

INDAGINI SPETTROFOTOMETRICHE SULLE PROPRIETA' DI TRASPARENZA E RIFLESSIONE DELLE VETRATE ANTICHE DECORATE CON TECNICHE SUPERFICIALI

G. Moncada Lo Giudice (*), C. Buratti (**), G. Baldinelli (**)

1. Introduzione

Le vetrate antiche realizzate con vetri policromi sono oggetto di studio del Laboratorio di Controlli Ambientali dell'Università di Perugia da molti anni; in passato gli studi hanno riguardato temi quali il monitoraggio delle condizioni termoigrometriche, 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 impiegati per il restauro delle vetrate artistiche [1, 2, 3, 4, 5, 6]. In relazione a quest'ultimo aspetto, si è riscontrata una certa influenza dell'invecchiamento su vetri colorati con tecniche superficiali; la colorazione del vetro, infatti, può avvenire in pasta o per mezzo di tecniche superficiali quali la grisaglia, l'immersione in bagno, lo smalto, la velatura a smalto.

I vetri colorati con tecniche superficiali si rivelano più sensibili alla variazione delle condizioni ambientali, in particolare temperatura e umidità relativa, per effetto della diversa composizione chimica tra vetro di supporto e strato di colorazione, del diverso coefficiente di dilatazione termica o di interventi di pulitura troppo drastici [7]. In precedenti lavori [8, 9, 10], effettuati su dieci campioni di vetro colorato sottoposti ad un processo di invecchiamento accelerato in camera climatica, è emerso che 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, calcolato ai sensi della EN 410 [11], 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. In particolare, poichè non si sono reperiti in Letteratura dati su questo argomento, si è effettuata una rassegna delle proprietà spettrali di vetri colorati con tecniche superficiali, al fine di disporre di una banca dati e procedere, in una successiva fase della ricerca, a sottoporre i campioni ad un processo di invecchiamento e a verificarne l'influenza sulle proprietà spettrofotometriche.

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 primo 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.

(*) G. Moncada Lo Giudice, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Fisica Tecnica

(**) C. Buratti, G. Baldinelli, Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale

2. I campioni di vetro

Gli otto campioni di vetro analizzati sono stati forniti dallo Studio Forme di Roma; 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 (v. Fig.1). Per ciascun campione sono identificate le due facce, nel seguito denominate x (lato decorazione) e y (altro lato).

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).

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.

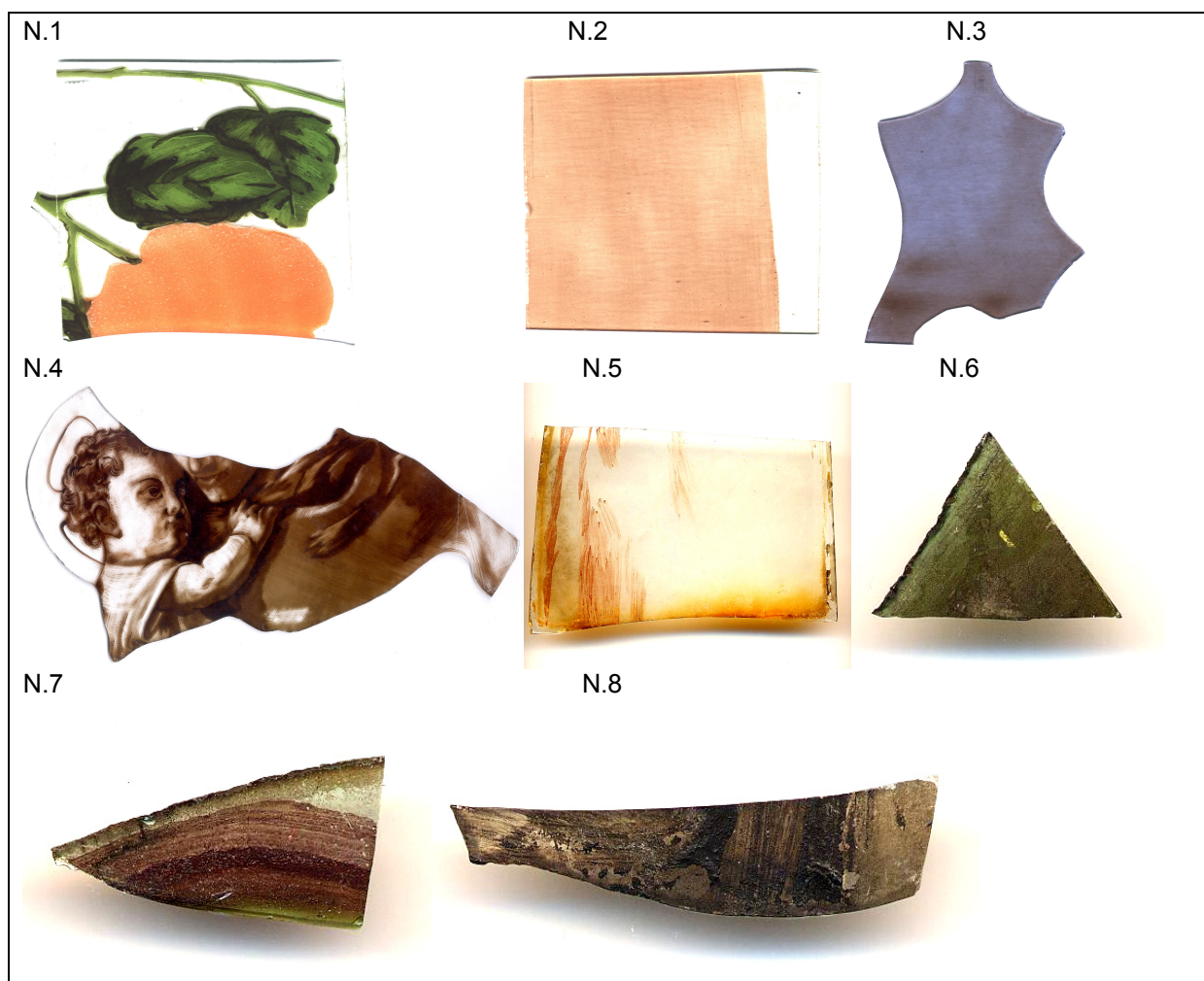


Figura 1: Campioni di vetro analizzati (le dimensioni relative dei campioni non sono reali)

3. Strumentazione e metodologia di misura

Le misure del coefficiente spettrale di trasmissione e riflessione sono state effettuate avvalendosi dello spettrofotometro Cary 2300, dotato di sfera integratrice per materiali diffondenti, per tutti i campioni tranne il n. 4, per il quale è stato utilizzato lo spettrofotometro portatile S2000, a causa delle dimensioni troppo elevate del campione.

Prima di effettuare le misure il campione viene pulito con etilene, lasciato essiccare all'aria e lucidato con cartine ottiche, secondo quanto previsto dalla UNI-EN 7885 relativamente alla preparazione dei campioni [12].

Le caratteristiche della strumentazione e la metodologia di misura dello spettrofotometro Cary 2300 sono descritti in precedenti lavori [8, 9, 10]; lo strumento è in grado di misurare le proprietà spettrali dei materiali nell'intervallo di lunghezze d'onda 180 – 3150 nm.

Lo spettrofotometro S2000 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. Queste grandezze vengono calcolate in modo relativo, si utilizzano pertanto misure che costituiscono due riferimenti, un BIANCO, che consiste in una misura in assenza del campione con sorgente accesa e un NERO, che consiste in una misura con sorgente spenta sempre in assenza del campione. Tale operazione permette di eliminare l'errore dovuto all'energia raggiante presente nell'ambiente al momento della misura, che viene così valutata calcolando la differenza tra il segnale rilevato con sorgente accesa e quello rilevato con sorgente spenta.

Lo spettrofotometro, equipaggiato con fibre ottiche, presenta due diverse configurazioni, a seconda che si debba eseguire una misura di riflessione o di trasmissione; nel primo caso 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. 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. Una volta memorizzati i due riferimenti e posizionato il campione tra la sorgente e il sensore, sullo schermo del computer collegato allo spettrofotometro compare una curva spettrale rappresentante la quota parte della radiazione emessa dalla sorgente che attraversa il campione. Il valore della trasmittanza, per ogni assegnata lunghezza d'onda, è calcolato secondo la seguente relazione:

$$T(\lambda)\% = \frac{(campione(\lambda) - NERO(\lambda))}{(BIANCO(\lambda) - NERO(\lambda))} \cdot 100 \quad (1)$$

4. Risultati sperimentali

Gli andamenti del coefficiente di trasmissione e riflessione in funzione della lunghezza d'onda dei campioni in esame sono riportati nelle Fig. 2, 3, 4 e 5; per il campione n. 4, misurato in 15 punti, sono riportati solo gli andamenti nei punti di trasmissione e riflessione massima e minima.

Per il calcolo dei coefficienti di trasmissione e riflessione nel visibile e nel solare i dati sono stati elaborati secondo la Normativa EN 410/1998 in base alle seguenti relazioni [11]:

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda=380}^{780} D_\lambda \tau(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{780} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda} \quad \text{coefficiente di trasmissione nel visibile} \quad (2)$$

$$\rho_v = \frac{\sum_{\lambda=380}^{780} D_\lambda \rho(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{780} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda} \quad \text{coefficiente di riflessione nel visibile} \quad (3)$$

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300}^{2500} S_\lambda \tau(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300}^{2500} S_\lambda \Delta\lambda} \quad \text{coefficiente di trasmissione nel solare} \quad (4)$$

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

coefficiente di riflessione nel solare (5)

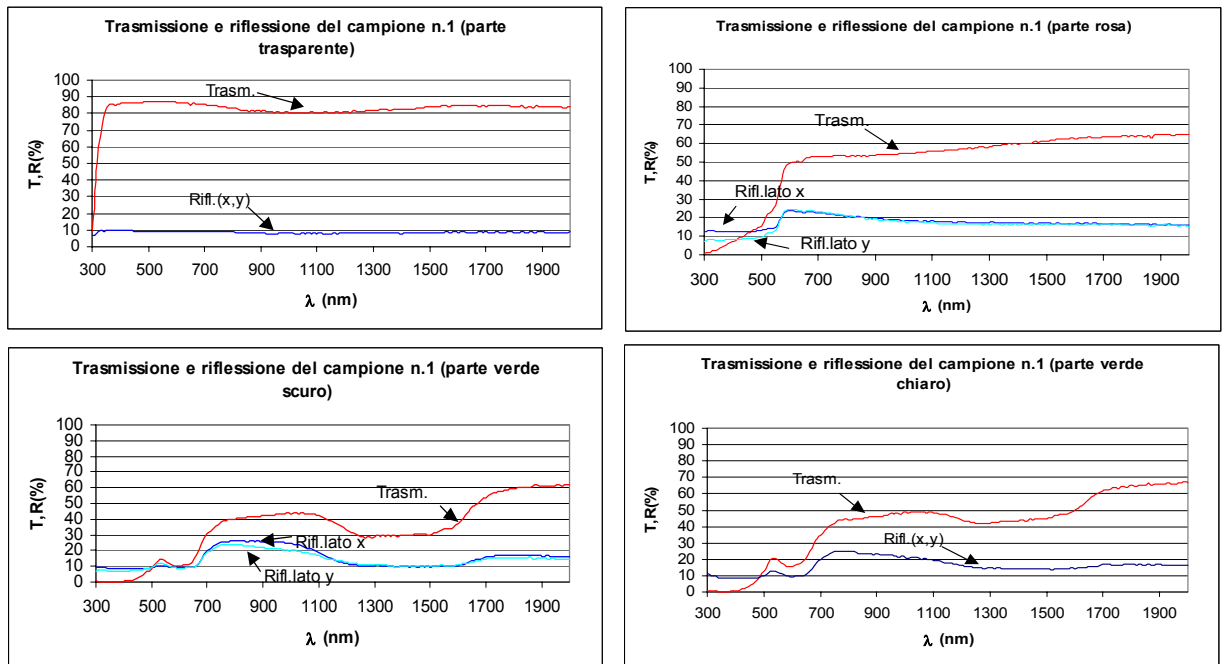


Figura 2: Andamenti dei coefficienti di trasparenza e riflessione (lati x, y) in funzione della lunghezza d'onda del campione n. 1

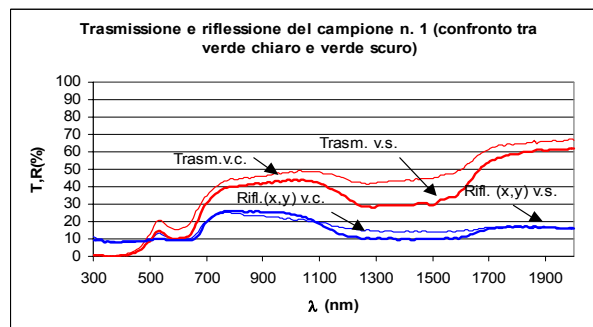


Figura 3: Confronto tra i coefficienti di trasmissione e riflessione spettrale in corrispondenza dei colori verde chiaro e verde scuro del campione n. 1

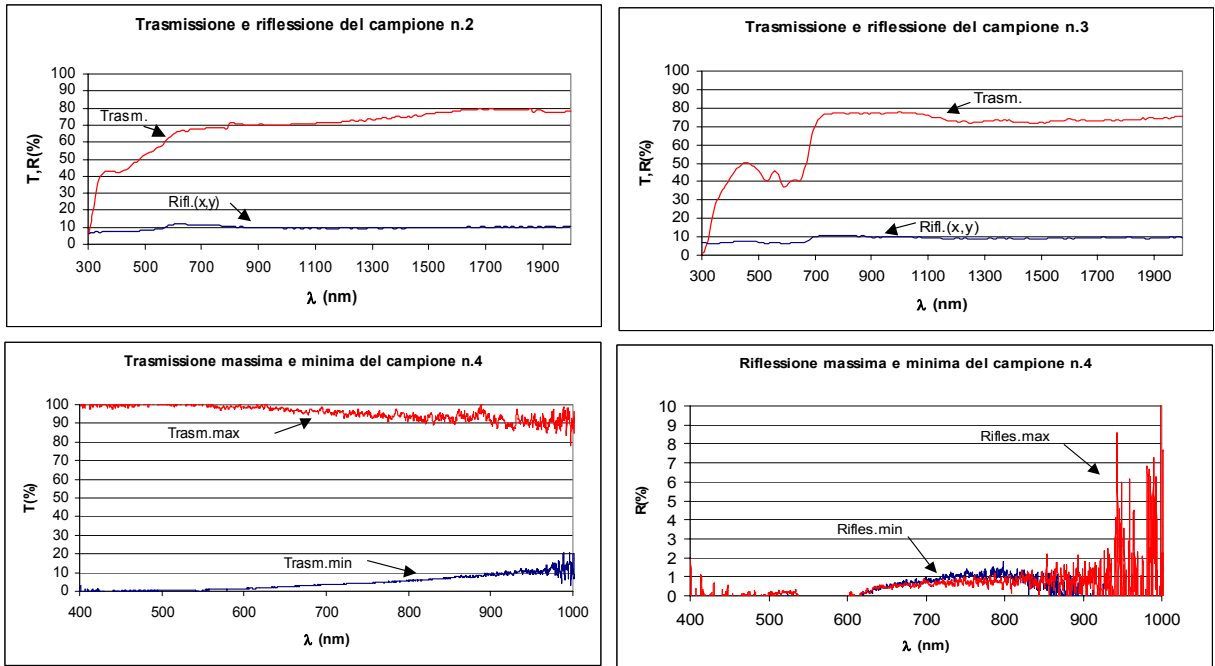


Figura 4: Andamenti dei coefficienti di trasparenza e riflessione (lati x, y) in funzione della lunghezza d'onda dei campioni n. 2, 3, 4

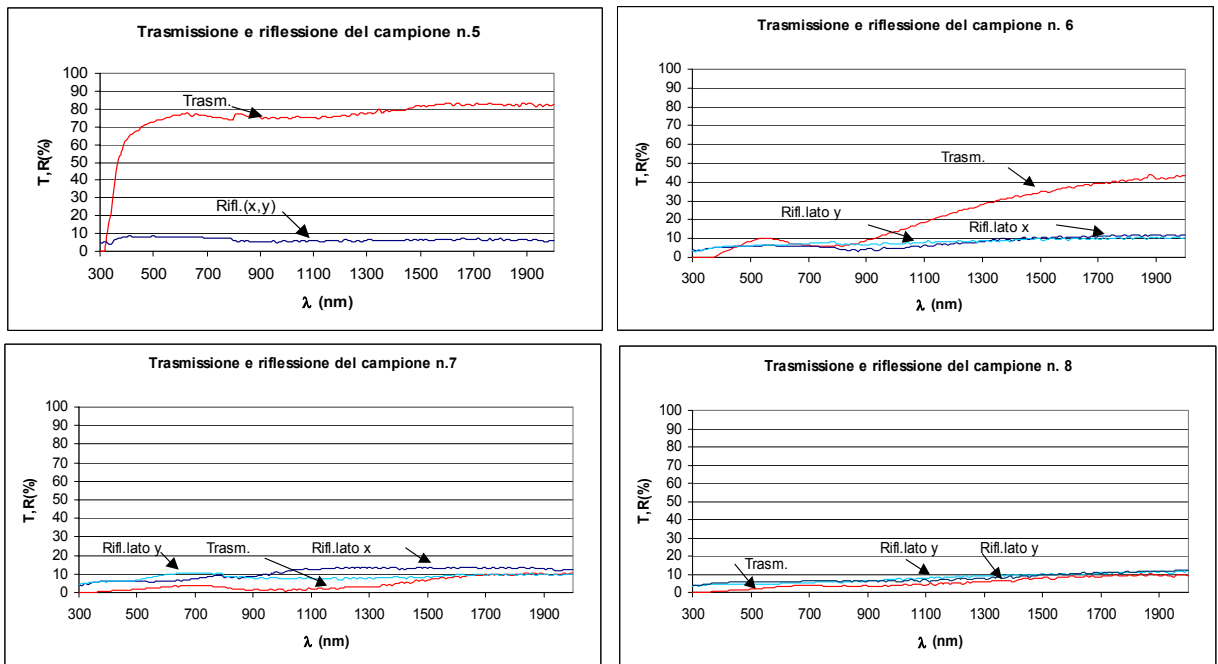


Figura 5: Andamenti dei coefficienti di trasparenza e riflessione (lati x,y) in funzione della lunghezza d'onda dei campioni antichi (n. 5, 6, 7 e 8)

Nelle Tab.1 e 2 sono riportati i valori dei coefficienti sopra citati; per il campione n. 4 non è stato possibile effettuare il calcolo di τ_e e ρ_e a causa del limitato intervallo di lunghezza d'onda in cui lavora lo spettrofotometro S2000.

		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

Tabella 1: 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

Tabella 2: Coefficienti di riflessione nel visibile e nel solare dei campioni analizzati

5. Confronti tra i campioni

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;

- le colorazioni verde chiaro e verde scuro del campione n. 1 forniscono andamenti del coefficiente di trasmissione e riflessione molto simili; il coefficiente di trasmissione della parte verde scuro è, come atteso, inferiore su tutto l'intervallo di lunghezze d'onda;
- 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%.

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.

6. Conclusioni

Le variazioni delle condizioni ambientali (temperatura, umidità relativa, radiazione solare) possono produrre processi di degrado nelle vetrate antiche di interesse storico-artistico ed inoltre possono generare sui vetri policromi condizioni di stress dannose in quanto si tratta di materiali fragili.

Con il tempo, inoltre, le condizioni ambientali possono influenzare le proprietà di trasmissione e riflessione relative alla radiazione solare e visibile.

Nel presente lavoro si sono misurate le proprietà di trasmissione e riflessione spettrale di campioni di vetro nuovi impiegati nel restauro delle vetrate artistiche e di frammenti di vetrate antiche, tutti caratterizzati da tecniche di colorazione superficiale, che si sono dimostrate essere le più sensibili alle condizioni microclimatiche [8, 9, 10].

I principali risultati ottenuti nel presente lavoro sono relativi ai campioni di vetro antichi colorati con la tecnica della grisaglia, che presentano valori più elevati dei coefficienti di riflessione. 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.

Data la mancanza in Letteratura di caratterizzazioni spettrofotometriche di vetri di questo tipo, le misure effettuate hanno dato la possibilità di costruire una banca dati piuttosto ampia, che abbraccia le principali tecniche di colorazione superficiale dei vetri. Tali dati potranno essere impiegati per procedere nella ricerca con la verifica dell'influenza di un processo di invecchiamento accelerato cui i campioni potranno essere sottoposti sulle loro proprietà spettrali di trasparenza e riflessione.

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. Elenco dei simboli

BIANCO(λ) = valore dello spettro del BIANCO;

campione(λ) = valore di T o R del campione in funzione della lunghezza d'onda;

D_λ = distribuzione spettrale relativa dell'illuminante D_{65} ;
NERO(λ) = valore dello spettro del NERO;
R = coefficiente di riflessione;
 S_λ = distribuzione spettrale relativa dell'energia solare;
T = coefficiente di trasmissione;
 $V(\lambda)$ = efficienza spettrale per una visione fototipica definita per l'osservatore standard;
 $\Delta\lambda$ = intervallo di lunghezza d'onda (nm);
 λ = lunghezza d'onda (nm);
 $\rho(\lambda)$ = fattore di riflessione spettrale del vetro;
 $\tau(\lambda)$ = fattore di trasmissione spettrale della vetrata in esame.

8. Bibliografia

- [1] C. Buratti, F. Cotana, M. Felli, 1994, *Sulla ventilazione di una vetrata artistica nel Duomo di Perugia*, 49° Congresso Nazionale ATI, Perugia, settembre 1994.
- [2] F. Asdrubali, C. Buratti, 1999, *Condizioni ottimali di conservazione delle opere d'arte: rassegna bibliografica ed analisi critica*, 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, settembre 1999.
- [3] F. Rossi, R. Baruffa, 1999, *Simulazione delle condizioni termoigrometriche di una Vetrata della Cattedrale di Perugia*, 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, settembre 1999.
- [4] F. Asdrubali, C. Buratti, F. Cotana, 1999, *Il sistema di ventilazione della vetrata di Arrigo Fiammingo nel Duomo di Perugia: monitoraggio delle condizioni termoigrometriche*, 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, settembre 1999.
- [5] C. Buratti, F. Cotana, R. Baruffa, 1999, *Il contributo di vetrate artistiche all'illuminazione naturale*, Workshop AIDI-ENEL La civiltà della Luce, Perugia-Assisi, 5 novembre, 1999.
- [6] F. Cotana, *Impianto sperimentale di Ventilazione e Termoregolazione per la Conservazione di una Vetrata Storico Artistica*, Condizionamento dell'aria, Riscaldamento e Refrigerazione (CDA), No. 6, giugno 2000, p. 641-654.
- [7] <http://www.vetrartistichevittore.it/grisaglie.htm>.
- [8] F. Gugliermetti, C. Buratti, S. Ortica: *Indagini spettrofotometriche per la valutazione dell'invecchiamento di vetrate artistiche*, Congresso Nazionale AIDI "Luce come innovazione", Perugia, dicembre 2001.
- [9] C. Buratti, F. Rossi: *Misura delle proprietà spettrofotometriche di campioni di vetro nuovi e invecchiati per il restauro di vetrate artistiche*, 56° Congresso Nazionale ATI, Pisa, settembre 2002.
- [10] C. Buratti: *Aging influence on the thermal and optical properties of artistic glasses: experimental data and comparison*, The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Hawaii, 16-20 marzo 2003.
- [11] EN 410: *Glass in buildings – determination of luminous and solar characteristics of glazing*, 1998.
- [12] Normativa UNI EN 7885/1978: *Prove sul Vetro. Determinazione dei Fattori di Trasmissione dell'Energia Solare*.