

ANALISI DELLE TENSIONI RESIDUE NEL VETRO MEDIANTE LA FOTOELASTICITÀ CON FRANGE DI RIFERIMENTO

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

Università degli Studi di Palermo - Viale delle Scienze, 90128 Palermo

e-mail : ^a a.ajovalasit@gmail.com, ^b giovanni.petrucci@unipa.it, ^c michele.scafidi@gmail.com

Sommario

L'analisi delle tensioni residue nei vetri viene di solito effettuata con metodi fotoelastici dato che il vetro è un materiale birifrangente. Questa memoria considera l'automazione del cosiddetto "test fringes" metodo che si basa sull'impiego di un compensatore di Babinet o di un provino inflesso. In particolare si propongono due metodi automatici basati sull'impiego del metodo del centro frangia in luce monocromatica e sull'impiego della fotoelasticità RGB in luce bianca. I metodi proposti possono efficacemente sostituire i metodi manuali.

Abstract

The analysis of residual stresses in glass is usually carried out with photoelastic methods since the glass is a birefringent material. This paper considers the automation of so-called "test fringes" method that is based on the use of a Babinet compensator or of a specimen subjected to bending.

In particular, two methods, based on the use of the method of the centre fringe in monochromatic light and of RGB photoelasticity in white light, are proposed. The suggested methods can effectively replace manual methods.

Parole chiave: vetro, tensioni residue, fotoelasticità automatica

1. INTRODUZIONE

È noto che la fotoelasticità può essere utilizzata per l'analisi delle tensioni residue dei vetri [1-3]. Lo sviluppo della fotoelasticità digitale [4,5] consente di automatizzare l'analisi delle tensioni residue nei vetri come mostrato in [6] nel caso del metodo a variazione di fase.

Nell'analisi fotoelastica delle tensioni residue membranali nel vetro è prassi comune inserire in serie al vetro da analizzare un compensatore tipo Babinet o anche un semplice provino soggetto a flessione in modo da ottenere un sistema di frange (isocromatiche) di riferimento parallele ed equidistanti. Le frange risultanti, che sono talvolta chiamate *test fringes* [1], rivelano in modo efficace la presenza delle tensioni residue. A titolo di esempio la figura 1 mostra a confronto le isocromatiche nel solo vetro (a, b), nel solo provino inflesso (c) e infine (d) le isocromatiche nel vetro con in serie il provino soggetto a flessione. L'andamento delle frange mette ben in evidenza la presenza delle tensioni residue. Come si nota dalla figura 1b infatti il sistema di frange di riferimento verticali è modulato dalle tensioni residue presenti nella lastra di vetro. La deviazione delle frange dall'andamento verticale mette in evidenza, in modo qualitativo, la presenza delle tensioni residue. L'analisi quantitativa può essere effettuata utilizzando la laboriosa tecnica manuale basata sull'impiego dei compensatori.

In questa memoria si propone l'automazione del *Test Fringes* metodo mediante due metodi:

1. il metodo del *centro frangia* (CFM) in luce monocromatica [4];
2. la fotoelasticità RGB [7-9], basata sull'analisi dei colori in luce bianca.

Si mostra inoltre l'applicazione dei suddetti metodi all'analisi delle tensioni residue membranali in un

vetro temprato. Evidentemente, come nei casi del metodo manuale basato sul compensatore di Babinet e del metodo della trasformata di Fourier con frange di riferimento [10], l'orientamento relativo tra vetro e carrier deve prevedere l'allineamento opportuno delle tensioni principali nel vetro e nel provino inflesso.

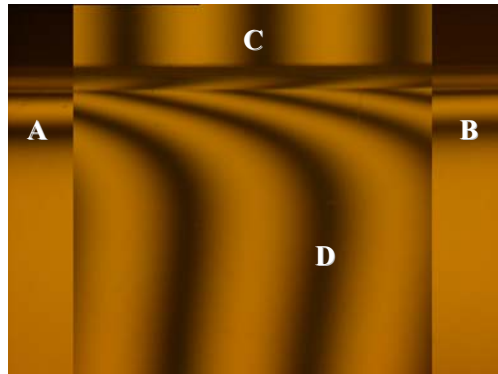


Figura 1 – (A), (B) Isocromatiche nella sola lastra di vetro dovute alle tensioni residue, (C) isocromatiche nel solo provino inflesso (*in alto*), (D) isocromatiche (*test fringes*) dovute all'inserimento del provino inflesso in serie alla lastra di vetro (*in basso*).

2. TEORIA

Nel metodo proposto si pone in serie alla lastra di vetro da analizzare, inserita in un polariscopio circolare, un provino che produce un sistema di frange di riferimento parallele ed equidistanti (Figura 2). Tale sistema di frange può essere ottenuto con un compensatore di Babinet o, come indicato nella figura 2, mediante un provino soggetto a flessione, denominato per semplicità *carrier*.

2.1. Analisi in luce monocromatica

Nel caso di illuminazione in luce monocromatica, l'intensità emergente da un siffatto polariscopio circolare a campo scuro (Figura 2) è data dalla relazione valida per il metodo della trasformata di Fourier con frange di riferimento [10]. Tale relazione, non considerando l'intensità di fondo ed il rumore, può essere scritta come segue:

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

dove I_0 è l'intensità luminosa, α_c e α sono gli angoli che definiscono le direzioni della tensione principale maggiore nel carrier e nella lastra di vetro (Figura 2b), δ^c è il ritardo (noto) nel carrier, δ è il ritardo incognito nel vetro che è legato alle tensioni residue principali nel vetro σ_1 , σ_2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2$) 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 sorgente di luce utilizzata.

L'equazione (1) mostra che in fotoelasticità, contrariamente a quanto accade in altri metodi ottici quali l'olografia ed il moiré, l'intensità luminosa dipende da due parametri relativi al campo tensionale, cioè dal ritardo δ e dal parametro dell'isocline α . Solo in condizioni particolari:

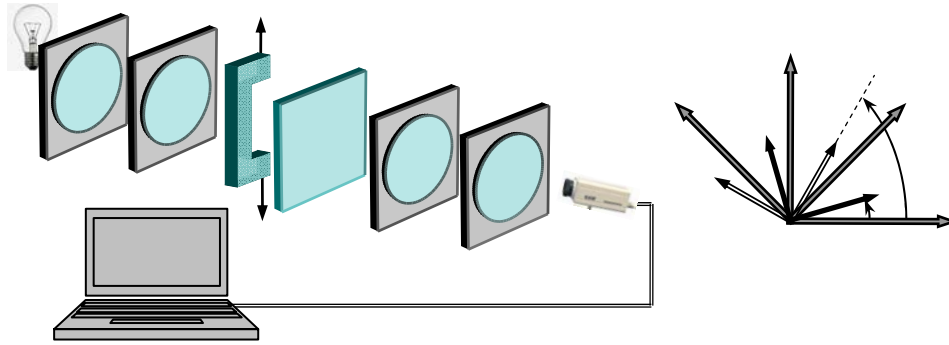


Figura 2 – Polariscopio a campo scuro: (a) polariscopio utilizzato per la fotoelasticità con frange di riferimento, (b) orientamento degli elementi. (C= carrier/compensatore, P,A=polarizzatori, R_p,R_a=lastre quarto d'onda, σ_1, σ_2 =tensioni principali nel modello, σ_{1c}, σ_{2c} =tensioni principali nel provino di riferimento, α, α_c =orientamento delle tensioni principali nel modello e nel provino di riferimento, TVC = telecamera, PC=personal computer con scheda digitalizzatrice).

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

l'intensità luminosa dipende esclusivamente dal ritardo. Nei suddetti casi la (1) fornisce:

$$I = \frac{I_0}{2} [1 - \cos 2\pi(\delta^c \pm \delta)] \quad (4)$$

dove il segno superiore vale per $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ e l'inferiore per $\alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ$. Cioè il ritardo totale misurato risulta dalla (4):

$$\text{per } \alpha - \alpha_c = 0^\circ: \delta^{\text{tot}} = \delta^c + \delta \quad (5)$$

$$\text{per } \alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ \text{ e } \delta^c > \delta: \delta^{\text{tot}} = \delta^c - \delta \quad (6)$$

$$\text{per } \alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ \text{ e } \delta^c < \delta: \delta^{\text{tot}} = -(\delta^c - \delta) \quad (7)$$

Le (5)-(7) possono essere sintetizzate nell'unica formula

$$\delta^{\text{tot}} = |\delta^c \pm \delta| \quad (8)$$

dove il segno superiore vale per $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ e l'inferiore per $\alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ$. Dalle (5)-(6) si ricava, sia per $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ sia per $\alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ$ con $\delta^c > \delta$:

$$\delta = |\delta^{\text{tot}} - \delta^c| = |\delta^c - \delta^{\text{tot}}| \quad (9)$$

mentre la (7) fornisce per $\alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ$ con $\delta^c < \delta$:

$$\delta = \delta^{\text{tot}} + \delta^c \quad (10)$$

Noto il ritardo si determina la differenza delle tensioni principali mediante la (2). In particolare in corrispondenza dei contorni (di solito compressi, cioè $\sigma_1 = 0$) il valore della tensione tangente al contorno risulta:

$$\sigma_2 = -\frac{\lambda}{Cd} \delta \quad (11)$$

2.1.1. Analisi in luce monocromatica con il metodo del centro frangia (CFM)

Nel caso del carrier con ritardo variabile linearmente in direzione x (frange disposte verticalmente) e vetro con ritardo costante in direzione x e variabile in direzione y , figura 3, il ritardo totale dato dalla (8) può essere riscritto nella seguente forma

$$\delta^{tot}(x, y) = |\delta^c(x) \pm \delta(y)| \quad (12)$$

Il ritardo nel compensatore può essere posto nella forma

$$\delta^c = \delta_i^c \pm \frac{x - x_i}{p} \quad (13)$$

nella quale il segno deve essere considerato positivo se il ritardo nel carrier è crescente con l'ascissa x e viceversa, x_i è l'ascissa della frangia di ordine i (ritardo δ_i) nel carrier, e p il passo delle isocromatiche nel carrier.

La (12), tenendo conto della (13) può essere riscritta come:

$$\delta^{tot}(x, y) = \left| \delta_i^c \pm \frac{x - x_i}{p} \pm \delta(y) \right| \quad (14)$$

Nel caso in cui si prendano in considerazione i punti nei quali $\delta^{tot} = \delta_i^c$, cioè i centri della frangia di ordine i e di ascissa x sulla lastra di vetro con il carrier posto in serie, la (14) si modifica in

$$\delta^{tot}(x, y) = \delta_i^c = \left| \delta_i^c \pm \frac{x - x_i}{p} \pm \delta(y) \right| \quad (15)$$

dalla quale è possibile ricavare la seguente relazione

$$\delta = \frac{|x - x_i|}{p} \quad (16)$$

In base alla (16), e con riferimento alla figura 3, identificata la retta passante per i centri di una frangia di ordine intero i (ritardo δ_i^c) sul carrier, il ritardo δ presente nella lastra di vetro in corrispondenza dei punti della retta è direttamente proporzionale alla distanza $|x - x_i|$ dalla retta stessa dei centri dell'isocromatica di ordine i (ritardo $\delta^{tot} = \delta_i^c$) presente nella lastra di vetro. In questo caso è sufficiente determinare la posizione dei centri di una isocromatica sulla lastra di vetro e la posizione dell'isocromatica dello stesso ordine sul carrier per ottenere, a scala p , l'andamento del ritardo lungo una sezione verticale. La posizione del centro delle frange è stata determinata mediante un procedimento di estrazione del centro frangia.

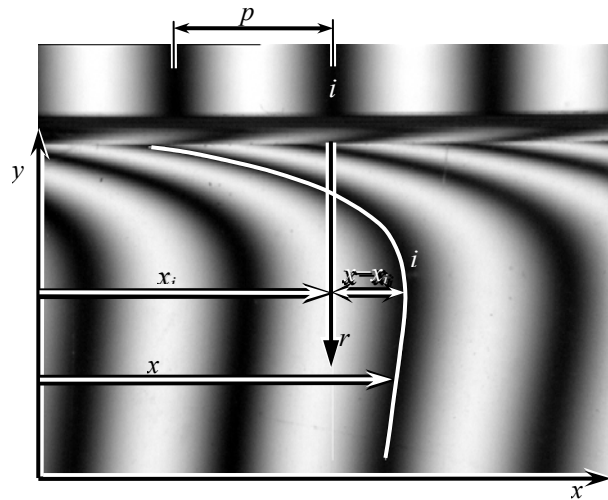


Figura 3 – Isocromatiche nel vetro, in luce monocromatica, ottenute con la sovrapposizione del carrier

2.2. Analisi in luce bianca

L'equazione (4) può essere riscritta come:

$$I = I_0 \sin^2 \pi (\delta^c \pm \delta) \quad (17)$$

A sua volta la (17), non considerando per semplicità l'errore dovuto alle lastre quarto d'onda [9], in luce bianca diventa:

$$I_{wj} = \frac{1}{\lambda_{j2} - \lambda_{j1}} \int_{\lambda_{j1}}^{\lambda_{j2}} I_0(\lambda) T(\lambda) T^c(\lambda) F_j(\lambda) \sin^2 \pi \frac{\lambda_0}{\lambda} \left(\delta_0^c \frac{C_\lambda^c}{C_0^c} \pm \delta_0 \frac{C_\lambda}{C_0} \right) d\lambda, \quad (j = R, G, B) \quad (18)$$

dove $T(\lambda)$ e $T^c(\lambda)$ indicano rispettivamente la trasmittanza del vetro e del carrier, δ_0 e δ_0^c indicano rispettivamente il ritardo nel vetro e nel carrier alla lunghezza d'onda di riferimento λ_0 , C_λ/C_0 e C_λ^c/C_0^c indicano rispettivamente la dispersione della birifrangenza [11,12] nel vetro e nel carrier. Se le dispersioni sono uguali si ha:

$$\frac{C_\lambda^c}{C_0^c} = \frac{C_\lambda}{C_0} \quad (19)$$

e di conseguenza la (18) diviene:

$$I_{wj} = \frac{1}{\lambda_{j2} - \lambda_{j1}} \int_{\lambda_{j1}}^{\lambda_{j2}} I_0(\lambda) T(\lambda) T^c(\lambda) F_j(\lambda) \sin^2 \pi \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{C_\lambda}{C_0} (\delta_0^c \pm \delta_0) d\lambda, \quad (j = R, G, B) \quad (20)$$

da cui si ricava, con la fotoelasticità RGB, il ritardo totale:

$$\delta_0^{tot} = \left| \delta_0^c \pm \delta_0 \right| \quad (21)$$

Nel solo carrier la (20) fornisce:

$$I_{vj}^c = \frac{1}{\lambda_{j2} - \lambda_{j1}} \int_{\lambda_{j1}}^{\lambda_{j2}} I_0(\lambda) T^c(\lambda) F_j(\lambda) \sin^2 \pi \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{C_\lambda}{C_0} \delta_0^c d\lambda, \quad (j = R, G, B) \quad (22)$$

dalla quale si ricava, sempre mediante la fotoelasticità RGB, il ritardo nel solo carrier δ_0^c .

Si noti che, a rigore, la taratura, necessaria nella fotoelasticità RGB, e la determinazione del ritardo nel solo carrier dovrebbero essere effettuate sul carrier avente in serie un vetro scarico da tensioni residue. In alternativa la taratura può essere effettuata sul solo carrier; ciò equivale ad ammettere che si abbia:

$$T(\lambda) T_c(\lambda) = T_c(\lambda) \quad (23)$$

cioè che la trasmittanza del vetro sia:

$$T(\lambda) = 1 \quad (24)$$

Noti δ_0^{tot} e δ_0^c si ricava il ritardo nel vetro δ_0 utilizzando le stesse relazioni ottenute in luce monocromatica [si vedano le equazioni (9)-(10)] come di seguito indicato:

$$\delta_0 = \left| \delta_0^{tot} - \delta_0^c \right| \quad (25)$$

$$\delta_0 = \delta_0^{tot} + \delta_0^c \quad (26)$$

essendo la (25) relativa ai casi di $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ ed $\alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ$ con $\delta^e > \delta$ e la (26) al caso di $\alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ$ con $\delta^e < \delta$. Per evitare confusione conviene operare nel campo di validità della (25) cioè: $\alpha - \alpha_c = 0^\circ$ e $\alpha - \alpha_c = \pm 90^\circ$ con $\delta^e > \delta$.

3. ESPERIENZE

Le esperienze sono state condotte con un polariscopio circolare a campo scuro avente lastre quarto d'onda corrette per la lunghezza d'onda di riferimento $\lambda_0 = 589$ nm (luce monocromatica gialla) utilizzando:

1. una sorgente di luce monocromatica costituita da lampade a vapori di sodio che emettono alla lunghezza d'onda di riferimento ($\lambda_0 = 589$ nm),
2. una sorgente di luce bianca costituita da tubi al neon tipo Philips Master 7L-D Super 80 18 watt/827 con spettro di emissione discreto (figura 4) avente tre picchi a banda stretta alle seguenti lunghezze d'onda: $\lambda_R = 610$ nm (red), $\lambda_G = 545$ nm (green), $\lambda_B = 435$ nm (blue);
3. una telecamera RGB modello JVC KY-F30 avente tre CCD indipendenti le cui risposte spettrali approssimate sono riportate in figura 5,
4. una scheda di acquisizione a colori con risoluzione di 768x576 pixel e quantizzazione ad 8 bit;
5. un provino in policarbonato M-M PSM1 (Figura 6) utilizzato come carrier e una lastra di vetro temprato (Figura 7) utilizzata per l'analisi delle tensioni residue.

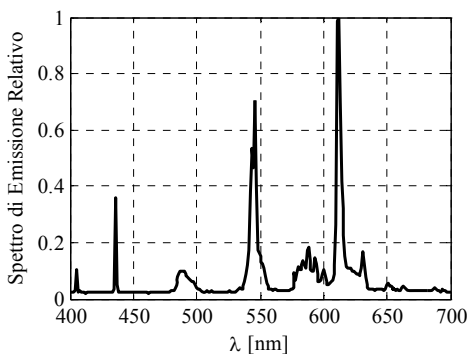


Figura 4 – Spettro di emissione della sorgente di luce bianca.

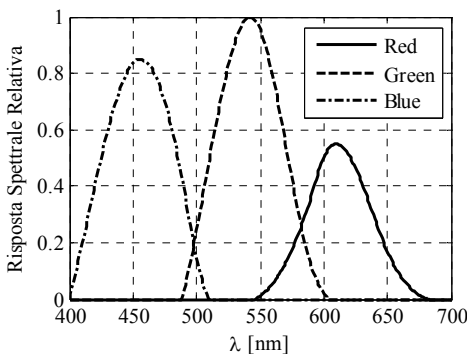


Figura 5 – Distribuzioni spettrali approssimate dei filtri R, G e B della telecamera utilizzata per le esperienze.

Il sistema ottico è stato regolato in modo da avere un fattore di scala di 28.5 pixels per mm; ciò assicura che, nel caso in esame, non si abbiano gradienti superiori a 0.1 ordini/pixel [7].

La taratura, necessaria per l'applicazione del metodo RGB, è stata effettuata utilizzando lo stesso provino inflesso (figura 6), utilizzato come carrier, nel quale è stato prodotto un ritardo massimo $\delta_{0max}=3$ ordini. La ricerca del ritardo, nel caso del metodo RGB è stata effettuata utilizzando la tecnica della tabella parzializzata ("subset of the calibration table") [9].

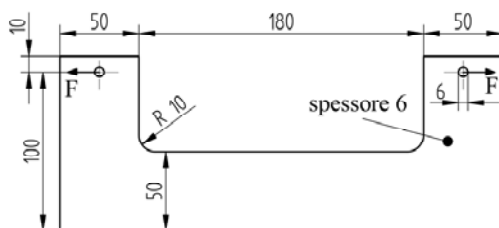


Figure 6 – Provino in policarbonato (dimensioni in mm) utilizzato sia come carrier sia per la taratura (limitatamente alla fotoelasticità RGB)

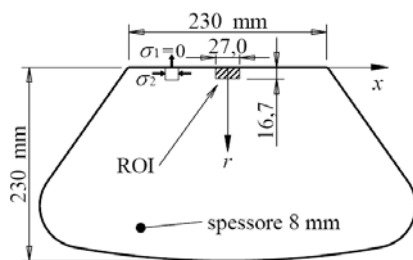


Figura 7 – Mensola di vetro temprato utilizzata per le prove

3.1. Esperienze in luce monocromatica: il metodo del centro frangia

La figura 8 mostra l'andamento delle frange isocromatiche nel solo carrier e nel complesso mensola (Figura 7) più carrier in corrispondenza della ROI (Region Of Interest). Per effetto delle tensioni residue nel vetro le frange nel carrier si deformano. In particolare se le tensioni residue nel vetro (al contorno) sono di compressione le frange compressive (vetro più carrier) curvano verso la zona compressa del carrier (nel caso che le costanti fotoelastiche del vetro e del carrier abbiano lo stesso segno). Ciò consente di identificare il segno della tensione residua al contorno del vetro stesso noto che sia il segno della tensione nel carrier.

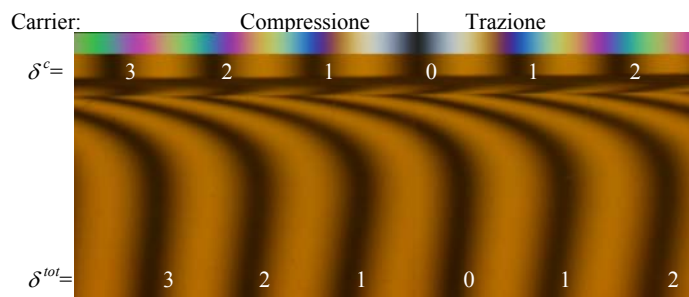


Figura 8 – Andamento delle frange isocromatiche nel solo carrier (*sopra*) e nel vetro in presenza del carrier in corrispondenza della ROI (*sotto*)

La figura 9a mostra l'andamento delle frange in corrispondenza della ROI della mensola; la sezione di misura è stata scelta in corrispondenza della frangia di ordine 1 nella zona tesa del carrier. La figura 9b mostra il ritardo, determinato mediante la relazione (16), lungo la sezione di misura prescelta e, per confronto, i risultati ottenuti con il metodo a variazione di fase a sei acquisizioni [13]. L'errore e rispetto al metodo a variazione di fase è inferiore a $\pm 0,025$ ordini di frangia. Risultati pressoché uguali si ottengono con il metodo semplificato a tre acquisizioni [6] e con il metodo a variazione di fase in luce bianca [14]. In prossimità del bordo curvo il ritardo ha un andamento irregolare e di conseguenza il grafico è stato troncato in prossimità del contorno; in tal caso si ricorre a procedimenti di estrapolazione del diagramma dell'ordine di frangia secondo ben note procedure applicate nel caso dei metodi manuali [15,16].

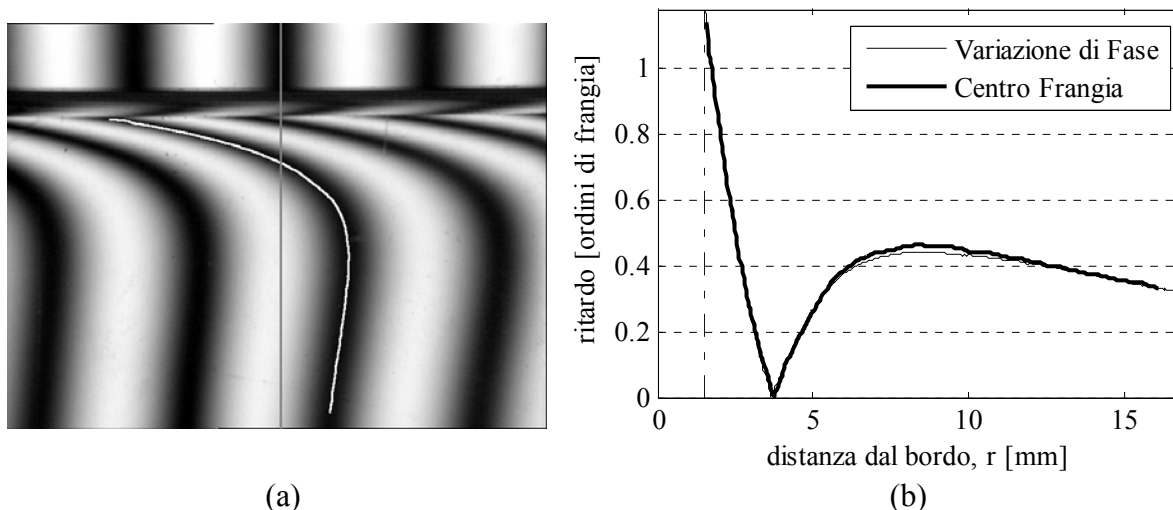


Figura 9 – Mensola: (a) andamento delle frange, (b) Ordine di frangia lungo la sezione di misura determinato con il metodo del CF e con il metodo a variazione di fase a sei immagini

3.2. Esperienze in luce bianca: la fotoelasticità RGB con frange di riferimento

A titolo di esempio la figura 10 mostra le isocromatiche nel solo carrier (parte superiore) e nella

mensola + carrier in corrispondenza della ROI (parte inferiore).

Come sezione di misura si è scelta la stessa di quella considerata con il metodo del centro frangia (sezione in corrispondenza della frangia di ordine 1 nella zona tesa del carrier). In tale sezione si verificano le condizioni di validità della (25); a tal fine si noti che dal punto di vista pratico basta scegliere la sezione di misura in modo tale che non venga intersecata (Figura 10) la frangia di ordine 0 (nel vetro + carrier) facilmente riconoscibile perché è l'unica nera in luce bianca. La Figura 11 mostra il ritardo totale δ_0^{tot} e il ritardo δ_0 nel vetro determinato mediante la (25) dove $\delta_0^c = 1$ dato che si considera una sezione verticale coincidente con l'isocromatica verticale avente $\delta_0^c = 1$ ordine (in luce monocromatica). Per confronto sono riportati i risultati ottenuti con il metodo a variazione di fase a sei acquisizioni.

L'errore e rispetto al metodo a variazione di fase è inferiore, salvo alcuni picchi isolati, a $\pm 0,05$ ordini di frangia. Risultati analoghi si ottengono nelle altre sezioni considerate. Lo scarto più elevato (rispetto al metodo del centro frangia) può essere in parte dovuto alle ipotesi fatte in relazione alla dispersione della birifrangenza [vedi l'equazione (19)] e alla trasmittanza del vetro [vedi le equazioni (23)-(24)].

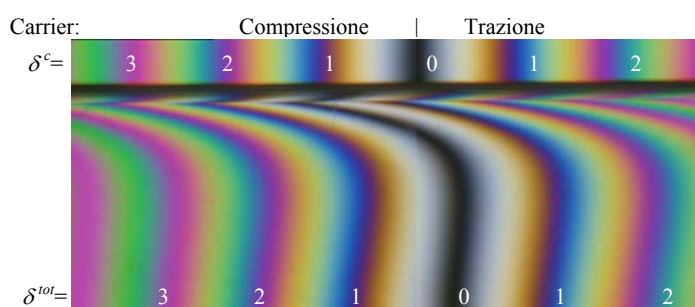


Figura 10 – Isocromatiche in luce bianca a campo scuro nel carrier (sopra) nella mensola più carrier (sotto)

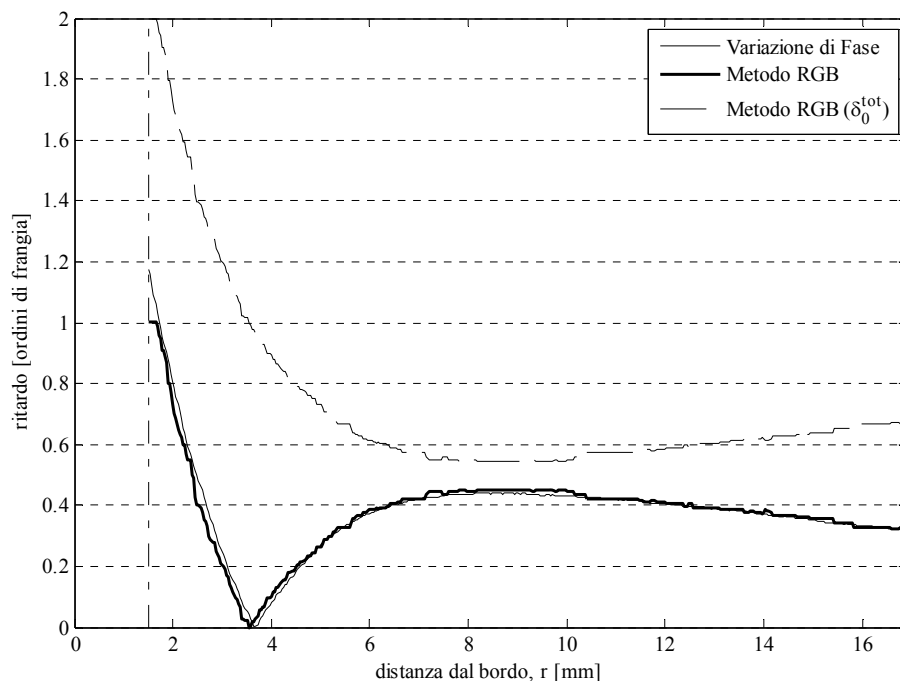


Figura 11 – Mensola: determinazione del ritardo mediante la fotoelasticità RGB con frange di riferimento

4. CONCLUSIONI

In questa memoria sono state proposte due tecniche di automazione del metodo fotoelastico per l'analisi delle tensioni residue di tipo membranale nei vetri definito "Test Fringes". Tale metodo manuale si basa sull'inserimento in serie al vetro da analizzare di un compensatore tipo Babinet o di un semplice provino soggetto a flessione dando luogo a frange isocromatiche risultanti che rivelano in modo qualitativamente efficace la presenza delle tensioni residue. Le tecniche proposte, basate sul metodo del centro frangia in luce monocromatica e sulla fotoelasticità RGB in luce bianca, consentono l'analisi automatica di tipo quantitativo delle suddette frange.

L'analisi quantitativa, che non richiede un aggravio del set-up sperimentale, mostra che lo scarto rispetto al metodo a variazione di fase è contenuto entro $\pm 0,025$ ordini di frangia per il metodo del centro frangia ed entro $\pm 0,05$ ordini per il metodo basato sulla fotoelasticità RGB. Rispetto al metodo a variazione di fase (che richiede da 3 a 6 acquisizioni), i metodi proposti richiedono una sola acquisizione.

Rispetto alla fotoelasticità RGB, il metodo del centro frangia risulta di più semplice applicazione dato che non è necessaria la taratura caratteristica della fotoelasticità RGB. Per contro il metodo del centro frangia è limitato all'analisi di elementi con contorni rettilinei, con frange parallele al contorno stesso. Nei casi in cui è applicabile il *vecchio* metodo del centro frangia, oggi in generale poco applicato, si rivela di grande efficacia e di applicazione immediata per l'analisi delle tensioni residue membranali nelle lastre di vetro.

5. 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 (1), 27-39.
- [6] 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(5), 652-657.
- [7] Ajovalasit A., Barone S., Petrucci G. (1995) Toward RGB Photoelasticity - Full Field Photoelasticity in White Light. *Experimental Mechanics* **35**, 193-200.
- [8] Ramesh K., Deshmukh S.S. (1996) Three fringe photoelasticity - use of colour image processing hardware to automate ordering of isochromatics. *Strain* **32**, 79-86.
- [9] Ajovalasit A., Petrucci G., Scafidi M. (2010), RGB Photoelasticity: Review and Improvements. *Strain* **46**, 137-147.
- [10] Ajovalasit A., Zuccarello B. (2000), Limitation of Fourier Transform Photoelasticity: Influence of Isoclinics. *Experimental Mechanics*, 40(4), 384-392.
- [11] Haake, S.J., Patterson, E.A. (1993), "The dispersion of birefringence in photoelastic materials". *Strain*, 29(1), 3-7.
- [12] Cloud, G. (1995) *Optical methods of engineering analysis*. Cambridge University Press.
- [13] Barone S, Burriesci G, Petrucci G (2002), Computer aided photoelasticity by an optimum phase stepping method. *Experimental Mechanics*, **42**(2), 132-9.
- [14] Ajovalasit A., Petrucci G., Scafidi M. (2007), Phase shifting photoelasticity in white light. *Optics and Lasers in Engineering* **45**, 596-611.
- [15] Redner A.S., Voloshin A.S. (1990), Surface and face stress in tempered glass. *Proc. 9th Int. Conf. on Experimental Mechanics*, Copenhagen, vol. 2, 884-891.
- [16] ASTM 1279, *Standard Test Method for Non-Destructive Photoelastic Measurement of Edge and Surface Stresses in Annealed, Heat-Strengthened, and Fully Tempered Flat Glass*, Annual Book of ASTM standards.