

19.11 Complementi di resistenza a fatica

19.11.1 Parametri della resistenza a fatica

Riprendiamo il diagramma tracciato nella *Figura 19.16-b*. Nel caso più generale lo sforzo medio σ_m di una curva sforzo-ciclo ha un valore diverso da zero. Dai valori degli sforzi massimo σ_{\max} e minimo σ_{\min} , si ricavano l'ampiezza dell'oscillazione dello sforzo σ_a , lo sforzo medio σ_m , l'intervallo dello sforzo σ_r e il rapporto degli sforzi R :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_r = 2\sigma_a \quad R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad 19-17$$

Ad esempio, nel caso della fatica alternata (*Figura 19.16-a*), lo sforzo medio è nullo e il rapporto degli sforzi risulta $R = -1$ poiché lo sforzo minimo è uguale in valore assoluto allo sforzo massimo ma di segno negativo.

Facendo variare sia lo sforzo medio σ_m che l'ampiezza dell'oscillazione σ_a in un provino sottoposto a carichi variabili si ottengono dei diagrammi collettivamente indicati come *diagrammi di Goodman* più o meno modificati. Il diagramma di *Figura 19.21* mostra i valori degli sforzi massimo e minimo in funzione dello sforzo medio ottenuti in prove condotte su una serie di provini sottoposti a cicli di trazione-compressione. Il diagramma è limitato in alto dalla tensione di snervamento σ_y , mentre le rette che delimitano l'area del diagramma convergono (linee tratteggiate) nel valore della resistenza a trazione del materiale σ_u . In corrispondenza dell'origine, punto in cui annulla lo sforzo medio σ_m , il valore dello sforzo è quello del limite di fatica alternata $\sigma_{f,alternata}$.

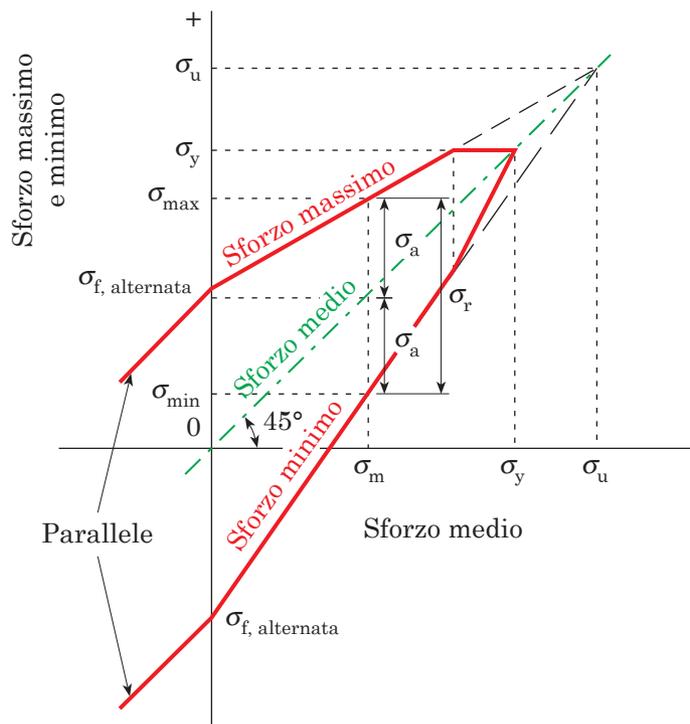


Fig. 19.21 - Diagramma di Goodman modificato con i valori degli sforzi massimo e minimo in funzione dello sforzo medio.

Tabella 19.2

Rapporto σ_f/σ_u per alcuni acciai e ghise con σ_f limite di fatica ottenuto in prove di flessione rotante

Denominazione	σ_u [MPa]	σ_f [MPa]	σ_f/σ_u
Acciai non legati			
S235	360	160	0,44
S275	430	195	0,45
S355	510	230	0,45
Acciai da bonifica			
C40	650	295	0,45
42 CrMo4	1100	495	0,45
Acciai legati			
25CrMo4	900	405	0,45
34CrMo4	1000	450	0,45
36CrNiMo4	1100	495	0,45
34CrNiMo6	1200	540	0,45
Acciai per molle			
50CrV4	1500	600	0,40
55Si8	1500	750	0,40
Ghise sferoidali			
EN GJS 450	450	155	0,34
EN GJS 600	600	205	0,34
EN GJS 800	800	270	0,34

Le prove mostrano che in molti casi esiste una relazione tra il limite di fatica in durata σ_f e la resistenza di trazione $\sigma_{u,t}$ ottenuta nella prova di trazione assiale del materiale (Tabelle 19.2 e 19.3). Ad esempio per gli acciai, il limite di fatica σ_f varia fra il 40% e il 60% della resistenza a trazione σ_u ; così il rapporto σ_f/σ_u risulta compreso tra 0,4 e 0,6. Allorché, come accade per molti materiali, non siano conosciuti né il limite di fatica σ_f né la resistenza a fatica σ_N valutata su N cicli, si possono adottare i seguenti valori di σ_f in funzione della resistenza a trazione $\sigma_{u,t}$ del materiale; per gli acciai da costruzione, ad esempio, si ha:

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_f &= (0,4 \div 0,6)\sigma_{u,t} && \ll \text{acciai - flessione alternata} \gg \\
 \sigma_f &= (0,3 \div 0,45)\sigma_{u,t} && \ll \text{acciai - assiale alternata} \gg \\
 \sigma_f &= (0,23 \div 0,35)\sigma_{u,t} && \ll \text{acciai - torsione alternata} \gg
 \end{aligned} \right\} \quad \mathbf{19-18}$$

dove i valori numerici minori (cioè 0,4, 0,3 e 0,23) sono da usarsi per gli acciai ad alta resistenza e i maggiori (cioè 0,6, 0,45 e 0,35) per gli acciai a bassa resistenza. Anche se la resistenza a trazione originale del materiale $\sigma_{u,t}$ subisce un deprezzamento maggiore allorché l'acciaio è più resistente, il limite di fatica σ_f degli acciai viene nel complesso aumentato qualora, al posto di un acciaio a bassa resistenza, si passi a un acciaio ad alta resistenza. Queste relazioni mettono anche in rilievo che il limite di fatica diminuisce allorché dalla flessione alternata si passa prima alla fatica alternata assiale di trazione-compressione

e quindi alla torsione alternata. A parte la torsione, che ubbidisce al legame tra tensione tangenziale e tensione normale espresso dalla **19-15**, la resistenza a fatica alternata a trazione-compressione risulta inferiore alla resistenza a fatica alternata a flessione perché in quest'ultimo caso vi è la possibilità che le fibre esterne più cariche del provino si scarichino sulle fibre interne meno cariche.

Tabella 19.3

Rapporto σ_f/σ_u in funzione del numero di cicli N

Materiale	σ_f/σ_u	N
Acciaio	0,5	10^6
Ghisa	0,4	10^6
Ghise grige	0,34 ÷ 0,46	10^6
Titanio e leghe	0,45 ÷ 0,65	10^6
Leghe di rame	0,25 ÷ 0,5	10^8
Leghe di nickel	0,35 ÷ 0,5	10^8
Leghe di alluminio	0,4	$5 \cdot 10^8$
Leghe di magnesio	0,35	10^8

19.11.2 Resistenza a fatica reale

La resistenza a fatica viene di solito determinata su un provino levigato di materiale con il diametro di 10 mm alla temperatura di 20 °C; le condizioni di carico, comunemente utilizzate, sono tali da dar luogo alla fatica alternata a flessione (o flessione rotante), situazione in cui lo sforzo medio è nullo. Il modo *reale* di lavoro del pezzo, all'interno della struttura meccanica, determina tuttavia delle modifiche rispetto alla resistenza a fatica σ'_N , che adesso viene accompagnata da un apice per indicare che il valore è stato ottenuto nella prova standard del provino in laboratorio. Occorre allora fare uso della *resistenza a fatica modificata* σ_N (oppure del *limite di fatica modificato* σ_f) moltiplicando il valore di laboratorio σ'_N (oppure σ'_f) per i diversi fattori di modifica:

$$\sigma_N = \frac{1}{K_f} k_a k_b k_c k_d k_e \sigma'_N \quad 19-19$$

K_f = fattore della concentrazione degli sforzi a fatica

k_a = fattore relativo alla finitura superficiale

k_b = fattore relativo alla dimensione del pezzo

k_c = fattore relativo alla temperatura

k_d = fattore relativo ai trattamenti superficiali

k_e = fattore relativo a effetti vari come corrosione, usura ecc.

Tra i diversi fattori che modificano il valore di fatica alternata ricavata sul provino σ'_N , riveste una particolare importanza la determinazione di K_f . Nel caso dei materiali duttili sottoposti a carichi statici, si osserva una redistribuzione degli sforzi lungo la sezione che annulla l'effetto di concentrazione dello sforzo: vengono così tagliate le punte degli sforzi massimi nelle sezioni in cui è presente la discontinuità, mentre contemporaneamente aumenta il valor medio dello sforzo. Perciò le discontinuità hanno un effetto mode-

sto nel caso dei materiali duttili sottoposti a carichi statici e non è necessario applicare ai materiali duttili i valori teorici del fattore di concentrazione degli sforzi K_t . Il valore teorico del fattore di concentrazione degli sforzi K_t va invece preso per intero nel caso dei materiali ad alta resistenza, di bassa duttilità, cementati e/o lavorati a freddo, sottoposti a carichi statici. Nel caso di materiali soggetti a carichi di fatica esiste un effetto ridotto, rispetto al valore teorico espresso da K_t , della concentrazione dello sforzo prodotto da intagli o discontinuità nella sezione; di questo effetto ridotto si tiene conto facendo uso di un fattore di concentrazione degli sforzi a fatica K_f , che ha un valore più basso di K_t . Il *fattore di concentrazione degli sforzi a fatica* K_f , valido non solo per materiali sottoposti a carichi di fatica ma anche per materiali fragili sottoposti a carichi statici, è definito come rapporto tra la resistenza del materiale senza intaglio e quella del materiale intagliato, sottoposto alle stesse condizioni di carico. In particolare, nel caso del materiale soggetto a fatica, K_f è il rapporto tra l'ampiezza di oscillazione della sollecitazione relativa alla resistenza (o al limite) di fatica di un provino non intagliato e la stessa grandezza rilevata su un provino intagliato:

$$K_f = \frac{\text{resistenza a fatica del materiale senza intaglio}}{\text{resistenza a fatica del materiale intagliato}}$$

e si esprime mediante un *fattore di sensibilità all'intaglio* q che lega tra loro il fattore di concentrazione degli sforzi a fatica K_f e il fattore teorico di concentrazione degli sforzi K_t :

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \Rightarrow K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad 19-20$$

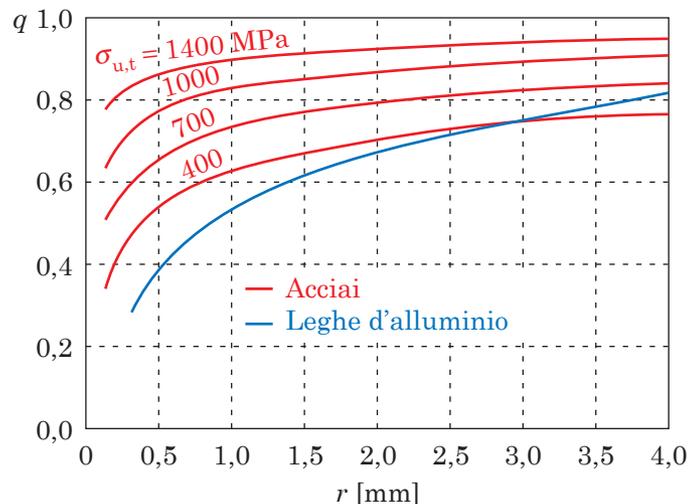


Fig. 19.22 - Fattore di sensibilità all'intaglio q per acciai e leghe di alluminio soggetti a carichi alterni assiali o di flessione in funzione del raggio r dell'intaglio. Sulle curve relative agli acciai, $\sigma_{u,t}$ è la resistenza a trazione del materiale; quando l'intaglio ha un raggio di curvatura r maggiore di 4 mm, occorre usare il valore di q corrispondente a $r = 4$ mm.

Il fattore di sensibilità all'intaglio q è normalmente compreso fra zero e uno. L'equazione 19-20 mostra che, per $q = 0$, è $K_f = 1$: ciò significa che il materiale non è sensibile agli intagli. D'altra parte, per $q = 1$, risulta $K_f = K_t$: il materiale ha piena sensibilità all'intaglio in quanto K_f raggiunge il valore teorico massimo K_t . Nella verifica o nel progetto dell'elemento, il fattore di concentrazione degli sforzi a fatica K_f va calcolato valutando in primo luogo il valore teorico di concentrazione degli sforzi K_t con diagrammi del tipo di quello della Figura 19.23, e quindi il fattore di sensibilità all'intaglio q , per mezzo delle curve riportate nella Figura 19.22 oppure sulla base di dati o di relazioni empiriche riportate nei manuali.

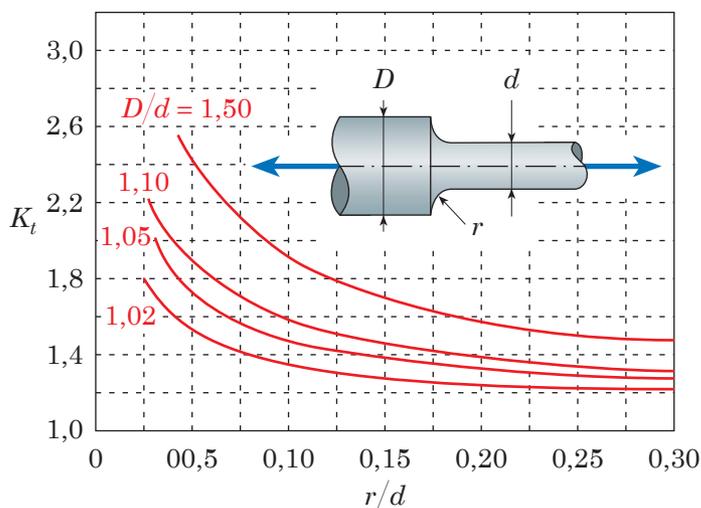


Fig. 19.23-a - Albero circolare sollecitato a trazione con raccordo di raggio r ; lo sforzo è $\sigma = F/A$ dove è $A = \pi(d^2/4)$.

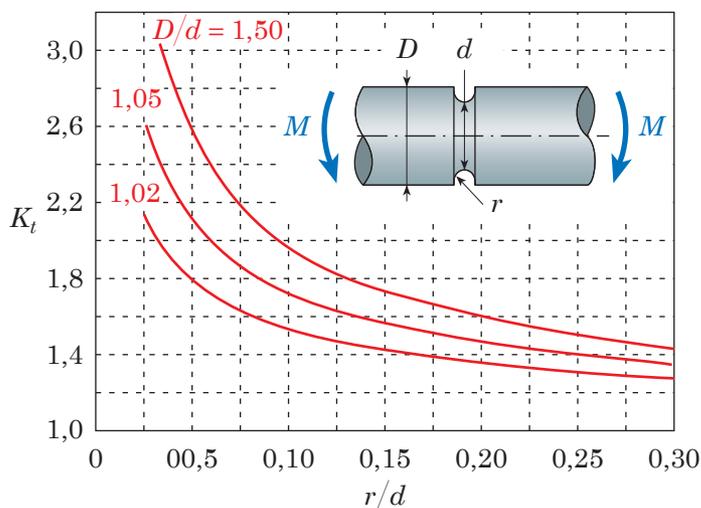


Fig. 19.23-b - Barra a sezione circolare sollecitata a flessione con intaglio semicircolare di raggio r ; lo sforzo è $\sigma = My/I$ con $y = d/2$ e $I = \pi d^4/64$.

19.11.3 Altri fattori che influenzano la fatica reale

Come le brusche discontinuità della superficie, così il grado di *finitura superficiale* influenza in modo severo la vita a fatica. La resistenza a fatica diminuisce al crescere della rugosità del pezzo con un effetto tanto più marcato quanto più grande è il valore della resistenza a trazione del materiale.

Non è stata rilevata un'influenza apprezzabile della *dimensione* del pezzo sulla vita a fatica assiale a trazione-comprensione di pezzi di dimensione diversa; ciò significa che un gruppo di provini avente il diametro pari a 6 mm e un altro gruppo di provini con diametro pari a 50 mm danno luogo allo stesso valore di resistenza a fatica quando sollecitati a fatica alternata assiale. La resistenza a fatica a flessione alternata del provino è maggiore della resistenza a fatica alternata assiale perché le fibre esterne più cariche si possono scaricare sulle fibre interne meno cariche. Questo aiuto prestato dalle fibre interne verso le fibre esterne diminuisce, a parità di sollecitazione, mano a mano che le dimensioni del pezzo aumentano in quanto le fibre meno cariche si allontanano sempre di più dalle fibre più cariche e meno facilmente possono prestare loro aiuto, essendo la rottura per fatica un fenomeno locale. In definitiva, al crescere delle dimensioni del pezzo, il valore della resistenza a fatica a flessione alternata diminuisce progressivamente fino a portarsi al valore della resistenza a fatica assiale alternata.

Le prove di fatica vengono solitamente condotte a temperatura ambiente; alcune volte possono venire realizzate a temperature elevate oppure al di sotto dello zero in funzione delle condizioni previste in esercizio per l'elemento di macchina. A bassa temperatura la resistenza a fatica dei metalli non mostra alcun deterioramento e anzi può addirittura migliorare; in tali condizioni il parametro k_c , legato alla temperatura, viene considerato uguale a 1. All'aumentare della *temperatura* T la resistenza a fatica diminuisce poiché gli effetti del creep si aggiungono a quelli della fatica, come viene rivelato dall'effetto più pronunciato della frequenza dei cicli e dello sforzo medio, in quanto appunto il creep dipende sia dallo sforzo medio che dal tempo.

Le cricche per fatica generalmente hanno inizio alla superficie del pezzo sottoposto a uno sforzo di trazione; in tali condizioni, alcuni processi, chimici e meccanici, che introducono sforzi residui di compressione alla superficie del pezzo, possono venire utilizzati per migliorare il comportamento a fatica. Tipici sono i *trattamenti superficiali* di rullatura, pallinatura, cementazione e nitrurazione che, essendo in grado di generare elevati sforzi residui di compressione in superficie, riescono in parte a neutralizzare gli sforzi di trazione, contribuendo così ad aumentare dal 10 al 30% la resistenza a fatica del pezzo. Al contrario quei trattamenti superficiali, come cromatura, nichelatura e cadmiatura, che infragilendo il materiale alla superficie favoriscono l'insorgere delle cricche, possono ridurre il limite di fatica fino al 30%.

Le discontinuità, prodotte sulla superficie del pezzo dalla *corrosione*, generano una concentrazione degli sforzi e rendono più facile l'insorgere di una frattura per fatica. I metalli corrosi hanno perciò una resistenza a fatica notevolmente più bassa di quella dei metalli non soggetti a corrosione. La riduzione della resistenza a fatica nei metalli che subiscono attacchi corrosivi è funzione principalmente del tipo di sostanza che ha determinato la corrosione e dell'entità della corrosione stessa.

Nel condurre prove di fatica a elevata temperatura in aria, si produce un'ossidazione del pezzo in condizioni simili a quelle dovute alla fatica a corrosione. Sotto l'azione dello sforzo ciclico il sottilissimo strato ("film") di ossido, che formandosi dovrebbe proteggere la superficie dal successivo attacco ossidante, viene via via rimosso consentendo così l'ulteriore e più severo attacco della superficie. La fatica e la corrosione insieme assicurano perciò la continua propagazione della cricca e quei materiali, che pur avendo un limite di fatica in condizioni normali di temperatura e in assenza di agenti corrosivi, non avranno più un limite di fatica a temperature molto elevate oppure in presenza di corrosione.

Allorché due componenti meccanici, premuti l'uno contro l'altro, si muovono tra loro a causa delle deformazioni elastiche, si verifica uno sfregamento che dà luogo a cricche con una consistente riduzione della resistenza a fatica. Si tratta di un fenomeno simile alla corrosione, che prende il nome di *fatica per usura*; l'usura è funzione della pressione con cui vengono premute le superfici a contatto dei materiali (è in genere più sentita nei materiali duri che in quelli morbidi) e dipende dalle condizioni superficiali (l'usura è più grande se i materiali a contatto sono completamente asciutti).

Esempio 19.8 Fattore di concentrazione degli sforzi a fatica

Valutare il limite di fatica a flessione alternata σ_f dell'albero con raccordo della *Figura 19.24* nel caso in cui il provino senza intaglio sia costituito da:

- acciaio non legato S355;
- acciaio legato 34CrNiMo6.

I valori della resistenza a trazione $\sigma_{u,t}$ e del limite di fatica σ'_f dei materiali si leggono sulla *Tabella 19.2*.

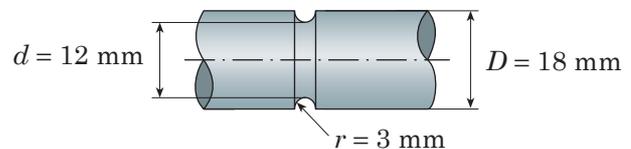


Fig. 19.24 - Albero con raccordo di raggio $r = 3$ mm trattato nell'*Esempio 19.8*.

SOLUZIONE

- Il limite di fatica modificato σ_f viene calcolato con la **19-19**, in cui si tiene conto del solo fattore di concentrazione degli sforzi a fatica K_f (**19-20**) poiché gli altri fattori vengono considerati uguali a 1, non essendo stati precisati nell'enunciato dell'Esempio:

$$\sigma_f = \frac{1}{K_f} k_a k_b k_c k_d k_e \sigma'_f = \frac{\sigma'_f}{K_f} \quad K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

Il fattore teorico di concentrazione degli sforzi K_t si ricava dalla *Figura 19.23-b*, dove, conoscendo l'ascissa $r/d = (3 \text{ mm}) / (12 \text{ mm}) = 0,25$ e $r/d = (3 \text{ mm}) / (12 \text{ mm}) = 0,25$ e il parametro che caratterizza la curva $D/d = (18 \text{ mm}) / (12 \text{ mm}) = 1,5$, si legge $K_t = 1,5$.

Sulla *Figura 19.22* si legge il fattore di sensibilità all'intaglio per l'acciaio non legato S355 ($\sigma_{u,t} = 510$ MPa); il limite di fatica del provino è $\sigma'_f = 230$ MPa.

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0,75(1,5 - 1) = 1,375$$

$$\sigma_f = \frac{1}{K_f} \sigma'_f = \frac{230 \text{ MPa}}{1,375} = 167 \text{ MPa} \quad \blacktriangleleft$$

b) Il fattore di sensibilità all'intaglio (*Figura 19.22*) per l'acciaio legato con resistenza a trazione $\sigma_{u,t} = 1200$ MPa vale $q = 0,92$; il limite di fatica del provino è $\sigma'_f = 540$ MPa.

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0,92(1,5 - 1) = 1,46$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma'_f}{K_f} = \frac{540 \text{ MPa}}{1,46} = 114 \text{ MPa} \quad \blacktriangleleft$$

COMMENTI Il fattore di concentrazione degli sforzi a fatica dell'acciaio più resistente ($K_f = 1,46$) risulta maggiore di quello dell'acciaio meno resistente ($K_f = 1,375$); esso risulta comunque sempre inferiore al valore del fattore teorico di concentrazione degli sforzi $K_t = 1,5$.

Esempio 19.9 Fatica alternata assiale di una barra in acciaio

Una barra circolare è caratterizzata da due diverse sezioni di diametro maggiore $D = 58$ mm e di diametro minore $d = 50$ mm raccordate tra loro da un raggio $r = 4$ mm. La barra, che è realizzata in acciaio avente una resistenza a trazione $\sigma_{u,t} = 500$ MPa, è soggetta a un carico assiale alternato F che varia da $+160$ kN a -160 kN. Determinare:

- l'ampiezza dell'oscillazione della sollecitazione σ_a e lo sforzo medio σ_m ;
- il limite di fatica modificato σ_f ;
- il valore del fattore di sicurezza n .

SOLUZIONE

a) Si calcola prima l'area A della barra e poi si applicano le formule **19-17**.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times (50 \text{ mm})^2}{4} = 1963 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{\max} = \frac{+160.000 \text{ N}}{1963 \text{ mm}^2} = +91,8 \text{ MPa} \quad \sigma_{\min} = \frac{-160.000 \text{ N}}{1963 \text{ mm}^2} = -91,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{+91,8 \text{ MPa} - (-91,8 \text{ MPa})}{2} = 91,8 \text{ MPa} \quad \blacktriangleleft$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{+91,8 \text{ MPa} + (-91,8 \text{ MPa})}{2} = 0 \quad \blacktriangleleft$$

Lo sforzo medio è nullo poiché si tratta di una sollecitazione di fatica alternata.

- b) Il limite di fatica alternata assiale di laboratorio σ'_f , trattandosi di un acciaio di resistenza a trazione $\sigma_{u,t} = 500 \text{ MPa}$ non elevata, viene calcolato con la formula empirica **19-18** in cui si usa il fattore numerico più alto di 0,45:

$$\sigma_f(0,3 \div 0,45)\sigma_{u,t} \Rightarrow \sigma'_f = 0,45 \cdot \sigma_{u,t} = 0,45 \times 500 \text{ MPa} = 225 \text{ MPa}$$

Il fattore teorico di concentrazione degli sforzi K_t si ricava dalla *Figura 19.23-a*, dove, conoscendo l'ascissa $r/d = (4 \text{ mm})/(50 \text{ mm}) = 0,08$ e il parametro che caratterizza la curva $D/d = (58 \text{ mm})/(50 \text{ mm}) = 1,16$, si ricava, per estrapolazione della curva con $D/d = 1,10$, $K_t = 1,7$. Sulla *Figura 19.22*, entrando con $r = 4 \text{ mm}$, si ottiene il fattore di sensibilità all'intaglio che, per un acciaio avente una resistenza a trazione $\sigma_{u,t} = 500 \text{ MPa}$, vale $q \approx 0,8$ (leggere tra le curve a 400 MPa e 700 MPa). Quindi si calcolano il fattore di concentrazione degli sforzi a fatica K_f (**19-20**) e il limite di fatica modificato σ_f con la **19-19**, in cui si tiene conto soltanto di K_f poiché gli altri fattori vengono considerati uguali a 1, non essendo stati precisati nell'enunciato dell'Esempio:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0,75(1,7 - 1) = 1,375$$

$$\sigma_f = \frac{1}{K_f} k_a k_b k_c k_d k_e \sigma'_f = \frac{\sigma'_f}{K_f} = \frac{225 \text{ MPa}}{1,56} = 144 \text{ MPa} \quad \blacktriangleleft$$

- c) Il fattore di sicurezza a fatica n si calcola con la **19-12**, dove come tensione ammissibile σ_{amm} si prende l'ampiezza della sollecitazione di fatica σ_a . La verifica del pezzo sollecitato a fatica richiede infatti che σ_a sia minore o uguale a σ_{amm} (oppure $\tau_a \leq \tau_{\text{amm}}$ nel caso della torsione); al solito si dovrà considerare il segno uguale ($\sigma_a = \sigma_{\text{amm}}$ oppure $\tau_a = \tau_{\text{amm}}$) qualora si debba procedere al dimensionamento del pezzo sollecitato a fatica.

$$n = \frac{\text{resistenza del materiale}}{\text{tensione ammissibile}} = \frac{\sigma_f}{\sigma_{\text{amm}}} = \frac{\sigma_f}{\sigma_a} = \frac{144,2 \text{ MPa}}{91,8 \text{ MPa}} = 1,57 \quad \blacktriangleleft$$

19.12.2 Metalli e loro leghe

I **metalli** utilizzati nelle macchine possono essere divisi in due gruppi sulla base del loro contenuto di ferro: quelli costituiti prevalentemente da ferro vengono chiamati *metalli ferrosi*, mentre tutti gli altri sono detti *non ferrosi*. I metalli *leggeri* comprendono alluminio, magnesio e titanio; i metalli *refrattari*, caratterizzati da una elevata resistenza al calore, comprendono tungsteno e molibdeno.

Le **leghe** vengono ottenute aggiungendo quantità, che possono essere anche estremamente modeste, di elementi diversi al metallo di base che, in tal modo, acquista proprietà significativamente differenti da quelle dei singoli costituenti. Le leghe più usate sono quelle a base di ferro con piccole quantità di carbonio, di solito inferiore al 4% in massa, in modo da produrre acciaio oppure ghisa. L'acciaio contiene meno dell'1,5% di carbonio; i comuni acciai al carbonio, composti quasi interamente di ferro e carbonio, si suddividono in *acciai dolci a basso tenore di carbonio* (carbonio inferiore a 0,25%), *acciai a medio* (carbonio da 0,25 a 0,6%) e *acciai ad alto tenore di carbonio* (carbonio da 0,6 a 0,9%). Prende il nome di *acciaio legato* quell'acciaio a cui, oltre al carbonio, vengono aggiunti altri elementi; l'elemento predominante aggiunto determina il nome dell'acciaio: ad esempio, l'acciaio al silicio usato per fare le molle. Le *ghise* hanno un più alto contenuto di carbonio (maggiore del 2,11%) insieme ad altri elementi quali silicio, magnesio, zolfo e fosforo. La ghisa più comune è la *ghisa grigia*, molto fragile, facilmente lavorabile di macchina, che conduce bene il calore; l'aggiunta di piccole quantità di magnesio alla ghisa allo stato liquido porta alla *ghisa sferoidale*, materiale resistente, tenace e duttile.

Tra i metalli non ferrosi e le loro leghe occorre citare in primo luogo l'*alluminio*, metallo a basso punto di fusione, di elevata conducibilità elettrica e termica, e con buona resistenza alla corrosione; dopo l'acciaio, è il materiale più usato a causa dell'elevato rapporto tra resistenza e massa. Il *rame*, in lega con lo zinco (fino al 40%) e con piccole quantità di altri elementi come lo stagno, dà luogo all'*ottone*; quando invece il rame viene legato, non allo zinco, ma ad altri elementi come stagno, fosforo, silicio o alluminio si ha il *bronzo*, di cui alcuni tipi, come il bronzo fosforoso (bronzo a base di stagno con aggiunto fosforo) oppure il bronzo-manganese sono particolarmente resistenti alla corrosione provocata dall'acqua salata. Altre leghe non ferrose sono quelle basate su *nichel* (dure e resistenti), *magnesio* (il metallo più leggero) e *titanio* (leggero e particolarmente resistenti anche ad alta temperatura).

19.12.3 Polimeri e plastiche

Un **polimero** è una sostanza costituita principalmente da atomi di carbonio e creata legando tra loro piccole molecole, dette *monomeri*, in modo da formare molecole grandi o macromolecole. In funzione del tipo di legame tra i monomeri, il polimero risultante può essere *cristallino* oppure *amorfo* o una combinazione di questi due stati. Esempi esistenti in natura sono il diamante (polimero cristallino), la gomma e la cellulosa (ambedue polimeri amorfi).

Plastica indica di solito il *polimero sintetico* (è il polimero che viene ottenuto artificialmente, cioè per sintesi, chiamato anche *resina*) a cui sono state aggiunte sostanze diverse, chiamate *additivi*. Le plastiche, a meno che non vengano rinforzate con altri materiali, sono poco adatte a sopportare i carichi soprattutto a causa delle modeste proprietà elastiche e della bassa resistenza a trazione o a compressione. Tuttavia la bassa densità delle plastiche

permette di ottenere un rapporto ancora moderatamente favorevole tra la sua pure modesta resistenza e la loro densità consentendone la diffusione nelle più diverse applicazioni.

I valori del modulo di elasticità, della resistenza alla trazione e della percentuale di allungamento a frattura delle plastiche sono grandemente influenzati dalle condizioni di temperatura e dalla velocità e dalla durata di applicazione del carico. Si possono distinguere tre categorie di plastiche:

- a) **Termoplastiche** – Sono di solito derivate dall’etilene (è l’idrocarburo C_2H_4 con due atomi di carbonio e quattro atomi di idrogeno); una volta formate, possono essere ram-mollite e colate negli stampi scaldandole. Sono in genere duttili, con alti allungamenti sotto carico, buona resistenza all’urto ma molto sensibili al calore. Il nailon (in inglese “nylon”) è un esempio di termoplastica, tenace, resistente agli urti e alla corrosione e con buone proprietà autolubrificanti.
- b) **Plastiche termoindurenti** – Sono formate da polimeri amorfi che vengono fatti diventare cristallini quando scaldati a una data temperatura che è funzione del tipo di polimero. Sono fragili, ma piuttosto resistenti. Vengono danneggiate se scaldate o sottoposte a pressione. Esempi di plastiche termoindurenti sono le resine epossidiche.
- c) **Elastomeri** – Vengono così chiamate le gomme naturali e sintetiche e tutte quelle materie plastiche che hanno proprietà simili alle gomme. L’elastomero, quando sottoposto a un carico di trazione alla temperatura ambiente, si allunga moltissimo con corrispondente riduzione della sezione trasversale; proprio a causa della sensibile riduzione dell’area trasversale, all’aumentare del carico, questi materiali non seguono la legge di Hooke.

19.12.4 Fibre

Le **fibre inorganiche**, principalmente di *vetro*, *carbonio* e *acciaio*, rappresentano lo sviluppo del concetto di fibra organica utilizzata nei tessuti. La differenza tra la proprietà del materiale e la fibra è, ad esempio, messa in evidenza dalle fibre di vetro: il vetro ordinario ha una resistenza a trazione generalmente inferiore a 170 MPa, ma in forma di fibre può arrivare fino a 3000 MPa. Le fibre di carbonio hanno un modulo di elasticità molto alto pari a 410 GPa e una resistenza a trazione fino a 2000 MPa.

19.12.5 Materiali compositi

Le fibre vengono utilizzate per *rinforzare* le plastiche e altri materiali in modo da migliorarne alcune proprietà come, ad esempio, il rapporto tra resistenza e massa oppure la capacità da parte di un materiale debole di sopportare un carico di trazione. Questo rinforzo può essere fatto sotto forma di nervature (fibre molto lunghe disposte come un tessuto) oppure con una matassa continua di fibre molto sottili ma più spesso le fibre vengono sminuzzate in piccoli pezzi di filato sotto forma di feltro. Il rinforzo delle materie plastiche, mediante fibre di vetro, di carbonio oppure di acciaio agglomerate nella plastica, dà luogo a materiali particolarmente leggeri, detti **materiali compositi**, in cui la plastica protegge le fibre da sfregamento e da attacchi chimici, mentre le fibre sopportano i carichi di trazione.

Le proprietà del materiale composito dipendono non solo da quelle delle fibre e della plastica che le ospita, ma anche dalla lunghezza e dalla massa delle fibre contenute oltre

che dal tipo di legame tra fibra e plastica. I valori risultanti del modulo di elasticità e della resistenza a trazione del materiale rinforzato sono di solito più bassi di quelli delle fibre impiegate nel rinforzo. Una tipica termoplastica, come il poliestere, ha, quando non ancora rinforzato, bassi valori del modulo elastico ($E = 500 \text{ MPa}$) e della resistenza a trazione ($\sigma_u < 70 \text{ MPa}$) e un elevato allungamento (dal 60 al 110%); quando il poliestere viene rinforzato, a seconda delle fibre, il modulo elastico aumenta fino a tre volte e la resistenza fino a 10 volte, mentre si verifica una perdita di duttilità e di resistenza all'urto. Significative applicazioni dei materiali compositi sono rappresentate da pale per le eliche di turboelica oppure per i rotori delle turbine eoliche.