

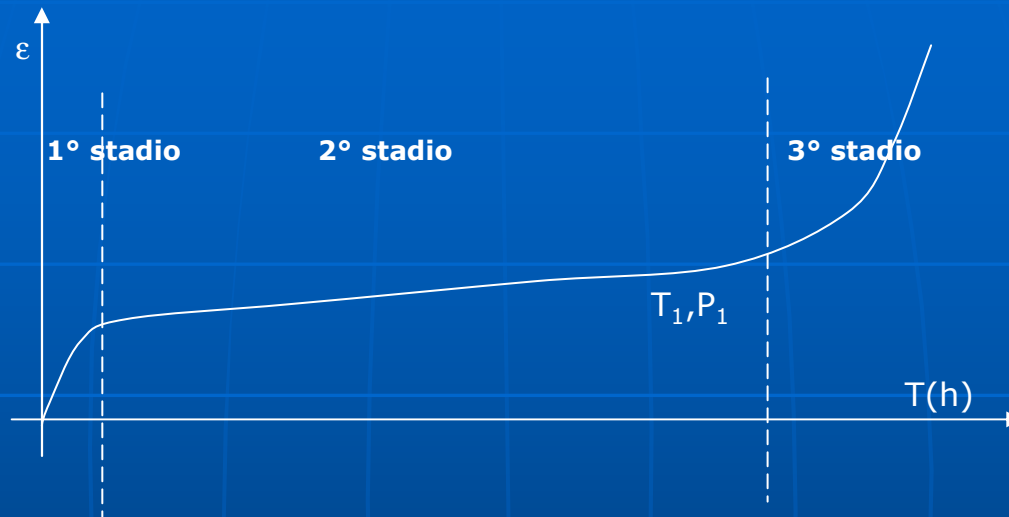
# SCORRIMENTO VISCOSO

## TEORIA E APPLICAZIONI

# DEFINIZIONI

- Lo **scorrimento viscoso** o scorrimento plastico permanente (in inglese **creep**) è la deformazione permanente di un materiale sottoposto, ad alta temperatura, a sforzo costante;
- si manifesta al di sopra della temperatura di scorrimento ( $T_s$ ), coincidente indicativamente con la temperatura di ricristallizzazione e approssimabile alla metà della temperatura di fusione misurata in gradi K.

# Risultati sperimentali



Si distinguono tre fasi:

- la prima (scorrimento primario) individua la parte di deformazione assai rapida che si genera all'atto dell'applicazione del carico
- la seconda (scorrimento secondario) definisce un periodo di tempo, in generale molto lungo e dipendente dalle condizioni di temperatura e carico applicate, in cui la velocità di deformazione è diversa da zero e costante; la deformazione accumulata è permanente
- la terza (scorrimento terziario) rappresenta un fenomeno intrinsecamente instabile che conduce rapidamente alla rottura.

# Interpretazione a livello microscopico

- I tre stadi rilevati sperimentalmente corrispondono a diversi meccanismi di deformazione a livello microscopico:
  - *primo stadio* (creep primario): la deformazione elasto-plastica aumenta rapidamente con velocità decrescente
  - *secondo stadio* (creep secondario): si stabilisce un equilibrio tra l'incrudimento e la ricristallizzazione: la deformazione prosegue a velocità quasi costante e bassa relativamente a quella presente nella fase successiva
  - *terzo stadio* (creep terziario): la deformazione aumenta rapidamente, arrivando velocemente alla rottura.
- E' da sottolineare che, in caso di  $T < T_S$ , lo sforzo costante induce una deformazione elastica e plastica senza che questa continui fino a rottura: non vi è infatti abbastanza energia per il movimento delle dislocazioni, quindi ad un certo punto la deformazione si arresta.

# Interpretazione a livello microscopico

- Il meccanismo alla base dello scorrimento viscoso è una sorta di competizione tra l'incrudimento e i fenomeni di recupero di resistenza strutturale del materiale, che regolano il moto delle dislocazioni.
- Nel primo stadio prevale l'incrudimento e quindi la velocità di deformazione diminuisce nel tempo; nel secondo stadio i due processi si bilanciano e la deformazione prosegue in quanto il rilassamento strutturale riduce il tasso di incrudimento. Infine nel terzo stadio avviene la rottura del materiale.

# Risultati sperimentali

- Le curve rappresentate in figura sono tracciate con:

$$P_1 < P_2 < P_3$$

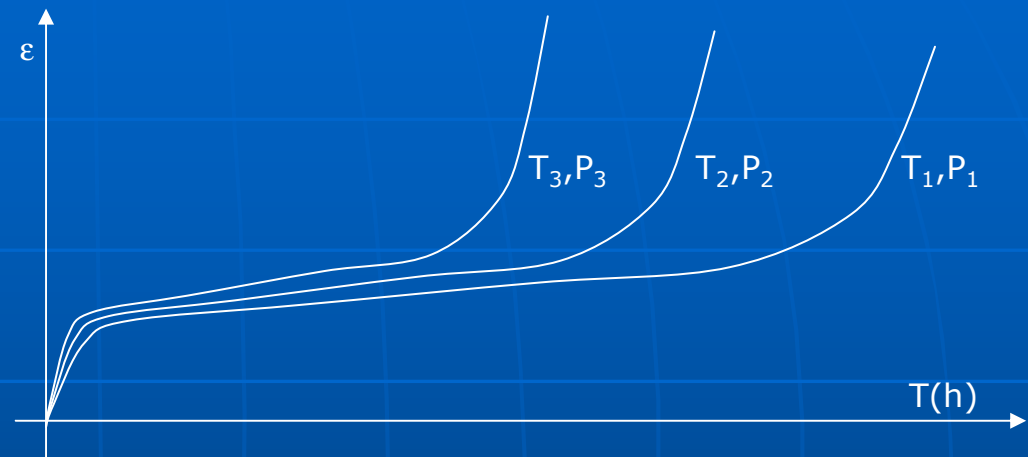
$$T_1 < T_2 < T_3$$

- Il loro andamento mostra che si può "barattare" il tempo con

il carico o la temperatura, cioè si può accelerare o ritardare lo svolgimento della prova aumentando o diminuendo, opportunamente il carico o la temperatura, o entrambi.

Hanno infatti interesse applicativo durate degli elementi meccanici che vanno da  $10^4$  fino a  $10^6$  ore e oltre. E' evidente che una sperimentazione diretta, specie per le durate più lunghe, non è proponibile.

Infatti 10.000 ore corrispondono a 420 giorni e 100.000 a 11,5 anni.



# Esecuzione delle prove

- E' necessario quindi, per fornire dati utili alla progettazione, eseguire sperimentazione accelerate e definire un criterio di equivalenza che consenta, sulla base di dati sperimentali riguardanti alcune terne di valori  $\sigma$  (sforzo),  $T$  (temperatura) e  $t$  (tempo), di valutare tutte le terne possibili per un dato materiale.
- Da un punto di vista qualitativo è stato già mostrato che all'aumentare dello sforzo la durata diminuisce e che essa decresce anche all'aumentare della temperatura.
- E' chiaro allora che, in base a tale comportamento, una volta stabilito il criterio di corrispondenza, è sufficiente eseguire prove per terne di valori con  $t$  corrispondente a tempi organizzativamente ed economicamente accettabili per estrapolare, poi, i risultati a terne di valori caratterizzate da tempi lunghi e temperature inferiori.

# Leggi empiriche

- L'equivalenza sperimentale inoltre fornisce relazioni che oltre che nella fase di caratterizzazione dei materiali può essere utilizzata a fini progettuali
- Molti parametri di tipo empirico sono stati sottoposti per valutare la pericolosità di una certa situazione sperimentale rispetto allo scorrimento viscoso. Tra essi due sono quelli più estesamente validati e, di conseguenza, utilizzati: quello di Larson-Miller e quello di Manson-Haferd.



# Parametro di Larson-Miller

- Il parametro di Larson-Miller ha nella sua formulazione originaria, derivante dai dati sperimentali, l'espressione

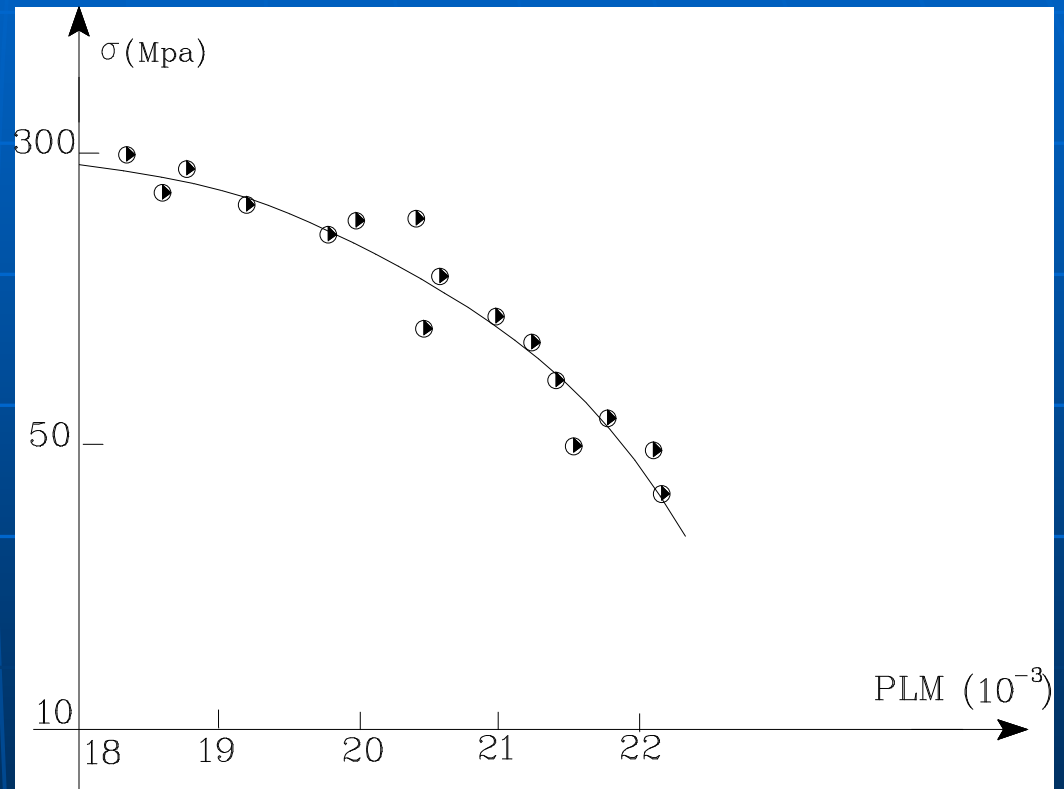
$$PLM = T \cdot (C1 + \log_{10} t_R)$$

dove

- T è la temperatura alla quale si trova l'elemento in esame, espressa in K°
- $t_R$  è il tempo necessario ad arrivare a rottura espresso in ore
- C1 è una costante, solitamente pari a 20 ÷ 22.

# Parametro di Larson-Miller

- Poiché il fenomeno è dipendente, come fattori fondamentali di influenza, dallo sforzo, oltre che dalla temperatura e dal tempo, è piuttosto evidente che PLM deve essere una funzione dello sforzo
- Infatti si trova, per ciascun materiale, un andamento del tipo di quello riportato in figura



# Parametro di Larson-Miller

- Nel diagramma viene evidenziato un legame univoco tra i valori del PLM e dello sforzo che porta a rottura. E' da notare che se si considera influente, per il raggiungimento della crisi del materiale solo lo scorrimento secondario è possibile scrivere

$$\varepsilon_R = t_R \cdot d\varepsilon/dt$$

ed essendo  $d\varepsilon/dt$  costante, si può manipolando opportunamente la relazione, scrivere una seconda formulazione per il parametro di Larson-Miller

$$PLM = T \cdot [C2 - \log_{10} d\varepsilon/dt]$$

essendo, mediamente,  $C2 \approx 20$

# Parametro di Larson-Miller

- In certe condizioni operative non è la rottura quella che può essere definita come crisi del materiale.
- Infatti esistono una serie molto nutrita di organi meccanici per i quali la costanza delle dimensioni è un requisito fondamentale per la corretta funzionalità.
- A titolo di esempio si possono citare tutti gli elementi rotanti che devono avere, nel loro moto, un piccolo gioco rispetto alle parti fisse di contenimento; un caso tipico, a questo riguardo, è costituito dalle palette delle turbine che, per migliorare l'efficienza della macchina, ruotano con un gioco assai ristretto rispetto alla carcassa. Queste ultime sono sottoposte, ad elevata temperatura e a notevoli carichi centrifughi e pertanto sono soggette a scorrimento viscoso. E' chiaro che devono essere sostituite non tanto perché prossime alla rottura, per scorrimento plastico accumulato quanto, piuttosto, perché quest'ultimo può variare, in modo non accettabile, l'altezza della palette e provocare, quindi, interferenza con la carcassa di contenimento.

# Parametro di Larson-Miller

- Solitamente, nelle valutazioni progettuali, la formula seguente è utilizzata per i calcoli a rottura

$$PLM = T \cdot (C1 + \log_{10} t_R)$$

- Per i calcoli a deformazione limitata si utilizzano invece

$$PLM = T \cdot [C2 - \log_{10} d\epsilon/dt]$$

$$\epsilon_R = t_R \cdot d\epsilon/dt$$

# Parametro di Larson-Miller

Del parametro di Larson e Miller si può fornire anche una giustificazione teorica. La correlazione tra le diverse grandezze fisiche, che governano il fenomeno dello scorrimento viscoso, può essere ricavata mediante leggi di tipo fenomenologico che consentono di approssimare in modo sufficientemente preciso i dati sperimentali. In questo ambito è nota la legge di Arrhenius in cui

$$d\varepsilon/dt = A \cdot e^{-\Delta H/KT}$$

dove H è l'energia di attivazione apparente. Supponendo che A sia indipendente dallo sforzo  $\sigma$  e che  $\Delta H$  dipenda dallo sforzo, si ricava, applicando i logaritmi in base 10

$$\Delta H / \log_{10} e \cdot K = T \cdot (C_2 - \log_{10} d\varepsilon/dt) = f(\sigma) = PLM$$

che coincide con la definizione del parametro di Larson Miller

# Parametro di Manson-Haferd

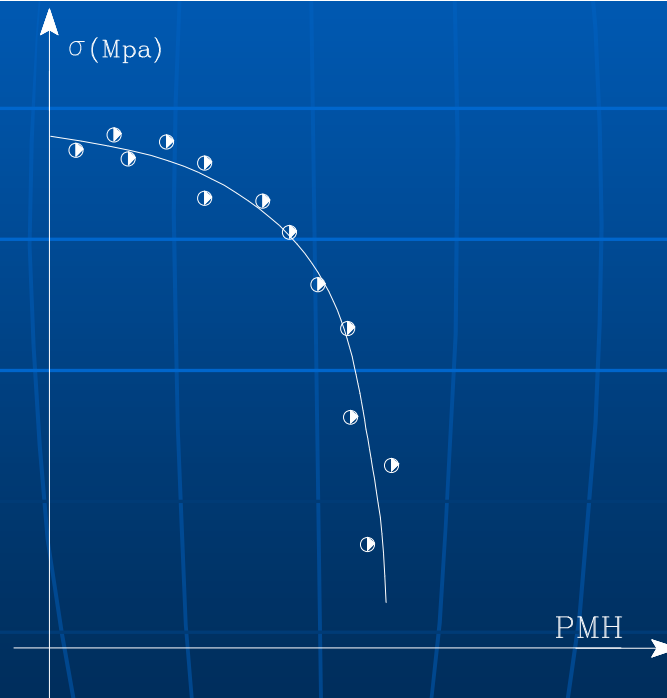
- Il parametro di Manson-Haferd ha la seguente espressione:

$$PMH = 9/5 \cdot (T - T_a) / (\log_{10} t - \log_{10} t_a)$$

- $T_a$  e  $t_a$  sono costanti caratteristiche del materiale mentre  $T$  è la temperatura agente ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $t$  è il tempo in ore per avere la rottura o una specifica deformazione, ovviamente connessa con i valori di  $T_a$  e  $t_a$ .
- Il valore di  $PMH$ , calcolato con la relazione scritta è costante per un certo materiale e per un certo livello di sforzo.

# Parametro di Manson-Haferd

Materiale	Condizione	$T_a$ (°C)	$\text{Log}_{10}t_a$
Acciaio inox	Rottura	310	15
Acciaio al C	Rottura	310	22
Nimonic 80	Rottura	310	17
Nimonic 80	0.1% Def. Plastica	310	17





# Criteri di sovrapposizione

- Come già fatto per la sollecitazione di fatica, anche nel caso dello scorrimento viscoso è necessario mettere a punto un opportuno criterio per la sovrapposizione degli effetti. Numerose sono le proposte in questo senso reperibili in bibliografia, tra queste una delle più diffuse è stata formulata da Robinson in analogia con l'ipotesi di Miner.
- Per essa la condizione limite è raggiunta, nel caso in cui lo stesso elemento sia sottoposto a più condizioni di scorrimento viscoso, quando:  
dove  $t_i$  è il tempo di effettiva esposizione dell'elemento alle condizioni  $i$ -esime ( $T_i$   $e_i$ ) mentre  $L_i$  è il tempo necessario a raggiungere la condizione limite sotto l'azione della sola condizione  $i$ -esima.

$$\sum_{1}^{n} \frac{t_i}{L_i} = 1$$

E' da notare che la condizione limite può essere sia la rottura e sia una deformazione limite prescelta a priori del progettista. Ovviamente i valori di  $L_i$  devono essere congruenti con tale scelta.

# Criteri di sovrapposizione

- Un altro problema di sovrapposizione è quello relativo al caso in cui sia agenti lo scorrimento viscoso e il danneggiamento per fatica.
- Questo si verifica quando ad una sollecitazione media si sovrappone un'oscillazione mentre l'elemento è mantenuto a temperatura elevata.

# Criteri di sovrapposizione

- Alcuni autori nel caso di fatica ad alto numero di cicli propongono di usare la relazione

$$(\sigma_m/\sigma_{sv})^2 + (\sigma_a/\sigma_f)^2 \leq 1$$

- dove

$\sigma_m$  è lo sforzo medio del ciclo

$\sigma_{sv}$  è lo sforzo che provoca la rottura per scorrimento viscoso

$\sigma_a$  è la semiampiezza del ciclo di fatica

$\sigma_f$  è la tensione limite di fatica per ciclo alterno simmetrico