratterizzato dal valore più alto del coefficiente di riflessione nel visibile, mentre il campione n. 8, che presenta un doppio strato di grisaglia sul lato x, ha valori più bassi del coefficiente di riflessione; da ciò si può dedurre che il doppio strato può avere una funzione di protezione del vetro nel processo di invecchiamento.

Il principale risultato ottenuto dalle misure effettuate è che l'invecchiamento altera le proprietà di riflessione dei vetri decorati con la tecnica della grisaglia, in particolare le aumenta, a conferma di quanto ottenuto in studi precedenti su campioni di vetro nuovi e invecchiati con un processo accelerato in camera climatica. Si è anche constatato che uno dei campioni, caratterizzato da un doppio strato di grisaglia, presenta un coefficiente di riflessione nel visibile più basso degli altri, quindi si può ipotizzare che il secondo strato di grisaglia possa avere un ruolo di protezione nel corso dell'invecchiamento del vetro. Inoltre, tra i campioni nuovi comunemente utilizzati per il restauro, quelli colorati a smalto o con velatura a smalto presentano valori del coefficiente di riflessione nel visibile molto simili, mentre quelli decorati con la tecnica della grisaglia sono caratterizzati da valori più bassi.

Si può pertanto concludere che i vetri colorati con tecniche superficiali necessitano di un'adeguata protezione rispetto alle variazioni delle condizioni ambientali, mediante un opportuno controllo del microclima, effettuato per mezzo di impianti dedicati.

7.4 Misure spettrofotometriche in situ su alcuni pannelli restaurati della vetrata di San Domenico a Perugia

La Chiesa di San Domenico in Perugia ospita nell'abside un'importante vetrata realizzata nel periodo rinascimentale (v. fig. 7.8); la vetrata è costituita da numerosi pannelli tenuti insieme da una struttura marmorea. Il complesso è attualmente in corso di restauro; i pannelli sono caratterizzati dalla presenza di tessere originali, risalenti al periodo rinascimentale, ovvero di tessere sostituite in successivi restauri nel corso dei secoli. Recentemente sono stati restaurati ed esposti nella Chiesa tre pannelli, uno dei quali caratterizzato dalla presenza di tessere quasi esclusivamente originali, uno dalla presenza di tessere quasi esclusivamente sostituite e uno dalla presenza di metà tessere originali e metà sostituite (v. fig. 7.9).

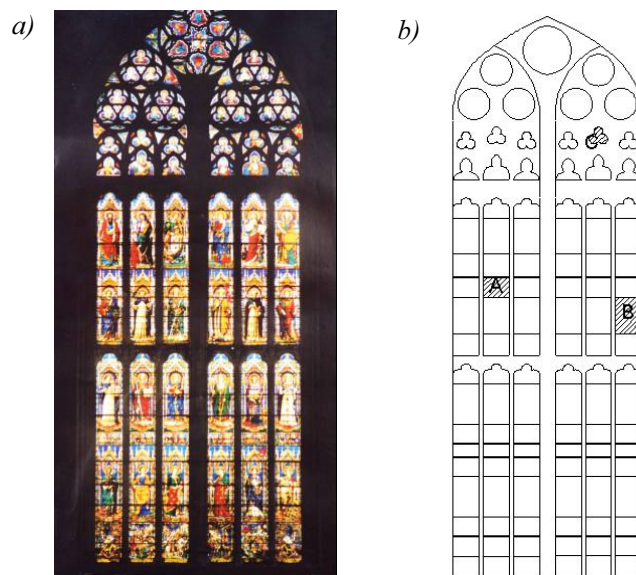


Fig. 7.8: Vista d'insieme della vetrata (a) e collocazione dei pannelli restaurati (b), oggetto delle misure.

Sui tre pannelli sono state effettuate le misure spettrofotometriche, al fine di valutare l'influenza dell'epoca cui risalgono le singole tessere vitree sulle proprietà di trasmissione; il confronto è stato effettuato su tessere di uguale colore originali e di sostituzione ottocentesca e su tessere decorate con la tecnica della grisaglia, anch'esse originali e di sostituzione ottocentesca.

I tre pannelli restaurati sono convenzionalmente indicati con A, B e C; essi rappresentano rispettivamente un'immagine cuspidata (fig. 7.9a), San Lorenzo (fig. 7.9b) e David Re (fig. 7.9c).

Precedenti indagini, effettuate ai fini del restauro, hanno permesso di distinguere le tessere originali da quelle di sostituzione ottocentesca. Il pannello A è caratterizzato dalla presenza di circa il 60% di vetri originali, sono considerate sostituzioni ottocentesche le tessere vitree dei fondi blu, alcuni vetri di bordura, due volute gialle, alcuni rossi e alcune guglie; nelle tessere originali sono stati rilevati elementi di corrosione ed i piombi non sono originali. Il pannello B risulta di completo rifacimento ottocentesco, ad eccezione della punta superiore della palma del Martire; il viso, l'aureola e le mani recano sul retro un trattamento di acidatura e/o sabbiatura, consistente nell'incisione della superficie del vetro con una sostanza abrasiva, non necessariamente sabbia, ma anche corindone,

effettuato in un restauro ottocentesco forse per migliorare l'effetto diffondente e omogeneizzare la trasmissione della luce, a vantaggio dell'effetto d'insieme; tali tessere devono essere considerate ben distinte da alcune tessere originali in cui è presente un effetto analogo, dovuto alla corrosione naturale. Il pannello C è caratterizzato dalla presenza di circa l'80% di vetri originali, che costituiscono soprattutto la figura di David Re e sono tessere di colore rosso e verde, mentre le tessere dei fondi blu sono di sostituzione ottocentesca.

Pannello A



Pannello B



Pannello C



Fig. 7.9: Pannelli impiegati per le misure spettrofotometriche: a) pannello A rappresentante un'immagine cuspidata; b) pannello B rappresentante S. Lorenzo; c) pannello C rappresentante David re.

Le misure sono state effettuate mediante lo spettrofotometro portatile S 2000; la configurazione dello spettrofotometro per la realizzazione di misure di trasmissione prevede che il campione sia posizionato tra due lenti che, tramite delle fibre ottiche, sono rispettivamente collegate allo spettrofotometro e alla sorgente. Le lenti devono essere perfettamente allineate ed il fascio che fuoriesce dalla sorgente deve incidere perpendicolarmente il materiale da analizzare.

Il problema principale per eseguire le misure in situ è perciò quello di dover progettare e costruire un apposito supporto dove sia possibile alloggiare le lenti delle fibre ottiche, tenendo conto della presenza del supporto nel quale sono esposti i pannelli della vetrata.

Le caratteristiche del supporto di legno sono le seguenti:

- forma ad U (in pianta), con l'anima di 1,9 m e le ali di 0,82 m;
- altezza 3,4 m;
- leggerezza e scarsa stabilità del telaio, costituito da un truciolare dello spessore di 1,8 cm.



Fig. 7.10: Telaio per l'alloggiamento delle sonde

Gli elementi che hanno guidato la progettazione del telaio sono stati l'esigenza di effettuare misure di trasmissione più accurate possibile garantendo la possibilità di raggiungere tutte le tessere vitree, operando allo stesso tempo in sicurezza, evitando cioè la possibilità di danneggiare i pannelli della vetrata. Inoltre, il supporto doveva essere trasportabile e quindi costituito da parti componibili, smontabile e rimontabile all'occorrenza. Per realizzare un supporto che soddisfacesse il più possibile tutti i requisiti indicati si è adottata la soluzione riportata in fig. 7.10.

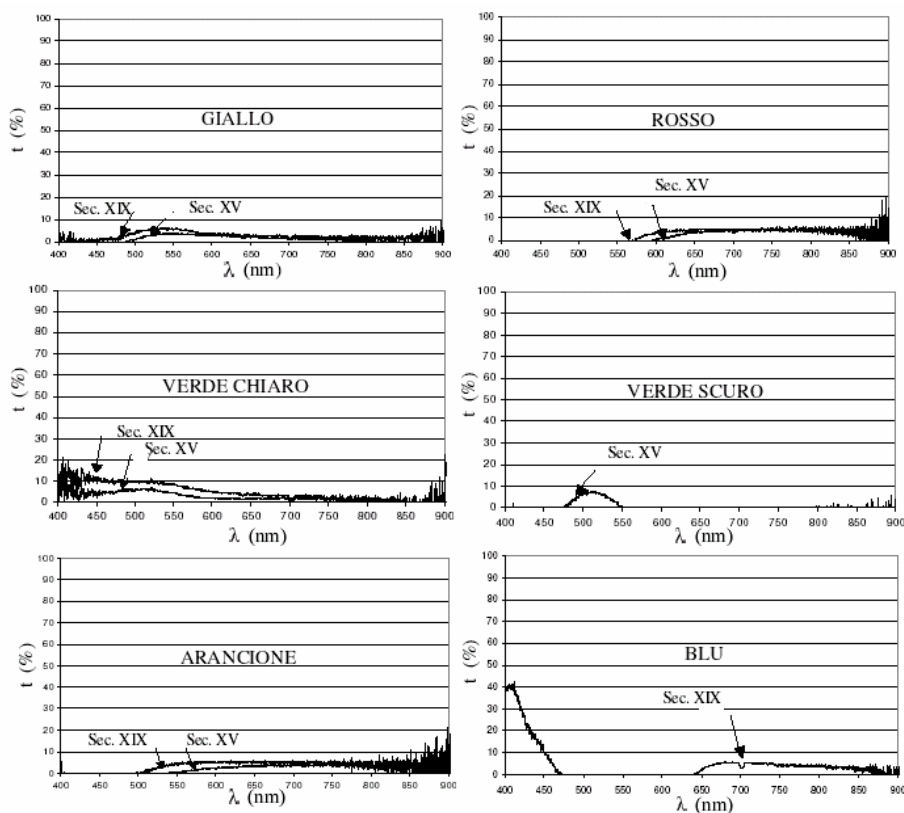


Fig. 7.11: Trasmittanza media delle tessere del pannello A al variare della lunghezza d'onda, per i diversi colori

Le misure sui tre pannelli sono state effettuate in numerosi punti; i risultati sono esaminati in base al pannello di appartenenza ed al colore delle tessere. Per ogni punto è stato ottenuto l'andamento della trasmittanza al variare della lunghezza d'onda; per ciascun colore è stata effettuata la media dei valori ottenuti, laddove possibile, per le tessere quattrocentesche e per quelle ottocentesche.

Gli andamenti relativi alle misure sul pannello A sono mostrati in figura 7.11.

In base alla normativa EN 410/1988 è stato calcolato il fattore di trasmissione nel visibile τ_v ; nella tab. 7.5 sono riportati i valori medi di tale fattore relativi alle misure effettuate sulle tessere vitree dei vari colori.

	τ_v		Differenza XIX - XV	
	Secolo XIX	Secolo XV	Assoluta	%
Giallo	0,0397	0,0253	0,0144	57
Rosso	0,0087	0,0047	0,0040	85
Verde chiaro	0,0736	0,0403	0,0333	83
Verde scuro	-	0,0192	-	-
Arancione	0,0298	0,0151	0,0147	97
Blu	0,0031	-	-	-

Tab. 7.5 : Valore medio del fattore di trasmissione nel visibile τ_v delle tessere del pannello A

La figura 7.12 mostra i risultati relativi al pannello B; è riportato l'andamento della trasmittanza media delle tessere verdi della palma e di quelle verdi di bordura, di quelle dipinte a grisaglia e, per completezza, le misure sulle tessere rosse e blu. La punta superiore della palma è l'unica tessera originale presente nel pannello; l'andamento della trasmittanza media al variare della lunghezza d'onda viene confrontato con quello delle altre due tessere che formano la palma, risalenti al 1800, e con quello delle altre tessere dello stesso colore, il verde.

Nella tab. 7.6 sono riportati i risultati relativi al calcolo del coefficiente di trasmissione nel visibile per i diversi colori delle tessere del pannello B.

Analogamente a quanto fatto per i pannelli A e B, si riportano di seguito i valori di trasmittanza media al variare della lunghezza d'onda per le tessere di diverso colore e per quelle dipinte con la tecnica della grisaglia (fig. 7.13) del pannello C e nella tab. 7.7 i valori medi del fattore di trasmissione nel visibile.

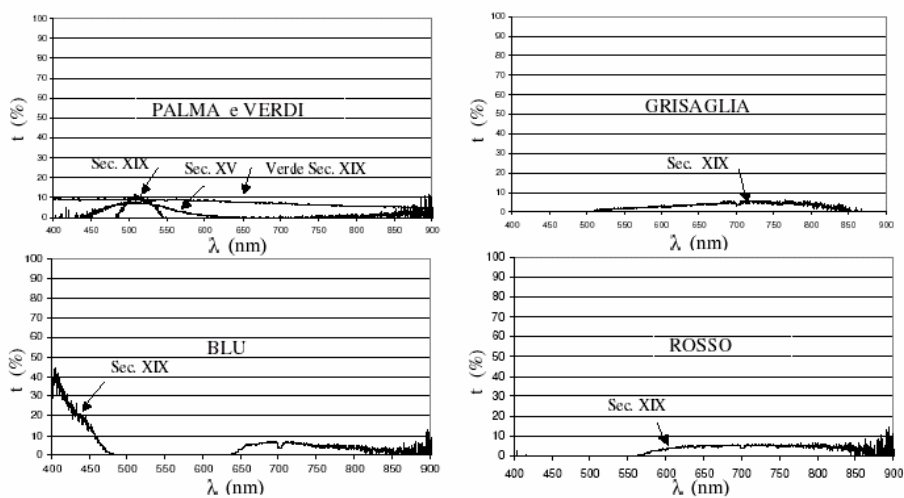


Fig. 7.12: Trasmittanza media delle tessere del pannello B al variare della lunghezza d'onda

	τ_v		Differenza XIX - XV	
	Secolo XIX	Secolo XV	Assoluta	%
Verde scuro	0,0237	0,0322	- 0,0085	- 26
Verde chiaro	0,0713	-	-	-
Rosso	0,0135	-	-	-
Blu	0,0032	-	-	-
Grisaglia	0,0218	-	-	-

Tab. 7.6: Valore medio del fattore di trasmissione nel visibile τ_v delle tessere del pannello B.

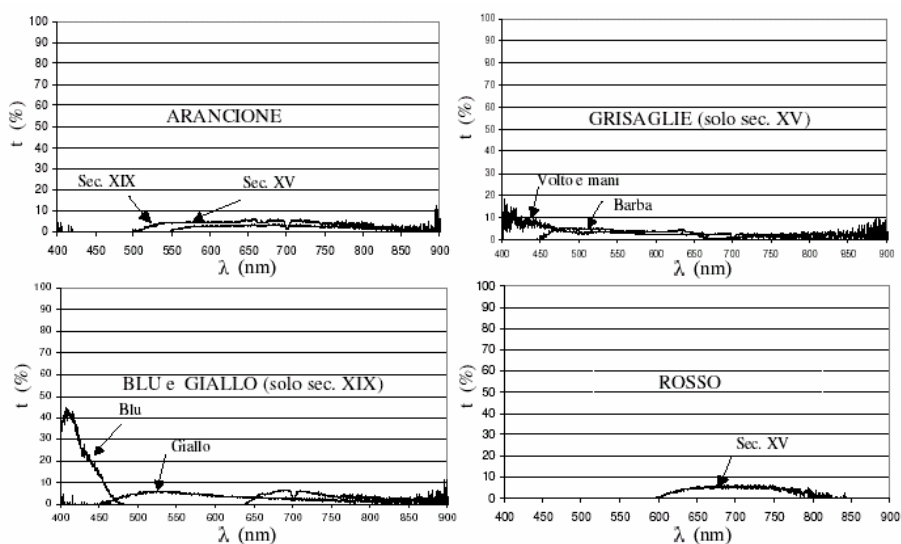


Fig. 7.13: Trasmittanza media delle tessere del pannello C al variare della lunghezza d'onda.

	τ_v		Differenza XIX - XV	
	Secolo XIX	Secolo XV	Assoluta	%
Giallo	0,0467	-	-	-
Arancione	0,0349	0,0136	0,0213	157
Rosso	-	0,0028	-	-
Blu	0,0030	-	-	-
Grisaglie mani	-	0,0315	-	-
Grisaglie volto	-	0,0390	-	-
Grisaglie barba	-	0,0360	-	-

Tab. 7.7: Valore medio del fattore di trasmissione nel visibile τ_v delle tessere del pannello C

Dalle figg. 7.11, 7.12 e 7.13 si evince che:

- i valori di trasmissione luminosa al variare della lunghezza d'onda sono quasi sempre inferiori al 7 - 8%; valori fino al 12 - 15% sono raggiunti solo dalle tessere di colore verde chiaro, nelle lunghezze d'onda comprese tra 400 nm e 450 nm. Fra i vari colori, le tessere blu sono quelle che, in un range di lunghezze d'onda compreso tra 410 nm e 420 nm, presentano la trasmissione più elevata, intorno al 40%, pur essendo più selettive delle altre;
- le tessere caratterizzate dal valore più elevato del coefficiente di trasmissione nel visibile sono di colore verde chiaro ($\tau_v = 0.07$ per le tessere del Sec. XIX e $\tau_v = 0.04$ per le tessere del Sec. XV); le tessere caratterizzate dai valori più bassi del coefficiente di trasmissione nel visibile sono quelle ottocentesche di colore blu ($\tau_v = 0.003$) e quelle quattrocentesche di colore rosso ($\tau_v = 0.005$);
- i campioni sono molto selettivi nelle lunghezze d'onda in cui essi sono colorati; ciò è vero soprattutto per i colori scuri (blu, rosso e verde scuro).

Se invece si effettua un'analisi in termini relativi si evince che:

- la trasmittanza media dei vetri di sostituzione ottocentesca è maggiore di quella dei vetri originali: le differenze, in termini del fattore di trasmissione nel visibile τ_v , sono comprese nel range 57% - 97% per i campioni del pannello A, e sono dell'ordine del 157% per i campioni del pannello C di colore arancione (unico colore del quale esistono tessere sia quattrocentesche che ottocentesche). Fanno eccezione le tessere ottocentesche di colore verde scuro del pannello B che, paragonate con quelle quattrocentesche dello stesso colore, rivelano una trasmissione inferiore del 26% ed i campioni decorati con la tecnica della grisaglia; la trasmissione luminosa delle tessere ottocentesche risulta inferiore a quella delle tessere quattrocentesche in un range di valori compreso tra il 31% ed il 44%;
- il confronto fra tessere quattrocentesche e ottocentesche appartenenti a pannelli diversi conferma che le differenze percentuali del coefficiente di trasmissione nel visibile sono comprese entro gli stessi range riscontrati nel confronto all'interno di uno stesso pannello; pertanto la diversa collocazione dei pannelli nell'ambito del complesso della vetrata non ha influito sulle proprietà spettrofotometriche.

Dall'approfondita analisi spettrofotometrica condotta in situ sulle tessere vitree di tre pannelli della vetrata è possibile evidenziare che i fenomeni di degrado chimico - fisico cui nel tempo questi delicati manufatti sono stati sottoposti ed il conseguente invecchiamento hanno alterato le proprietà di trasmissione spettrale; in particolare si ha, in media, una trasmissione delle tessere quattrocentesche inferiore del 44% rispetto a quella delle tessere ottocentesche. Si può pertanto

concludere che gli effetti di degrado legati al passare del tempo comportano un incremento delle proprietà di trasmissione dei vetri. Le tessere di colore verde scuro del pannello B costituiscono un'eccezione, insieme alle tessere dipinte con la tecnica della grisaglia; per le prime il dato può essere dovuto alle disomogeneità di colore nelle tessere, infatti la curva stessa di trasmissione luminosa assomiglia più a quella dei campioni di colore verde chiaro che a quella dei campioni verde scuro (vedi fig. 7.12). Per le seconde si può ipotizzare che i fenomeni di degrado chimico – fisico, danneggiando il sottile strato di grisaglia e determinandone il parziale distacco dal substrato, possano aver causato l'aumento della trasmissione luminosa. Tale risultato è in accordo con quanto già ottenuto in precedenti lavori.

CONCLUSIONI

Il quaderno presenta i risultati di un'ampia ricerca volta alla valutazione delle prestazioni energetiche e illuminotecniche di materiali trasparenti, nonché alla determinazione delle proprietà spettrofotometriche di vetrate di interesse storico – artistico.

Per le campagne di misura condotte ci si è avvalsi delle strumentazioni disponibili presso il Laboratorio, precisamente di due spettrofotometri, uno fisso ed uno portatile e dei relativi accessori.

I valori misurati, elaborati secondo la Normativa Europea 410 del 1998, hanno permesso di determinare l'andamento spettrale della trasmissione e della riflessione e parametri quali il fattore di trasmissione e riflessione nel visibile e nel solare dei campioni analizzati.

E' stato quindi possibile effettuare valutazioni e confronti di tipo energetico e illuminotecnico tra le varie tipologie di campioni. Sono inoltre state effettuate ipotesi riguardo le variazioni delle proprietà spettrofotometriche di vetrate artistiche con l'invecchiamento, in particolare delle vetrate decorate con la tecnica della grisaglia.

Ulteriori studi sono in atto; possibili sviluppi della ricerca prevedono l'analisi delle proprietà spettrofotometriche di pellicole per oscuramento applicate ai vetri delle auto. Verranno approfonditi gli studi sui materiali trasparenti innovativi impiegando i dati misurati ed elaborati in opportuni codici di calcolo per la simulazione delle prestazioni energetiche e illuminotecniche degli edifici.

Per quanto riguarda lo studio delle vetrate artistiche, l'intento è quello di effettuare analisi colorimetriche mediante l'impiego dello spettrofotometro portatile S 2000 su vetrate in corso di restauro, al fine di analizzare il legame esistente tra le variazioni colorimetriche ed il degrado delle vetrate stesse.

ELENCO DEI SIMBOLI

D_λ	= distribuzione spettrale relativa all'illuminante D65
e	= emissività
g	= fattore solare
h	= coefficiente di trasferimento di calore
I	= radiazione trasmessa
I_o	= radiazione incidente
P_o	= potenza emessa
P	= potenza trasmessa
q_i	= fattore di trasferimento secondario di calore
q_k	= valore osservazione
R_a	= indice generale di resa dei colori
r	= ripetibilità
S_λ	= distribuzione spettrale relativa dell'energia solare
s	= spessore
$S_{(q)}$	= scarto quadratico medio
T	= trasmittanza
$V_{(\lambda)}$	= efficienza spettrale per visione scotopica

Lettere greche

α_e	= fattore di assorbimento solare diretto
$\Delta\lambda$	= intervallo di lunghezza d'onda
λ	= lunghezza d'onda
μ	= media
ϑ	= angolo di incidenza
ρ	= fattore di riflessione spettrale
ρ_e	= fattore di riflessione solare diretta
ρ_v	= fattore di riflessione luminosa
σ	= deviazione standard
τ	= fattore di trasmissione spettrale
τ_e	= fattore di trasmissione solare diretta
τ_v	= fattore di trasmissione luminosa
τ_{uv}	= fattore di trasmissione di UV
Λ	= conducibilità termica
Σ	= sommatoria

BIBLIOGRAFIA

- 1) G. Marchini: "Le vetrate dell'Umbria"; CVMA Italia, vol. I, Roma, 1973.
- 2) UNI 7885: "Prove sul vetro. Determinazione dei fattori di trasmissione dell'energia solare"; 1978.
- 3) R.E. Collins, S.J. Robinson: "Evaluated glazing". Solar Energy, 47, 1991.
- 4) A. Carpinteri: "Meccanica dei materiali e della frattura". Pitagora, 1992.
- 5) E. Castelnuovo: "Vetrate medievali". Torino, Einaudi, 1994.
- 6) D. Festa, E. Guadagnino: "Proprietà chimiche del vetro, Parte I: generalità". Rivista Stazione Sperimentale del Vetro, 1995.
- 7) F. Abbozzo: Mariotto di Nardo e Bartolomeo di Pietro: La vetrata absidale di S. Domenico 1411. Storia e Conservazione, in "Il complesso di S. Domenico a Perugia", Atti del Convegno, Perugia, 19-21 ottobre 1995, pagg. 63-66.
- 8) P. Polato: "Spettrofotometria UV-VIS-NIR applicata al vetro". Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro, 1996.
- 9) P. Polato: "Misure spettrofotometriche: errori sistematici e precauzioni". Laboratorio 2000, 1996.
- 10) W.J. Plarzen, B. Karlsoon, T. Ojassen, Task 18: "Advanced Glazing and Associated Materials for Solar and Building Applications", Ica Solar Heating and Cooling Programme, 1996.
- 11) Saint Gobain: "Manuale del vetro"; Saint Gobain Vetro Italia 1997, Milano.
- 12) UNI EN 410: "Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate"; 1998.
- 13) G. Elias, E. Ferrari, L. Fantini: "Materiali isolanti innovativi: gli Aerogel", rivista La Termotecnica 1999.
- 14) F. Asdrubali, C. Buratti, G. Baldinelli: "Misure spettrofotometriche su materiali trasparenti per chiusure perimetrali in edilizia", 55° Congresso Nazionale ATI, Bari – Matera, 15 – 20 Settembre 2000.
- 15) F. Gugliermetti, C. Buratti, S. Ortica: "Indagini spettrofotometriche per la valutazione dell'invecchiamento di vetrate artistiche", Convegno Nazionale AIDI – Luce come Innovazione, Perugia, Dicembre 2001.
- 16) F. Castelletti: "Le Superfici Vetrate Innovative", CDA Rivista sul condizionamento dell'aria, riscaldamento e refrigerazione, Maggio 2002.
- 17) F. Asdrubali, G. Baldinelli: "Messa a punto di una strumentazione spettrofotometrica per misure di trasmittanza e riflessione di materiali trasparenti", XX Congresso Nazionale U.I.T., Maratea, Giugno 2002.

- 18) E.S. Lee, D.L. Dibartolomeo: "Application issues for large – area electrochromic windows in commercial buildings". *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 71, 2002.
- 19) UNI EN 673: "Determinazione della Trasmittanza Termica (valore U) – Metodo di calcolo"; 2002.
- 20) N. Ba, P. Iacomuzzi, G. Rossi: "Considerazioni sui materiali trasparenti per l'edilizia". *Luce* (Organo Ufficiale dell'Associazione Italiana di Illuminazione); AIDI, Febbraio 2003.
- 21) C. Buratti: "Transparent insulating materials: experimental data of transmission coefficient and buildings energy saving evaluation", *Energy and Environment 2003, First International Conference on Sustainable Energy, Planning & Technology in relationship to the Environment*, Helkidiki, Grecia, 14 – 16 Maggio 2003.
- 22) C. Buratti, F. Rossi: "Misura delle proprietà spettrofotometriche di campioni di vetro nuovi e invecchiati per il restauro di vetrate artistiche", 57° Congresso Nazionale ATI, Pisa, Settembre 2003.
- 23) F. Gugliermetti, F. Asdrubali, F. Bisegna: "Experimental glass optical data of new glazing systems to improve energy savings", *Renewables 2004, International Conference on New and Renewable Energy Technologies for Sustainable Development*, 28 June- 1 July 2004, Evora, Portugal.