



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto per l'Energetica e le Interfasi
(sede di Milano)

***Modellazione del comportamento meccanico
per la progettazione***

Riccardo Donnini, Ph.D.

01/03/2016

Area3 Bicocca - Milano



IENI-CNR
Via R. Cozzi 53, 20125 Milano

Ricercatori

Maurizio Maldini

Giuliano Angella

Dario Ripamonti

Riccardo Donnini

Collaboratori tecnici

Tullio Ranucci

Davide Della Torre

1) Impianti per la produzione di energia ed applicazioni aeronautiche

- *Componenti sottoposti ad alti livelli di sollecitazioni (temperature e sforzi), spesso non costanti, sul medio e lungo termine*
- *Materiali soggetti ai fenomeni di creep e rilassamento durante le fasi di esercizio*
- *Equazioni costitutive capaci di descrivere la risposta del materiale e prevederne il comportamento al variare delle condizioni di esercizio*

2) Industria manifatturiera per componenti

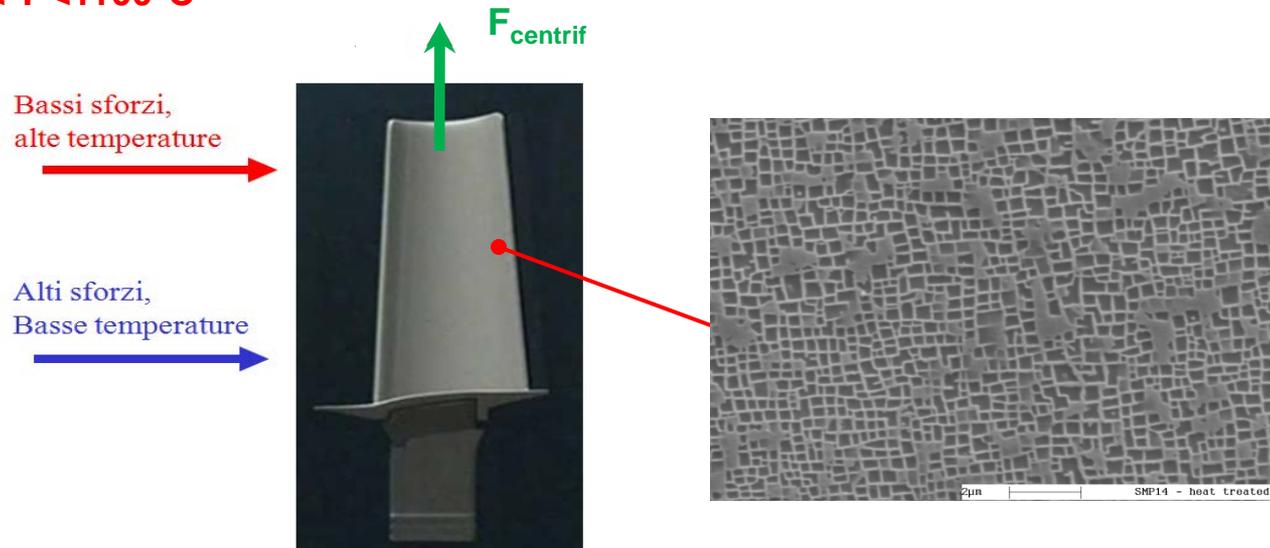
- *Caratterizzazione delle proprietà di deformabilità del materiale adottato*
- *Equazioni costitutive interpretabili dalle proprietà del materiale*
- *Qualità del prodotto e miglioramento del processo produttivo*

Equazioni costitutive: relazione matematica descrivente il comportamento meccanico del materiale quando sottoposto a sollecitazioni esterne



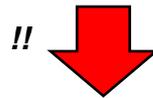
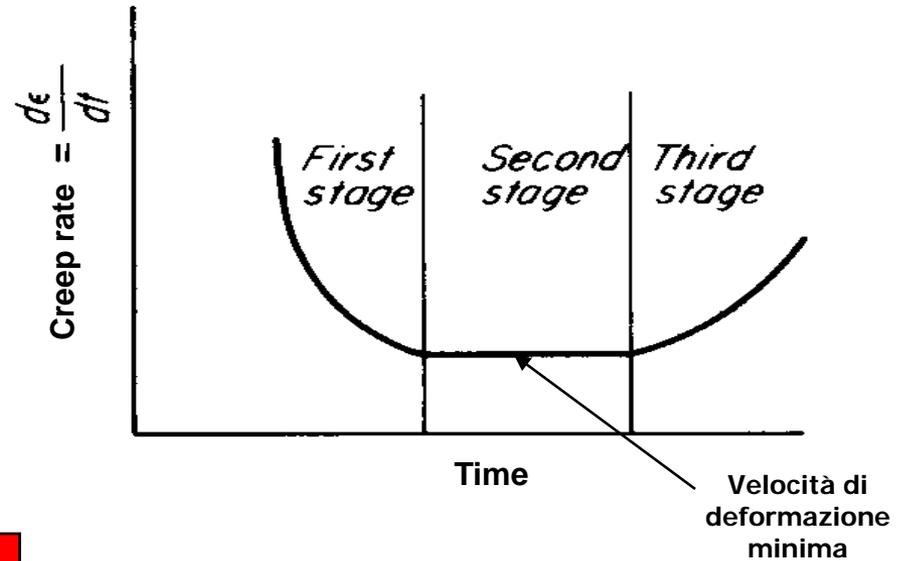
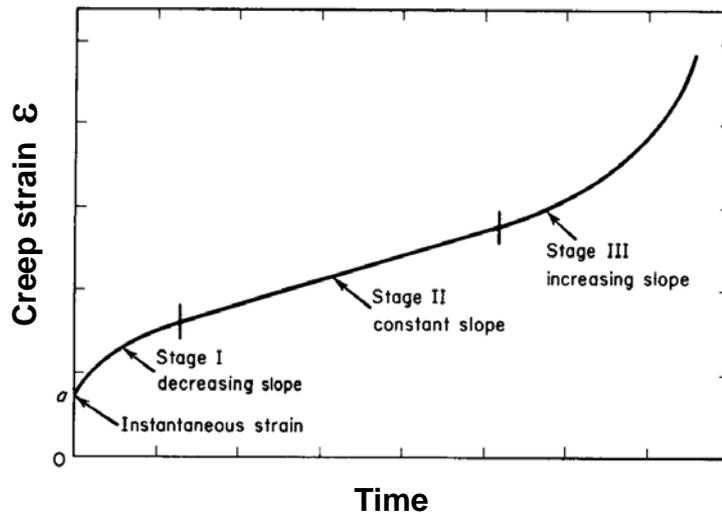
Modellazione del comportamento a creep (superleghe a base nichel)

$500^{\circ}\text{C} < T < 1100^{\circ}\text{C}$



- Sviluppo di un adeguata campagna sperimentale
- Identificazione dei meccanismi fisici alla base del fenomeno del creep
- Sviluppo di una equazione costitutiva, basata sui meccanismi fisici di deformazione, capace di cogliere gli aspetti salienti delle curve sperimentali ma funzionale alla progettazione

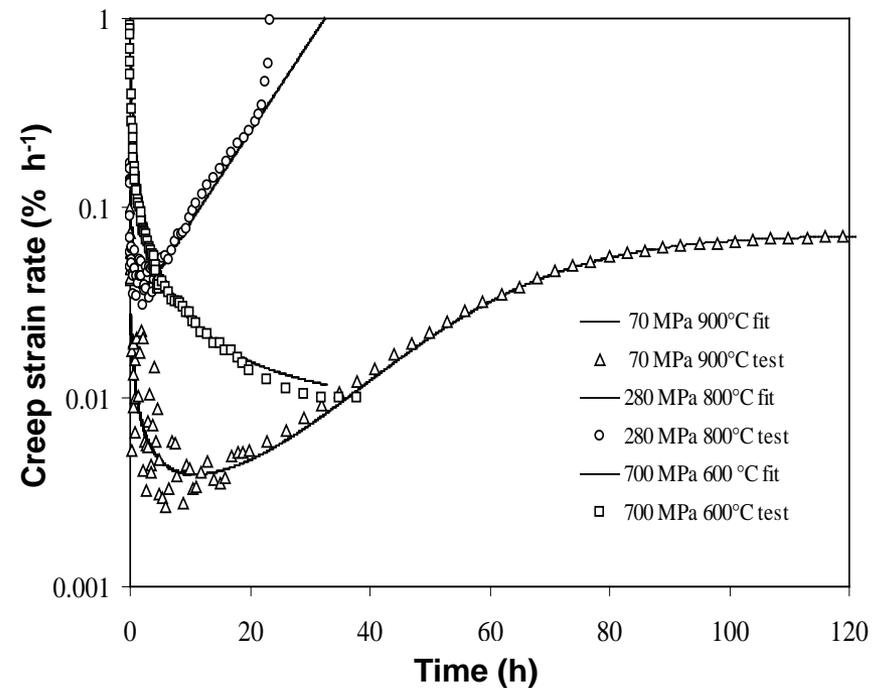
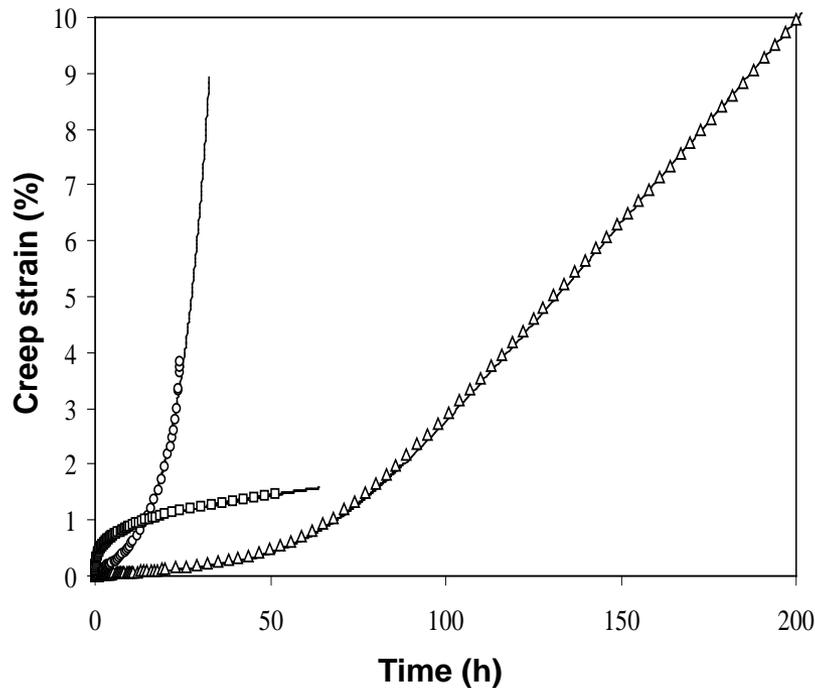
Curve ideali di creep



Le curve ideali non sempre si ottengono su leghe di interesse pratico
(es. causa instabilità microstrutturali: ingrossamento fasi indurenti, crescita della densità di dislocazione ecc.)

La forma curve di creep dipende fortemente dalle sollecitazioni applicate

Superlega C263



M. Maldini, G. Angella, R. Donnini, V. Lupinc, D. Ripamonti, *Analisi del comportamento a creep della superlega Nimonic 263*, La Metallurgia Italiana, 104/10 (2012) , pp. 3-10

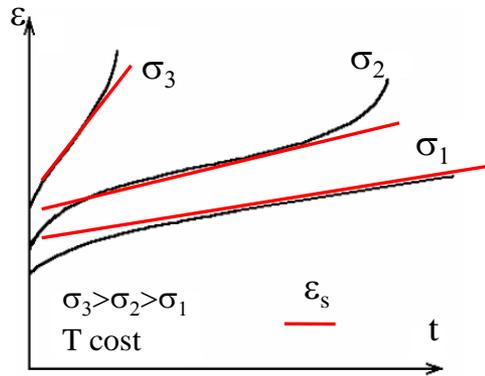


Approcci convenzionali alla modellazione

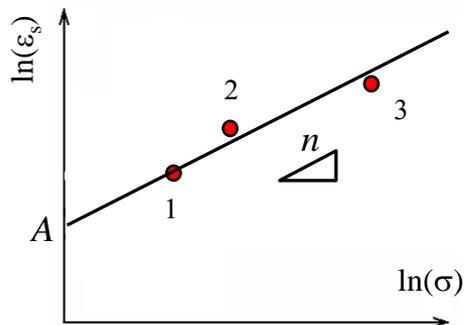
Equazione di Norton

$$\varepsilon_s = A \cdot \sigma^n \quad A = f(T) = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q_a}{RT}\right)$$

$n = \text{const}$



$$\ln(\varepsilon_s) = \ln(A) + n \ln(\sigma)$$



Vantaggi:

- Semplicità e praticità

Svantaggi

- n varia con σ e T
- Stima di Q_a non precisa
- Non valido su ampi range di stress

θ Projection concept

La curva di creep è descritta come somma di uno stadio primario (decelerante) ed uno stadio terziario (accelerante).

$$\varepsilon = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_3(e^{+\theta_4 t} - 1)$$

Parametri da determinare in funzione di σ e T

$$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \dots, \theta_i \longleftrightarrow \log \theta_i = a_i + b_i T + c_i \sigma + d_i \sigma T$$

Vantaggi:

- Semplicità
- Permette di eseguire estrapolazioni

Svantaggi

- Numero dei parametri
- Non tiene conto di possibili cambiamenti dei meccanismi di deformazione
- Difficile predire l'evoluzione della deformazione

Continuum Damage Mechanisms (CDM)

Obiettivo:

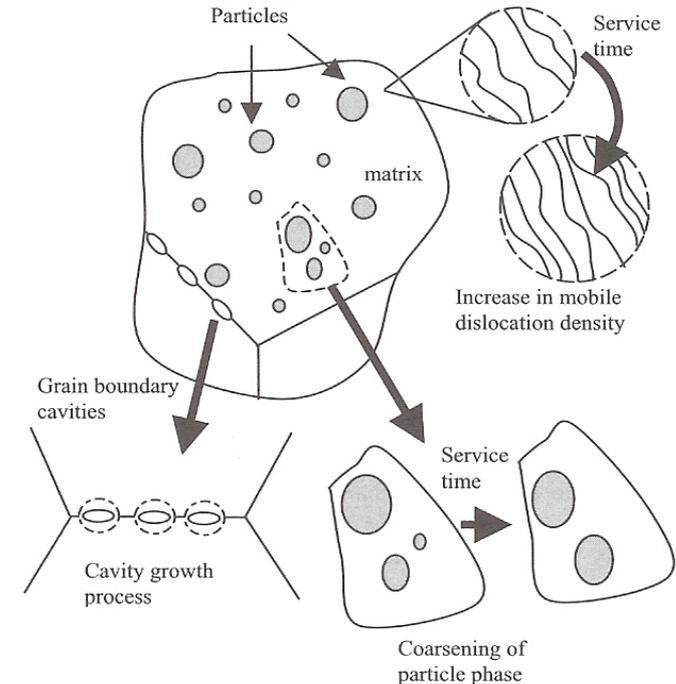
dare una forma esplicita alle Eqs. basandosi sui micromeccanismi effettivi di deformazione e frattura

- identificare i “danni” reali che influenzano la velocità di deformazione da creep
- quantificare i loro effetti sulla velocità di deformazione
- assemblare il tutto in un set di equazioni “computer friendly”

Assunzioni base:

Una variabile di stato (es.: w) descrive l'evoluzione del fenomeno microstrutturale che è alla base dell'andamento osservato per la curva di creep

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}(\sigma, T, w_1, w_2, \dots) \\ \dot{w}_1 = \dot{w}_1(\sigma, T, w_1, w_2, \dots) \\ \dot{w}_2 = \dot{w}_2(\sigma, T, w_1, w_2, \dots) \\ \dots \end{array} \right.$$



Esempio:

Evoluzione della densità delle dislocazioni mobili

La densità delle dislocazioni mobili evolve da un valore iniziale ρ° , all'inizio della prova di creep ad un valore d'equilibrio ρ_{ss} .

Parametri :

$$w = 1 - \rho^\circ/\rho$$

$$w^* = 1 - \rho^\circ/\rho_{ss}$$

$$0 < w < 1$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\varepsilon}^\circ}{(1-w)} \\ \dot{w} = \delta v (w^* - w) \end{array} \right.$$

- $w^* < 0$ ($\rho^\circ > \rho_{ss}$)

il sistema descrive uno stadio decelerante, che termina in uno stadio stazionario

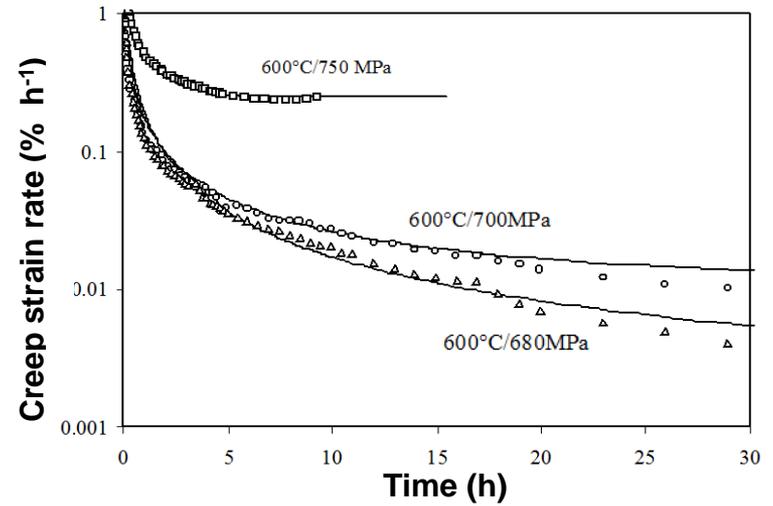
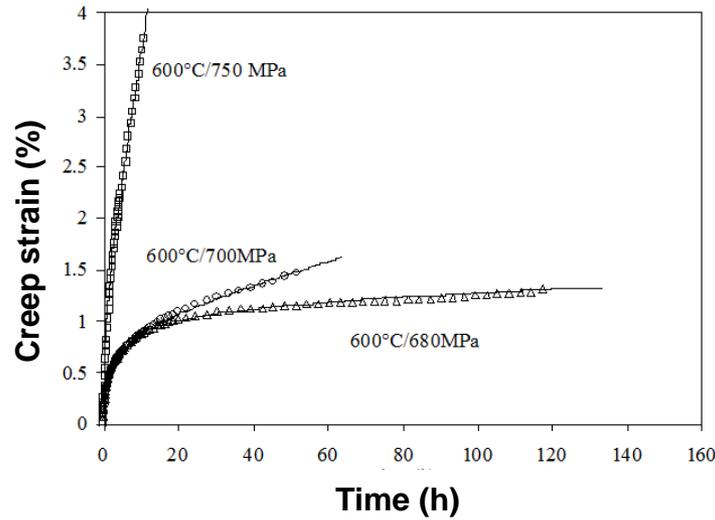
- $0 < w^* < 1$ ($\rho^\circ < \rho_{ss}$)

il sistema descrive uno stadio accelerante, che termina in uno stadio stazionario

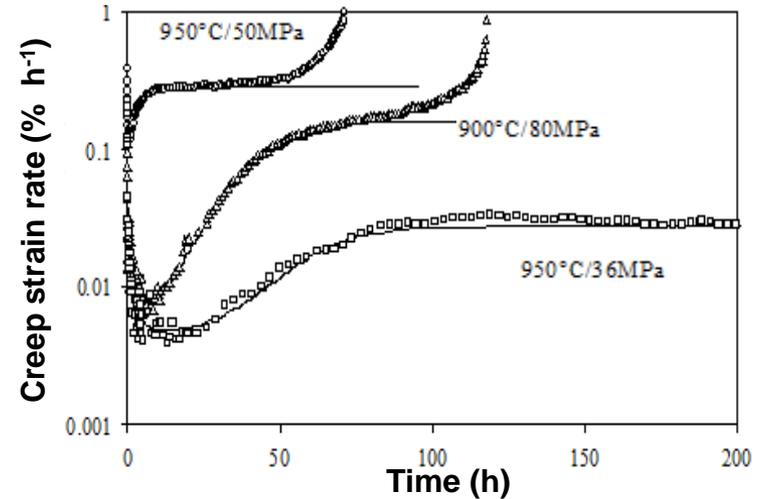
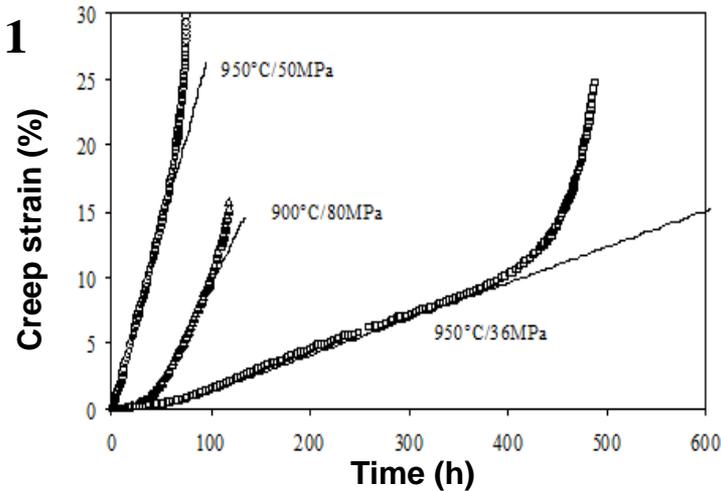
M. Maldini, G. Angella, R. Donnini, V. Lupinc, D. Ripamonti, *Analisi del comportamento a creep della superlega Nimonic 263*, La Metallurgia Italiana, 104/10 (2012) , pp. 3-10



$w^* < 0$



$0 < w^* < 1$



M. Maldini, G. Angella, R. Donnini, V. Lupinc, D. Ripamonti, *Analisi del comportamento a creep della superlega Nimonic 263*, La Metallurgia Italiana, 104/10 (2012) , pp. 3-10



Continuum Damage Mechanisms (CDM)

Vantaggi legati al formalismo differenziale :

- Può essere utilizzato per predire il comportamento a creep a carichi e/o temperature variabili.
- Può essere utilizzato per predire il comportamento al rilassamento
- Facilmente implementabile in un codice di calcolo agli elementi finiti

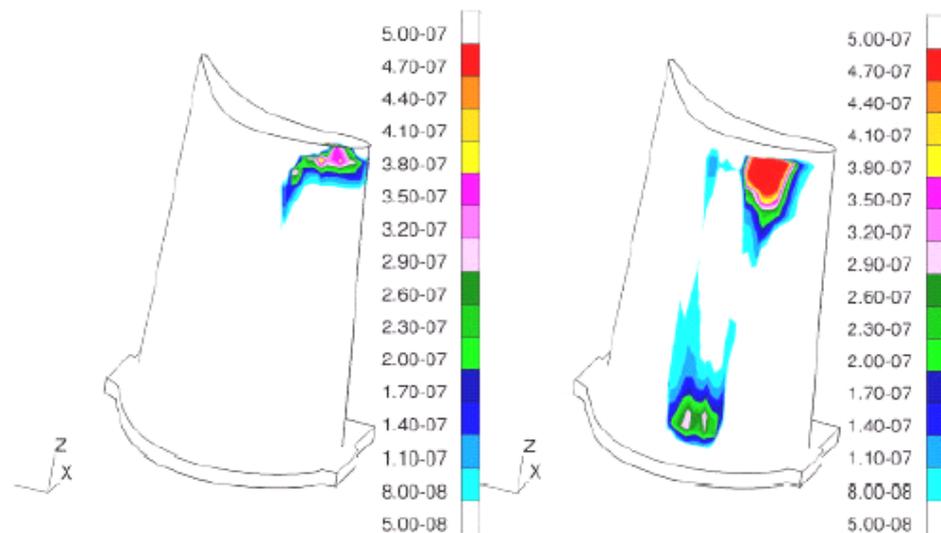
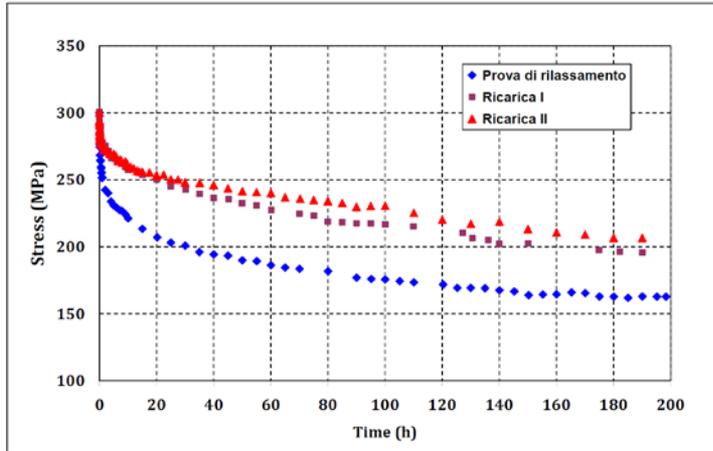


Figure 17 Creep damage ($\epsilon_{c,z}$) in a SRR99 SC blade (left) and a polycrystalline IN100 blade

Modellazione curve di rilassamento (acciai alto-legati)

520°C



La deformazione elastica iniziale si trasforma nel tempo in deformazione plastica a causa di processi di creep.

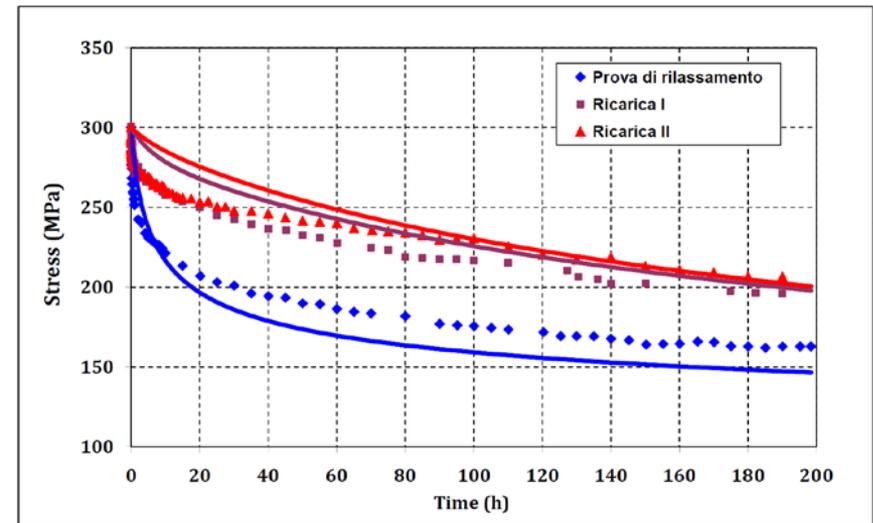
$$\dot{\sigma} = -E\dot{\epsilon}_c$$

Le deformazioni plastiche “reali” che si accumulano sono molto piccole. I meccanismi del creep che agiscono sono quelli dello stadio primario.

“s” parametro identificativo del meccanismo di danno

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = -E\dot{\epsilon}_c \\ \dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon}_i(1-s) \\ \dot{s} = H\dot{\epsilon}_c - Rs \end{cases}$$

Descrizione stadio primario
per le curve di creep



$$\dot{\epsilon}_i = f(\sigma, T)$$

$$R = f(\sigma, T)$$

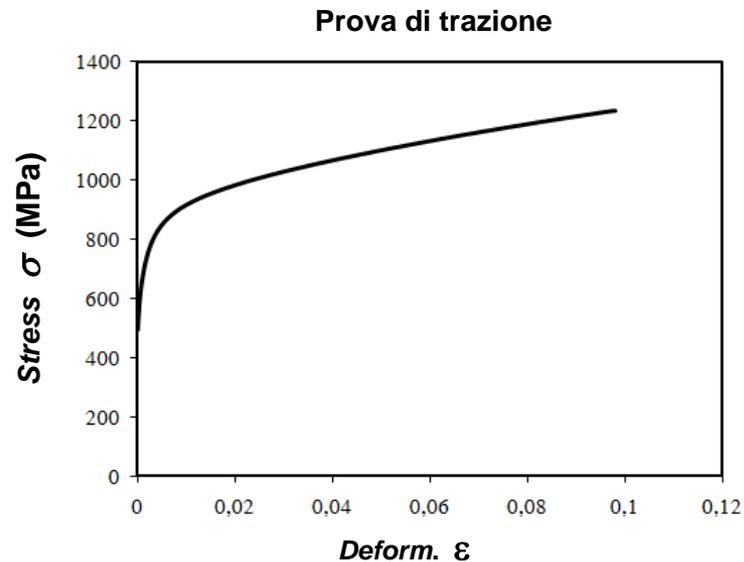
$$H = f(\sigma, T)$$

G. Angella, D. Della Torre, R. Donnini, M. Maldini, D. Ripamonti, F. Pero, E. Poggio, A. Riva, A. Sanguineti, *Stress relaxation modeling using creep data*, 10th Conference on Materials for Advanced Power Engineering, Liege (BE), 09/2014, pp.121-130

Analisi del comportamento plastico a basse ed alte temperature (ghise convenzionali e austemperate)

Obbiettivi

- *Studio delle curve di trazione per il materiale*
- *Identificazione dei meccanismi micro-strutturali alla base del fenomeno dell'incrudimento, sia a freddo che a caldo*
- *Sviluppo di equazioni costitutive, aventi significato fisico e basate sull'evoluzione micro-strutturale osservata*



Approccio convenzionale

Equazioni "empiriche" tipo Hollomon:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n$$

Utili ma difficilmente interpretabili (mediante K e n) rispetto alla microstruttura del metallo

Approccio fisico-descrittivo

Equazione di Voce e conseguente sviluppo in termini differenziali →

$$\sigma = \sigma_V + (\sigma_0 - \sigma_V) \cdot \exp(-\varepsilon / \varepsilon_c)$$

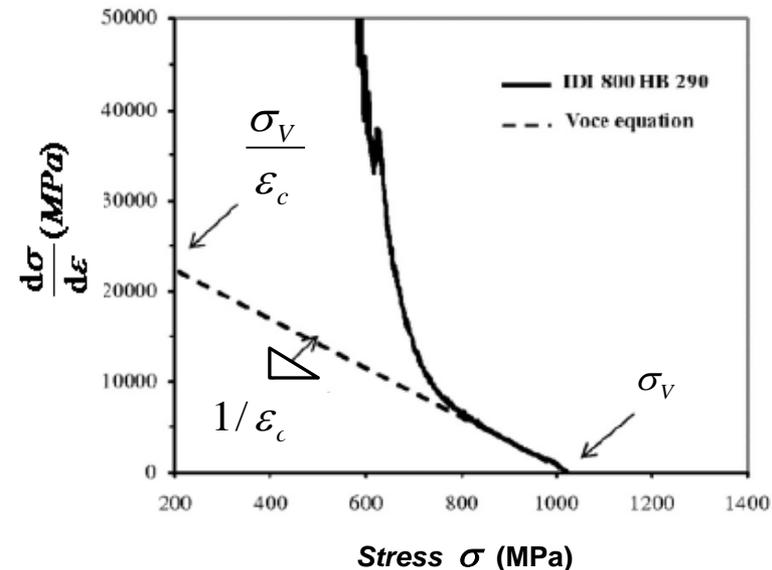
$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma_V}{\varepsilon_c} - \frac{1}{\varepsilon_c} \sigma \quad \begin{array}{l} \varepsilon_c, \sigma_0, \sigma_V \text{ parametri che descrivono la curva di trazione} \\ \varepsilon \text{ variabile indipendente} \end{array}$$

Formulazione KM (Kocks-Mecking)

$$\Rightarrow \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = f(\Lambda, D, \lambda, r) \quad \downarrow$$

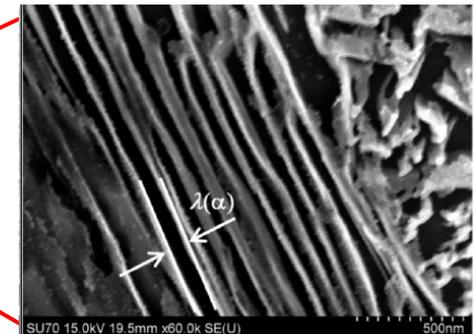
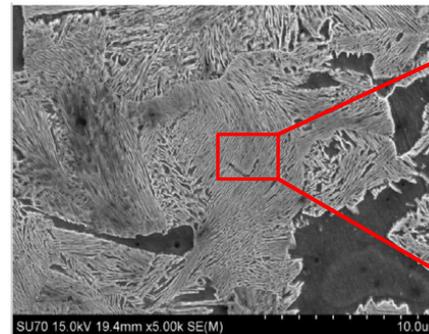
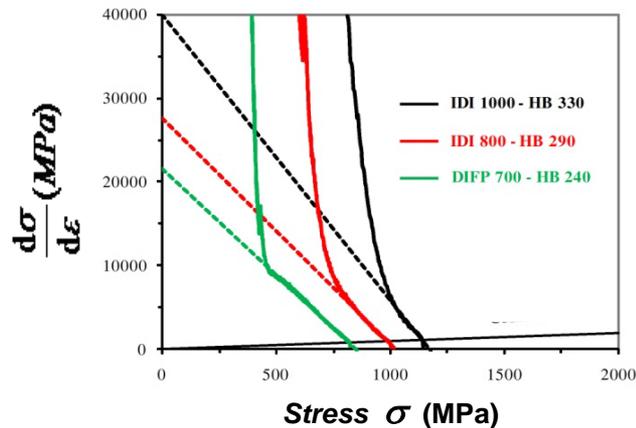
Possibilità di correlare i parametri alla evoluzione microstrutturale del metallo (interazione tra dislocazioni, dimensione dei grani, distanza interlamellare)

$$\frac{\sigma_V}{\varepsilon_c} \propto \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{D} + \frac{1}{\lambda}$$

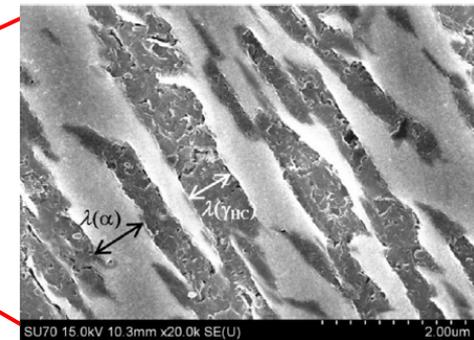
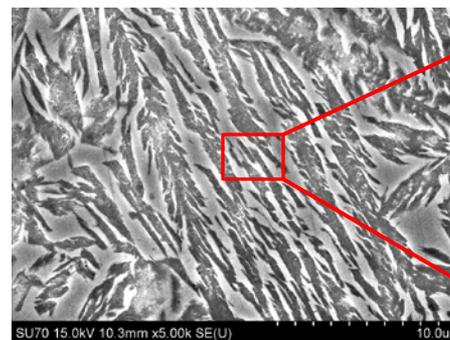
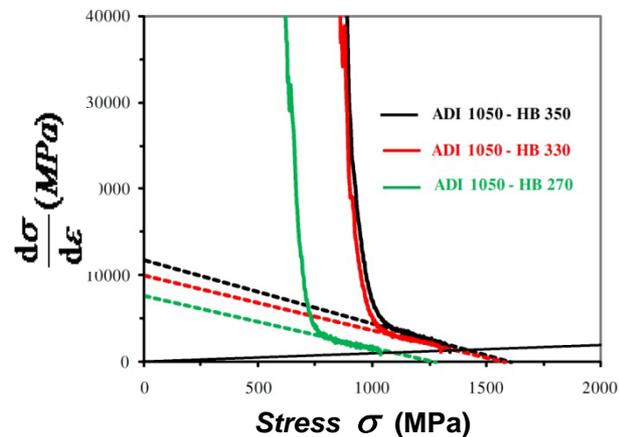


G. Angella, F. Zanardi, R. Donnini, *On the significance to use dislocation-density-related constitutive equations to correlate strain hardening with microstructure of metallic alloys: the case of conventional and austempered ductile irons*, Journal of Alloys and Compounds 669 (2016), pp. 262-271

Ghisa convenzionale (1)



Ghisa austemperata (2)



$$\frac{\sigma_V}{\varepsilon_c} \propto \frac{1}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \frac{\sigma_V^{(1)}}{\varepsilon_c} > \frac{\sigma_V^{(2)}}{\varepsilon_c} \Leftrightarrow \lambda_{med}^{(1)} < \lambda_{med}^{(2)}$$

Il parametro è identificativo della micro-struttura

G. Angella, F. Zanardi, R. Donnini, *On the significance to use dislocation-density-related constitutive equations to correlate strain hardening with microstructure of metallic alloys: the case of conventional and austempered ductile irons*, Journal of Alloys and Compounds 669 (2016), pp. 262-271

Settore energia e aeronautica

- *La modellazione del comportamento a creep di superleghe a base nichel viene sviluppata mediante l'approccio CDM (Continuum Damage Mechanisms), per cui:*
 - *si ha un diretto collegamento alle proprietà intrinseche del materiale*
 - *si descrive l'evoluzione dell'effettivo meccanismo di danno*
 - *si ottengono equazioni costitutive funzionali alla fase di progettazione*
- *La modellazione CDM del rilassamento di acciai alto-legati, realizzata a partire dall'analisi delle curve di creep:*
 - *permette di "risparmiare" sui tempi di prova sperimentale*
 - *riproduce gli andamenti mantenendo un certo livello di sicurezza*
 - *può ricondurre agli effettivi meccanismi micro-strutturali*

Settore manifatturiero

- *L'analisi delle proprietà di deformabilità del materiale risultano utili nella valutazione di componenti in ghisa*
- *L'approccio su basi fisiche alla descrizione delle curve di trazione permette, nel caso delle strutture lamellari bifasiche, di definire l'opportunità di avere specifiche micro-strutture*