

ANALISI SPERIMENTALE E NUMERICA DEL DANNEGGIAMENTO PLASTICO NEI METALLI E RICERCA DEL DANNO CRITICO ATTRAVERSO LA TECNICA DELL'EMISSIONE ACUSTICA

A. Calabrò¹, C. Esposito¹, P. Massarotti jr., P. Perugini¹

¹C.I.R.A. S.p.A. - Centro Italiano Ricerche Aerospaziali
via Maiorise, 81043 Capua - CE

SOMMARIO: Lo scopo del presente lavoro, inquadrato nell'ambito del Continuum Damage Mechanics, è di contribuire a standardizzare, semplificare e migliorare la previsione della rottura e/o della vita residua di un elemento strutturale con simulazioni numeriche accoppiate a nuovi metodi di analisi sperimentale. In particolare questo studio è rivolto alla ricerca del *Danno Critico* D_c nei materiali metallici duttili. L'obiettivo, quindi, è quello di trovare un metodo di misurazione diretto del danno critico e di rendere tale misura semplice e di immediata utilizzazione da parte dei progettisti. La tecnica di Emissione Acustica ha permesso di trovare con estrema precisione la sollecitazione cui corrisponde il valore D_c . La conoscenza di tale parametro, inteso come caratteristica intrinseca del materiale, assume notevole importanza nella determinazione della resistenza dell'elemento strutturale; infatti permette di prevedere con notevole confidenza l'innescò di macrofratture e quindi accoppiato ai classici modelli di Meccanica della Frattura il carico ultimo dell'elemento stesso.

PAROLE CHIAVE: Continuum Damage Mechanics, Danno Critico, Emissione Acustica.

INTRODUZIONE

Nei metalli le cause dei fenomeni di danneggiamento sono da imputarsi (come per le deformazioni irreversibili) ai movimenti, alle accumulazioni e alle localizzazioni delle dislocazioni; carattere fondamentale del danneggiamento è, quindi, la sua irreversibilità (Hult, 1979). Per quantificare il livello di resistenza residua del materiale si definisce la variabile di danneggiamento D :

- lo stadio iniziale corrispondente alla condizione di materiale integro (spesso indicato con $D=0$) è caratterizzato dalla assenza di fessure e cavità microscopiche.

Questa fase non esclude la presenza né di deformazioni plastiche né di incrudimento locale.

- lo stadio finale (indicato con $D = 1$) è caratterizzato dalla rottura dell'elemento di volume, cioè dall'esistenza di una cricca macroscopica avente le dimensioni dell'elemento di volume rappresentativo (0.1 ÷ 1 mm per i metalli).

La Meccanica del Danneggiamento Continuo (Chaboche, 1986) assume che in questa fase sia presente una discontinuità del materiale sufficientemente grande rispetto alle eterogeneità microscopiche (grani, altri difetti, ecc.). La teoria del danneggiamento

descrive dunque l'evoluzione dei fenomeni tra lo stato integro del materiale e l'innesco di una fessura macroscopica.

MISURA DEL DANNEGGIAMENTO

Nel caso di un danneggiamento isotropo (Lemaitre e Chaboche, 1986) le fessure e le cavità sono caratterizzate da una orientazione distribuita uniformemente in tutte le direzioni. Il valore di D_n non dipende dall'orientazione di \vec{n} e lo scalare D caratterizza completamente lo stato di danneggiamento.

Nel presente lavoro si analizza esclusivamente il caso di danneggiamento isotropo per il quale:

$$D_n = D \quad \forall \vec{n} \quad (1)$$

Si introduce il concetto di tensione effettiva per descrivere l'effetto del danno sul comportamento in deformazione del materiale. Un volume di materiale danneggiato isotropicamente ($D \neq 0$) sottoposto ad una tensione applicata σ esplica la stessa risposta in termini di deformazione di un materiale integro ($D=0$) soggetto ad una tensione effettiva $\tilde{\sigma} > \sigma$, così definita:

$$\tilde{\sigma} = \sigma \frac{S}{\tilde{S}} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (2)$$

Nel caso tridimensionale di danneggiamento isotropo, il rapporto S/\tilde{S} non dipende dall'orientazione della normale e l'operatore $(1-D)$ si applica a tutte le componenti.

Quindi la risposta in termini di deformazione monodimensionale o tridimensionale di un materiale danneggiato si traduce con le leggi di comportamento di un materiale integro nel quale si sostituisce la tensione di Cauchy σ con quella effettiva $\tilde{\sigma}$. La tensione effettiva è utilizzata nelle equazioni costitutive per descrivere l'effetto del danno nel comportamento macroscopico del materiale. Poiché si è scelta una definizione fondata sul concetto di tensione effettiva, associata al principio di equivalenza in deformazione, le misure che ne derivano devono essere essenzialmente legate all'accoppiamento tra deformazione e danneggiamento quindi alla modifica delle caratteristiche meccaniche dei materiali interessati dal danneggiamento. La variabile di danneggiamento D può essere misurata con vari metodi (X-grafia, correnti parassite, magnetoscopia, liquidi penetranti etc.); queste tecniche misurano D dalle variazioni delle caratteristiche meccaniche globali (di elasticità o plasticità) e possono quindi essere considerate tecniche indirette. Le tecniche di Emissione Acustica EA, invece, permettono invece un controllo in tempo reale dell'avanzamento del danno durante la sollecitazione del materiale (Hilton, 1995).

Utilizzando la legge di elasticità lineare per un materiale danneggiato si ha:

$$\tilde{S} = \frac{S}{1-D} = E e_e \quad (3)$$

(E : modulo di Young del materiale integro) da cui:

$$\sigma = E (1-D) \epsilon_e = \tilde{E} \epsilon_e \quad (4)$$

$E(1-D) = \tilde{E}$ può essere interpretato come il modulo di elasticità normale del materiale danneggiato. Quindi, noto E , ogni misura della rigidità elastica permette di ottenere il valore del danneggiamento che diventa:

$$D = 1 - \frac{s}{Ee_c} = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (5)$$

PROCEDURA DI PROVA

L'estensimetria e l'emissione acustica sono stati i nostri versatili mezzi di indagine sperimentale. Questi due metodi sono stati utilizzati in "parallelo", cioè nell'ambito della stessa prova per confrontare i risultati della prima tecnica, ben più impiegata e collaudata, con quelli della seconda (Massorotti, 1996). L'emissione acustica è, infatti, tranne alcune eccezioni una tecnica qualitativa, in questo lavoro si è voluto dare un fattivo contributo all'evoluzione e alla messa a punto di questa metodologia nell'ambito della teoria del danno. Inoltre le due tecniche impiegate hanno dato risultati complementari, nel senso che alcune informazioni sul comportamento del materiale sono state date dall'estensimetro altre, invece, dalle emissioni acustiche. Infatti, come si vedrà in seguito, l'analisi delle emissioni acustiche permette di trovare con precisione la sollecitazione e la deformazione cui corrisponde il danno critico D_c .

Nel danneggiamento plastico duttile la valutazione della variabile D viene fatta attraverso misure delle variazioni del modulo di elasticità E (eqn. (5)). Per trovare il danno D in funzione del tempo o della deformazione totale dalla (6) è necessario conoscere il valore attuale \tilde{E} del modulo di elasticità che si ottiene solo in campo elastico ovviamente. Il metodo per trovare \tilde{E} richiede che, durante la deformazione plastica, il provino sia gradualmente scaricato fino a sollecitazione nulla. Si otterrà, in tal modo, nuovamente il comportamento elastico e un tratto rettilineo nella curva (σ, ϵ) .

La \tilde{E} attuale si ottiene come pendenza di questo tratto rettilineo nella fase di scarico.

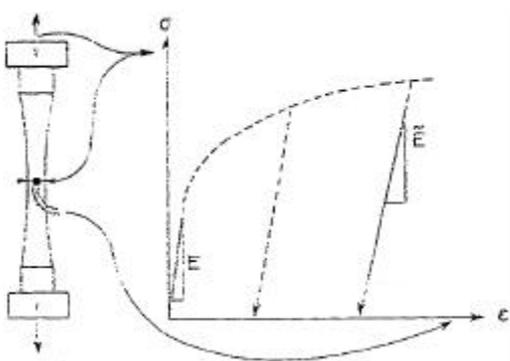


Figura 1: Procedura di prova.

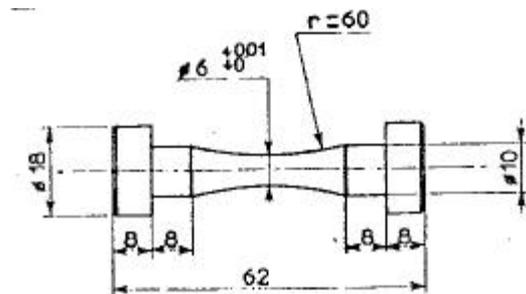


Figura 2: Provini.

Si è visto che la fase di scarico, che in teoria dovrebbe essere anch'essa lineare, presenta in realtà tratti fortemente non lineari e dipende anche dalla velocità di variazione del carico. Tale tipo di comportamento è dovuto alla geometria dei morsetti e dei provini testati che non hanno forma adatta per una misura precisa del modulo di Young. Della

fase di scarico va considerata, per il calcolo del danno, la zona iniziale a pendenza costante (Fig. 1) in cui il rilascio dell'energia immagazzinata durante la deformazione viene rilasciata in modo perfettamente elastico.

Da notare che le zone di maggiore non linearità per la curva (σ, ϵ) sono quelle estreme: dove si annulla il carico e nei pressi del nuovo limite di elasticità, per cui la \tilde{E} attuale deve essere calcolata per $\sigma_{\min} < \sigma < \sigma_{\max}$ ($S_{\min} = 0.65S(e)$; $S_{\max} = 0.85S(e)$).

La misura del danno, apparentemente semplice, è, in realtà, difficile perché:

- ogni misura del modulo di elasticità \tilde{E} richiede una elevata precisione su deformazioni molto piccole, specie all'inizio del processo di danneggiamento;
- il danneggiamento è un fenomeno estremamente localizzato per cui la base di misura della deformazione è molto piccola e deve corrispondere alle dimensioni dell'elemento di volume che nei metalli è dell'ordine di $0.5^3 \div 5^3 \text{ mm}^3$.

I provini impiegati sono a simmetria cilindrica di dimensioni molto limitate (Fig. 2) con sezione centrale indebolita in modo che il danno sia unidimensionale e isotropo senza direzioni privilegiate, inoltre la sezione centrale indebolita assicura che il danno sia ivi localizzato (Sollo, 1996). La misura della deformazione è realizzata mediante l'applicazione, sulla sezione centrale indebolita, di estensimetri di dimensioni molto ridotte $0.38 \times 0.38 \text{ mm}$. Come sonde di emissione acustica sono stati adoperati 2 sensori piezoelettrici risonanti a 150 KHz. Tali sensori sono stati applicati sulla superficie esterna del provino, in corrispondenza dei tratti a sezione crescente, attraverso guide d'onda cilindriche in acciaio. I provini presi in esame sono in Acciaio 38 NiCrMo4, Rame puro al 99.9% e lega di Alluminio 2024 T4. Le prove sono state condotte presso il Laboratorio Prove Meccaniche del C.I.R.A., utilizzando una macchina elettromeccanica per prove statiche con cella di carico da 100 KN di fondo scala, e sono state eseguite in controllo di deformazione con una velocità pari a 10^{-4} s^{-1} ed a temperatura ambiente.

RISULTATI DELLE PROVE SPERIMENTALI

Il modello teorico di danno utilizzato, che prevede un andamento di tipo esponenziale della funzione $D(\epsilon)$, valuta il danno critico in presenza di una variazione del danno molto significativa, basata su criteri di tipo energetico. Nelle prove sperimentali, si ottiene l'andamento della funzione $D(\epsilon)$ attraverso la diminuzione, misurata con l'estensimetro, del modulo di Young del materiale. Tuttavia l'individuazione, mediante tale metodo, del danno critico D_c , è molto complessa e poco precisa. D_c viene valutato con estrema precisione solo con gli eventi di EA. Nelle figure seguenti sono riportati, a titolo di esempio per la sola lega di alluminio, i parametri caratteristici della EA: l'energia e l'ampiezza (in dB) degli eventi registrati in funzione del tempo della prova, la curva di $\epsilon(t)$, la curva $\sigma(\epsilon)$ con i carichi-scarichi, e le curve $D(\epsilon)$ per tutti e tre i materiali esaminati. Analizzando i diagrammi, nelle Figure 3 e 4, dei parametri di EA si individuano una serie di picchi, alcuni anche evidenziati con frecce.

Tali picchi indicano, in sequenza, il passaggio in campo plastico, l'inizio del danneggiamento, il danno critico, lo scollamento dell'estensimetro. Per quanto riguarda il primo picco vanno fatte alcune precisazioni (Massarotti, 1996). La geometria dei provini

e dei morsetti utilizzati non è la migliore per la valutazione del limite di elasticità del materiale.

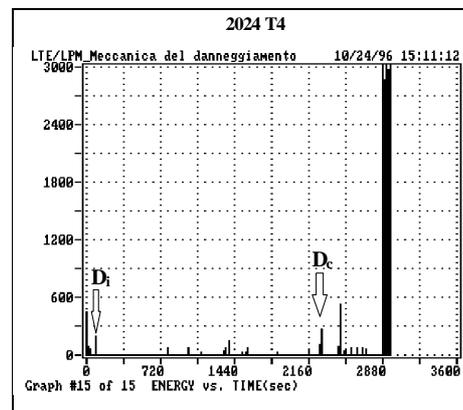
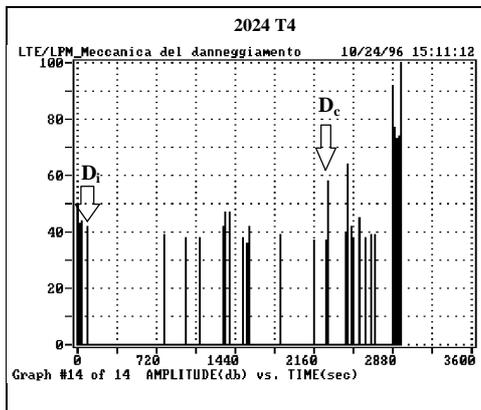


Figura 3: Ampiezze degli eventi di EA. Figura 4: Energia associata agli eventi di EA.

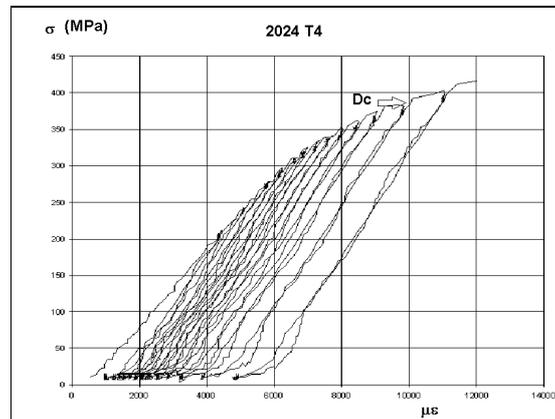
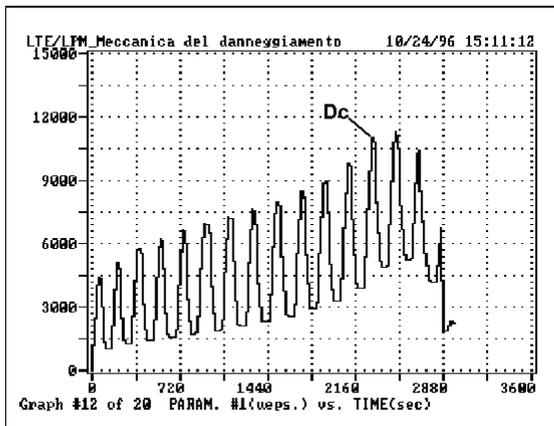


Figura 5: mevs. Time per lega di alluminio 2024T4.

Figura 6: s-me per 2024T4.

Tuttavia i valori di (σ, ϵ) , rilevati in corrispondenza di questo primo picco, sono lievemente minori del limite di elasticità convenzionale del materiale, il che è spiegabile con la maggiore sensibilità della tecnica di EA rispetto a quella estensimetrica, che basa il calcolo del limite di elasticità sulla pendenza della curva (σ, ϵ) . Il secondo picco è correlato all'inizio del processo di danneggiamento plastico.

L'aumento di eventi di EA può anche coincidere, come nel caso della lega 2024 T4, con il primo picco. Dunque l'inizio del danneggiamento plastico in genere può avvenire anche dopo il limite di elasticità e non necessariamente in corrispondenza di questo. Il terzo picco indica il danno critico D_c : questo è il valore più rilevante del danneggiamento. Attraverso il monitoraggio contemporaneo degli eventi di EA, della deformazione totale ϵ e della forza di trazione F (ossia della σ ingegneristica) si ottengono i valori più significativi (σ_c, ϵ_c) nel processo di danneggiamento plastico corrispondenti a D_c . Il parametro di EA più significativo in questo caso è l'ampiezza, riportata in dB.

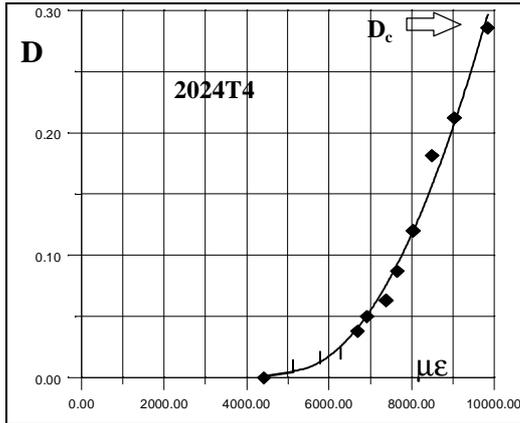


Figura 7: Danno vs. mε per lega di alluminio 2024T4

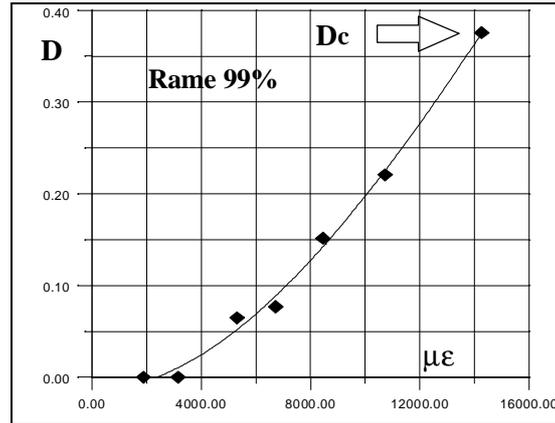


Figura 8: Rame 99%.

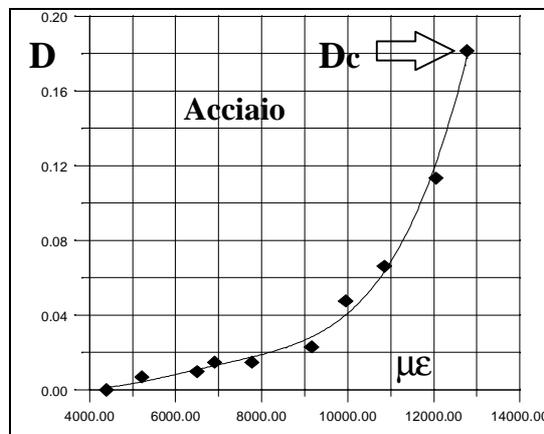


Figura 9: Danno vs. mε per Acciaio NiCrMo4.

Si consideri per il 2024 T4 il grafico delle ampiezze (Fig. 3), si evince subito che le emissioni di tipo continuo caratteristiche del danneggiamento plastico hanno ampiezza di 40 - 45 dB mentre il picco identificato come danno critico ha ampiezza di circa 60 dB; ciò vuol dire che le ampiezze differiscono di un ordine di grandezza. Le emissioni ad alta ampiezza e ad alta energia che avvengono successivamente al danno critico, invece, possono interpretarsi con l'apertura e la propagazione di macrofratture all'interno del materiale. Tali eventi sono molto numerosi e di ampiezza ancora più elevata, di 70-80 dB e dimostrano che il danneggiamento finale dovuto alla frattura del materiale è un processo molto diverso, sia in termini di energia rilasciata in gioco, sia in termini di fenomenologia, da quello del danneggiamento plastico. Analogo discorso può farsi anche per la prova sull'acciaio, che, per le sue caratteristiche di maggiore duttilità e resistenza rispetto al 2024 T4, presenta ampiezze EA molto simili per l'inizio del danneggiamento e il danno critico. Durante le prove sperimentali il problema principale da affrontare è stato lo scollamento dell'estensimetro, che si è verificato, per i provini in 2024 T4 e Acciaio, sensibilmente dopo il danno critico, cosicché abbiamo ottenuto la curva $D(\epsilon)$ completa fino al danno critico, mentre per i provini in Rame, a causa della forte strizione del provino lo scollamento dell'estensimetro è avvenuto poco prima del danno critico. In conclusione i risultati sperimentali si sono dimostrati in buon accordo con la teoria, la tecnica di EA si è rivelata ottima e molto precisa. Le curve $D(\epsilon)$ ottenute dalle prove

sperimentali possono essere facilmente applicate in sede di progetto come ulteriore legame costitutivo per il materiale. I valori (σ_c , ϵ_c) corrispondenti a D_c possono essere utilizzati come limite di sicurezza in campo plastico.

ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI DI UNA PIASTRA RETTANGOLARE CON MACRODIFETTO

Come esempio di applicabilità dei risultati sperimentali ottenuti si analizza di seguito una piastra rettangolare modellizzata con il metodo ad elementi finiti (Fig. 10).

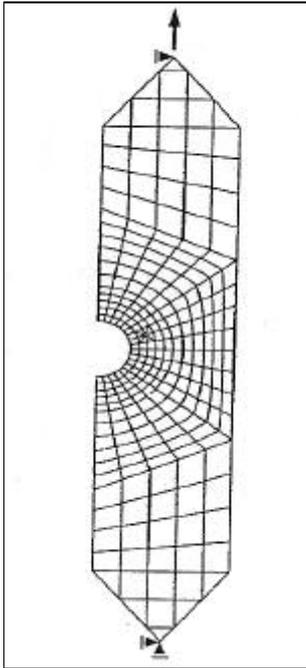


Figura 10

Tale piastra presenta una gola circolare che ne indebolisce la sezione, questa gola agisce, quindi, da concentratore di tensione.

Nei pressi del bordo della gola è presente, come ulteriore concentratore di tensioni, un piccolo foro che simula un macrodifetto.

In questo modo la gola ed il foro individuano una zona che raggiungerà per prima il danneggiamento critico D_c .

La piastra è rettangolare, ma la condizione di vincolo richiede che vi siano due zone terminali di forma triangolare in cui la sollecitazione, inizialmente concentrata, si distribuisce gradualmente nella parte centrale della struttura.

La legge di carico della piastra prevede una sollecitazione crescente nel tempo con legge lineare.

L'analisi della struttura è non lineare e, ovviamente, di tipo plastico poiché il livello di carico massimo provoca la plasticizzazione in alcune zone.

Utilizzando le equazioni esatte fornite dalla teoria del danno plastico duttile, si realizza una mappatura del danno.

Se si sceglie una legge di plasticità accoppiata al danno si ha l'equazione (Doghri, 1995):

$$D(e_p) = \frac{1}{2ES_0} \left\{ (R_\infty + S_Y)^2 e_p - \frac{2R_\infty(R_\infty + S_Y)}{n} [1 - \exp(-ne_p)] + \frac{R_\infty^2}{2n} [1 - \exp(-2ne_p)] \right\} \quad (6)$$

questa equazione deve essere caratterizzata dai coefficienti R_∞ , S_0 , n , E , S_Y tipici di ogni materiale.

Nel caso in esame si scelgono i valori per la lega d'alluminio pari a:

$$E = 72000 \text{ MPa}$$

$$S_Y = 273.5 \text{ MPa}$$

$$S_0 = 500 \text{ MPa}$$

$$n = 1.186$$

$$R_\infty = 10000 \text{ MPa}$$

la (6) è utilizzata nell'analisi ad elementi finiti della lastra calcolando, per ogni step di carico al variare del tempo, le deformazioni plastiche in ogni elemento finito.

In tal modo si ottengono, al variare del carico nel tempo, in ogni elemento, i valori del danno.

Viene di seguito riportato il confronto tra il danno sperimentale e quello fornito dalla (6) in funzione della deformazione plastica (Fig. 11).

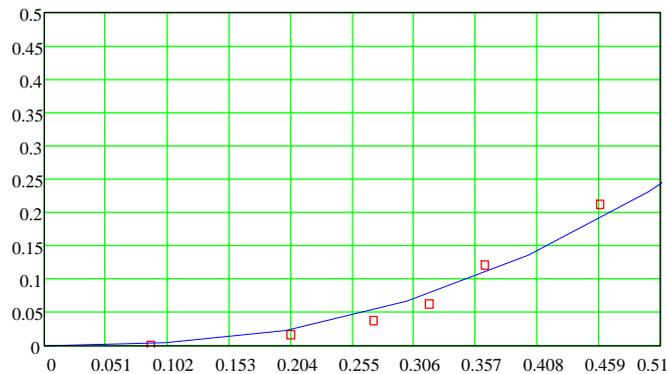


Figura 11: Confronto tra Danno sperimentale e Danno teorico vs. ϵ_p .

Nella Fig. 12 è riportata per diversi step temporali l'evoluzione del danno. Come si vede la zona che si danneggia per prima è ovviamente quella prossima alla gola e al foro.

La zona danneggiata si espande all'aumentare del carico e, quindi, del tempo.

Quando in un elemento si raggiunge il danno critico $D_c=0.29$ comincia a propagarsi la frattura in tutta la lastra e l'elemento va considerato con rigidità nulle.

CONCLUSIONI

I risultati di questa campagna di prove hanno dimostrato che l'emissione acustica è un mezzo efficace per indagare sulle modificazioni del materiale metallico sottoposto a sollecitazione, in particolare tale tecnica ben si presta alla rilevazione del danno critico. L'uso di strain gages incollati si è rivelata una scelta obbligata ma migliorabile a causa della loro deformazione massima sopportabile dovuta alla geometria a doppia curvatura dei provini ed ai particolari materiali esaminati. La geometria dei provini e dei morsetti da noi utilizzati per il danneggiamento plastico pure è suscettibile di miglioramenti atti a rendere più uniforme lo scarico elastico e più precisa la valutazione del modulo di Young. Le prove sperimentali mostrano, comunque, che la previsione sull'inizio della frattura è effettivamente possibile con uno scarto sul danno critico al di sotto del 5%. Tale previsione può essere utilizzata facilmente in fase di progettazione di qualsiasi struttura metallica grazie alle equazioni esatte fornite dalla teoria, che sono in buon accordo con i dati sperimentali. La conoscenza della curva del danno per un determinato materiale permette, quindi, di avere un importante riferimento per la previsione dell'innescò delle cricche.

Il modello di danneggiamento utilizzato nell'analisi FEM è disaccoppiato, ovvero il danno è valutato a posteriori dalle conoscenze delle ϵ_p . Per un'analisi più accurata è necessario considerare modelli di danno accoppiati, con complicazioni notevoli delle procedure di soluzioni non lineari.

Analisi sperimentale e numerica del danneggiamento plastico nei metalli e ricerca del danno critico attraverso la tecnica dell'emissione acustica

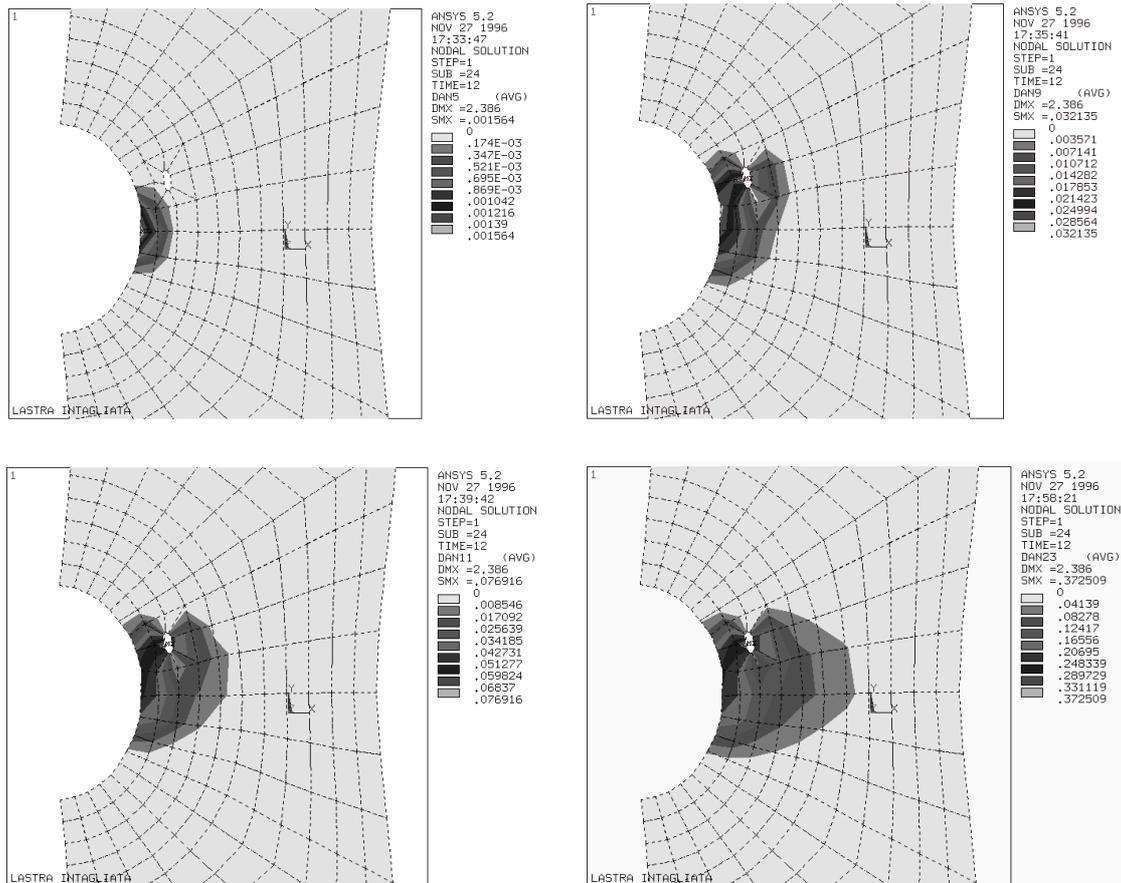


Figura 12: Evoluzione temporale del danno.

BIBLIOGRAFIA

- Chaboche J.-L.,1986, "Time independent constitutive theories for cyclic plasticity", Int. J. Plasticity, 2, pp.149-188
- Doghri I.,1995, "Numerical implementation and analysis of a class of metal plasticity", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.38, pp.3403-3431.
- Hinton Y.L., 1995, "Acoustic Emission" ASTM standardization News.
- Hult J., 1979, "Continuum damage mechanics, capabilities limitation and promises Mechanism of deformation and fracture" Pergamon, Oxford, pp.233-247.
- Lemaitre J., Chaboche J., 1990, "Mechanics of Solid Materials", Cambridge University Press.
- Lemaitre J., Doghri E. I., 1994, "DAMAGE 90 : a post-processor for crack initiation", Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 115/3-4, pp.197-232.
- Massorotti P. jr., 1996, "Metodologia di analisi sperimentale e numerica del danneggiamento plastico nei metalli", Tesi di Laurea c/o C.I.R.A. SpA.
- Rosselier G., Devaux J.C., Mottet G., 1985, "Ductile initiation and crack growth in tensile specimens. Application of Continuum Damage Mechanics", SMIRT 8, Brussels.
- Sollo A., 1996, "Meccanica del danneggiamento continuo: applicazione di modelli numerico-sperimentali nei materiali isotropi", Tesi di Laurea c/o C.I.R.A. SpA.