

V Convegno Gruppo Italiano Frattura  
8-9 giugno 1989, Università di Trento

IL FORMALISMO DELLA MECCANICA DEL CONTINUO APPLICATA AI MECCANISMI DI  
DANNEGGIAMENTO DA CREEP IN SUPERLEGHE DI NICHEL: RECENTI SVILUPPI

V. Lupinc, M. Maldini  
CNR-ITM, Cinisello Balsamo

INTRODUZIONE

Nel passato la maggior parte degli studi sia teorici che pratici sullo scorrimento viscoso, si limitavano ad analizzare in funzione dei parametri di prova poche caratteristiche della curva di creep, in genere la velocità minima di deformazione, il tempo per raggiungere una prefissata deformazione ed infine il tempo e la deformazione a rottura. Veniva quindi tralasciata molta dell'informazione contenuta in una curva, questo perché le metodologie di progettazione dei componenti operanti ad elevate temperature richiedevano solo la conoscenza di questi pochi parametri. Tali metodologie, utilizzate ancora oggi, devono essere necessariamente molto conservative perché non in grado di rappresentare in modo corretto la ridistribuzione degli sforzi che avviene nel componente operante in regime di creep.

Per ridurre questo spesso eccessivo conservativismo, senza per questo ridurre le caratteristiche di sicurezza ed affidabilità del componente, le moderne tecnologie di progettazione ad alta temperatura richiedono l'uso di adeguate espressioni analitiche in grado di caratterizzare l'intera curva di creep in funzione delle condizioni di  $\sigma$  e  $T$  imposte.

A tali equazioni è richiesta inoltre la capacità di estrapolazione per sollecitazioni diverse da quelle analizzate sperimentalmente ed infine di poter essere utilizzate per prevedere il comportamento del materiale sottoposto a sforzi e temperature non costanti nel tempo, come invariabilmente avviene nei componenti in esercizio.

GLI APPROCCI FISICO E FENOMENOLOGICO NELLO STUDIO DEL CREEP

L'informazione che si ottiene da una prova di scorrimento viscoso

consiste nella variazione della deformazione in funzione del tempo per le condizioni di sforzo e temperature imposte nella prova, cioè:

$$\varepsilon = f_1(\sigma, T, t) \quad (1)$$

Esistono inoltre altri metodi meno diretti, ma equivalenti, per rappresentare le curve di creep, quali per esempio riportare le curve della velocità di deformazione in funzione del tempo, o della deformazione, oltre che dalle condizioni di prova:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) &= f_2(\sigma, T, t) \\ \dot{\varepsilon}(\varepsilon) &= f_3(\sigma, T, \varepsilon) \end{aligned} \quad (2)$$

Per dare forma analitica alle equazioni precedenti sono stati utilizzati due differenti approcci: l'approccio fisico, in cui i meccanismi di deformazione vengono rappresentati tramite modelli fisici dedotti da prove sperimentali spesso molto sofisticate, e l'approccio puramente fenomenologico basato su equazioni che non hanno nessuna pretesa di rappresentare i meccanismi fisici di deformazione e frattura. Entrambi presentano vantaggi e svantaggi: l'approccio puramente fenomenologico è sicuramente il più semplice, infatti è sempre possibile interpolare una curva di creep tramite equazioni parametriche. Tuttavia la variazione dei valori dei parametri può non essere legata in maniera semplice alle condizioni di prova. Anche se si riesce a descrivere molto bene la singola curva di creep, risulta limitato il loro potere di estrapolazione al di fuori del campo di sollecitazione investigato dove potrebbero agire meccanismi di creep completamente diversi, in grado di ridurre la vita e/o la duttilità a creep del materiale.

Difficile risulta inoltre affrontare il problema del comportamento a creep del materiale sottoposto a sollecitazioni variabili se non utilizzando alcune regole empiriche ed in parte anche arbitrarie, quali la legge dello "strain hardening" o del "time hardening".

L'approccio fisico è più promettente: tramite una opportuna rappresentazione con modelli dei meccanismi fisici di deformazione e danneggiamento che avvengono nel materiale alle varie condizioni di sforzo e temperatura, si possono ottenere equazioni in grado, in linea di principio, sia di descrivere una qualsiasi curva di creep che di superare le accennate difficoltà dell'approccio empirico.

Un problema dell'approccio fisico è che non si presta alla descrizione di sistemi molto complessi, quando molti meccanismi di deformazione agiscono contemporaneamente, a volte influenzandosi vicendevolmente. Fortunatamente molto spesso, nei vari stadi di deformazione di una prova di creep, agiscono solo uno o due meccanismi in modo preponderante rispetto agli altri che possono quindi essere trascurati permettendo di semplificare il problema.

Le equazioni ottenute tramite modelli fisici contengono alcuni

parametri, analoghi a quelli presenti nelle equazioni totalmente empiriche, che risultano in questo caso funzioni note di costanti microscopiche del materiale, quali il vettore di Burgers, i coefficienti di diffusione, ecc. La conoscenza di queste funzioni permette di individuare le migliori relazioni che collegano tali parametri allo sforzo e alla temperatura.

#### L'APPROCCIO FENOMENOLOGICO

Tra le varie equazioni di tipo fenomenologico utilizzate per interpolare ed anche estrapolare le curve di creep, ha ricevuto una considerevole attenzione quella proposta da Evans e Wilshire (1985), comunemente chiamata "concetto  $\vartheta$ ". Tale equazione è nata dalla constatazione sperimentale che per molte leghe di interesse ingegneristico, la curva di creep non presenta un reale stadio stazionario, ma la velocità di deformazione passa direttamente da uno stadio decelerante ad uno accelerante attraverso un flesso dove si raggiunge la minima velocità di deformazione.

Questo comportamento ha suggerito ai sopraccitati autori di scomporre la curva di creep in due componenti descritte da funzioni esponenziali:

$$\varepsilon = \vartheta_2 (1 - e^{-\vartheta_2 t}) + \vartheta_3 (e^{\vartheta_4 t} - 1) \quad (3)$$

Una volta trovata, tramite alcune prove sperimentali, la dipendenza dei parametri  $\vartheta_i$  dallo sforzo e temperatura, si ottiene una espressione che permette di eseguire estrapolazioni per sollecitazioni diverse da quelle esplorate sperimentalmente.

La capacità del concetto  $\vartheta$  nell'eseguire estrapolazioni per condizioni di sollecitazioni costanti abbastanza distanti da quelle sperimentali è tuttora dubbia, inoltre il metodo prevede l'esecuzione di prove di creep a sforzo costante invece che a carico costante, come usualmente vengono eseguite.

Non sempre è necessario poter descrivere in modo accurato l'intera curva di creep: nel caso delle superleghe di nichel, per esempio, la curva di creep può consistere praticamente nel solo stadio terziario, mentre la deformazione dovuta al primario è assai limitata e spesso trascurabile.

Una descrizione fenomenologica del processo di creep in grado di descrivere lo stadio terziario è stata proposta da Kachanov (1958) e sviluppata da Rabotnov (1969). Questi autori hanno introdotto un parametro fenomenologico,  $w$ , legato al danno da scorrimento viscoso il cui accumularsi nel materiale produce l'accelerazione della velocità di deformazione dello stadio terziario. Il valore di  $w$  può assumere valori fra 0 (quando nessun danno è presente) ed un valore generalmente costante alla frattura (questo valore è usualmente, ma non necessariamente, posto uguale all'unità da opportuni parametri di normalizzazione).

La velocità del terziario e la velocità di accumulo del danno sono definite dal valore istantaneo di  $w$  attraverso una coppia di equazioni

differenziali del tipo:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= g(\sigma, T, w) \\ \dot{w} &= h(\sigma, T, w)\end{aligned}\quad (4)$$

Kachanov e Rabotnov hanno proposto per le equazioni precedenti la seguente forma:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}_0 (1 - w)^{-n} \\ \dot{w} &= \dot{w}_0 (1 - w)^{-m}\end{aligned}\quad (5)$$

dove  $\dot{\epsilon}_0 = \dot{\epsilon}_0^0 (\sigma/\sigma_0)^n$ ,  $\dot{w}_0 = \dot{w}_0^0 (\sigma/\sigma_0)^m$  e  $\dot{\epsilon}_0^0$ ,  $\dot{w}_0^0$  sono funzioni della sola temperatura.

Il formalismo qui esemplificato per descrivere l'andamento del "danno" e della deformazione da creep, comunemente chiamato in letteratura Continuum Creep Damage Mechanics (CDM) risulta particolarmente utile nella progettazione per la sua semplicità. In particolare la formulazione differenziale delle equazioni permette di usare tale formalismo anche per descrivere il creep a sollecitazioni variabili nel tempo. E' da notare, comunque, che nella CDM come introdotta da Kachanov e Rabotnov non si fa alcuna ipotesi sui meccanismi che causano il terziario; infatti la forma delle eqq. 5 è totalmente empirica. Da ciò consegue che la CDM ha un limitato potere estrapolativo.

#### L'APPROCCIO DELLA MECCANICA DEL CONTINUO APPLICATA AI MECCANISMI DEL DANNO

Ashby e Dyson (1984) hanno recentemente analizzato molte delle equazioni basate su modelli fisici, in grado di descrivere diversi possibili meccanismi di danno e di deformazione, e le hanno riformulate con il formalismo della CDM. Si ottengono in questo modo equazioni che, pur basandosi sul formalismo della CDM e conservandone quindi i vantaggi, hanno maggiori capacità estrapolative.

I possibili meccanismi di danneggiamento analizzati possono essere raggruppati come riportato in tabella 1 e sono stati approfonditi da diversi autori.

In particolare l'addolcimento termico delle superleghe di nichel dovuto all'ingrossamento delle particelle  $\gamma'$ , con conseguente aumento della loro interdistanza, è stato esaminato da Dyson e McLean (1983) che hanno concluso che l'apporto dell'invecchiamento della seconda fase sulla velocità di deformazione è di secondaria importanza rispetto al contributo dovuto all'aumento delle dislocazioni, conclusione che risulta concorde anche con l'analisi di Basso et al. (1986).

L'influenza dell'attacco ambientale sul creep delle superleghe di nichel è stato trattato dettagliatamente da Dyson e Osgerby (1987).

Il danno, e quindi l'addolcimento del materiale dovuto al contemporaneo

aumento del flusso delle dislocazioni e alla nucleazione di cavità ai bordi dei grani in superleghe di nichel, è stato rappresentato da Dyson e Gibbons (1987) moltiplicando, e non sommando, le due funzioni che descrivono i rispettivi danni, sottolineando così l'interazione fra i due meccanismi.

Questo tipo di approccio della meccanica del continuo orientato dallo studio dei meccanismi del danno viene qui ulteriormente sviluppato ed applicato al creep di una superlega monocristallina.

Per il caso in esame l'ossidazione, almeno per componenti massivi, non rappresenta un danno importante. Il materiale, inoltre, non cava, ma subisce sotto carico ad elevata temperatura un continuo processo di addolcimento dovuto essenzialmente all'aumento del flusso delle dislocazioni. Questo meccanismo di danneggiamento continua ad accelerare la velocità di deformazione fino a raggiungere le condizioni di instabilità plastica e quindi la frattura finale.

Il creep primario, se trascurabile in ampiezza e durata rispetto allo stadio terziario, può essere approssimato da una deformazione iniziale istantanea e tutta l'attenzione può venir quindi rivolta allo stadio terziario che rappresenta spesso quasi tutta la curva di creep. Questa scelta è stata fatta per il creep a 850°C e 950°C del materiale monocristallino SRR 99 (Maldini e Lupinc, 1988).

Le seguenti equazioni differenziali:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}_0(1 + w) \\ \dot{w} &= C \dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (6)$$

sviluppate per rappresentare prove a sforzo costante, sono state trasformate nella seguente versione in modo da descrivere prove di creep a carico costante:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}_0 e^{n\epsilon} (1 + w) \\ \dot{w} &= C \dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (7)$$

Questo sistema di equazioni differenziali, risolto numericamente, può rappresentare tutte le curve di creep nell'intervallo delle sollecitazioni esplorate.

Dalle figg. 1 e 2 è evidente che il parametro  $\dot{\epsilon}_0$  dipende sia da T che da  $\sigma$ , mentre il parametro C può essere descritto con una funzione di  $\sigma$  soltanto. Il parametro n risulta essere la pendenza delle rette in fig. 1 che legano la  $\dot{\epsilon}_0$  con lo sforzo. In fig. 3 appaiono alcune curve di creep della lega SRR 99 calcolate sostituendo nelle eqq. 7 ai parametri C ed  $\dot{\epsilon}_0$  i loro valori interpolati dalle figg. 1 e 2; tali curve sono confrontate con i rispettivi punti sperimentali.

Questo tipo di descrizione si è mostrato promettente anche per le curve di creep della superlega policristallina IN 939 a 850°C riportate in fig. 4 (Lupinc et al. 1988).

Solo eccezionalmente il creep primario può essere trascurato. Per

tenerne conto, quindi, è stata introdotta una seconda variabile,  $s$ , che può essere correlata ad uno sforzo interno che insorge per la redistribuzione degli sforzi nella microstruttura non omogenea del materiale:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}_i(1 - s) \\ \dot{s} &= H\dot{\epsilon} - R s\end{aligned}\quad (8)$$

Il parametro  $\dot{\epsilon}_i$  è la velocità di deformazione iniziale,  $H$  descrive lo "strain hardening" ed  $R$  il "recovery".

Combinando nel seguente modo interattivo le eqq. 7 con le eqq. 8, rispettivamente del creep primario e del terziario, è stata proposta la seguente serie di equazioni differenziali che descrive la curva completa di creep a temperatura e sforzo applicato costanti:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}_i(1 - s)(1 + w) \\ \dot{s} &= H\dot{\epsilon} - R s(1 + w) \\ \dot{w} &= C \dot{\epsilon} / (1 - s)\end{aligned}\quad (9)$$

Queste equazioni differenziali ricordano quelle proposte da Ion et al. (1986):

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}_i(1 - s)(1 + w) \\ \dot{s} &= H\dot{\epsilon} - R s \\ \dot{w} &= C \dot{\epsilon}\end{aligned}\quad (10)$$

e si distinguono da quest'ultime per i seguenti aspetti:

- i) il recovery non è favorito soltanto da tensioni interne,  $s$ , ma anche dal fattore di danno  $1 + w$ , correlabile al flusso di dislocazioni;
- ii) il tasso di danno,  $\dot{w}$ , è proporzionale alla velocità di deformazione "depurata" dal fattore del meccanismo del creep primario in quanto durante questo stadio la deformazione anelastica spesso prodomina su quella plastica;
- iii) le eqq. 10 non hanno una soluzione analitica mentre le eqq. 9 integrate portano alla seguente espressione:

$$\epsilon = A(1 - e^{-a(e^{bt} - 1)}) + B(e^{bt} - 1) \quad (11)$$

in grado di rappresentare anche il creep primario sigmoidale quando  $C\dot{\epsilon}_i > H\dot{\epsilon}_i + R$ .

I parametri  $A$ ,  $B$ ,  $a$ ,  $b$  sono funzioni dei parametri  $\dot{\epsilon}_i$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $H$ .

Le equazioni in forma differenziale (eqq. 9) sono preferibili alla soluzione analitica (eq. 11) per i seguenti motivi:

- i parametri usati in queste equazioni sono più adatti per interpretazioni fisiche;
- la forma differenziale contenente i parametri del danno si presta anche a descrizioni di curve di creep a carico invece che a sforzo costante,

oppure per rappresentare curve di creep a temperatura e/o sforzo o carico applicato variabili.

In tutti questi casi è necessario l'inserimento della dipendenza dei parametri  $\epsilon_i$ , C, H e R dalla  $\sigma$  e dalla T nelle eqq. 9.

Curve di creep a carico costante della lega monocristallina SRR 99 nell'intervallo di temperatura da 750 a 950°C, per tempi a rottura fra 200 e 5000 h sono state analizzate con un approccio parziale del tipo sopra descritto, nel senso che solo il parametro  $\epsilon_i$  è stato considerato variare durante la prova a causa dell'aumento dello sforzo applicato.

Nella fig. 5 sono riportati i valori così ottenuti dei quattro parametri per le diverse temperature e sforzi applicati; usando successivamente le funzioni che interpolano questi punti sperimentali è possibile calcolare qualsiasi curva di creep nell'intervallo dei parametri esplorati. La fig. 6 porta alcuni esempi di curve calcolate seguendo la procedura appena descritta e raffrontate con i rispettivi punti sperimentali.

## CONCLUSIONI

Il formalismo della meccanica del continuo, guidata da conoscenze dei meccanismi del danno, ha migliorato ed ampliato notevolmente la possibilità di descrivere il comportamento del creep delle superleghe. Ulteriori indagini permetteranno di affinare queste descrizioni e verificare le capacità estrapolative, in particolare per creep a sollecitazioni variabili.

## BIBLIOGRAFIA

- Ashby, M.F. e B.F. Dyson, Proc. ICF 6, New Delhi, Pergamon Press (1984) 3.
- Basso, S., V. Lupinc, M. Maldini, Proc. Int. Conf. on Creep, Tokyo, JSME, IMechE, ASME, ASTM, (1986) 483.
- Dyson, B.F. e T.B. Gibbons, Acta Metall. 35 (1987) 2355.
- Dyson, B.F. e F.A. Leckie, Proc. ICF 7, curato da K. Salama et al., Pergamon Press, Vol. 3 (1989) 2169.
- Dyson, B.F. e M. McLean, Acta Metall. 31 (1983) 17.
- Dyson, B.F. e S. Osgerby, Mat. Sci. Techn., Vol. 3 (1987) 545.
- Evans, R.W. e B. Wilshire, "Creep of Metals and Alloys", Institute of Metals, London, 1985, p. 313.
- Ion, J.C., A. Barbosa, M.F. Ashby, B.F. Dyson, M. McLean, NPL Report DMA All5, April (1986).
- Kachanov, L.M. Izvestja Akademiceskih Nauk SSSR 8 (1958) 26.
- Lupinc, V., M. Maldini, M. Barbieri, A. Bianchessi, E. Signorelli, Atti XVI° AIAS, Fac. Ing. Univ. L'Aquila, (1988) 345.
- Maldini, M. e V. Lupinc, Scripta Metall. 22 (1988) 1737.
- Rabotnov, Y.N., Proc. XII IUTAM, Stanford (Ed.s Hetenyi and Vincenti) Springer (1969) 342.

TABELLA 1. Diversi meccanismi di danno del creep terziario.

Addolcimento	Causa
da deformazione	riduzione di sezione a carico costante aumento del flusso di dislocazione cavitazione ai bordi dei grani
termico	crescita di particelle
da ambiente	frattura del prodotto da corrosione corrosione Interna

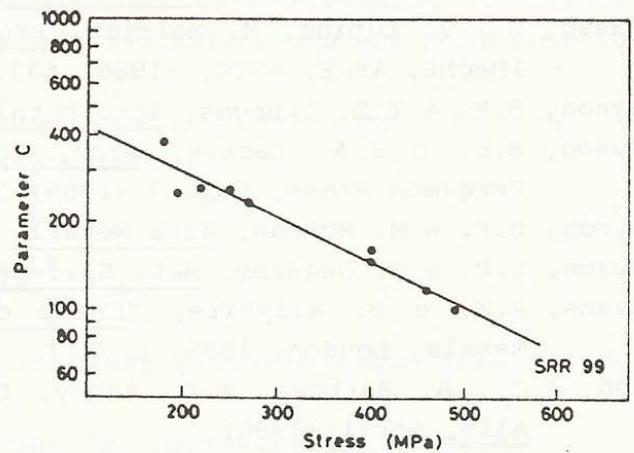
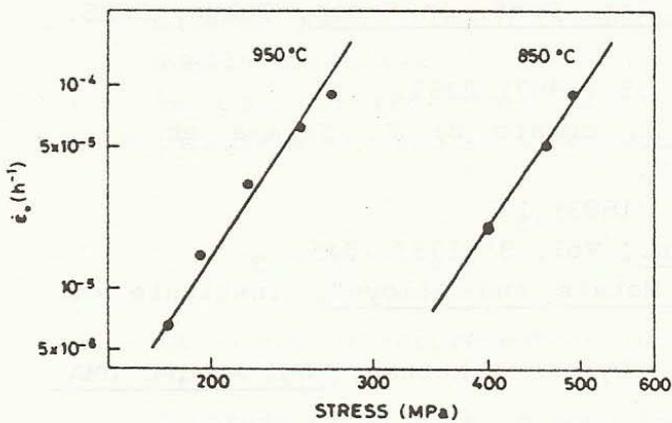


Fig. 1. Dipendenza del parametro  $\dot{\epsilon}_0$  dallo sforzo applicato.

Fig. 2. Dipendenza del parametro C dallo sforzo applicato.

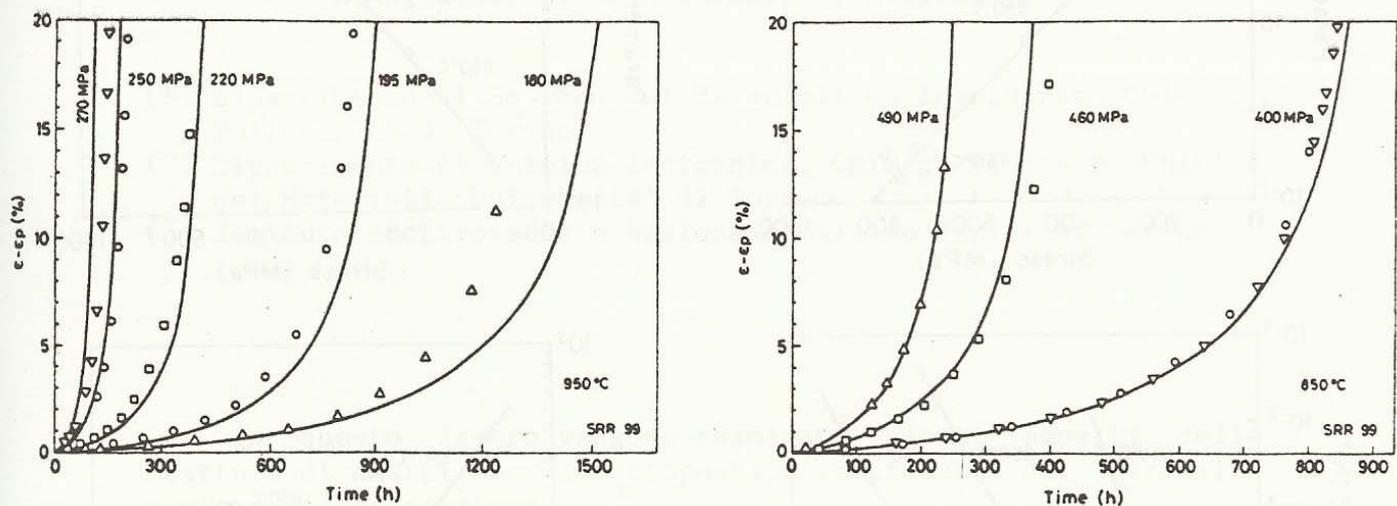


Fig. 3. Confronto di curve di creep calcolate usando le eqq. 7 con i dati sperimentali. Materiale: SRR 99.  $\epsilon_p$  è la deformazione del primario che non supera 0,5%.

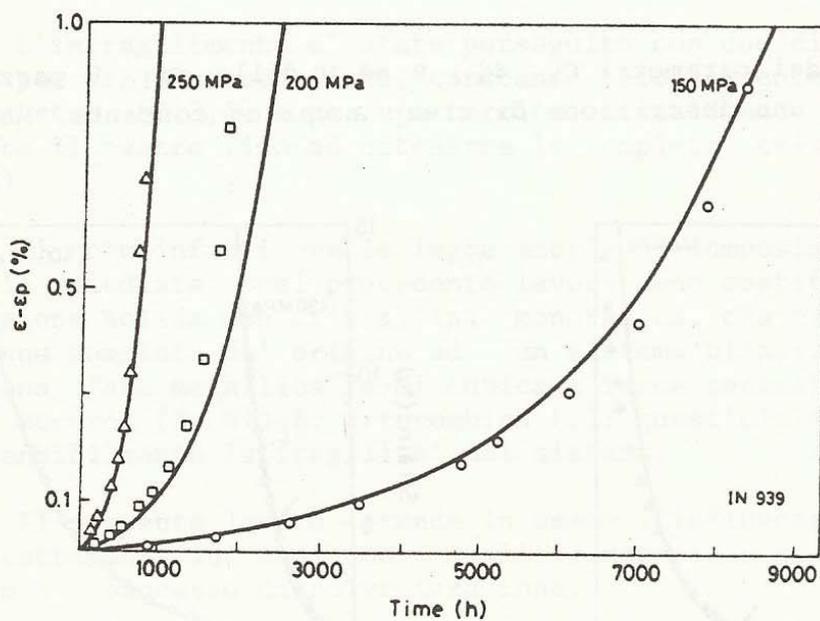


Fig. 4. Confronto fra comportamento di creep sperimentale e quello calcolato per la lega IN 939 a 850°C.

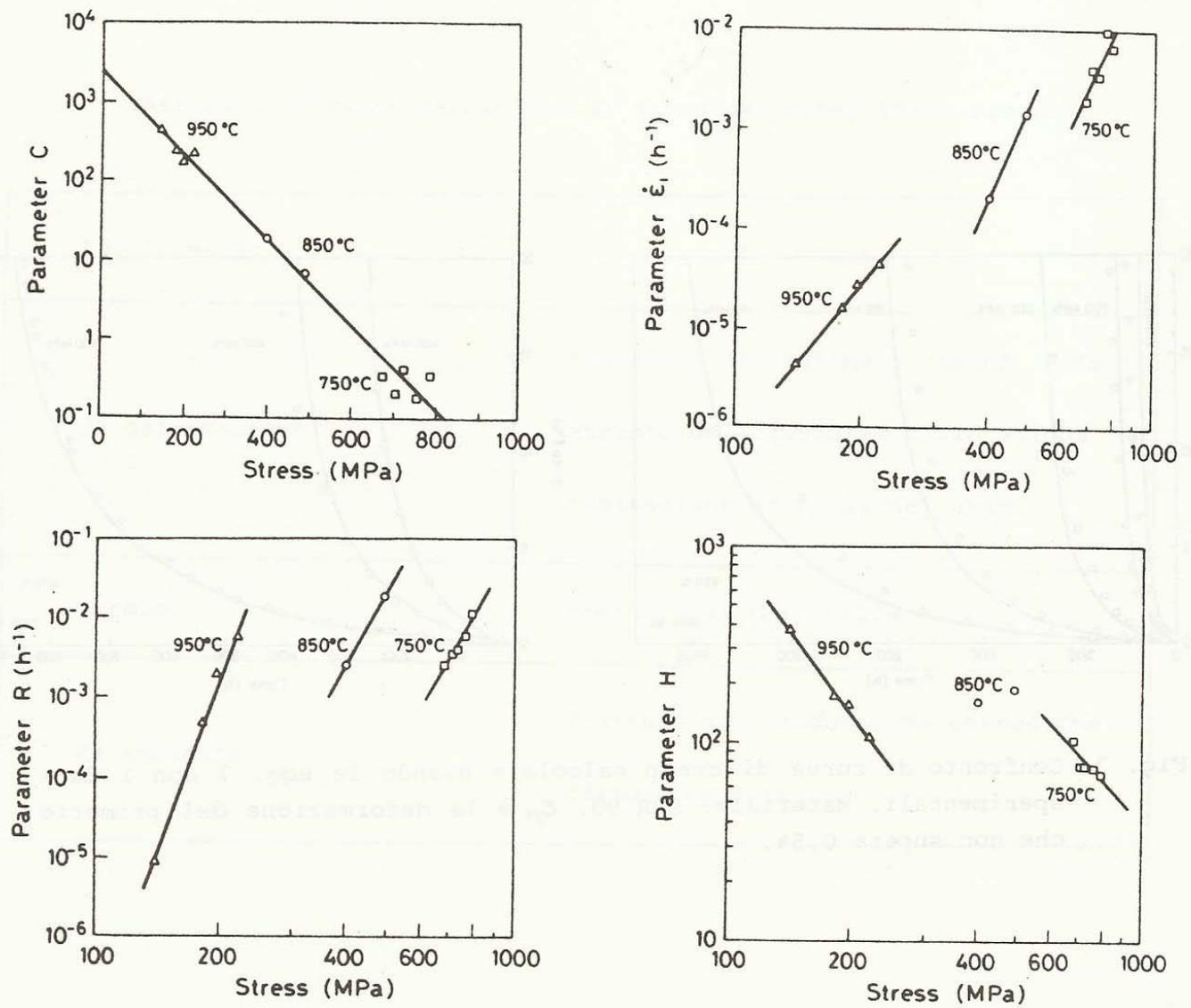


Fig. 5. Dipendenza dei parametri C,  $\dot{\epsilon}_1$ , R ed H delle eqq. 9 parzialmente adattate ad una descrizione di creep a carico costante. Materiale: SRR 99.

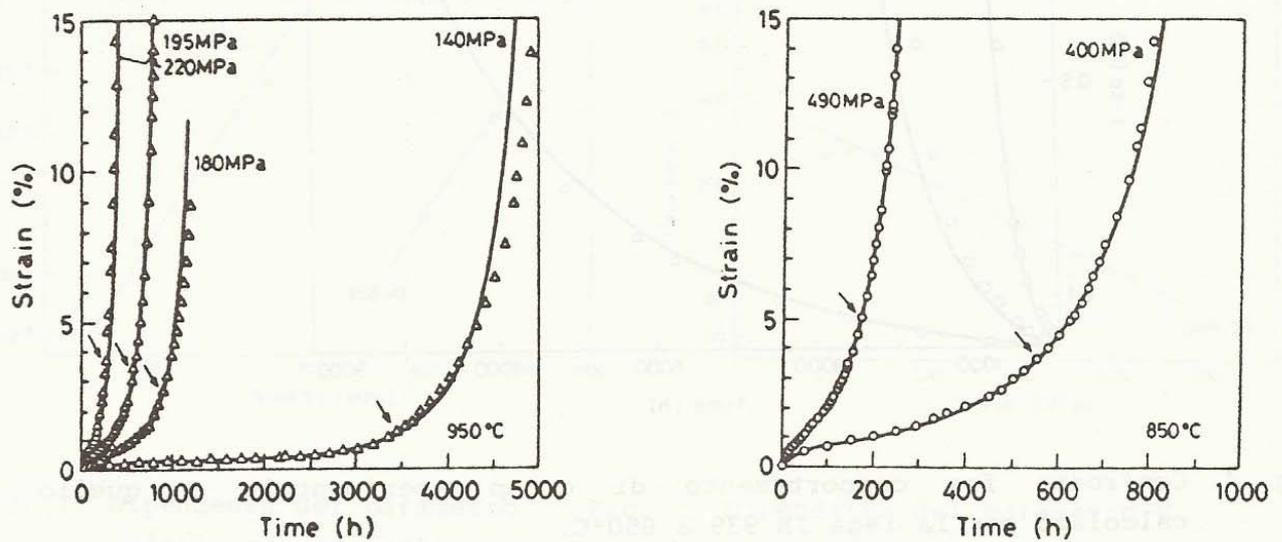


Fig. 6. Confronto di curve calcolate con i dati sperimentali. Materiale: SRR 99.