



Impiego di sensori in fibra ottica per il monitoraggio di fratture statiche e dinamiche

F.Felli, A.Brotzu

Sapienza Università di Roma, Dip.ICMA, via Eudossiana 18, Roma.

ferdinando.felli@uniroma1.it; andrea.brotzu@uniroma1.it

RIASSUNTO. Viene presentata una rassegna di indagini effettuate sull'impiego di sensori in fibra ottica FBG (Fiber Bragg Grating) per il monitoraggio di fratture statiche e dinamiche in diversi campi applicativi dell'ingegneria.

Viene illustrato:

1. Il monitoraggio di una frattura muraria di un arco di un importante edificio storico (scuola Grande di San Rocco a Venezia) valutando la risposta dei sensori installati in funzione della quantità di visitatori presenti nell'edificio.
2. Il monitoraggio di una frattura presente sulla zampa anteriore di appoggio del cavallo della statua di Bartolomeo Colleoni a Venezia
3. Il monitoraggio della propagazione di cricche di fatica su materiali compositi in fibra di carbonio e su leghe di alluminio.

KEYWORDS. Frattura; Fatica; Materiali Compositi; Leghe Metalliche; Fiber Bragg Gratings; Sensori in Fibra Ottica; Monitoraggio delle Strutture.

INTRODUZIONE

Continuamente vengono condotte ricerche per il monitoraggio di cricche e zone interessate da importanti fenomeni di corrosione, tensocorrosione e per sviluppare nuovi test e nuove tecniche di misura per studiare i fenomeni di fatica e meglio comprendere i meccanismi coinvolti. La "Structural health monitoring" [1-3] è la nuova frontiera delle prove non distruttive e i sensori in fibra ottica sono molto promettenti per monitoraggi in tempo reale. Questi sensori possono essere facilmente utilizzati per studiare i meccanismi della fatica e della fatica corrosione. In particolare possono essere usati per caratterizzare gli stati di tensione e deformazione dei materiali testati vicino l'apice della cricca o misurare eventuali fenomeni di chiusura della cricca stessa.

I sensori in fibra ottica sono particolarmente attraenti rispetto ai sensori tradizionali perché presentano diversi vantaggi. Infatti essendo di vetro sono elettricamente e chimicamente passivi e sono immuni da interferenze elettromagnetiche, inoltre sono piccoli e trasparenti. Particolarmente interessanti sono i sensori FBG (Fiber Bragg Grating). Su di una singola fibra possono essere inseriti più sensori ("multiplexati"), questo consente di avere a disposizione più sensori con minor ingombro utilizzando un solo strumento di interrogazione.

I sensori in fibra ottica possono sia venire inglobati all'interno del materiale da monitorare che incollati sulla sua superficie. In questa maniera è possibile ottenere un monitoraggio in situ in tempo reale dello stato di deformazione di una struttura.

Il sensore FBG è praticamente uno strain gage ottico ottenuto fotoincidendo nel core della fibra ottica un reticolo di materiale caratterizzato da un indice di rifrazione differente. Tale fotoincisione viene realizzata illuminando la fibra ottica di traverso, attraverso una opportuna maschera di fase, con un fascio coerente di luce UV. Il risultato di questo processo è quello di ottenere una periodica variazione dell'indice di rifrazione del core della fibra nella direzione longitudinale. La conseguenza finale è che al passaggio di un fascio luminoso a banda larga lungo la fibra, il reticolo così fotoinciso riflette

una specifica lunghezza d'onda chiamata "lunghezza d'onda di Bragg" (λ_B) (vedi Fig. 1). Ogni deformazione (strain) della fibra causa uno shift della lunghezza d'onda correlabile alla deformazione. Si possono misurare accuratamente deformazioni inferiori di 1 μ strain (1 μ m ogni metro).

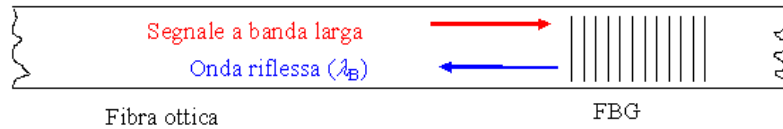


Figura 1: Principi di funzionamento del sensore Fiber Bragg Grating.

La lunghezza d'onda riflessa è legata alle caratteristiche del reticolo attraverso la legge:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (\text{nm}) \quad (1)$$

dove n_{eff} è l'indice di rifrazione effettivo del reticolo e Λ è la distanza tra le maglie del reticolo. Di solito la lunghezza d'onda riflessa si aggira intorno a 1550 nm.

Quando la struttura in cui è immerso o su cui è incollato il sensore subisce una deformazione, anche il sensore si deforma e varia le sue caratteristiche sia fisiche che geometriche. Di conseguenza si osserva una variazione della lunghezza d'onda riflessa:

$$d\lambda_B = 2(dn_{\text{eff}} \Lambda + n_{\text{eff}} d\Lambda) \quad (2)$$

Il valore dn_{eff} esprime la variazione dell'indice di rifrazione del reticolo e $d\Lambda$ è la deformazione del reticolo stesso. È stato dimostrato che, ipotizzando che l'indice di rifrazione non sia sensibile a variazioni termiche, la deformazione totale (termica+ meccanica) della struttura viene data dalla formula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} = \frac{\Delta \lambda_B}{(1 - p_e) \cdot \lambda_B} \quad (3)$$

dove p_e è un coefficiente che tiene conto dell'effetto delle tensioni sull'indice di riflessione definito dalla formula:

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2} \right) \cdot [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \approx 0.22 \quad (4)$$

dove ν è il rapporto di Poisson e P_{ij} è il coefficiente di Pockel del sensore.

I sensori FBG sono integrati sulla fibra ottica utilizzata per trasportare il segnale luminoso di interrogazione e di risposta dei sensori stessi. Tale fibra ottica è definita 'dorsale'. In ogni fibra ottica possono venire inseriti più sensori FBG caratterizzati da diversa lunghezza d'onda riflessa. Un'estremità della dorsale è connessa alla centralina opto-elettronica che genera il segnale di interrogazione ed effettua l'analisi del segnale di risposta; l'altra estremità è libera e può essere eventualmente prolungata per aggiungere ulteriori sensori. Il segnale di interrogazione si propaga lungo la dorsale e quando interagisce con un sensore genera il segnale di risposta che si propaga all'indietro verso la centralina. La centralina decodifica il segnale di risposta e misura la deformazione del componente monitorato. Il segnale di risposta dei sensori è analizzato dalla centralina con tecniche di tipo spettroscopico; se pur impropriamente, si può dire che la centralina analizza il colore del segnale di risposta, ed in base alla variazione del colore determina la deformazione del componente monitorato.

Lo studio della propagazione della cricca sotto test di fatica dovrebbe porre attenzione oltre che all'analisi delle sollecitazioni e alla determinazione delle dimensioni della zona plastica lungo il fronte della cricca nelle vicinanze dell'apice anche ai fenomeni di chiusura della cricca [4].

Il monitoraggio di questi parametri in tempo reale comporta parecchie difficoltà.

Alcune tecniche come la termografia differenziale che utilizza gli effetti termo-elastici può risolvere questi problemi con alcune limitazioni, quali l'elevato costo dell'apparecchiatura e la possibilità di monitorare le sollecitazioni superficiali in zona di sforzo piano.

L'inserimento di un sensore FBG vicino l'apice della cricca può dare un contributo alla soluzione di questi studi.

Premesso che questi sensori vengono proposti per diversi settori che vanno dall'aerospaziale alle strutture civili, esaminiamo ora alcune applicazioni per il monitoraggio di fratture statiche e dinamiche in diversi campi applicativi dell'ingegneria.

MONITORAGGIO DI FRATTURE IN STRUTTURE CIVILI [5].

Un campo estremamente interessante di applicazione dei sensori FBG è quello del monitoraggio strutturale civili quali ponti ed edifici anche storici.

Di seguito è riportato un esempio di installazione di sensori FBG in un importante edificio storico a Venezia, in particolare sull'arco di accesso alla Sala del Tintoretto nella Scuola Grande di S. Rocco:

La posizione del sensore installato è indicata schematicamente in Fig. 2, (Dorsale SR1; n. 1 sensore, contraddistinto come 'SR11). Il sensore è stato installato sul cornicione dell'arco, a cavallo della crepa che si sviluppa, all'interno della Sala del Tintoretto, in direzione verticale, Figg.3,4,5.

Il sensore è alloggiato in Housing in Acrilate cilindrico, di diametro esterno pari a 0.25mm; il sensore è centrato sull'asse dell'Housing.

Il sensore è stato installato in configurazione Strain Gauge, allo scopo di monitorare, la dimensione della crepa sul cornicione dell'arco all'interno della Sala del Tintoretto. L'installazione del sensore è avvenuta mediante incollaggio dell'intero sensore in letto di colla strutturale Wishay AE10, con successiva applicazione di protettivo Wishay M-CoatC e protettivo silconico Wishay RTV-3145.

Successivamente alla installazione del sensore, è stato eseguito un test di verifica del corretto funzionamento dello stesso, procedendo ad una breve acquisizione dei segnali.

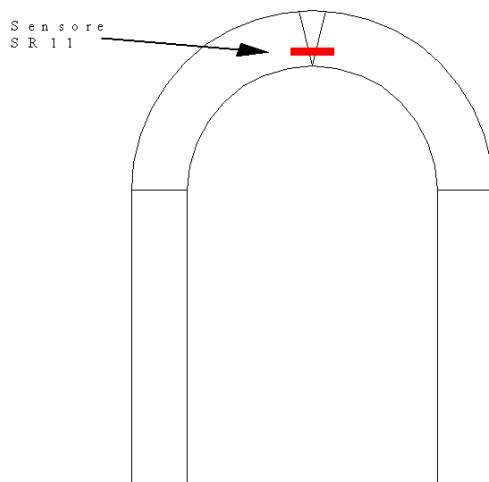


Figura 2: Posizione dei sensori collegati sulla dorsale SR1.



Figura 3: Sala del Tintoretto, Scuola Grand di San Rocco. Sensore SR11 installato per il monitoraggio della crepa.



Figura 4: Sala del Tintoretto, Scuola Grand di San Rocco.
Terminazione della dorsale SR1, lato sensore SR11.



Figura 5: Sala del Tintoretto, Scuola Grand di San Rocco.
Sensore SR11 installato per il monitoraggio della crepa.

Le acquisizioni effettuate, riportate in Fig. 6 confermano il corretto funzionamento. Nel seguito si commentano brevemente i segnali della dorsale, ribadendo comunque che l'acquisizione era finalizzata esclusivamente alla verifica del buon funzionamento del sensore e non al monitoraggio delle strutture, cosa che avrebbe richiesto acquisizioni più prolungate nel tempo ed il controllo di parametri e condizioni ambientali quali temperatura, affollamento dei locali, etc.:

La Fig. 6 mostra la misura effettuata dalla 'centralina' nel corso del tempo: sull'asse orizzontale si può leggere il tempo trascorso dall'inizio della misura; sull'asse verticale si può leggere la misura effettuata dalla centralina all'istante di tempo corrispondente. Se il segnale non cambia al trascorrere del tempo, significa che la deformazione della struttura monitorata non varia, e che quindi è meccanicamente imperturbata; se invece varia, significa che la struttura subisce, più o meno rapidamente, una deformazione più o meno ampia. Se il valore del segnale aumenta (se la curva 'sale' verso l'alto), la struttura monitorata è soggetta ad un allungamento; se il valore del segnale diminuisce (se la curva 'scende' verso il basso), la struttura monitorata è soggetta ad una contrazione; se in un breve intervallo temporale il segnale aumenta e diminuisce ripetutamente, la struttura monitorata è soggetta ad una vibrazione.

L'acquisizione è avvenuta dopo la completa polimerizzazione del collante strutturale. L'acquisizione, durata circa 3 ore, mostra una ampia variazione del segnale che risulta essere correlata alla variazione del numero di visitatori presente all'interno della Sala del Tintoretto. Infatti, l'acquisizione è stata avviata (tempo = 0 minuti) con la sala molto affollata, ed è stata interrotta (tempo = 160 minuti) con la sala pressoché deserta.

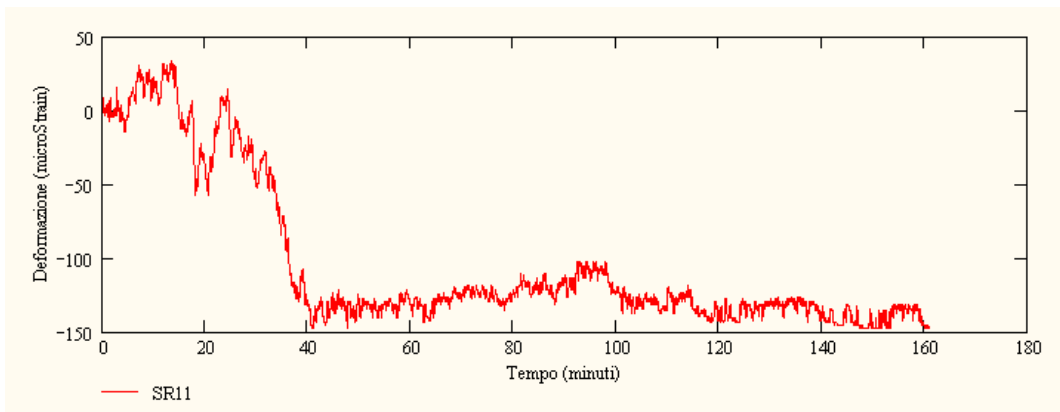


Figura 6: Verifica del corretto funzionamento del sensore collegato sulla dorsale SR1, dopo la installazione.

MONITORAGGIO DI FRATTURE IN STATUE METALLICHE.

Durante il lavoro di restauro della statua equestre di Bartolomeo Colleoni (opera di Andrea Verrocchio, Fig. 7) al campo dei Santi Giovanni e Paolo in Venezia, è stato applicato un sistema di sensori FBG per il monitoraggio strutturale a lungo termine di una frattura della zampa anteriore destra. (Fig. 8 e 9).



Il sistema ha consentito di verificare la sollecitazione strutturale durante le fasi di calibrazione dei sensori mediante sollecitazione meccanica controllata effettuata sul cavallo senza cavaliere e durante il riposizionamento del cavaliere stesso (Fig. 10).

Le misure sono state eseguite mediante 4 sensori FBG (Fig. 9) di cui 3 sensori FBG per il monitoraggio strutturale e 1 sensore FBG per compensare la misura con riferimento alla temperatura.

Il sistema di sensori è stato collaudato e calibrato tramite campagne di misura sperimentali mediante sollecitazioni controllate termiche e meccaniche.



Figura 7: Statua di Bartolomeo Colleoni.



Figura 8: Particolare della cricca.

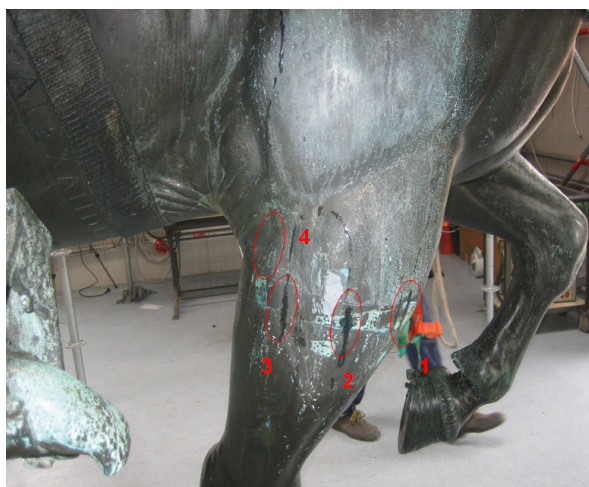


Figura 9: Posizione dei sensori FBG.



Figura 10: Fase di riposizionamento del cavaliere.

In Fig. 11 è riportato uno dei grafici acquisiti applicando sollecitazioni i cui valori venivano misurati con un dinamometro in varie zone del cavallo.

E' possibile notare che oltre a misurare l'ampiezza della deformazione della frattura in varie zone è possibile discernere zone in compressione e zone in trazione.

In Fig. 12 è riportato il grafico acquisito con la stringa di sensori FBG durante il posizionamento del cavaliere. Anche in questo caso è possibile notare oltre all'aumento della deformazione anche il fatto che in una zona la frattura è in trazione (apertura) mentre in un'altra zona è in compressione (chiusura).

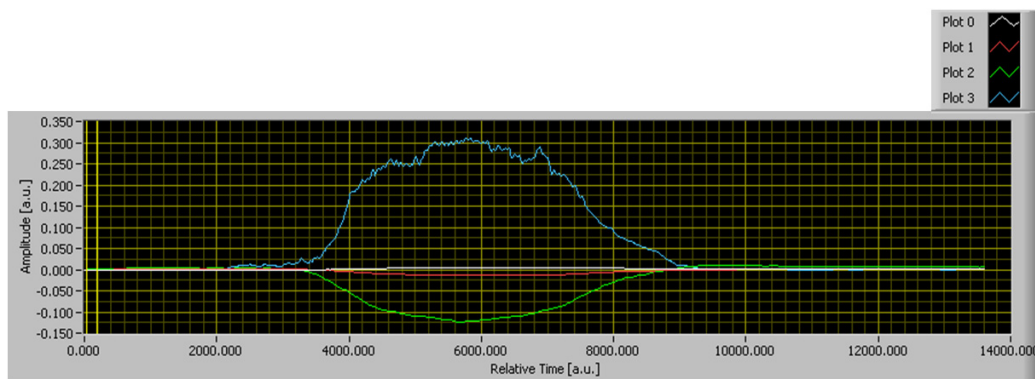


Figura 11: Time History relativa alla fase di calibrazione dei sensori mediante. Sollecitazione meccanica controllata.

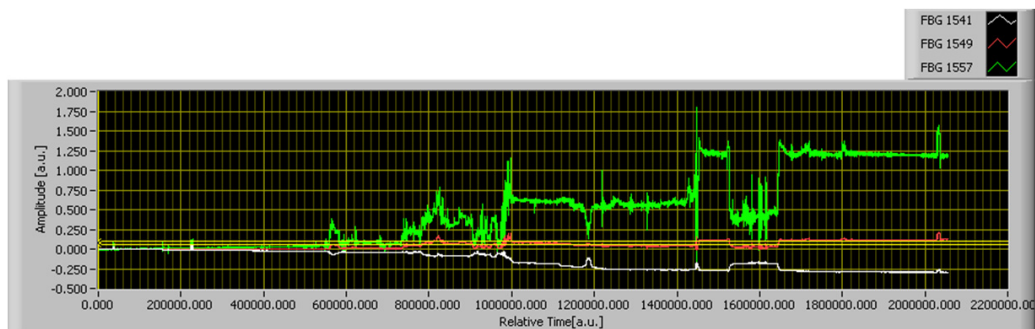


Figura 12: Time History relativa alla fase di riposizionamento del cavaliere.



UTILIZZO DEI SENSORI IN FIBRA OTTICA PER IL MONITORAGGIO E LO STUDIO DEI FENOMENI DI FATICA IN MATERIALI COMPOSITI A MATRICE POLIMERICA. [6]

Nel caso di compositi polimerici la descrizione del campo di sollecitazione all'interno del materiale è più critico a causa dell'interazione fibra-matrice e dell'orientazione del rinforzo, mentre è più semplice l'inserimento del sensore FBG essendo le temperature di manifattura non elevate.

Le potenzialità di questa tecnica sono state esplorate realizzando tre provini da un componente aeronautico dimesso. I provini sono stati tagliati da uno stabilizzatore verticale composito in matrice plastica rinforzata con fibre di carbonio di un aereo AMX. Il laminato composito presentava diverse orientazioni delle fibre. La forma e le dimensioni dei provini (0.05 x 0.05 x 0.0024m) sono state scelte in accordo con la norma ASTM E 647 che descrive i test con provini Compact Tension (CT) (Fig. 13).

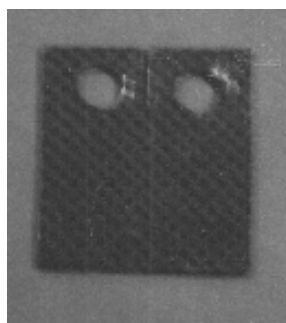


Figura 13: Provino CT usato nei test di fatica.

Un provino è stato utilizzato per un test classico di propagazione della cricca ad una frequenza di 2 Hz i cui risultati sono riportati in Fig. 14. Si può osservare che i carichi sono stati gradualmente incrementati fino ad un valore di 1800 N.

Un secondo provino è stato utilizzato per il test di termografia differenziale utilizzando una apparecchiatura Delta Term 1560 fornita dalla Stress Fotonica. In Fig. 15 sono riportati i risultati in termini di valori di stress in funzione della distanza dall'apice della cricca forniti dalla prova per tre livelli di sollecitazione.

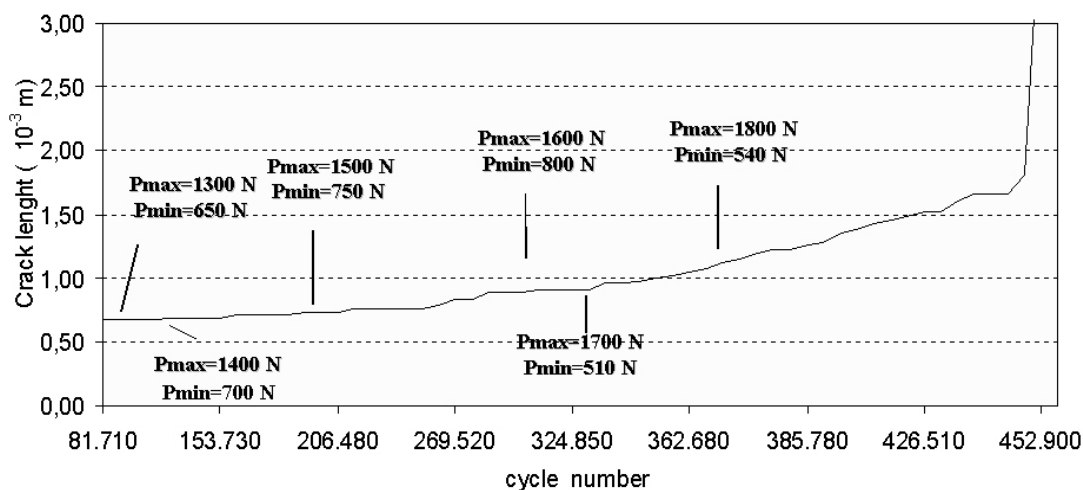


Figura 14: Propagazione della cricca in funzione del numero dei cicli.

In base a questa prova è stato possibile stabilire dove posizionare il sensore FBG scegliendo un compromesso tra la zona molto vicina all'apice della cricca, (più sensibile alle variazioni di deformazione) e una più lontana in grado di misurare queste variazioni per un tempo più lungo.

Determinata la posizione ideale (indicata dalla linea verticale tratteggiata di Fig. 15), il sensore è stato incollato sul provino con una resina epossidica a due componenti Araldite 2011. Dopo 48 ore il provino era pronto per il test di fatica. In Fig. 16 è riportato un disegno del provino con la posizione del sensore FBG, mentre in Fig. 17 è riportato il set-up sperimentale.

In Fig. 18 è riportata la variazione della deformazione misurata dal sensore FBG all'inizio del test di fatica durante l'applicazione del carico ($P_{\min} = 800 \text{ N}$, $P_{\max} = 1600 \text{ N}$, $R = P_{\min}/P_{\max} = 0.5$). Si può osservare che il segnale del sensore segue molto bene il carico applicato

Al fine di valutare la propagazione della cricca con la deformazione misurata dal sensore FBG, un valore medio di deformazione è stato calcolato ogni 5 minuti.

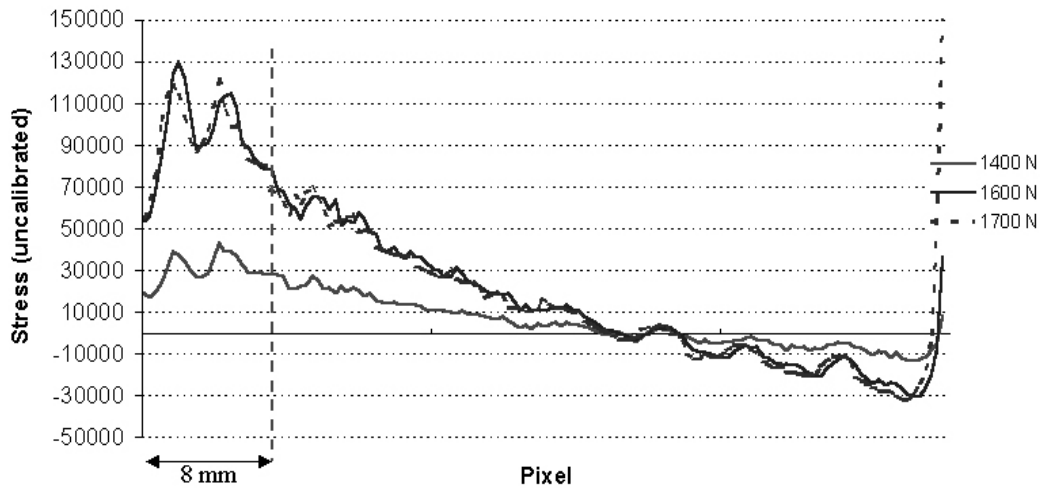


Figura 15: Stress vs. pixel per le ampiezze di sollecitazioni indicate.

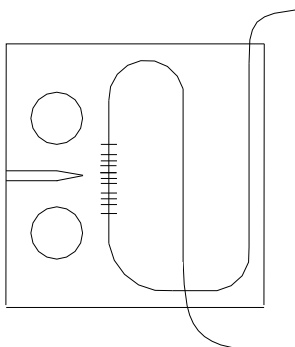


Figura 16: Posizione del sensore FBG sul provino CT.



Figura 17: Set-up sperimentale per il sensore FBG.

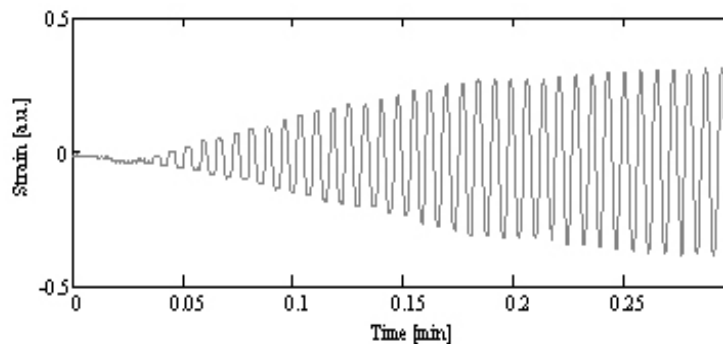


Figura 18: Deformazione misurata dal sensore FBG all'inizio della prova di fatica.

In Fig. 19 sono riportati questi valori medi in funzione del tempo (minuti). Le linee verticali tratteggiate corrispondono ai fermi dell'attuatore dei carichi, mentre quelle continue corrispondono alle rimozioni del provino per sottoporlo ad indagini ispettive con ultrasuoni e raggi X. Queste indagini non hanno mostrato nessun cambiamento del provino rispetto alla condizione iniziale.

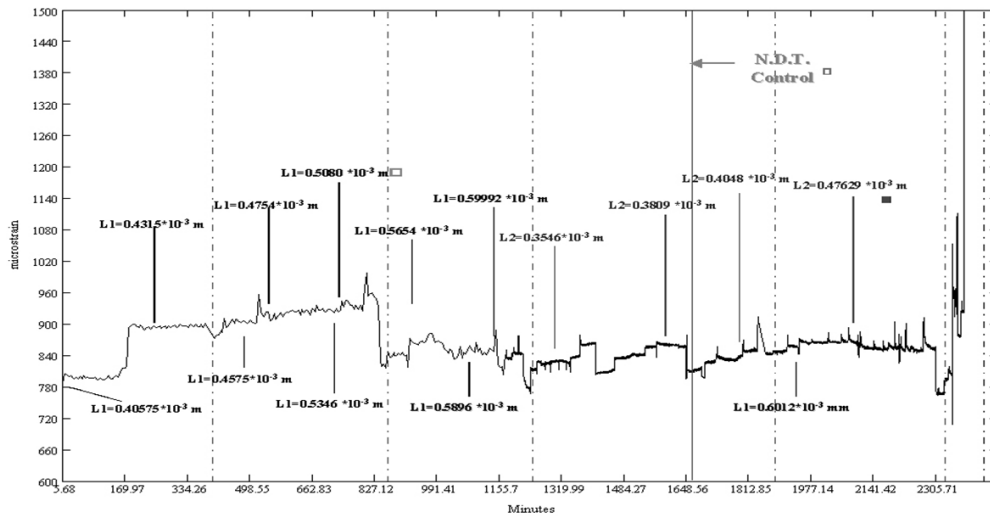


Figura 19: Microstrains. vs tempo (minuti), valori medi ogni 5 minuti; L = lunghezza della cricca.

Dopo alcune ore il sensore ha registrato un incremento di deformazione di circa il 10% passando da circa 800 microstrains a 900 microstrains. L'osservazione della cricca con un microscopio ottico ha mostrato un incremento della lunghezza della cricca di circa 30 μ m. Per il resto del giorno e per la maggior parte del secondo giorno il sensore FBG ha registrato un graduale incremento della deformazione media fino a circa 950 microstrains. In Fig. 20 è riportato un dettaglio dell'intaglio con la cricca indicata da una freccia. Alla fine del secondo giorno la deformazione rapidamente (in circa 30 minuti) decresce scendendo a circa 810 microstrains. La spiegazione di questo comportamento è stata trovata individuando con l'osservazione al microscopio la formazione di una cricca secondaria che si propagava con un'inclinazione di 45 gradi rispetto alla prima (Fig. 21). La cricca secondaria causa una riduzione della deformazione vicino la cricca primaria.



Figura 20: Propagazione della cricca nella direzione ortogonale rispetto alla sollecitazione di fatica.

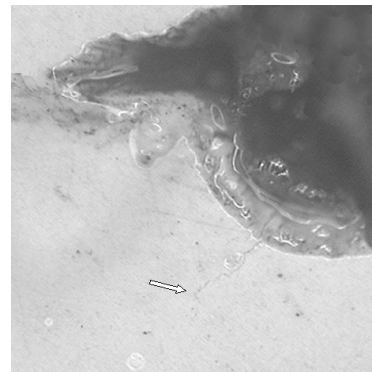


Figura 21: Cricca secondaria.

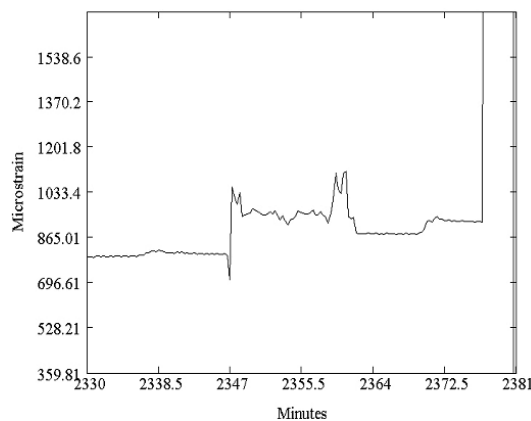


Figura 22: Deformazione media prima del cedimento.

In particolare come si osserva anche dalla Fig. 19 dopo la formazione della cricca secondaria non si osservano incrementi significativi della deformazione, infatti si osserva una propagazione da 600 a 601 μm in 16 ore, mentre la cricca secondaria si propaga per più di 50 μm .

Infine dopo sei giorni è stato incrementato il carico massimo di 100 N ed in circa mezzora il provino si è rotto (Fig. 22). Dieci minuti dopo che il carico era stato incrementato è comparso un picco di deformazione causato dal cedimento di alcune fibre di carbonio. Questo potrebbe essere considerato come un segnale premonitore prima del collasso finale.

UTILIZZO DEI SENSORI IN FIBRA OTTICA PER IL MONITORAGGIO E LO STUDIO DEI FENOMENI DI FATICA IN MATERIALI METALLICI [7]

Un approccio innovativo nello studio dei fenomeni di fatica su un provino metallico è stato tentato utilizzando questo tipo di sensori per monitorare l'avanzamento della cricca di fatica durante un test standard di propagazione condotto in accordo alla norma ASTM E 647-00.

Infatti il problema è di più facile soluzione per provini metallici che sono isotropi ed omogenei, anche se l'inserimento del sensore è più critico data l'elevata temperatura di fusione dei metalli.

In questo caso è più facile far ricorso all'incollaggio dei sensori.

È stato realizzato un provino CT standard (vedi Fig. 23, W 39 mm, B 10 mm a_0 6,5 mm) a partire da un laminato in lega leggera di alluminio (2024-T3). Questo campione è stato modificato realizzando davanti all'apice della cricca (circa 17 mm) sia una sottile cava superficiale che un foro passante al cui interno sono stati incollati due sensori multiplexati sulla stessa fibra ottica.

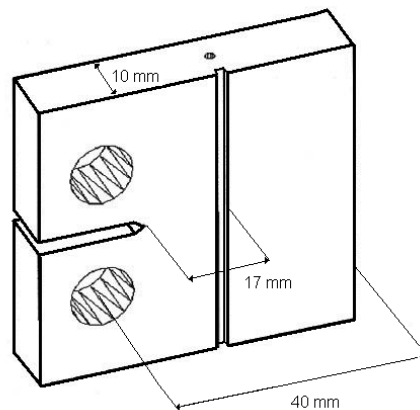


Figura 23: Provino CT modificato.

Il primo sensore (S1) è caratterizzato da una λ_B di 1542 nm ed è stato inserito nella cava superficiale per valutare le deformazioni nella zona caratterizzata da uno stato di deformazione piana, mentre il secondo sensore (S2) è caratterizzato da una λ_B di 1552 nm ed è stato inserito nel foro per monitorare le deformazioni della materiale sottoposta ad uno stato di sforzo piano. I sensori sono stati incollati utilizzando una resina bicomponente epossidica (Mecaprex MA1) caratterizzata da una notevole fluidità ed è quindi in grado di riempire completamente il foro passante e la cava superficiale. Inoltre da test effettuati risulta possedere una buona compatibilità con il coating della fibra. In questo modo è stato garantito il trasferimento delle deformazioni dal materiale testato alla fibra ottica.

La fibra ottica sensorizzata è stata connettorizzata e connessa ad un sistema di interrogazione in grado sia di lanciare il segnale luminoso nella fibra che di ricevere ed analizzare il segnale riflesso dai due sensori. Il campione è stato quindi testato impiegando una macchina di fatica elettromeccanica applicando un carico sinusoidale oscillante tra 4500 N e 1500 N alla frequenza di 10 Hz. L'avanzamento della cricca è stato monitorato sia mediante i due sensori posizionati davanti alla cricca sia mediante misure della lunghezza della cricca prese attraverso due microscopi ottici. Le Fig. 24 e 25, mostrano rispettivamente uno schema dell'esperimento ed una foto dell'intero apparato sperimentale.

Durante il test sono state prese circa 20 misure della cricca e per ogni misura sono stati registrati i relativi grafici lunghezza d'onda riflessa vs. tempo ottenuti dai due sensori.

Le Fig. 26 e 27 riportano questi grafici presi in corrispondenza di 5 misure della cricca.

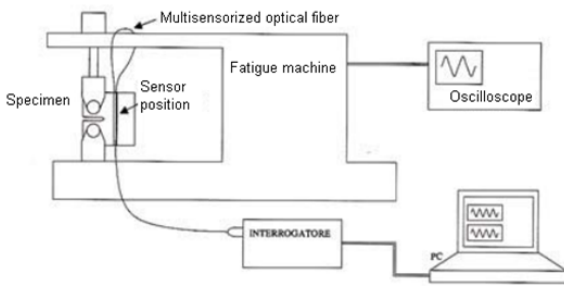


Figura 24: Set up dell'esperimento.

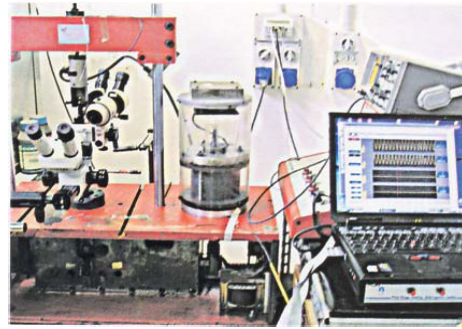


Figura 25: Foto del sistema di test.

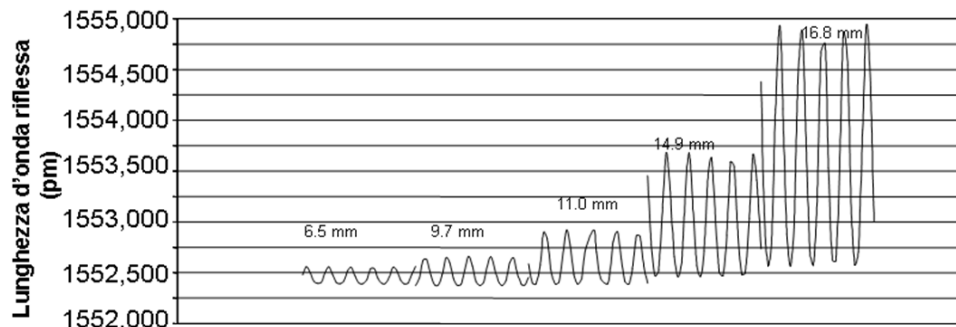


Figura 26: Risposta del sensore interno S2.

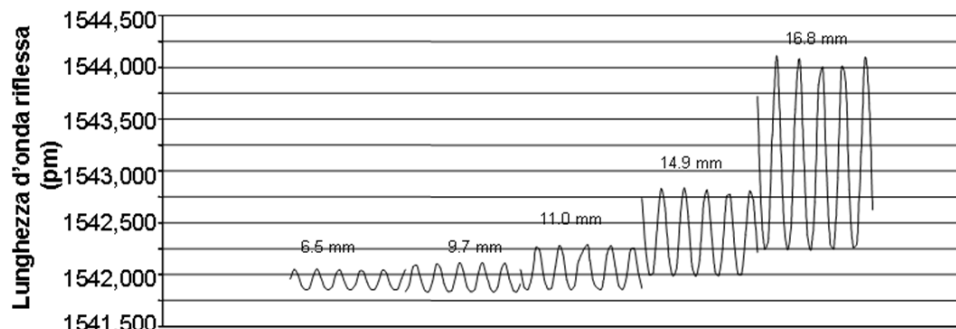


Figura 27: Risposta del sensore esterno S1.

Come si può osservare entrambi i sensori riproducono bene il carico sinusoidale applicato senza rumori o fenomeni di isteresi. Ciò indica che l'incollaggio mediante resina epossidica svolge correttamente la sua funzione di transfert delle deformazioni.

Come logicamente ci si deve aspettare all'avvicinarsi della cricca ai sensori le deformazioni sono maggiori e di conseguenza aumenta la lunghezza d'onda riflessa. I due sensori in ogni caso danno risultati differenti. In particolare il sensore S2 posto all'interno del foro passante rileva deformazioni più alte che il sensore esterno S1. Ciò è dovuto allo stato differente che viene a generarsi all'apice della cricca. Infatti all'interno del provino, a causa dei vincoli imposti dal materiale stesso, viene a generarsi all'apice della cricca il cosiddetto stato di Deformazione Piana, caratterizzato da uno stato tensionale triassiale. Viceversa in prossimità della superficie vige lo stato di Sforzo Piano con tensioni biassiali. La tensione totale all'interno è maggiore che all'esterno e di conseguenza anche le deformazioni sono maggiori.

Un'altra considerazione riguarda la risposta del sensore in corrispondenza del carico minimo. Si osserva un progressivo aumento della lunghezza d'onda riflessa, indice ciò che al carico minimo rimane una deformazione residua e che la cricca rimane aperta. Anche in questo caso si osserva una certa differenza di risposta da parte dei due sensori. In particolare il livello di deformazione residua misurato al carico minimo è maggiore sulla superficie che all'interno. Anche in questo caso la spiegazione risiede nel differente stato tensionale che caratterizza le diverse zone del provino. Sulla superficie l'assenza di vincoli derivanti dal materiale fa sì che si possano produrre delle deformazioni plastiche perpendicolari alla superficie. All'interno del provino tale fenomeno non è permesso. Queste deformazioni superficiali sono permanenti e possono



essere la causa del maggiore deformazione residua misurata in corrispondenza del carico minimo da S1 quando la cricca risulta essere vicina al sensore (ultime misure).

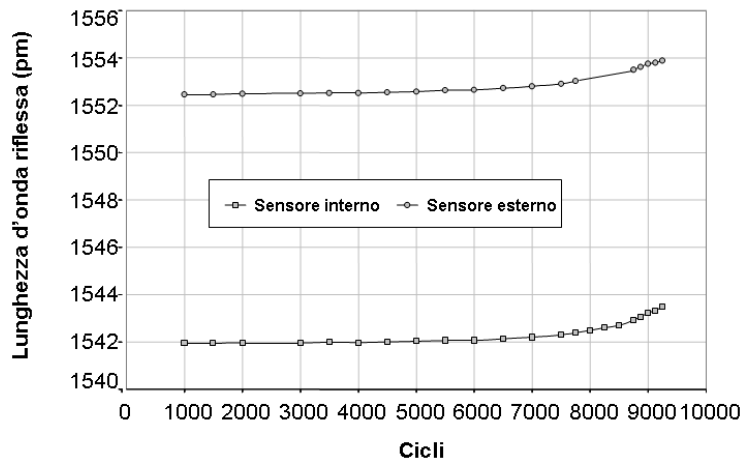


Figura 28: Lunghezza d'onda riflessa in funzione del numero di cicli.

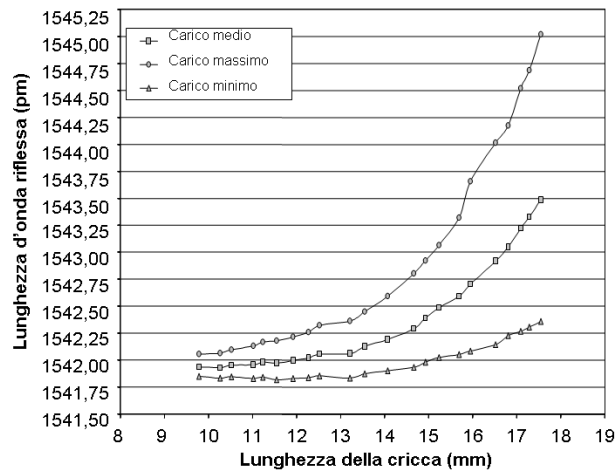


Figura 29: Lunghezza d'onda riflessa in funzione della lunghezza della cricca, sensore esterno.

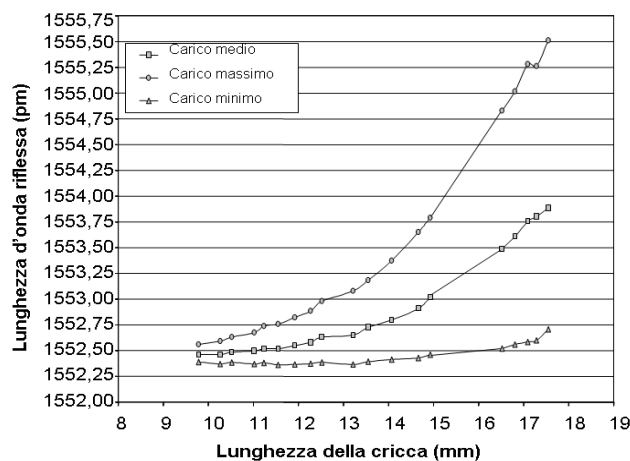


Figura 30: Lunghezza d'onda riflessa in funzione della lunghezza della cricca, sensore interno.

Il progressivo aumento della lunghezza d'onda riflessa in corrispondenza del carico minimo può essere anche legato ai fenomeni di chiusura, cioè a tutti quei fenomeni di interferenza tra le due superfici di frattura che impediscono una



completa chiusura della cricca e che riducono il ΔK realmente applicato. Questi fenomeni sono più evidenti nelle zone a sforzo piano rispetto alle zone a deformazione piana.

I dati ottenuti dai sensori sono stati rappresentati anche riportando il valore medio della lunghezza d'onda riflessa sia in funzione del numero di cicli (Fig. 28) che in funzione della lunghezza della cricca (Fig. 29 e 30). Il primo grafico ricalca l'andamento tipico delle curve a vs. n , mentre i secondi grafici mostrano un andamento non lineare e possono essere utilizzate come punto di partenza per uno studio volto a definire le curve di taratura del sensore.

CONCLUSIONI

Dall'insieme di questa rassegna emergono numerosi spunti interessanti per l'applicazione dei sensori FBG nel monitoraggio di fratture in strutture sollecitate sia staticamente che dinamicamente. Alcune applicazioni possono avere un utilizzo operativo pratico significativo mentre altre sono finalizzate più a scopi di ricerca, in ogni caso di notevole interesse.

I sensori FBG monitorizzano bene l'evoluzione e la crescita di cricche in vari tipi di materiali, la correlazione tra la lunghezza della cricca e i valori medi misurati dai sensori è buona. Anche lo sviluppo e la crescita di cricche secondarie può essere evidenziata.

Questa ricerca è una ricerca a tutt'oggi di avanguardia che necessita di ulteriori studi e approfondimenti sia teorici che applicativi per rendere questa tecnologia affidabile e quindi applicabile su vasta scala.

RINGRAZIAMENTI

Ringraziamo gli altri partecipanti al gruppo di ricerca sull'applicazione dei sensori FBG prof. Antonio Paolozzi ed il dot. Michele Arturo Caponero.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Paolozzi, P. Gasbarri, Dynamic analysis with fibre optic sensors for Structural Health Monitoring. NATO RTO AVT 141 (2006) 1.
- [2] Fiber Optic Smart Structures, Eric Udd editor, (2005).
- [3] Fiber Brag Gratings, Raman Kashyap, P. L. Kelly et al. editors, Academic Press, (1998).
- [4] Mechanics of Fatigue Crack Closure, J.C. Newman, W. Elber, editors, STP 982, ASTM publication, (1988).
- [5] F. Felli, A. Paolozzi, G. Saviano, M.A. Caponero, L. Pastorelli, In: 8th Int. Conf. on "Non-Destructive Investigation and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage, Lecce (2005).
- [6] M.A. Caponero, F. Felli, G. Mazzoni, A. Paolozzi, In: Int. Conf. on Materials and Processing 2002 (M&P2002), (2002) 406.
- [7] A. Brotzu, F. Felli, A. Paolozzi, L. Caputo, F. Passeggio, S. Gaeta, Advanced Materials Research, 38 (2008) 155.