

Università Politecnica delle Marche



Facoltà di ingegneria

Corso di laurea in ingegneria meccanica

Prove su acciaio laminato a caldo per uso in
applicazioni idrico/sanitarie

Hot rolled steel tests for use in sanitary water
applications

Relatore: Prof. M. Rossi

Laureando: A. Casagrande

Anno accademico 2019/2020

Indice

Introduzione

1 Cenni sulle lamiere

- 1.1 Introduzione
- 1.2 Ciclo di produzione delle lamiere in acciaio laminato a caldo
 - 1.2.1 Produzione del metallo
 - 1.2.2 Laminazione a caldo
 - 1.2.3 Trattamenti termici
- 1.3 Caratteristiche delle lamiere
 - 1.3.1 Anisotropia
 - 1.3.2 Dimensione dei grani
 - 1.3.3 Formabilità delle lamiere
 - 1.3.4 Raggio minimo e massimo di piegatura
- 1.4 Prova di Ford

2 Lavorazioni delle lamiere

- 2.1 Tranciatura e punzonatura
 - 2.1.1 Punzonatura
 - 2.1.2 Gioco nel taglio a perimetro chiuso
 - 2.1.3 Tranciatura
 - 2.1.4 Tranciatura fine
- 2.2 Piegatura delle lamiere
 - 2.2.1 Processo
 - 2.2.2 Piegatura con lamiera ferma
 - 2.2.3 Ritorno elastico
 - 2.2.4 Piegatura con lamiere in movimento
- 2.3 Imbutitura e stampaggio
 - 2.3.1 Imbutitura pezzi assialsimmetrici
 - 2.3.2 Parametri di processo
 - 2.3.3 Ironing
 - 2.3.4 Imbutitura pezzi non assialsimmetrici
 - 2.3.5 Stampaggio

3 Problematiche di corrosione

- 3.1 Introduzione
- 3.2 Tipologie di corrosione
 - 3.2.1 Corrosione generalizzata
 - 3.2.2 Corrosione galvanica
 - 3.2.3 Corrosione per vaiolatura
 - 3.2.4 Corrosione sottodeposito
 - 3.2.5 Corrosione intergranulare
 - 3.2.6 Corrosione sottotensione

3.3 Caso dell'acciaio

3.4 Protezione dalla corrosione

3.4.1 Quantificazione della corrosione

3.4.2 Stratagemmi di protezione

4 Prova di trazione

4.1 Elementi della prova

4.1.1 Il provino

4.1.2 Macchina di trazione

4.2 Procedimento

4.2.1 Fase elastica

4.2.2 Fase di transizione

4.2.3 Fase plastica vera e propria

4.2.4 Strizione localizzata

4.2.5 Rottura

4.2.6 Conclusioni

4.3 Curva trazione nominale

4.4 Effetti sulla curva

4.4.1 Effetto della temperatura

4.4.2 Effetto della velocità di deformazione

4.5 Prova di compressione

5 Fatica

5.1 Cos'è la fatica?

5.2 Meccanismo del danneggiamento per fatica

5.2.1 Approccio energetico secondo Griffith

5.3 Controlli non distruttivi

5.4 Principali fattori che influenzano la fatica

5.4.1 Finitura superficiale

5.4.2 Corrosione del materiale

5.4.3 Effetto taglia

5.4.4 Gradiente e/o tipo di sollecitazione

5.4.5 Presenza di intagli

5.4.6 Effetto della temperatura

5.4.7 Tensioni residue

5.5 Calcolo della vita a fatica di un componente

6 Fatica termomeccanica

6.1 Convezione

6.1.1 Moti convettivi

6.1.2 Coefficiente di convezione

6.1.3 Equazione di convezione

6.2 Fatica termomeccanica

6.2.1 Introduzione

6.2.2 Effetti dello sfasamento tra carico meccanico e termico

6.2.3 Previsione vita di pezzi sottoposti a fatica termomeccanica

7 Test effettuati

7.1 Fase 1: Disegno e realizzazione del provino

7.2 Fase 2: Prove di trazione

7.2.1 Prova 1

7.2.2 Prova 2

7.2.3 Prova 3

7.2.4 Prova 4

7.2.5 Risultati e considerazioni

7.3 Fase 3: Prove di fatica

7.3.1 Setup della prova

7.3.2 Risultati

7.3.3 Considerazioni

Bibliografia

Introduzione

Si chiede di effettuare dei test sia di trazione che di fatica, per quanto riguarda un acciaio usato nelle applicazioni idrico sanitarie, più precisamente nei boiler.

I boiler sono di più dimensioni, ma in tutti e tre i casi sono di dimensioni non elevate (sotto i 50l).

I pezzi interessati sono ottenuti da delle lamiere stampate che vanno a formare le 2 parti che si incastrano fra loro



fig.1.0 foto dei boiler

Lo scopo della tesi è quello di sottoporre dei provini di materiale alle prove di trazione e di fatica, al fine di:

- verificare i dati della casa madre
- individuare il limite di fatica
- capire l'effetto che provoca la presenza dello smalto

La tesi articola in una parte più bibliografica, c'è una prima parte sulle lamiere, nella quale si parla delle caratteristiche generali delle stesse e delle loro lavorazioni, finita questa parte ve ne è una sulla corrosione, visto che i boiler sono riempiti d'acqua, che con il tempo, può dare problemi. Si passa poi ad una parte sulla prova a trazione, nella quale si spiega come si fa la prova a trazione, ed una parte sulla fatica.

In fine vi sono le prove pratiche effettuate sui campioni di cui sopra.

Cenni sulle lamiere

1.1 Introduzione

Nella vita usuale per lamiera si intende un corpo di forma prismatica che ha una dimensione molto minore delle altre due: lo spessore. A livello industriale le lamiere sono importanti per la loro lavorabilità, infatti grazie al limitato spessore, la rigidità lungo la direzione dello stesso è limitata, questo comporta, come già detto, una buona lavorabilità, ma anche un rischio di rottura abbastanza elevato. I vantaggi dell'uso di lamiere metalliche sono molteplici:

- Lavorabilità (imbutitura, foratura, tranciatura e altre operazioni)
- Facilmente riciclabile
- Costo relativamente limitato

Secondo la normativa UE con lamiera si intende un prodotto dalla superficie piana e rettangolare con una larghezza non minore di 600mm, che si ricava dal taglio di un nastro largo o di un nastro largo cesoiato. Tra le principali proprietà della lamiera abbiamo l'attitudine a diversi processi di saldatura e il fatto che tale materiale può essere utilizzato per rivestire di metallo un altro materiale per immersione a caldo o per via elettrolitica.

1.2 Ciclo di produzione delle lamiere in acciaio laminato a caldo

Si divide in 3 fasi:

1.2.1 Produzione del metallo

è un processo a caldo che consiste nella fusione di vari materiali metallici e materiali scorificanti per liberare il metallo da eventuali materiali indesiderati. Da questa fase esce un getto di forma parallelepipedica da fusione.

Questo procedimento avviene così:

- La ghisa proveniente dall'altoforno viene messa in una siviera (contenitore rivestito di refrattario)
- Il metallo viene pretrattato per ridurre le concentrazioni di zolfo, silicio e fosforo attraverso l'aggiunta del magnesio in polvere.
- Viene messo dell'ossigeno a $N^{\circ}Mach=1$ nel metallo con una lancia raffreddata, questo fa sì che il carbonio brucia, e come prodotti ho biossido di carbonio e monossido di carbonio. Questo processo fonde gli scarti, abbassa il tenore di carbonio nella colata, e aiuta il pezzo a rimuovere gli elementi indesiderati.
- I getti vengono versati nello stampo e formano la loppa che assorbe le impurità del processo di lavorazione.
- L'acciaio viene versato in una grande siviera ("tapping dell'acciaio") ulteriormente rifinito nella fornace con elementi additivi vari (es cromo ecc.)
- L'acciaio è pronto per essere preso e stampato, dandogli la forma che serve ai processi successivi.

1.2.2 Laminazione a caldo

Il lamierato in questione è ottenuto tramite laminazione a caldo, procedimento di lavorazione meccanica che, sfruttando le alte temperature, porta i metalli alla massima plasticità, consentendo di ridurre lo spessore o il diametro. In altre parole, il materiale originario (in genere consistente in un semilavorato grezzo sotto forma di bramma, di blumo o di billetta di acciaio) viene riscaldato fino a quando non raggiunge una temperatura tale da consentirne la deformazione plastica. La lavorazione a caldo avviene facendo scorrere il materiale originario all'interno dell'impianto di laminazione. L'impianto di laminazione sopra citato è composto da più parti meglio descritte sotto:

- a) un forno di riscaldamento necessario per portare il semilavorato alla temperatura di massima plasticità
- b) un treno di laminazione, cioè la parte dell'impianto in cui avviene la deformazione plastica
- c) dispositivi accessori quali gabbie scagliatrici, rulli, dispositivi per la manipolazione dei lingotti (manipolatori, ribaltatori, trascinatori, elevatori), dispositivi per il taglio, placche di raffreddamento e sistema per l'avvolgimento.

Nel treno di laminazione sono presenti delle armature fisse (cosiddette gabbie di laminazione) al cui interno è inserita una coppia di rulli o cilindri posti ad una distanza inferiore rispetto a quella del semilavorato grezzo: in tal modo, l'azione di schiacciamento dei rulli genera necessariamente una riduzione della sezione trasversale del pezzo, una diminuzione del suo spessore e un conseguente allungamento nella direzione della laminazione. Ovviamente, per raggiungere le dimensioni, lo spessore o il diametro richiesti, può rendersi necessario ripetere più volte il procedimento, in maniera tale da ottenere, sfruttando più riduzioni successive, la dimensione finale richiesta. L'ultima parte del processo è il raffreddamento controllato, durante il quale l'acciaio viene messo su un sistema di rastrelli che permette di raffreddare l'acciaio in diverse maniere per avere la struttura cristallina adeguata.

Vi sono più tipi di laminazione a caldo:

1. laminazione con trattamento termico in linea, come avviene per la produzione di barre
2. Laminazione con acciaio microlegato (processo usato per la produzione di rotoli, caratterizzati da una maggiore lavorabilità);

3. Laminazione con successiva stiratura o ribobinatura (particolarmente usato per la produzione di staffe).

In alcuni casi viene richiesto un aumento delle prestazioni meccaniche che sono ottenute con:

-microalligazioni di Ni, V e Ti, che formano carburi e affinano il grano, questo aumenta la resistenza meccanica dell'acciaio, ma ne diminuisce la lavorabilità
soluzioni sostituzionali, ovvero, si sostituiscono agli atomi di C degli atomi di Mn, P e Si, conferendo formabilità migliore.

Le lamiere ottenute per laminazione a caldo di solito sono in 4 tipi:

- Qualità commerciale: servono per usi generici, non avrò quindi sforzi impegnativi.
- Qualità per stampaggio
- Indurite per precipitazione
- Indurite per trattamenti termici

1.2.3 Trattamenti termici

I trattamenti che interessano a noi sono quelli che aumentano la duttilità delle lamiere

Ricottura

La ricottura completa prevede dopo il riscaldamento, un mantenimento e un raffreddamento lento, questo trattamento è uno dei più vicini al raffreddamento per stadi infinitesimi, come nel diagramma ferro-carbonio.

Le curve CCT sono attraversate molto in alto, questo comporta:

- struttura grossolana
- durezza bassa
- struttura più omogenea e regolare
- omogenizzazione della composizione chimica

Di solito questa lavorazione si usa per rendere il materiale più lavorabile in deformazione plastica, o tramite macchine utensili.

Normalizzazione

E' spesso usata al posto della ricottura, è uguale al precedente, però non ho un raffreddamento per stadi infinitesimi, ma in aria calma. Aumentando la velocità di raffreddamento ho:

- strutture più fini a livello di grani
- risparmio economico nel processo
- struttura più omogenea e regolare

Siccome la normalizzazione viene eseguita all'inizio dei processi lavorativi, avere grano fine mi porta a dover applicare più forza per deformare il pezzo, quindi faccio seguire questo processo dalla ricottura di lavorabilità.

L'insieme dei 2 processi è detto **rigenerazione**.

Ricottura di lavorabilità

E' un processo che prevede il riscaldamento e il mantenimento del pezzo a circa 600°C (in realtà posso stare anche sotto). Il raffreddamento è eseguito arbitrariamente. Questo processo migliora la lavorabilità alle macchine utensili visto che la perlite passa da lamellare a globulare diminuendo così la sua durezza.

Questo processo fatto a 300°C circa prende il nome di **distensione** e serve a ridurre le tensioni residue.

1.3 Caratteristiche delle lamiere

1.3.1 Anisotropia

L'anisotropia nelle lamiere è influenzata dal processo meccanico di produzione delle stesse, oltre che dai trattamenti a cui sono sottoposte. Ne distinguo due:

1.3.1a) **Anisotropia normale**: diverso comportamento tra il piano della lamiera e la direzione dello spessore. Per riuscire a valutarla prendo dei provini dalla lamiera, orientati rispettivamente a 0°, 45° e 90° e li sottopongo alla prova di trazione, misurando le deformazioni, in seguito valuto il coefficiente R, indice di anisotropia normale, per ogni direzione:

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{t_0}{t_f}\right)}$$

Dove

w_0 = larghezza iniziale (m)

w_f = larghezza finale (m)

t_0 = spessore iniziale (m)

t_f = spessore finale (m)

ϵ_w = deformazione lungo la direzione della larghezza (adimensionale)

ϵ_t = deformazione lungo la direzione dello spessore (adimensionale)

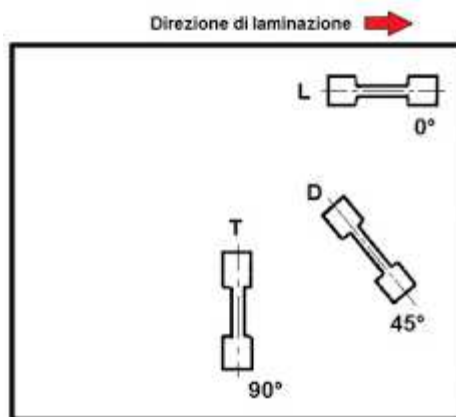


Fig. 1.1 orientamento dei provini per le prove

Avrò quindi 3 valori di R, che mi permettono di calcolare R_m:

$$R_m = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4}$$

Dove

R₀ = R coefficiente R calcolato sul provino orientato a 0°

R₄₅ = R coefficiente R calcolato sul provino orientato a 45°

R₉₀ = R coefficiente R calcolato sul provino orientato a 90°

Se il comportamento del materiale è perfettamente isotropo le due ϵ sono uguali, e R=1.

L'effetto principale dell'anisotropia normale si ha quando $R < 1$, e tende verso valori bassi, questo comporta che il materiale tende ad assottigliarsi molto lungo lo spessore della lamiera, favorendo le fratture duttili.

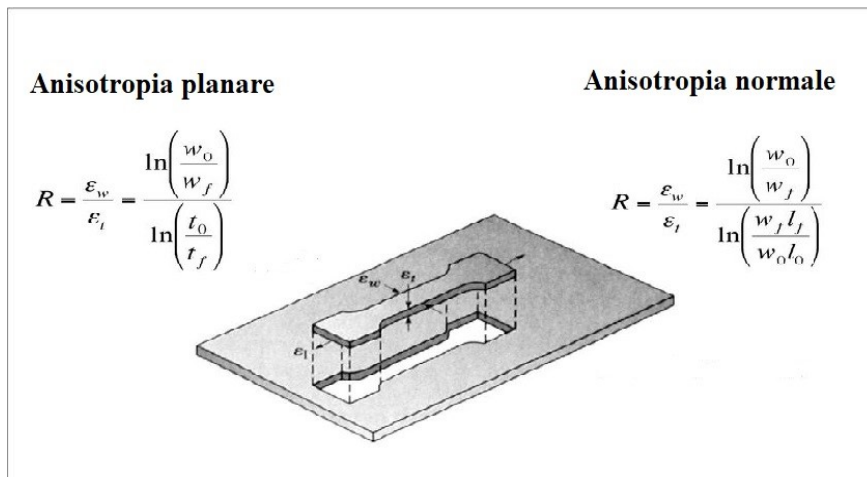


Fig. 1.2 illustrazione anisotropia planare e normale

1.3.1b) **Anisotropia planare:** diverso comportamento fra le direzioni nel piano della lamiera. Anche in questo caso per valutarla eseguo delle prove di trazione su provini orientati rispettivamente a 0° , 45° e 90° , calcolo quindi 3 coefficienti R: R_0 , R_{45} , R_{90} , calcolo quindi ΔR :

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{4}$$

Dove i coefficienti R sono stati illustrati precedentemente

Nel caso in cui $\Delta R = 0$, ho isotropia planare. L'anisotropia planare comporta il problema della formazione delle "orecchie", ovvero un bordo ondulato che va eliminato, perdendo tempo e sprecando materiale.

In generale nelle lamiere si cerca un valore R_m il più alto possibile, così da allontanarsi dal rischio di rotture fragili, mentre si cerca un valore ΔR il più prossimo allo zero, per eliminare il problema delle orecchie.

1.3.2 Dimensione dei grani

In generale maggiore è la dimensione del grano, minore è la resistenza meccanica, la durezza, mentre maggiore è la duttilità. La resistenza meccanica è inoltre descritta dalla legge di Hall-Petch:

$$\delta_{sn} = \delta_i + \sqrt{\frac{k}{d}}$$

Dove

δ_{sn} = tensione di snervamento (Mpa)

δ_i = tensione di snervamento di soglia (Mpa)

k = costante che descrive le dislocazioni (N^2/m^3)

d = diametro medio del grano (m)

L'equazione di Hall-Petch vale solo se la temperatura di prova è inferiore alla temperatura di ricristallizzazione del materiale. Con l'aumentare della dimensione dei grani, la superficie appare più ruvida e può dare un effetto di buccia di arancia.

Ovviamente l'orientamento e la forma dei grani sono caratteristiche essenziali per avere lamiere isotrope.

1.3.3 Formabilità delle lamiere

E' la capacità della lamiera stessa di subire deformazioni plastiche senza rompersi.

E' funzione dell'anisotropia (più normale che planare) e del coefficiente di incrudimento.

Può essere valutata in più modi, ne vediamo alcuni:

1.3.3a) Il **bulge test** è utilizzato per simulare le operazioni di formatura di lamiera. Un provino circolare di lamiera, bloccato lungo il perimetro a una matrice viene espanso mediante l'azione di una pressione idrostatica, che simula l'azione del punzone. Il processo consiste in una stiratura biassiale pura, priva di attrito. Il limite di espansione è indicato dall'altezza raggiunta prima della rottura e descrive la formabilità e la qualità della lamiera. Questa prova permette di ottenere curve di trazione reali per carichi biassiali senza l'influenza dell'attrito presente all'interfaccia tra punzone e lamiera.

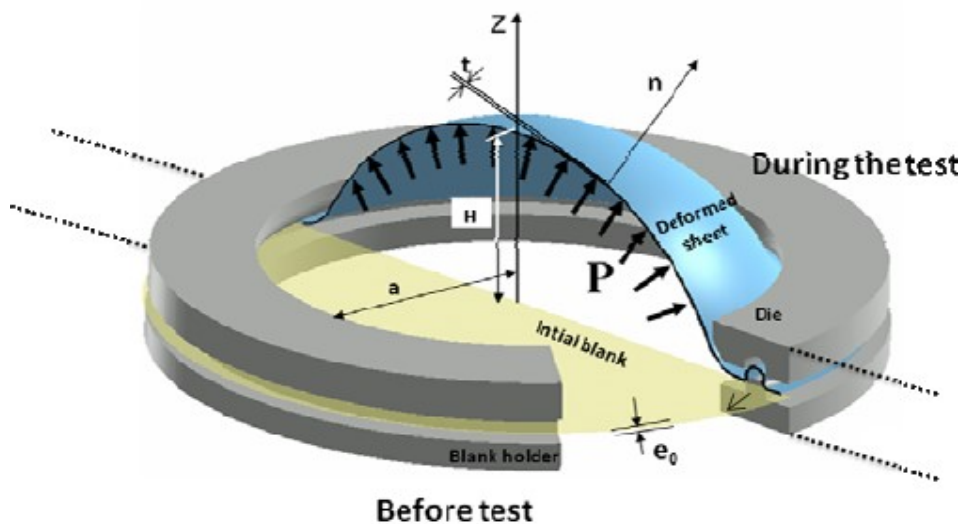


Fig. 1.3 illustrazione del bulge test

Durante il bulge test ho alcuni aspetti critici:

-La parte di lamiera completamente bloccata, non partecipa al processo, questo crea dei stati di tensione più severi di quelli reali, il bloccaggio va comunque fatto, perchè è la condizione più riproducibile

-La prova è eseguita per un unico stato tensionale che può essere diverso da quello reale.

1.3.3b) Nelle **curve limite di formabilità** la lamiera viene verniciata con un pattern. Il pattern è un reticolo circolare di pallini che viene verniciato su più lamiere di dimensioni diverse, (di solito ne cambio solo una delle 2), questo mi permette di avere stati deformativi diversi fra loro.

La prova si svolge in maniera simile al bulge test, ma con un punzone di forma emisferica e superficie lubrificata, al posto dell'olio in pressione.

Una volta terminata la prova avrò che alcuni dei pallini verniciati precedentemente sono rotti, altri invece sono solo deformati, analizzo quindi in un grafico ϵ_1 , ϵ_2 tutti i dati facendo differenza tra rotto o solo deformato:

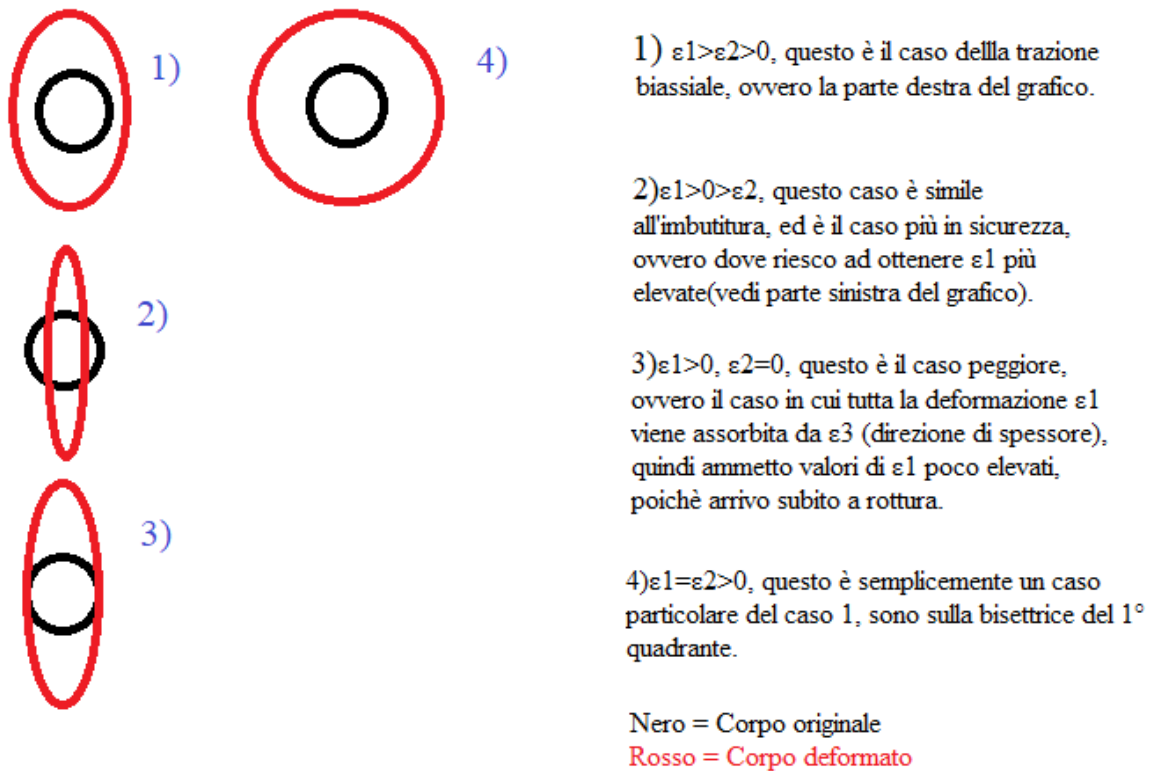


Fig. 1.4 varie possibilità di deformazione nelle curve limite di formabilità

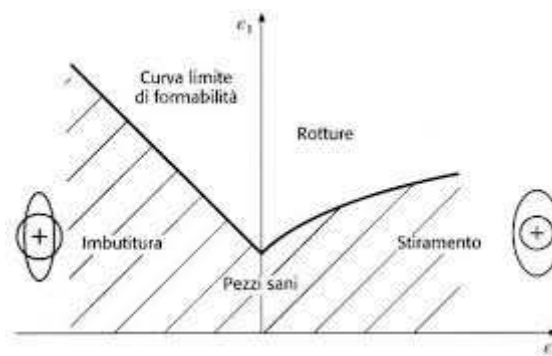


Fig. 1.5 Grafico della curva limite di formabilità

Si nota che:

- Nel caso di $\epsilon_2 = 0$ sono nel caso peggiore, poiché l'effetto Poisson si scarica tutto sullo spessore della lamiera, infatti ho anche il valore minimo di ϵ_1 .
- Nel caso 3 sto praticamente reiterando la prova di trazione.
- Nel caso 4 (bisettrice del 1° quadrante), ho uno stretching biassiale bilanciato.

Alcune considerazioni finali:

- La lamiera è bloccata come nel bulge test, questo mi permette di analizzare il caso più severo
- Le curve sono solitamente già implementate nei sistemi FEM.
- Se svolgo la prova a $T > T_{ambiente}$, avrò che le curve si spostano verso l'alto
- Risolverò il problema dell'unico stato tensionale imposto dalla prova del bulge test, ma sono costretto ad usare un punzone che mi introduce il problema dell'attrito punzone-lamiera.

1.3.4 Raggio minimo e massimo di piegatura

Analizzo per prima il raggio massimo di piegatura.

Il raggio max è un limite superiore oltre il quale non ho deformazione plastica, questo fa sì che una volta che rilascio la forza applicata per piegare la lamiera, la stessa tornerà alle condizioni iniziali. Vediamo ora come calcolare il raggio massimo di piegatura:

Ipotesi:

- Momento di piegatura costante
- Stato piano di deformazione
- Stato tensionale monoassiale
- Spessore lamiera costante
- Posizione fibra neutra invariata

Impongo la condizione che sulla fibra più esterna, la tensione sia minore/uguale alla tensione di snervamento

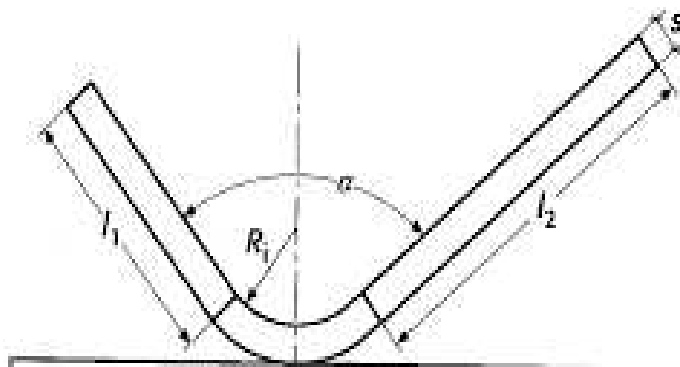
$$\varepsilon(r) = \frac{(R + r)\alpha - R * \alpha}{R * \alpha} = \frac{r}{R}$$

impongo $r=s/2$

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon\left(\frac{s}{2}\right) = \frac{s}{2R}$$

$$\delta_{sn} = E\varepsilon_{max} = \frac{Es}{2R}$$

$$R = \frac{sE}{\delta_{sn}}$$



Calcolo dello sviluppo di un pezzo piegato.

Fig. 1.6 Illustrazione della lamiera durante la piegatura

Dove

R=raggio di curvatura della lamiera(m)

s=spessore della lamiera(m)

E=modulo di Young (MPa)

r=ascissa che parte dall'asse neutro e va verso l'esterno della lamiera(m)

α =angolo di piegatura della lamiera(adimensionale)

δ_{sn} =tensione di snervamento del materiale (MPa)

Passiamo ora al **raggio di curvatura minimo**.

Il raggio di curvatura di una lamiera sottoposta ad un processo di piegatura non può essere inferiore

ad un certo valore o il metallo si romperà in corrispondenza delle fibre più esterne. Il raggio minimo di piegatura costituisce quindi un limite inferiore.

Di solito è espresso in funzione del suo spessore, e viene ricavato per vie sperimentali.

Questo parametro dipende:

-dal materiale

Può essere calcolato così:

Ipotesi:

-Momento di piegatura costante

-Stato piano di deformazione

-Stato tensionale monoassiale

-Spessore lamiera costante

In questo caso basta riprendere la figura 1.7 e imporre che le fibre più esterne, ovvero le prime che romperanno, arrivino ad avere deformazione uguale alla deformazione di rottura:

$$\varepsilon_{\theta_{\max}} = \varepsilon_R$$

$$\frac{s}{2R_{\min}} = \frac{A\%}{100}$$

$$R_{\min} = \frac{50s}{A\%}$$

Dove

s=spessore della lamiera(m)

A%= variazione percentuale dell'area del provino a fine prova (adimensionale)

R_{min} = raggio minimo di piegatura (m)

ε_{θ_{max}} = deformazione massima (adimensionale)

ε_R = deformazione a rottura (adimensionale)

1.4 Prova di Ford

E' una prova che viene fatta sulle lamiere, poichè sottoporre una lamiera a compressione mi porta problemi di carico critico. Consiste nella compressione di una lamina fra due piastre piane e parallele fra loro, con profondità maggiore di quella della lamina stessa. Di conseguenza avrò:

- Stato piano di deformazione
- Niente fenomeni di barilottatura

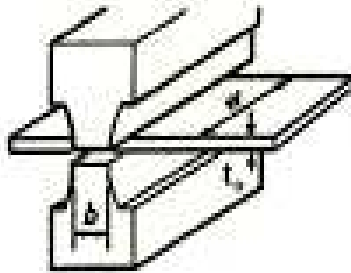


Fig. 1.7 Prova di Ford

Condizioni della prova

- a) $w > 5b$, questo comporta che la dilatazione della larghezza sia trascurabile
- b) $0,25 < t_0/b < 0,5$, infatti se t_0/b è molto piccolo ho molto attrito da parte delle piastre sulla lamina, mentre se t_0/b è molto grande, la prova perde di validità perché non ho sottoposto alla prova abbastanza superficie di lamiera.

Anche avendo dimensionato correttamente il tutto ho problemi di attrito, ricorrerò quindi ad un lubrificante.

$$\delta_{CP} = \frac{P}{wb}$$

$$\epsilon_{cp} = \ln\left(\frac{t_0}{t}\right)$$

Dove

δ_{CP} = tensione nella direzione del carico P (Mpa)

ϵ_{cp} = deformazione nella direzione di applicazione del carico P (adimensionale)

P = carico applicato (N)

w = vedi figura sopra (m)

b = vedi figura sopra (m)

t_0 = spessore della lamina ad inizio prova (m)

t = spessore della lamina durante la prova (m)

Ora considero:

-1 = direzione dello spessore

-2 = direzione della lunghezza

-3 = direzione della larghezza

Quindi considero $\epsilon_3 = 0$, e di conseguenza $\epsilon_1 = -\epsilon_2$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \epsilon_{cp} = 1,155 \epsilon_{cp}$$

Supponendo trascurabile δ_2 , posso scrivere:

$$\delta_3 = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} = \frac{\delta_1}{2}$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\delta_1 - \delta_2)^2 + (\delta_3 - \delta_2)^2 + (\delta_1 - \delta_3)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \delta_{CP} = \frac{\delta_{CP}}{1,155}$$

La prova di Ford, come la prova di compressione si fa perchè:

-Assenza di strizione, quindi riesco a non falzare la prova una volta raggiunto δ_u , questo fa sì che anche le deformazioni raggiungibili sono maggiori.

-Ho uno stato tensionale simile a quello delle lavorazioni meccaniche.

Per quanto riguarda il problema della lubrificazione della prova si distinguono:

-Prove a caldo, nelle quali oltre a surriscaldare la lamiera, uso come lubrificante grafite in olio per prove su alluminio, mentre per T più alte uso del vetro liquido.

-Prove a freddo, nelle quali posso usare olio ad alta viscosità, fogli di teflon o bisolfuro di molibdeno.

Lavorazione delle lamiere

2.1 Tranciatura e punzonatura

La tranciatura è un processo che sfrutta la deformazione plastica, serve per ottenere dei semilavorati per le operazioni di formatura, in alcuni casi può essere usata per eliminare dei difetti nel prodotto finito, come bave in eccesso.

Si distinguono 2 tipi di tranciatura:

- Taglio rettilineo
- Taglio a perimetro chiuso o (punzonatura)

2.1.1 Punzonatura

Viene eseguita mediante una pressa sulla quale sono montati punzone e matrice, aventi la forma dell'elemento da distaccare dalla lamiera.

Nelle fig. 2.1 e 2.2 sotto si possono vedere i tipici prodotti della punzonatura



Fig. 2.1 dischi ottenuti per punzonatura

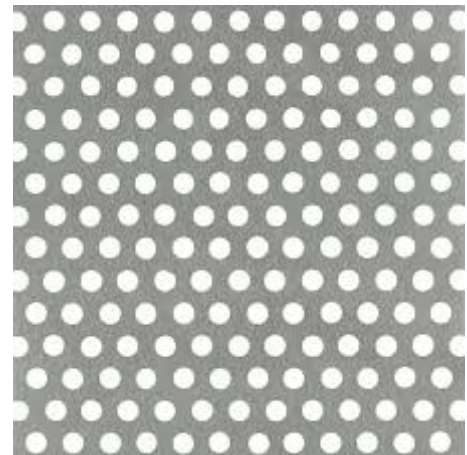


Fig.2.2 Lamiera ottenuta per punzonatura

2.1.2 Gioco nel taglio a perimetro chiuso

La dimensione del prodotto finito è determinata da:

- punzone, se devo realizzare i fori. In questo caso il gioco si ottiene aumentando le dimensioni della matrice
- matrice, se devo realizzare gli sviluppi. In questo caso il gioco si ottiene riducendo le dimensioni del punzone

Per avere un processo ottimale tra punzone e matrice ho un gioco, altrimenti il processo non riesce.

Di solito il gioco, ovvero l'interspazio tra punzone e matrice, vale al massimo 1/10 dello spessore della lamiera. Un gioco ben appropriato comporta diversi vantaggi:

- sforzo minimo per far avvenire il processo
- buona superficie laterale del tranciato
- buona durata dello stampo
- altezza bava minima

Gioco troppo grande	Gioco troppo piccolo
Superficie laterale con tolleranze elevate, sia dimensionali, sia per rugosità	Aumento della forza per far avvenire il processo, rischio di dover usare lubrificante
Arrotondamento eccessivo dello spigolo inferiore del tranciato	Difficile allineare il punzone con la matrice
Rischio di incurvare la superficie inferiore del tranciato	Maggior usura di punzone e matrice

Tab. 2.1

2.1.3 Tranciatura

Come visibile in fig. 2.3 può essere eseguita mediante cesoia che sollecita il laminato con due coltelli, producendo così la frattura nella zona di interesse.

Anche qui abbiamo il problema del gioco:

Insufficiente	Corretto	Elevato
Superfici irregolari e sbavature	Bordo tranciato di netto come da progetto	Superfici con tolleranze elevate, sia dimensionali, sia per rugosità, oltre a fenomeni di imbutitura

Tab. 2.2

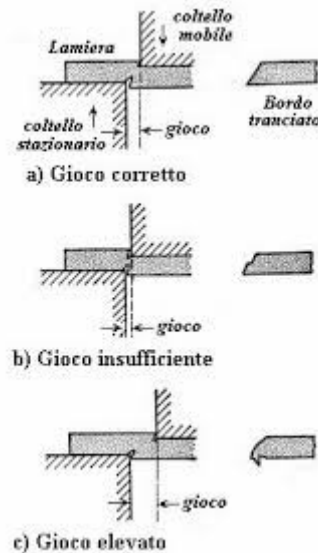


Fig. 2.3 Tranciatura illustrata

Le operazioni di tranciatura possono avvenire con:

- Coltelli paralleli
- Coltelli inclinati fra loro

2.1.4 Tranciatura fine

Un caso particolare della tranciatura delle lamiere è la tranciatura fine. Questo processo serve nella meccanica di precisione e garantisce alcuni vantaggi rispetto alla tranciatura tradizionale:

- Bordi di taglio netti
- No bavature
- Facce parallele fra loro

-Miglior precisione.

Le principali differenze tra tranciatura fine e tranciatura classica sono di vario tipo:

-Gioco ridotto tra punzone e matrice

-Presenza di un dente nel premilamiera che blocca la matrice e favorisce la localizzazione del processo nelle zone interessate

-Presenza di un contro-punzone che stringe la lamiera assieme al punzone, inoltre evita ingobbamenti o arrotondamenti della stessa. Di solito per fare ciò si usano presse a doppio effetto molto stabili.

Per abbassare ulteriormente la stabilità della macchina e del processo si scambiano punzone e contropunzone, così facendo abbasso il centro di gravità della macchina.

La velocità del punzone è minore rispetto alla tranciatura classica, così diminuisce anche la produttività del processo

2.2 Piegatura delle lamiere

2.2.1 Processo

La piegatura è una delle lavorazioni più comuni quando si parla di lavorazione delle lamiere, di solito può essere fatto sia come processo a sé stante, che in combinazione con altri processi.

E' eseguita a temperatura ambiente, salvo il caso di grandi sezioni o raggi di curvatura minimi.

Ho più tipi di piegatura:

- Piegatura con lamiera ferma
- Piegatura con lamiera in movimento

2.2.2 Piegatura con lamiera ferma

Con questo tipo di piegatura si possono ottenere diversi profili, noi vedremo solo la piegatura a v.

Fasi della piegatura a v:

1)Piegatura in aria: è la prima parte del processo, inizia con il contatto tra punzone e lamiera, e finisce quando le ali della lamiera sono tangenti alle facce della matrice.

Caratteristiche di questa fase:

- Forza di piegatura bassa
- Elevato ritorno elastico
- Posso aver angoli diversi controllando la corsa del punzone

2)Coniatura: è la seconda parte, inizia dove finisce la piegatura in aria e finisce con l'arrivo all'angolo finale desiderato. In questa fase viene forzata la lamiera tra punzone e matrice per ridurre le incertezze sulla geometria.

Caratteristiche coniatura:

- Forza elevata
- Ritorno elastico ridotto

Per quanto riguarda il problema del raggio minimo e raggio massimo è stato già affrontato nel capitolo precedente, non viene quindi ritrattato una seconda volta.

2.2.3 Ritorno elastico

Nel momento in cui vado a piegare la lamiera mi aspetto che avrò una parte delle deformazioni in campo plastico, mentre altre saranno in campo elastico. Questo fa sì che la parte elastica della deformazione, una volta rilasciata la lamiera, tenda a far tornare la lamiera alla configurazione originale.

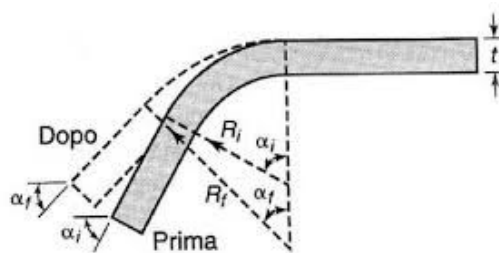


Fig. 2.4 Ritorno elastico

Per calcolare il ritorno elastico basta:

$$\kappa = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{R_c}{R_f}$$

Dove

α_f = angolo esterno dopo il rilascio del carico (adimensionale)

α_i =angolo esterno sotto carico (adimensionale)

R_f =raggio di piegatura dopo il rilascio del carico (m)

R_c = raggio di piegatura sotto carico (m)

$$\text{Angolo di ritorno elastico} = \rho = \alpha_i - \alpha_f$$

Come è ovvio pensare, più la mia deformazione si sviluppa in campo elastico, e maggiore sarà il ritorno elastico. Al diminuire del raggio di piegatura R , diminuisce la porzione di spessore che subisce la sola deformazione elastica, diminuendo così il ritorno elastico. All'aumentare della deformazione, diminuisce ulteriormente la porzione che subisce la sola deformazione elastica.

Tutto questo comporta che al diminuire del raggio di piegatura, il ritorno elastico diminuisce

Un altro fenomeno da tenere in considerazione sono le fibre esterne, che, avendo subito deformazione plastica, ostacolano le fibre interne nel ritorno elastico, creando così uno stato tensionale residuo della lamiera.

Di solito, per risolvere questo problema basta applicare una sovrappiegatura evitando così ulteriori spese come l'eseguire la piegatura a caldo.

2.2.4 Piegatura con lamiera in movimento

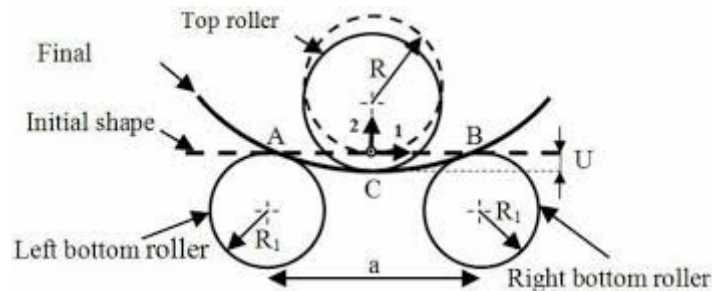


Fig. 2.5 Piegatura in movimento su rulli

Questa tipologia di piegatura serve per ottenere lamiere di forme meno convenzionali. Questo può essere ottenuto con l'uso di rulli rotanti (come in fig. 2.5). Questo processo può avvenire anche in maniera progressiva, facendo passare la lamiera su più rulli disposti in serie.

Di solito questa tipologia di piegatura è usata per ottenere oggetti conici o cilindrici

2.3 Imbutitura e stampaggio

L'imbutitura consiste nel trasformare la lamiera in un corpo cavo, attraverso uno o più passaggi (dipende dal prodotto finale).

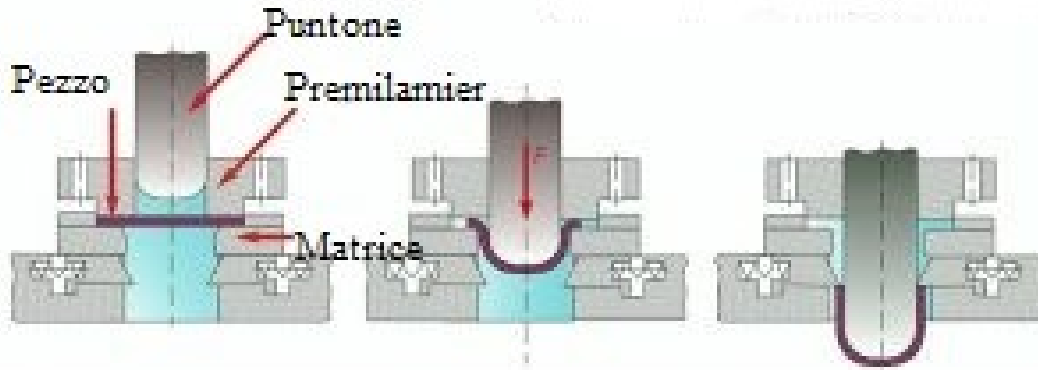


Fig. 2.6 Imbutitura

In figura possiamo riconoscere:

- Punzone
- Matrice
- Premilamiera

Vediamo 2 casi di imbutitura, abbastanza diversi fra loro:

- Imbutitura pezzi assialsimmetrici
- Imbutitura pezzi non assialsimmetrici

2.3.1 Imbutitura pezzi assialsimmetrici

Il processo segue le seguenti fasi:

- 1) Posizionamento della lamiera sulla matrice
- 2) Abbassamento del premilamiera e del punzone
- 3) Spinta del punzone che deforma la lamiera e fa scorrere la lamiera nella matrice
- 4) Il punzone risale e si estrae la forma finale

Il prodotto finale presenta:

- Flangia: è la porzione originale del disco che rimane incastrata tra lamiera e matrice, man mano che il processo va avanti essa diminuisce di diametro fino a scomparire ed il materiale è richiamato tutto nella matrice.
- Parete cilindrica
- Fondo

Difetti nel prodotto imbutito

I difetti che si possono trovare nel prodotto imbutito sono di vario genere, i principali sono:

- Assottigliamento della lamiera fino alla frattura del prodotto
- Formazione di grinze nella flangia

2.3.2 Parametri di processo

Sono alcuni:

1) **Numero di passaggi di imbutitura:** è calcolabile sapendo che:

$$\beta = \frac{D}{d_p}$$

Dove:

D = diametro del disco di partenza (m)

d_p = diametro del punzone (m)

β = rapporto calcolato (adimensionale)

Al crescere di β aumento la severità della tensione sul materiale rischiando così la rottura e aumentando la velocità di processo.

Ovviamente β non può essere troppo elevato, si considera quindi un valore limite detto LDR: limit drawing ratio, ovvero valore limite per l'imbutitura, che per l'acciaio di solito non supera il valore 2.

Quindi:

se $\beta < \text{LDR}$ posso eseguire il processo in un solo passaggio

se $\beta > \text{LDR}$ devo fare più passaggi

2) **Pressione del premilamiera:** E' un parametro essenziale per avere un giusto flusso radiale della lamiera, evitando grinze, se la pressione dovesse essere troppo elevata ho che:

-Assottigliamento eccessivo del prodotto imbutito

-Flusso radiale verso il centro del prodotto ostacolato

Di solito, in applicazioni industriali, la pressione iniziale è circa l'1,5% del Tensione di snervamento, e aumenta di valore man mano che il processo va avanti. In alcuni casi particolari l'uso del premilamiera può essere evitato, semplificando il processo e rendendolo meno costoso. Questo è possibile quando:

$\beta < 1,2$

Spessore della lamiera tale da avere una lamiera molto rigida

3) Condizioni di lubrificazione

Le interfacce da prendere in considerazione sono 2:

-Premilamiera -lamiera e matrice – lamiera: in questo caso bisogna far si che il flusso del materiale sia centripeto, così facendo si diminuisce anche la forza necessaria all'imbutitura.

Necessita quindi l'uso del lubrificante

-Punzone- lamiera: in questo caso il flusso del materiale non deve essere aiutato come nel caso sopra, è quindi meglio evitare di lubrificare.

4) Raggi di raccordo di punzone e matrice

Servono per evitare di avere deformazioni troppo severe e rompere il pezzo.

Se questi raggi sono troppo piccoli ho:

-Deformazioni severe

-Aumento delle forze necessarie per il processo

-Diminuisce la profondità di imbutitura

Nel caso opposto:

-Molta della lamiera non è guidata durante il processo, avrò quindi tolleranze meno strette e formazione di grinze

5) Gioco tra punzone e matrice

Durante il processo sono obbligato ad avere un gioco tra punzone e matrice, altrimenti la forza del punzone ha valori assurdi, se il gioco diventa troppo, rischio di avere le pareti laterali ondulate.

Il gioco si calcola con la formula empirica:

$$g = s + c\sqrt{10s}$$

Dove

g=entità del gioco (m)

s=spessore della lamiera (m)

c=valore costante in base al materiale (\sqrt{m})

2.3.3 Ironing

Questo processo è usato per avere uno spessore della parete laterale più uniforme, oltre a permettere un'imbutitura più profonda, per fare ciò si usa un anello nel quale viene fatto passare l'imbutito, facendo così lo stesso ottiene lo spessore desiderato.

Si possono ottenere riduzioni di spessore tra il 40% e il 60%.

2.3.4 Imbutitura pezzi non assialsimmetrici

A differenza dei pezzi assialsimmetrici, in questo caso, studiare questo processo in modo teorico è molto difficile, questo poiché il flusso plastico rispetto al caso precedente è molto più difficile da comprendere.

In questo caso il premilamiera ha funzioni un po' diverse:

- Nei lati serve da guida per il materiale che scorre al centro
- Nei raccordi serve, come al solito, per evitare le grinze

Per fare i compiti sopra descritti si usa un premilamiera che ha pressione variabile, questo fa sì che il processo sia ancora più complicato.

2.3.5 Stampaggio delle lamiere

Lo stampaggio delle lamiere è un processo molto usato nel mondo dell'industria automobilistica e degli elettrodomestici, inoltre è possibile avere geometrie finali anche molto complesse.

Questo comporta un'exasperazione dei problemi di disomogeneità del flusso plastico rispetto all'imbutitura.

Abbiamo diverse variabili su cui agire:

1) Scelta della geometria iniziale della lamiera

Devo scegliere una geometria iniziale che mi permetta di avere una forma non particolarmente complessa, che però mi permetta di seguire la figura da stampare.

Per scegliere la geometria iniziale di solito si usano simulazioni numeriche Fem o metodi sperimentali (o una combinazione delle due)

2) Dispositivi rompigrinze

Come dice il nome, serve per evitare la formazione di grinze, questo è possibile perché ostacola il flusso radiale del materiale verso la cavità della matrice. Di solito è posizionato nelle zone dove è necessario rallentare il flusso plastico per omogenizzarlo a quello delle altre zone.

Fisicamente è composto da un risalto sulla matrice con una corrispondente cavità sul premilamiera (vedi figura sotto)

3)Premilamiera segmentati Servono per rendere il flusso il più uniforme possibile. E' in grado di applicare pressioni differenti sulle zone della lamiera

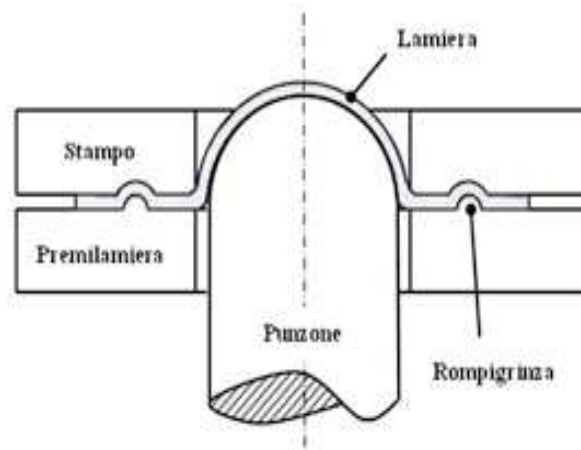


Fig. 2.7 stampaggio delle lamiera

3.1 Problema della corrosione

Introduzione

Come ben noto, i materiali metallici, a contatto con determinate sostanze, si degradano riducendo così la loro sezione resistente, questo fenomeno è chiamato corrosione.

Spesso la corrosione non è evitabile, ma attraverso una scelta oculata dei materiali e di protezione degli stessi, si può allungare la vita dei componenti in maniera considerevole.

Definizione

La corrosione è definita come un processo chimico o elettro-chimico nel quale gli atomi del metallo reagiscono con una sostanza a contatto del metallo stesso deteriorando la struttura.

Può presentarsi in molti modi (es. Ruggine), ma non sempre visibile.

Di solito la corrosione si divide in

-Corrosione a umido, ovvero il materiale metallico è a contatto con ambiente acquoso.

-Corrosione a secco, ovvero il materiale metallico è a contatto con ambiente corrosivo gassoso, di solito avviene a T elevate.



Fig 3.1 corrosione su una coppia di ingranaggi

3.2 Tipologie di corrosione

3.2.1 Corrosione generalizzata

E' una delle forme più comuni e colpisce in maniera omogenea tutta la superficie del metallo, assottigliandone lo spessore, colpisce i materiali che non si passivano.

E' lineare nel tempo, quindi abbastanza prevedibile, e non troppo pericolosa.

Si ha quando espongono il metallo in atmosfera, ed è aggravata da sostanze corrosive o atmosfere salmastri.

Per evitare questo tipo di corrosione di solito si usano rivestimenti (es vernici ecc.) o accoppio il metallo con uno meno nobile che sta all'esterno e si ossida al posto di quello nobile (es acciaio zincato).

3.2.2 Corrosione galvanica

La corrosione per accoppiamento galvanico avviene quando due metalli di diversa nobiltà sono a contatto in presenza di un elettrolita. Si instaura una differenza di potenziale che porta ad un flusso di corrente dal meno nobile (catodo, metallo che si corrode) al più nobile (anodo, metallo che resta invariato).

In questo caso la corrosione dipende da:

-materiali in gioco

-l'elettrolita

-ampiezza delle superfici a contatto

Questo fenomeno è poco prevedibile grazie ad eventuali ossidi che si formano sulle superfici.



Fig 3.2 esempio di corrosione galvanica

3.2.3 Corrosione per vaiolatura (o pitting)

Questa tipologia di corrosione avviene grazie ad un innesco di natura statica, in seguito avviene una circolazione di corrente tra cavità (anodo) e la zona circostante (catodo), questo fa sì che questa corrosione sia localizzata in punti ben precisi e può arrivare a diminuzioni di spessore molto elevate, è quindi una tipologia molto pericolosa, anche se studiata e conosciuta.

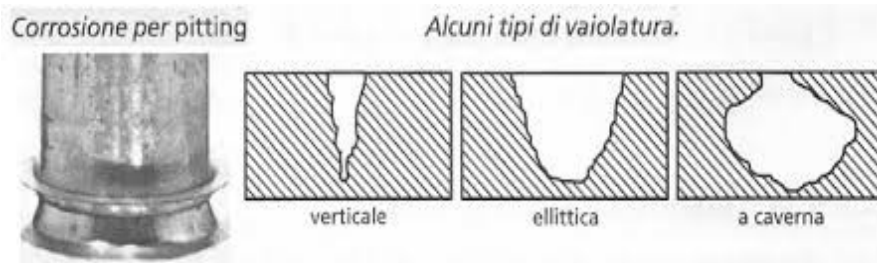


Fig 3.3 esempio di vaiolatura

3.2.4 Corrosione sottodeposito

Questa tipologia avviene in corrispondenza di interstizi, ed è di tipo localizzato (come il pitting). Nella fessura ho ossigeno che non si ricambia (anodo), mentre fuori ho ossigeno sempre nuovo (catodo), di conseguenza la corrosione avviene nella zona anodica. Man mano che il fenomeno procede la velocità di corrosione aumenta poiché l'ossigeno nell'interstizio è finito.

3.2.5 Corrosione intergranulare

In questa tipologia il bordo del grano diventa anodico, mentre il resto del grano diventa catodico, questo comporta che nei bordi compaiano quasi dei buchi. Questo comportamento può essere causato dalla formazione di carburi nei bordi di grano.

Un tipico esempio c'è negli acciai inossidabili che esposti a temperature elevate avviene la precipitazione dei carburi di cromo (Cr_{23}C_6), quindi lungo il bordo di grano avviene la perdita di cromo e quindi la corrosione della matrice metallica.

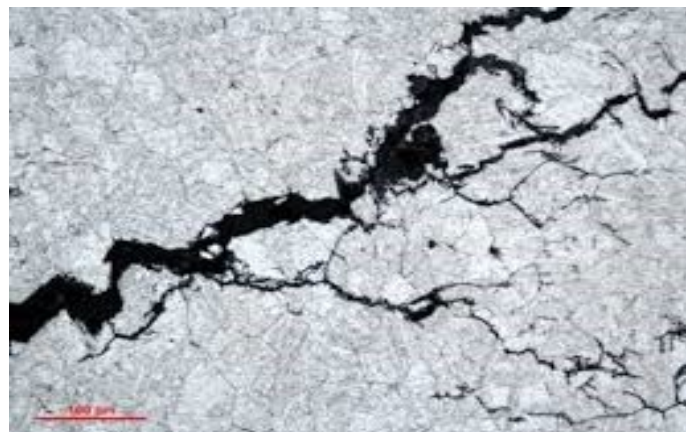


Fig 3.4 esempio di corrosione intergranulare

3.2.6 Corrosione sottotensione (SCC o stress corrosion cracking)

La corrosione sottotensione avviene quando si ha sforzo di trazione in un ambiente specifico (l'ambiente varia in base al materiale).

Questa tipologia di corrosione è molto problematica perché non produce prodotti di corrosione che possano in qualche modo avvertire della situazione, inoltre il cedimento avviene di schianto.

Nel momento che la cricca nasce sulla superficie, essa può procedere in più modi:

- La cricca avanza per dissoluzione anodica del suo apice, mentre le pareti rimangono passive.

-Infragilimento causato dall'idrogeno sviluppato dal processo di corrosione, l'idrogeno si concentra nell'apice della cricca e indebolisce i legami atomici.

3.3 Caso dell'acciaio

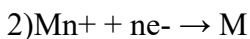
La condizione necessaria affinché si manifesti la corrosione elettrochimica del ferro, a temperatura normale, è che il manufatto si trovi in presenza di acqua e ossigeno.

In un metallo M isolato, immerso in una soluzione acquosa, avvengono naturalmente queste 2 reazioni:



M ha la tendenza a far passare in soluzione alcuni atomi disposti sulla sua superficie sotto forma di ioni M^{n+} . Poiché gli ioni che passano in soluzione lasciano nel metallo i loro elettroni più esterni $n e^{-}$, il metallo stesso si carica negativamente.

In questa situazione alcuni ioni M^{n+} verranno attratti dal metallo e si ridepositeranno sulla sua superficie in forma metallica secondo la reazione:



La somma delle 2 reazioni porta a:

- equilibrio dinamico della reazione, ovvero quando le 2 velocità di reazione si equivalgono
- il metallo assume un potenziale elettrico di equilibrio, E_{eq} , appena viene raggiunto l'equilibrio dinamico di cui sopra.

Questo processo dipende dalla natura del metallo, e dell'ambiente a cui è esposto. Sulla superficie dei manufatti in acciaio, a causa delle lavorazioni subite, vi sono sempre zone o punti che differiscono tra loro fisicamente o chimicamente e che pertanto hanno un diverso potenziale.

Tra questi punti, nonostante esista un potenziale ΔE , non vi è passaggio di corrente, poiché non vi è il conduttore (ho solo aria secca).

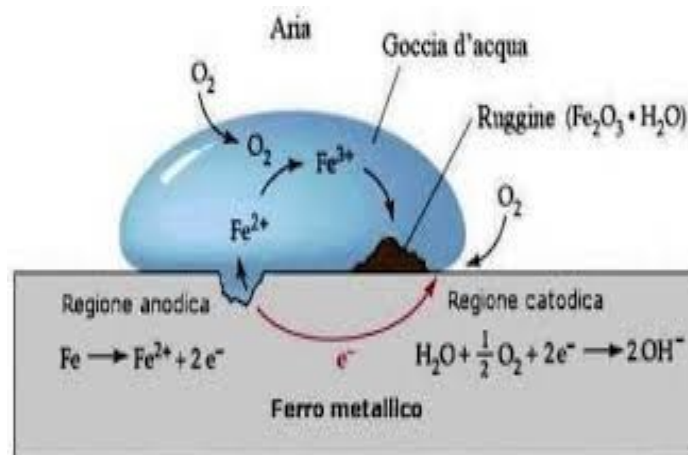
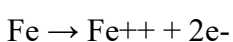


Fig 3.5 La corrosione dell'acciaio in breve

Nel caso specifico del ferro nell'area anodica i cationi di ferro lasciano i loro siti per disperdersi nell'ambiente, mentre gli elettroni rimasti nella struttura si spostano sull'area catodica permettendo la formazione di ioni ossidrile.

La corrosione nel ferro segue il seguente processo: nella zona anodica, il ferro passa in soluzione cedendo all'acqua o al velo di umidità, lo ione Fe^{++} e liberando nel contempo degli elettroni:



Gli elettroni liberati dagli atomi di ferro in corrispondenza dell'anodo, migrano attraverso il metallo (circuito elettronico) al catodo, dove reagiscono con gli ioni idrogeno H⁺ provenienti dal circuito ionico:

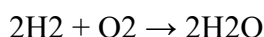


Questa reazione ha un duplice effetto:

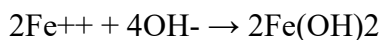
- diminuisce la concentrazione di H⁺ rispetto a quella degli ioni ossidrili OH⁻, rendendo alcalina l'acqua a contatto col catodo

- la formazione di bollicine di gas idrogeno ostacola l'avvicinamento di nuovi ioni idrogeno alla superficie del catodo, prevenendo la fuga di altri elettroni.

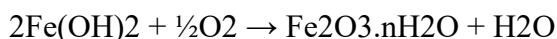
A questo punto interviene l'ossigeno disciolto nell'acqua che, reagendo con il gas idrogeno, forma acqua e depolarizza il catodo:



Intanto nella zona anodica gli ioni ossidrili provenienti dal catodo incontrano gli ioni ferrosi Fe⁺⁺ che si diffondono dall'anodo nell'acqua o nel velo di umidità, formando idrato ferroso:



In presenza di sufficiente ossigeno nella zona anodica, lo ione ferroso viene ossidato a ione ferrico con formazione di ossido ferrico idrato (che costituisce chimicamente la ruggine), poco solubile, che precipita sul metallo:

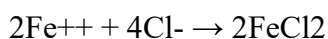
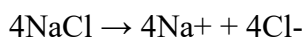


Data la tendenza degli ioni ferrosi a diffondersi dall'anodo prima di combinarsi e formare la ruggine, questa depositasi sulla superficie del manufatto in ferro, si presenta come un prodotto spugnoso con labile adesione sul metallo all'anodo.

Pertanto la sua azione protettiva (passivazione) non è sufficiente a inibire o arrestare il processo corrosivo come avviene invece nell'acciaio inossidabile (o nelle leghe di rame e di alluminio) per il quale i prodotti della corrosione, formando un film di ossidi continui e aderenti alla superficie del materiale, inibiscono il processo anodico in modo tale che la velocità di corrosione diventa del tutto trascurabile.

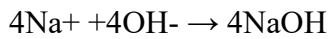
Con il passare del tempo, il processo può danneggiare in maniera significativa la struttura, arrivando così alla rottura della stessa. Da notare che senza ossigeno non può avvenire la corrosione, questo è il caso delle tubazioni a circuito chiuso.

La conducibilità elettrica, dell'acqua, e pertanto la velocità di corrosione, aumenta in funzione della quantità di Sali disciolti, oltre che agli eventuali metalli disciolti. In atmosfera marina o in acqua di mare la conducibilità elettrica raggiunge valori molto superiori a quelli che si riscontrano nell'acqua chimicamente pura. In questo caso la corrosione è più pericolosa, infatti, pur restando valido il meccanismo precedentemente visto, va aggiunto che gli ioni ferrosi che si diffondono dall'anodo si combinano più facilmente con gli ioni cloro prodotti dalla dissociazione elettrolitica del cloruro di sodio nell'acqua o nel velo di umidità, formando cloruro ferroso:

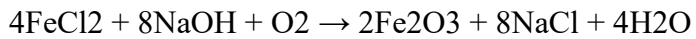


Allo stesso tempo nella zona catodica gli ioni sodio si combinano con gli ioni ossidrili (OH⁻)

formando idrato di sodio:



La successiva reazione tra cloruro ferroso, idrato di sodio e l'ossigeno, presente nell'acqua o nel velo d'umidità, determina la formazione di ossido ferrico:



La ruggine che deposita sulla superficie del materiale ferroso risulta ancora molto spugnosa e molto labile e pertanto non riesce a passivare il metallo.

Il processo di corrosione è ulteriormente facilitato dalla rigenerazione del cloruro di sodio

3.4 Protezione dalla corrosione

3.4.1 Quantificazione della corrosione:

- Camera a nebbia salina:** Il pezzo viene messo in un ambiente con umidità e concentrazione di Sali elevata, questo simula il comportamento delle acque salate e ambienti marini in generale.
- Camere cicliche di corrosione:** sono come le camere a nebbia salina, ma più versatili, visto che sono in grado di riprodurre più condizioni. E' possibile inoltre sottoporre un materiale a più cicli di corrosione in ambienti diversi fra loro (es. Acqua dolce, acqua salata e atmosfera inquinata).
- Un altro modo è l'uso di **tabelle**, il più immediato e più economico rispetto agli altri, permette di sapere se un determinato accoppiamento materiale-elettrolita andrà a corrodere il materiale.

3.4.2 Stratagemmi di protezione

Una volta che avrò effettuato i miei conti, dovrò usare degli stratagemmi per evitare la corrosione:

- Uso di **metalli nobili** come il cromo, che rendono materiali come l'acciaio inossidabile, poichè a contatto con l'atmosfera crea un film protettivo che non è penetrabile dall'ossigeno.
- Uso della **zincatura**, ovvero si ricopre il ferro di un materiale meno nobile. Essendo lo zinco più riducente del ferro, è il primo a ossidarsi, anche se ho del ferro a contatto con l'esterno. Questo fa sì che finchè non consumo tutto lo zinco, il ferro è protetto.
- Pittura esterna** protettiva, ne è un esempio la Torre Eiffel che viene verniciata periodicamente ogni 5 anni.
- Manti protettivi** in bitume, polietilene e poliuretano, che come la vernice, non fanno penetrare l'ossigeno.

Le protezioni attive sono chiamate protezioni catodiche e sono utilizzate per eliminare i fenomeni di corrosione dei manufatti di ferro interrati. Si possono distinguere due tipi di protezioni catodiche:

- Ad **anodo sacrificale:** consiste nel collegare direttamente il manufatto in ferro a un elettrodo interrato costituito da un metallo meno nobile (più riducente) del ferro stesso. Come nel caso della zincatura è il materiale meno nobile ad essere corroso per primo, salvando così il ferro. Ovviamente l'anodo sacrificale va cambiato periodicamente.



Fig. 3.6 Anodo sacrificale

-A **corrente impressa**: consiste nell'applicare dall'esterno una fem contraria, ossia collegare il manufatto al polo negativo di un generatore esterno il cui polo positivo è a sua volta collegato a un elettrodo inerte (esempio grafite) interrato in prossimità del manufatto. Sarà poi l'umidità del terreno a fungere da elettrolita.

Un altro metodo di protezione dalla corrosione, per quanto riguarda l'acciaio, è un trattamento termico, chiamato **nitrurazione**, e consiste nell'indurire la superficie tramite l'arricchimento di azoto. L'azoto si diffonde nel ferro, e può formare dei precipitati con gli additivi presenti nel ferro, rendendolo più duro.

Questo processo però richiede tempo, quindi si lascia il pezzo a contatto con l'azoto per molto tempo (almeno 12 ore, fino a 96), anche se non c'è bisogno di superare la temperatura critica dello stesso si raggiungono però i 500°circa, così facendo questo trattamento può essere eseguito alla fine del processo.

Dopo la nitrurazione, infine, l'acciaio è ricoperto di coltre bianca e appare quindi di bell'aspetto bianco. I nitruri che si formano sulla superficie rendono l'acciaio inossidabile.

Prova di trazione

4.1 Introduzione

La prova di trazione monoassiale è un esperimento che viene effettuato per trovare alcune caratteristiche del materiale, come:

- Tensione di rottura
- Tensione di primo snervamento
- Modulo di Young
- Deformazione percentuale alla rottura

Per fare ciò ho bisogno di più provini dello stesso materiale, per poter reiterare la prova un numero congruo di volte.

Durante la prova il provino viene sottoposto ad una tensione monoassiale (parallela il più possibile alla lunghezza utile del provino) crescente, fino alla rottura del provino stesso.

4.2 Elementi della prova

4.2.1 Il provino

Si prende il materiale da sottoporre alla prova e si intaglia con una forma simile alla figura sotto, la sezione utile del provino può essere circolare o rettangolare, per i materiali metallici si usano provini a sezione circolare, mentre per i materiali polimerici si usano provini a sezione rettangolare (usata anche nel caso delle lamiere).



Fig. 4.1 Esempio di provino

Nel provino possiamo vedere:

- Area di afferraggio o testa: è l'area nella quale avviene l'afferraggio, deve essere sufficientemente grande affinché possa afferrare il provino in maniera adeguata senza avere scorrimenti, inoltre ha la sezione più grande del provino.
- Lunghezza utile del provino (L_0): è la lunghezza della sezione utile, si usa per calcolare la deformazione ingegneristica
- Tratto calibrato: è il tratto che collega la testa alla lunghezza utile, attraverso un raggio di raccordo e deve essere calcolato tenendo conto delle problematiche dell'intaglio
- Sezione utile (A_0): è la sezione più piccola del provino, quindi quella che cederà, deve essere sufficientemente lunga per misurare la deformazione a rottura e il modulo di Young.

4.2.2 Macchina di trazione

Generalmente una macchina di prova è costituita da:

- telaio chiuso: è un pezzo che ha rigidità teorica infinita, ed è costituito da 2 traverse di cui una mobile e 2 montanti. La traversa mobile è azionata da un dispositivo che la fa muovere rispetto la traversa fissa sottoponendo così il provino a trazione.
- Afferraggi: sono 2 e servono per afferrare il provino alle sue estremità, sono posizionati sulle due traverse e di solito funzionano per attrito statico.
- Trasduttori di segnale: servono a misurare i dati della prova, più precisamente misuro la forza applicata tramite cella di carico lo spostamento (o ΔL) tramite estensometro
- Sistema di acquisizione che permette di registrare le misure effettuate e visualizzarle graficamente.

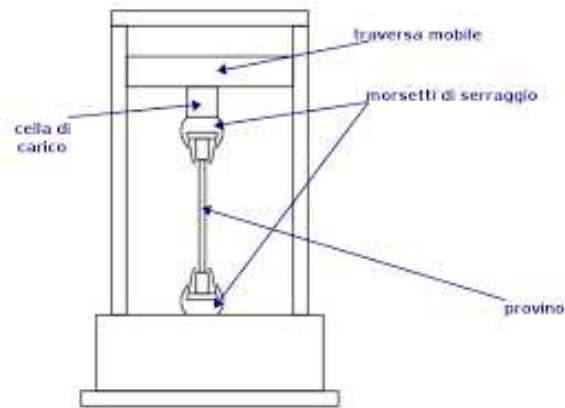


Fig. 4.2 Macchina di prova a trazione con componenti illustrati

Durante la prova verrà misurata la corsa della macchina, quindi l'allungamento del provino, e la forza che esplicherà la macchina stessa. Questo vuol dire che se ho 100 provini di dimensioni diverse otterrò 100 curve diverse, si adopera quindi la tensione ingegneristica e la deformazione ingegneristica:

-Tensione ingegneristica = F/A_0

-Deformazione ingegneristica = $\Delta L/L_0$

Sono dette ingegneristiche perché non sono reali, sono delle variabili introdotte per facilitare i calcoli.

4.3 Procedimento

Il provino viene montato sulla macchina, in seguito all'avvio della macchina lo stesso viene sottoposto ad una forza di trazione crescente, il provino così comincia a deformarsi e ad attraversare le fasi della prova:

4.3.1 Fase elastica

La fase elastica è caratterizzata da un comportamento prettamente lineare, il provino si comporta come una molla del 1° grado, quindi, se all'interno di questa fase interrompo la prova il provino torna al suo stato iniziale, rendendolo indistinguibile dai provini vergini.

La legge che regola questo fenomeno è la legge di Hooke:

$$\delta = E \varepsilon$$

Dove

δ = tensione ingegneristica (MPa)

E = modulo di Young (MPa)

ε = deformazione ingegneristica (adimensionale)

Il modulo di Young non è altro che la tangente dell'angolo che il grafico forma con l'asse ε , oltre ad essere una misura della rigidità del materiale sottoposto alla prova. Nel caso dell'acciaio E è circa 200 MPa, e varia di poco anche cambiando il carbonio o trattando termicamente l'acciaio.

La deformazione elastica nei metalli è data dalle forze interatomiche che agiscono riportando gli atomi spostati nella configurazione iniziale.

Va osservato che nei cristalli vi sono direzioni in cui la densità di atomi è maggiore e di conseguenza le forze sono maggiori. Il modulo di Young è maggiore nelle direzioni di maggior impacchettamento.

4.3.2 Transizione

Mentre la prova va avanti si arriva ad un punto chiamato T_r , oltre questo punto la deformazione è plastica, ed il provino assume una deformazione permanente se rimuovo il carico.

Trovare il limite sopra descritto non è così semplice, viene quindi preso, nelle situazioni più.

Difficili, come riferimento lo 0,2% di deformazione plastica permanente a carico rilasciato.

4.3.3 Fase plastica vera e propria

L'ultima fase, nei materiali fragili è quasi assente (es. calcestruzzo). È caratterizzata da 2 fenomeni:

4.3.3a) **Incrudimento**: è un fenomeno metallurgico che rafforza il materiale, è dato dalla deformazione plastica che avviene per scorrimento dei piani cristallini fra loro, questo però è ostacolato dai difetti del reticolo cristallino, che possono essere di vario tipo:

di punto

di linea

di superficie

Mentre all'inizio questi difetti aiutano la deformazione, con l'avanzare della prova i stessi si moltiplicano e rendono il materiale più resistente.

Il fenomeno dell'incrudimento può essere attenuato scaldando il provino.

4.3.3b) **Riduzione dell'area del provino**: come sappiamo dalle scienze delle costruzioni, l'effetto Poisson fa sì che ad uno sforzo monoassiale (come la nostra prova di trazione), corrisponda una deformazione che non coinvolge solamente un asse, ma si ha un allungamento del provino e una riduzione dell'area nella sezione utile. Quando ho introdotto la tensione ho usato

$\delta = F/A_0$, e non F/A , nel momento in cui la sezione si riduce sensibilmente ovviamente basta una forza minore per continuare a deformare il provino, e quindi δ cala.

Nota: siccome nel tratto elastico A è circa uguale ad A_0 questo effetto lì è poco visibile.

La somma dei due effetti porta a delle curve plastiche derivata prima >0 .
 La relazione che descrive questa parte della curva è

$$\delta = k\epsilon^n$$

dove

- ϵ = deformazione (adimensionale)
- k =costante di resistenza del materiale (MPa)
- n =coefficiente di incrudimento(adimensionale)

4.3.4 Strizione localizzata

Il provino ha una riduzione sensibile dell'area in un punto ben preciso, in quel punto la curva raggiunge il massimo assoluto δ_r o tensione di rottura, e si accentua ancora di più il fenomeno 3b portando quindi la curva a scendere. Nella zona della strizione il carico non è più monoassiale, ma triassiale e questo comporta:

- cedimento del pezzo in quel punto.
- da questo punto in poi la prova è affetta da errore in quanto la tensione non è più solo monoassiale.

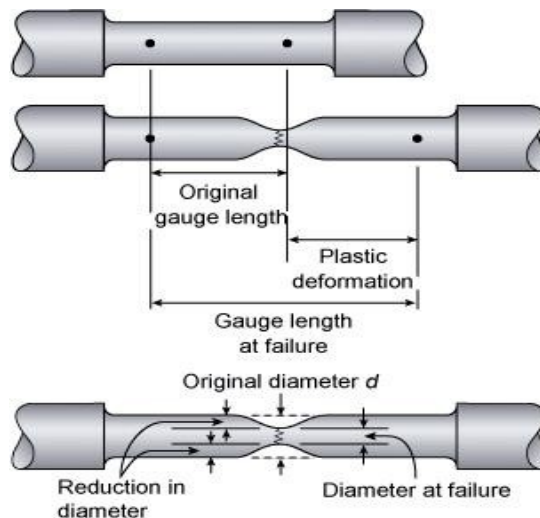


Fig. 4.3 Strizione localizzata su provino cilindrico

Questo punto, seppur chiamato con il numero 4, è in realtà parte del fenomeno 3(deformazione plastica vera e propria).

4.3.5 Rottura: il formarsi della strizione localizzata porta il provino a rompersi in breve tempo, concludendo così la prova. La sezione di rottura può assumere aspetti diversi. In generale si distingue:
Rottura duttile: si ha per deformazione plastica, i piani che scendono fra loro sono orientati di 45° rispetto alla direzione della tensione, inoltre ho:

- a) deformazioni elevate (è l'unica delle due a presentare la strizione localizzata)
- b) δ_{sn} minore di δ_r .

A livello microscopico si vede che le deformazioni generano dei microvuoti (chiamati "dimple") che sono causati dalla concentrazione della tensione nei difetti del pezzo. I dimple crescono e si uniscono fino al punto in cui la sezione si riduce così tanto che non riesce più a sostenere lo sforzo e arriva al cedimento.

Rottura fragile: si ha per rottura dei legami atomici, e conseguente separazione dei piani cristallini, avviene in maniera improvvisa, la rottura è perpendicolare alla direzione di tensione, inoltre:

- 1) deformazioni basse
- 2) δ_{SN} è molto vicino a δ_r .

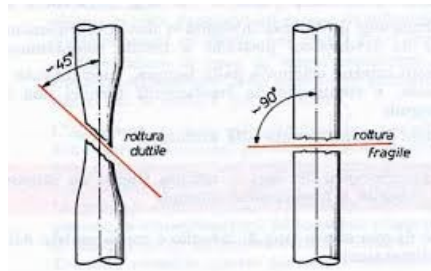


Fig. 4.4 differenza tra rottura fragile e rottura duttile

4.4 Conclusioni

Una volta che la prova è conclusa posso calcolare diversi dati:

- Tensione di snervamento
- Tensione ultima
- Tensione di rottura
- Deformazione a snervamento
- Deformazione ultima
- Deformazione a rottura (o allungamento percentuale)
- Curva di trazione ingegneristica

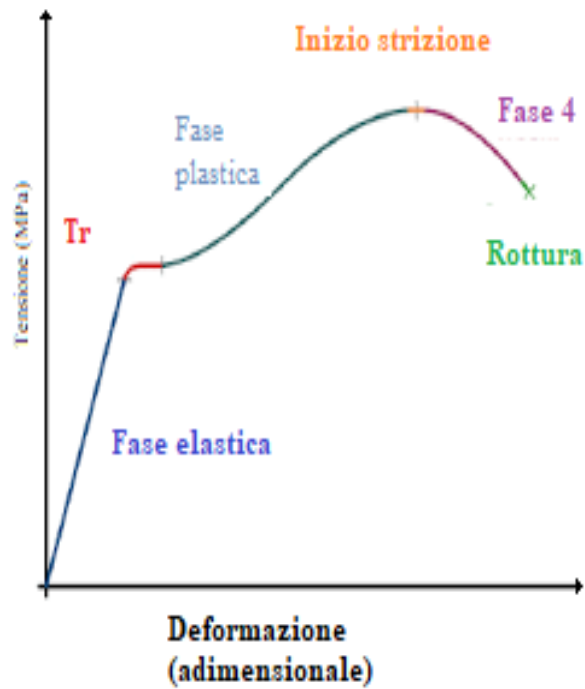


Fig. 4.5 Grafico della prova di trazione generica

4.5 Curva di trazione nominale

Ho prima sottolineato come la tensione ingegneristica e la deformazione ingegneristica introducono un errore nel descrivere la prova di trazione nella fase plastica. Vediamo se è possibile sistemare la cosa:

-Per la tensione devo considerare

$$\delta_{\text{reale}} = F/A$$

$$\delta_{\text{reale}} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{A_0}{A} = \delta(1 + \varepsilon)$$

-Per la deformazione invece la prova di trazione si può assumere come somma di prove di trazioni incrementali, dove per ogni incremento il campione ha una lunghezza maggiore rispetto alle prove precedenti. Si ha:

$$\varepsilon_{\text{reale}} = \int \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon)$$

Dove

δ_{reale} = tensione effettiva sul provino (Mpa)

$\varepsilon_{\text{reale}}$ = deformazione effettiva del provino (adimensionale)

A = area del provino durante la prova (m²)

F = forza della macchina durante la prova (N)

l = lunghezza del provino misurata durante la prova (m)

A₀ = area iniziale del provino (mq)

L₀ = lunghezza iniziale del provino (mq)

La seconda formula vale se considero che in campo plastico non ho variazione di volume.

Nell'immagine sotto si evidenzia l'errore che si ha fra le 2 curve, e si ribadisce che non è sempre possibile misurare l'area durante la prova di trazione e che comunque, l'errore è accettabile.

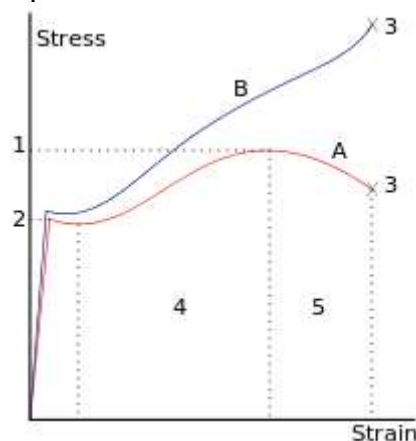


Fig. 4.6 Differenza fra curva ingegneristica (rosso) e curva reale (blu)

Secondo Datsko inoltre

$$\delta_{\text{reale}} = \delta\varepsilon$$

Siccome $\varepsilon = \ln(L/L_0) = \ln(A_0/A)$

$$A = \frac{A_0}{e^\varepsilon}$$

Siccome $P = F/A$, allora $P = \delta_{\text{reale}} * A_0 / (e^\varepsilon)$

Considerando che la strizione avviene quando la variazione di carico per avere deformazione è nulla, posso porre:

$dP/d\varepsilon = 0$, quindi

$$\frac{dP}{d\varepsilon} = \frac{A_0}{e^\varepsilon} \left(\frac{d\delta_{\text{reale}}}{d\varepsilon} - \delta_{\text{reale}} \right) = 0$$

Il punto di inizio formazione della strizione è

$$d\delta_u/d\varepsilon = \delta_u$$

L'indice "u" sta a significare che sono nel massimo della curva di trazione (non a rottura, ma al punto di formazione della strizione). Siccome $\delta_{\text{reale}} = \delta_0 * \varepsilon_{\text{reale}}^m$, allora $m = \varepsilon_u$, ovvero il collasso plastico avviene quando l'esponente di incrudimento m , eguaglia il valore della deformazione.

4.6 Effetti che interferiscono sulla prova

4.6.1 Effetti della temperatura

Le principali caratteristiche influenzate sono:

-Resistenza

-Duttilità

1) Per quanto riguarda la resistenza si distingue tra

1°) Resistenza a trazione (tensione di rottura) nella quale per T simili alla T ambiente il suo valore cambia poco, mentre se alzo T ulteriormente il suo valore precipita

1b) Resistenza di snervamento (tensione di snervamento) la quale cambia in maniera più continua al crescere di T

Un fenomeno di nostro interesse è il Creep, ovvero il deformarsi in maniera plastica del provino posto sotto tensione < tensione di snervamento.

2) Per quanto riguarda la duttilità, sappiamo che l'aumento della temperatura affievolisce il fenomeno dell'incrudimento, ciò è possibile poiché:

-L'energia cinetica degli atomi è tale per cui alcuni di loro si mobilitano e vanno a rimediare ai difetti del cristallo.

-Si attivano nuovi piani di scorrimento per la deformazione plastica.

A livello sperimentale si è osservato come la temperatura incida secondo la formula:

$$\delta = C2 * e^{\frac{Q}{RT}}$$

dove

Q=energia di attivazione per lo scorrimento plastico (J)

R=costante universale dei gas

T=temperatura alla quale eseguo la prova (K)

C2=costante del materiale (MPa)

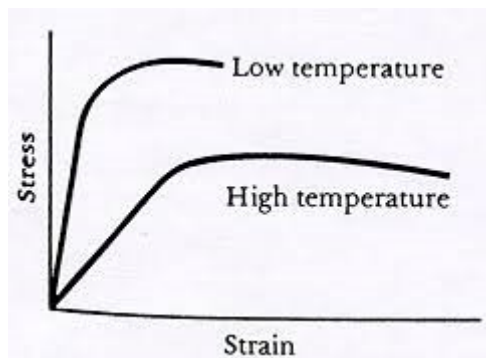


Fig. 4.7 Variazione di tensione e deformazione al variare della temperatura

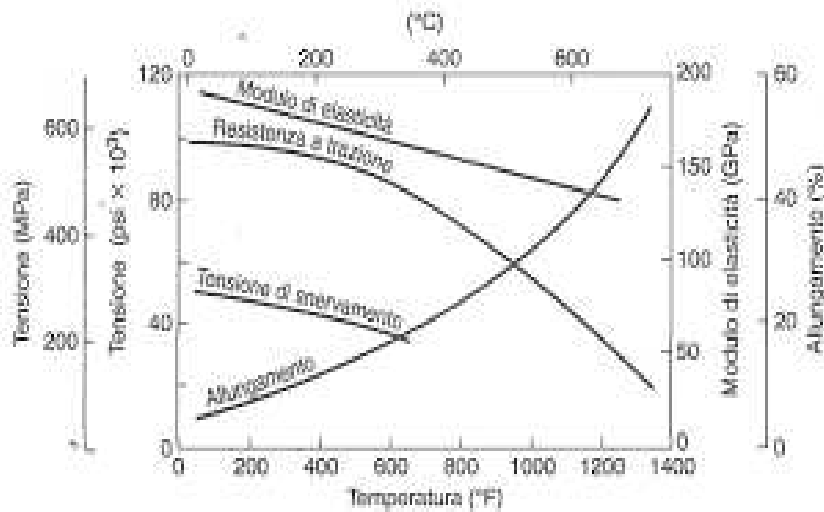


Fig. 4.8 Variazione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio al variare della temperatura

4.6.2 Effetti della velocità di deformazione

La velocità di deformazione indica la velocità con la quale viene applicata una determinata deformazione ad un campione di materiale. Per poter simulare il processo anche la prova di trazione può essere eseguita a diverse velocità di deformazione. La velocità di deformazione ingegneristica è definita come:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$$

$$\delta = c\dot{\epsilon}^m$$

Dove

$\dot{\epsilon}$ = velocità di deformazione (s^{-1})

ϵ = deformazione (adimensionale)

t = tempo (s)

δ = tensione di snervamento (MPa)

C = coefficiente di resistenza (MPa*s)

m = coefficiente di sensibilità della tensione alla velocità di deformazione (strain-rate sensitivity)

Di solito per la maggior parte dei metalli si assume un valore di $0 < m < 0,03$, questo vuol dire che gli effetti della velocità di deformazione sono visibili solo nelle lavorazioni meccaniche, infatti considerando 2 velocità di deformazione di cui una è 100 volte l'altra si ottiene:

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right)^m$$

$$\ln(\delta_2/\delta_1) = m \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right)$$

$$\ln((\delta_1 + \Delta\delta) / \delta_1) = m \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right)$$

$$\Delta\delta/\delta_1 = m * \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right) = 2.3 * m * \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right)$$

Questo vuol dire che se $\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right)=100$, allora $\Delta\delta/\delta_1=4,6\%$, ovvero la differenza è abbastanza trascurabile.

Di solito per avere un effetto vero della velocità di deformazione devo avere almeno $\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} = 10000$.

Per calcolare il fattore m di solito si eseguono prove di trazione a differenti velocità, oppure con delle prove aventi repentini cambiamenti di velocità di deformazione, detti jump set, questo permette di trovare i $\Delta\delta$ di cui sopra, e quindi trovare poi m.

C'è infine da ricordare che m non è indipendente dalla temperatura, nel caso in cui la prova si svolga a temperature elevate.

4.7 Prova di compressione

Si accenna alla prova di compressione poichè, visto che la prova di trazione è vincolata dalla strizione localizzata (come già appena visto), la prova di compressione può, in alcuni casi, andare ad integrarsi con la prova di trazione per avere delle informazioni in più, soprattutto nella parte finale della curva, questo è l'unico vero vantaggio.

Consiste nel comprimere un provino di forma cilindrica stretto fra 2 piastre, mentre viene misurata la variazione di altezza (Δh) e la forza impressa P.

Tensione vera:

$$\delta = \frac{P}{A} = \frac{Ph}{A_0 h_0}$$

Deformazione vera:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) = \ln\left(\frac{h_0}{h_0 - \Delta h}\right)$$

Dove:

A_0 = Sezione iniziale del provino (m^2)

A = Sezione del provino nel momento t (m^2)

h_0 = Altezza iniziale del provino (m)

h = Altezza del provino nel momento t (m)

P = forza impressa durante la prova (N)

Δh = variazione di altezza del provino (m)

Come si può osservare dalla fig. 4.11, il provino assume la forma di una botte durante la prova, questo poichè si sviluppa dell'attrito a contatto con le piastre che ostacola il flusso del materiale verso l'esterno, questo fenomeno è ovviamente accentuato man mano che mi avvicino alle piastre, mentre quando sono lontano da esse (in mezzzeria) ho il flusso normale del materiale.

Per ovviare a questo problema di solito si usa del lubrificante fra piastra e provino che può essere di più tipi:

prova a caldo: grafite in olio, vetro

prova a freddo: fogli di teflon, olio ad alta viscosità.

Un altro problema che sorge durante questa prova è l'aumento del diametro del provino, questo provoca un aumento di P notevole su provini con rapporto D_0/h_0 elevato (D_0 è il diametro iniziale). Se dal lato opposto diminuisco questo rapporto ho problemi di carico critico (infatti non si può effettuare questa prova sulle lamiera).

La curva di compressione in assenza di attrito viene estrapolata da curve con diversi rapporti D_0/h_0 .

La figura mostra il tipico comportamento della tensione in funzione della deformazione.

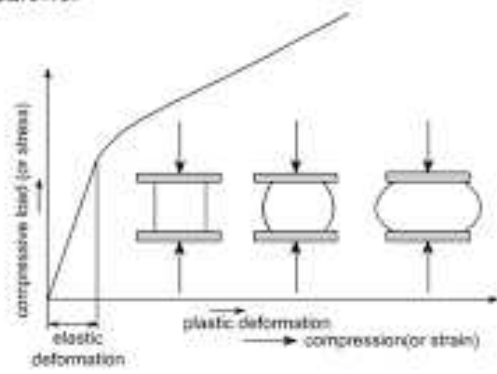


Fig. 4.9 grafico ed esempio di prova di compressione

Fatica

5.1 Cos'è la fatica?

La fatica è un fenomeno che si ha quando un corpo è soggetto ad una serie di sforzi ripetuti, questi possono essere di vario genere.

Il corpo quindi dopo un numero di sforzi ripetuti si rompe per fatica, nonostante le tensioni applicate siano minori di quelle di rottura, spesso non arrivano neanche allo snervamento.

La curva che descrive questo fenomeno è detta curva del Wöhler (fig. 5.1).

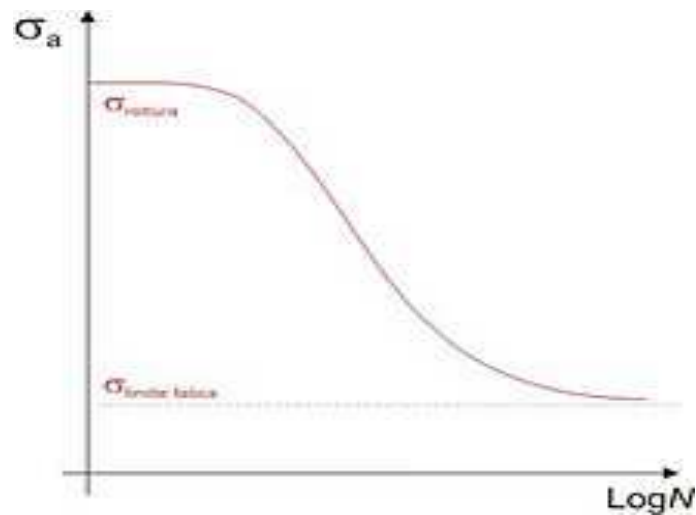


Fig. 5.1 Diagramma di Wöhler

Nella curva di Wöhler si riconoscono alcuni punti:

- La tensione di rottura (δ_r) derivante direttamente dalla prova di trazione

- La fatica oligociclica, ovvero quella fatica che si verifica attorno i 1000/10000 cicli, ed è la prima parte del grafico,

La fatica su, ovvero quella fatica che si verifica tra la fatica oligociclica e i 10 milioni di cicli circa.

La tensione limite di fatica (δ_{lf}), oltre la quale, il corpo riesce a tenere un numero infinito di cicli (teoricamente).

5.2 Meccanismo del danneggiamento per fatica

Il meccanismo per danneggiamento a fatica avviene grazie al fatto che anche se globalmente σ è sotto la soglia di snervamento, localmente ciò non è vero, visto che il reticolo cristallino è di per se imperfetto. Il fenomeno della frattura si svolge in più fasi sotto descritte:

-Innesco della frattura: ha l'effetto di stabilizzare il ciclo di isteresi plastica della massa metallica. Si generano inoltre delle microintrusioni e microestrusioni. La frattura si innesca quasi sempre sulla superficie del pezzo ed è dovuta a irregolarità superficiali di qualsiasi tipo.

-Nucleazione: in questa fase nelle microintrusioni e microestrusioni innescate si hanno sforzi di taglio, quindi il materiale cederà in maniera molto più facile, e si formeranno delle microcricche che tendono a riunirsi fra loro generando una cricca vera e propria.

-Propagazione della cricca: mentre nella prima fase la cricca avanza con direzione di 45° rispetto allo sforzo esterno, ora la direzione è perpendicolare (come nella rottura fragile), e ad ogni ciclo di sforzo la cricca avanza.

-Frattura finale: in questa fase la cricca è avanzata così tanto che la sezione del materiale è bassa e la rottura avviene per carico statico (tipo prova di trazione).

5.2.1 Approccio energetico secondo Griffith

Secondo questo approccio sfrutto la conservazione dell'energia per analizzare il fenomeno della cricca.

Se ho un corpo con una cricca e soggetto ad una forza F , in condizioni di equilibrio ho che:

$$U_{el} = U_f$$

Dove

U_{el} = energia di deformazione elastica (J)

U_f = energia spesa nell'applicare la forza F (J)

Se aumento F e la cricca comincia a propagarsi, l'area della cricca aumenta di una quantità dA e:

$$\frac{dU_f}{dA} = \frac{dU_{el}}{dA} + \frac{dU_{sup}}{dA} + \frac{dU_{cin}}{dA}$$

Dove

U_{sup} = energia di formazione di nuove superfici (J)

U_{cin} = energia cinetica della cricca (J)

Definendo $G = dU_f/dA - dU_{el}/dA$ = tasso di rilascio dell'energia, ovvero la parte di energia che continua ad agire sul pezzo al di là della deformazione elastica

$R = dU_{sup}/dA$ = resistenza a frattura, allora:

$$G - R = \frac{dU_{cin}}{dA}$$

Ovvero la cricca continua la sua propagazione se $G > R$.

Siccome tutti i termini dipendono da dA , una volta che l'equazione si è verificata, la cricca aumenta la sua dimensione, e quindi cambia il fattore dA , questo vuol dire che devo nuovamente verificare l'equazione se voglio avere una rottura improvvisa, si introduce quindi il criterio di instabilità:

$$G > R$$

Il quale vien derivato secondo la variabile dA e si ottiene:

$$dG/dA > dR/dA$$

Risolvendo l'equazione *:

$$U_{cin} = \int (G - R) dA$$

Inoltre:

-Egli ipotizza che l'energia superficiale è calcolata come prodotto tra l'area superficiale totale della cricca ($2 \cdot 2 \cdot t$) e l'energia superficiale specifica γ :

$$R = 4at\gamma$$

Mentre per il calcolo di G sfrutta la trattazione analitica di Inglis nella quale:

$$G = \frac{(\pi a^2 t \delta^2)}{E}$$

Dove

a = semiampiezza della cricca (m)

t = spessore della piastra (m)

E = modulo elastico di Young (MPa)

γ = energia superficiale specifica (N/m²)

δ = tensione applicata (MPa)

Ora il problema dell'instabilità della cricca è di facile risoluzione, poichè derivando 2 volte in a (semiampiezza della cricca):

$$2 \frac{(\pi t \delta^2)}{E}$$

Un fattore sempre negativo, il quale fa sì che una volta che si inneschi la cricca essa si propaga sempre. La derivata di primo grado posta uguale a zero porta alla condizione:

$$2\gamma = \frac{(\pi a \delta^2)}{E}$$

Dalla quale è possibile ricavare la tensione δ :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\gamma E}{a\pi}}$$

Nel caso in cui abbia uno stato piano di tensione:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\gamma E}{a\pi(1-\nu^2)}}$$

Siccome $0,25 < \nu < 0,33$, l'ipotesi di stato piano di tensione non produce grandi cambiamenti.

Da considerare che per ora abbiamo agito sotto l'ipotesi che il materiale agisce in maniera completamente elastica fino alla rottura, cosa vera solo per i materiali fragili (es. Calcestruzzo), mentre per l'acciaio ciò non è assolutamente vero, infatti nei materiali duttili, il materiale è in grado di assorbire molta più energia, grazie al campo plastico di deformazione.

Per ovviare a ciò si introduce il parametro γ_p che rappresenta l'energia plastica di deformazione, quindi:

$$\delta = \sqrt{\frac{2(\gamma + \gamma_p)E}{a\pi}}$$

Considerato che nei materiali duttili il campo elastico è praticamente nullo, se confrontato al campo plastico, avrò che

$$\gamma \ll \gamma_p$$

Quindi ignorando γ :

$$\delta = \sqrt{\frac{2(\gamma_p)E}{a\pi}}$$

Introduco ora

$$\delta_c = \sqrt{\frac{E\gamma_s}{a_0}}$$

energia da vincere per innescare una cricca in un materiale non danneggiato

$$\delta_{\max} = 2\delta_a \sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

fattore di concentrazione delle tensioni approssimato, per una piastra infinita soggetta a trazione o compressione, con un intaglio ellittico centrale.

Dove:

δ_a = carico applicato a monte e a valle dell'intaglio per giungere a frattura (MPa)

E = modulo elastico (MPa)

a_0 = equilibrium atomic separations (m)

γ_s = energia superficiale specifica (J)

ρ = raggio di raccordo agli apici (m)

a = semi-ampiezza dell'intaglio (m)

Eguagliando le 2 equazioni precedenti e ricavando δ_a si ottiene:

$$\delta_a = \frac{E\gamma_s}{2a_0} \sqrt{\frac{\rho}{a}}$$

Concludendo, quindi avrò che le equazioni appena scritte avranno quindi campi di applicabilità diversi:

-le equazioni in blu potranno essere applicate quando siamo in presenza di intagli con apici $\rho \leq (8/\pi)a_0$, ma non è ragionevolmente plausibile che la tensione vada a zero se $\rho \rightarrow 0$;

-le equazioni verdi potranno essere applicate in presenza di apici $\rho > \frac{8a_0}{\pi}$ dove i processi plastici presenti sono molto evidenti.

5.3 Controlli non distruttivi

Sono dei controlli che vengono fatti su dei pezzi soggetti a sforzi di fatica atti ad evitare la rottura, ne vediamo alcuni:

1) **Liquidi penetranti**

Viene versato del liquido a bassa viscosità sulla superficie del pezzo, a questo punto il liquido penetra per capillarità nei difetti della superficie, mentre il liquido in eccesso viene rimosso.

Si passa un agente assorbente che estrae il liquido dalle fessure e le evidenzia sulla superficie.

Questo metodo ha il difetto che non può essere usato sulle superfici porose, non evidenzia cricche interne, e non è realizzabile su superfici difficilmente raggiungibili.

2) **Controlli ultrasonori**

Vengono propagate nel pezzo da analizzare delle onde ultrasonore ad alta frequenza, queste propagano facilmente nei corpi solidi e vengono riflesse quando incontrano una discontinuità.

In base alle riflessioni siamo in grado di sapere quante discontinuità (o difetti) ci sono nel corpo.

3) **Controlli radiografici**

Sono simili alle radiografie fatte per trovare le fratture nelle ossa umane.

Il componente è attraversato da dei raggi X che colpiscono quindi una lastra fotografica: parte delle radiazioni vengono assorbite, altre no, creando così un diverso effetto sulla lastra e potendo analizzare anche pezzi complessi e di notevole spessore. Il problema è ovviamente il danno che le radiazioni sono in grado di recare al personale.

4) **Controlli magnetoscopici**

Si posiziona sul pezzo da controllare della polvere ferromagnetica e si impone un campo magnetico esterno. Si avrà quindi un addensamento della polvere in corrispondenza del flusso disperso che individua eventuali difetti nel pezzo.

E' un metodo semplice che riesce fare analisi più profonde rispetto ai liquidi penetranti.

5.4 Fattori che influenzano la prova di fatica

I principali sono:

5.4.1 Finitura superficiale

La cricca come già detto si innesta sempre in un punto sulla superficie del pezzo, questo avviene perché:

- i cristalli in corrispondenza della superficie possono presentare minore resistenza ai difetti microscopici non essendo totalmente circondati da altri cristalli.
- Le irregolarità della superficie costituiscono un punto di concentrazione di tensioni, oltre ad essere già delle cricche microscopiche

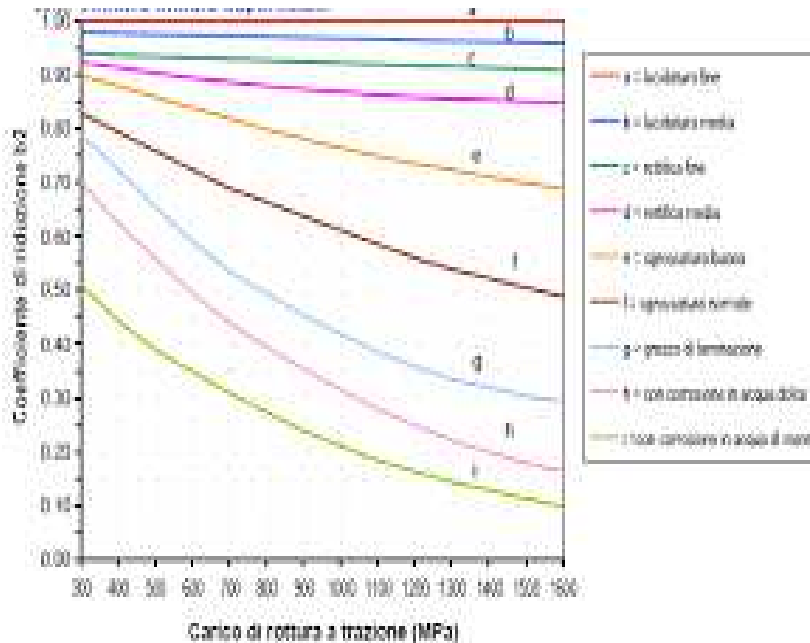
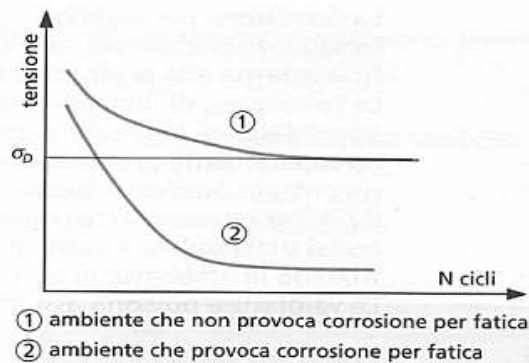


Fig. 5.2 Variazione del carico di rottura in funzione della finitura superficiale

5.4.2 Corrosione del materiale

In presenza di ambiente corrosivo, come l'acciaio in acqua, si vede che l'effetto principale è la scomparsa del limite di fatica, si ha quindi un effetto che si vede principalmente nella parte destra del diagramma di Wöhler. Per ovviare questo problema si può rivestire il metallo di uno smalto (come nel nostro caso)



– Andamento qualitativo della resistenza a fatica (curve di Wöhler) per un acciaio.

Fig. 5.3 variazione e annullamento del limite di fatica in ambiente corrosivo

5.4.3 Effetto taglia

Aumentando le dimensioni del provino diminuisce la resistenza a fatica perchè:

- un provino più grande ha una maggiore quantità di difetti, quindi la possibilità di innesco del danneggiamento è maggiore e si verifica più rapidamente;
- le lavorazioni e i trattamenti superficiali hanno minore influenza positiva nelle zone interne del provino per elementi di dimensioni maggiori.

5.4.4 Gradiente e/o tipo di sollecitazione

Le prove di fatica sono di vario tipo, è ovvio quindi che i risultati possono variare in base al tipo di prova:

- $K_c=1$ per prove a flessione rotante
- $K_c=0,85$ per prove a trazione/compressione assiale
- $K_c=0,59$ per prove a torsione pura

5.4.5 Presenza di intagli

Come nel caso della finitura superficiale gli intagli costituiscono:

- Punti di concentrazione delle tensioni
- Punti di innesco di cricche e di difficile lavorazione

Per cui in maniera analoga alla finitura superficiale influiscono negativamente sulla vita a fatica del componente.

5.4.6 Effetto della temperatura

Come nella prova di trazione, anche nelle prove di fatica la temperatura gioca un ruolo non indifferente. Se $T < T_{ambiente}$, vado incontro alla frattura fragile nell'acciaio perdendomi tutto il campo elastico e abbassando la prima parte della curva di Wöhler.

Caso differente invece vale per il rialzo della temperatura oltre una certa T , infatti in questo caso la temperatura abbassa la tensione di rottura, quella di snervamento, e il limite di fatica.

5.4.7 Tensioni residue

A differenza di quel che si può pensare, le tensioni residue non sono sempre negative, infatti le rotture dovute alla fatica appaiono quasi sempre come rotture dovute alla trazione, quindi se io volutamente metto delle tensioni residue di compressione, esse possono aiutare il pezzo a resistere.

Pallinatura, stampaggio e laminazione a freddo sono lavorazioni che possono aiutare in questo senso, sempre evitando tensioni elevate di compressione.

5.5 Calcolo vita a fatica di un componente

Le teorie per il calcolo di un componente a fatica sono molte, ripartendo dai grafici di carico che, pur potendo essere molteplici, si è visto sperimentalmente come la cosa più importante è la differenza tra massimo e minimo della forza applicata (e della conseguente tensione).

Si individuano così alcune grandezze:

- δ_{\max} = Tensione massima (MPa)

- δ_{\min} = Tensione minima (MPa)

- δ_a = Tensione alterna o semiampiezza di tensione (MPa): $\left| \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{2} \right|$

- δ_m = Tensione media (MPa), ovvero: $\frac{\delta_{\max} + \delta_{\min}}{2}$

- δ_r = variazione della tensione = $\left| \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{2} \right| = 2\delta_a$

- δ_s = è una componente diversa dalla δ_m poiché la tensione media è una componente calcolabile come sopra illustrato, mentre questo è un valore compreso tra δ_{\min} e δ_{\max} .

- δ_{lf} = tensione limite di fatica (MPa)

Definisco inoltre:

-R = rapporto di tensione (adimensionale) = $\frac{\delta_{\min}}{\delta_{\max}}$

-A, coefficiente adimensionale = $\frac{\delta_a}{\delta_m}$

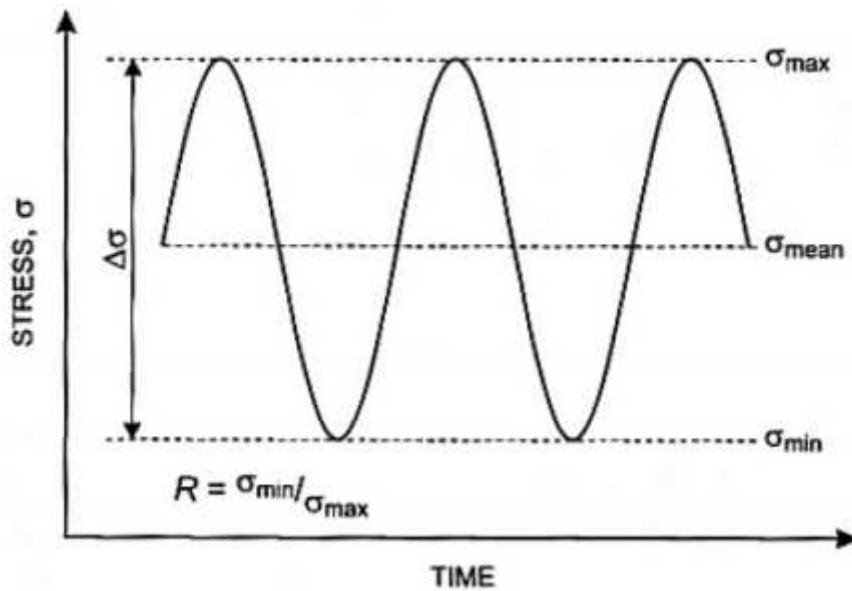


Fig.5.5 Esempio di tensione alternata nel tempo

Tra i vari criteri per la rottura ve ne sono alcuni:

1) **Retta di Soderberg**: è il metodo più in sicurezza, si ottiene considerando la retta nella figura sotto e calcolandola come tale, ovvero:

$$\delta_a = -\frac{\delta_{lf}}{\delta_{sn}} \delta_m + \delta_{lf}$$

$$\delta_a + \frac{\delta_{lf}}{\delta_{sn}} \delta_m = \delta_{lf}$$

$$\frac{\delta_a}{\delta_{lf}} + \frac{\delta_m}{\delta_{sn}} = 1$$

2) L'ultima equazione ottenuta è la retta di Soderberg. Per ottenere la **retta di Goodman modificata** basta porre $\delta_{sn} = \delta_r$:

$$\frac{\delta_a}{\delta_{lf}} + \frac{\delta_m}{\delta_r} = 1$$

3) **Criterio di rottura di Gerber**: è ottenuto considerando una parabola che interseca gli stessi punti del criterio di Goodman, inoltre, come terza condizione si considera come vertice il punto sulle ordinate, quindi si ha:

- A(δ_r , 0)
- B(0, δ_{lf})=vertice

Vado a vedere ora le condizioni della parabola:

- Xv=coordinata sulle ascisse del vertice= $-b/2$
- Yv=coordinata sulle ordinate del vertice= $-\Delta/4$
- Passaggio per il punto A

Quindi ho il sistema di equazioni:

- 1) $0 = \frac{-b}{2a}$
- 2) $\delta_{lf} = \frac{-\Delta}{4a}$
- 3) $0 = \delta_u^2 + b\delta_u + c$

La soluzione del sistema è:

$$(a,b,c) = \left(\frac{-\delta_{lf}}{\delta_u^2}, 0, \delta_{lf} \right)$$

L'equazione della parabola è:

$$\delta_a = \frac{-\delta_{lf}}{\delta_u^2} \delta_m^2 + \delta_{lf}$$

Raccogliendo a fattor comune δ_{lf} e lasciando solo il termine noto al membro di destra si arriva all'equazione finale:

$$\frac{\delta_a}{\delta_{lf}} + \left(\frac{\delta_m}{\delta_u} \right)^2 = 1$$

4) L'ultimo metodo trattato è la **linea ellittica ASME**, la quale considera un quarto di ellisse, passante per i punti di Soderberg, è molto semplice da trovare se si considera la generica equazione dell'ellisse:

$$\left(\frac{x}{a} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 = 1$$

Dove x e y sono gli assi di riferimento, mentre a e b sono la misura dei semiassi dell'ellisse, di conseguenza si ha:

$$\left(\frac{\delta_m}{\delta_{sn}} \right)^2 + \left(\frac{\delta_a}{\delta_{lf}} \right)^2 = 1$$

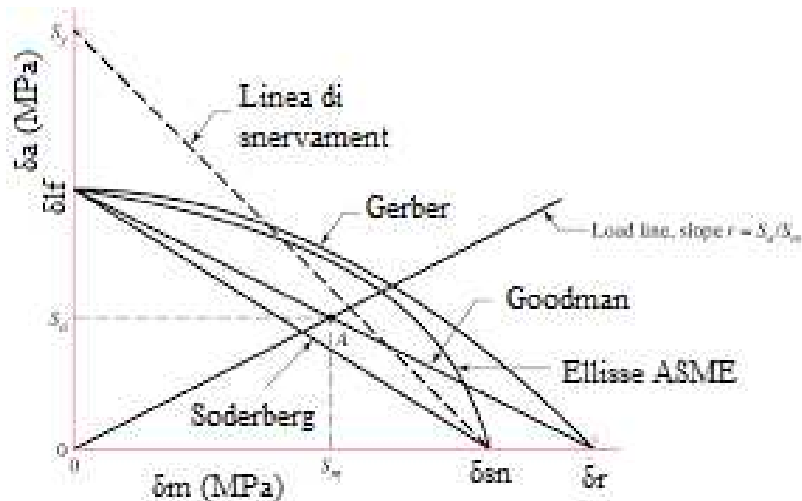


Fig.5.6 Grafico dei vari criteri

Nella fig. 4. Si possono vedere graficamente tutti i metodi sopra analiticamente descritti. Vi è inoltre l'aggiunta della linea di snervamento, ovvero di quella linea che serve ad unire al problema della fatica, quello del carico statico, e quindi evitare che il pezzo vada a snervamento. Questa linea è detta anche di Langer e la sua equazione è facile da trovare:

$$\delta_a = -\delta_m + \delta_{sn}$$

$$\delta_a + \delta_m = \delta_{sn}$$

Ovviamente per avere rottura il pezzo deve avere coordinate che escono dall'area sottesa alla curva. E' possibile aggiungere un coefficiente di sicurezza X, come spesso accade in ambito ingegneristico, per fare ciò basta sostituire a δ_a e δ_m dei valori $X\delta_a$ e $X\delta_m$ in modo tale che le equazioni già viste diventano:

Criterio di Sooderberg

$$\frac{\delta_a}{\delta_{lf}} + \frac{\delta_m}{\delta_{sn}} = \frac{1}{X}$$

Criterio di Goodman modificato:

$$\frac{\delta_a}{\delta_{lf}} + \frac{\delta_m}{\delta_r} = \frac{1}{X}$$

-Criterio di Gerber:

$$X \frac{\delta_a}{\delta_{lf}} + X \left(\frac{\delta_m}{\delta_u} \right)^2 = X^{-2}$$

-Ellisse ASME

$$\left(\frac{\delta_a}{\delta_{lf}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_m}{\delta_{lf}}\right)^2 = X^{-2}$$

-Linea di Langer:

$$\delta_a + \delta_m = \frac{\delta_{sn}}{X}$$

Un calcolo che è interessante fare è l'interpolazione del criterio di Goodman modificato con la linea di Gerber, che può essere facilmente risolto con un sistema:

- 1) $\delta_a = -\delta_m + \delta_{lf}$
- 2) $\delta_a = -\delta_{lf}/\delta_r * \delta_m + \delta_{lf}$

Da questo sistema posso trovare la soluzione:

$$(\delta_m, \delta_a) = \left(\frac{\delta_{sn} - \delta_{lf}}{\delta_r - \delta_{lf}} \delta_r, \delta_{sn} \frac{\delta_r - \delta_{sn}}{\delta_r - \delta_{lf}} \right)$$

Ora è possibile calcolare $\tan(\alpha) = \frac{\delta_a}{\delta_m}$

$$\tan(\alpha) = \frac{\frac{\delta_{sn}(\delta_r - \delta_{sn})}{\delta_r - \delta_{sn}}}{\frac{(\delta_{sn} - \delta_{lf}) \cdot \delta_r}{\delta_r - \delta_{lf}}}$$

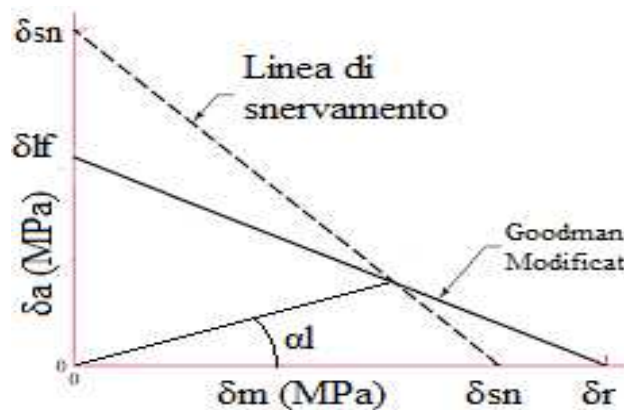


Fig.5.7 Grafico dell'unione tra linea di snervamento e criterio di Goodman modificato

Come è visibile nel grafico sopra, una volta calcolato α , si ha che:

- $\alpha < \alpha_l$, arriverà prima lo snervamento
- $\alpha > \alpha_l$, arriverà prima la rottura per fatica

Ci sono da aggiungere alcune considerazioni:

- Se al posto di δ_{lf} ci metto δ_n , ovvero la tensione alla quale il materiale riesce a sopportare un numero N di cicli, allora sto progettando su N cicli di fatica, e non più a vita infinita
- I coefficienti δ già citati devono essere completi dei coefficienti k_i , che descrivono i fenomeni che descrivono i fattori che influenzano la fatica.

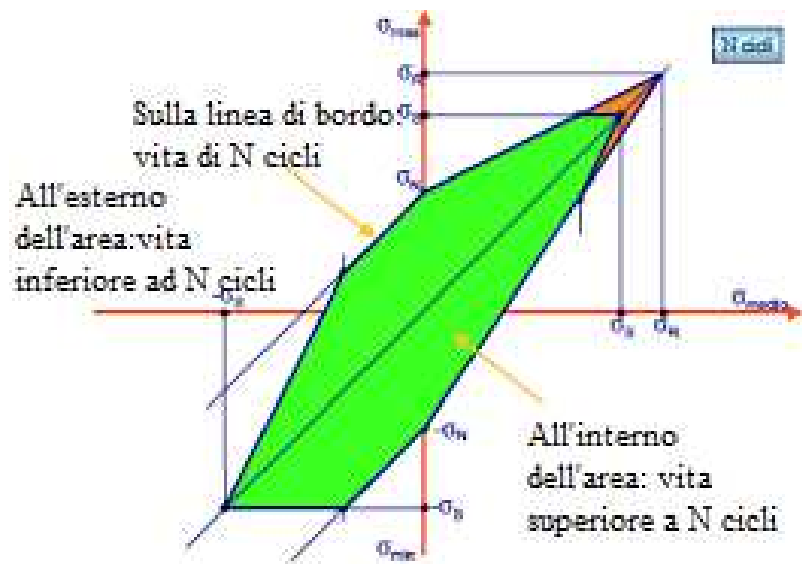


Fig. 5.8 Grafico di Goodman Smith

Fatica termomeccanica

6.1 Convezione

6.1.1 Moti convettivi

Si parte parlando della convezione, ovvero del processo che regola lo scambio di calore tra un fluido ed un solido. Il processo è caratterizzato da dei moti detti convettivi, ovvero, come visibile in fig. 7.1

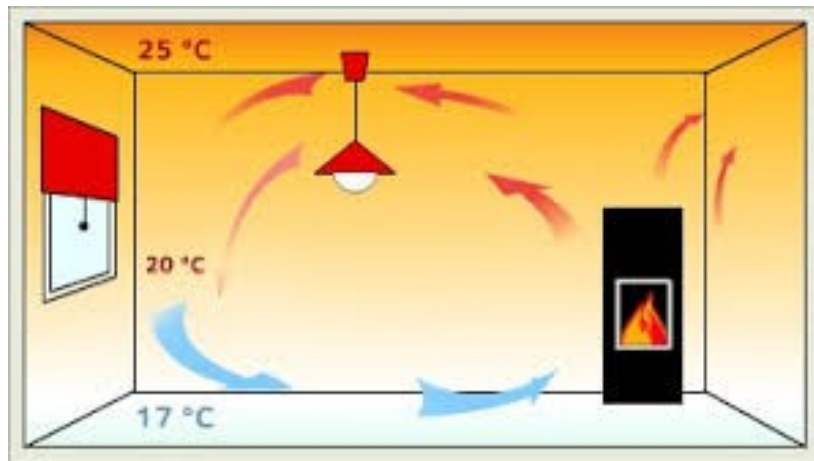


Fig. 6.1 Moto convettivo in un'abitazione

Questo avviene con un fluido che a contatto con un corpo caldo (in questo caso la stufa) viene scaldato e quindi si dilata, a questo punto il fluido diminuisce di densità e va verso l'alto, man mano che si allontana dalla sorgente di calore però lo stesso si raffredda, subendo così il processo inverso. Mentre il fluido si raffredda, la sorgente di calore è a contatto con un'altra parte di fluido, innescando questo processo con continuità, e creando così il moto convettivo.

Si distingue tra convezione naturale e forzata:

- naturale quando è solo la differenza di temperatura tra due superfici a mettere in moto il fluido.
- forzata quando il fluido è messo in moto da pompe o ventilatori (oltre che alla differenza di temperatura).

Il fluido può avere moto laminare o turbolento, anche se per avere elevati coefficienti di scambio termico si predilige convezione forzata e fluido in regime turbolento, mentre per il caso opposto si cerca di avere moto laminare e convezione naturale.

Per sapere se sono in regime turbolento o laminare si calcola il numero di Reynolds:

$$Re = \frac{\rho u l}{\mu}$$

Dove

ρ = densità del fluido $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

u = velocità del fluido $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

l = parametro lineare (m)
 μ = viscosità dinamica (Pa * s)

6.1.2 Coefficiente di convezione

Analizzando i dati sperimentali e la comune esperienza, si ha che 'energia scambiata q è direttamente proporzionale alla differenza tra parete calda e parete fredda.

$$Q \propto T_c - T_f$$

Dove

q = calore scambiato (J)
 T_c = temperatura parete calda (K)
 T_f = temperatura parete fredda (K)

Introducendo il coefficiente di convezione si ha:

$$q = h(T_c - T_f)$$

Dove h è il coefficiente di convezione (J/K)

A questo punto ho ricondotto il calcolo di q al coefficiente h , che dipende d diversi parametri:

$$h = h(\lambda, a, \rho, \mu, \gamma, u, l, \theta)$$

Dove

λ = conducibilità del fluido ($\frac{W}{m * K}$)
 a = coefficiente di dilatazione cubica (mc/k)
 ρ = densità (kg/mc)
 μ = viscosità dinamica (Pa*s)
 γ = calore specifico ($\frac{J}{kg * K}$)
 u = velocità della corrente indisturbata (m)
 l = parametro lineare che descrive la geometria del sistema (m)
 θ = differenza di temperatura fra le due pareti ($T_c - T_f$) (K)

Il calcolo di h cambia in base al tipo di flusso a cui stiamo assistendo:

convezione naturale: non tengo conto del parametro u
convezione forzata; non tengo conto dei parametri θ e a .

6.1.3 Equazioni convezione

E' possibile scrivere un'equazione differenziale deducibile dal principio di conservazione dell'energia, che consenta di determinare la distribuzione di temperatura. Scrivendo un bilancio energetico si ottiene:

$$dq + dqg - dL = dU .$$

Dove

dq = quantità di calore scambiata dal sistema (J)

dq_g = quantità di calore generata all'interno del sistema (J)

dL = lavoro compiuto dal sistema contro forze applicate (J)

dU = variazione di energia interna (J)

Le forze applicate all'elemento di volume ΔV sono gli sforzi di pressione e gli sforzi tangenziali: il lavoro compiuto contro i primi può essere positivo o negativo, mentre quello compiuto contro i secondi è sempre positivo. Tutti questi contributi sono tuttavia in genere trascurabili

Per quanto riguarda la variazione di energia interna, la derivata della temperatura $T = T(x,y,z,t)$ la derivata della temperatura deve essere di tipo globale:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T}{x} \frac{dx}{dt} + \frac{T}{y} \frac{dy}{dt} + \frac{T}{z} \frac{dz}{dt} = \frac{T}{t} + \mathbf{grad}(T) \cdot \mathbf{v}$$

Per cui ottengo

$$h\nabla^2 T + \frac{qg}{\rho c} = \frac{dT}{dt}$$

Dove

h = coefficiente di convezione

c = capacità termica

qg = quantità di calore generata all'interno del sistema

ρ = densità del fluido

L'equazione trovata è l'equivalente dell'equazione di Fourier per la convezione, quest'equazione però è risolvibile solo se conosco α , il campo delle velocità e le condizioni al contorno.

Oltre a questo, l'equazione trovata va messa a bilancio con:

-L'equazione di continuità

-Eq. Del moto di Newton

Questo rende il sistema non risolvibile, se non per vie numeriche, o introducendo delle approssimazioni.

6.2 Fatica termomeccanica

6.2.1 Introduzione

Quando un componente è soggetto a fatica termo-meccanica, avviene l'accrescimento dei carburi precipitati e la formazione di particolari strutture di dislocazioni dotate di una mobilità superiore, che causano quindi l'incremento prematuro dell'ampiezza della deformazione plastica. Contemporaneamente, ma solo per i primi cicli, si verifica un debole effetto di incrudimento che viene tanto meno evidenziato, quanto più alte sono la temperatura di esercizio e l'ampiezza della tensione. Durante i primi cicli, l'ampiezza della tensione si mantiene circa costante, mentre la tensione massima tende a calare e quella minima a crescere in valore assoluto, a causa dell'incremento di temperatura; questo produce una riduzione della tensione media e un aumento dell'ampiezza della deformazione plastica. La deformazione plastica, tuttavia, compare principalmente durante la fase di compressione ad elevate temperature, provocando così un aumento della tensione media di trazione che funge da compensazione per la riduzione di lunghezza subita dal campione. La vita residua di un componente soggetto a fatica termica viene ridotta all'aumentare della temperatura massima del ciclo, ma anche al crescere del ΔT . Si nota inoltre che per prove con la stessa temperatura massima, i provini con temperatura minima di 100°C hanno una vita residua inferiore rispetto a quelli con temperatura minima di 200°C, poiché un ΔT maggiore causa un aumento dell'ampiezza delle tensioni (quindi anche della tensione media). Infine, a parità di ΔT , temperature minime più basse portano a vite residue maggiori.

6.2.2 Effetto dello sfasamento tra carico meccanico e termico

Nella fatica termica anche lo sfasamento tra carico meccanico e termico è molto importante; infatti prove IP (in fase) e OP (in opposizione di fase) di solito forniscono risultati diversi per quanto riguarda la vita di un componente.

6.2.3 Previsione della vita a fatica termo-meccanica

Metodo di Ostergren

Ostergren ha proposto la seguente funzione di danneggiamento:

$$N_f = L[\sigma_{\max} * \Delta \epsilon_p]^\eta$$

Dove

- α , L e η sono parametri del materiale ricavabili da prove LCF
- σ_{\max} è il valore della tensione di picco di trazione ricavata a metà vita (σ_T)
- $\Delta \epsilon_p$ è la deformazione plastica considerata a metà vita

E' possibile modificare l'equazione per tenere conto di più fenomeni

$$N_f = L[\sigma_{\max} * \Delta \epsilon_p]^\eta * (\bar{v})^{(1-k)}$$

Nell'equazione sopra sono stati aggiunti i termini

\bar{v} = frequenza effettiva

k = costante dipendente dal materiale

Metodo della separazione della frequenza (Frequency Separation Method)

Questo metodo ha l'obiettivo di tenere in considerazione gli effetti dovuti alla frequenza del carico meccanico applicato, tenendo presente la relazione del metodo precedente, si è arrivati a questa relazione:

$$N_f = C \Delta \varepsilon_p^\beta v^{k-1} \left(\frac{v_c}{v_t} \right)^c$$

dove:

- C, β , k e c sono delle costanti
- v_c è la frequenza di compressione
- v_t è la frequenza di trazione

Modello Tensione-Deformazione-Tempo (Stress-Strain-Time, SST)

Come da nome, questo modello usa le grandezze di tensione, deformazione e tempo, per stimare la vita a fatica del componente:

$$N_f = A T_1 T_2 T_3 T_4$$

Dove

A= è un coefficiente relativo alla duttilità durante le prove di fatica

$$T_1 = \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{A_c} \right)^b$$

$$T_2 = \left(\frac{\tilde{\sigma}_t}{\tilde{\sigma}_y} \right)^c$$

$$T_3 = (\tau_t)^d$$

$$T_4 = \left(\frac{\tau_c}{\tau_t} \right)^e$$

dove:

- A_c è un coefficiente inerente alla duttilità in condizioni di fatica
- $\tilde{\sigma}_t$ e $\tilde{\sigma}_y$ sono rispettivamente la tensione di trazione e la tensione di snervamento
- η_t e η_c rappresentano rispettivamente il periodo di trazione e quello di compressione
- A, b, c, d, e sono delle costanti di natura sperimentale

Come si evince dalla formula, è il metodo più complicato, poiché devo procurarmi tutti i coefficienti. Questo è dato dal fatto che questo metodo sfrutta più metodi matematici, e li mette insieme, oltre a richiedere molti dati sperimentali.

Tutto questo porta però ad avere una maggior precisione rispetto ai metodi prima visti.

Fase pratica

Si è provveduto per fasi:

7.1 Fase 1: Progetto e Realizzazione del provino

Si è proceduto ad effettuare il disegno del provino, il quale ha una forma ad osso, di solito molto usata, si è inoltre tenuto conto del problema dell'intaglio durante i test di fatica, e quindi ho usato un raggio di raccordo più generoso.

Altro problema da tenere conto è la dimensione dell'area del provino, infatti, mentre a trazione ero sicuro della rottura del provino, per quanto riguarda la fatica non ero così sicuro, visto che la forza massima esplicabile della macchina è 2kN. Di conseguenza siccome i dati di targa del materiale sono

-Tensione di snervamento = 264MPa

-Tensione di rottura = 364MPa

-Allungamento percentuale = 35,3%

-Spessore lamiera = 1,6mm

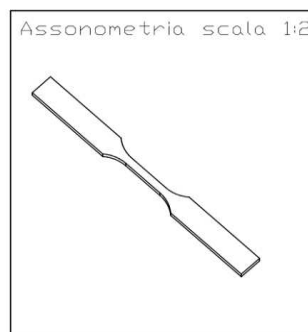
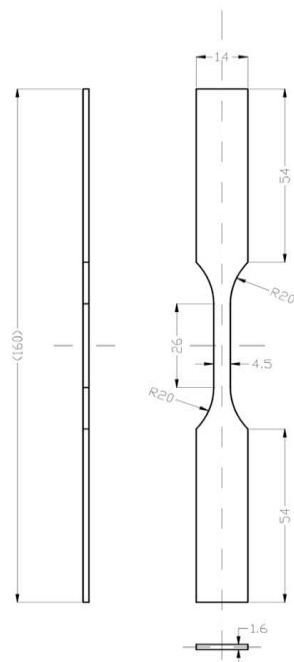
Ora siccome $\delta = F/A$, e A è di sezione rettangolare:

- $A = b * s$ dove $s = 1,6\text{mm}$.
- Tensione di lavoro = 280 MPa circa per evitare che venga durante i test di fatica non si arrivi a tensioni adeguate e si stia sotto il limite di fatica.
- $F = 2000\text{N}$ per limitazioni della macchina.

Di conseguenza $b = F/(\delta * s) = 4,5\text{mm}$ circa.

Provino per prove su materiale: acciaio laminato a caldo DD12 secondo norma EN 10111/08 ed EN 10051/11

Proiezione ortogonale su 3 viste scala 1:1



Casagrande
Alessandro

Fig. 7.1 Tavola del provino

I provini sono stati tagliati con del taglio a getto, circa la metà sono stati smaltati, ovvero ci è stato applicato sopra lo smalto che viene messo nei boiler per evitare la corrosione dell'acciaio. Lo smalto ha comportato uno spessore di circa 0,25mm.



Fig. 7.2 Provini tagliati

La casa madre ci ha fornito i seguenti dati:

- Tensione di snervamento= 264 MPa
- Tensione di rottura= 364 MPa
- Allungamento percentuale a rottura = 35,3%

7.2 Fase 2: Prova di trazione

Per quanto riguarda la prova di trazione effettuata sul provino, non ci sono stati particolari problemi per quanto riguarda i provini non smaltati, infatti i dati le 2 curve di trazione trovate sono sovrapponibili.

7.2.1 Prova 1 (provino non smaltato o NS)

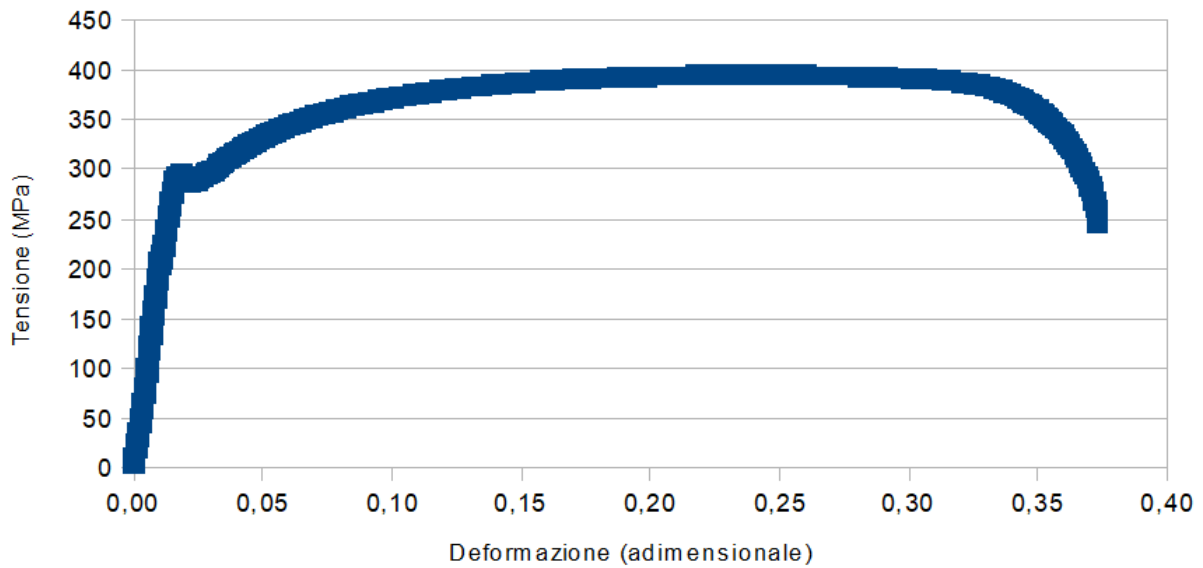


Fig. 7.3 grafico della prova 1

Dati rilevati oltre al grafico:

Tensione di snervamento=293MPa

Tensione di rottura=395MPa

Allungamento percentuale=37,34%

7.2.2 Prova 2 (provino non smaltato o NS)

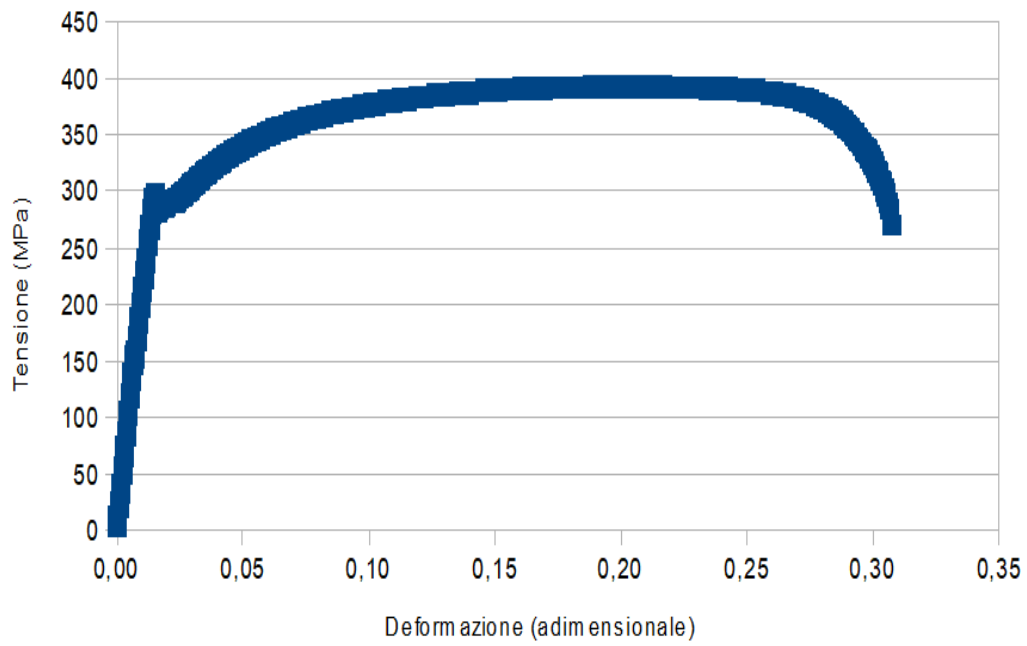


Fig. 7.4 Grafico della prova 2

Dati rilevati oltre al grafico:
Tensione di snervamento=298MPa
Tensione di rottura=393MPa
Allungamento percentuale=35,88%

7.2.3 Provino 3 (provino smaltato o S)

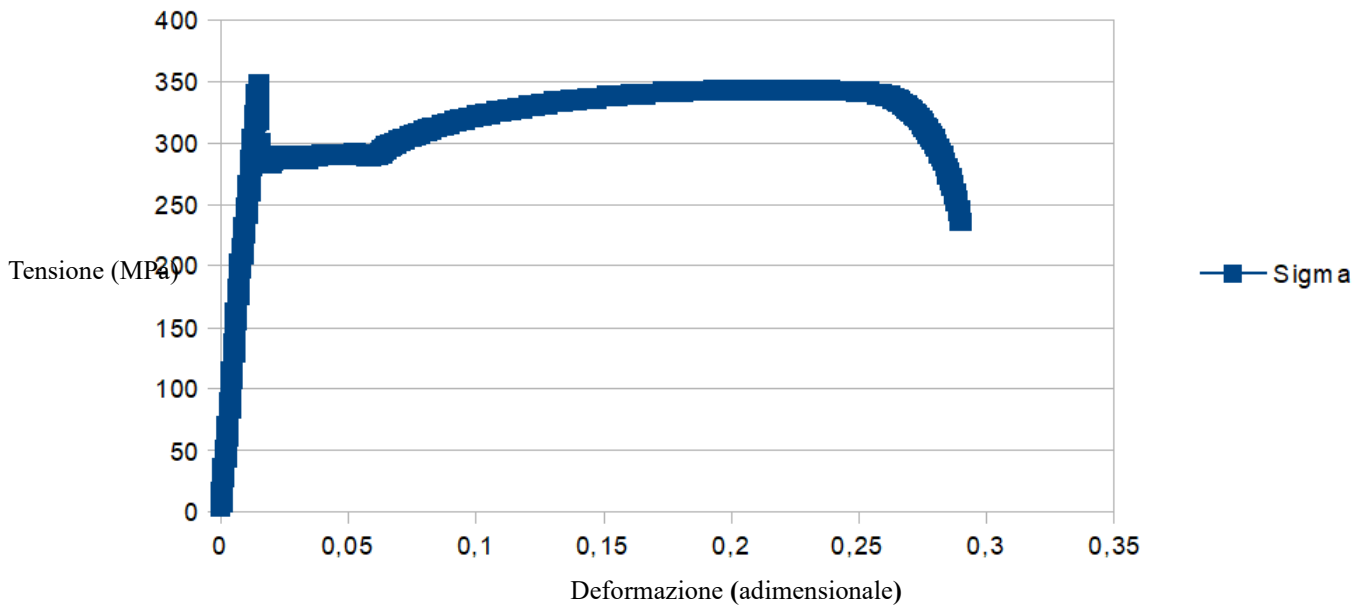


Fig. 7.5 Grafico della prova 3

Dati rilevati oltre al grafico:

Tensione di snervamento=290MPa

Tensione di rottura=350MPa

Allungamento percentuale=38,66%

Picco di snervamento = 360 MPa

7.2.4 Prova 4 (provino smaltato o S)

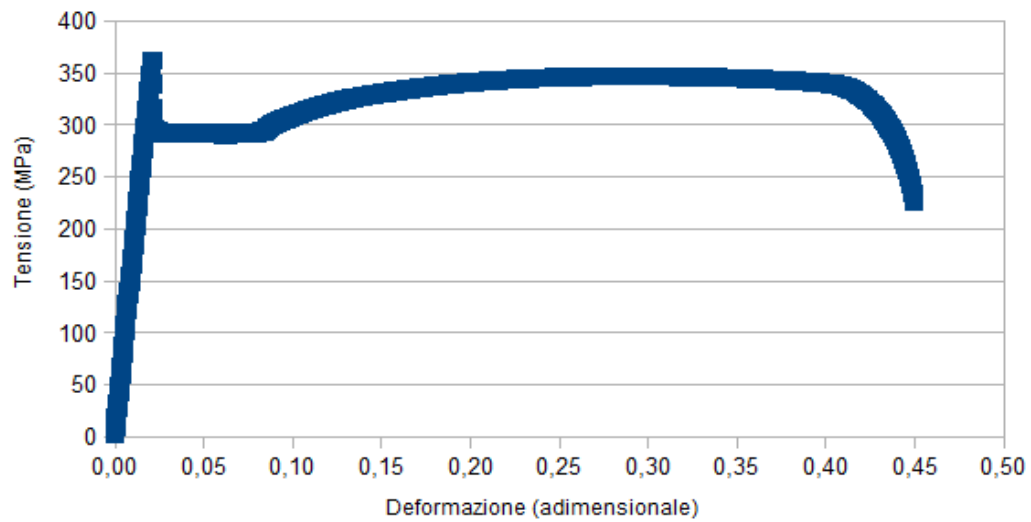


Fig. 7.6 Grafico della prova 4

Dati rilevati oltre al grafico:

Tensione di snervamento=295MPa

Tensione di rottura=350MPa

Allungamento percentuale=44,95%

Picco di snervamento : 365MPa

7.2.5 Risultato finale e considerazioni

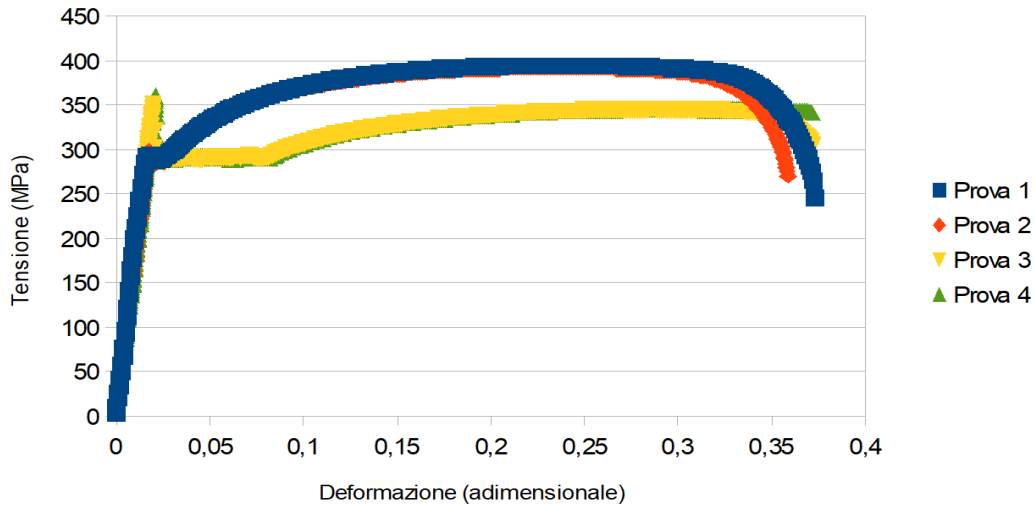


Fig. 7.7 Grafici delle quattro prove sovrapposti

In conclusione:

	Snervamento	Picco di snervamento (S)	Rottura	Allungamento % a rottura
Prova 1 (NS)	293MPa	---	395MPa	37,34%
Prova 2 (NS)	298MPa	---	393MPa	35,88%
Prova 3 (S)	290MPa	360MPa	350 MPa	38,66%
Prova 4 (S)	295MPa	365MPa	350MPa	44,95%
Dati di targa	264 MPa	---	364 MPa	35,30%

Tab. 7.1 Riassunto dei risultati delle prove di trazione

Visti i grafici e i dati riportati nella tabella posso dire che:

- 1) i dati di targa (riferiti al provino non smaltato) sono in sicurezza con un margine di 30MPa circa, questo ovviamente è voluto dall'azienda venditrice che, come al solito, si crea un margine di sicurezza, poichè nel momento in cui un acciaio rompe, può anche dar luogo a eventi gravi.
- 2) il provino smaltato, oltre ad essere smaltato è stato anche ricotto durante il processo di smaltatura, questo ne abbassa i δ_{sn} , oltre a questo la presenza dello smalto (non conteggiato nel calcolo di δ) aiuta in qualche modo a resistere, creando il picco di primo snervamento.
- 3) come ci si poteva aspettare la ricottura dell'acciaio ne ha aumentato l'allungamento a rottura.

7.3 Fase 3: Prove di fatica

Trattandosi di lamiera, le prove di fatica non sono state svolte con la flessione rotante, ma con una trazione intermittente. Questo perchè il materiale interessato, essendo una lamiera, non viene testata a flessione rotante, inoltre, quando viene messa in uso la sollecitazione a cui è sottoposta è quella a trazione data dall'acqua.

7.3.1 Setup della prova

Per quanto riguarda il setup della macchina è visibile dalle foto sotto:

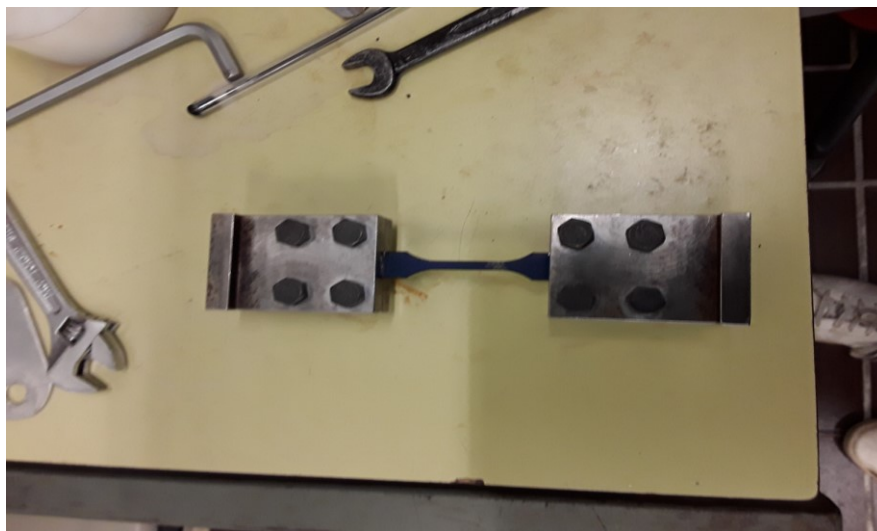


Fig. 7.8 provino incastrato fra le due piastre avvitate per la prova a fatica

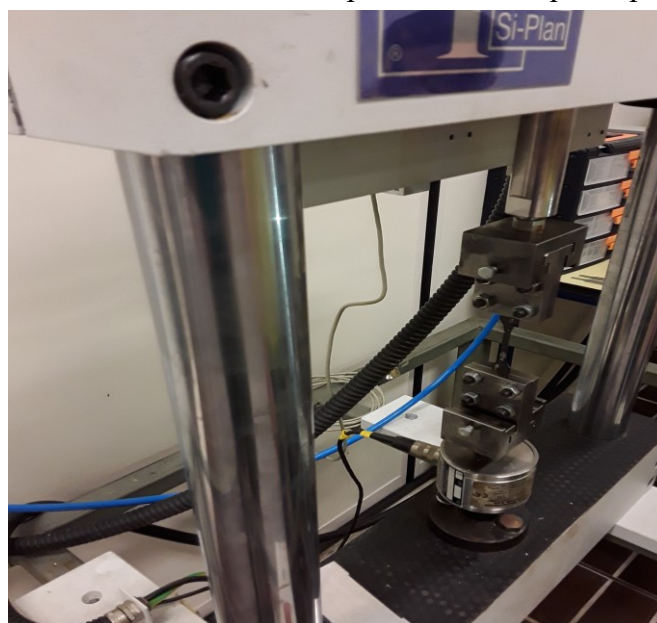


Fig. 7.9 Provino nella macchina di prova a fatica

Come si può osservare dalle immagini, il provino è bloccato da 2 piastre che sono strette da delle viti con dei bulloni, la piastra per incastro viene inserita nella macchina, questo fa sì che la macchina stessa possa applicare la forza desiderata.

7.3.2 Risultati

Di seguito sono tabulati i risultati della prova:

Provino	Tensione ciclica (MPa)	N° di cicli	Tensione calcolata con Goodman (MPa)	Note
Non smaltato	296	>3,5 milioni di cicli	254	Il provino non è arrivato a rottura
Non smaltato	326	1 milione di cicli circa	280	Provino rotto
Smaltato	318	1056579	273	Smalto danneggiato inizialmente
Smaltato	314	500456	269	Lo smalto si è rotto dopo circa 1000 cicli

Tab. 7.2 Riassunto dei risultati delle prove di fatica

7.3.3 Considerazioni

-Come già detto, per lamiere non è possibile effettuare la prova per problemi di carico critico.

-Facendo le prove con $R=0$ la tensione max applicabile è pari al valore di snervamento, questo comporta che

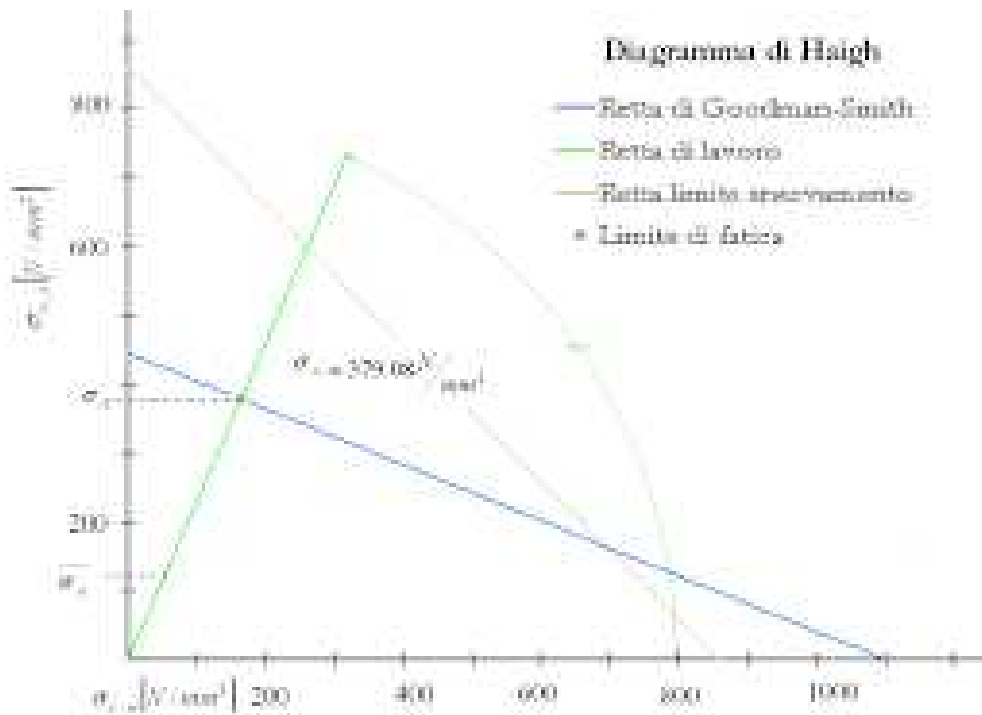


Fig. 7.10 diagramma di Goodman

come si può vedere dall'immagine sopra, essendo $\delta_a = \delta_m$, non riesco ad indagare tutto il diagramma di Goodman, ma solo una parte, non riesco quindi a valutare la fatica oligociclica (intorno ai 1000-10000 cicli), mentre è possibile valutare il limite di fatica che è stimato intorno ai 260MPa.

-Dalle prime prove effettuate il limite di fatica è situato tra i 250 e i 280 MPa

-Un'ultima osservazione è che lo smalto si rompe molto prima del provino, questo vuol dire che, a quel punto, il provino è a contatto diretto dell'acqua, tendendo così a corrodarsi, come già visto in precedenza. Da questo possiamo dire che la fatica meccanica sul pezzo, è un problema minore, rispetto alla corrosione poichè facendo lavorare il provino al limite di fatica, nonostante in teoria avrei vita infinita del pezzo, in realtà, mi trovo il pezzo che si corrode, non potendo così sfruttare le potenzialità meccaniche dell'acciaio usato.

Bibliografia

- "Progetto e Costruzioni di Macchine" Shigley
- "Metallurgia e Materiali non metallici" Barella Gruttadauria
- "Stampi e lavorazione della lamiera" Ariosi Marzi
- "Lezioni di fisica tecnica 2" Felli