

APPLICAZIONE DI UN METODO DI DANNO CONTINUO ALL'ACCIAIO 2½Cr1Mo  
SOTTOPOSTO A CREEP CICLICO E FATICA OLIGOCICLICA

V. BICEGO<sup>1</sup>, N. TAYLOR<sup>1</sup>, S. TETTAMANTI<sup>1</sup> e D. D'ANGELO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CISE Tecnologie Innovative, Segrate (Milano)

<sup>2</sup> ENEL-CRTN, Milano

**SOMMARIO.** A partire da dati ottenuti in prove di creep a carico costante e di fatica oligociclica con ciclo continuo su un acciaio 2½Cr1Mo, sono stati determinati i parametri che compaiono nelle leggi di accumulo di danno per creep (Kachanov) e per fatica (Lemaitre-Chaboche-Plumtree) secondo il Metodo del Danno Continuo. Le previsioni applicate al caso di prove di fatica con hold time sono risultate non conservative, ma migliorative rispetto a quanto ottenuto con la Somma Lineare di Danno prevista dall'ASME. Le previsioni di durata di campioni sottoposti a creep ciclico possono essere migliorate includendo nel modello la considerazione del creep primario, in linea con gli sviluppi più recenti in letteratura.

## 1. INTRODUZIONE

Il Metodo di Danno Continuo impiegato per affrontare i problemi della previsione di vita dei componenti in servizio ad alta temperatura sta ricevendo sempre più attenzione nella letteratura tecnica. Il vantaggio derivante dall'uso di tale strumento consiste in primo luogo nella possibilità di fornire un modello con una base fisica per simulare il danno che si accumula nel materiale, contrariamente ai metodi tradizionali che sono per lo più empirici. Ne conseguono una migliore possibilità di riscontro diretto con la valutazione del danno per via microstrutturale, una più fondata estrapolabilità ai lunghi tempi degli impianti e un'estensione naturale a trattare situazioni comunque complesse; inoltre il metodo ben si presta ad essere incorporato in analisi ad elementi finiti e in questo modo offre la possibilità di stimare in maniera più precisa il comportamento di un componente in servizio.

E' ormai diffusamente riconosciuta l'importanza dello sviluppo di metodi di valutazione del degrado dei materiali dei componenti, che in molti casi sono prossimi alla vita di progetto, a causa delle crescenti difficoltà che sorgono per la ubicazione e realizzazione di nuovi. Negli ultimi anni si è inoltre assistito all'avvio di una diversa filosofia di utilizzo degli impianti industriali, quali petrolchimici, siderurgici ecc, per adeguamento alle richieste di mercato. In particolare le centrali termoelettriche sono chiamate ad una maggiore flessibilità di funzionamento, sia per provvedere a richieste variabili da parte dell'utenza sia per aumentare le proprie capacità di adattamento a cicli combinati di produzione di energia che all'utilizzo di combustibili diversi. Risulta chiaro a questo proposito quanto sia importante garantire una buona affidabilità di funzionamento in condizioni di sollecitazioni termiche e meccaniche variabili. L'integrità strutturale deve essere mantenuta in condizioni di massima sicurezza durante la vita operativa dell'impianto. Molti sono gli aspetti da tenere presente nella valutazione del degrado che i materiali interessati subiscono a causa della variazione delle condizioni operative. I comportamenti a creep-fatica ed a creep ciclico rappresentano due degli aspetti più importanti del complesso quadro di sollecitazione termo-meccanico-ambientale in cui alcuni componenti d'impianto si trovano ad operare.

Per considerare questi aspetti ed il contributo che creep e fatica portano in modo sinergico al degrado delle caratteristiche di resistenza del materiale, è stato da poco introdotto il concetto di "metodo unificato", con il quale si possa dare una valutazione del danno provocato contemporaneamente dal creep e dalla fatica.

Viene descritta un'indagine eseguita al CISE relativa all'applicazione del metodo per previsioni di danneggiamento dell'acciaio 2½Cr1Mo, per il quale esistono già i dati sperimentali e familiarità con i fenomeni di evoluzione microstrutturale.

## 2. MODELLO DI DANNO CONTINUO

### Creep

La Meccanica di Danno Continuo (Continuum Damage Mechanics, CDM) è stata sviluppata negli anni '50 da Kachanov [1] per descrivere l'evoluzione del danno da creep nei materiali. Il parametro di danno, "D" assume valori tra 0 (nessun danno) ed 1 (rottura).

Attualmente esistono modelli CDM molto sofisticati che si prefiggono lo scopo di descrivere con maggiore accuratezza i meccanismi del danno al livello della microstruttura [2] e stanno trovando largo impiego nella trattazione dei problemi di creep.

La descrizione analitica del danno provocato dall'azione combinata creep - fatica non dispone ancora di metodi di previsione avanzati come quelli per la trattazione del danno da creep e quindi l'approccio largamente utilizzato per trattare l'accumulo di danno è ancora quello fornito dalla formulazione classica di Kachanov-Rabotnov [1,3]:

$$\frac{dD}{dt} = \left[ \frac{|\sigma|}{C \cdot (1-D)} \right]^r \cdot (1-D)^{-q} \quad (1)$$

dove i coefficienti C, r, q, sono specifici del materiale ad una certa temperatura.

L'effetto del danno sulla velocità di deformazione è dato da:

$$\epsilon_{creep} = A \cdot \left( \frac{\sigma}{\sigma_0 \cdot (1-D)} \right)^n \quad (2)$$

I valori dei parametri possono essere individuati da una serie di curve di creep, preferibilmente a stress costante.

### Fatica

Per la fatica la formulazione più usata è quella dovuta originariamente a Lemaitre e Chaboche [4] ed estesa da Lemaitre e Plumtree [5] per considerare l'andamento del danno nella condizione di controllo in deformazione, (la situazione più tipica nei casi reali e nelle prove LCF di laboratorio):

$$\frac{dD}{dN} = \frac{(1-D)^{-p}}{(p+1) \cdot N_i (\Delta \epsilon_{pl})} \quad (3)$$

In una successiva riformulazione si è riconosciuto utile attribuire a "p" una certa dipendenza da  $N/N_i$  e da  $\Delta \epsilon_{pl}$ , secondo l'espressione [6]:

$$p = \exp\left(x_3 \cdot \frac{N}{N_i} + x_1 \cdot \ln(\Delta \epsilon_{pl}) + x_2\right) \quad (4)$$

I parametri  $x_{1,2,3}$  sono individuati mediante prove a ciclo continuo veloce (per escludere effetti di creep) con diversa ampiezza di deformazione. L'integrazione di (6) produce:

$$D = 1 - \left(1 - \frac{N}{N_i}\right)^{1/[\exp(x_3 \cdot \frac{N}{N_i} + x_1 \ln(\Delta \epsilon_{pl}) + x_2) + 1]} \quad (5)$$

Scegliendo di identificare come danno "D" la frazione di area resistente che viene a mancare a causa del formarsi di cavità nel materiale o di cricche superficiali, risulta:

$$D = 1 - \Delta \sigma / \Delta \sigma_0 \quad (6a)$$

o alternativamente:

$$D = 1 - E/E_0 \quad (6b)$$

dove  $\Delta \sigma_0$  e  $E_0$  sono rispettivamente il valore della sollecitazione ciclica e del modulo elastico a  $D=0$ . Con valori per D così definiti, si può operare una stima ai minimi quadrati per ottenere i parametri  $x_{1,2,3}$  nell'eq.(5).

## Il Modello Unificato

L'impiego combinato delle relazioni per il danno da creep (1) e il danno da fatica (5) costituisce un modello unificato:

$$dD = dD_f + dD_c = \left( \frac{dD}{dN} \right)_f \cdot dN + \left( \frac{dD}{dt} \right)_c \cdot dt \quad (7)$$

Con evidente significato, la relazione precedente esprime il danno subito dal materiale come risultato dell'azione di danneggiamento provocata dalle sollecitazioni di creep e di fatica agenti su di esso. In questo modo, si dispone di uno strumento analitico che consente di valutare l'interazione tra il creep e la fatica ed è applicabile in diverse situazioni: fatica con Hold Time, creep e fatica in successione, creep ciclico ecc.

### 3. DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DEI MODELLI DI DANNO PER 2½Cr1Mo

#### 3.1 La Relazione di Danno da Creep

I parametri contenuti nella relazione (1), che esprime il danneggiamento del materiale per effetto del creep, sono stati ricavati utilizzando i dati relativi a 6 prove di creep svolte a 550°C a carico costante su campioni di 2½Cr1Mo [7]. I provini sono stati ottenuti da uno spezzone di tubo fornito da ENEL/CRTN.

I dettagli delle prove sono riassunti nella Tabella 1. Le curve di creep deformazione-tempo corrispondenti a livelli di sforzo 120, 150 e 171 MPa sono presentate in Fig.1 (si noti che l'equazione (1) presume che le prove siano state svolte a stress costante; al contrario, le curve disponibili sono state ricavate da prove a carico costante. Per l'analisi attuale questa differenza è stata ignorata).

L'integrazione dell'equazione (1) a stress costante produce:

$$(1-D) = [1 - t/t_f]^{1/(r+q+1)} \quad (8)$$

dove :

$$t_f = \frac{1}{r+q+1} \cdot \left[ \frac{\sigma}{C} \right]^{-r} \quad (9)$$

I termini "  $C^{r/(r+q+1)}$  " ed "  $r$  " che compaiono nella (9) possono essere determinati semplicemente tramite un'analisi ai minimi quadrati  $\log(\sigma)$  vs.  $\log(t_f)$ .

Per valutare i coefficienti "C" e "q" è necessario calcolare il parametro di danno "D" in funzione del tempo per ciascuna delle prove prese in esame. Questo è stimato tramite l'equazione (10):

$$D = \left[ 1 - \frac{\dot{\epsilon}_{\min}}{\dot{\epsilon}(t)} \right]^{1/n} \quad (10)$$

ottenuta risolvendo rispetto al parametro "D" l'equazione (2) nell'ipotesi che il danneggiamento del materiale abbia inizio già dalle prime fasi della prova, assumendo cioè  $D=0$  per  $t=0$  e ritenendo valida la legge di Norton ( $\epsilon_{\min} = A \cdot \sigma^n$ ) durante il secondario. I coefficienti A e n della legge di Norton sono calcolati mediante regressione lineare  $\log(\epsilon_{\min})$  vs.  $\log(\sigma)$  dai dati in Tabella 1:

$$\dot{\epsilon}_{\min} = 1.83 \times 10^{-28} \cdot \sigma^{9.38}$$

A questo punto il termine  $1/(r+q+1)$  che compare nella (8) può essere stabilito tramite una regressione lineare dei dati  $\log(1-D)$  vs.  $\log(1-t/t_f)$ .

Dalla combinazione dei risultati precedentemente ottenuti sono individuati valori per "q" e "C". Esplicitamente si è ottenuto:

$$\frac{dD}{dt} = \left[ \frac{|\sigma|}{515.2 \cdot (1-D)} \right]^{7.78} \cdot (1-D)^{-8.91} \quad (11)$$

Si ritiene opportuno evidenziare che il parametro di danno qui ottenuto è stato calcolato considerando solo la fase terziaria della generica prova di creep, trascurando quindi la fase di creep primario che in ogni caso risulta essere relativamente piccola nelle prove prese in considerazione.

Nella Fig. 1 sono confrontate alcune delle curve di creep sperimentali utilizzate per la determinazione dei parametri che compaiono nel modello di danno, con quelle ottenute dal modello stesso.

La corrispondenza è buona, particolarmente se si considera che solo 5 parametri (A, n, C, r, q) sono stati impiegati dal modello per la descrizione delle curve di creep. Essa risulta soddisfacente anche nella zona iniziale delle curve a conferma della scarsa importanza della fase primaria nelle prove considerate.

Il fatto che il modello descriva con sufficiente accuratezza le curve sperimentali fa ritenere che un unico meccanismo di danno sia presente per tutti i livelli di carico considerati.

### 3.2 Fatica

La legge riportata nell'eq. (3) esprime la velocità di accumulo di danno nel caso della fatica oligociclica (LCF).

Per poterla applicare occorre dunque conoscere la relazione deformazione-vita ( $N_i(\Delta\epsilon_{p_i})$ ) ed il valore dell'esponente "p" definito nell'eq. (4). Nell'intento di determinare la legge ( $N_i(\Delta\epsilon_{p_i})$ ) ed il parametro "p", sono stati considerati i dati di una serie di prove LCF condotte sullo stesso materiale (2 1/4Cr1Mo) impiegato precedentemente per le prove di creep.[8]. Si sono

utilizzate complessivamente 10 prove svolte con ciclo continuo ad una temperatura di 540 °C ed una velocità di deformazione di  $3 \times 10^{-4}$  1/sec. I risultati sono riassunti nella tabella 1. Il ciclo di fine vita,  $N_i$ , è in corrispondenza ad una caduta del carico tensile al di sotto del 75% del valore a metà vita, mentre i valori delle deformazione plastica corrispondono ad un ciclo a metà vita.

Il primo passo è stato quello di ricavare i valori di danno "D" da ognuna delle prove considerate. Il parametro più promettente per quantificarlo è in teoria il modulo elastico, "E". In mancanza di dati sufficientemente precisi, si è dovuto ricorrere a misure di carico ciclico per tarare il modello. Va rilevato che i dati di carico comprendono contributi di plasticità, che a rigore non dovrebbero rientrare nel discorso CDM. Si fa notare che le prove sono state eseguite in controllo di deformazione assiale a partire da misure diametrali. Se il danno (la crescita di cricche superficiali o di vuoti) ha, come probabile, direzione di sviluppo normale all'asse della sollecitazione, un estensimetro diametrale tende a sottostimare il fenomeno. Può dunque darsi che la legge di accumulo di danno qui ottenuta sia troppo rallentata. Inoltre si è notato che il materiale 2 1/4Cr1Mo considerato ha subito addolcimento per fatica, fenomeno questo dovuto alla rimobilizzazione delle dislocazioni a causa dell'alternarsi dei cicli di carico, rilevante almeno nella prima parte della vita; ciò crea qualche problema per l'analisi perché in concorrenza con l'altro fenomeno responsabile della diminuzione del carico ciclico, cioè l'accumulo del danno "D" dovuto alle cricche ed alla formazione di vuoti. Il problema è stato risolto scartando, con opportuno criterio, i punti iniziali di ogni prova dalle elaborazioni. I diagrammi  $\Delta\sigma$  vs  $1-N/N_i$ , uno per ogni prova, sono mostrati in Fig. 2. Un'analisi ai minimi quadrati di tutti i dati perviene alla determinazione dei parametri  $x_{1-3}$  contenuti nell'eq.(5):

$$D = 1 - \left(1 - \frac{N}{N_i}\right)^{1 / [\exp(1.134 \cdot \frac{N}{N_i} + 0.004 \cdot \ln(\Delta\epsilon_{pl}) + 2.254) + 1]} \quad (12)$$

Le curve analitiche di  $1-N/N_i$  vs.  $(1-D)$  secondo l'eq.(13) sono incluse nella Fig. 2. Si osserva, anche se forse poco accentuata, la presenza di concavità verso il basso di tutte le curve; ciò è testimoniato nel modello dalla dipendenza di "p" da  $N/N_i$ . Tutte le varie curve di danno sono pressoché parallele a causa della scarsa dipendenza delle curve stesse dalla deformazione, cioè  $x_1 \approx 0$ . La relazione  $N(\Delta\epsilon_{pl})$  è stabilita semplicemente dai dati in Tabella 2 e prende la forma convenzionale:

$$N_i = \left(\frac{\Delta\epsilon_{pl}}{73.1}\right)^{-1.639} \quad (13)$$

#### 4. PREVISIONI DEI MODELLI

##### 4.1 Applicazione del Modello Unificato di Danno alle Prove di Creep-Fatica con "Hold Time"

Prove del tipo creep-fatica con hold time a deformazione costante forniscono un esempio di una situazione in cui il danno da creep e quello da fatica possono agire congiuntamente, e quindi dare l'opportunità di controllare le previsioni del modello CDM unificato. Sono stati esaminati i risultati di 11 prove di creep-fatica con hold time eseguite sullo stesso materiale impiegato per le prove con cicli continui. I dati principali sono elencati in Tabella 3.

L'impiego del modello unificato è basato su una integrazione numerica dei contributi di danno durante ogni ciclo, per cui l'incremento del danno  $\Delta D$  è definito da:

$$\Delta D = \Delta D_f + \Delta D_c = \left( \frac{dD}{dN} \right)_f dN + \left( \int_0^{t_H} \left( \frac{dD}{dt} \right)_c dt \right) dN \quad (14)$$

$\Delta D_{fatica}$  è determinato da:

$$\Delta D_{fatica} = \frac{(1 - D_{i-1})^{-p}}{(p+1) \cdot N_i (\Delta \epsilon_{pl})} \quad (15)$$

dove  $D_{i-1}$  è il danno totale del ciclo  $i-1$ , e  $N_i$  è determinato mediante l'equazione (13). Si nota che  $\Delta \epsilon_{pl} = \Delta \epsilon_{tot} - (\sigma_o - \sigma_r)/E$ , cioè viene esclusa la deformazione da creep che avviene durante l'hold time (è stato assunto  $E = 160$  GPa). Per quanto riguarda il creep si presume che il danno si produca solo durante l'hold time; esso è calcolato sulla base di una integrazione della equazione (11). Per descrivere il rilassamento del carico durante l'hold time è stata scelta la relazione [9]:

$$\sigma_r = \sigma_o \cdot (1+t)^{a + b \cdot \log(\sigma_o)} \quad (16)$$

Utilizzando i dati delle prove nella Tabella 3, sono stati determinati  $a = 0.1016$  e  $b = -0.03453$ ; dunque dall'integrazione dell'equazione (11) risulta:

$$\Delta D_c = D_i - D_{i-1} \quad (17)$$

$$D_i = 1 - \left[ (1 - D_{i-1})^{r+q+1} - \left( \frac{\sigma_o}{C'} \right)^r \cdot \frac{r+q+1}{m \cdot r+1} \cdot (1+t_{hold})^{m \cdot r+1} \right]^{1/(r+q+1)}$$

dove  $t_{hold}$  è la durata dell'hold time,  $m = a + b \cdot \log(\sigma_o)$  e  $C'$  corrisponde al valore del parametro  $C$  trasformato sulla base della relazione di Larson-Miller per compensare la differenza in

temperatura tra le prove di creep-fatica, eseguite a 540°C, e quelle di creep, eseguite a 550°C.

A scopo di confronto con quanto effettuato nella prassi ingegneristica più diffusa (ASME C.C. N47) sono anche ricavate previsioni di vita col metodo della Somma Lineare di Danno (Linear Damage Summation, LDS). In Tabella 3 e Fig. 3 si confrontano i valori di vita sperimentale con le previsioni ottenute dai modelli CDM e LDS. Tutte le previsioni del modello CDM ricadono entro un fattore due sulla vita e sono più precise di quelle calcolate secondo LDS. Da una prima osservazione si nota che le previsioni ottenute con modello CDM, pur essendo più precise di quelle fornite da LDS, forniscono nel caso delle prove più lunghe stime di vita maggiori della reale durata delle prove (sono quindi non conservative). Sono possibili due diverse spiegazioni. In primo luogo, è attendibile che il danno da creep sia sottovalutato nell'hold time perchè, in queste condizioni di prova, il materiale si trova in una condizione addolcita per fatica e la sua resistenza a creep è ben nota essere inferiore a quanto deducibile da prove di creep monotono sul materiale vergine. Infatti nel caso presente a parità di sforzo sul provino, la velocità di deformazione durante l'hold time è maggiore di quella riscontrata nelle prove di creep utilizzate nel calcolo dei coefficienti del modello di danno. L'effetto provocato da una maggiore velocità di deformazione potrebbe essere considerato tramite l'introduzione di variabili di sforzo interno (cioè di creep primario) nel modello di danno da creep.

In secondo luogo, il danno durante l'hold time potrebbe essere aggravato da un meccanismo addizionale, per esempio l'ossidazione delle cricche superficiali, ed in questo caso si dovrebbe considerare l'opportunità di cambiare la formulazione del modello. Questa possibilità andrebbe dapprima verificata mediante un'indagine metallografica.

#### 4.2 Simulazione del Comportamento a Creep Ciclico

Le prove di creep ciclico qui considerate prese a riferimento costituiscono parte integrante di un programma sperimentale che è attualmente in fase di svolgimento e che riguarda due differenti tipologie di prova in relazione alla modalità di applicazione del carico:

- carico applicato con forma d'onda quadra (Tab. 4)
- carico applicato con forma d'onda triangolare (Tab.5).

Il modello di danno da creep (equazione 1 e 2) è stato impiegato per prevedere la vita a rottura delle prove elencate nelle Tabelle 4 e 5. In questo caso non è stato considerato l'effetto di danno per fatica, che dovrebbe essere modestissimo.

Esaminando la Fig. 4 che descrive il l'andamento di una prova di creep ciclico ad onda quadra, si nota come la curva sperimentale presenti una accelerazione della deformazione rispetto alla prova a carico costante con il medesimo valore di sollecitazione massima. Per quanto riguarda questo tipo di ciclo, onda quadra con carico minimo uguale a zero, il modello CDM come riportato nella equazione (1) non descrive questo andamento, comportandosi come se la prova



fosse a carico costante e considerando i periodi di hold time a carico nullo come tempo in cui il danneggiamento del materiale non avviene. E' trascurato quindi il fenomeno di "addolcimento" che avviene nel materiale a causa dell'aumentata possibilità di movimento delle dislocazioni conseguenti a fasi di scarico e ricarico dello sforzo.

Per quanto riguarda la simulazione delle prove con applicazione del carico a rampa triangolare, è necessario integrare le equazioni (1) e (2) seguendo la storia di carico. Le previsioni sono riportate nella Tabella 5. La Fig. 5 mostra un esempio di curva di creep sperimentale a confronto con la curva generata dal modello. Anche in questo caso il modello prevede vita più lunga di quella sperimentale. In realtà pare che il materiale subisca un fenomeno di addolcimento causato dal susseguirsi delle fasi di aumento e diminuzione del carico con conseguenti accelerazioni del processo di deformazione.

Il modello impiegato non tiene in considerazione quanto avviene nel materiale durante la fase di creep primario, ma i risultati descritti sopra implicano la necessità di considerare anche questa fase nel modello di danno, cioè la variazione di sforzo interno collegato alla fase di aumento e diminuzione di carico. Con questo intento è stato individuato (usando anche le prove di creep riportate nella Tabella 2) un modello di creep più avanzato che include questo effetto [8]:

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon}_o \cdot \left[ \frac{1 - \frac{s_i}{s_o}}{1 - \frac{s_i^*}{s_o}} \right] \cdot \left[ \frac{1}{1-D} \right]^n \quad (18a)$$

$$\dot{s}_i = \dot{\epsilon}_c \cdot H \cdot \left[ \frac{s_i^* - s_i}{s_i^* \cdot \left(1 - \frac{s_i}{s_o}\right)} \right] \quad (18b)$$

$$\dot{D} = \dot{\epsilon}_c \cdot C \quad (18c)$$

dove  $s_i$  è lo sforzo interno,  $s_s = (\sigma_0/32.59)2.915$  è il suo valore stabilizzato,  $n = 9.38$ ,  $H = 34642.0 - 175.5 \cdot \sigma$ , e  $C = 2.44 - 0.01184 \cdot \sigma$ .

Dalla Tabella 5 si nota che il campo dei valori di carico impiegato dalle prove a rampa triangolare si estende al di fuori dei valori impiegati per la definizione del modello. Visto che  $\dot{\epsilon}_o$  corrisponde praticamente alla velocità di deformazione minima, esso risulta essere il parametro più importante per quanto riguarda l'estrapolazione del modello ai carichi bassi. Si è scelta la seguente relazione esponenziale,  $\dot{\epsilon}_o = \exp(0.06679 \cdot \sigma - 27.06)$ , per esprimere la dipendenza della velocità di deformazione dal carico al posto della legge di Norton (Fig. 6).

Le previsioni di vita delle prove a gradino (incluse nella Tabella 4) risultano essere significativamente più vicine ai valori sperimentali di quelle ottenute dal modello precedente. Questo miglioramento non si è ottenuto nel caso delle prove a rampa triangolare per le quali rimane ancora un notevole divario tra durate previste dai modelli e valori sperimentali.

## 5. CONCLUSIONI

E' stata svolta un'indagine sulla capacità predittiva di un metodo di danno continuo, applicato all'acciaio 2 1/4 Cr1Mo. Le leggi di evoluzione del danno da fatica oligociclica e del danno da creep sono state determinate rispettivamente dai dati di prove a ciclo continuo e da curve di creep a carico costante.

Al fine di valutare la adeguatezza del modello unificato, cioè di quello in cui i due tipi di danno agiscono congiuntamente, è stata analizzata una serie di prove LCF con Hold Time. Le previsioni sono state confrontate sia con analoghe previsioni ottenute mediante Linear Damage Summation (LDS), che con i dati di vita sperimentali. Le stime fornite dal modello CDM, pur essendo più precise di quelle fornite dal modello LDS, sono non conservative nel caso delle prove più lunghe.

Il modello di danno per creep è stato utilizzato per prevedere il comportamento del materiale sottoposto a creep ciclico, sia con onda rettangolare che con onda triangolare. Le previsioni di vita sono ancora non conservative, ma in questo caso sono disponibili in letteratura formulazioni più avanzate del metodo CDM in grado di permettere stime più attendibili dell'evoluzione del danno, in particolare includendo nel modello il contributo del creep primario.

## Ringraziamenti

Gli autori desiderano esprimere viva gratitudine ai Sigg. A. Foggi, G. Gritti e M. Sciamanna per la collaborazione nello svolgimento delle attività sperimentali. L'attività descritta è stata svolta nell'ambito di commesse dell'ENEL/CRTN di Milano, che si ringrazia per aver acconsentito alla pubblicazione dei dati presentati.

## Bibliografia

- [1] Kachanov, L.M. "Time to rupture under creep conditions", Izv.Akad.Nauk. USSR, Otd.Tekd, Nauk.8, 1958.
- [2] Ashby, M.F. e Dyson, B.F., Creep Damage Mechanics and Micromechanisms, Advances in Fracture Mechanics, Vol. 1, ed. Valluri, Pergamon, 1984, pp 3-30
- [3] Rabotnov, Y.N. Creep Problems in Structural Members, North Holland Publishing, Amsterdam, 1969.
- [4] Lemaitre, J and Chaboche, J.L., A Non-Linear Model of Creep-Fatigue Damage Cumulation and Interaction, in Mechanics of Viscoplastic Media and Bodies, Ed. Hult, Springer, 1975.
- [5] Lemaitre, J., Plumtree, A., Application of Damage Concepts to Predict Creep-Fatigue Failures, J. Eng. Mats. Tech., 101, 1979

- [6] Plumtree, A. and Shen, G. Cyclic Deformation and Life Prediction Using Damage Mechanics, in Constitutive Laws of Plastic Deformation and Fracture, Eds. Krausz et al, 1990, Kluwer, pp 77-85
- [7] Tettamanti, S. e Foggi, A. Metodiche Sperimentali Relative a Creep in Ambiente ed Attività di Creep Ciclico, CISE Rapporto 6684 (1992)
- [8] Bicego, V, Gritti, G., Sciamanna, M. Fatica ad Alta Temperatura di Acciai Basso Legati di Impianti per Generazione di Potenza, CISE Rapporto 6663 (1991)
- [9] Bicego, V, Gritti, G., Schiamanna, Comportamento in Regime di Fatica Oligociclica ad Alta Temperatura dell'Acciaio 1CrMoV di un Rotore di Turbina a Vapore, CISE Rapporto 6087 (1991)
- [10] Ion, J., Barbosa, A., Ashby, M.F., McLean, M. The Modelling of Creep for Engineering Design, NPL Report DMA A115, 1986

Prova	$\sigma_0$ MPa	$t_f$ ore	$\epsilon_f$ %	$\epsilon_{\min}$ 1/sec
C2	171	315	49.9	$1.5 \times 10^{-7}$
C3	171	297	37.6	$1.5 \times 10^{-7}$
C4	150	1125	37.4	$3.5 \times 10^{-8}$
C5	150	841	48.9	$4.3 \times 10^{-8}$
C7	140	1055	39.5	$3.1 \times 10^{-8}$
C8	120	5554	24.3	$4.2 \times 10^{-9}$

Tabella 1: Risultati delle prove creep costante load su 2½Cr1Mo a 550°C.

$\Delta\epsilon_{\text{tot}}$ %	$N_i$	$\Delta\epsilon_{\text{pl}}$ %	$\Delta\sigma$ MPa
3.981	184	3.638	609
2.972	266	2.629	580
2.491	370	2.13	569
1.982	493	1.659	544
1.394	940	1.082	497
1.004	1538	0.711	480
0.806	2612	0.510	448
0.603	4950	0.321	449
0.505	11531	0.242	419
0.425	34200	0.173	385

Tabella 2: Prove fatica a ciclo continuo per 2½Cr1Mo a 540°C,  $3 \times 10^{-4}$  1/sec

$\Delta\epsilon_{tot}$ %	$N_1$	HT ore	$\Delta\epsilon_{pl}$ %	$\sigma_0$ MPa	$\sigma_r$ MPa	$N_{CDM}/N_1$	$N_{LDS}/N_1$
2.048	377	1	1.797	235	112	0.942	1.173
3.996	125	1	3.745	283	126	0.920	1.043
0.503	2995	1	0.324	179	103	1.760	2.130
0.790	1180	1	0.619	191	106	1.623	2.063
0.596	2370	1	0.404	176	96	1.622	2.238
1.415	671	1	1.190	220	104	0.994	1.320
0.992	945	1*	0.793	-214	-112	1.333	1.678
0.832	1215	1*	0.614	-204	-112	1.556	1.882
2.012	439	1*	1.799	-248	-128	0.797	0.928
1.965	367	8	1.747	226	87	0.981	1.257
0.799	1020	8	0.637	165	52	1.799	2.602

Tabella 3: Confronto delle previsioni dei modelli CDM e LDS con i risultati delle prove creep-fatiga con hold time ( $2\frac{1}{4}$ Cr1Mo, 540°C, \* indica hold time in compressione)

Sigla	$\sigma_{min}$ / HT MPa / min.	$\sigma_{max}$ / HT MPa / ore	$t_f$ ore	$t_f$ , CDM ore	$t_f$ , eq. 14 ore
PT5	0 / 1'	175 / 120	223	258	272
PT6	0 / 60'	175 / 120	241	260	274
PT7	0 / 1'	151 / 120	650	774	718
PT9(aria)	0 / 1'	151 / 120	576	774	718
PT8	0 / 60'	151 / 120	601	774	718

Tabella 4: Prove di creep ciclico con applicazione del carico a onde rettangolare e rispettive simulazione ( $2\frac{1}{4}$ Cr1Mo, 550°C, vuoto)

Sigla	$\sigma_{max}$ MPa	$\sigma_{min}$ MPa	Periodo ore	$t_f$ ore	$t_f$ , CDM ore	$t_f$ , eq. 14 ore
PT1	175	0	24	878	2112	2136
PT3	175	0	120	761	2112	2218
PT3	151	0	24	2473	6955	6756

Tabella 5: Prove di creep ciclico con applicazione del carico a rampa triangolare e rispettive simulazione ( $2\frac{1}{4}$ Cr1Mo, 550°C, aria)

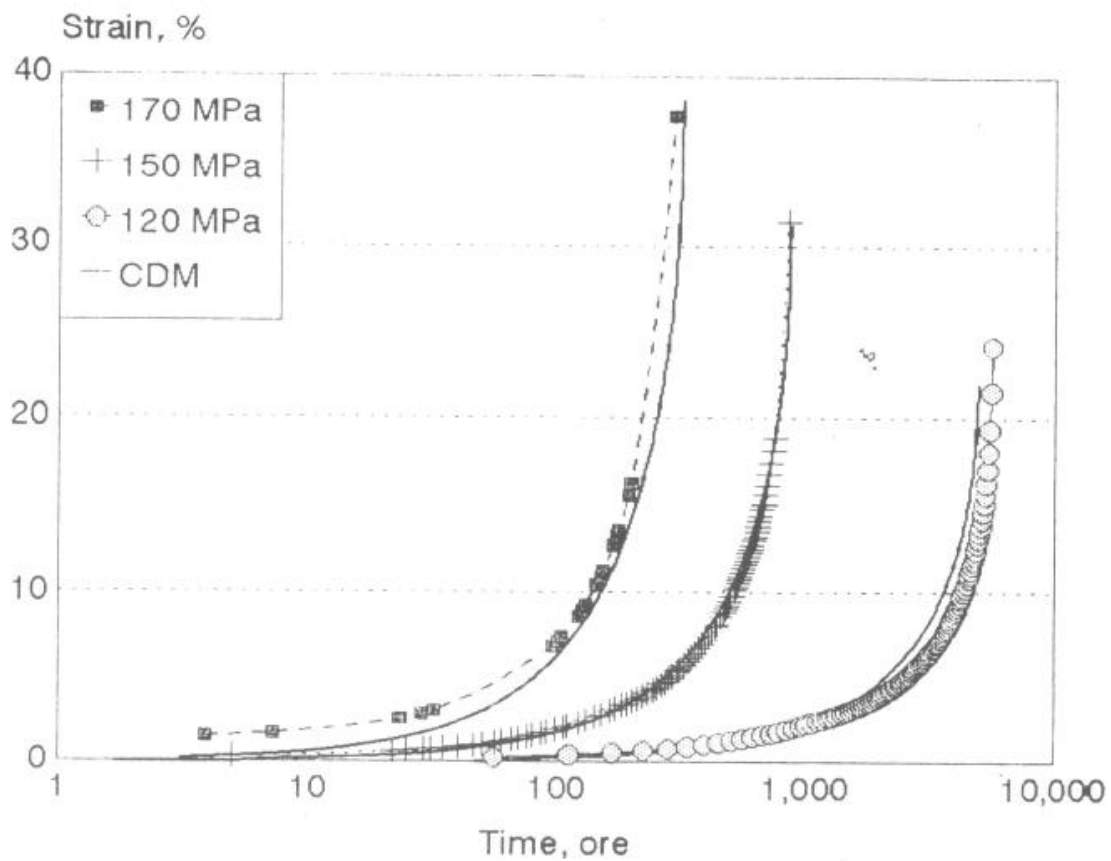


Fig. 1: Verifica della relazione CDM per curve di creep.

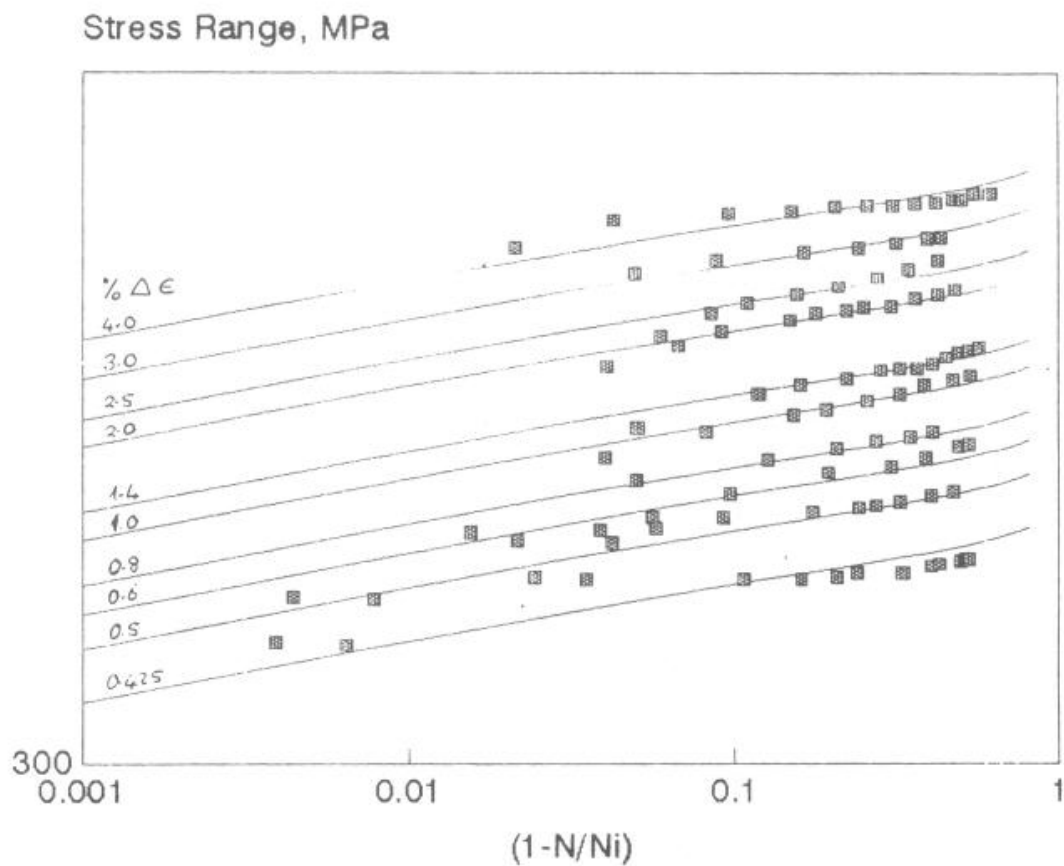


Fig. 2: Verifica della relazione CDM per i dati LCF.

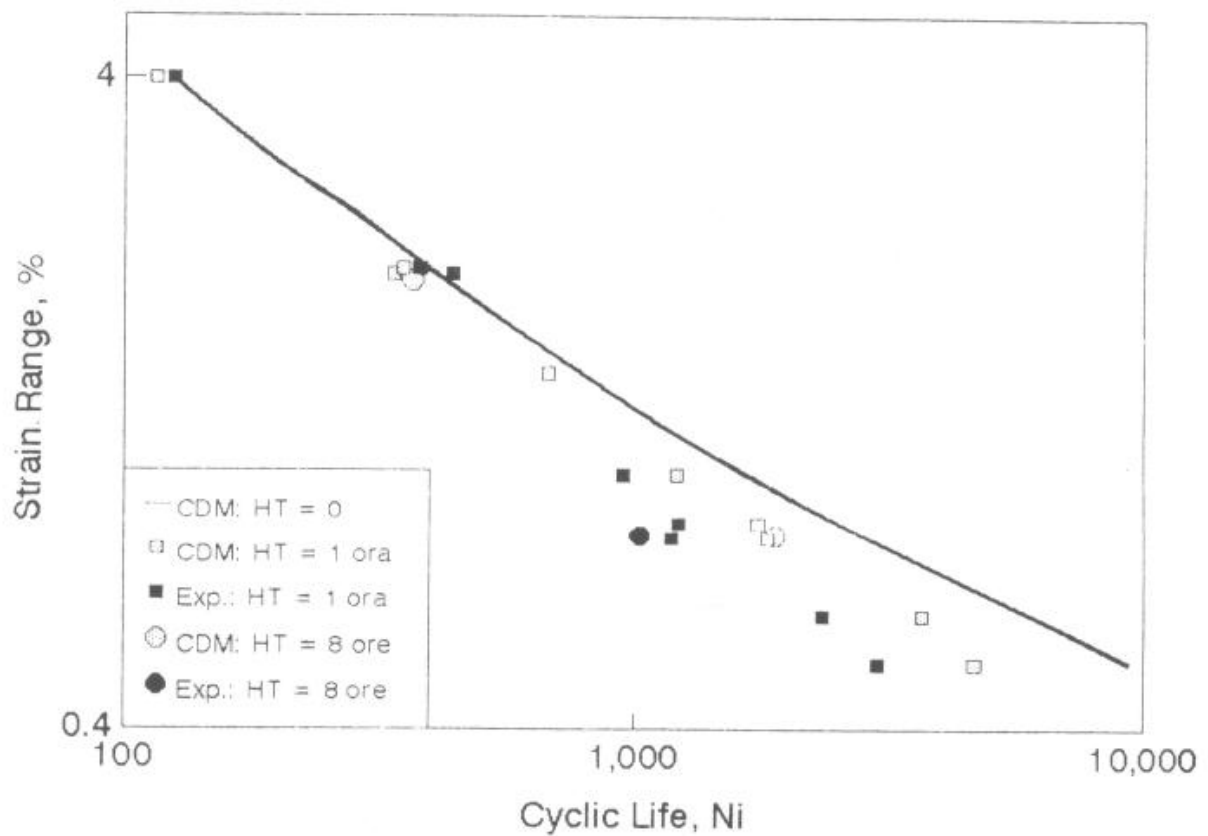


Fig. 3: Capacità del modello unificato di prevedere i valori di vita ciclica delle prove con hold time.

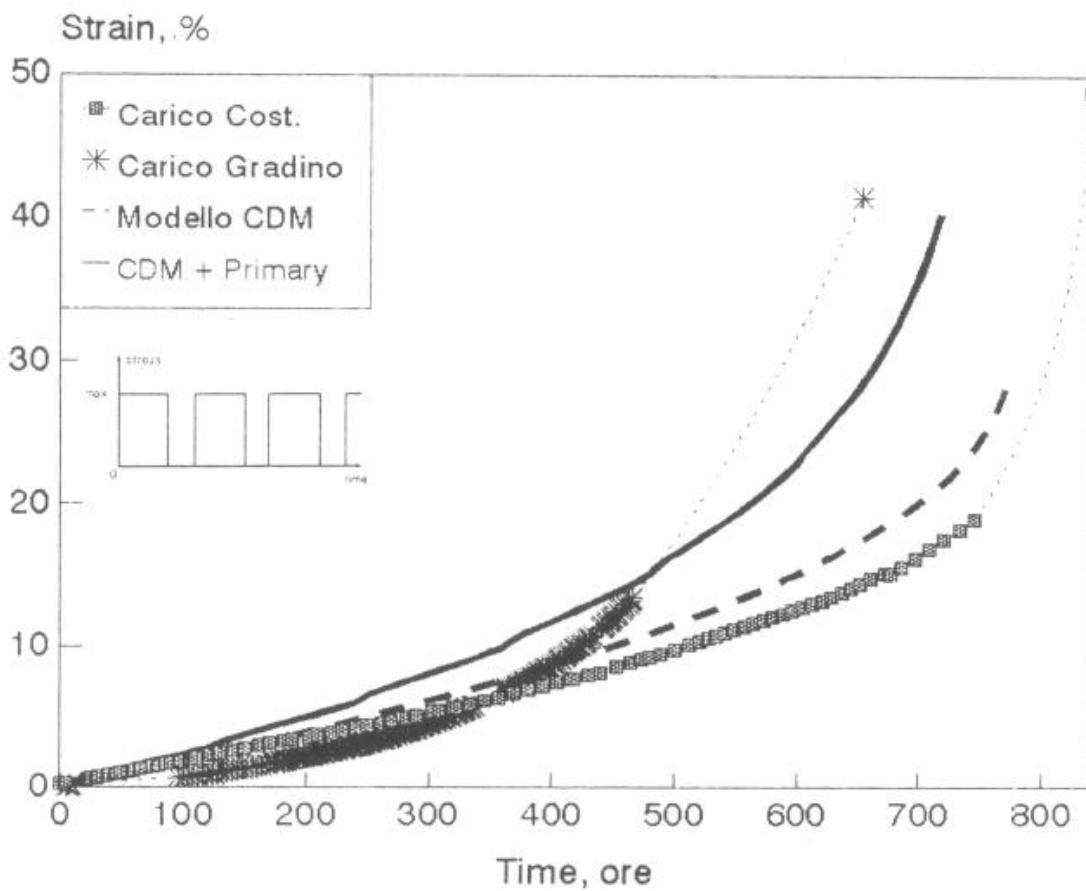


Fig. 4: Confronto tra curve di creep a carico costante (150 MPa) e quelle ad onde rettangolare (151 MPa, 120 ore; 0 MPa, 1 min.)

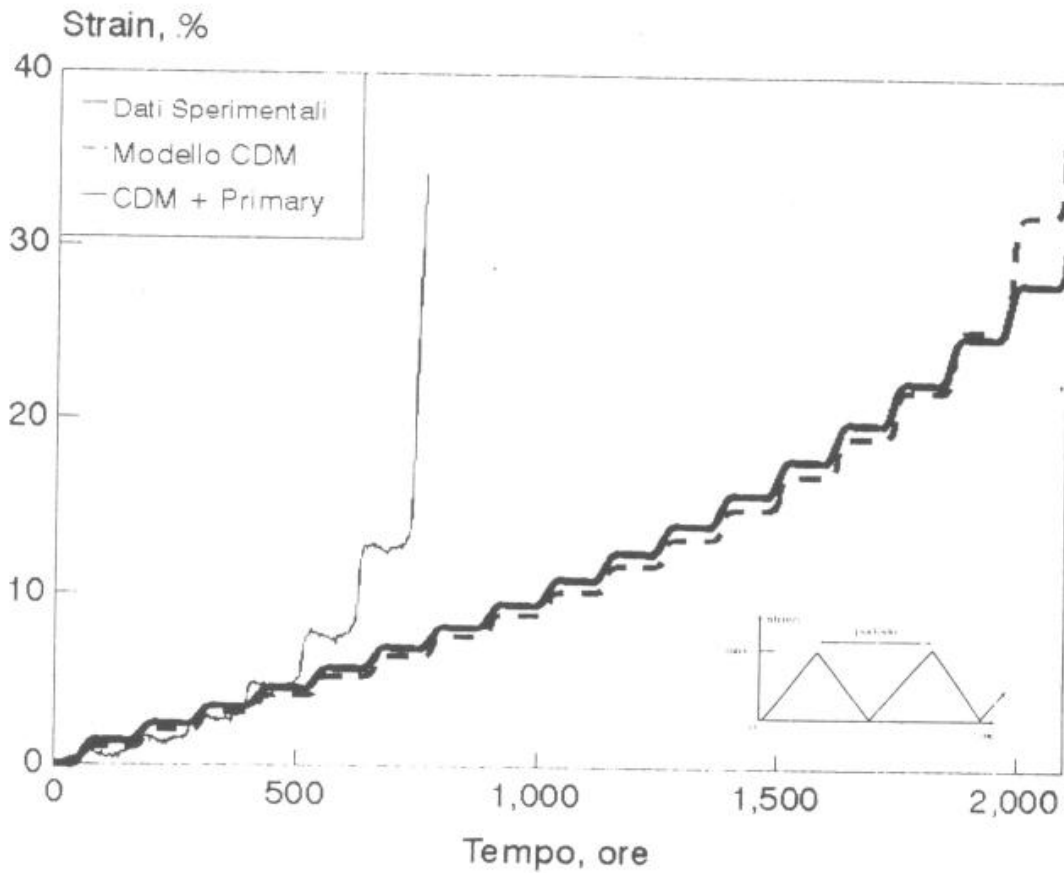


Fig. 5: Capacità dei modelli CDM di prevedere l'andamento di creep in una prova eseguita con carico ad onde triangolare ( $\sigma_{\max} = 175$  MPa, periodo = 120 ore)

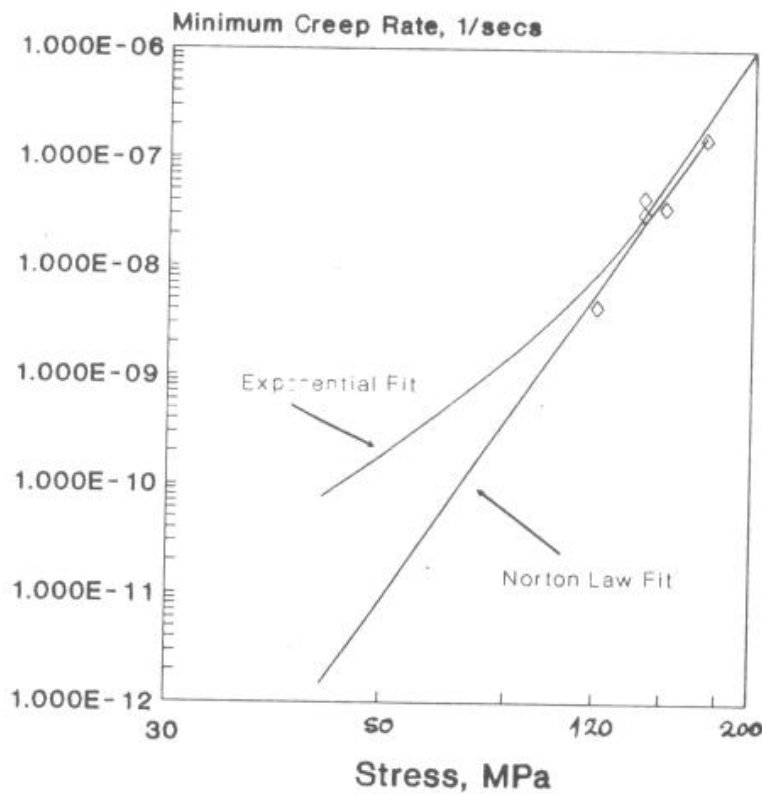


Fig. 6: Modelli per l'estrapolazione della velocità minima di deformazione.