

MONITORAGGIO TERMOGRAFICO SU PROVE DI FATICA DI COMPOSITI IN FIBRA DI CARBONIO

C.Santulli

Centro Comune di Ricerca di Ispra (VA) -ISIS - ATIA

SOMMARIO: il lavoro verte sullo studio del comportamento di compositi quasi-isotropi in fibra di carbonio e matrice epossidica, seguito in modo passivo mediante termografia infrarossa durante l'applicazione di sollecitazioni cicliche. Sono state effettuate delle prove di fatica con sollecitazioni di tipo trazione-trazione ($R \sim 0.1$) su provini tal quali e di tipo trazione-compressione simmetrica ($R = -1$) su provini in cui era praticato un foro centrale di diametro pari ad $\frac{1}{2}$ della larghezza del provino con carichi non eccedenti il 60% del carico di rottura del materiale. Le frequenze di lavoro utilizzate erano di 10 e 20 Hz, consentendo di sfruttare al massimo le possibilità di acquisizione della videocamera. Lo scopo era di valutare la distribuzione delle temperature sul campione durante la prova e di osservare e misurare l'iniziazione e lo sviluppo delle delaminazioni. I risultati raggiunti, pur trattandosi di una valutazione preliminare, sembrano prestarsi particolarmente all'analisi comparativa con altre tecniche di monitoraggio in tempo reale.

PAROLE CHIAVE: termografia, fibra di carbonio, fatica, delaminazioni

INTRODUZIONE

La maggior parte delle applicazioni della termografia sui materiali compositi polimerici riguardano un approccio attivo alla tecnica, consistente nel riscaldamento della superficie con una sorgente di calore e nell'osservazione, durante il transitorio di trasmissione del calore che si ha fino al nuovo raggiungimento dell'equilibrio, la distribuzione delle temperature dovuta alle diverse conducibilità locali, che permette di evidenziare i difetti presenti nel materiale (Almond e Lau, 1992, Bruno, 1989). Un tale approccio che comporta l'applicazione del riscaldamento per un periodo fino a qualche secondo ed in modo ripetuto (termografia pulsata) permette dei transitori osservabili anche su strutture metalliche (Henneke et al., 1979). In particolare su compositi in matrice epossidica rinforzata con fibre di carbonio, grazie alla minor diffusività del materiale si può giungere anche ad una durata dell'osservazione di qualche decina di secondi ed al riconoscimento della dimensione di difetti con sufficiente approssimazione anche a profondità di qualche millimetro (Aiello et al., 1995, Ailello e Caneva, 1996).

I piccoli livelli di contrasto dell'immagine conseguibili anche ricoprendo il materiale con vernici ad alto assorbimento e la presenza di rumore di fondo, sul quale le indicazioni in letteratura sembrano alquanto carenti (Trétout, 1987) ed il limite della risoluzione in temperatura dei sensori infrarossi, che non scende molto al di sotto del decimo di grado rendono invece problematica l'individuazione non distruttiva di un difetto non conosciuto,

come pure il monitoraggio passivo di una prova ai fini del riconoscimento del manifestarsi di fenomeni di danneggiamento.

Concentrandoci sul monitoraggio della fatica di tali materiali, due strade sono state in particolare percorse: quella di una sollecitazione di intensità bassissima, tale da potersi ritenere non distruttiva, ma con alte frequenze (50-100 Hz), in modo da evidenziare in superficie le isole di calore dovute alla frizione reciproca degli strati delaminati, oppure quella del monitoraggio vero e proprio della prova di fatica trazione-compressione. Un tale monitoraggio fornisce più chiare evidenze sperimentali in presenza di fattori di intensificazione degli sforzi, quali fori centrali nel provino (Balageas, 1993). L'applicazione su prove trazione-trazione è meno tipica del controllo termografico passivo. Si è scelto tale tipo di sollecitazione su provini tal quali allo scopo di valutare l'effettiva possibilità in queste condizioni del monitoraggio delle delaminazioni in corso di formazione: per un raffronto anche coi risultati provenienti da altre tecniche di monitoraggio passivo.

MATERIALI E METODI

La videocamera termografica utilizzata, Agéma modello TH 880 SWB, raffreddata ad azoto liquido permetteva l'acquisizione di 6,25 immagini per secondo, mediabili poi in vario modo a seconda delle esigenze sperimentali. Va notato al proposito che un limite del monitoraggio termografico era costituito nel nostro caso dalla possibilità del programma di acquisire un massimo di 380 immagini per volta, il che costringeva in qualche caso ad interrompere la prova, oltre che il problema, meglio ovviabile dal punto di vista pratico, dell'autonomia massima del serbatoio di azoto liquido, che non eccedeva i 90 minuti. Sono state eseguite quattro serie di prove a differenti condizioni, dove il materiale era sempre costituito da provini quasi-isotropi in resina epossidica HTA 6376 C rinforzata con 8 strati di fibre di carbonio la cui sequenza di impilaggio era $(0/+45/90/-45)^*2$, con spessore quindi complessivo di 1.2 mm. Il carico di rottura a trazione nominale del materiale era di 708 MPa. La prima serie prevedeva delle prove di fatica a 10 Hz con sollecitazioni massime pari al 60 % del carico di rottura a trazione del materiale e rapporto di carico $R=0,1$. Una seconda serie, conservando la stessa frequenza di 10 Hz e lo stesso carico massimo, portava il rapporto di carico a 0,2. In altri provini ancora la frequenza di prova viene portata a 20 Hz, mentre R rimane a 0,1 ed il carico massimo è sempre del 60%. Per queste prime tre serie di prove sono stati tagliati dei provini di lunghezza 200 mm e larghezza 11 mm con talloni su una lunghezza di 4 cm ad ogni estremità in fibra di vetro, incollati con colla a base cianacrilica a temperatura ambiente, con un tratto utile quindi di 120 mm. In questo caso le 6,25 immagini/secondo acquisite dalla videocamera venivano filtrate sulla base di un periodo di 5 secondi, onde ridurre al minimo il rumore di fondo. Un'ulteriore serie di provini prevedeva l'applicazione con frequenza di 10 Hz di sollecitazioni alternate e simmetriche ($R=-0,1$); i carichi massimi applicati crescevano dal 10 al 30% con incrementi del 5 % ogni 10000 cicli. In tale quarta serie di prove variava la sola larghezza dei campioni (18 mm, onde poter praticare dei fori di diametro 9 mm). Qui la media veniva effettuata su di un periodo di soli 2 secondi, per la migliore condizione di uniforme illuminazione ed il più elevato assorbimento conseguito sui provini forati. La macchina di fatica impiegata era una MTS a

comando idraulico con carico massimo nominale di 100 kN, spostamento massimo 200 mm, frequenza massima di 200 Hz in carico e spostamento e ganasce idrauliche, in cui i provini sono stati serrati con una pressione media di 10 MPa.

RISULTATI

Esaminando le evidenze sperimentali ottenute dai provini senza cioè l'introduzione di concentrazioni di sforzi, osserviamo nelle fig.1 e 2, riferite entrambe al monitoraggio di due provini tra i 30 ed i 60 kcicli, ma a frequenze diverse, come caratteristicamente la temperatura massima, nel caso la rottura non sia prossima, tenda a raggiungere un livello costante, più rapidamente e su valori maggiori nel caso della prova a frequenza più alta.

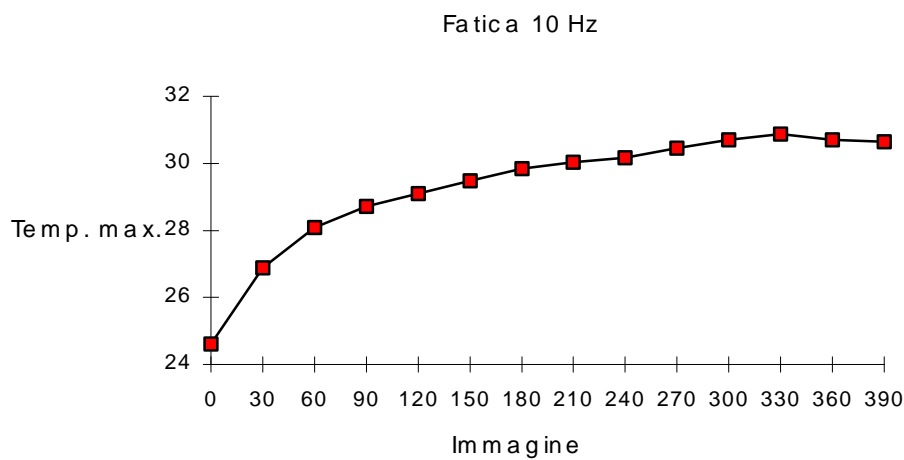


Fig.1 Variazione della temp.max. tra 30 e 60 kcicli su un provino testato a 10 Hz ($R=0,1$)

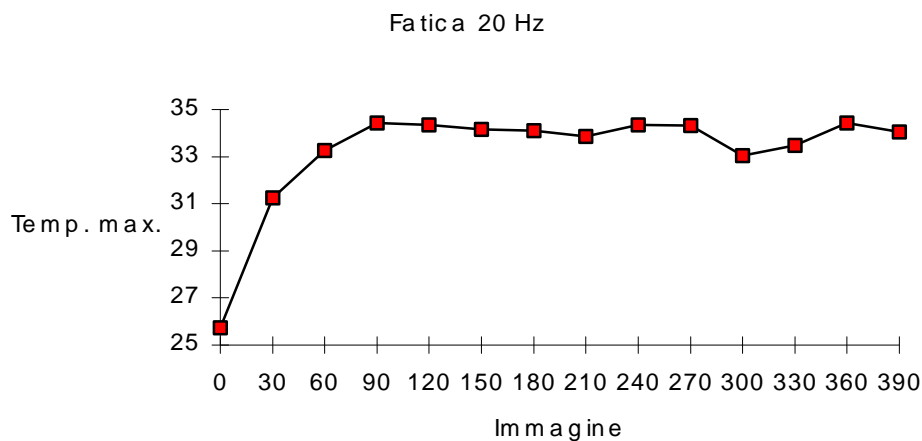


Fig.2 Variazione della temp.max. tra 30 e 60 kcicli su un provino testato a 20 Hz ($R=0,1$)

Osservando poi la distribuzione delle temperature sulla superficie del materiale, si può notare, a parte la presenza di maggiori temperature nella parte bassa del provino, che é

dovuta al moto della ganascia inferiore della macchina di fatica utilizzata, si cercavano irregolarità, in particolare sui bordi che potessero mostrare lo sviluppo preferenziale delle delaminazioni in certe direzioni. Una tale evidenza é stata mostrata dal provino in fig.3, che presentava sistematicamente, a partire da un certo numero di cicli, una zona più calda in modo spiegabile solo dalla presenza di più cospicue delaminazioni che nel resto del materiale. La zona mostrata in questo caso si estende per circa 25 mm da ambo le parti rispetto al centro, coprendo in totale quasi la metà del tratto utile del provino.

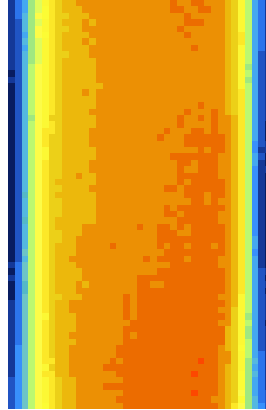


Fig.3 Sospetta delaminazione su provino dopo 5000 cicli circa

Quando la rottura del provino é prossima, la ridistribuzione delle temperature e degli sforzi non é invece più possibile, e si passa in brevissimo tempo dalla situazione in fig.4a a quella in fig.4b: non vi sono zone prevalentemente danneggiate (infatti il provino é totalmente delaminato) ed inoltre la temperatura massima cresce continuamente, senza stabilizzarsi su un valore approssimativamente costante.

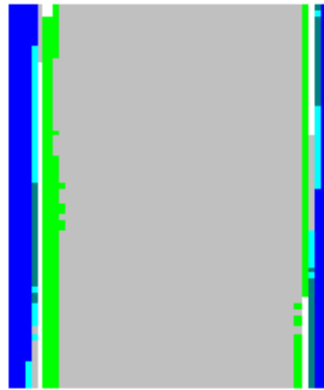


Fig.4a Provino a 10 Hz ($R= 0,2$) dopo 400 cicli

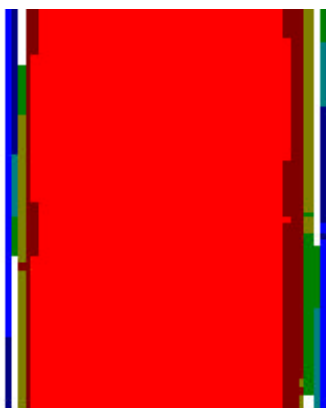


Fig.4b Lo stesso provino dopo 700 cicli (in prossimità della rottura)

Passando poi all'analisi dei risultati ottenuti dai provini forati, va notato innanzitutto (fig.5, riferita ad una prova al 15% del carico ultimo, che vi é sempre una notevole dissimmetria nella distribuzione delle temperatura sui campioni all'intorno del foro. In fig.6 poi, relativa ad una prova a 25 % del carico ultimo, si nota il tipico andamento indotto dalla concentrazione degli sforzi sulla distribuzione delle temperature. Le tre curve si riferiscono rispettivamente alla temperatura massima (fS) nell'area di circa 25x20 mm nell'intorno del foro, poi alla temperatura massima in un'area più ristretta (5x5 mm) nella zona di massima concentrazione degli sforzi a sinistra del foro (f1) ed analogamente a sinistra del foro (f2). In modo caratteristico e riscontrato in modo ripetibile, l'area di massima temperatura si sposta nel corso delle serie di 10000 cicli dalla sinistra alla destra del foro, o viceversa.

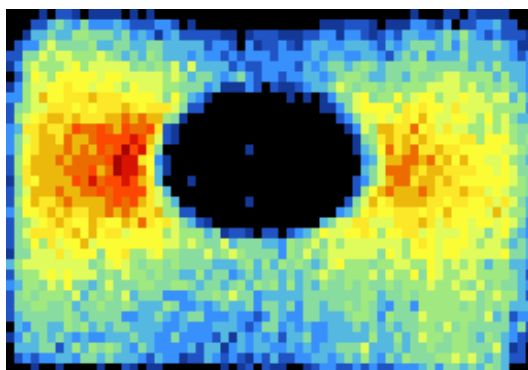


Fig.5 Dissimmetria nella distribuzione delle temperature attorno al foro

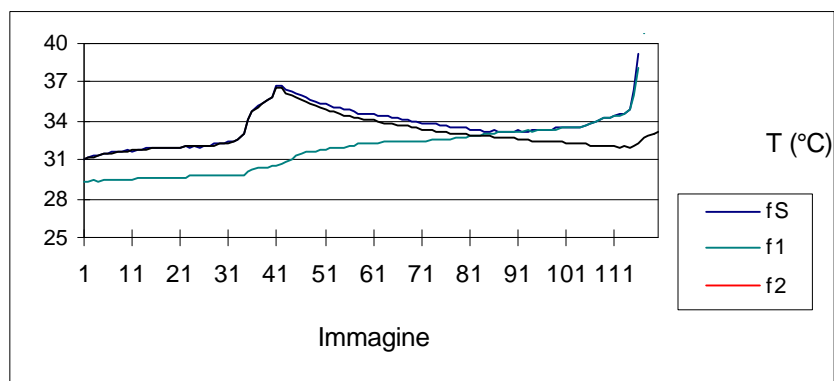


Fig.6 Distribuzione delle temperature su un periodo di 2000 cicli intorno al foro

CONCLUSIONI

La tecnica termografica si adatta complessivamente bene al monitoraggio di prove di fatica di compositi e senz'altro meglio nel caso di sollecitazione alternata per la presenza di più grandi differenze di temperatura. Dubbi permangono sulla capacità di rilevare le delaminazioni dall'osservazione dei bordi dei provini, per incrementare la quale si trovano ancora ostacoli nella risoluzione del sensore infrarosso e nella difficoltà oggettiva di stabilire un monitoraggio continuo per periodi superiori all'ora. Tale tecnica tuttavia si presta particolarmente alla correlazione con informazioni provenienti da altre tecniche di monitoraggio (p.es., l'emissione acustica) e di osservazione del danneggiamento nei compositi (reggi X, replica, C-Scan).

BIBLIOGRAFIA

- A. Aiello, C. Caneva, 1996, "Potenzialità del controllo non distruttivo con metodi di ultrasuoni e termografia di nuova generazione", Giornata dell'Aeronautica AIPnD, Pratica di Mare giu..
- A. Aiello, C. Caneva, C. Santulli, 1995, "Controllo di qualità di strutture sandwich mediante termografia ed emissione acustica" 8a Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive monitoraggio diagnostica. Torino ott..
- D. Balageas, 1993, "Contrôle non destructif des matériaux composites par thermographie infrarouge", Revue des laboratoires d'Essais May, pag.12-16
- D.P. Almond, S.K. Lau, 1992, "A quantitative analysis of pulsed video thermography"
- E.G. Henneke II, K.L. Reifsnider, W.W. Stinchcomb, 1979, "Thermography - An NDI method for damage detection", Journal of metals, Sept. pag.11-15.
- H. Trétout, 1987, "Application industrielle de la thermographie infrarouge au contrôle non destructif de pièces en matériaux composites", Revue Générale Thermique Française n.301 Jan., pp.47-53
- Photonics Spectra July, pag.123-125.
- QIRT 92 - Eurotherm Series 27 - Paris , pag. 207-211
- R.P. Bruno, 1989, "Thermography in nondestructive industrial testing"