

VALUTAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DI CRICCHE IN PROVINI SALDATI CON TECNICHE DI EMISSIONE ACUSTICA E TERMOGRAFICA

M. Cali, G. La Rosa, F. Lo Savio, L. Maiolino

*Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Università di Catania
Viale Andrea Doria, 6 - 95125 Catania (e-mail: glarosa@diim.unict.it)*

Sommario

Il presente articolo si propone di valutare come due tecniche di controllo non distruttivo, l'emissione acustica e la termografia, possano essere integrate in una metodologia che consenta lo studio della propagazione della frattura in condizioni di sollecitazione a fatica. In particolare, si tratta di uno studio preliminare nel quale si vuole proporre un parallelismo tra i risultati ottenuti su prove sperimentali applicando contemporaneamente entrambe le tecniche.

Abstract

Aim of this paper is to evaluate how two non-destructive testing may be integrated in a methodology to study the fracture propagation on materials and components under fatigue loading. The present work is a preliminar comparison between the results obtained by experimental tests in which the two methods were applied simultaneously.

Introduzione

Le verifiche meccaniche su condutture in pressione o su serbatoi di stoccaggio rivestono particolare importanza nell'ambito dei controlli non distruttivi poiché tali strutture, al variare delle condizioni di funzionamento, possono subire danneggiamenti non facilmente rilevabili, che portano a rottura prima dei normali intervalli manutentivi.

Nel presente studio si è analizzata la possibilità di correlare il metodo dell'emissione acustica con quello termografico. Le due tecniche di controllo sono state applicate a provini ricavati da tubazioni saldate, con lo scopo di evidenziare, durante prove di fatica, eventuali correlazioni.

Entrambe le tecniche si caratterizzano per la capacità di rilevare la quantità di energia rilasciata da un corpo sottoposto a deformazione anche quando questa viene generata da fenomeni strettamente localizzati, come del caso della fatica. In ambedue le metodologie di controllo non distruttivo l'energia viene rilasciata direttamente dal corpo analizzato sottoposto ad un campo tensionale e non è indotta da una sorgente esterna, come si verifica, invece, nella gran parte dei controlli non distruttivi (ultrasuoni, raggi X, magnetoscopia, ecc.). Sia per la tecnica dell'emissione acustica che per il metodo termografico, inoltre, la quantità di energia rilevata è prevalentemente fornita dalla crescita di fratture e dalla deformazione plastica. Ciò rende

particolarmente interessante la comparazione tra le due tecniche al fine di sviluppare una nuova e più efficace metodologia d'indagine.

Descrizione delle metodologie di indagine

Volendo analizzare il comportamento a fatica del materiale, ed essendo questo legato a fenomeni di microplasticità localizzati, ciò che interessa maggiormente è valutare in che modo i due metodi suddetti sono in grado di rilevarli e se i dati sono in qualche modo correlabili.

Dal punto di vista termografico si può affermare che ogni evento danneggiante che si verifica nel materiale viene rilevato come una variazione della temperatura superficiale. Qualunque evento danneggiante può quindi essere rilevato da un sensore all'infrarosso sotto forma d'incremento di temperatura. In particolare, il metodo Risitano ha dimostrato che gli incrementi di temperatura possono considerarsi proporzionali all'energia di deformazione prodotta nel materiale. Acquisendo immagini in continuo è possibile anche localizzare i fenomeni puntuali di plasticizzazione [1-6].

Analogamente, mediante l'emissione acustica, ogni evento danneggiante è individuato da un insieme di colpi (*hits*). La rilevazione di ogni singolo colpo dipende dal valore di soglia e dal valore del tempo morto (intervallo tra due colpi successivi) fissati in fase di taratura dell'apparecchiatura di acquisizione. Ogni colpo sarà caratterizzato, inoltre, da un valore di intensità proporzionale all'energia dell'evento rilevato.

Volendo proporre un parallelismo tra le due tecniche è possibile, dunque, affermare che il livello energetico associato al colpo può essere correlato all'incremento termico rilevato con il metodo termografico. Infatti, a carichi più elevati corrispondono colpi più energetici ed incrementi di temperatura più significativi.

Prove sperimentali

Le prove sperimentali sono state effettuate su provini di acciaio legato al Cr-Mo (ASTM A335 Gr P9), ricavati da una sezione di tubo avente diametro 8", saldati in corrispondenza della mezzeria. I provini hanno dimensioni 17×172×4 mm e sono stati sagomati in maniera tale da lasciare una sezione minima resistente avente un'area di 48 mm². I raccordi laterali circolari, realizzati con fresa a controllo numerico, hanno raggio di curvatura di 75 mm e profondità massima di 2,5 mm.

L'acquisizione dei segnali di emissione acustica è stata effettuata tramite quattro sensori; due posti direttamente sul provino (sensore 1 in alto, sensore 2 in basso, Fig. 1) ad una distanza di 80 mm tra loro e non equidistanti dalla zona della frattura. Altri due sensori (sensore 3 in alto, sensore 4 in basso) sono stati disposti sulle ganasce della macchina di prova per eliminare le componenti dovute al rumore di fondo. Sui segnali acquisiti, provenienti dai sensori 1 e 2, è stata effettuata un'operazione di filtraggio mediante differenziazione con i segnali di guardia, provenienti dai sensori 3 e 4.

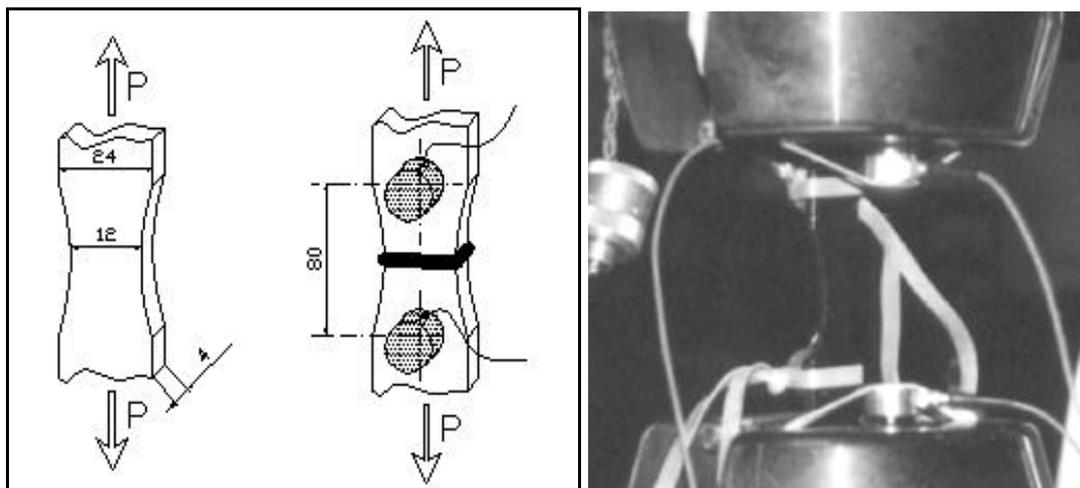


Fig. 1: Schema dei provini e foto con sensori applicati.

Le prove a fatica sono state effettuate utilizzando la macchina per prova di materiali Instron 8501 con cella di carico da 100 kN. Sono stati applicati carichi oscillanti dall'origine ($R=0$) sia ad ampiezza costante che ad ampiezza crescente a gradini con frequenza di 5 Hz. Nel primo caso si è applicato un carico di ampiezza 35 kN, valutato sufficientemente superiore al limite di fatica ed inferiore a quello di snervamento, in modo da seguire per intero un livello di carico della prova di fatica tradizionale. Nel secondo caso ciascun carico è stato applicato per 1000 cicli, raggiunti i quali si è provveduto, secondo una collaudata procedura (treni di carico di ampiezza crescente a gradino), ad incrementare il carico con la sequenza prefissata di {20, 22, 24, 26...} kN come mostrato in Fig. 2.

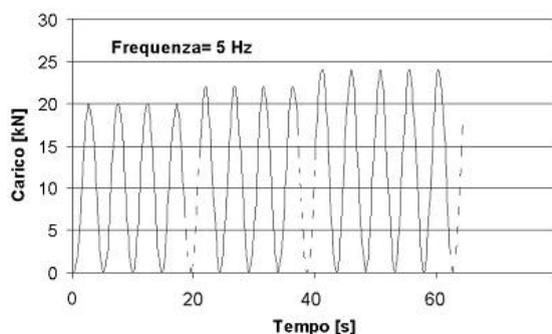


Fig. 2: Ampiezze di carico applicate.

Per l'acquisizione delle immagini ad infrarosso è stata utilizzata la termocamera AGEMA THV 900 che acquisisce nella banda 8-12 μm . Con essa è stata registrata la temperatura superficiale di ciascun provino per l'intera durata della prova. Le immagini rilevate a una frequenza di 0,1 Hz sono state elaborate successivamente mediante software Matlab 5.0.

L'apparecchiatura utilizzata per il rilevamento e l'analisi dei segnali di emissione acustica (E.A.) è il modello MC6-US quadricanale della Vallen Systeme GmbH, sul quale è implementato il software AMSY4. Le sonde utilizzate, schematizzate in Fig. 3, sono di tipo differenziale, con frequenza di risonanza di 150 kHz. In Fig. 3 si riporta altresì la curva di calibrazione di tali

sensori. Le sonde sono state fissate ai provini mediante supporti elastici, utilizzando grasso al silicone come mezzo di accoppiamento.

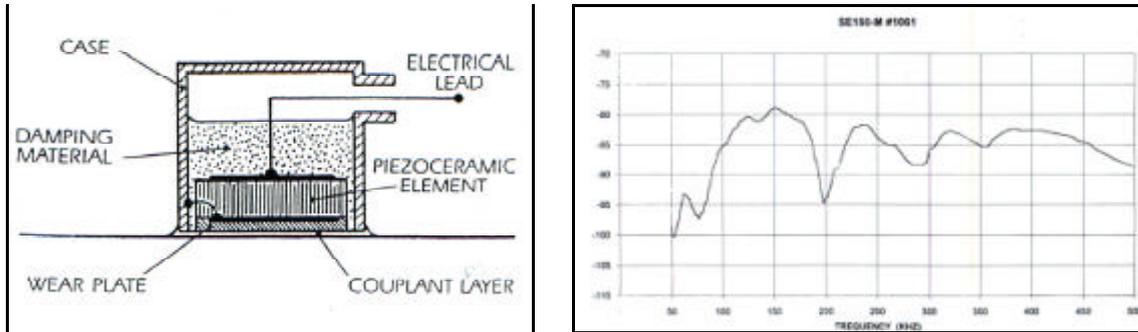


Fig. 3: Schema di un sensore e relativa curva di calibrazione.

La strumentazione è stata regolata impostando l'amplificazione ed il livello di soglia ottimali al fine di evitare il rilevamento di segnali spuri dovuti all'ambiente di lavoro o al rumore elettrico della strumentazione stessa. Tali valori sono stati determinati mediante prove di calibrazione che hanno permesso di determinare i parametri caratteristici dell'E.A. con riferimento ad una sorgente facilmente identificabile e ripetibile quale la rottura di una mina sottile (ASTM E 1106-86). La prova è stata effettuata su di una piastra dello stesso acciaio di dimensioni 200×200×5 mm, in cui sono stati posizionati, in corrispondenza dei vertici, i quattro sensori (Fig. 4).

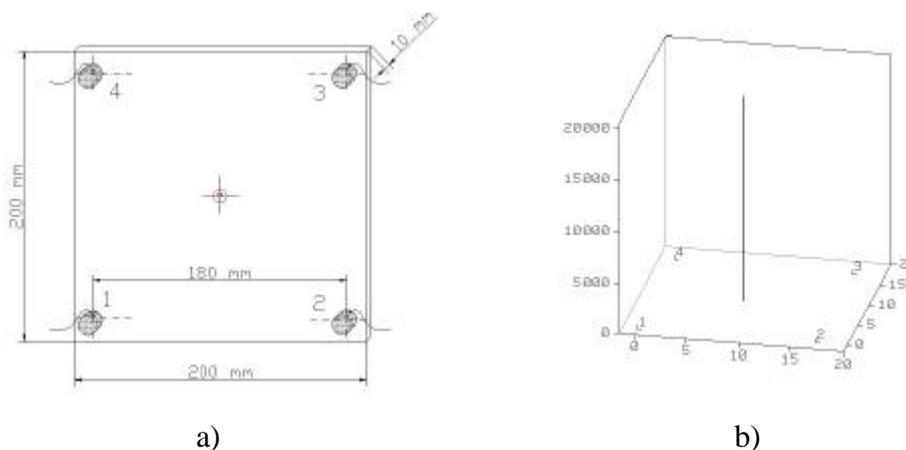


Fig. 4: Prove di calibrazione: a) Schema della piastra in acciaio
b) Diagramma di localizzazione.

La prova di localizzazione è stata effettuata nel punto di intersezione tra le due diagonali. A seguito delle prove effettuate sono stati determinati i seguenti parametri:

- velocità del suono = 4300 m/s;
- amplificazione di 40 dB;
- livello di soglia di 0,258 mV= 48,3 dB;
- tempo morto pari a 0,1 ms;
- tensione di ingresso di 1 μ V.

Analisi dei risultati

Relativamente ai dati termografici, sulla base delle immagini termiche, sono state costruite le curve di incremento di temperatura in funzione del tempo ($\Delta T-t$), essendo tale parametro significativo dei fenomeni di deformazione elastica e plastica che avvengono nel materiale.

Per i segnali di emissione acustica, al fine di ottenere informazioni comparabili con quelle rilevabili dalle immagini termiche sulla sorgente delle emissioni, sulla sua localizzazione e sulla sua intensità, sono stati costruiti i seguenti diagrammi (di cui sono stati riportati nel presente lavoro soltanto quelli più significativi per il confronto delle metodologie):

- integrale del numero di colpi (*hits*) in funzione del tempo;
- ampiezze in funzione della localizzazione;
- colpi in funzione della localizzazione;
- integrale del numero di colpi in funzione della localizzazione;
- integrale dell'energia in funzione del tempo.

Inoltre, per poter effettuare una localizzazione nel tempo e nello spazio sono stati costruiti i diagrammi tridimensionali:

- colpi-tempo-posizione;
- energia-tempo-posizione.

Una prima interessante considerazione nasce dal confronto delle curve $\Delta T-t$, e *hits-t* (integrale del numero di colpi in funzione del tempo) riportate in Fig. 5 per il caso di carico di ampiezza costante ed in Fig. 6 per le prove effettuate con carico a gradini. Si può osservare che l'andamento delle due curve appare assimilabile. Nell'analisi termografica [2, 5] le tre fasi sono caratterizzate da una rapida crescita dell'energia di deformazione, da una stabilizzazione degli incrementi di temperatura (dovuta al raggiungimento dell'equilibrio tra energia di deformazione prodotta e flusso termico) e da un forte incremento finale dovuto all'energia plastica nella fase di rottura.

Anche l'analisi con l'E.A. mostra tre fasi distinte, con una crescita iniziale rapida (formazione e nucleazione della cricca), una stabilizzazione nella fase intermedia (stazionarietà della cricca) ed un elevato rilascio nella fase di rottura (propagazione instabile) [7-9].

Va evidenziato che la frattura, per condizioni di carico costante, è di tipo fragile e questo spiega la presenza di una fase di stabilizzazione anche in E.A. poichè, in tali condizioni di sollecitazione, per i materiali metallici in mancanza di una significativa deformazione plastica, si manifesta l'effetto Kaiser, per il quale l'emissione acustica si arresta (o si attenua in maniera considerevole) finchè il livello di sollecitazione non viene incrementato. Infatti, delle possibili cause di emissione note (plasticizzazione iniziale all'apice della cricca, microfratture nella zona di intensa deformazione plastica ed attrito tra le superfici della cricca in richiusura), soltanto la prima, viste le condizioni di frattura fragile e di carico dall'origine, può provocare la produzione di colpi e soltanto nella fase iniziale dell'applicazione del carico. Nel caso di carico a gradino, invece, manifestandosi tale effetto a tratti, il numero di colpi rilevati cresce al crescere del carico con una risposta a gradino simile a quella termica.

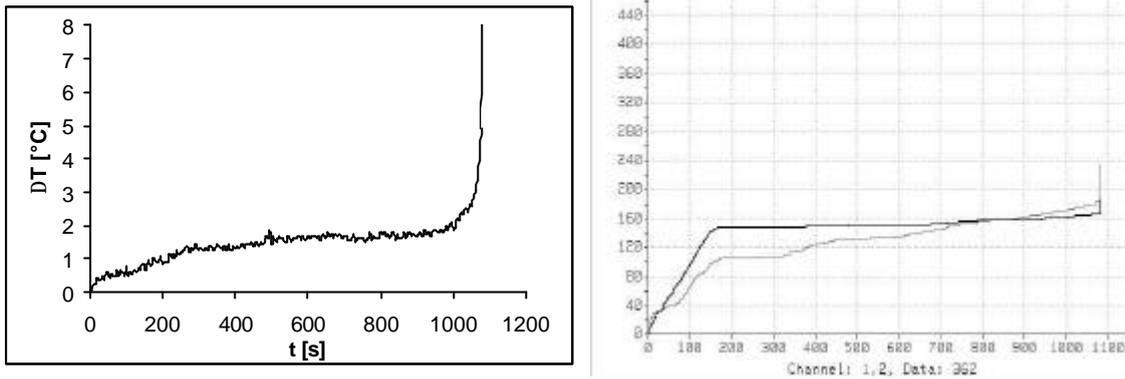


Fig. 5: $DT-t$, Hits- t carico ad ampiezza costante.

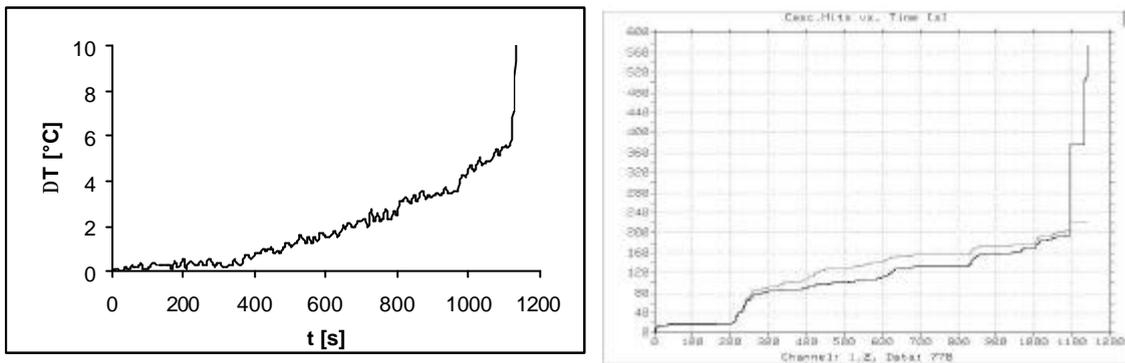


Fig. 6: $DT-t$, Hits- t carico a gradini.

Si può altresì osservare che nella zona di transizione dalla fase elastica a quella plastica si verificano notevoli incrementi dell'energia associata all'attività di emissione acustica ed agli incrementi di temperatura rilevati termograficamente. Tali incrementi risultano evidenti nei diagrammi di Fig. 7 e Fig. 8, in cui sono riportate rispettivamente l'energia e l'energia cumulata in funzione del tempo. L'analisi energetica è certamente più significativa, perchè permette di valutare gli eventi correlati alla deformazione plastica pesandoli in funzione della loro ampiezza. Questa è legata in maniera diretta ai processi di formazione plastica, nucleazione ed accrescimento della cricca.

In questi diagrammi è possibile individuare anche la fase di transizione dalla zona elastica a quella plastica in corrispondenza del tratto di maggiore gradiente.

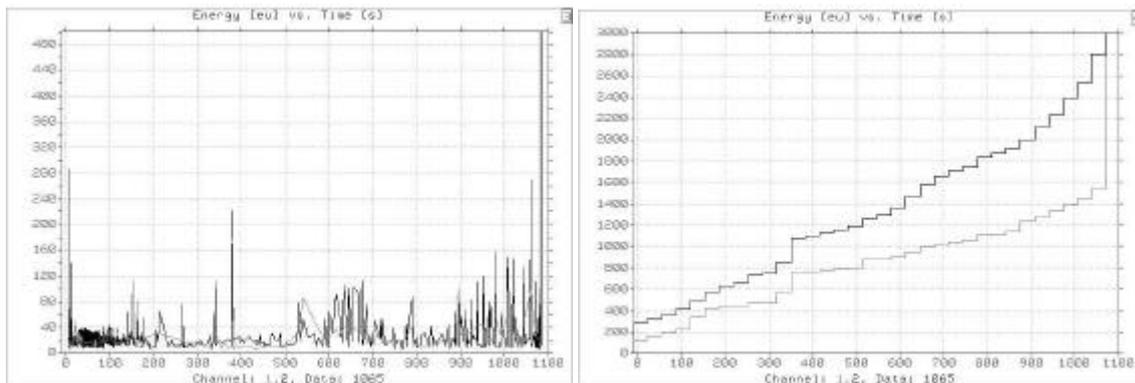


Fig. 7: E-t carico ad ampiezza costante.

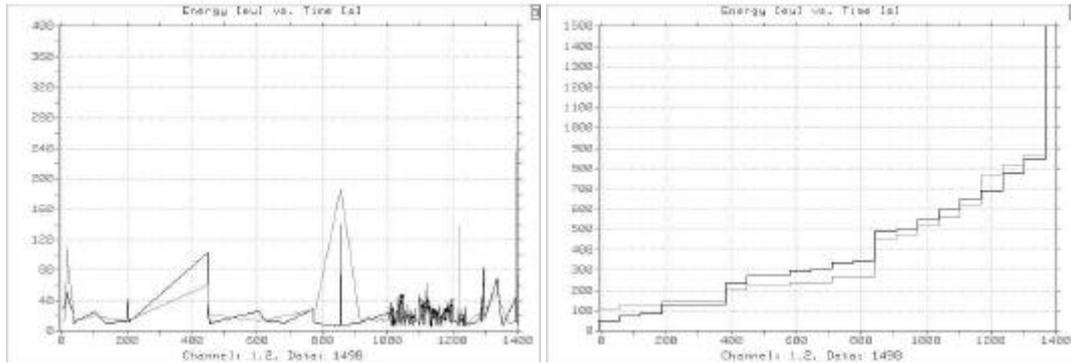


Fig. 8: E-t carico a gradini.

Tale zona di transizione, come ha dimostrato il metodo Risitano, corrisponde al limite di fatica del materiale considerato. Dalla Fig. 9 è possibile anche verificare come l'insorgere dei primi colpi rilevati può essere correlato al superamento del limite di fatica. In figura sono stati rappresentati il numero dei colpi e l'energia corrispondente in funzione del tempo (profondità) e della posizione. Su quest'asse sono indicate anche le posizioni dei due sensori (1 e 2) per la localizzazione.

Per evidenziare la correlazione delle metodologie per , in Fig. 10 (a) è stato riportato il gradiente di temperatura medio del primo tratto della curva $\Delta T-N$ per ogni carico applicato, da questo come è noto è possibile calcolare il limite di fatica [2, 5]. In Fig.10 (b) si riporta lo stesso gradiente in funzione del tempo al fine di poter effettuare un confronto diretto con l'immagine rappresentata in Fig. 9. Appare evidente infatti la corrispondenza esistente tra l'istante in cui si rileva il primo incremento termico significativo (600 s) e il primo valore di energia non trascurabile rilevato con l'emissione acustica.

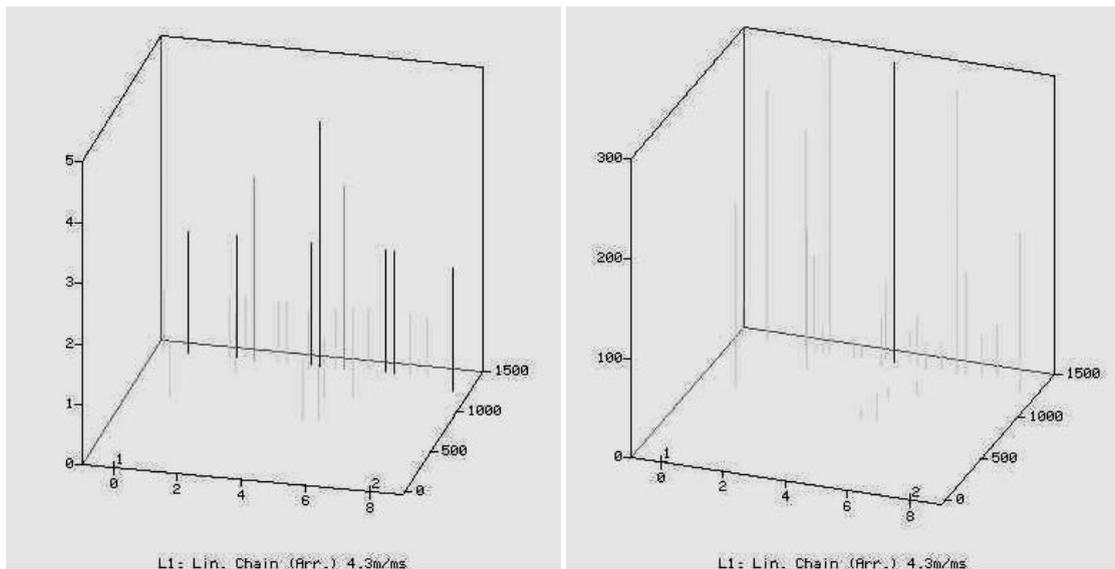


Fig. 9: H-t-x, E-t-x carico a gradini.

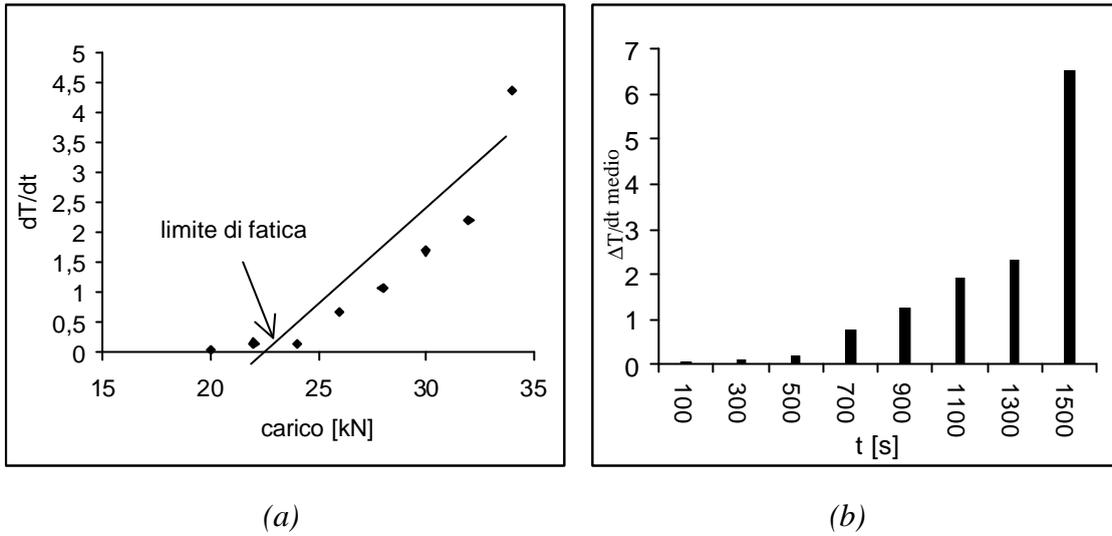


Fig. 10: dT/dt -carico.

Al fine poi di effettuare una localizzazione del danno, si evidenzia una notevole corrispondenza dei valori ottenuti con le due tecniche. In Fig. 11 è mostrata una immagine termografica nella fase di rottura del provino in esame. Mediante il fattore di scala, si è ricavata la distanza del punto di rottura dall'asse del sensore 1. Nell'esempio di Fig. 11 tale distanza è pari a 45 mm corrispondente al valore ottenuto mediante emissione acustica rilevabile in Fig. 12. Tale corrispondenza è stata riscontrata su tutti i provini analizzati. E' inoltre utile sottolineare che osservando i dati di E.A. e termografici è possibile prevedere il punto in cui avverrà la rottura col primo metodo nella zona in cui si concentrano i segnali rilevati, col secondo nell'area in cui si ha il massimo incremento di temperatura.



Fig. 11: Immagine termografica del provino.

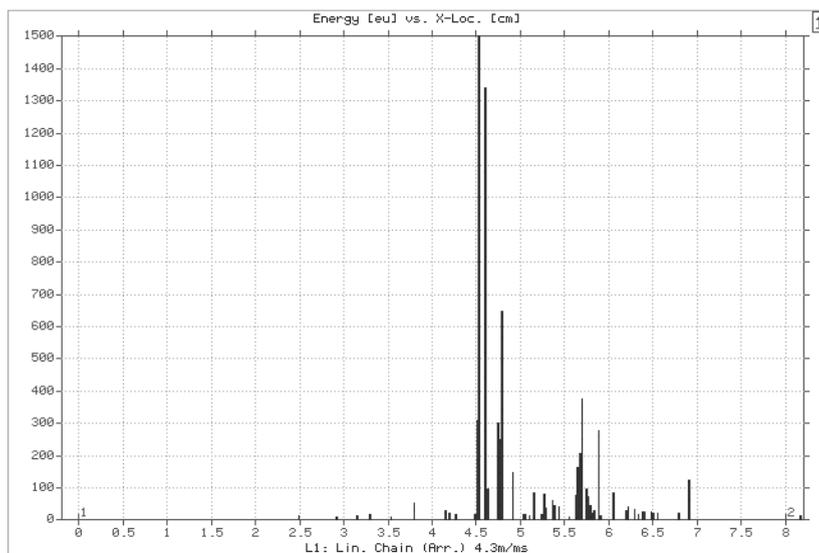


Fig. 12: Localizzazione della cricca attraverso l'energia rilasciata.

Conclusioni

Il confronto tra i risultati ottenuti con i due metodi ha consentito di determinare una stretta correlazione tra l'insorgere di gradienti di temperatura ed il numero di colpi e, in misura maggiore, l'energia rilevata mediante EA. Quanto detto è legato all'insorgere di fenomeni di danneggiamento localizzato che, come è noto, nel range di sollecitazioni superiori al limite di fatica, producono maggiore energia delle deformazioni elastiche.

Analizzando l'entità dei segnali per diverse ampiezze di sollecitazione si nota come, quando variano le condizioni di sollecitazione ed il provino entra nel campo plastico, si verifica un notevole incremento dell'emissione acustica acquisita dal sistema, nonché del gradiente di temperatura. Ciò consente tra l'altro di determinare il limite di fatica del materiale valutando la variazione di pendenza sia della curva $\Delta T-t$, sia della curva $E-t$.

Questo confronto metodologico conferma ulteriormente i risultati ottenuti in termografia con il metodo Risitano, ponendo in evidenza come i parametri di fatica siano determinabile mediante la rilevazione dell'energia plastica localizzata che si evidenzia con la tecnica termografica in termini di gradienti termici e con quella dell'emissione acustica in termini di contenuto energetico degli eventi.

E' stata osservata infine con entrambi i metodi la possibilità di localizzare il punto di rottura già dalle prime fasi del danneggiamento.

Già da questo primo approccio è possibile prevedere interessanti sviluppi alla ricerca, che verrà indirizzata verso la determinazione dell'energia dissipata dal materiale sollecitato a fatica e verso la localizzazione preventiva del punto di rottura.

Bibliografia

1. Caltabiano, T., Geraci A. and Orlando M., *Analisi tramite infrarosso termico in provini sollecitati a fatica*, Il Progettista Industriale, No. 2 (1984).
2. Curti, G., La Rosa G., Orlando M. and Risitano A., *Analisi tramite infrarosso termico della "temperatura limite" in prove di fatica*, XIV Convegno Nazionale AIAS, Catania (1986), pp. 211-220.
3. Geraci, A., La Rosa G. and Risitano A., *Influence of Frequency and Cumulative Damage On the Determination of Fatigue Limit of Materials Using the Thermal Infrared Methodology*, Proceedings of the 15th Polish National Symposium on Experimental Mechanics of Solids, pp. 63-65a, Warsaw, Poland (1992).
4. Geraci A.L., La Rosa G., Risitano A., Grech M., *Determination of the fatigue limit of an austempered ductile iron using thermal infrared imagery*, SPIE International Conference, St. Petersburg (Russia) (1995).
5. La Rosa G., Risitano A., *Thermographic methodology for the rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components*, International Journal of Fatigue 22 (2000), pp. 65-73.
6. Fargione G.A., Geraci A.L., La Rosa G., Risitano A., *Rapid determination of the the fatigue limit by thermografic method*, International Journal of fatigue Vol. 24/1 (2001).
7. AIPnD, *Le prove non distruttive*, Milano (1984).
8. Kanji Ono, *Trends of Recent Acoustic Emission Literature*, Journal of Acoustic Emission Vol.12 (1994).
9. Dornfeld, *Application of acoustic emission techniques in manufacturing*, NDT & International Vol. 25 (1992).
10. Lassari L, Rivolta B., Sinigaglia D., *Deformazione plastica dei materiali metallici*. Ed. C.L.U.P. (1989).
11. Dieter G., *Mechanical metallurgy*, Mc Graw-Hill (1992).
12. Miller R.K., *Nondestructive Testing Handbook, vol 5.Edit. McIntire P*, (1987).
13. Giuliani L., *L'emissione acustica secondo il codice TEA*, ATEL S.r.l. (1994).
14. Nilsen. A., *Acoustic Emission Source Based on Pencil Lead Breaking*, The Danish Welding Institute (1980).
15. Cherfaoul M., *Acoustic Emission development and industrial applications in France*, CETIM, Senlis, France (1994).
16. P. Bartle, *Periodic Inspection of Pressurized Components*, Inst. Mech. Engrn., London, p. 37 (1974).
17. Iannello A., Iaccarino S. – ISPESL Lab. CND – *Contributo per la valutazione della vita residua di componenti funzionanti ad alta temperatura, mediante Emissioni Acustiche e Termografia (effetto termoplastico)*, Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica p.168–182 Torino, 17-19 Ottobre 1995.
18. Raccolte ASTM (1991).
19. J.W. Whittaker, *A Note on the Prediction of Fatigue Life of Metal Structures by Use of Felicity Effect*, Journal of Acoustic Emission Vol. 5 (1986).