



ASSOCIAZIONE ITALIANA DI ILLUMINAZIONE

CONVEGNO NAZIONALE

Perugia, 4-6 dicembre 2001

INDAGINI SPETTROFOTOMETRICHE PER LA VALUTAZIONE DELL'INVECCHIAMENTO DI VETRATE ARTISTICHE

F. Gugliermetti (*), C. Buratti(**), S. Ortica(**)

1. Introduzione

Le vetrate artistiche che decorano chiese e cattedrali rivestono un'importante funzione iconografica nella rappresentazione del sacro ma, al tempo stesso, forniscono un significativo contributo all'illuminazione naturale. Sicuramente il primo aspetto è preponderante rispetto al secondo, anche se quest'ultimo non è da sottovalutare; infatti, pur essendo la radiazione solare trasmessa da tali vetrate di modesta entità, rappresenta spesso l'unica o la principale fonte di illuminazione.

L'Umbria possiede un ricco patrimonio di vetrate artistiche nelle sue chiese e cattedrali; basti pensare alla grande vetrata nella Chiesa di San Domenico e alle pregevoli vetrate del Duomo di San Lorenzo a Perugia, oppure alle splendide vetrate nella Basilica Superiore di San Francesco ad Assisi.

Il laboratorio di Controlli Ambientali dell'Università di Perugia si occupa da anni della conservazione di vetrate di interesse storico – artistico; in particolare si sono affrontati temi quali il controllo delle condizioni termoigrometriche [1, 2, 3, 4] e di qualità dell'aria [5], dell'illuminazione naturale [6], della simulazione delle condizioni di stress dovute a sollecitazioni termiche [7], dell'influenza dell'invecchiamento sulle proprietà dei vetri impiegati per il restauro delle vetrate artistiche, come ad esempio il coefficiente di dilatazione termica [8].

Anche le proprietà spettrofotometriche dei vetri impiegati per la realizzazione di vetrate artistiche sono suscettibili di variazioni nel corso del tempo; tali variazioni possono essere indice di un'alterazione delle caratteristiche chimico-fisiche dei vetri, che può anche costituire un importante segnale di degrado.

Al fine di stabilire una correlazione tra i processi di invecchiamento e le proprietà di trasparenza e riflessione dei vetri impiegati nella realizzazione di vetrate artistiche, nel presente lavoro si sono effettuate misure del coefficiente di trasparenza di vetri colorati impiegati nel restauro di tali vetrate. I campioni di vetro, reperiti presso un importante studio di restauro di Roma, sono stati sottoposti a invecchiamento accelerato in camera climatica. Per il processo di invecchiamento, della durata complessiva di 11 settimane, si è fatto riferimento alla UNI 10593-2 [9]; il processo è costituito da 56 cicli di 12 ore, con temperature variabili tra -18°C e $+53^{\circ}\text{C}$, per un totale di 4 settimane, e da un periodo di 7 settimane durante il quale l'ambiente è mantenuto ad una temperatura costante di 58°C ; l'umidità relativa è impostata su un valore pari al 95% per tutto il processo.

Le misure spettrofotometriche sono state effettuate su 10 campioni di vetro diversi tra di loro, prima e dopo il processo di invecchiamento sopra descritto. I risultati di ciascun campione nuovo e invecchiato sono stati quindi confrontati, al fine di valutare l'influenza dell'invecchiamento sulle proprietà di trasparenza.

(*) F. Gugliermetti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Fisica Tecnica

(**) C. Buratti, S. Ortica, Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale

2. Strumentazione e metodologia di misura

Le misure del coefficiente di trasmissione spettrale dei 10 campioni di vetro sono state effettuate per mezzo di uno spettrofotometro Cary 2300 (fig. 1), che consente di effettuare misure del coefficiente di trasparenza spettrale di materiali poco diffondenti e, quando equipaggiato con la sfera integratrice, misure del coefficiente di riflessione spettrale e del coefficiente di trasparenza spettrale di materiali diffondenti; l'intervallo di lunghezza d'onda di misura varia tra 185 e 3152 nm, comprendendo l'UV, il visibile e il vicino IR.

Il campione, prima dell'effettuazione delle misure, viene pulito con etilene, lasciato essiccare all'aria e lucidato con cartine ottiche; poi, avendo cura di non lasciare impronte su di esso, viene collocato sulla torretta porta-campioni, dotata di una sporgenza per il suo alloggiamento e di perni per il posizionamento all'interno della cella di misura; questa viene appositamente chiusa e schermata dall'esterno. Nel frattempo, prima dell'inserimento del campione, si effettua la baseline dello strumento, ossia la sua calibrazione, che deve essere fatta ogni volta che viene acceso.

Lo spettrofotometro è dotato di due lampade, una al deuterio per l'UV (185÷340 nm), una al tungsteno/alogeno per il visibile e l'IR (340÷3152 nm). Le due sorgenti sono continue ed inviano il segnale ad un selettore di lunghezza d'onda, costituito da un monocromatore a reticolo ad apertura variabile, per la selezione della lunghezza d'onda efficace. Il monocromatore si compone di due parti: un elemento disperdente e un filtro ottico; esso riesce a scomporre in bande monocromatiche la radiazione policroma emessa dalle lampade. La qualità del monocromatore dipende da due parametri: l'ampiezza della banda passante (responsabile della selezione di una determinata radiazione) e il potere risolvete (capacità di separare tra di loro più lunghezze d'onda).

I sensori per la rilevazione del segnale che attraversa il campione sono costituiti da un tubo fotomoltiplicatore per l'UV e il visibile (185÷800 nm) e da un sensore al solfuro di piombo per l'IR (800÷3152 nm); entrambi sono rivelatori sensibili ai fotoni, in quanto possiedono una superficie attiva che assorbe la radiazione.

Lo spettrofotometro Cary 2300 è uno strumento a doppio raggio: il fascio di radiazione proveniente dalla lampada è suddiviso in due porzioni, destinate rispettivamente alla cella che ospita il campione e alla cella di riferimento. Lo sdoppiamento del raggio avviene mediante un chopper; questa modalità permette di eliminare gli errori dovuti alla non costante emissione della lampada: si riesce infatti a rilevare l'assorbimento in maniera relativa, facendo un rapporto bianco/campione. Il sistema è ottenuto mediante settori rotanti che alternativamente deflettono il fascio luminoso oppure lo lasciano passare.

La scansione avviene in sequenza su tutto l'intervallo di lunghezze d'onda considerato, facendo funzionare, per λ inferiore a 340 nm, la lampada al deuterio e per λ superiore a 340 nm quella al tungsteno.

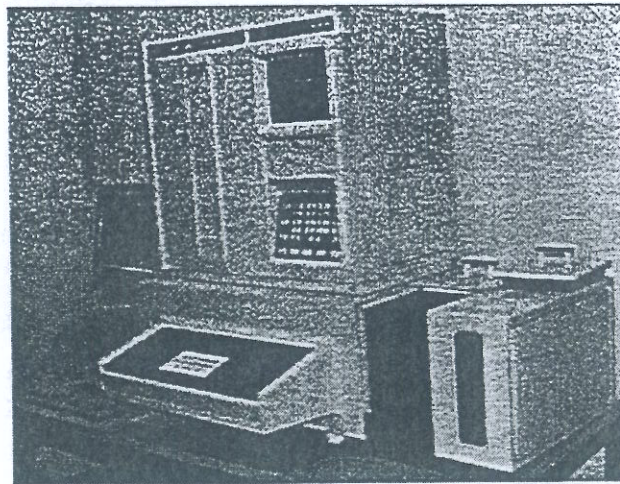


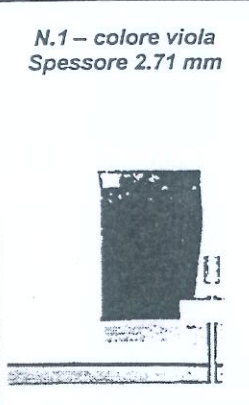
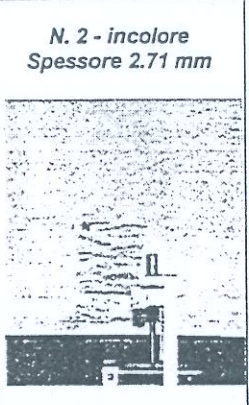
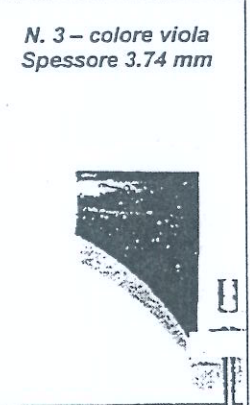
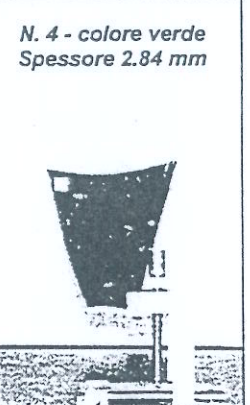
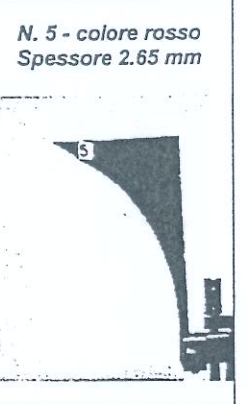
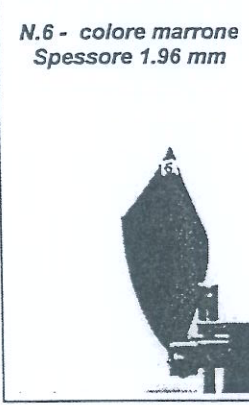
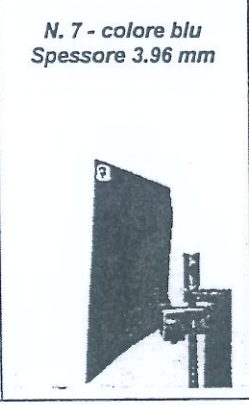
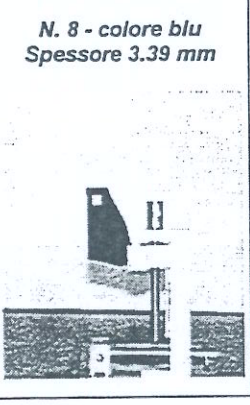
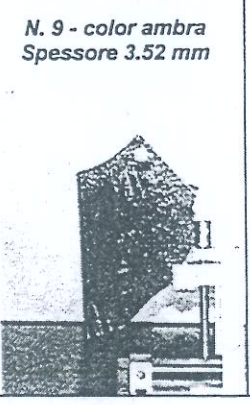
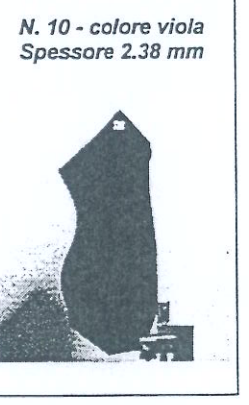
Fig. 1: Spettrofotometro Cary 2300

3. Campioni di vetro

I campioni di vetro, in numero di 10, sono stati reperiti presso lo studio Forme di Roma che ha curato il restauro della vetrata di Arrigo Fiammingo nel Duomo di Perugia. Si tratta di vetri di diverse caratteristiche e di diverso colore, che vengono correntemente impiegati nel restauro delle vetrate artistiche. Le caratteristiche dei campioni sono riportate in tab. 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; tale tecnica era molto diffusa nella colorazione delle vetrate antiche, soprattutto per creare gli effetti di chiaroscuro. Essa consiste nella pittura delle lastre di vetro con un composto di ossidi di ferro o di rame finemente triturati, ai quali si aggiungono polvere di vetro e borace come leganti; dopo la pittura la lastra di vetro viene messa in forno per fare in modo che il composto, detto appunto grisaglia, vetrificando divenga solidale con il supporto.

Lo spessore di ciascun campione è stato misurato per mezzo di un calibro; esso varia tra un minimo di 1.96 mm per il campione n. 6 e un massimo di 3.96 mm per il campione n. 7.

Tab. 1: Caratteristiche dei campioni di vetro esaminati

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

4. Invecchiamento dei campioni

Al fine di valutare l'influenza del tempo sulle proprietà spettrofotometriche dei campioni di vetro, essi sono stati sottoposti ad un processo di invecchiamento accelerato in camera climatica (fig. 2).

Per la definizione del processo di invecchiamento si è fatto riferimento alla UNI 10593-2 [9] (fig. 3), che è riferita a vetrate isolanti per impieghi in edilizia; tuttavia è 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 sono attuati n. 56 cicli di 12 ore, con temperature variabili tra -18°C e $+53^{\circ}\text{C}$, con gradiente di $14^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 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%.

Il processo ha avuto inizio il giorno 26 marzo 2001 e si è concluso il giorno 15 giugno 2001. Durante il ciclo si è effettuato il monitoraggio degli andamenti delle temperature superficiali dei vetri; un esempio è riportato in fig. 4.

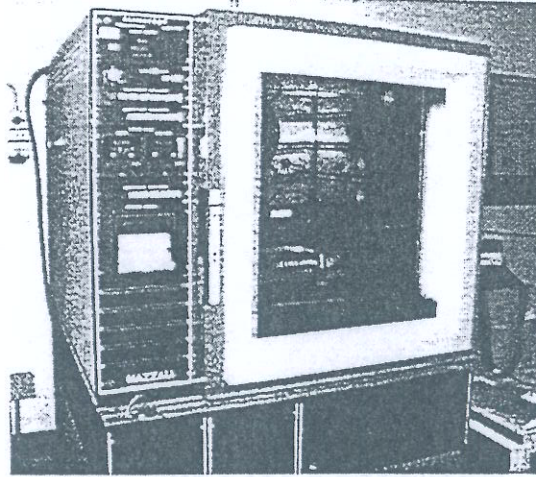


Fig. 2: Camera climatica impiegata per l'invecchiamento dei campioni di vetro

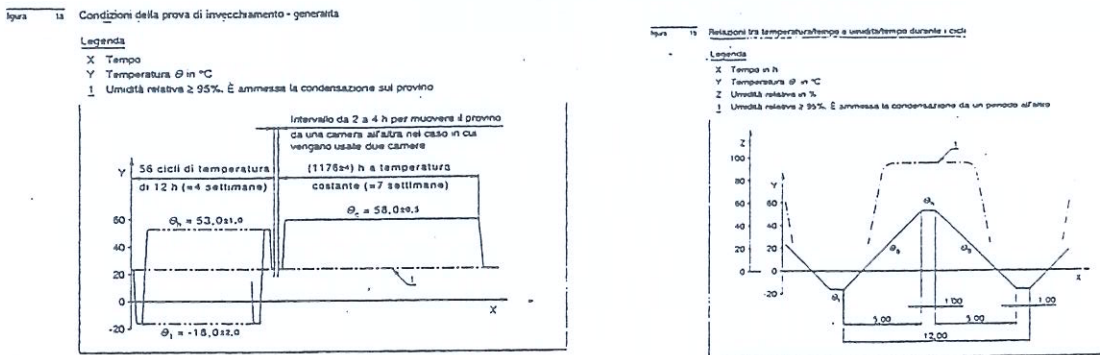


Fig. 3: Condizioni della prova di invecchiamento [9]

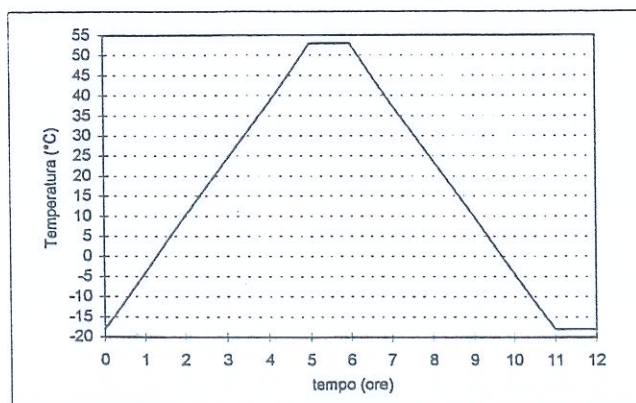


Fig. 4: Monitoraggio delle condizioni termoigrometriche durante una porzione del processo di invecchiamento

5. Risultati sperimentali

Gli andamenti del coefficiente di trasparenza dei campioni sono disegnati in fig.5; per ciascun campione l'andamento del coefficiente di trasparenza in funzione della lunghezza d'onda del campione nuovo è messo a confronto con l'andamento dello stesso campione invecchiato. Le misure sono state

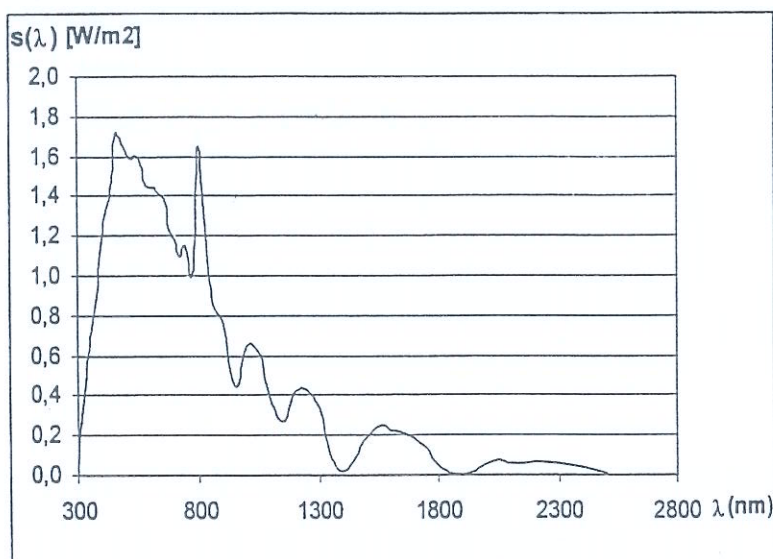
effettuate dividendo in due parti l'intervallo di lunghezza d'onda (300 nm – 2000 nm) e assegnando a ciascuna di esse rispettivamente un range variabile tra 300 nm e 800 nm, e tra 800 nm e 2000 nm. Ogni misura è stata ripetuta per tre volte; il risultato finale si è ottenuto dall'unione dei valori medi delle due fasi. Si sono inoltre calcolati i valori del fattore di trasmissione nel solare τ_e dei campioni sulla base dei risultati sperimentali, secondo la seguente relazione [10]:

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300}^{2000} S_{\lambda} \tau(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300}^{2000} S_{\lambda} \Delta\lambda}$$

Il fattore di trasmissione solare rappresenta la frazione di energia trasmessa rispetto alla radiazione solare incidente; esso viene calcolato attraverso la curva di trasmissione spettrale del campione, $\tau(\lambda)$, pesata sulla curva spettrale della radiazione solare, $S(\lambda)$, il cui andamento è riportato in fig. 4. In tab. 2 sono riportati i valori spettrali del prodotto $S_{\lambda} \Delta\lambda$.

Dall'esame dei risultati, riportati in Tab. 3, si evince che i vetri con più basso valore di τ_e sono quelli di colorazione scura e/o spessore maggiore, vale a dire i campioni n. 1, 3, 4, 6, e 10 ($\tau_e < 0,4$).

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. 2: valori spettrali del prodotto $S_{\lambda} \Delta\lambda$ [$\text{kW/m}^2 \times \text{nm}$] e andamento di S_{λ} (kW/m^2) [10].

6. Influenza dell'invecchiamento

Confrontando gli andamenti dei coefficienti di trasparenza spettrale di ciascun campione nuovo con il rispettivo campione invecchiato si è visto che essi rimangono pressoché inalterati per tutti i campioni la cui colorazione è realizzata in pasta (1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 e 10). Per i campioni n. 5 e n. 6, per i quali la colorazione è effettuata rispettivamente in bagno e con la tecnica della grisaglia, si ha un sensibile aumento del coefficiente di trasparenza spettrale (fig. 5); esso risulta tanto più marcato quanto più è elevata la lunghezza d'onda, per entrambi. Dal confronto tra i valori del fattore di trasmissione nel solare

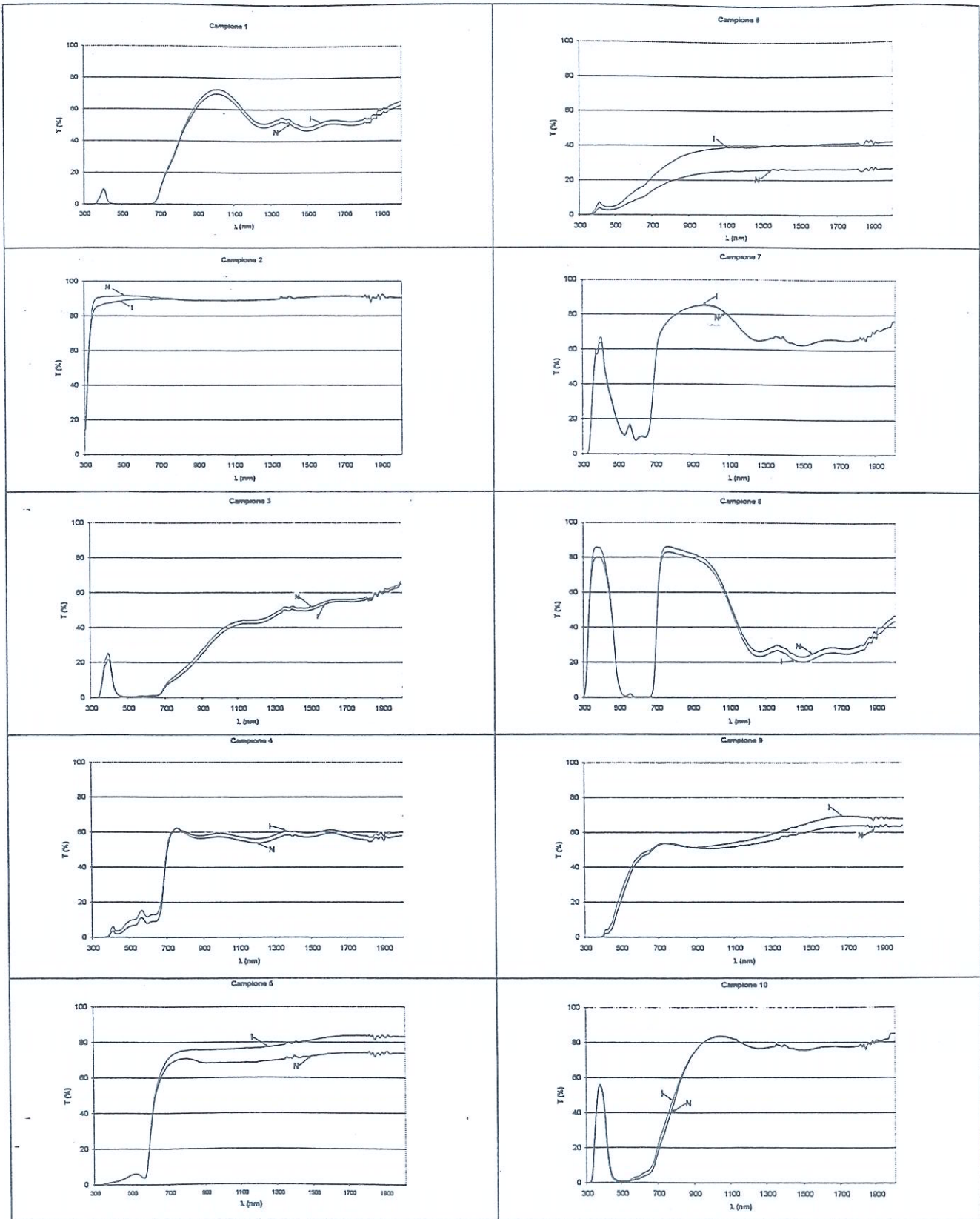


Fig. 5: confronto tra i coefficienti di trasparenza spettrali dei vetri nuovi (N) e invecchiati (I).

Tab. 3: Fattore di trasmissione nel solare τ_e dei campioni nuovi (N) e invecchiati (I).

Campione	τ_e		$\tau_e (I - N)$	Campione	τ_e		$\tau_e (I - N)$
	N	I			N	I	
1	0.243	0.255	0.012	6	0.137	0.215	0.077
2	0.902	0.889	- 0.013	7	0.490	0.484	- 0.006
3	0.178	0.166	- 0.013	8	0.430	0.408	- 0.021
4	0.318	0.342	0.023	9	0.411	0.406	- 0.005
5	0.431	0.468	0.037	10	0.363	0.377	0.015

[10] dei campioni n. 5 e n. 6, si evince che l'incremento è pari a circa 0,05 (+9%) per il campione n. 5 e pari a circa 0,08 (+56%) per il campione n. 6 (v. fig. 6). Ciò è legato presumibilmente al fatto che la colorazione, avvenuta attraverso trattamenti superficiali, è più sensibile agli agenti termogrignometrici ai quali è sottoposta nel ciclo di invecchiamento (variazioni di temperatura, valori elevati di umidità relativa), con i quali viene direttamente a contatto, rispetto alla colorazione effettuata in pasta. Inoltre, per quanto riguarda il vetro n. 6, per il quale l'incremento di τ_e è più sensibile, occorre ricordare che le sollecitazioni termiche sono spesso responsabili del distacco della grisaglia e ciò conferma e avvalorata il risultato sperimentale.

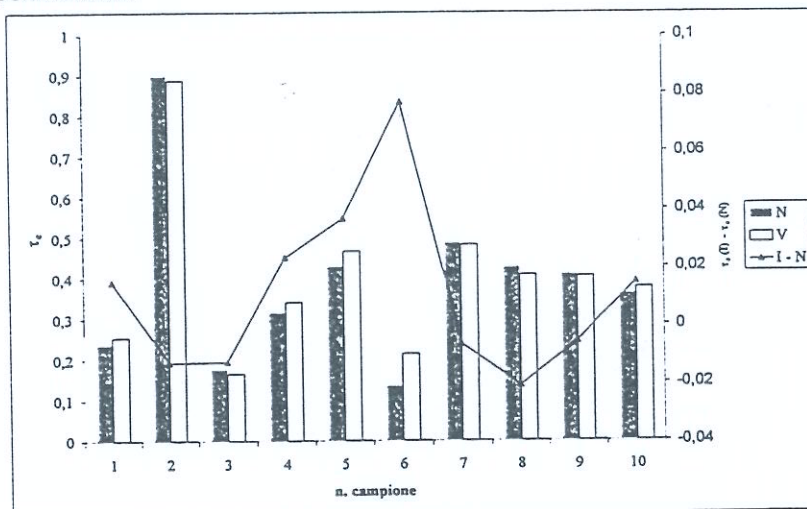


Fig. 6: confronto tra i fattori di trasmissione nel solare dei vetri nuovi e invecchiati

7. Conclusioni

Le vetrate storico-artistiche costituiscono il mezzo attraverso il quale le Chiese e le Cattedrali antiche erano illuminate durante le ore diurne, per effetto dell'illuminazione naturale. Le condizioni microclimatiche cui esse sono sottoposte nel corso di secoli possono alterare le proprietà di trasparenza e riflessione rispetto alla radiazione solare. Allo scopo di valutare l'influenza dell'invecchiamento sulle proprietà spettrofotometriche di tali vetrate, si sono misurati i coefficienti di trasparenza spettrale di 10 campioni di vetro impiegati nel restauro di vetrate storico-artistiche e sottoposti ad un ciclo di invecchiamento accelerato in camera climatica.

I risultati hanno mostrato che l'invecchiamento ha influenza sulle proprietà di trasparenza di campioni la cui colorazione non è effettuata in pasta, ma mediante trattamenti superficiali (bagno, tecnica della grisaglia). In particolare, per uno dei campioni, quello colorato in bagno, si è avuto un incremento del fattore di trasmissione nel solare dell'ordine del 9%; per un altro, colorato con la tecnica della grisaglia, l'incremento è stato del 56%. Questo è un risultato particolarmente importante in quanto la tecnica della grisaglia era molto diffusa nella colorazione delle vetrate antiche, soprattutto per creare gli effetti di chiaroscuro. Per completare l'indagine sono attualmente in corso misure del coefficiente di riflessione spettrale dei 10 campioni nuovi e invecchiati ed il calcolo del corrispondente coefficiente di

assorbimento spettrale, al fine di valutare l'influenza dell'invecchiamento anche su queste proprietà spettrofotometriche.

8. Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano la dott.ssa Ginevra Becchetti per la preziosa collaborazione nell'effettuazione delle misure spettrofotometriche.

9. Elenco dei simboli

S_λ = distribuzione spettrale dell'energia solare secondo la lunghezza d'onda (-);

T = temperatura (K, °C);

U.R. = umidità relativa (%);

$\Delta\lambda$ = intervallo di lunghezza d'onda (nm);

λ = lunghezza d'onda (nm);

τ_e = fattore di trasmissione nel solare (-);

$\tau(\lambda)$ = fattore di trasmissione spettrale (-).

10. Bibliografia

- [1] M. Felli, C. Buratti, F. Cotana: Sulla ventilazione di una vetrata artistica nel Duomo di Perugia, *Atti 49° Congresso Nazionale ATI*, Perugia, 26-30 settembre 1994, 387.
- [2] F. Asdrubali, C. Buratti: Condizioni ottimali di conservazione delle opere d'arte: rassegna bibliografica ed analisi critica, *Atti 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, 14-17 settembre 1999*.
- [3] F. Rossi, R. Baruffa: Simulazione delle condizioni termoisometriche di una vetrata della Cattedrale di Perugia, *Atti 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, 14-17 settembre 1999*.
- [4] F. Asdrubali, C. Buratti, F. Cotana: Il sistema di ventilazione della vetrata di Arrigo Fiammingo nel Duomo di Perugia: monitoraggio delle condizioni termoisometriche, *Atti 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, 14-17 settembre 1999*.
- [5] C. Buratti, F. Cotana, F. Scurpi: Rilievo della qualità dell'aria in alcuni spazi espositivi della Galleria Nazionale dell'Umbria, *Atti Giornata Seminariale Microclima, Qualità dell'Aria e Impianti negli Ambienti Museali, Firenze, 7 febbraio 1997*, 119.
- [6] F. Cotana, C. Buratti, R. Baruffa: Il contributo di vetrate artistiche all'illuminazione naturale, *Giornata di Studio ENEL La Civiltà della Luce, Perugia/Assisi, 5 novembre 1999*.
- [7] C. Buratti: Analysis of Thermal Stress and Strain on Arrigo Fiammingo's Artistic Window in the Cathedral of Perugia, *Journal of Heat Transfer, Vol. 123, n. 6, dicembre 2001*.
- [8] C. Buratti, S. Ortica: Experimental Data of Thermal Expansion Coefficient on Artistic Glass. *1st International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics; 8-10 Aprile 2002, Kruger Park, South Africa*.
- [9] UNI 10593-2: Vetro per edilizia, Vetrate isolanti. Prove d'invecchiamento, misurazione della penetrazione del vapor d'acqua e requisiti, *Luglio 1996*.
- [10] EN 410: Glass in buildings – determination of luminous and solar characteristics of glazing, 1998.