

ANALISI DELLE TENSIONI RESIDUE NEI VETRI MEDIANTE FOTOELASTICITÀ RGB E LASTRA A TINTA SENSIBILE

A. Ajovalasit^a, G. Petrucci^b, M. Scafidi^c

Università degli Studi di Palermo - Viale delle Scienze, 90128 Palermo
^a e-mail: a.ajovalasit@gmail.com; ^b e-mail: giovanni.petrucci@unipa.it ;
^c e-mail: michele.scafidi@unipa.it

Sommario

L'analisi delle tensioni residue nel vetro viene solitamente effettuata mediante metodi fotoelastici. Questo lavoro considera l'automazione del metodo fotoelastico in luce bianca basato sull'uso congiunto della fotoelasticità RGB e di una lastra *a tinta sensibile* (*full wave plate o tint plate*), che manifesta il ritardo di un ordine di frangia, posta in serie alla lastra di vetro. Il metodo proposto è stato applicato all'analisi delle tensioni residue membranali in un vetro temperato.

Abstract

The analysis of residual stress in glass is usually carried out by means of photoelastic methods. This paper considers the automation of the white light RGB photoelastic method based on the use of a full-wave plate (or *tint plate*) placed behind the glass plate. The proposed method have been applied to the analysis of membrane residual stresses in tempered glass.

Parole chiave: vetro, tensioni residue, fotoelasticità RGB, lastra a tinta sensibile.

1. INTRODUZIONE

È noto che la fotoelasticità è utilizzata per l'analisi delle tensioni residue nel vetro [1-3]. Lo sviluppo della fotoelasticità digitale [4-5] ha permesso di automatizzare le procedure di analisi tramite i seguenti metodi: *Gray Field Polariscopes* [6-8], *SCA (Spectral Content Analysis)* [9-15], variazione di fase (*PSM – Phase Shifting Method*) [16-17], fotoelasticità RGB [18-20] e *Test Fringes* [21].

La fotoelasticità in luce bianca è stata ampiamente usata per l'analisi delle tensioni residue nei vetri. In particolare, la determinazione del ritardo è stata effettuata analizzando i colori ottenuti tramite l'uso della lastra a tinta sensibile [1-2,22-23]. La tecnica consiste nell'inserire una lastra a tinta sensibile (che introduce un ritardo costante uguale ad 1 ordine di frangia) in serie con il vetro da analizzare. Il ritardo della lastra a tinta sensibile si somma algebricamente al ritardo presente nel vetro da analizzare. L'uso della lastra a tinta sensibile è particolarmente efficace vicino alla frangia di ordine zero dove il ritardo è basso e, come noto, la sua misurazione è soggetta ad errori significativi nel caso di analisi effettuata con sorgenti di luce bianca.

La mera osservazione dei colori e l'uso della carta dei colori [1,24] producono spesso risultati qualitativi. Nell'ambito delle tecniche automatiche, l'uso della lastra a tinta sensibile è stata proposta da Ivanova e Nechev (1990) [12] e da Sanford e McGinnis (1991) [13] in combinazione con il metodo SCA, e qualitativamente da Lavrador et al. (1998) [18] con la fotoelasticità RGB.

In questo lavoro si analizza, quantitativamente, l'uso congiunto della fotoelasticità RGB [25-27] e della lastra a tinta sensibile. Questo metodo è chiamato per brevità *metodo ATPM (Automated Tint*

Plate Method). Dopo l'analisi teorica del metodo, si mostra l'applicazione del metodo alla determinazione delle tensioni residue membranali in una lastra di vetro.

2. TEORIA

La figura 1 mostra lo schema del polariscopio dove si nota, in serie al vetro, un provino soggetto a trazione che funge da lastra a tinta sensibile. Di solito, le norme tecniche riguardanti l'analisi delle tensioni residue nei vetri prevedono l'impiego una lastra a tinta sensibile che produce un ritardo di 565 nm. Il valore del ritardo introdotto dalla lastra a tinta sensibile non è un valore critico: in questo lavoro è stata utilizzata una lastra che produce un ritardo spaziale di 589 nm. Questo ritardo può essere ottenuto anche utilizzando un compensatore di Babinet-Soleil o un provino soggetto ad una tensione assiale, come mostrato in figura 1.

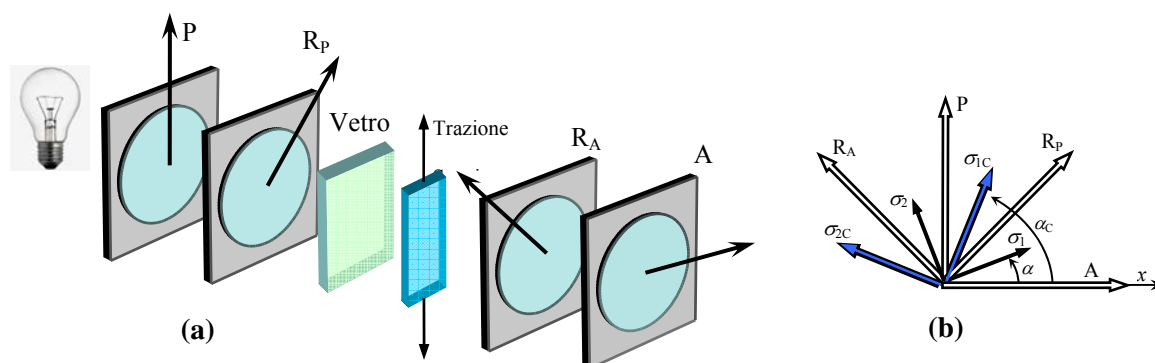


Figura 1: (a) Polariscopio circolare a campo scuro con l'impiego di un provino sottoposto a trazione quale lastra a tinta sensibile, (b) orientamento degli elementi (P,A = polarizzatore ed analizzatore, R_P, R_A = lastre quarto d'onda, σ_1, σ_2 = tensioni principali nel vetro, σ_{1c}, σ_{2c} = tensioni principali nel provino sottoposto a trazione, α, α_c = angoli delle tensioni principali nel vetro e nel provino sottoposto a trazione).

2.1. Analisi in luce monocromatica

Nel caso di luce monocromatica, l'intensità emergente dal polariscopio (Fig. 1) è data dalla relazione valida per il metodo della trasformata di Fourier [28] e per il metodo del "test fringes" [21]. La relazione, non considerando l'intensità di fondo, può essere scritta come di seguito

$$I = \frac{I_0}{2} \left[1 - \sin^2(\alpha - \alpha_c) \cos 2\pi(\delta^c - \delta) - \cos^2(\alpha - \alpha_c) \cos 2\pi(\delta^c + \delta) \right] \quad (1)$$

dove I_0 è l'intensità di riferimento, α_c e α sono gli angoli che definiscono le direzioni delle tensioni principali rispettivamente nel provino sottoposto a trazione e nel vetro (Fig. 1b), δ^c è il ritardo (noto) nel provino sottoposto a trazione, δ è il ritardo incognito nel vetro che è legato alle tensioni principali σ_1 e σ_2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2$) nel vetro dalla ben nota relazione

$$\delta = \frac{C_\lambda d}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

dove C_λ è la costante fotoelastica del vetro, d è lo spessore del vetro e λ è la lunghezza d'onda della luce.

L'equazione (1) mostra che in fotoelasticità, al contrario di altri metodi ottici come l'olografia o moiré, l'intensità emergente dipende dai seguenti due parametri legati allo stato tensionale: il ritardo δ e l'angolo delle tensioni α . Solo sotto le seguenti condizioni:

$$\alpha - \alpha_c = 0^\circ \text{ o } \pm 90^\circ \quad (3)$$

l'intensità dipende esclusivamente dal ritardo δ . In questi casi, l'equazione (1) diventa

$$I = I_0 \sin^2 \pi (\delta^c \pm \delta) \quad (4)$$

dove il segno superiore si applica per $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ ed il segno inferiore per $\alpha - \alpha_c = 90^\circ$. Quindi, il ritardo totale risulta dall'equazione (4) [21]:

$$\delta^{tot} = |\delta^c \pm \delta| \quad (5)$$

dove il segno è scelto con la stessa regola dell'equazione (4). Il ritardo incognito nel vetro è:

$$\delta = |\delta^{tot} - \delta^c| \quad (6)$$

per $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ o $\pm 90^\circ$ con $\delta_c > \delta$,

$$\delta = \delta^{tot} + \delta^c \quad (7)$$

per $\alpha - \alpha_c \pm 90^\circ$ con $\delta_c < \delta$.

Nel caso di uso di una lastra a tinta sensibile le direzioni delle tensioni principali σ_{1c}, σ_{2c} sono sostituite dalle direzioni degli assi ottici (lento e veloce) della lastra a tinta sensibile.

2.2. Uso della luce bianca

In luce bianca, non considerando per semplicità l'errore dovuto alle lastre quarto d'onda [21] e la dispersione della birifrangenza, l'equazione (4) diventa:

$$I_{wj} = \frac{1}{\lambda_{j2} - \lambda_{j1}} \int_{\lambda_{j1}}^{\lambda_{j2}} I_0(\lambda) T(\lambda) T^c(\lambda) F_j(\lambda) \sin^2 \pi \frac{\lambda_0}{\lambda} (\delta_0^c \pm \delta_0) d\lambda, \quad (j = R, G, B) \quad (8)$$

dove $T(\lambda)$ e $T^c(\lambda)$ sono rispettivamente la trasmittanza del vetro e della lastra a tinta sensibile, $F_j(\lambda)$ è la risposta spettrale dei filtri della telecamera, $\lambda_{j1}, \lambda_{j2}$ sono le lunghezze d'onda iniziale e finale dei tre filtri sopra menzionati, il pedice w indica che le acquisizioni sono state fatte in luce bianca, δ_0 e δ_0^c sono i ritardi nel vetro (incognito) e nella lastra a tinta sensibile (noto) alla lunghezza d'onda di riferimento λ_0 .

La determinazione del ritardo δ_0 per mezzo dell'equazione (8) non è semplice, per cui si applica una procedura in due passi consistenti nella creazione di un data-base di colori (fase di calibrazione) e nella successiva misurazione del ritardo utilizzando il data-base. La lastra a tinta sensibile è usata anche nella fase di calibrazione. Sotto queste condizioni, la relazione (8) si applica in entrambe le fasi di calibrazione e di misura. Conseguentemente, ad una data terna di segnali R, G, B (determinata o nella fase di calibrazione o in quella di misura) corrisponde lo stesso ritardo totale alla lunghezza d'onda di riferimento, come nel caso monocromatico [v. eq.(5)]:

$$\delta_0^{tot} = |\delta_0^c \pm \delta_0| \quad (9)$$

dove, come nel caso di luce monocromatica, il segno superiore si applica per $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ ed il segno inferiore per $\alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ$.

2.2.1. Procedura di calibrazione

La procedura di calibrazione usuale consiste nell'acquisizione dei livelli R , G , e B lungo una sezione di un apposito provino di taratura soggetto a flessione.

In generale la colorazione dei materiali e la dispersione della birifrangenza influenzano la misura. Per questa ragione i migliori risultati si ottengono se per la calibrazione viene utilizzato lo stesso materiale dell'elemento da analizzare. Tuttavia, nel caso di analisi delle tensioni residue nel vetro, l'esecuzione di un provino di calibrazione dello stesso materiale dell'elemento da analizzare può essere difficoltosa. In questo caso, è possibile utilizzare un provino di calibrazione di materiale differente, applicando una procedura di adattamento dei colori [29] ovvero, in alternativa, applicare la cosiddetta *procedura di autotaratura (Self-Cal procedure)* [20], come fatto in questo lavoro.

L'uso della procedura di auto taratura permette di creare una tabella di taratura utilizzando un provino, soggetto a tensioni residue, dello stesso materiale dell'elemento da analizzare, eliminando la necessità di realizzare un provino dedicato soggetto a flessione o la procedura di adattamento dei colori. La lastra a tinta sensibile deve essere posizionata nel polariscopio con gli assi ottici allineati con la direzione delle tensioni principali del provino di taratura, in modo tale che ad ogni terna R_i , G_i , e B_i della tabella di taratura sia associato un valore del ritardo pari a $\delta_{0i}^{tot} = |\delta_0^c \pm \delta_{0i}|$.

2.2.2. Ricerca del ritardo

Nella fase di misura del ritardo, si acquisiscono i segnali R , G , e B nei punti dove il ritardo è incognito usando nuovamente la lastra a tinta sensibile con gli assi ottici allineati con le tensioni principali del vetro. Ogni terna R , G , e B viene quindi confrontata con le terne R_i , G_i , e B_i presenti nella tabella di taratura. Il ritardo incognito $\delta_0^{tot} = |\delta_0^c \pm \delta_0|$, alla lunghezza d'onda di riferimento λ_0 , è quello corrispondente ai valori R_i , G_i , e B_i che minimizzano una funzione errore definita come:

$$e_i = \sqrt{(R_i - R)^2 + (G_i - G)^2 + (B_i - B)^2} \quad (10)$$

Quindi, si determina l'indice i della tabella di taratura che minimizza la funzione errore (10) per ogni pixel dell'immagine acquisita. Il ritardo è quindi determinato con la relazione:

$$\delta_{0i}^{tot} = \left(\delta_{0N}^{tot} - \delta_{00}^{tot} \right) \frac{i}{N} + \delta_{00}^{tot}; \quad 0 \leq i \leq N \quad (11)$$

dove δ_{0N}^{tot} è il ritardo massimo presente nella tabella di taratura, N è l'indice dell'ultimo elemento della tabella di taratura (corrispondente a δ_{0N}^{tot}) e δ_{00}^{tot} è il ritardo minimo della tabella di taratura in corrispondenza del primo elemento di indice $i=0$; se, come usualmente si ha, il primo elemento della tabella di taratura corrisponde alla frangia di ordine zero, si ha $\delta_{00}^{tot} = 0$. Come alternativa alla procedura di ricerca del ritardo basata sull'applicazione dell'equazione (10) valutata per l'intera tabella di taratura, è preferibile l'uso di una procedura basata sull'equazione (10) applicata solo ad una parte della tabella di taratura [27]. Questa ultima procedura è caratterizzata da un minore tempo di elaborazione e contiene implicitamente la condizione di continuità del ritardo. Inoltre essa riduce gli errori in un modo simile alle procedure che impiegano esplicitamente la condizione di continuità del ritardo [30,31].

Una volta che il ritardo totale δ_0^{tot} è stato determinato ed essendo noto il ritardo δ_0^c della lastra a tinta sensibile, il ritardo δ_0 può essere determinato con la stessa relazione usata per la luce monocromatica [v. eq.(6)-(7)] come di seguito riportato:

$$\delta_0 = \left| \delta_0^{tot} - \delta_0^c \right| \quad (12)$$

per $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ o $\alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ$ con $\delta^c > \delta$;

$$\delta_0 = \delta_0^{tot} + \delta_0^c \quad (13)$$

per $\alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ$ con $\delta^c < \delta$.

Usualmente, è consigliabile operare, come si è fatto in questa memoria, nel campo di validità dell'eq.(12).

2.2.3. Determinazione delle tensioni

Nota il ritardo δ_0 , la differenza delle tensioni principali è determinata tramite l'equazione (2) che, scritta per la lunghezza d'onda di riferimento λ_0 , fornisce:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda_0}{C_0 d} \delta_0 \quad (14)$$

dove la costante fotoelastica C_0 del vetro usualmente varia tra 2.4 e 3.6 Brewster (1 Brewster = 1 TPa⁻¹). In questo lavoro, come esempio di applicazione, è stato assunto un valore medio di $C_0 = 3$ Brewster.

In particolare in corrispondenza del bordo (usualmente compresso, cioè con $\sigma_1 = 0$) la tensione tangenziale al bordo è:

$$\sigma_2 = -\frac{\lambda_0}{C_0 d} \delta_0 \quad (15)$$

3. ESPERIMENTI

Gli esperimenti sono stati realizzati utilizzando un polariscopio circolare a campo scuro con lastre quarto d'onda corrette per la lunghezza d'onda di 589 nm (luce monocromatica gialla) usando:

1. per il metodo RGB, una sorgente di luce bianca costituita da tubi fluorescenti Philips di tipo Master 7L-D Super 80 18 Watt/827 con uno spettro di emissione discreto (Fig. 2a) con tre picchi principali di emissione alle seguenti lunghezze d'onda: $\lambda_R = 612$ nm (rosso), $\lambda_G = 546$ nm (verde), $\lambda_B = 436$ nm (blu);
2. per il metodo a variazione di fase, una sorgente di luce monocromatica costituita da lampade a vapore di sodio avente un unico picco di emissione a $\lambda_0 = 589$ nm;
3. una telecamera RGB modello JVC KY-F30 3CCD avente tre CCD indipendenti con una risposta spettrale approssimativamente pari a quella mostrata in figura 2b, in combinazione con una scheda di acquisizione Matrox Meteor-II con una risoluzione spaziale di 768x576 pixel e 256 livelli per ogni colore;
4. una lastra a tinta sensibile avente un ritardo di $\delta_0^c = 1$ ordine di frangia alla lunghezza d'onda di riferimento $\lambda_0 = 589$ nm;
5. due lastre di vetro temprato (Fig. 3) per l'analisi delle tensioni residue.

Il sistema ottico è stato regolato in modo da ottenere un fattore di scala compreso tra 23.5 e 36.6 pixel/mm; questo assicura che le lastre di vetro non presentino gradienti superiori a 0.1 ordini/pixel [25].

La procedura di auto taratura è stata effettuata in una opportuna sezione dello stesso vetro da analizzare con la lastra a tinta sensibile posta dietro il vetro. Gli assi ottici delle lastre di vetro sono stati allineati con il bordo del vetro e con la sua normale, in modo da ottenere al bordo, ed in prossimità di questo, una delle seguenti condizioni: $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ o $\alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ$. La figura 3 mostra i vetri temprati usati per gli esperimenti, dove sono indicate le zone di interesse (*ROI - Region Of Interest*).

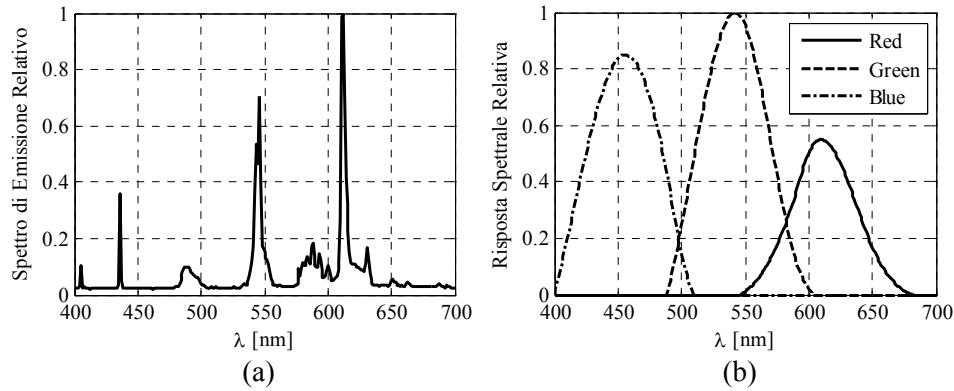


Figura 2: (a) spettro di emissione della sorgente di luce bianca (comuni tubi fluorescenti) usata per le esperienze, (b) distribuzioni spettrali approssimate dei filtri R, G e B della telecamera utilizzata per le esperienze.

3.1. Effetto del disallineamento

Al fine di valutare l'effetto dell'eventuale posizionamento errato degli assi ottici della lastra a tinta sensibile rispetto alle direzioni delle tensioni principali nel vetro, è stato utilizzato il vetro temprato mostrato in figura 3a.

In questo vetro sono state analizzate le tensioni residue lungo la sezione centrale della ROI.1, dove il ritardo è compreso tra 0 e 0.5 ordini di frangia e il parametro dell'isocлина è costante. L'analisi è stata fatta ruotando la lastra a tinta sensibile da $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ (posizione corretta) fino a $\alpha - \alpha_c = 30^\circ$. La figura 4a mostra il ritardo δ_0 lungo la sezione di misura della ROI.1, per due valori di $\alpha - \alpha_c$, determinato mediante il metodo APM, e, per confronto, con il metodo a variazione di fase (PSM) applicato in assenza della lastra a tinta sensibile. La figura 4b mostra gli errori rispetto al metodo PSM.

In figura 5 sono mostrati la media degli errori e_a (valutati rispetto al metodo a variazione di fase nell'intera ROI.1) e la deviazione standard std in funzione del disallineamento $\alpha - \alpha_c$.

La figura 5, inoltre mostra che il disallineamento non è critico: quindi, per esempio, l'errore medio e la deviazione standard previsti sono $e_a = 0.005$ ordini di frangia, $std = 0.020$ ordini di frangia per un disallineamento di 2.5° , mentre per un disallineamento di 15.8° si ha $e_a = -0.019$ ordini di frangia, $std = 0.033$ ordini di frangia.

3.2. Analisi delle tensioni residue

L'analisi delle tensioni residue è stata effettuata in una porta in vetro ed in particolare nella zona interna identificata come ROI.2, mostrata nella figura 3b. Nella zona analizzata il parametro dell'isocлина rimane pressoché costante con valori attorno a 0° , con un errore massimo di 2.5° in un punto distante circa 10 mm dal bordo. Nell'intera ROI.2 il ritardo è compreso nel campo $0 \leq \delta < 0.5$ ordini di frangia. Inoltre in questo caso la lastra a tinta sensibile è stata posizionata in modo da ottenere la condizione $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ al bordo del vetro.

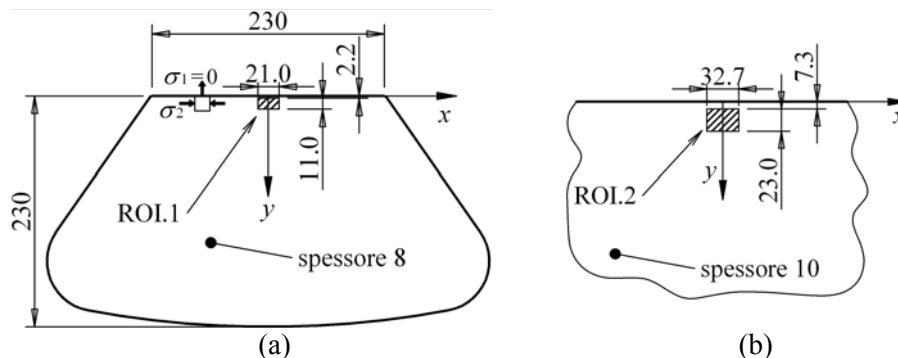


Figura 3: (a) vetro temprato (mensola) utilizzato per la valutazione dell'errore di disallineamento, (b) vetro temprato utilizzato per la valutazione delle tensioni residue (dimensioni in mm).

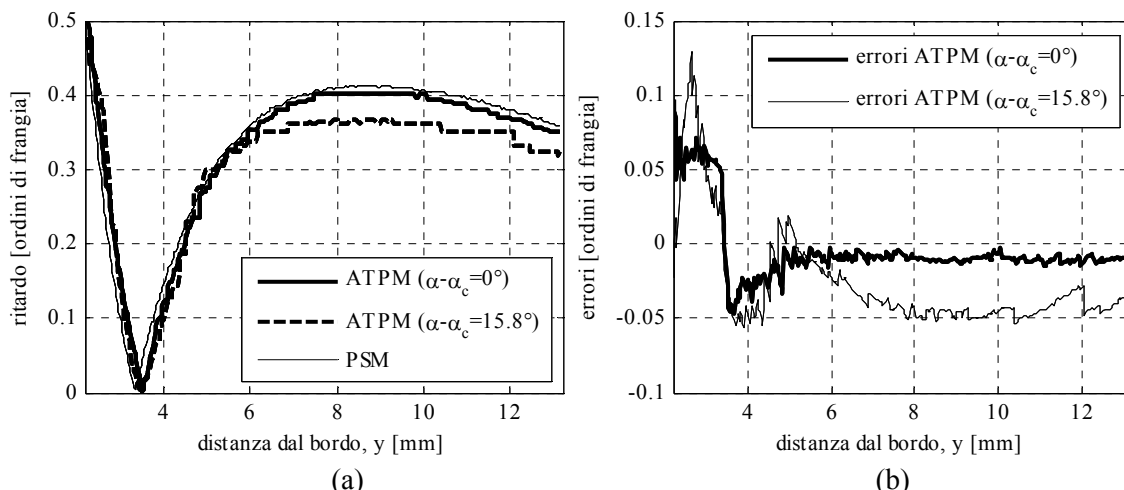


Figura 4: ROI.1: (a) ritardo δ_0 lungo la sezione centrale misurato con il metodo ATPM per $\alpha-\alpha_c=0^\circ$ e $\alpha-\alpha_c=15.8^\circ$ e, per confronto, con il metodo PSM, (b) errori rispetto al metodo PSM.

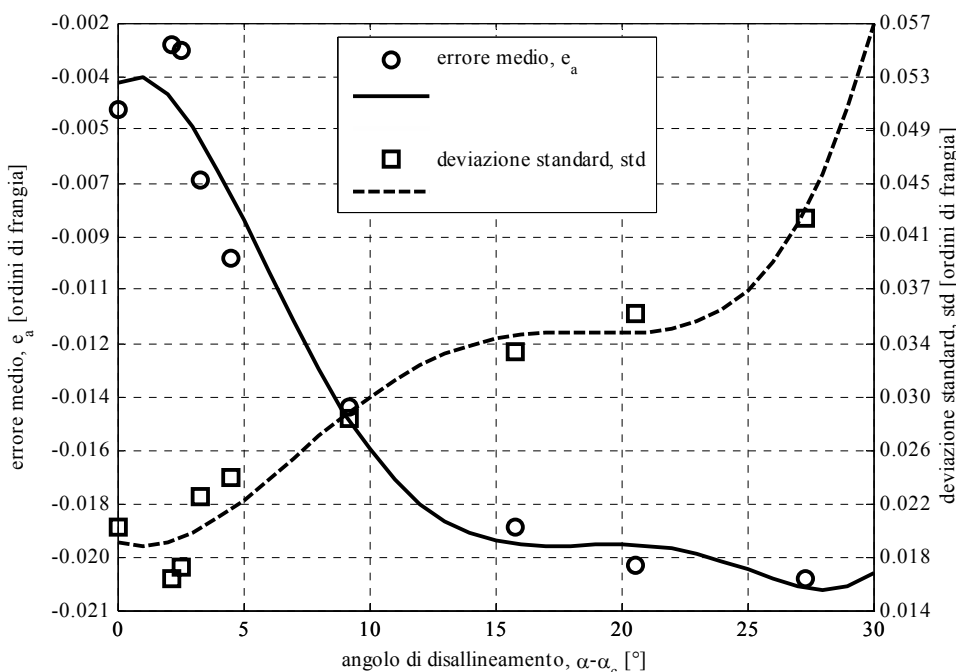


Figura 5: ROI.1: Errore medio e_a (scala a sinistra) e deviazione standard std (scala a destra) in funzione dell'angolo di disallineamento $\alpha-\alpha_c$: valori sperimentali (\circ, \square) e interpolazioni ($—, - -$).

La figura 6 mostra le isocromatiche senza (a) e con (b) la presenza della lastra a tinta sensibile. Nella figura 6c sono mostrati il ritardo totale δ_0^{tot} determinato con il metodo ATPM ed il ritardo δ_0 valutato con il metodo RGB. È chiaramente visibile come l'uso della lastra a tinta sensibile permette di operare al di fuori del campo con bassi ordini di frangia.

La figura 7a mostra il ritardo δ_0 lungo la sezione di misura determinato con il metodo RGB classico, con il metodo automatico della lastra a tinta sensibile (ATPM) e, per confronto, con il metodo a variazione di fase (PSM) proposto in [32]. La figura 7b mostra gli errori rispetto al metodo PSM. In particolare, gli errori relativi alla sezione di misura sono indicati nel seguito:

- per il metodo ATPM: l'errore medio è $e_a=-0.009$ ordini di frangia, la deviazione standard è $std=0.006$ ordini di frangia;
- per il metodo RGB: $e_a=-0.028$ ordini di frangia, $std=0.018$ ordini di frangia.

L'analisi dei risultati descritti e di quelli riportati in figura 7 mostra il vantaggio dell'uso della lastra a tinta sensibile per la misura di ritardi inferiori a 0.5 ordini di frangia.

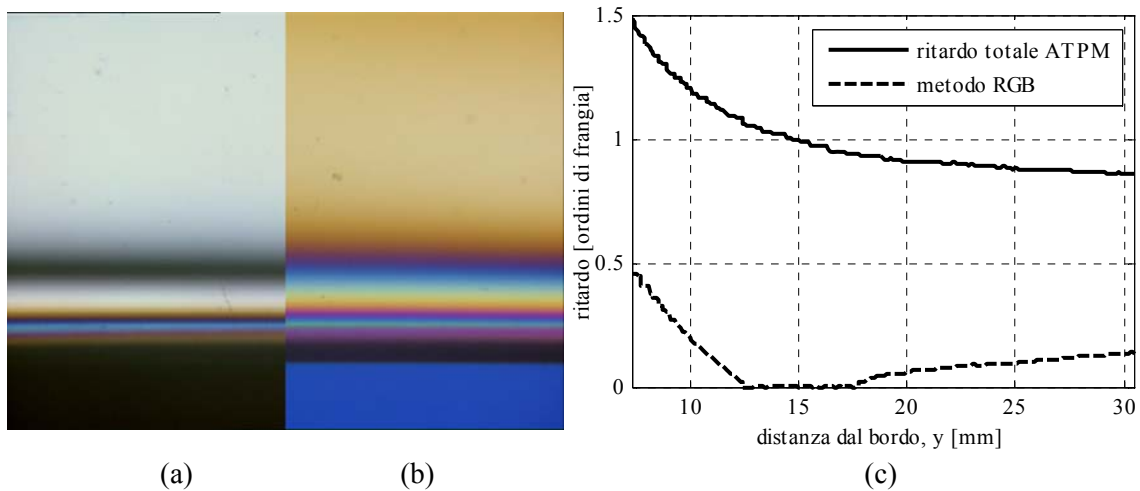


Figura 6: ROI.2: isocromatiche senza (a) e con (b) lastra a tinta sensibile, (c) ritardo totale δ_0^{tot} determinato con il metodo ATPM e ritardo δ_0 determinato con il metodo RGB.

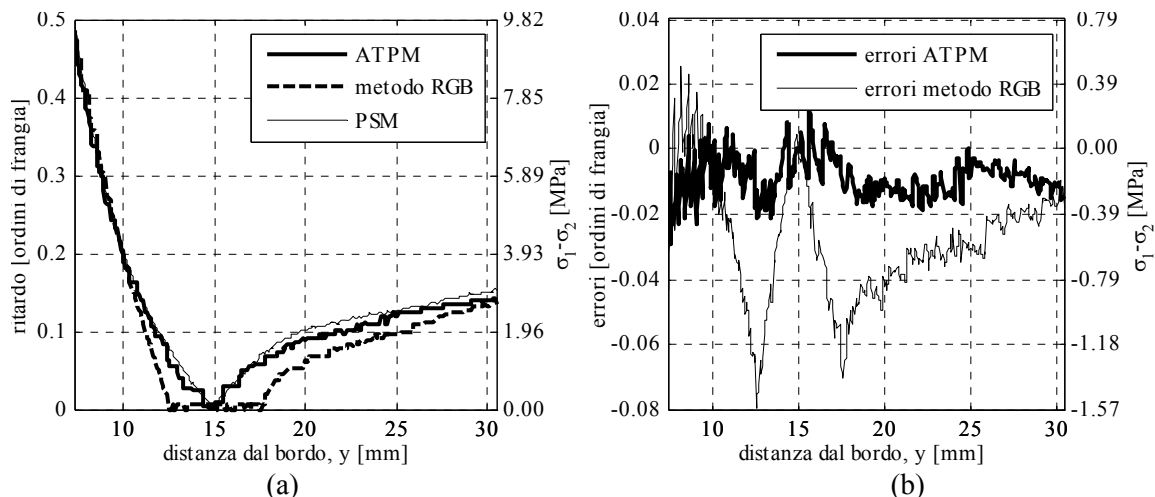


Figura 7: ROI.2: (a) ritardo (scala a sinistra) e tensioni residue (scala a destra) in funzione della distanza y dal bordo determinati con il metodo ATPM, con il metodo RGB e, per confronto, con il metodo PSM, (b) errori rispetto al metodo PSM.

4. CONCLUSIONI

Nel caso di bassi valori del ritardo, l'analisi fotoelastica in luce bianca è affetta da errori che possono essere attenuati utilizzando una lastra a tinta sensibile. Operando in questo modo è possibile incrementare il ritardo migliorando l'accuratezza dei metodi basati sull'uso di sorgenti di luce bianca. In questo lavoro si propone l'automazione del metodo basato sull'uso della lastra a tinta sensibile tramite il metodo RGB in luce bianca. Rispetto al metodo manuale, è solamente necessario aggiungere un sistema di acquisizione delle immagini.

L'analisi quantitativa, usando come riferimento il metodo a variazione di fase, ha mostrato che gli errori medi e la deviazione standard sono inferiori rispetto a quelli ottenibili con il classico metodo RGB senza lastra a tinta sensibile. Rispetto al metodo a variazione di fase (che usualmente necessita sei acquisizioni), il metodo proposto ha il vantaggio di richiedere una sola acquisizione. Il metodo

chiaramente richiede l'allineamento tra gli assi ottici della lastra a tinta sensibile e la direzione delle tensioni residue principali, nonostante un disallineamento di 15° sia trascurabile.

In conclusione, il metodo proposto è particolarmente adatto all'analisi di bassi valori del ritardo, nel caso in cui non è possibile effettuare le acquisizioni multiple necessarie per i metodi a variazione di fase. In questo caso, il metodo automatico della lastra a tinta sensibile (ATMP), proposto in questo lavoro, rappresenta una migliore alternativa al metodo RGB.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Aben, H., Guillemet, C. (1993), Photoelasticity of glass. Berlin Springer – Verlag.
- [2] McKenzie, H. W., - Hand, R. J. (1999), Basic optical stress measurement in glass, Society of Glass Technology, Sheffield.
- [3] Aben H., Anton J., Errapart A. (2008), Modern photoelasticity for residual stress measurement in glass. *Strain* 44, 40-48.
- [4] Ramesh K. (2000), Digital Photoelasticity. Springer, Berlin.
- [5] Patterson, E.A. (2002), Digital photoelasticity: principles, practice and potential. *Strain* 38, 27-39.
- [6] Lesniak J.R., Zickel M.J., Welch C.S., Johnson D.F. (1997), An innovative polariscope for photoelastic stress analysis. Proc. Soc. For Exp. Mech., Spring Conference, June 1997.
- [7] Zickel M.J., Lesniak J.R., Tate D.J., La Brecque R., Harkins K. (1999), Residual Stress Measurement of Auto Windshields using the Grey Field Polariscope. Spring '99 SEM Conference, Cincinnati, OH, USA.
- [8] Glass Photonics web site (2012): <http://www.glassphotonics.com>.
- [9] Sanford R.J., Iyengar V. (1985), The measurement of the complete photoelastic fringe order using a spectral scanner. Proceeding of the SEM Conference on Experimental Mechanics, Las Vegas, 160-168.
- [10] Sanford R.J. (1986), On the range of accuracy of spectrally scanned white light photoelasticity. Proceeding of the SEM Conference on Experimental Mechanics, New Orleans, 901-908.
- [11] Voloshin A.S., Redner A.S. (1989), Automated measurement of birefringence: development and experimental evaluation of the techniques. *Experimental Mechanics*, 29, 252-257.
- [12] Ivanova, L., Nechev, G. (1990), A method for investigation of the residual stressed in glasses with spectral polariscope, Proceedings of the 9th International Conference on Experimental Mechanics, Copenhagen, vol.2, 876-883.
- [13] Sanford R.J., McGinnis, A. (1991), New method for measuring low level birefringence using a spectra scanner. Proceedings 37th International Instrumentation Symposium, ISA – Instrument Society of America, San Diego, May 1991, 1029-1041.
- [14] Redner A. (2003), Automated measurement of edge stress in automotive glass. Proc. Conf. Glass Processing Days, Tampere, Finland, 578-599.
- [15] Strainoptic Technologies (2012), Glass application & plastic application, available on line on web site: <http://www.strainoptic.com>.
- [16] Aben, H., Ainola, L., Anton, J. (1999), Half-fringe phase-stepping with separation of the principal stress directions. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 5(3), 198-211.
- [17] Ajovalasit A., Petrucci G., Scafidi M. (2011), Measurement of edge residual stresses in glass by the phase shifting method. *Optics and Lasers in Engineering*, 49, 652-657.
- [18] Lavrador, M.B., Soares, A.C.C., Vieira, R.D., Freire, J.L.F. (1998), Automated inspection of residual stresses in glass using RGB photoelasticity. Proc. of the SEM Spring Conf. on Experimental and Applied Mechanics. Houston, Texas, June 1-3.
- [19] Battaglia, S, Ajovalasit, A., Petrucci, G., Scafidi, M. (2010), Analisi fotoelastica delle tensioni residue nel vetro. *Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro*, 40(3), 19-31.
- [20] Ajovalasit A., Petrucci G., Scafidi M. (2012), RGB photoelasticity applied to the analysis of membrane residual stress of glass. *Measurement Science and Technology*, 23(2) art. n. 025601.
- [21] Ajovalasit A., Petrucci G., Scafidi M. (2011), Photoelastic analysis of edge residual stresses in glass by automated "test fringes" methods. Accepted for publication on *Experimental Mechanics*, available on line, DOI 10.1007/s11340-011-9558-0.
- [22] ASTM F218, Standard method for Analyzing Stress in Glass, Annual Book of ASTM standards.

- [23] ASTM C978, Standard Test Method for Photoelastic Determination of Residual Stress in a Transparent Glass Matrix Using a Polarizing Microscope and Optical Retardation Compensation Procedures, Annual Book of ASTM standards.
- [24] Cloud, G. (1995), Optical methods of engineering analysis. Cambridge University Press.
- [25] Ajovalasit A., Barone S., Petrucci G. (1995), Toward RGB Photoelasticity - Full Field Photoelasticity in White Light. *Experimental Mechanics* 35, 193-200.
- [26] Ramesh K., Deshmukh S.S. (1996), Three fringe photoelasticity - use of colour image processing hardware to automate ordering of isochromatics. *Strain* 32, 79-86.
- [27] Ajovalasit A., Petrucci G., Scafidi M. (2010), RGB Photoelasticity: Review and Improvements. *Strain* 46, 137-147.
- [28] Ajovalasit A., Zuccarello B. (2000), Limitation of Fourier Transform Photoelasticity: Influence of Isoclinics. *Experimental Mechanics*, 40(4), 384-392.
- [29] K.R. Madhu, R.G.R. Prasath, K. Ramesh (2007), Colour Adaptation in Three Fringe Photoelasticity. *Experimental Mechanics*, 47, 271-6.
- [30] Quiroga J.A., Garcia-Botella A., Gomez-Pedrero J.A. (2002), Improved method for isochromatic demodulation by RGB calibration. *Applied Optics* 41, 3461-3468.
- [31] Madhu K.R., Ramesh K. (2007), Noise removal in three fringe photoelasticity by adaptive colour difference estimation. *Optics and lasers in Engineering*, 45, 175-182.
- [32] Barone S., Burriesci G., Petrucci G. (2002), Computer aided photoelasticity by an optimum phase stepping method. *Experimental Mechanics*, 42(2), 132-9.