

Stato di tensione ed aspetti di fatica in elementi filettati per perforazione petrolifera

C. Santus M. Beghini L. Bertini

Università di Pisa. Facoltà di Ingegneria.

Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione



AIAS XXXV / 13 – 16 Sett. 2006
Università Politecnica delle Marche

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il
rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Introduzione

Aspetti della perforazione petrolifera
Connessioni filettate coniche

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione alla radice del filetto, lato Pin

Stato di tensione alla radice del filetto

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico dello stato di tensione iniziale

Condizioni affinché il materiale sviluppi rilassamento
Prove monoassiali di rilassamento ciclico
Modello di accumulo di danno, durante il rilassamento

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Introduzione

Aspetti della perforazione petrolifera
Connessioni filettate coniche

Stato di tensione alla radice del filetto, lato Pin
Stato di tensione alla radice del filetto

Rilassamento ciclico dello stato di tensione iniziale
Condizioni affinché il materiale sviluppi rilassamento
Prove monoassiali di rilassamento ciclico
Modello di accumulo di danno, durante il rilassamento

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

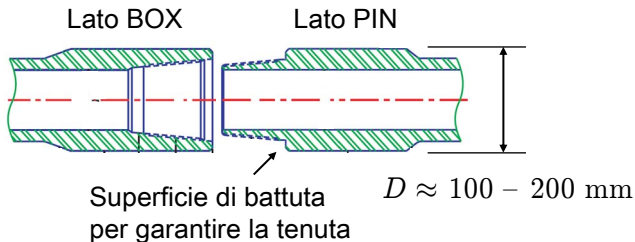
Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il
rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Connessioni filettate coniche



La conicità favorisce le operazioni di apertura e chiusura della connessione.

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

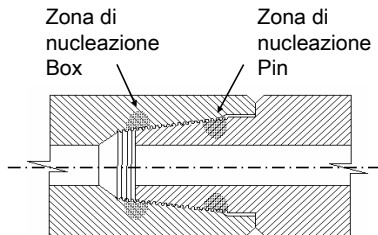
Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Conessioni filettate coniche

Siti di nucleazione



Il filetto in presa d'estremità (per entrambi: Pin e Box) rappresenta il sito di nucleazione della cricca per fatica.

Si possono osservare rotture su entrambi.

Introduzione

Perforazione petrolifera
Conessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

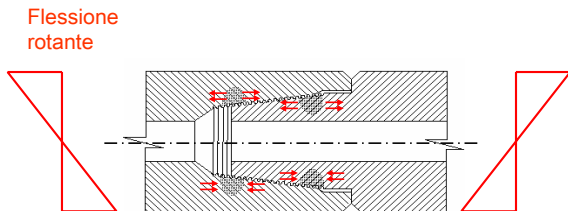
Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Connessioni filettate coniche

Stato di sollecitazione



La flessione rotante produce una tensione alternata nei siti di nucleazione Pin e Box.

Introduzione

Perforazione petrolifera

Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento

Prove di rilassamento

Modello di accumulo

Conclusioni

Introduzione

Aspetti della perforazione petrolifera
Connessioni filettate coniche

Stato di tensione alla radice del filetto, lato Pin Stato di tensione alla radice del filetto

Rilassamento ciclico dello stato di tensione iniziale

Condizioni affinché il materiale sviluppi rilassamento
Prove monoassiali di rilassamento ciclico
Modello di accumulo di danno, durante il rilassamento

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

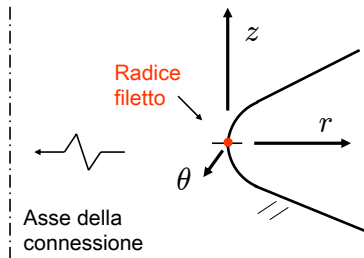
Rilassamento ciclico

Condizioni per il
rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Radice del filetto

Geometria



- ▶ conicità trascurabile, angolo dell'elica del filetto trascurabile;
- ▶ direzioni z , θ , r **principali** (simmetria geometrica e del carico, azioni tangenziali trascurabili);
- ▶ stato di tensione simile alla condizione di stato piano di tensione (*plane strain*).

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

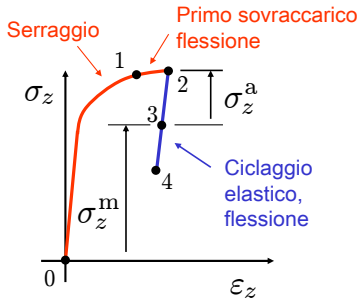
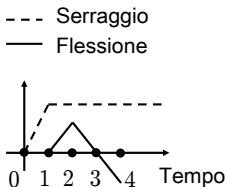
Rilasciamento
ciclicoCondizioni per il
rilasciamento
Prove di rilasciamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Radice del filetto

Stato di tensione, evoluzione temporale

Storia temporale dei carichi



Storia temporale:

- ▶ forte **sovraccarico**, generato dall'operazione di **serraggio** della connessione, (plasticizzazione);
- ▶ successivo ciclaggio **elastico**, generato dalla sollecitazione di **flessione**.

Radice del filetto

Stato di tensione, evoluzione temporale

Stato di tensione alla radice del filetto, al tempo S ,
componente idrostatica

$$\sigma_h = \frac{1 + \nu}{3} \sigma_z \approx 0.433 \sigma_z$$

Stato di tensione alla radice del filetto, al tempo S ,
componenti deviatoriche

$$s_z = \sigma_z - \sigma_h = \frac{2 - \nu}{3} \sigma_z \approx 0.566 \sigma_z$$

$$s_\theta = \sigma_\theta - \sigma_h = -\frac{1 - 2\nu}{3} \sigma_z \approx -0.133 \sigma_z$$

$$s_r = \sigma_r - \sigma_h = -\frac{1 + \nu}{3} \sigma_z \approx -0.433 \sigma_z$$

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il
rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Radice del filetto

Stato di tensione, evoluzione temporale

Incremento di deformazioni plastiche, al tempo S^+ ,
modello di *Prandtl – Reuss*

$$\frac{d\varepsilon_z^P}{s_z} = \frac{d\varepsilon_\theta^P}{s_\theta} = \frac{d\varepsilon_r^P}{s_r} = d\lambda$$

Quindi

$$d\varepsilon_z^P = 0.566 \sigma_z d\lambda \approx 0.5 \sigma_z d\lambda$$

$$d\varepsilon_\theta^P = -0.133 \sigma_z d\lambda \approx 0.0 d\lambda$$

$$d\varepsilon_r^P = -0.433 \sigma_z d\lambda \approx -0.5 \sigma_z d\lambda$$

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il
rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Radice del filetto

Stato di tensione, evoluzione temporale

Dopo un sensibile accumulo di plasticizzazione, la condizione di (quasi) *plane strain* genera un arresto di deformazione secondo θ

$$d\varepsilon_{\theta}^P \approx 0.0 d\lambda$$

Per cui le Eq. di Prandtl – Reuss possono essere sfruttate nel seguente modo

$$d\varepsilon_{\theta}^P = \frac{2}{3} [\sigma_{\theta} - 0.5(\sigma_z + \sigma_r)] d\lambda \approx 0.0 d\lambda$$

essendo $\sigma_r = 0$ segue che:

- ▶ $\sigma_{\theta} \approx 0.5 \sigma_z$
- ▶ $d\varepsilon_z^P = 0.5 \sigma_z d\lambda$
- ▶ $d\varepsilon_r^P = -0.5 \sigma_z d\lambda$

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

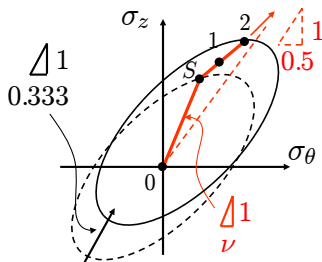
Rilassamento ciclico

Condizioni per il
rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Radice del filetto

Stato di tensione, evoluzione temporale



Muovendosi verso il punto 2 le tensioni nel piano σ_z , σ_θ crescono con un rapporto: $1 \div 0.3 \rightarrow 1 \div 0.5$.

Secondo il modello di **incrudimento cinematico, lineare** nel piano σ_z , σ_θ il dominio elastico segue la pendenza: $1 \div 1/3$.

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

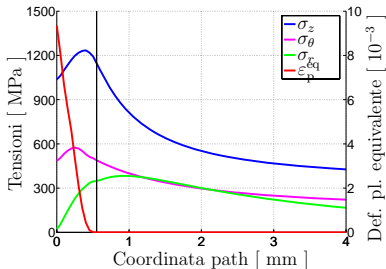
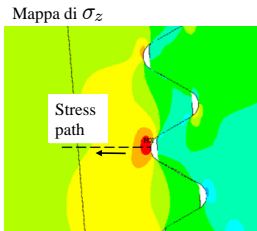
Rilasciamento
ciclico

Condizioni per il
rilasciamento
Prove di rilasciamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Radice del filetto

Stato di tensione, fine accumulo plastico



Caratteristiche dello stato di tensione:

- ▶ rapporto $\sigma_\theta/\sigma_z \approx 0.5$;
- ▶ max σ_z ad una certa profondità;

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

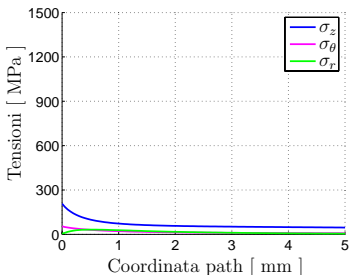
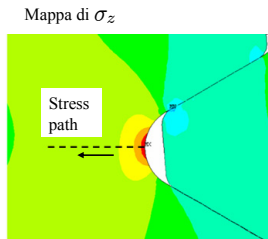
Rilassamento
ciclico

Condizioni per il
rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Radice del filetto

Stato di tensione, componente alternata (flessione)



Caratteristiche dello stato di tensione:

- ▶ tipica distribuzione a gradiente, stato piano di deformazione;
- ▶ in superficie il rapporto $\sigma_\theta/\sigma_z \approx \nu = 0.3$;

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

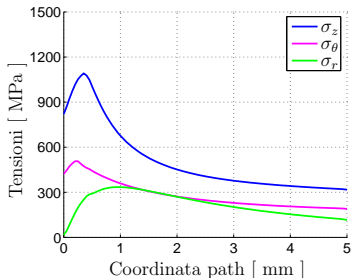
Rilassamento
ciclico

Condizioni per il
rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

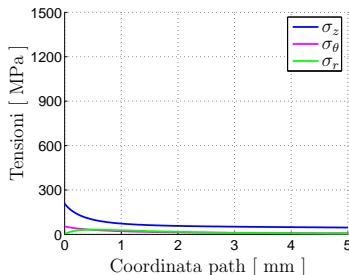
Conclusioni

Radice del filetto

Stato di tensione, componenti medie e alternate



Tensioni medie

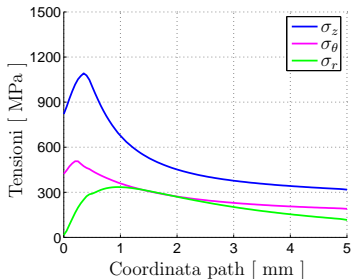


Tensioni alternate

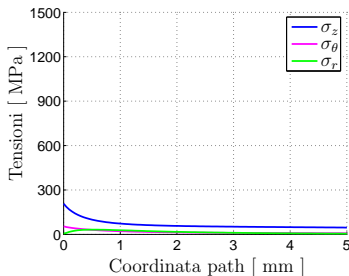
- ▶ componenti medie **elevate**;
- ▶ componenti alternate basse, ciclaggio elastico.

Radice del filetto

Stato di tensione, componenti medie e alternate



Tensioni medie



Tensioni alternate

- ▶ **Elevato** $R = \sigma_z^{\min} / \sigma_z^{\max}$ in superficie.
- ▶ R **crescente** in un primo tratto della profondità.

... quale profondità di interesse?

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

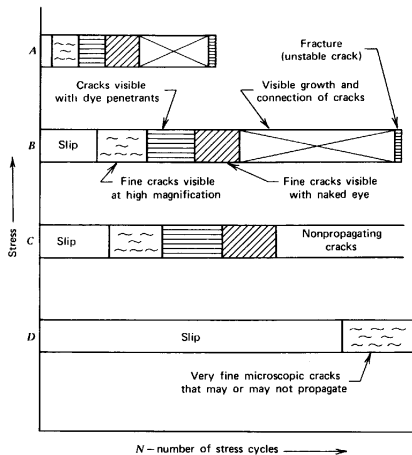
Rilassamento
ciclico

Condizioni per il
rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Limite di fatica

Cricca nella condizione di non propagazione

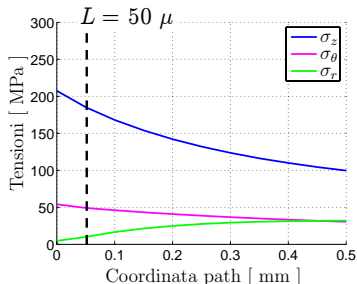
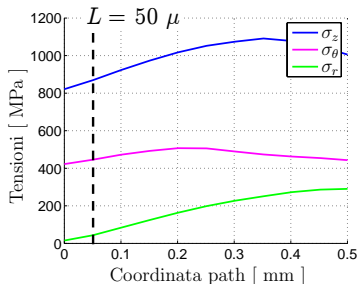


Condizione di
Limite di Fatica

La condizione di limite di fatica prevede la presenza di cricche non propaganti.

Radice del filetto

Gradiente nel volume di processo (distanza critica)



In superficie:

$$\sigma_z^m = 821 \text{ MPa} \quad \sigma_z^a = 208 \text{ MPa} \quad R = 0.60$$

Alla profondità pari alla distanza critica, $L = 50 \mu$:

$$\sigma_z^m = 867 \text{ MPa} \quad \sigma_z^a = 185 \text{ MPa} \quad R = 0.65$$

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Radice del filetto

Possibile approccio, per il calcolo di fatica

AIAS XXXV
Art. 122

C. Santus
M. Beghini
L. Bertini

1. Multiassialità:

- ▶ **carico proporzionale** (direzioni principali fisse della componente alternata);
- ▶ criterio di **Sines** (solo per limite di fatica);

2. Gradiente:

- ▶ non elevato (variazione $\approx 10\%$ alternata, $\approx 10\% R$) all'interno della **distanza critica**;
- ▶ metodo del punto, stato di tensione a $L/2$.

3. Rilassamento ...

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

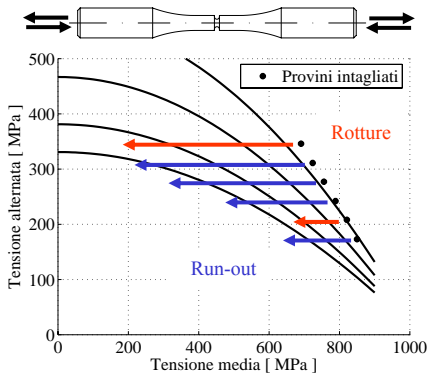
Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Radice del filetto

Evidenza di rilassamento



Il livello di tensione media iniziale è **molto elevato**, in disaccordo con la vita a fatica osservata.

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Introduzione

Aspetti della perforazione petrolifera
Connessioni filettate coniche

Stato di tensione alla radice del filetto, lato Pin
Stato di tensione alla radice del filetto

Rilassamento ciclico dello stato di tensione iniziale

Condizioni affinché il materiale sviluppi rilassamento
Prove monoassiali di rilassamento ciclico
Modello di accumulo di danno, durante il rilassamento

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

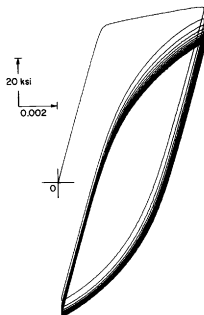
Rilassamento ciclico

Condizioni per il
rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Rilassamento ciclico

Ciclaggio elasto-plastico



Il rilassamento si ottiene nel caso di controllo in **deformazione** con tensione *iniziale* media non nulla.

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento

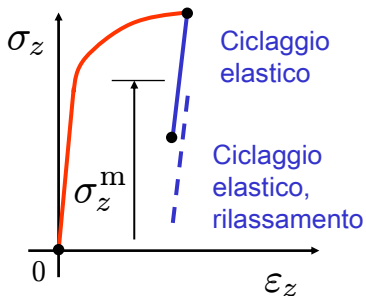
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Modellazione del rilassamento ciclico

Rilassamento con ciclaggio elastico

Ad elevata componente media, si può osservare rilassamento, nonostante **ciclaggio elastico**.



In tal caso il rilassamento tende ad essere **lento** (paragonabile con la **vita a fatica**).

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento

Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Modellazione del rilassamento ciclico

Rilassamento con ciclaggio elastico

Modello monoassiale:

$$\sigma_{mN} = \sigma_{m1} N^r$$



N. E. Dowling.

Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue.

Pearson US Imports and PHIPES.
1999.

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il
rilassamento

Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Modellazione del rilassamento ciclico

Rilassamento con ciclaggio elastico

Modello monoassiale:

$$\sigma_{mN} = \sigma_{m1} N^r$$

In cui:

σ_{m1} Tensione media al primo ciclo

σ_{mN} Tensione media dopo N cicli

l'esponente r ammette una soglia di ampiezza di deformazione:

$$r = \alpha \left(1 - \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_a^{\text{th}}} \right) \quad (\varepsilon_a > \varepsilon_a^{\text{th}})$$

$$r = 0.0 \quad (\varepsilon_a \leq \varepsilon_a^{\text{th}})$$

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

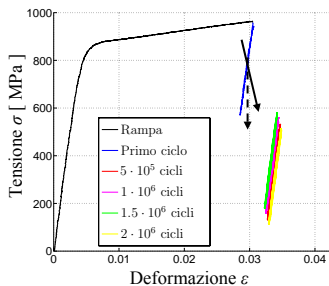
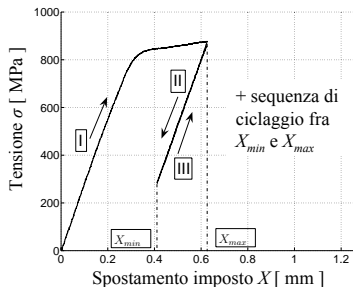
Condizioni per il rilassamento

Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Prove monoassiali di rilassamento ciclico

Controllo di spostamento vs. deformazione



Controllo in **spostamento**, buona rappresentazione del controllo in deformazione.

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento

Prove di rilassamento

Modello di accumulo

Conclusioni

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il
rilassamento

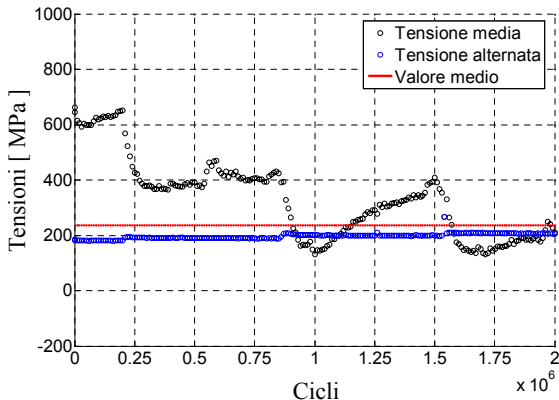
Prove di rilassamento

Modello di accumulo

Conclusioni

Prove monoassiali di rilassamento ciclico

Andamenti ottenuti



- Rilassamento con andamento incerto.

- ▶ Modello di rilassamento (nonostante i suoi limiti).

$$\sigma_{mN} = \sigma_{m1} N^r$$

- ▶ Accumulo di danneggiamento alla *Palmgren – Miner*.

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Rilassamento ciclico

Modello di accumulo di danno

Parabola di *Gerber*, al generico ciclo N durante il rilassamento del provino:

$$\bar{\sigma}_a(N) = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_{mN}}{S_u} \right)^2}$$

Curva di fatica del materiale, vita finita:

$$\sigma_{a,N_f} = \sigma'_f (2N_f)^b$$

Combinando le due equazioni si ottiene la vita stimata per l'attuale livello di tensione σ_{mN} , σ_a :

$$N_f(N) = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\sigma}_a(N)}{\sigma'_f} \right)^{-b}$$

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Legge di accumulo:

$$\sum_{N=1}^{N_{f,r}} \frac{1}{N_f(N)} = 1$$

In cui l'incognita è:

$$N_{f,r}$$

Numero di cicli a fatica (considerando il *rilassamento*).

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

Rilassamento ciclico

Modello di accumulo di danno

Per il rilassamento delle tensioni di trazione:

$$N_{f,r} > N_f(1)$$

ossia la vita prevista è maggiore di quella ottenuta dallo stato di tensione iniziale.

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni

1. Stato di tensione alla radice del filetto:
 - 1.1 multi-assialità tensionale, ma direzioni principali costanti (Sines);
 - 1.2 un **rapporto di carico** R molto alto in superficie e crescente nel volume di processo;
 - 1.3 **rilassamento ciclico**, benefico ai fini della resistenza a fatica.
2. Caratterizzazione sperimentale del rilassamento ciclico (ciclaggio elastico):
 - 2.1 provini lisci assenza di **multi-assialità** e **gradiente**;
 - 2.2 elevata **dispersione** di comportamento, difficoltà nel proporre un modello.
3. Rilassamento da ciclaggio elastico **lento**, modello di accumulo di danno.

Introduzione

Perforazione petrolifera
Connessioni filettate

Stato di tensione

Radice del filetto

Rilassamento ciclico

Condizioni per il rilassamento
Prove di rilassamento
Modello di accumulo

Conclusioni