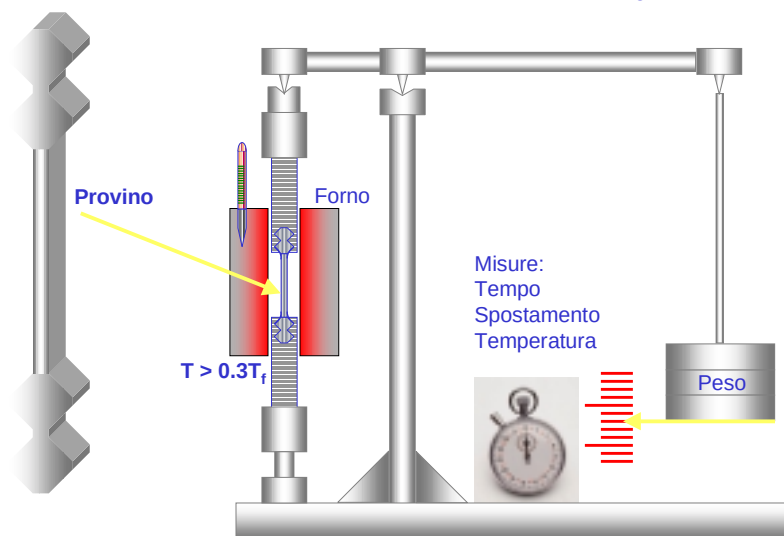


Calcolo a scorrimento viscoso di componenti meccanici

Sottoponendo un provino ad una elevata temperatura e ad un carico costante nel tempo, in esso si verificherà una deformazione progressiva e permanente.

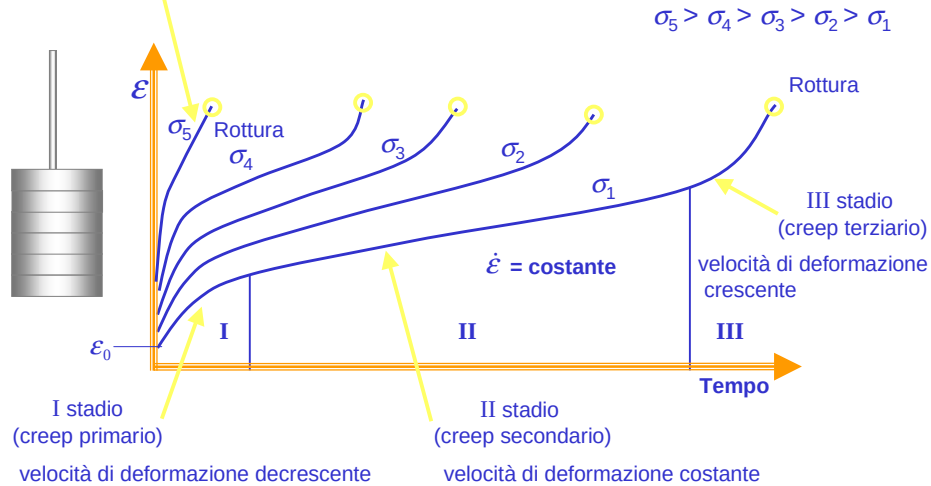
La deformazione aumenta nonostante che la tensione rimanga costante nel tempo



Misurando l'allungamento del provino nel tempo si ottengono curve deformazione tempo:

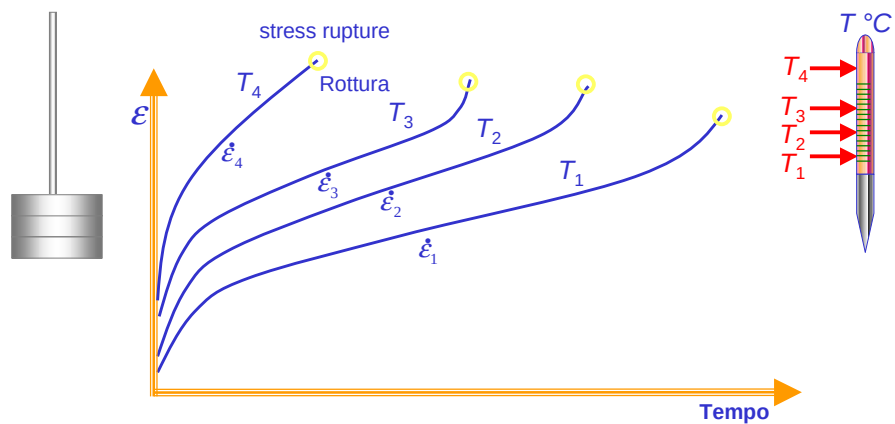
In questa condizione di carico e di temperatura il II stadio è scomparso; (stress rupture)

Aumentando il peso e ripetendo la prova la curva deformazione tempo si modifica, riducendo le durate dei vari stadi e incrementando la velocità di deformazione:

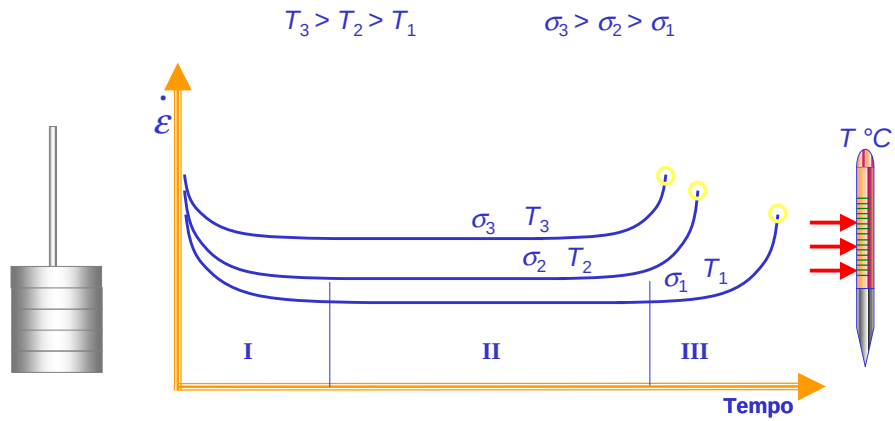


Ripetendo la prova variando la temperatura nel forno e mantenendo costante il peso (la tensione) la curva deformazione tempo si modifica in modo analogo a quanto accadeva incrementando il peso:

$$T_4 > T_3 > T_2 > T_1$$



Gli stessi dati precedenti possono essere rappresentati in termini di velocità di deformazione in funzione del tempo:



Temperature di fusione di alcuni materiali:

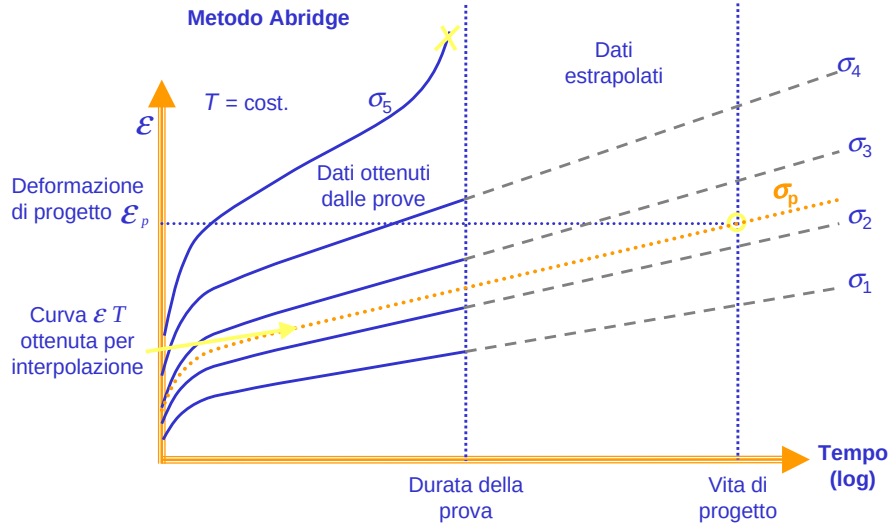
Una indicazione sul valore della temperatura, oltre la quale è opportuno prendere in considerazione il fenomeno del creep, è data dalla temperatura di fusione del materiale:

Materiale	Temperatura di fusione $^{\circ}\text{C}$
Carburo di Afnio	3887
Grafite (sublimazione)	3500
Tungsteno	3370
Carburo di tungsteno	2867
Magnesia	2800
Molibdeno	2620
Boro	2300
Titanio	1795
Platino	1750
Silice	1728
Cromo	1650
Ferro	1540
Acciaio inossidabile	1450
Acciaio al carbonio	1400
Leghe di alluminio	660
Leghe di magnesio	650
Leghe di piombo	320

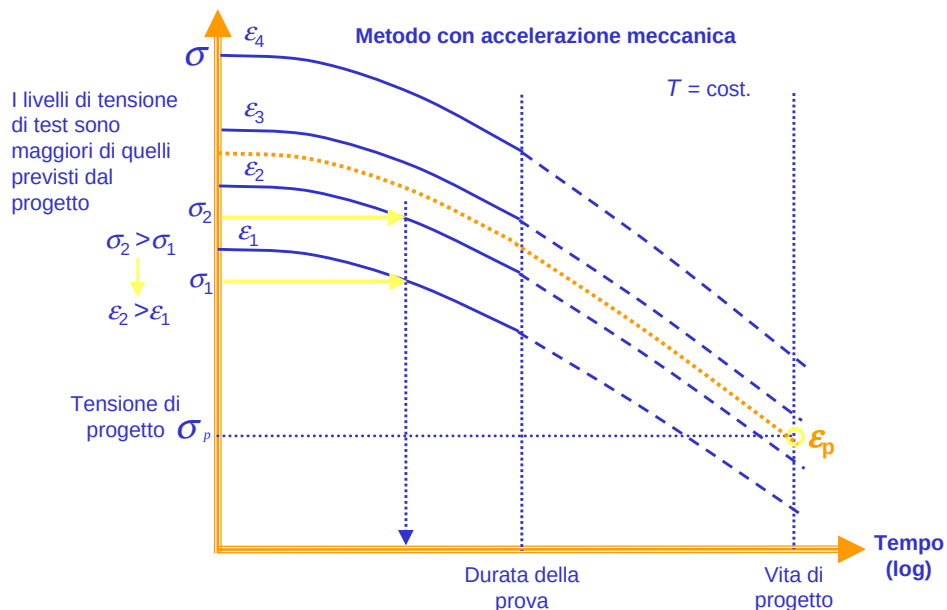
Previsione del comportamento a lungo termine
in base ai risultati di **prove accelerate**

Gli effetti negativi dello scorrimento viscoso, eccessiva deformazione e rottura, si manifestano in tempi lunghi: tipicamente dalle 5 alle 15 migliaia di ore, per come sono generalmente progettati i componenti che funzionano in ambienti ad elevata temperatura.

Metodo Abridge



Previsione del comportamento a lungo termine
in base ai risultati di **prove accelerate**



Previsione del comportamento a lungo termine
in base ai risultati di **prove accelerate**

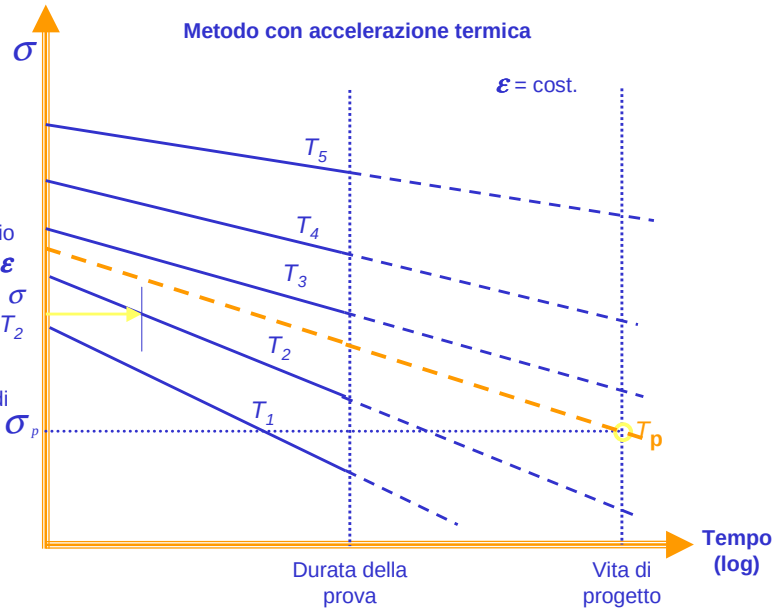
Anche in questo caso i livelli di tensione di test sono maggiori di quelli previsti dal progetto

Tempo necessario a raggiungere la ϵ con la tensione σ alla temperatura T_2

Tensione di progetto σ_p

Metodo con accelerazione termica

$\epsilon = \text{cost.}$



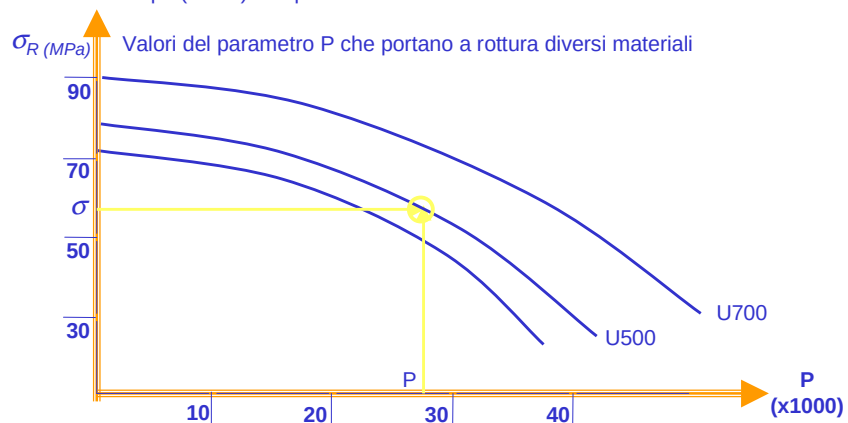
Molte teorie sono state proposte per prevedere il comportamento a lungo termine
in base a i dati ottenuti a breve termine.

Tre le più accurate ed utili troviamo quelle di Larson-Miller e Manson-Haferd.

Larson-Miller: per ogni materiale, ad un certo livello di tensione, esiste un unico valore del parametro P che correla temperatura e tempo, tramite l'equazione:

dove: T è la temperatura ($^{\circ}\text{F}$),
 C è una costante (generalmente = 20),
 t è il tempo (in ore) che porta a rottura il materiale.

$$P = (T + 460)(C + \log t)$$



CDM - Creep

Molte teorie sono state proposte per prevedere il comportamento a lungo termine in base a i dati ottenuti a breve termine.

Tre le più accurate ed utili troviamo quelle di Larson-Miller e Manson-Haferd.

Manson-Haferd. per ogni materiale, ad un certo livello di tensione, esiste un unico valore del parametro P' che correla temperatura e tempo, tramite l'equazione:

dove: θ è la temperatura (°F),
 θ_0 e t_a sono costanti dipendenti dal materiale,
 t è il tempo (in ore) che porta a rottura il materiale.

$$P' = \frac{\theta - \theta_0}{\log t - \log t_a}$$

Valori delle costanti del modello di Manson-Haferd per alcuni materiali

Materiale	Creep o Rottura	θ_a	$\log t_a$
25-20 stainless steel	Rottura	100	14
25-20 stainless steel	Rottura	100	15
S-590 Alloy	Rottura	0	21
DM steel	Rottura	100	22
Inconel X	Rottura	100	24
Nimonic 80	Rottura	100	17
Nimonic 80	$\epsilon_{cr} = 0.2\%$	100	17

CDM - Creep

Applicazione: Larson-Miller: $P = (T + 460)(C + \log t)$

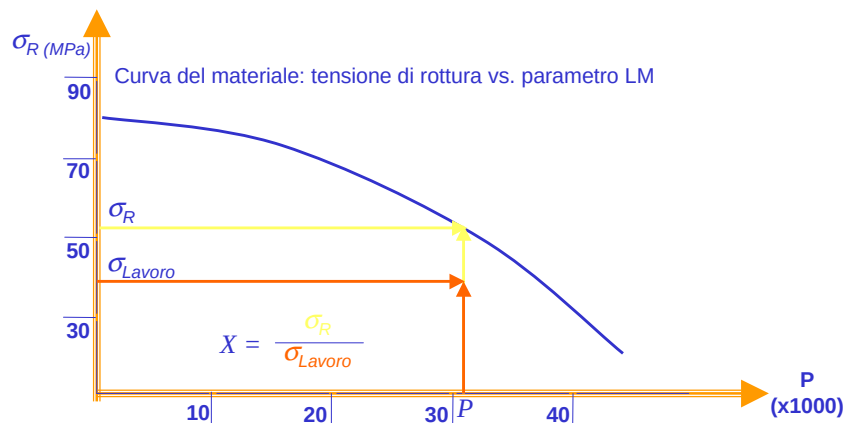
$$T = 800 \text{ } ^\circ\text{F} \quad t = 10'000 \text{ h}$$

$$(800 + 460)(20 + \log 10000) = 30240$$

$$T = 850 \text{ } ^\circ\text{F} \quad t = 1213 \text{ h}$$

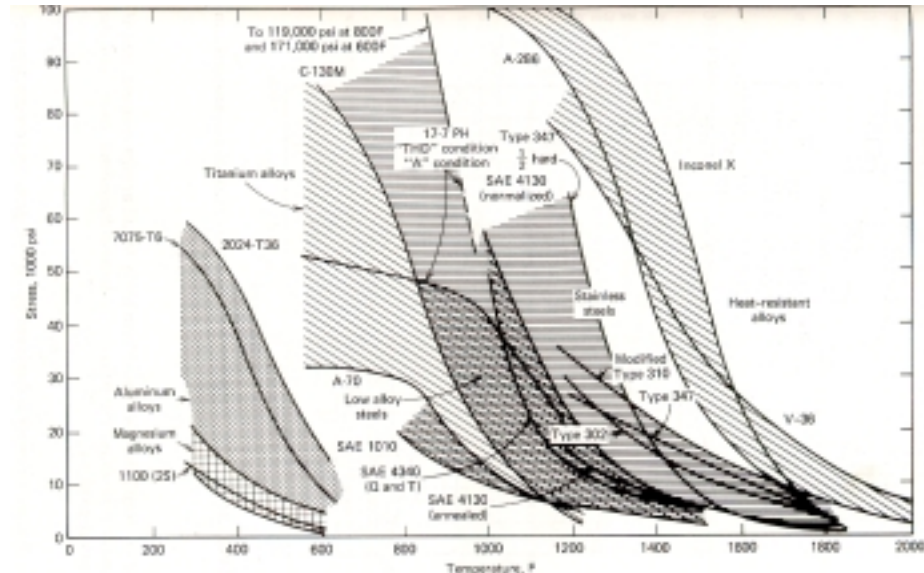
$$(850 + 460)(20 + \log t) = 30240$$

$$t = 10^{\left(\frac{(800+460)}{(850+460)} \right)^{(20+\log 10000)-20}} = 1213$$



Il diagramma mostra i risultati di prove di creep a breve termine.

La tensione letta in ordinata provoca nel provino un allungamento totale del 3%, in un tempo di 10 minuti ed alla temperatura letta in ascissa.



Tensione - deformazione - temperatura - tempo

Molte relazioni sono state proposte per correlare tra loro deformazione, tensione, temperatura e tempo

$$\varepsilon = f(\sigma, T, t)$$

Il comportamento a scorrimento viscoso di molti materiali può essere descritto da relazioni del tipo:

$$\varepsilon = At^a$$

ε deformazione logaritmica dovuta al creep, t tempo
 A, a costanti del materiale ricavate sperimentalmente

derivando rispetto al tempo si ha: $\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = aAt^{(a-1)}$

$$\dot{\varepsilon} = bt^{-n}$$

avendo posto:
 $aA = b$
 $1 - a = n$

dove b, n sono caratteristiche del materiale che possono dipendere da:
 la composizione chimica,
 la temperatura, la tensione,
 il livello di deformazione raggiunto

Il creep primario può essere rappresentato da una relazione del tipo: $\dot{\varepsilon} = C_1 \sigma^{C_2} \varepsilon^{C_3} e^{-C_4/T}$

Nel caso di creep secondario
 può essere utilizzata una relazione del tipo:

$$\dot{\varepsilon} = C'_1 \sigma^{C'_2} e^{-C'_3/T}$$

dove le costanti C_n dipendono dal materiale e T indica la temperatura

Nel caso di creep secondario una relazione molto semplice e spesso utilizzata nel calcolo è:

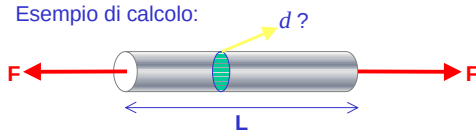
$$\dot{\epsilon} = B\sigma^n$$

dove B ed n dipendono dalla temperatura

Valori di B ed n per alcuni materiali: (t = giorni, tensione=psi)

Materiale	Temperatura	B	n
1030 steel	750°F	48E-38	6.9
1040 steel	750°F	16E-46	8.6
Ni-Cr-Mo steel	850°F	10E-20	3.0

Esempio di calcolo:



Specifica:

Materiale: 1030

$L = 5$ ft

$F = 10\,000$ lb

$T = 750^\circ\text{F}$

durata = 10 anni

massimo allungamento = 0.1 in

X_s fattore di sicurezza = 1.25

$$\sigma_f = \left(\frac{\epsilon}{Bt} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \sigma_f = \left(\frac{0.1/(5 \cdot 12)}{(48E-38) \cdot (10 \cdot 365)} \right)^{\frac{1}{6.9}}$$

$$\sigma_f = 22114 \text{ psi} \quad \sigma_d = \frac{\sigma_f}{X_s} = \frac{22114}{1.25} = 17691 \text{ psi} \quad d = \sqrt{\frac{4F}{\pi\sigma_d}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10000}{\pi \cdot 17691}} = 0.85 \text{ in}$$

Nel caso di creep secondario una relazione molto semplice e spesso utilizzata nel calcolo è:

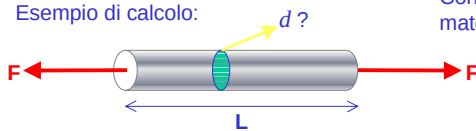
$$\dot{\epsilon} = B\sigma^n$$

dove B ed n dipendono dalla temperatura

Valori di B ed n per alcuni materiali: (t = giorni, tensione=psi)

Materiale	Temperatura	B	n
1030 steel	750°F	48E-38	6.9
1040 steel	750°F	16E-46	8.6
Ni-Cr-Mo steel	850°F	10E-20	3.0

Esempio di calcolo:



Con un diverso materiale si ha:

Specifica:

Materiale: 1040

$L = 5$ ft

$F = 10\,000$ lb

$T = 750^\circ\text{F}$

durata = 10 anni

massimo allungamento = 0.1 in

X_s fattore di sicurezza = 1.25

$$\sigma_f = \left(\frac{\epsilon}{Bt} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \sigma_f = \left(\frac{0.1/(5 \cdot 12)}{(16E-46) \cdot (10 \cdot 365)} \right)^{\frac{1}{8.6}}$$

$$\sigma_f = 29618 \text{ psi} \quad \sigma_d = \frac{\sigma_f}{X_s} = \frac{29618}{1.25} = 23694 \text{ psi} \quad d = \sqrt{\frac{4F}{\pi\sigma_d}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10000}{\pi \cdot 23694}} = 0.73 \text{ in}$$

Tensione - deformazione - temperatura - tempo

Nel caso più generale è possibile utilizzare la seguente relazione:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + k_1 \sigma^n + k_2 (1 - e^{-qt}) \sigma^n + k_3 t \sigma^p$$

↓ deformazione elastica
 ↓ deformazione plastica iniziale
 ↓ creep primario
 ↓ creep secondario

Scorrimento viscoso nel caso di stato di tensione pluriassiale

Le relazioni costitutive in campo plastico, per uno stato triassiale di deformazione, possono essere scritte come segue:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{D} \left[\sigma_1 - \frac{1}{2} (\sigma_2 + \sigma_3) \right] \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{D} \left[\sigma_2 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \right] \quad \varepsilon_3 = \frac{1}{D} \left[\sigma_3 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) \right]$$

dove : $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ sono le deformazioni logaritmiche

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ sono le tensioni "vere", ovvero calcolate in base alla sezione aggiornata

D è il modulo di plasticità, dipendente dal valore della deformazione plastica raggiunta.

$$\frac{\varepsilon_1}{t} = \dot{\varepsilon}_1 = \frac{1}{Dt} \left[\sigma_1 - \frac{1}{2} (\sigma_2 + \sigma_3) \right]$$

Dividendo per il tempo
le precedenti espressioni si ottiene:

$$\frac{\varepsilon_2}{t} = \dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{Dt} \left[\sigma_2 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \right]$$

$$\frac{\varepsilon_3}{t} = \dot{\varepsilon}_3 = \frac{1}{Dt} \left[\sigma_3 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) \right]$$

Scorrimento viscoso nel caso di stato di tensione pluriassiale

Nel caso di stato di tensione monoassiale $\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ si può scrivere:

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{1}{Dt} \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right] \longrightarrow \dot{\varepsilon}_1 = \frac{\sigma_1}{Dt} \quad \text{da cui:} \quad \sigma_1 = \dot{\varepsilon}_1 Dt$$

Richiamando il concetto di tensione equivalente si può scrivere, ancora nel caso monoassiale:

$$\sigma_e = \sigma_1$$

e quindi si può scrivere:

$$\sigma_e = \sigma_1 = \dot{\varepsilon}_1 Dt$$

Nel caso in cui la deformazione per scorrimento viscoso sia esprimibile con la relazione:

$$\dot{\varepsilon}_1 = B(\sigma_1)^n = B(\sigma_e)^n$$

La tensione può essere espressa come:

$$\sigma_1 = B(\sigma_1)^n Dt$$

e quindi:

$$\frac{1}{Dt} = B(\sigma_1)^{n-1} = B(\sigma_e)^{n-1}$$

Nel caso triassiale, accettando il criterio di von Mises, la tensione equivalente si scrive:

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Scorrimento viscoso nel caso di stato di tensione pluriassiale

Introducendo l'espressione trovata: $\frac{1}{Dt} = B(\sigma_e)^{n-1}$ nelle relazioni costitutive si ha:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= B(\sigma_e)^{n-1} \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right] \\ \dot{\varepsilon}_2 &= B(\sigma_e)^{n-1} \left[\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right] \\ \dot{\varepsilon}_3 &= B(\sigma_e)^{n-1} \left[\sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right] \end{aligned} \quad \text{e ponendo:} \quad \begin{aligned} \alpha &= \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \\ \beta &= \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \end{aligned}$$

e introducendo l'espressione della tensione di von Mises al posto di σ_e si ottiene infine:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= Bt(\sigma_1)^n \left[\alpha^2 + \beta^2 - \alpha\beta - \alpha - \beta + 1 \right]^{(n-1/2)} \left[1 - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \right] \\ \varepsilon_2 &= Bt(\sigma_1)^n \left[\alpha^2 + \beta^2 - \alpha\beta - \alpha - \beta + 1 \right]^{(n-1/2)} \left[\alpha - \frac{\beta}{2} - \frac{1}{2} \right] \\ \varepsilon_3 &= Bt(\sigma_1)^n \left[\alpha^2 + \beta^2 - \alpha\beta - \alpha - \beta + 1 \right]^{(n-1/2)} \left[\beta - \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2} \right] \end{aligned}$$

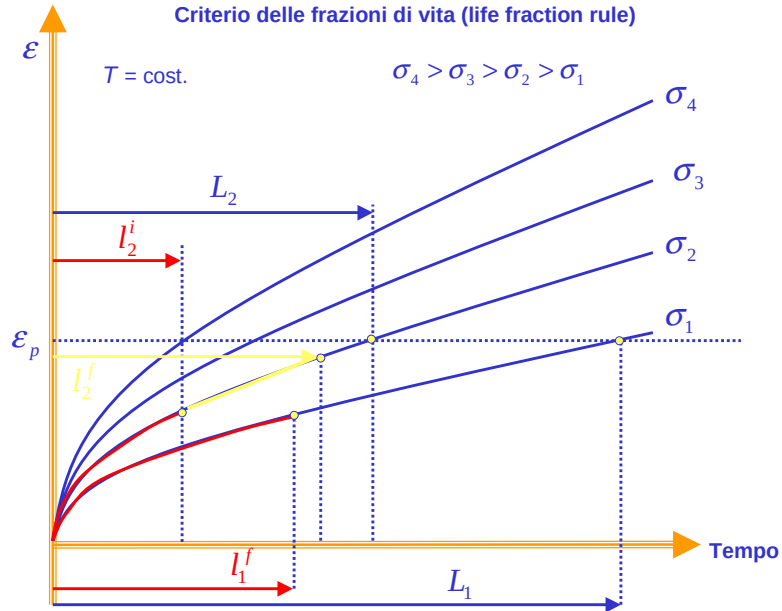
Effetti cumulativi del danneggiamento da creep

Criterio delle frazioni di vita (life fraction rule)

$$l_2^i = \frac{l_1^f}{L_1} L_2$$

$T = \text{cost.}$

$\sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$



Effetti cumulativi del danneggiamento da creep

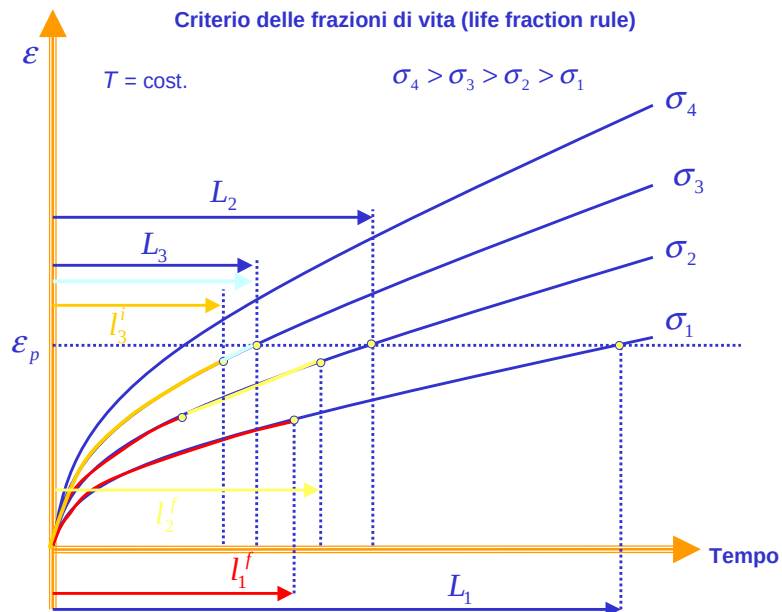
Criterio delle frazioni di vita (life fraction rule)

$$l_2^i = \frac{l_1^f}{L_1} L_2$$

$T = \text{cost.}$

$\sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$

$$l_3^i = \frac{l_2^f}{L_2} L_3$$



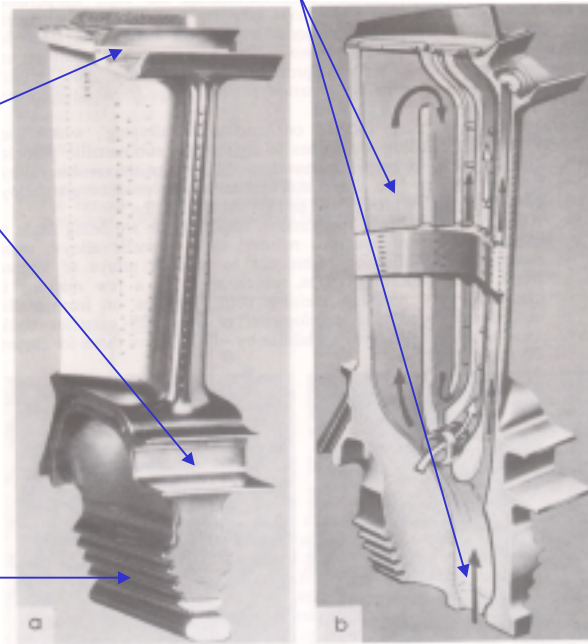
$$l_3^f = L_3$$

Applicazione: Sistema di canali per la circolazione dell'aria di raffreddamento

Paletta di turbina

Tenute a labirinto

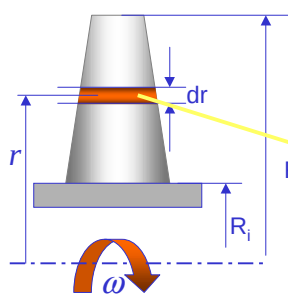
Sistema di fissaggio al disco:
attacco a pino rovescio



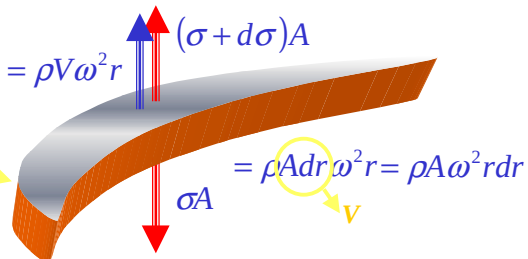
Applicazione:

Paletta di turbina

Ipotesi: sezione costante

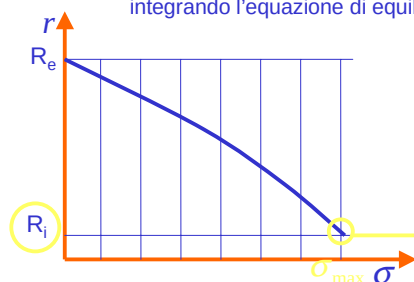


$$m \cdot a = \rho V \omega^2 r$$



$$\text{Equilibrio radiale: } (\sigma + d\sigma)A - \sigma A + \rho A \omega^2 r dr = 0$$

integrando l'equazione di equilibrio tra il raggio interno ed il raggio esterno si ha:



$$\int_{\sigma(r)}^{\sigma_e} d\sigma = -\rho \omega^2 \int_r^{R_e} r dr$$

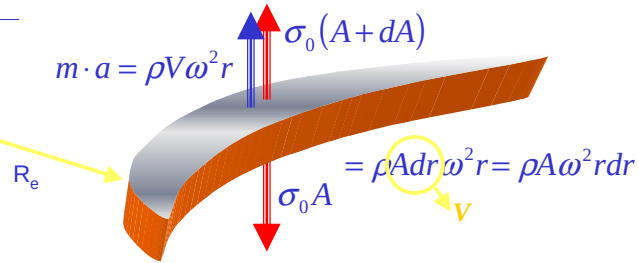
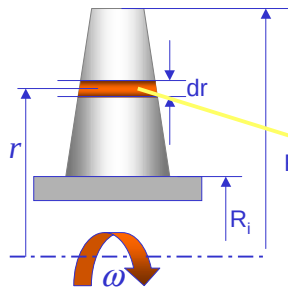
$$\sigma(r) = \frac{\rho \omega^2}{2} (R_e^2 - r^2)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\rho \omega^2}{2} (R_e^2 - R_i^2)$$

Applicazione:

Paletta di turbina

Ipotesi: sezione variabile - tensione costante



Equilibrio radiale: $(A + dA)\sigma_0 - \sigma_0 A + \rho A \omega^2 r dr = 0$

$$\sigma_0 dA = -\rho A \omega^2 r dr \quad \frac{dA}{A} = -\frac{\rho \omega^2}{\sigma_0} r dr$$

$$\int_{A(r)}^{A_e} \frac{dA}{A} = -\frac{\rho \omega^2}{\sigma_0} \int_r^{R_e} r dr$$

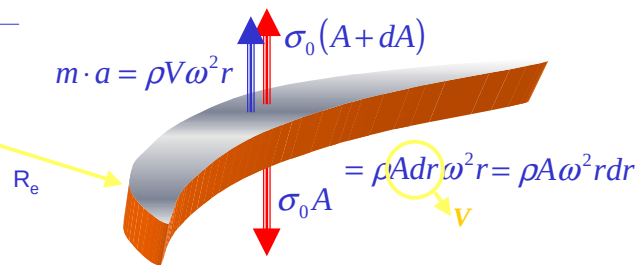
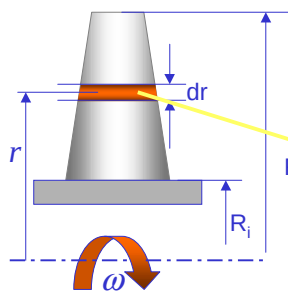
$$\ln \frac{A_{(r)}}{A_e} = \frac{\rho \omega^2}{2\sigma_0} (R_e^2 - r^2)$$

$$A_{(r)} = A_e e^{\frac{\rho \omega^2}{2\sigma_0} (R_e^2 - r^2)}$$

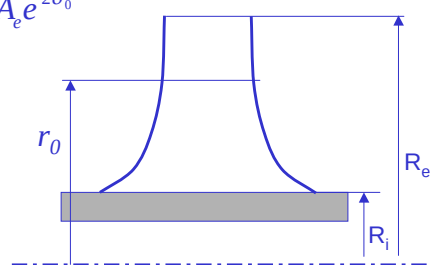
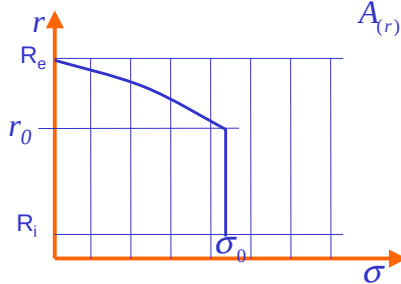
Applicazione:

Paletta di turbina

Ipotesi: sezione variabile - tensione costante



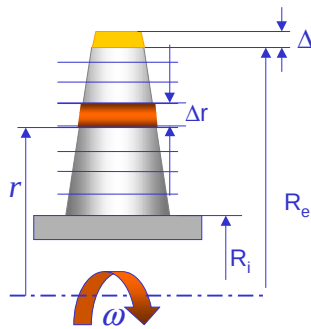
$$A_{(r)} = A_e e^{\frac{\rho \omega^2}{2\sigma_0} (R_e^2 - r^2)}$$



Applicazione:

Paletta di turbina

Ipotesi: sezione costante



Modello di creep secondario: $\dot{\epsilon} = \text{costante}$ $\epsilon = Bt\sigma^N$

Si divide la pala in n sezioni di estensione radiale Δr
Nell'ambito di ogni sezione si consideri costante la σ

L'allungamento di ogni sezione è dato da:

$$\Delta l(r) = \epsilon \cdot \Delta r = \Delta r B t \sigma_{(r)}^N$$

L'allungamento totale della pala è dato da:

$$\Delta l(\text{tot}) = \sum_n \Delta l(r)$$

DATI:

Raggio esterno $R_e = 800 \text{ mm}$ Durata $t = 5000 \text{ ore}$
Raggio interno $R_i = 600 \text{ mm}$ Densità del materiale (lega di Nikel) $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$
Velocità angolare $\omega = 5500 \text{ g/m} = 575.9 \text{ r/s}$
Coefficienti di creep: $B = 8.0 \text{ E-36}$ $N = 3.5$ (Pa, ore)
Allungamento ammissibile $\Delta l = 2 \text{ mm}$ (5000 ore)

Applicazione:

Paletta di turbina sezione costante

Calcolo della tensione in funzione del raggio

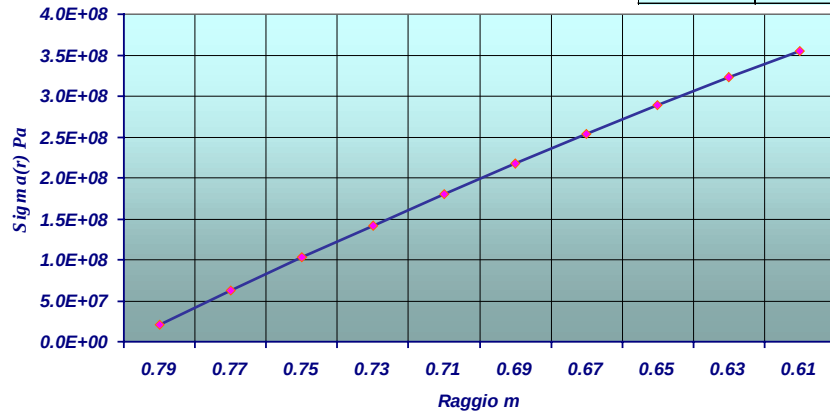
$$\sigma(r) = \frac{\rho \omega^2}{2} (R_e^2 - r^2)$$

$$\sigma(r) = \frac{8000 \cdot 575.9^2}{2} (0.8^2 - r^2)$$

n° sezioni = 10

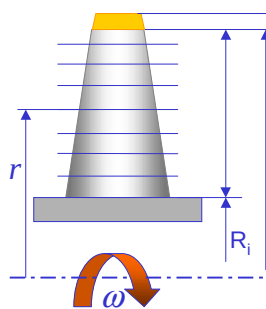
Tensione vs. raggio

r medio	Sigma(r)
0.79	2.1E+07
0.77	6.2E+07
0.75	1.0E+08
0.73	1.4E+08
0.71	1.8E+08
0.69	2.2E+08
0.67	2.5E+08
0.65	2.9E+08
0.63	3.2E+08
0.61	3.6E+08



Applicazione:

Paletta di turbina sezione costante



$\Delta l(tot)$

Calcolo dell'allungamento per scorrimento viscoso

$$\Delta l(r) = \varepsilon \cdot \Delta r = \Delta r B t \sigma_{(r)}^N$$

$$\varepsilon(r) = 8 \cdot 10^{-36} \cdot 5000 \cdot \sigma_{(r)}^N$$

$$\Delta l(r) = h / 10 \cdot 8 \cdot 10^{-36} \cdot 5000 \cdot \sigma_{(r)}^N$$

$$\Delta l(tot) = \sum_n \Delta l(r) = 1.92 \text{ mm}$$

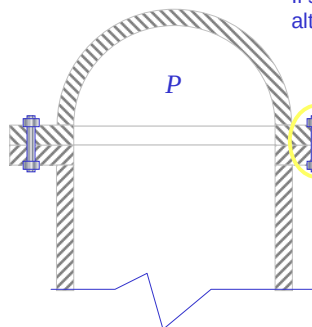
r(i)	r(i+1)	r medio	Sigma(r)	Epsilon (r)	Delta L (r)	Delta L Totale
0.8	0.78	0.79	2.1E+07	1.73E-06	3.45E-08	3.45E-08
0.78	0.76	0.77	6.2E+07	7.72E-05	1.54E-06	1.58E-06
0.76	0.74	0.75	1.0E+08	4.41E-04	8.82E-06	1.04E-05
0.74	0.72	0.73	1.4E+08	1.37E-03	2.74E-05	3.78E-05
0.72	0.7	0.71	1.8E+08	3.15E-03	6.30E-05	1.01E-04
0.7	0.68	0.69	2.2E+08	6.07E-03	1.21E-04	2.22E-04
0.68	0.66	0.67	2.5E+08	1.04E-02	2.08E-04	4.30E-04
0.66	0.64	0.65	2.9E+08	1.63E-02	3.27E-04	7.56E-04
0.64	0.62	0.63	3.2E+08	2.41E-02	4.82E-04	1.24E-03
0.62	0.6	0.61	3.6E+08	3.39E-02	6.77E-04	1.92E-03

$\Delta l(tot)$

Applicazione:

Rilassamento dello stato tensionale

Il serbatoio è in pressione e la temperatura è sufficientemente alta da causare scorrimento viscoso nelle viti



La forza \$F\$ è proporzionale al \$\Delta l\$:

$$F = K \cdot \Delta l_0$$

dove:

$$\Delta l_0 = p \cdot n_g$$

$$K = \frac{EA}{l}$$

Ipotesi:
la rigidità della lamiera è grande (infinita) rispetto a quella delle viti

Ruotando i dadi la vite viene messa in tensione

\$p\$ = passo della filettatura
\$n_g\$ = giri effettuati dal dado

Rigidità della vite

Si vuol calcolare la riduzione della forza \$F\$ nel tempo per effetto dell'allungamento della vite dovuto allo scorrimento viscoso.

La tensione nella vite al momento del serraggio è:

$$\sigma_{iniziale \text{ serraggio}} = \frac{F}{A} = \frac{K \Delta l_0}{A} = \frac{EA}{l} \frac{\Delta l_0}{A} = \frac{E}{l} \Delta l_0$$

Applicazione: Rilassamento dello stato tensionale

Ipotesi: il fenomeno avviene nell'ambito del creep secondario, quindi con velocità di deformazione costante, in condizioni di tensione e temperatura costanti.

La vite, per effetto dello scorrimento viscoso, si allunga con una deformazione permanente data dalla relazione:

$$\varepsilon = Bt\sigma^N$$

L'allungamento permanente della vite riduce il precarico iniziale dovuto al serraggio

L'incremento di deformazione può essere calcolato in un intervallo di tempo Δt sufficientemente piccolo perché la tensione possa essere considerata costante:

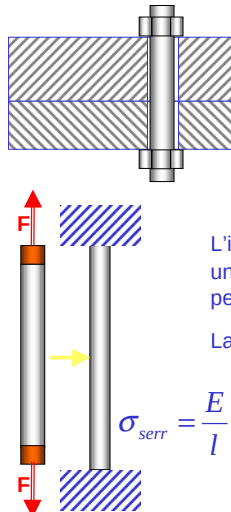
$$\Delta\varepsilon = B\Delta t\sigma^N$$

La conseguente riduzione di tensione vale:

$$\Delta\sigma = EB\Delta t\sigma^N$$

La tensione all'istante di tempo generico t può essere calcolata come segue:

$$\sigma_t = \sigma_{t-1} - \Delta\sigma = \sigma_{t-1} - EB\Delta t\sigma^N$$



Il serraggio può essere schematizzato in due fasi:

- 1) applicazione del carico di serraggio
- 2) applicazione di un vincolo nella configurazione deformata

Applicazione: Rilassamento dello stato tensionale

Tensione iniziale di serraggio $\sigma_0 = \frac{E}{l} \Delta l_0 = \frac{160.0E9}{200.0} \cdot 0.30 = 240.0 \text{ MPa}$

Δt di calcolo = 10 ore

$$\Delta\sigma_1 = -EB\Delta t\sigma_0^N = -160E9 \cdot 4.50E-37 \cdot 10 \cdot (240.0E6)^{3.6} = -1.062 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_2 = -EB\Delta t\sigma_1^N = -160E9 \cdot 4.50E-37 \cdot 10 \cdot (238.94E6)^{3.6} = -1.045 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_3 = -EB\Delta t\sigma_2^N = -160E9 \cdot 4.50E-37 \cdot 10 \cdot (237.89E6)^{3.6} = -1.029 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_4 = -EB\Delta t\sigma_3^N = \dots\dots\dots$$

DATI:

Lunghezza vite $L_0 = 200 \text{ mm}$

$E = 160.0 \text{ GPa}$

Allungamento iniziale $\Delta l_0 = 0.30 \text{ mm}$

Tensione iniziale di serraggio $\sigma = 240.0 \text{ MPa}$

Riduzione % ammissibile di carico di serraggio $\Delta F = -30\%$ $\Delta\sigma = 72 \text{ MPa}$ $\sigma = 168 \text{ MPa}$

Coefficienti di creep:

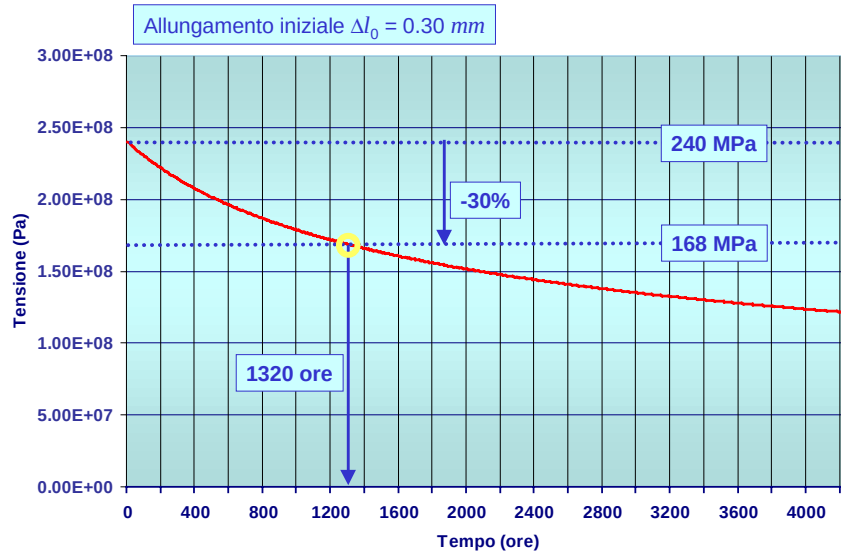
$B = 4.50 \text{ E-37}$

$N = 3.6$

(Pa, ore)

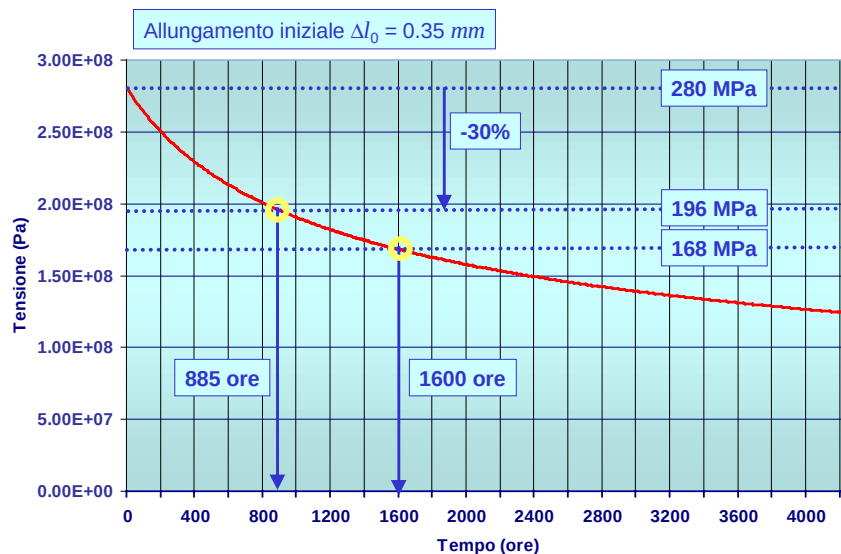
Applicazione: Rilassamento dello stato tensionale

Con la procedura di calcolo descritta e con i dati forniti
si ottiene il grafico della tensione di serraggio nel tempo

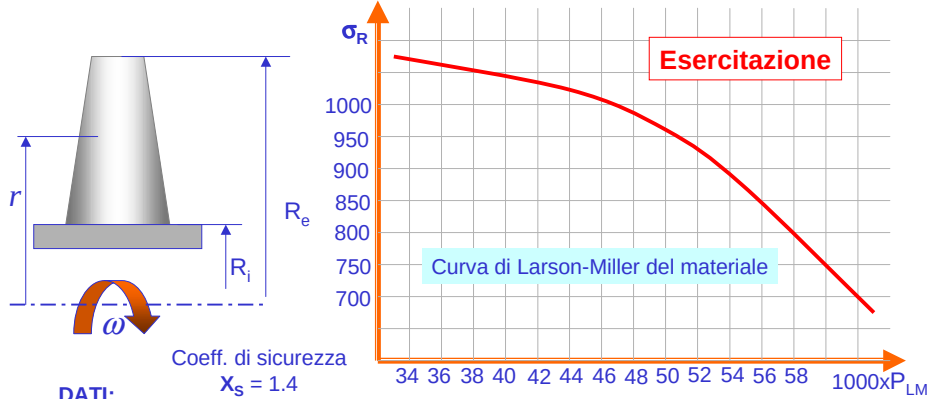


Applicazione: Rilassamento dello stato tensionale

Con la procedura di calcolo descritta e con i dati forniti
si ottiene il grafico della tensione di serraggio nel tempo



Applicazione: Verifica di una paletta di turbina sezione costante



DATI:

Coeff. di sicurezza
 $X_S = 1.4$

Raggio esterno $R_e = 800 \text{ mm}$	Durata $t = 10.000 \text{ ore}$
Raggio interno $R_i = 650 \text{ mm}$	Densità del materiale (lega di Nikel) $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$
Velocità angolare $n = 8200 \text{ g/m}$	$T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$
Coefficienti di creep:	$B = 7.5 \text{ E-36}$ $N = 3.40$ (Pa, ore)
Allungamento ammissibile $\Delta l = 3 \text{ mm}$ (10.000 ore)	

Calcolo a scorrimento viscoso di componenti meccanici

