



Associazione Italiana
per l'Analisi delle Sollecitazioni



Università degli Studi di Perugia
Istituto di Energetica

AIAS '98

Atti del
XXVII Convegno Nazionale
dell'Associazione Italiana per l'Analisi
delle Sollecitazioni

Volume I

Perugia 1998



AIAS '98
XXVII Convegno Nazionale dell'Associazione
Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni
Università di Perugia – Istituto di Energetica



RECENTI PROGRESSI NELLA TECNICA DEL MOIRÈ OLOGRAFICO

R. Ambu¹, F. Bertolino¹, C. Jubing², F. Ginesu¹

¹*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Cagliari, Piazza d'Armi 1, 09123 Cagliari*

²*Ninxia University, Yinchuan (Cina)*

Sommario

La tecnica del moirè olografico è da tempo nota ma ha avuto diffusione più limitata rispetto ad altre tecniche ottiche ad alta sensibilità. In questo lavoro il metodo viene riproposto introducendo alcune soluzioni innovative che ne consentono una maggiore versatilità e possono contribuire ad una sua maggiore diffusione. In particolare, viene illustrata una procedura semplice per replicare sulla superficie dei modelli un reticolo di fase con sensibilità in tre diverse direzioni; i risultati sperimentali relativi ad applicazioni di questa tecnica ad alcuni semplici modelli ne dimostrano l'efficacia sia nel caso dei modelli trasparenti che per quelli opachi. In particolare, per quanto riguarda i modelli opachi, l'utilizzo di fibre ottiche come sorgente luminosa consente di ottenere apparati sperimentali compatti e con distorsioni minime del fronte d'onda.

Abstract

Some improvements of the moirè interferometry technique are briefly presented. In particular a simple and effective procedure to manufacture and replicate on the models a three-directional grating is described. The method is applied successfully to transparent and opaque models both in real time and double exposure. As for opaque models, thanks to the use of an optical fibre as light source it is possible to obtain a compact optical set up free from optical distortions of the wavefront. The results demonstrate the validity and can contribute to a larger diffusion of the method.

1. Introduzione

Le prime applicazioni del moirè olografico per l'analisi delle sollecitazioni risalgono a circa trenta anni fa anche se l'originario apparato sperimentale è stato sviluppato molto tempo prima ed ampiamente utilizzato per moltiplicare i sistemi di frange. Dantu [1], Sciammarella e Chiang [2] furono tra i primi che utilizzarono questa tecnica, mentre successivamente altri ricercatori [3,4] hanno sviluppato e migliorato il metodo, ponendo particolare attenzione alla validazione teorica dei risultati sperimentali. Alcuni anni fa, uno degli Autori propose di estendere la tecnica allo studio di oggetti opachi [5], fatto che

consente di utilizzare un fronte d'onda riflesso ottenuto per mezzo di una particolare disposizione dei componenti ottici.

Rispetto ad altre tecniche, in primo luogo l'interferometria moirè [6], il moirè olografico non ha avuto grande diffusione. Questa circostanza è probabilmente dovuta a due principali cause: in primo luogo la difficoltà di realizzare semplici apparati sperimentali per ottenere dati in tempo reale, e, in secondo luogo, la mancanza di un sistema per calcolare i valori puntuali di deformazione in tre diverse direzioni, informazione necessaria per determinare lo stato di sforzo nella zona analizzata quando non è presente una simmetria geometrica nel provino o nella distribuzione del carico.

In questo lavoro la tecnica del moirè olografico viene riproposta introducendo alcune soluzioni innovative che consentono una maggiore versatilità del metodo e possono contribuire ad una sua più vasta diffusione tra le tecniche per l'analisi sperimentale delle sollecitazioni.

In particolare, basandosi su precedente esperienza, gli Autori hanno sviluppato una procedura semplice ed efficace per la realizzazione e la replica sui modelli di reticoli con sensibilità in tre diverse direzioni: orizzontale, verticale ed obliqua (45°). Questa loro caratteristica consente di misurare gli spostamenti e le deformazioni nelle direzioni di sensibilità in tutta la zona esaminata. E' perciò possibile calcolare il tensore di sforzo piano utilizzando le misure di deformazione nelle tre direzioni, mediante le ben note formule usate comunemente per le rosette estensimetriche con tre elementi. Inoltre il metodo può essere applicato sia a modelli trasparenti che a modelli opachi ed in quest'ultimo caso viene mostrato come sia possibile realizzare apparati sperimentali di forma compatta e con minime distorsioni. Infine vengono presentati alcuni risultati sperimentali relativi a modelli di diverse forme.

2. Realizzazione dei reticoli

Il primo passo per poter utilizzare la tecnica è quello di ottenere i reticoli di diffrazione e replicarli sulle superfici dei modelli. La semplice procedura adottata, qui di seguito descritta, è stata sviluppata dagli Autori basandosi su precedente esperienza.

Il reticolo con tre direzioni di sensibilità, rispettivamente orizzontale, verticale e obliqua (45°) viene impresso su una normale lastra olografica (Agfa 10E75) per mezzo di due fasci laser che vengono ruotati secondo le diverse direzioni di sensibilità.

La lastra, dopo essere stata sbiancata, viene pressata sul modello sulla cui superficie è stato applicato un agente legante (Acrifix 92 prodotto dalla Rohm). Il modello e la lastra vengono quindi esposti alla luce UV o più semplicemente alla luce solare per circa un ora. Infine, la lastra viene distaccata in modo da lasciare una replica del reticolo tridirezionale sulla superficie del modello. La lastra può essere distaccata con estrema facilità in quanto la colla usata è costituita da una soluzione viscosa di resina acrilica parzialmente polimerizzata che non aderisce alla gelatina della lastra olografica. Seguendo la procedura descritta in sintesi sono stati realizzati differenti reticoli con passo variabile tra 0,025 e 0,0005 mm, campo che consente, teoricamente, di studiare la gran parte dei problemi relativi all'analisi strutturale. Da osservare che nel caso dei modelli trasparenti il reticolo di fase replicato non altera la trasparenza del materiale.

L'utilità del disporre sul modello di un reticolo con sensibilità nelle tre direzioni consiste nel fatto che è possibile determinare lo stato di sollecitazione nel caso più generale in cui

nel modello non siano presenti direzioni di simmetria geometriche e di carico e sia necessario ottenere con estrema precisione la componente tangenziale di deformazione [7]. E' noto infatti che il tensore degli sforzi nel piano può essere facilmente calcolato per mezzo di tre misure di deformazione, utilizzando le ben note formule usate per le rosette estensimetriche con tre elementi [8]. Infatti, il singolo reticolo consente di misurare gli spostamenti nella direzione di sensibilità in tutta la zona esaminata e da questi è possibile risalire alle deformazioni. Indicando con ε_A , ε_C e ε_B i valori di deformazione lungo le direzioni orizzontale (x), verticale (y), e obliqua (45°), il valore del tensore di sforzo nel piano sarà dato da:

$$\sigma_{\max} = E \left[\frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2(1-\nu)} + \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_C)^2 + (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C)^2} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{\min} = E \left[\frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2(1-\nu)} - \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_C)^2 + (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C)^2} \right] \quad (2)$$

L'angolo tra l'asse principale ed un asse di riferimento può essere invece calcolato utilizzando la seguente relazione:

$$\tan 2\phi = \frac{2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C}{\varepsilon_A - \varepsilon_C} \quad (3)$$

Lo stato di sforzo risulta quindi completamente definito.

3. Applicazione dell'olografia moirè a modelli trasparenti

3.1 Apparato Sperimentale base

La disposizione dei componenti ottici utilizzata per analizzare i modelli trasparenti è schematizzata in Fig.1.

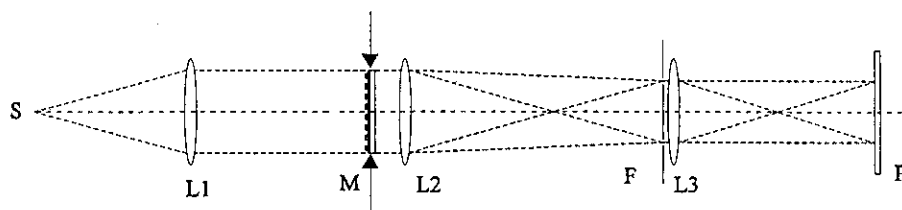


Fig.1. Apparato sperimentale per modelli trasparenti

Un fascio proveniente dal laser, mediante una fibra ottica monomodo, viene inviato attraverso un sistema di Fourier. Una prima lente (L1) produce un fronte d'onda piano,

mentre la seconda (L2), trasforma la luce in singoli spot, che rappresentano la trasformata di Fourier del fascio in ingresso.

Il modello, sul quale é stato replicato il reticolo tridirezionale, viene posto tra due lenti in modo tale che il fronte d'onda che lo attraversa viene diffratto secondo le diverse direzioni di sensibilità.. La Fig.2 riporta un particolare della trasformata di Fourier del reticolo; in essa sono evidenti le tre direzioni di sensibilità.

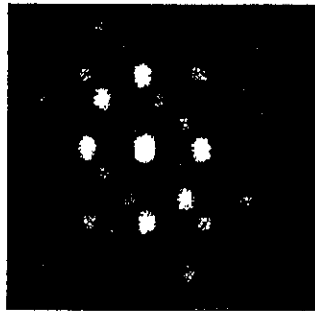


Fig.2. Trasformata di Fourier del reticolo tridirezionale

L'apparato sperimentale è completato da un filtro che consente il passaggio di una coppia di ordini simmetrici per volta, e da un'altra lente (L3) che permette di ricostruire l'immagine di interferenza. Questa immagine viene registrata su lastra olografica in tempo reale o doppia esposizione. E' ben noto che la frequenza delle frange di interferenza che si ottengono dipende dagli ordini ($\pm n$) che vengono filtrati; In particolare, la frequenza virtuale è pari a $2nf$ dove f è la frequenza reale del reticolo replicato sul modello. Questa caratteristica permette di aumentare la sensibilità virtuale del sistema senza variare la frequenza reale del reticolo consentendo quindi, quando necessario, una maggiore facilità di interpretazione e misura.

La sensibilità reale del sistema rimane invariata in quanto dipende dalla frequenza del reticolo replicato sul provino.

3.2 Risultati Sperimentali

Utilizzando l'apparato sperimentale descritto, la cui principale caratteristica è la presenza del reticolo tridirezionale, sono stati analizzati alcuni semplici modelli di spessore costante pari a 3mm e forme diverse quali quella circolare con foro centrale, triangolare, e rettangolare ricavati da una lastra di poli-metil-metacrilato, materiale più noto con i nomi commerciali di perspex e plexiglas. Ciascun modello è stato caricato con forze concentrate secondo proprie direzioni di simmetria e sono quindi state ottenute le deformazioni relative a diversi livelli di carico filtrando tre differenti ordini simmetrici nel piano di Fourier. L'applicazione della tecnica a semplici modelli da infatti la possibilità di verificare la sensibilità e l'efficienza del metodo essendo di essi facilmente calcolabile la distribuzione teorica delle sollecitazioni. Sono state testate diverse sensibilità con alcune prove realizzate sia in tempo reale che in doppia esposizione. Nella procedura in tempo reale, la lastra olografica viene posizionata alla distanza focale; viene quindi eseguito un primo ologramma con il modello scarico. Dopo lo sviluppo la lastra viene riportata nella posizione originaria e dietro di essa, quasi a contatto, posto uno schermo semitrasparente.

La Fig.3 mostra i risultati relativi ad una delle prove effettuate per il modello circolare con foro centrale soggetto a carico di compressione che agisce lungo un diametro.

Il p
lent
des
La
moc
part
sezi

I ris
per
La
form
vert

In c
di s

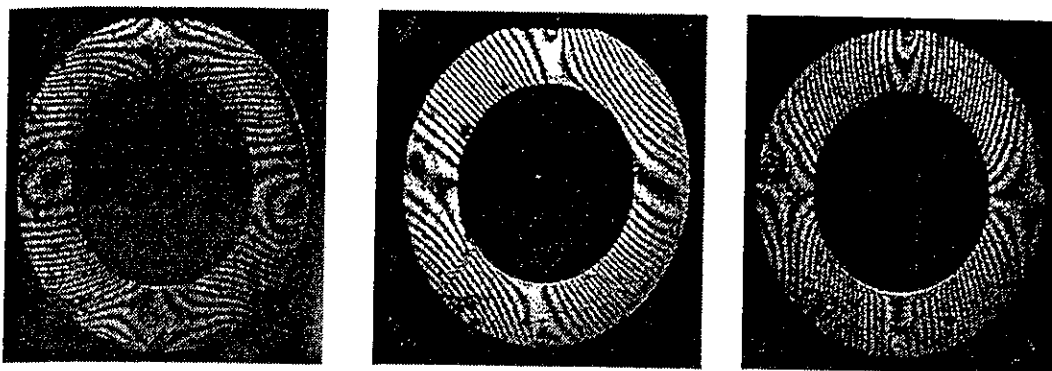


Fig.3. Modello circolare con foro centrale ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$)

Il passo del reticolo utilizzato è pari a 0,01 mm, scelto in relazione alla dimensione delle lenti utilizzate. Inoltre, sono stati filtrati solo gli ordini ± 1 , in quanto sufficienti per descrivere in maniera accurata l'andamento degli spostamenti.

La Fig.4 presenta un confronto tra risultati sperimentali e dati numerici ottenuti con un modello ad elementi finiti realizzato con elementi a quattro nodi e sei gradi di libertà. In particolare è riportato l'andamento della componente v dello spostamento lungo una sezione verticale di simmetria.

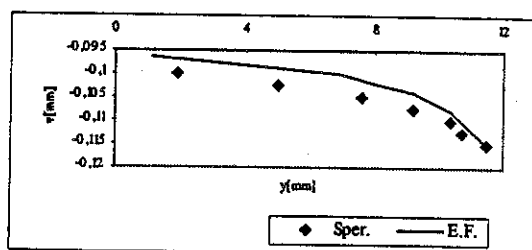


Fig.4. Confronto tra risultati sperimentali e modello agli elementi finiti

I risultati ottenuti sono soddisfacenti e si accordano con quelli riportati in letteratura [9,10] per questo tipo di modello con rapporto tra i diametri pari a due.

La Fig.5 mostra invece i risultati relativi ad una delle prove realizzate per il modello di forma quadrata con foro centrale cui è stato applicato un carico concentrato lungo l'asse verticale di simmetria.

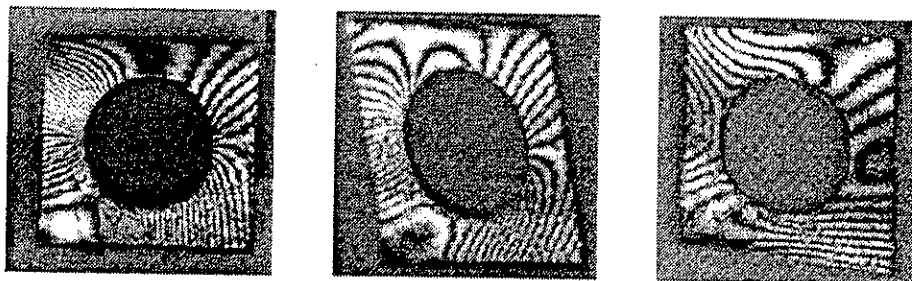


Fig.5. Modello quadrato con foro centrale ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$)

In questo caso è presente una dissimmetria il cui valore massimo, misurato nella direzione di sensibilità verticale, è all'incirca pari a 0,015mm.

4. Applicazione dell'olografia moirè a modelli opachi

La disposizione dell'apparato sperimentale utilizzato per analizzare i modelli opachi è rappresentata in Fig.6.

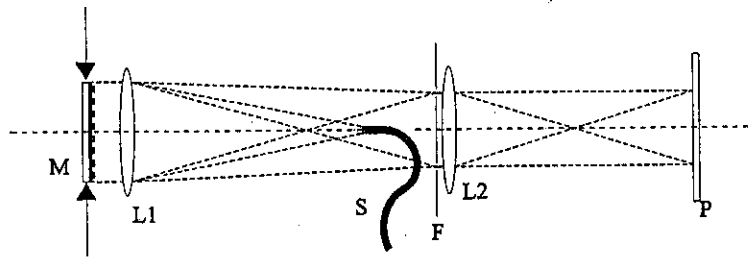


Fig.6. Apparato sperimentale per modelli opachi

In questo caso il sistema di Fourier si ottiene con una sola lente che consente sia di rendere parallelo il fascio luminoso che viene inviato al modello che di ottenere la trasformata del fascio diffratto dal reticolo tridirezionale. Da osservare che, l'apparato sperimentale originariamente utilizzato per analizzare i modelli opachi necessitava di uno specchio disposto lungo l'asse del sistema ottico, per inviare il fascio luminoso dalla sorgente laser verso il modello. In questa nuova versione, grazie all'utilizzo di una fibra ottica è stato possibile evitare l'utilizzo di specchi e la relativa distorsione del fronte d'onda focalizzato che ne derivava, rendendo contemporaneamente tutto l'apparato sperimentale più compatto. In modo analogo ai modelli trasparenti, anche in questo caso vengono osservati solo di due ordini simmetrici la cui interferenza viene focalizzata su un piano per mezzo di una lente. Sono state effettuate delle prove sia in doppia esposizione che in tempo reale ed entrambe hanno fornito risultati soddisfacenti. La Fig.7 mostra gli ologrammi relativi alle tre direzioni di sensibilità ottenuti per il modello triangolare con foro centrale a cui è stato applicato un carico concentrato nel vertice superiore.

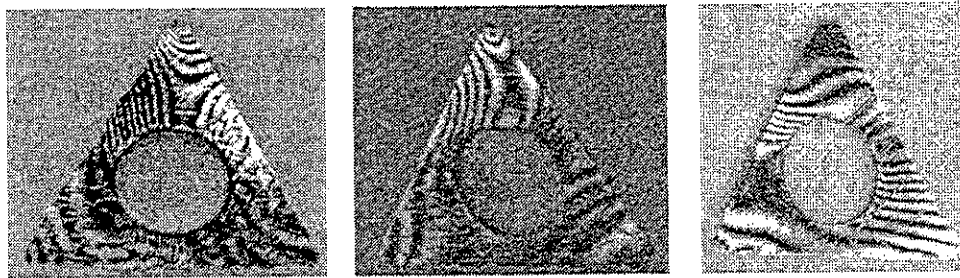


Fig.7. Modello triangolare con foro centrale ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$)

La dissimmetria che si osserva nella parte inferiore è dovuta agli appoggi.

5. Olografia moirè e interferometria moirè

Come detto nell'introduzione, tra le tecniche sperimentali ad alta sensibilità l'interferometria moirè ha avuto una ben più ampia diffusione rispetto al moirè olografico con cui è in stretta relazione. Risulta perciò interessante confrontare i principi di

I
S
F
U
I
E
S
C
D
S

funzionamento delle due tecniche. In Fig.8 vengono riportati gli schemi essenziali dei due metodi per modelli opachi.



Fig. 8. Confronto tra e interferometria moirè e moirè olografico

Come si può osservare, quando si utilizza l'interferometria moirè [11] vengono inviati sulla superficie del modello due fronti d'onda piani ed osservati due ordini simmetrici diffratti in direzione perpendicolare al modello. Nella tecnica del moirè olografico, invece, occorre inviare sulla superficie un solo fronte d'onda piano mentre vengono osservati due ordini simmetrici con l'utilizzo di una sola lente. Da un punto di vista teorico, il principio di funzionamento è simile. La differenza principale consiste nel fatto che nell'interferometria moirè le frange che si ottengono sovrapponendo il reticolo reale con quello virtuale possono essere visualizzate e registrate direttamente mediante una CCD camera che focalizza il sistema di frange presenti sulla superficie del modello. In generale, invece, la tecnica del moirè olografico richiede il supporto dell'olografia, ma in generale ha una efficienza maggiore quando è necessario utilizzare diverse sensibilità.

E' noto che il rapporto segnale-rumore decresce all'aumentare dell'ordine di diffrazione che viene osservato. Perciò il livello più basso di rumore si ottiene quando vengono osservati gli ordini ± 1 , ed in genere sono questi che vengono utilizzati nell'interferometria moirè. Se invece si vuole aumentare la sensibilità mediante l'operazione di moltiplicazione delle frange allora il moirè olografico risulta più versatile proprio per l'elevata sensibilità della pellicola olografica.

6. Conclusioni

In questo lavoro la tecnica del moirè olografico è stata riproposta allo scopo di mostrare la sua validità ed efficienza come moderno metodo per l'analisi delle sollecitazioni. In particolare, la tecnica può essere applicata nel caso più generale di sollecitazione nel piano utilizzando dei reticoli di diffrazione con sensibilità in tre diverse direzioni.

La tecnica può essere applicata sia a modelli trasparenti che a modelli opachi in tempo reale e in doppia esposizione. In particolare, nel caso dei modelli opachi, utilizzando come sorgente luminosa una fibra ottica, è possibile ottenere un apparato sperimentale compatto e con limitate distorsioni del fronte d'onda focalizzato. Infine, modificando l'ordine di diffrazione che viene osservato è possibile aumentare la sensibilità virtuale del sistema senza variare la sensibilità reale del reticolo replicato sul provino.

R. Ambu, F. Bertolino, C. Jubing, F. Ginesu

7. Bibliografia

- [1] Dantu P. "Deformation d'une sphere de plexiglass comprimée entre deux plans parallèles rigides en dehors du le domaine élastique", Laboratoire Centrale de Ponts et Chaussées, publication N° 622, 1962
- [2] Sciammarella C.A., Di Chirico G., Chiang F.P., "Moiré Holographic Technique for Three Dimensional Stress Analysis", Journal of Applied Mechanics, March 1970, pp.180-185
- [3] Di Chirico G., "Advances in Moiré-Strain measurements by Reconstruction of Diffracted Wavefronts", IUTAM Symposium Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers 1979
- [4] Di Chirico G., Ginesu F., Rossi R., "Moiré Holographic Analysis of Reinforced Plate Models", Experimental Mechanics, December 1989, pp.420-423
- [5] Ginesu F., "Application of the Holographic Moiré Technique to the Analysis of Composite Materials", Measurement, May 1992, pp.56-61
- [6] Ginesu F., Rossi R., "Improvements in Moiré Holographic Gratings for Structural Analysis ", International Congress on Laser Technologies in Industry, Porto, June 1988
- [7] Theocaris P.S., "Moiré Fringes in Strain Analysis", Pergamon Press
- [8] Dally J.W., Riley W.F., "Experimental Stress Analysis", Mc Graw Hill, New York,
- [9] Timoshenko S.P., Goodier J. N., "Theory of Elasticity", McGraw-Hill, New York
- [10] Froct M.M., "Selected papers of M.M. Froct on photoelasticity", Pergamon Press
- [11] Post D., Han B., Ifju P., "High Sensitivity Moiré; experimental analysis for mechanics and materials ", Springer -Verlag