

Unità Didattica 11 – I Materiali nelle Costruzioni Navali

11.1 Generalità

I materiali più comunemente utilizzati nelle costruzioni navali sono: il ferro, l'acciaio, la ghisa, gli acciai speciali e le leghe (leghe leggere, cioè leghe dell'alluminio; leghe del rame; leghe speciali per le eliche).

La ghisa, ad esempio, la troviamo spesso nelle incastellature e nelle camicie dei cilindri dei motori Diesel.

Il materiale principe della costruzione navale resta comunque l'**acciaio**.

L'acciaio impiegato è soprattutto sotto forma di lamiere o profilati ma anche tubolari e pezzi fusi o fucinati.

Le lamiere che sono utilizzate per i fasciami e le paratie hanno uno spessore variabile da pochi millimetri a 50mm, una lunghezza massima di 15 m ed una larghezza massima di 3,5 m. I profilati invece hanno forme varie, a T, a doppio T, a L, ecc. e la loro lunghezza varia da 12 a 18 m.

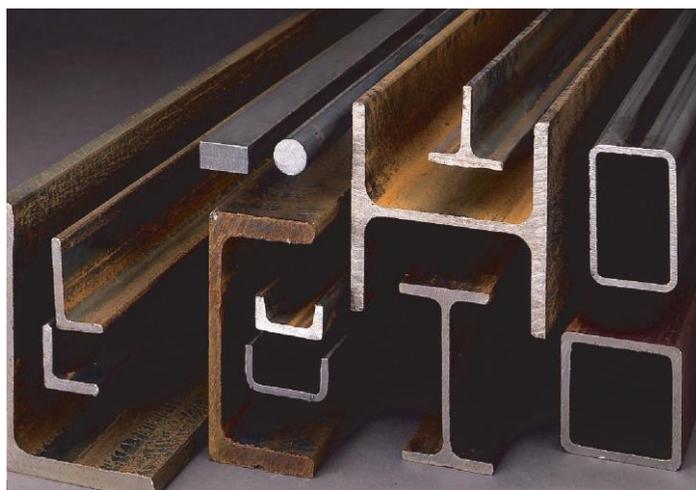


Fig. 11.1 - Alcuni tipi di profilati e tubi

In genere si parla di **Acciai da Scafo** e **Acciai di Qualità**. Ai primi si richiedono non solo le normali caratteristiche meccaniche (resistenza a trazione, compressione...) ma anche un buon allungamento percentuale che nelle costruzioni navali ha molta importanza perché è una misura della duttilità e della capacità di allungarsi senza rompersi del materiale.

L'**Acciaio di Qualità**, invece, è caratterizzato da un *Coefficiente di Qualità* o *Indice di Qualità* (è un numero convenzionale risultante dal prodotto del carico di rottura - in kg/mm^2 - per l'allungamento percentuale); per gli acciai da scafo non deve essere inferiore a 900, valore corrispondente a 41 kg/mm^2 e 22% di allungamento. Per questi acciai l'indice di snervamento è di solito pari a 25 kg/mm^2 . In conclusione si esige che il materiale resista bene anche in caso di deformazioni plastiche.

A parte la composizione chimica, ciò che contraddistingue un acciaio, come per altri materiali da costruzione, sono le sue proprietà meccaniche.

Fra di esse, le principali sono:

- **RESISTENZA ALLA TRAZIONE:** è un indice della capacità del materiale di sopportare le sollecitazioni più comuni;
- **RESILIENZA:** è un indice della fragilità, cioè della capacità di sopportare gli urti;
- **DUREZZA:** è la resistenza che un materiale oppone alla penetrazione di una punta.

Vi sono altre caratteristiche significative nel nostro campo di interesse, come la lavorabilità meccanica, la piegabilità a freddo, e, importantissima, la saldabilità.

Però la caratteristica meccanica di riferimento è la resistenza alla trazione, tanto che i *Regolamenti del Registro Italiano Navale* per gli acciai distinguono due categorie:

- **ACCIAI ORDINARI**
- **ACCIAI AD ELEVATA RESISTENZA**

Le proprietà tecnologiche invece si riferiscono alle caratteristiche dei materiali più strettamente connesse con la lavorazione meccanica, cioè alla loro attitudine a farsi modellare.

- **Malleabilità:** è l'attitudine dei metalli ad essere trasformati in lamine sottili; normalmente i materiali sono più malleabili a caldo che a freddo.
- **Duttilità:** è l'attitudine dei metalli a ridursi in fili sottili.
- **Imbutibilità:** è l'attitudine di un materiale ad essere trasformato per ottenere mediante una lavorazione a freddo (stampaggio) o a caldo (fucinatura) corpi cavi senza rompersi. Mediante la fucinatura, il metallo riscaldato alla giusta temperatura, viene deformato a colpi di martello o maglio meccanico, fino a fargli assumere la forma desiderata. È questo il metodo più antico di "formatura" dei metalli.
- **Piegabilità:** è l'attitudine di un materiale ad essere piegato senza rompersi.
- **Estrudibilità:** è l'attitudine di un materiale ad assumere una determinata forma quando viene spinto verso un foro.
- **Fusibilità:** è l'attitudine di un metallo a lasciarsi fondere. Sono facilmente fusibili la ghisa e il bronzo mentre, invece, è difficilmente fusibile l'acciaio.

- **Colabilità:** è l'attitudine dei metalli liquidi di riempire una forma ricopiandone l'impronta.
- **Saldabilità:** è la proprietà dei metalli di unirsi fra di loro in unico pezzo per mezzo di saldatura. Possono essere saldati insieme materiali uguali o diversi.
- **Truciolabilità:** è l'attitudine di un materiale di subire lavorazioni con l'asportazione di truciolo.
- **Temprabilità:** è l'attitudine dei materiali ad aumentare la propria durezza se scaldati e repentinamente raffreddati.

Il RINA dedica un intero fascicolo alle specifiche dei materiali.

Nella Parte D (materiali e saldature), dal Capitolo 2 al Capitolo 4, sono specificate le prescrizioni per la fabbricazione, il collaudo e la certificazione di materiali semilavorati in acciaio, in ghisa, in metalli non ferrosi e di vari prodotti finiti quali eliche, bombole, ancore, catene, cavi e portellini, finestrini, destinati alla costruzione o alla riparazione di navi.

Le prescrizioni generali relative alla fabbricazione, al collaudo e alla certificazione dei suddetti materiali e prodotti sono date nel Capitolo 1; esse devono essere soddisfatte per quanto applicabili. Nel Capitolo 5, infine, sono specificate le prescrizioni per l'approvazione dei materiali d'apporto per saldatura e per la qualifica dei procedimenti di saldatura.

Le prove sui materiali da scafo vengono effettuate presso stabilimenti privati da funzionari del RINA, per lotti ed a campione. Il primo controllo è quello visivo (difetti evidenti possono innescare fenomeni a fatica), c'è poi un collaudo dimensionale sulle tolleranze (per lamiere di spessore da 5 a 8 mm la tolleranza è di 0,4 mm, tra 8 e 25 mm è di 0,6 mm, tra 25 e 40 è 0,8 mm, oltre è di 1 millimetro).

La prima prova vera e propria è quella di Trazione, condotta su una barretta (detta provino o provetta) del materiale in esame. Si passa poi alla prova di Resilienza, a quella di Resistenza a Fatica, alla prova di Flessione Rotante. Seguono la prova di Durezza, la prova di Tempra, la prova di Piegatura. Si eseguono prove anche su pezzi fusi (ad esempio il dritto di poppa, il dritto di prora, parti del timone...) come la prova di Caduta e la prova di Martellamento. In caso di bisogno di ulteriori prove si utilizzano gli Ultrasuoni, i Raggi X, e l'Esame Magnetoscopico.

11.2 Sistemi di giunzione degli elementi strutturali metallici

I pezzi finiti provenienti da precedenti fasi di lavorazione (tranciatura, piegatura, bordatura, ecc.) passano alla linea di assemblaggio dove vengono posizionati su appositi scali o cantieri.

L'assemblaggio vero e proprio si realizza attraverso la **chiodatura** o la **saldatura**.

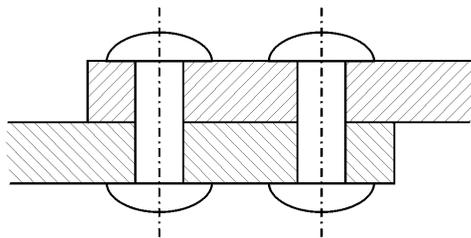


Fig. 11.2 - Ribattini in opera

L'opera di chiodatura ha come base il ribattino (o rivetto pieno) che viene martellato per formare una controtesta (l'operazione per la formazione della controtesta è detta **ribaditura** e può essere eseguita a freddo o a caldo) o il rivetto a strappo. In questo caso il gambo del rivetto è cavo, e contiene uno stelo metallico, che viene strappato durante la rivettatura, deformando plasticamente l'estremità del gambo, grazie ad una sfera posta all'estremità dello stelo con diametro maggiore del foro nel gambo.



Fig. 11.3 - Rivetti a strappo



Fig. 11.4 - Ribattino o rivetto pieno

Attualmente la chiodatura è praticamente abbandonata a favore della saldatura che permette tempi di lavorazione più brevi, un risparmio del peso dello scafo di circa il 20%, possibilità di ottenere una struttura stagna e quindi eliminazione di calatafaggio, facilità di riparazione e sostituzione.

La saldatura è un procedimento utilizzato per il collegamento fisso e continuo di parti metalliche mediante fusione delle stesse, con o senza materiale di apporto.

I principali procedimenti di saldatura sono:

SALDATURA PER FUSIONE A GAS: viene fatta con l'impiego di speciali cannelli che producono una fiamma caldissima. Sui pezzi da collegare si fa colare il metallo di una bacchetta di apporto.

SALDATURA ELETTRICA AD ARCO: In questo tipo di saldatura il calore necessario per portare a fusione le parti è fornito dall'energia termica posseduta dall'arco voltaico che può arrivare fino a 3000 °C.

SALDATURA ELETTRICA PER PRESSIONE E RESISTENZA ELETTRICA: il riscaldamento è ottenuto per effetto Joule al passaggio della corrente elettrica attraverso i pezzi da saldare. Nel punto di contatto le parti diventano pastose e per effetto della pressione esercitata si uniscono saldamente. Questo tipo di saldatura è molto usato per unire "per punti" le lamiere

SALDATURA LASER AD ELEVATA POTENZA O ALTRI SISTEMI DI APPORTO DI ENERGIA NON DA FIAMMA: viene utilizzato un fascio di onde elettromagnetiche in fase, fotoni, focalizzati con mezzi ottici e concentrati sul pezzo generando elevate potenze. Quando il fascio colpisce la superficie l'energia viene in parte riflessa e in parte assorbita portando il materiale alla fusione.

I controlli delle saldature vengono fatti visivamente, con gli ultrasuoni, con i raggi X o con liquidi penetranti.

11.3 Resistenza dei materiali *(a cura di A. R. Bibbo)*

Nello studio della resistenza dei materiali i corpi vengono considerati come deformabili, pertanto suscettibili di variazioni di dimensioni, o anche di rottura, sotto l'azione di carichi esterni.

La finalità che si propone la resistenza dei materiali è sostanzialmente la valutazione della resistenza che i differenti materiali oppongono alle sollecitazioni esterne e, in base a questo comportamento, poter assegnare alle strutture la forma e le dimensioni opportune per meglio assicurarne la stabilità.

Si consideri una barra rettilinea, a sezione normale costante (fig. 11.5): se sottoposta all'azione di due forze assiali uguali e contrarie, tende ad allungarsi. Al cessare dell'azione delle forze applicate possono verificarsi, in generale, due situazioni: la barra riprende le sue dimensioni e la sua forma primitiva, oppure può conservare un certo allungamento residuo.

Nel primo caso si sarà verificata una deformazione elastica, mentre nel secondo caso una deformazione plastica. Se poi le forze sono particolarmente elevate in intensità, può verificarsi ovviamente il caso in cui la barra si rompe sotto l'azione del carico applicato. Quindi il solido si oppone a carichi che tendono a deformarlo,

e questa resistenza è dovuta alle forze di coesione delle molecole, che sono variabili da materiale a materiale.

Quando la barra di fig. 11.5 è sottoposta a carico assiale di intensità N , subisce un certo allungamento: ciò significa che le due superfici S' ed S'' , adiacenti in S quando la barra è scarica, tendono ad allontanarsi sotto carico. Appunto a questo allontanamento si oppongono le forze di coesione molecolare, che in questo caso prendono il nome di tensioni interne normali.

In una configurazione di equilibrio sotto carico, quindi, le tensioni interne dovranno sviluppare una trazione che si oppone esattamente al carico applicato; detta A l'area della sezione normale, N il carico assiale applicato e σ la tensione interna normale, dovrà essere:

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

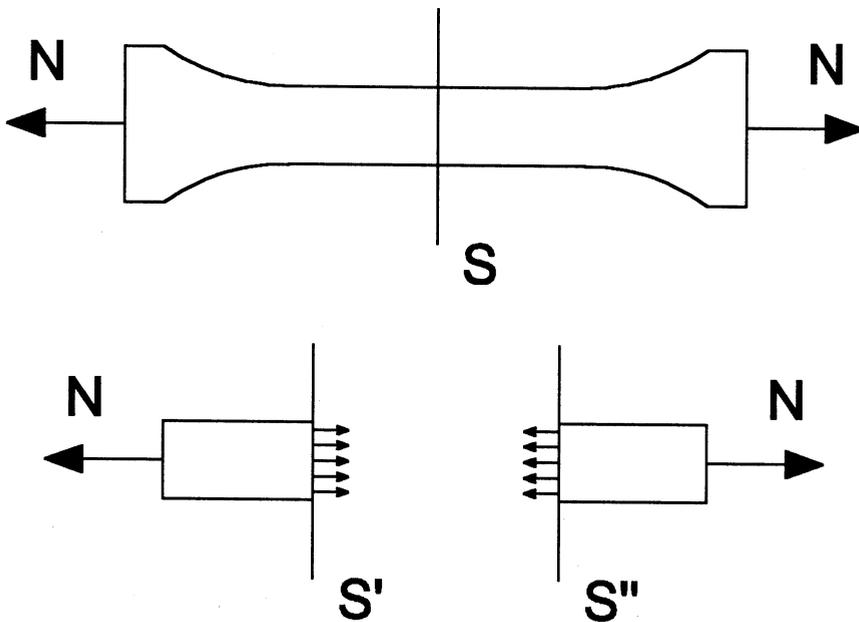


Fig. 11.5

È evidente che, affinché si possa mantenere l'equilibrio, la tensione interna deve aumentare se aumenta il carico applicato N . Tuttavia, mentre il carico N può raggiungere valori comunque elevati, la tensione interna σ ha, per ogni materiale, un valore massimo oltre il quale il solido non è più in grado di resistere al carico

applicato e si verifica la rottura. Per ogni materiale esistono dei valori tipici per le tensioni interne, che vengono determinati sperimentalmente.

In fig. 11.6 è mostrato un tipico diagramma che si ottiene sottoponendo a tensione assiale una barretta in acciaio: nel diagramma viene riportata in ordinata la sollecitazione applicata, ed in ascissa l'allungamento causato da tale sollecitazione.

In linea del tutto generale, da un simile diagramma si possono definire tre diversi stati fondamentali attraverso i quali è passato il materiale durante la prova.

- TRATTO 0-1, fase elastica. In questo tratto il materiale si comporta elasticamente, quindi se il carico resta compreso tra 0 e N_P , il materiale è capace di riassumere la configurazione iniziale una volta che il carico esterno cessa di agire. Nella fase elastica esiste una proporzionalità diretta tra carico e deformazione; per questo motivo il punto 1 è chiamato limite di proporzionalità, ed il carico corrispondente, indicato con N_P , è detto carico di proporzionalità.
- TRATTO 1-2, fase di snervamento. In questo tratto la resistenza del provino mostra un andamento altalenante, con momenti di cedimento alternati a momenti di ripresa di resistenza. Questo comportamento viene schematizzato in fig. 11.6 con un tratto seghettato.
- TRATTO 2-3-4, fase plastica. In questo caso il materiale subisce forti allungamenti per piccoli aumenti del carico applicato, opponendo via via una resistenza decrescente, con la contrazione di una sezione in cui poi avviene la rottura. In questa fase si raggiunge il carico massimo, indicato con N_M , detto carico di rottura.

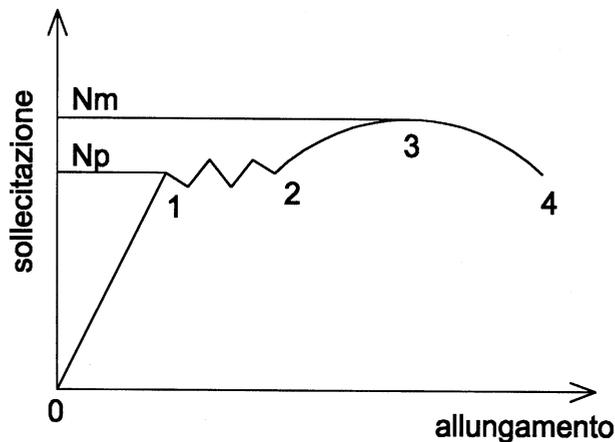


Fig. 11.6

Come detto, nella fase elastica esiste una proporzionalità diretta tra carico applicato e conseguente deformazione; si consideri in quest'ambito la fig. 11.7: un'asta metallica, avente lunghezza iniziale l_0 , sezione normale di area A , sia sollecitata da un carico assiale N , crescente lentamente, che comunque assuma sempre valori minori al valore del carico di proporzionalità, $N < N_p$.

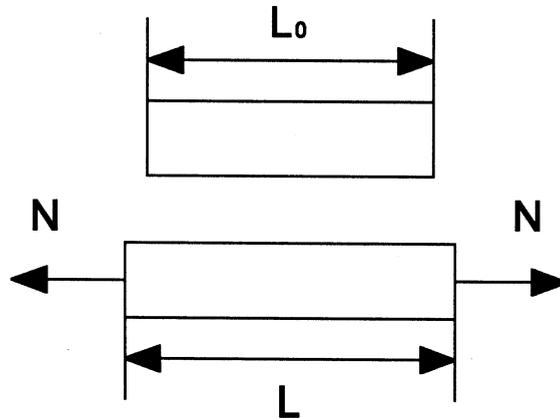


Fig. 11.7

Dalla fig. 11.6 si vede che, limitatamente al tratto 0-1, il carico applicato è proporzionale all'allungamento: è evidente che l'asta si allunga tanto più quanto più è lunga inizialmente. Ad un certo punto, per un dato carico N , si avrà per l'asta una lunghezza $l > l_0$.

Si definisce allungamento relativo ε il rapporto tra l'allungamento subito sotto carico e la lunghezza iniziale:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Nei limiti delle ipotesi fatte, è valida la legge di Hooke, che esprime la proporzionalità diretta tra lo sforzo assiale e la deformazione relativa, tramite una costante di proporzionalità E , detta modulo di elasticità, caratteristica del materiale costituente l'elemento sotto carico

$$\sigma = E \varepsilon$$

Dalla precedente, tenuto conto del significato dei simboli, si può ricavare subito:

$$\frac{N}{A} = E \frac{\Delta l}{l_0}$$

dalla quale, per l'allungamento, si ottiene:

$$\Delta l = \frac{N l_0}{A E}$$

Mediante la precedente si può valutare l'allungamento di un elemento soggetto a trazione o, più precisamente, si può valutare la variazione di lunghezza (allungamento o accorciamento) di un elemento soggetto a carico assiale (trazione o compressione) se i carichi agenti sono minori al carico di proporzionalità.

Per un dato materiale, il rapporto tra il carico massimo N_M al quale resiste il materiale e l'area della sezione primitiva del provino definisce la tensione unitaria di rottura σ_R :

$$\sigma_R = \frac{N_M}{A}$$

Al fine di assicurare la stabilità di una struttura, occorre che le tensioni in ogni singolo componente si tengano lontane da tale limite, ed anzi che non superino un dato valore limite, inferiore certamente a quello di rottura, dedotto dall'esperienza, che viene chiamato carico di sicurezza o tensione ammissibile σ_{amm} . La tensione massima ammissibile σ_{amm} esprime lo sforzo unitario massimo a cui può essere assoggettato un materiale senza che si incorra in fenomeni pericolosi per la struttura.

In pratica, la tensione ammissibile si ottiene dal rapporto tra la tensione di rottura ed un opportuno coefficiente di sicurezza $k > 1$:

$$\sigma_{amm} = \frac{\sigma_R}{k}$$

A titolo di esempio, di seguito sono riportati alcuni valori tipici consigliati per il coefficiente di sicurezza:

K = 1,5 4 2	Sollecitazioni e condizioni operative normali
K = 2 4 2,5	Materiali con alte caratteristiche meccaniche
K = 2,5 4 3	Materiali fragili con basse caratteristiche meccaniche
K = 3 4 4	Buon materiale in condizioni operative critiche, o condizioni operative normali e materiali di scarsa qualità

Le considerazioni finora fatte per la barra soggetta a carico assiale possono essere ripetute anche per il caso in cui le forze esterne agiscono perpendicolarmente all'asse della barra (fig. 11.8).

In questo caso, anziché un allungamento, avviene lo scorrimento delle due superfici S' ed S'' , inizialmente adiacenti in S . Le forze interne riferite all'unità di superficie che si oppongono a questo scorrimento vengono chiamate tensioni interne tangenziali ed indicate usualmente con il simbolo τ .

Anche per le tensioni tangenziali interne si definisce una tensione tangenziale di rottura τ_R ed una tensione tangenziale ammissibile τ_{amm} , che di solito si assume come una frazione della σ_{amm} .

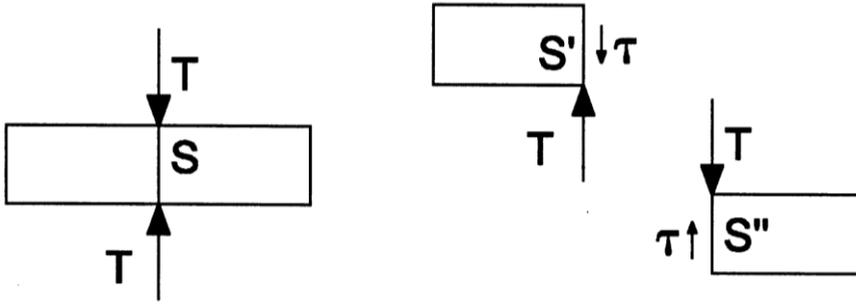


Fig. 11.8

In generale si può ritenere che, a seconda dei materiali e delle applicazioni:

$$\tau_{amm} = \frac{3}{4} \div \frac{4}{5} \sigma_{amm}$$

11.3.1 TRAZIONE

Si consideri il solido di fig. 11.9, sollecitato da due forze uguali in intensità tra loro N ed opposte in verso, che tendono ad allontanarsi tra loro. All'interno del solido, sufficientemente lontano dal punto di applicazione delle forze, si genera in questo caso una sollecitazione di tensione data dal rapporto tra la forza agente e la superficie normale alla linea d'azione della forza stessa:

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

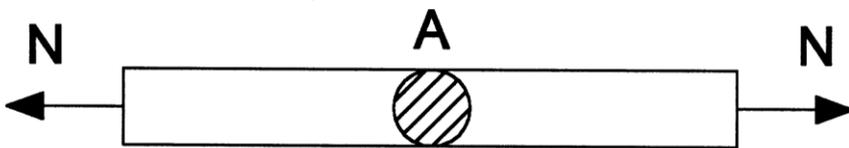


Fig. 11.9

Quindi con σ si indica la tensione normale, o la quota di forza che interessa la superficie di area unitaria.

Nelle condizioni di carico, il valore della tensione di esercizio non deve superare la tensione ammissibile σ_{amm} , a sua volta minore della tensione di rottura σ_r :

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \sigma_{amm}$$

La precedente è detta equazione di stabilità, e viene utilizzata, nel caso di solidi sollecitati a trazione, sia nel calcolo di progetto che nel calcolo di verifica.

11.3.2 COMPRESIONE

Si consideri il solido di fig. 11.10, sollecitato da due forze uguali in intensità tra loro N ed opposte in verso, che tendono ad avvicinarsi tra loro. Questo tipo di sollecitazione è del tutto analogo al caso della trazione, con l'unica variante dell'inversione del verso di applicazione del carico N . Pertanto, anche qui, l'equazione di stabilità è data dalla:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \sigma_{amm}$$

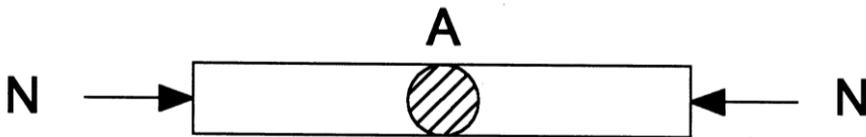


Fig. 11.10

In questo caso, però, occorre fare attenzione al fatto che l'equazione di stabilità è valida a condizione che il solido sollecitato a compressione non abbia una lunghezza molto maggiore delle due dimensioni trasversali. Se invece si verifica questa condizione, cioè ci si trova in presenza di solidi snelli, questi, se sottoposti a carico di compressione lungo la dimensione maggiore, sono interessati al fenomeno del carico di punta, che ne compromette la resistenza a compressione anche per sollecitazioni molto minori di quelle che soddisfano alla precedente condizione di stabilità.

Come regola pratica si può dire che per dimensionare un elemento a compressione semplice, senza tenere conto del fenomeno del carico di punta, occorre verificare che la lunghezza l dell'elemento lungo la quale è applicato il carico di compressione, non deve superare di oltre 10 volte la minima dimensione trasversale d dell'elemento stesso. Cioè, occorre che sia:

$$\frac{l}{d} \leq 10$$

se il rapporto l/d risulta maggiore di 10, l'elemento in esame, anziché dimensionato a compressione semplice, andrà dimensionato e verificato a carico di punta.

11.3.3 TAGLIO

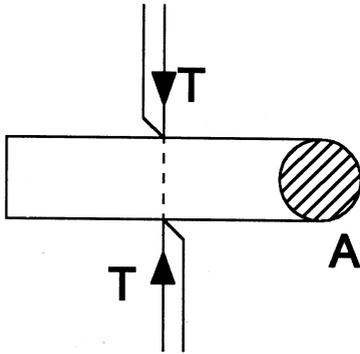


Fig. 11.11

Si consideri il solido di fig. 11.11, sollecitato da due forze T uguali ed opposte, giacenti nel piano della sezione, tendenti a dividere il solido mediante scorrimento lungo la sezione stessa. Nella sezione così sollecitata si sviluppa una tensione tangenziale τ , o sforzo di taglio, la cui espressione è data dal rapporto tra il carico T e l'area cui è applicato A :

$$\tau = \frac{T}{A}$$

Noto lo sforzo ammissibile τ_{amm} , proprio del materiale, l'equazione di stabilità è data dalla:

$$\tau = \frac{T}{A} \leq \tau_{amm}$$

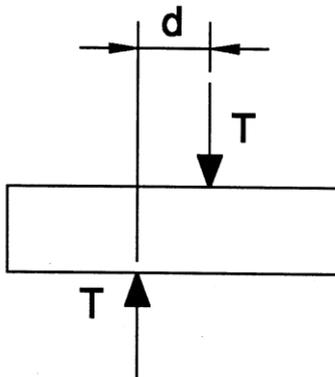


Fig. 11.12

Nei casi pratici, questa sollecitazione è sempre accompagnata da flessione (fig. 11.12), in quanto tra le due forze esiste sempre una distanza d , comunque piccola, che dà luogo ad una coppia di momento Td . Se tale momento è trascurabile, il solido può essere considerato soggetto a taglio semplice; se è rilevante, il solido è soggetto a sollecitazione composta di taglio e flessione.

11.3.4 FLESSIONE

Un solido è sollecitato a flessione quando, sottoposto a combinazioni di forze o coppie, viene incurvato il suo asse longitudinale (fig. 11.13). Per effetto della sollecitazione di flessione, le varie sezioni ruotano attorno all'asse neutro, che coincide con l'asse baricentrico della sezione stessa. Tali rotazioni producono

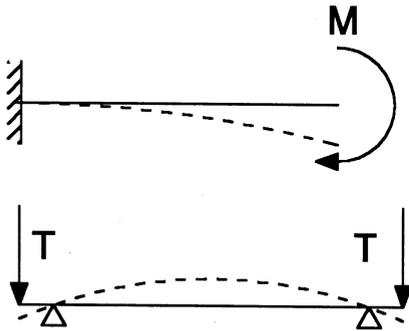


Fig. 11.13

trazione in alcune fibre e compressione in altre. Questi sforzi assiali (fig. 11.14) sono direttamente proporzionali alla distanza y della fibra dall'asse neutro, ed inversamente proporzionali al momento di inerzia J della sezione rispetto a tale asse:

$$\sigma = \frac{M}{J} y$$

Quindi, diversamente per quanto avviene per la trazione ed il taglio semplice, in cui tutte le fibre sono soggette al medesimo sforzo σ o τ , nella flessione gli sforzi vanno da un valore nullo in corrispondenza dell'asse neutro, ad un massimo in corrispondenza della fibra piú lontana dall'asse neutro.

Per la stabilit , occorrer  conoscere il massimo valore che assume lo sforzo normale σ , ovvero in corrispondenza delle fibre piú lontane dall'asse neutro, e verificare se questa tensione   inferiore alla tensione ammissibile, propria del materiale.

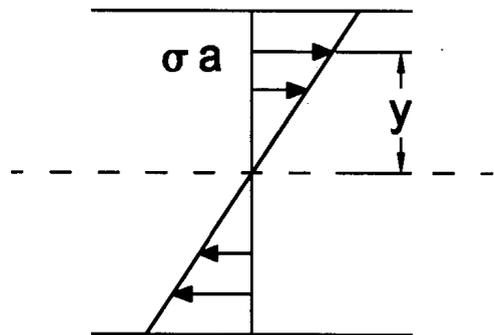
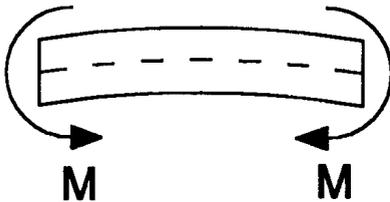


Fig. 11.14

Quindi, indicando con y la massima distanza delle fibre dall'asse neutro, l'equazione di stabilit  si pu  scrivere come:

$$\sigma = \frac{M}{J} y \leq \sigma_{amm}$$

La precedente, definito il modulo di resistenza W come:

$$W = \frac{J}{y}$$

l'equazione di stabilita si può scrivere come:

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq \sigma_{amm}$$

Per il progetto, ovvero quando è noto il materiale e la sollecitazione, e sono incognite le dimensioni del solido, la formula di progetto è data dalla:

$$W \geq \frac{M}{\sigma_{amm}}$$

11.3.5 TORSIONE

SOLIDI PIENI

Un solido si dice soggetto a torsione quando viene sollecitato da due coppie di pari momento e di verso opposto, giacenti in piani perpendicolari all'asse del solido stesso (fig. 11.15). Il momento delle coppie in questo caso diventa il momento torcente. Ciascuna sezione ruota rispetto alla sezione adiacente di un certo angolo, ed a queste deformazioni si oppongono delle tensioni tangenziali giacenti nelle sezioni stesse.

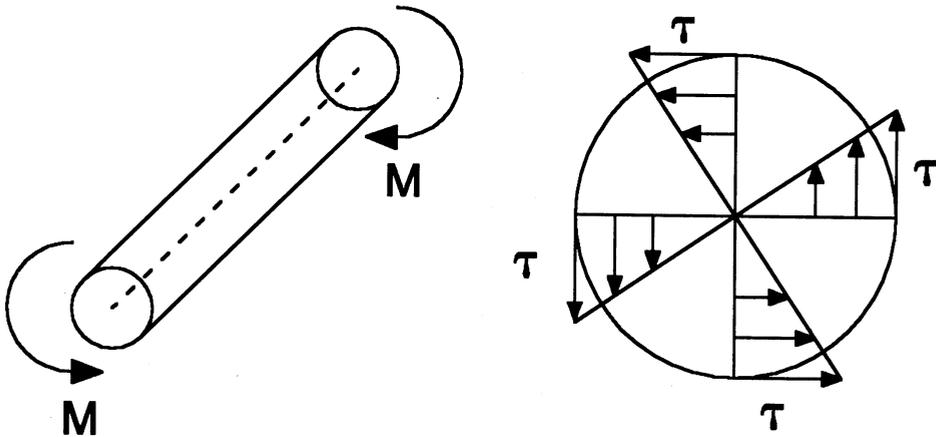


Fig. 11.15

Queste tensioni, che devono equilibrare il carico applicato, sono proporzionali al momento torcente applicato, inversamente proporzionali al momento d'inerzia

polare J_P rispetto all'asse neutro; sono inoltre tanto più grandi quanto è maggiore la distanza dall'asse neutro.

Quindi, la formula di stabilità a torsione è data dalla:

$$\tau = \frac{M_T}{J_P} r \leq \tau_{amm}$$

Definendo con W_T il modulo di resistenza a torsione, dato dalla:

$$W_T = \frac{J_P}{r}$$

la stabilità a torsione può essere data anche come:

$$\tau = \frac{M_T}{W_T} \leq \tau_{amm}$$

mentre la formula di progetto risulta:

$$W_T = \frac{M_T}{\tau_{amm}}$$

TUBI A PARETI SOTTILI

La torsione di elementi costituiti da tubolari aventi pareti sottili si discosta molto dalla teoria della torsione di solidi pieni.

Per le travi a pareti sottili chiuse (fig. 11.16) si applica la teoria di Bredt, nella quale viene introdotto il flusso di taglio q (N/mm), definito come prodotto tra lo sforzo di taglio e lo spessore della lamiera:

$$q = \tau t$$

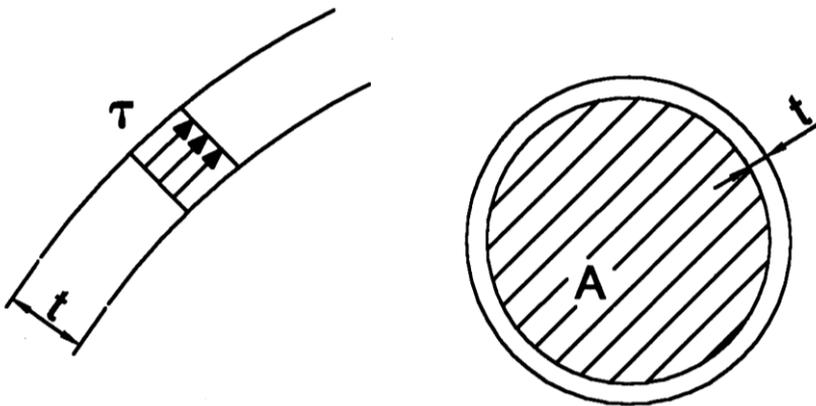


Fig. 11.16

Tale teoria si basa sull'ipotesi che il flusso di taglio è costante nella parete sottile, quando questa è soggetta a torsione. Indicando con A l'area della superficie, perpendicolare all'asse della trave, racchiusa dalla parete sottile della trave, e con M_T il momento torcente applicato alla trave, vale la relazione:

$$M_T = 2 q A$$

e quindi, noto il carico, il flusso di taglio si ricava come:

$$q = \frac{M_T}{2 A}$$

dalla quale, tenuto conto della definizione di flusso di taglio, si ottiene per la tensione tangenziale l'equazione di stabilità:

$$\tau = \frac{M_T}{2 A t} \leq \tau_{amm}$$

11.3.6 FLESSIONE E TAGLIO

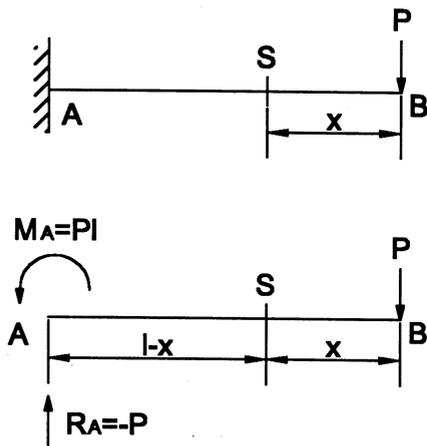


Fig. 11.17

Tra le sollecitazioni agenti su un elemento strutturale, la sollecitazione composta di flessione e taglio è senz'altro una delle più comuni. In generale, la risultante relativa ad una sezione qualsiasi di un solido rettilineo soggetto a flessione e taglio si può sempre ridurre ad una forza passante per il baricentro della sezione e giacente nella sezione stessa, ed una coppia situata nel piano individuato dall'asse del solido e dalla direzione del carico.

Caso tipico di questa sollecitazione composta è quello di una trave incastrata all'estremo A e caricata con un carico

concentrato P applicato al baricentro della sezione di estremo libero B (fig. 11.17). In questa configurazione, applicando le equazioni della statica, si determinano le reazioni vincolari dell'incastro A:

$$\sum F = R_A + P = 0$$

$$\sum M = Pl + M_A = 0$$

dalle quali è immediato ricavare:

$$R_A = -P$$

$$M_A = -Pl$$

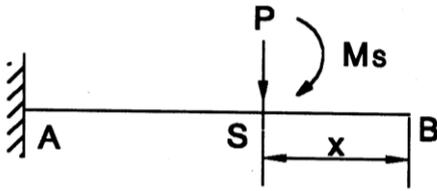


Fig. 11.18

In una generica sezione S, a distanza x dall'estremo libero, fig. 11.18, le forze agenti a destra della sezione stessa sono equivalenti ad una forza applicata al baricentro della sezione, che dà luogo ad uno sforzo di taglio $T_S=P$, e ad una coppia di momento $M_S=Px$, che genera flessione.

Volendo considerare le forze agenti

alla sinistra della sezione S, si trova che, nella sezione stessa:

$$T_S = R_A$$

$$M_S = -M_A + R_A(l - x) = Pl - Pl + Px$$

Da quanto sopra si vede che è equivalente, ai fini della determinazione del carico agente in una generica sezione S, considerare le forze agenti alla destra o alla sinistra della sezione stessa.

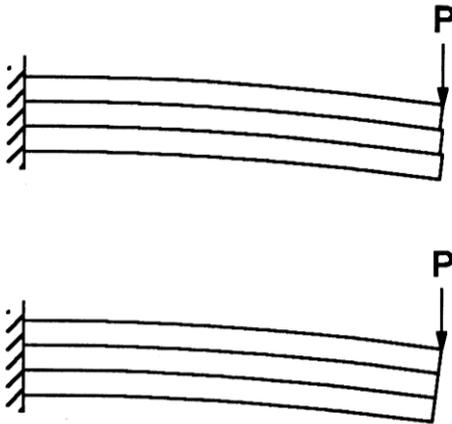


Fig. 11.19

Quanto finora detto mostra chiaramente che nella sollecitazione composta di sezione e taglio, il momento flettente varia da sezione a sezione, cosicché la trave dovrà essere calcolata in corrispondenza della sezione dove lo sforzo è massimo, ovvero:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} \leq \sigma_{amm}$$

Per la valutazione degli sforzi tangenziali, si consideri una trave incastrata (fig. 11.19), costituita da diversi strati sovrapposti del

medesimo materiale, sottoposta ad un carico verticale applicato all'estremo libero, prima con gli strati liberi di scorrere tra loro, e dopo con gli strati vincolati, ad esempio con bulloni o chiodi, in modo che ne sia impedito lo scorrimento reciproco; nel primo caso i singoli strati presentano uno scorrimento reciproco in direzione assiale, che è assente nel secondo caso, a causa del vincolo applicato.

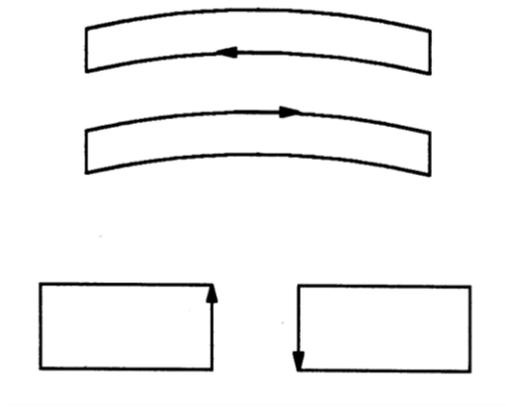


Fig. 11.20

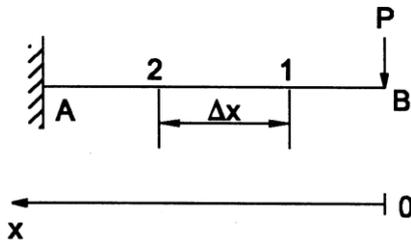


Fig. 11.21

saranno presenti due diversi valori del momento flettente: in particolare, poiché alla generica sezione distante x dal punto di applicazione del carico il valore del momento flettente è dato dalla:

$$M_x = Px$$

è immediato dedurre che risulta:

$$M_2 > M_1$$

Prendendo in considerazione l'elemento di trave compreso tra le sezioni 1 e 2, fig. 11.22, che deve essere in equilibrio rispetto alla rotazione ed alla traslazione, si trova subito che:

$$M_2 - M_1 = T \Delta x$$

Da questo semplice esempio si può dedurre l'esistenza, nelle travi soggette a flessione e taglio, di tensioni tangenziali aventi direzione parallela all'asse della trave stessa, oltre alle tensioni tangenziali giacenti nei piani normali all'asse (fig. 11.20). Si consideri la fig. 11.21: una trave incastrata è soggetta ad un carico P applicato all'estremità libera. In queste condizioni si verifica una sollecitazione di taglio costante su tutta la trave e pari al carico applicato:

$$T = \text{cost} = P$$

ed un momento flettente il cui valore aumenta via via che ci si allontana dal carico e ci si avvicina all'incastro, raggiungendo in quest'ultimo il valore massimo.

Nelle due sezioni contrassegnate dai numeri 1 e 2, distanti tra loro di Δx ,

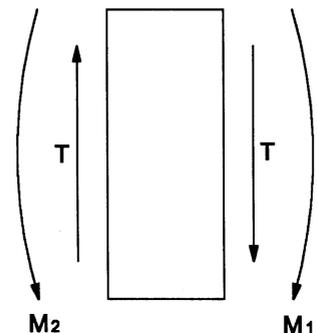


Fig. 11.22

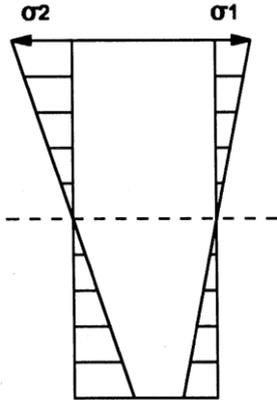


Fig. 11.23

Sotto queste condizioni di carico l'elemento, come tutta la trave nell'insieme, tende ad incurvarsi in modo da allungare le fibre superiori ed accorciare quelle inferiori: si sviluppa quindi un campo di tensioni assiali come rappresentato in fig. 11.23, in cui la differenza tra le tensioni stesse è esagerata per chiarezza di disegno. I valori di queste tensioni sono espressi dalle:

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{J} y$$

$$\sigma_2 = \frac{M_2}{J} y$$

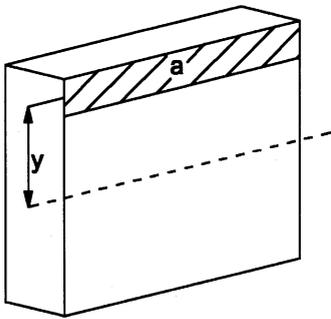


Fig. 11.24

In particolare, essendo il momento agente in 2 maggiore del momento agente in 1 in quanto la sezione 2 è più distante della sezione 1 dal punto di applicazione del carico, sarà anche, alla generica distanza y dall'asse neutro:

$$\sigma_2 > \sigma_1$$

Si consideri ora una striscia di area a distante y dall'asse della trave (fig. 11.24); moltiplicando membro a membro le precedenti espressioni per a , si ottiene ovviamente:

$$\sigma_1 a = \frac{M_1}{J} ya$$

$$\sigma_2 a = \frac{M_2}{J} ya$$

sottraendo membro a membro le precedenti si ottiene facilmente:

$$(\sigma_2 - \sigma_1) a = \frac{M_2 - M_1}{J} ya$$

Notando che il prodotto ya non è altro che il momento statico S dell'area a rispetto all'asse della trave, e tenendo presente l'equilibrio alla rotazione dell'elemento stesso, si ottiene:

$$(\sigma_2 - \sigma_1) a = \frac{T \Delta x}{J} S$$

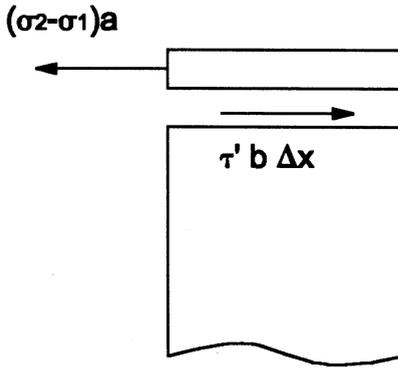


Fig. 11.25

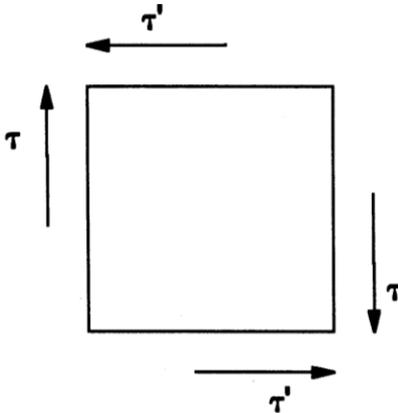


Fig. 11.26

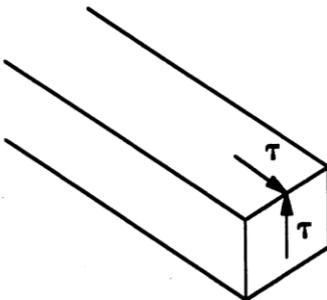


Fig. 11.27

Si noti ora che sull'elementino corrispondente all'area a (fig. 11.25) agisce una forza di intensità $(\sigma_2 - \sigma_1)a$ che tende a farlo scorrere rispetto alla parte di trave rimanente; per evitare questo scorrimento deve nascere una forza uguale ed opposta, generata da sforzi di taglio τ' agenti su una superficie di area $b\Delta x$:

$$(\sigma_2 - \sigma_1) a = \tau' b \Delta x$$

uguagliando tra loro i secondi membri delle due precedenti espressioni si trova subito che:

$$\tau' = \frac{T S}{J b}$$

A questo punto, considerando il solito elementino di trave (fig. 11.26), risulta facile dimostrare, per l'equilibrio alla rotazione, che gli sforzi tangenziali longitudinali come τ' sono uguali in modulo agli sforzi tangenziali τ agenti sul piano normale all'asse:

$$\tau' = \tau$$

In ciò consiste il principio di reciprocità delle tensioni tangenziali, che si può anche enunciare dicendo che le tensioni agenti sopra due superfici ortogonali e dirette normalmente ad uno spigolo comune sono uguali (fig. 11.27).

A titolo di esempio, si calcola l'espressione dello sforzo di taglio per una sezione rettangolare (fig. 11.28). Si consideri la sezione tratteggiata, avente area

$$A = b \left(\frac{h}{2} - y \right)$$

e baricentro distante dall'asse neutro:

$$y_G = \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2} + y \right)$$

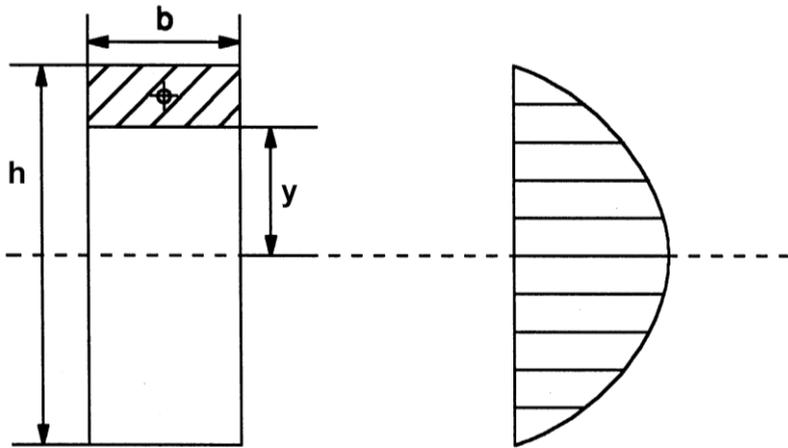


Fig. 11.28

Il momento statico di questa area rispetto all'asse neutro si ottiene come prodotto dell'area A per la distanza tra baricentro ed asse neutro y_G :

$$S = b \left(\frac{h}{2} - y \right) \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2} + y \right) = \frac{1}{2} b \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - y^2 \right]$$

e quindi, per gli sforzi di taglio si ha:

$$\tau = \frac{T}{2J} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - y^2 \right]$$

Dalla precedente espressione appare subito evidente che gli sforzi di taglio si distribuiscono lungo la sezione con legge parabolica, assumendo valore nullo per le fibre esterne e valore massimo in corrispondenza dell'asse neutro.

Infatti, per le fibre esterne si ottiene:

$$y = \frac{h}{2} \Rightarrow \tau = \frac{T}{2J} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right] = 0$$

mentre, all'asse neutro:

$$y = 0 \Rightarrow \tau = \frac{T}{2J} \left(\frac{h}{2} \right)^2$$

Tenendo presente che, per la sezione rettangolare, il momento d'inerzia rispetto al baricentro è dato da:

$$J = \frac{bh^3}{12}$$

il valore dello sforzo di taglio massimo τ_{\max} è fornito dalla:

$$\tau = \frac{T}{2bh^3/12} \frac{h^2}{4} = \frac{3 T}{2 bh} = \frac{3 T}{2 A}$$

Quindi, per una sezione rettangolare sottoposta al taglio T, lo sforzo di taglio massimo è pari a 1,5 volte lo sforzo di taglio medio, dato dal rapporto tra il taglio e l'area della sezione:

$$\tau_{\max} = 1,5 \tau_{\text{medio}}$$

Per la sezione circolare, omettendone la dimostrazione, si trova che:

$$\tau_{\max} = \frac{4 T}{3 A}$$

11.4 Carico di punta

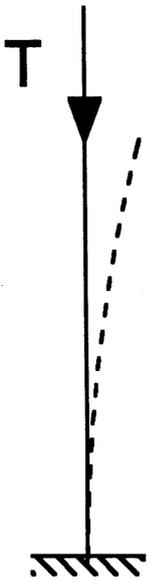


Fig. 11.29

Si consideri un elemento strutturale snello, cioè avente la dimensione trasversale massima molto minore della dimensione assiale; quando un elemento simile viene compresso assialmente, oltre che a compressione, questo tende ad inflettersi lateralmente (fig. 11.29).

La ragione di tale inflessione va ricercata nel fatto che la forza applicata assialmente non agisce con precisione lungo l'asse geometrico; di conseguenza, la linea d'azione del carico presenta un braccio rispetto all'asse, e quindi, oltre alla compressione, nasce una sollecitazione di flessione, come se l'asta fosse soggetta anche ad una coppia.

Il momento così prodotto dalla forza assiale tende ad incurvare il solido, da un lato che è assolutamente impossibile prevedere a priori, per cui a seguito di questo incurvamento si genera un aumento del braccio della forza e quindi della sollecitazione di flessione, nonostante che il carico esterno agente sembri sollecitarla solamente a compressione.

A questo stato di cose, le forze interne all'elemento si oppongono fino ad un certo limite; tale limite, detto carico critico N_{CR} , rappresenta il valore del carico di punta oltre il quale la struttura cede per flessione.

La determinazione del carico critico si ottiene utilizzando la formula di Eulero:

$$N_{CR} = \frac{\pi^2}{l_0^2} E J$$

che tiene conto del materiale mediante il modulo di elasticità E , della forma geometrica della sezione mediante il momento di inerzia minimo della sezione trasversale J , e della lunghezza libera di inflessione l_0 , considerata come la lunghezza di un'asta incernierata agli estremi.

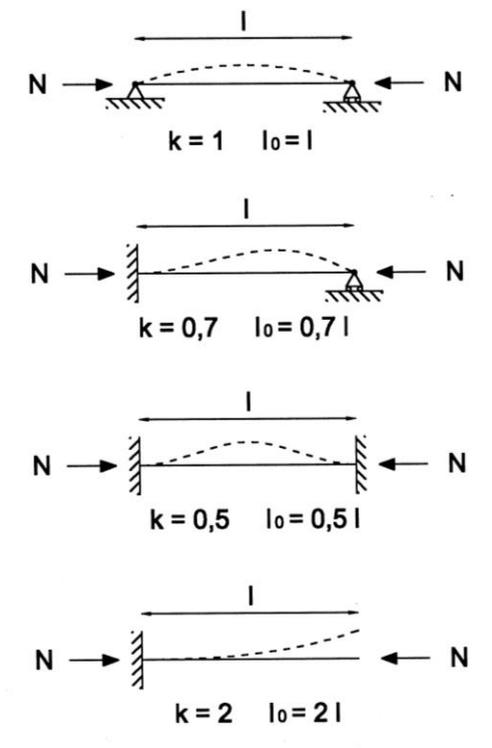


Fig. 11.30

Nei casi pratici in cui i vincoli di estremità delle aste non sono delle cerniere, il valore l_0 da usare nella formula di Eulero si ottiene dalla lunghezza dell'asta l moltiplicata per un opportuno coefficiente k , che tiene conto della natura dei vincoli di estremità:

$$l_0 = k l$$

Il valore del coefficiente k è indicato nella fig. 11.30, per i più comuni tipi di vincolo.

Quindi, negli elementi strutturali snelli, affinché non si presenti il fenomeno del carico di punta, dovrà verificarsi che lo sforzo assiale soddisfi la condizione:

$$N < N_{CR}$$

la quale, espressa in termini di tensioni, indica che deve essere:

$$\sigma < \sigma_{CR}$$

cioè:

$$\frac{N}{A} = \frac{\pi^2 E J}{A l_0^2}$$

11.5 Fatica

Molti pezzi di macchine sono soggetti a sollecitazioni che variano nel tempo in maniera ciclica. Ad esempio, i componenti del manovellismo di un motore a combustione interna sono soggetti a carichi ciclici. L'assale di una vettura ferroviaria, in rotazione assieme alle ruote, è anch'esso soggetto a sollecitazioni cicliche, benché le forze agenti (il peso della vettura) conservino il loro valore. Ciò è dovuto al fatto che le fibre esterne dell'assale, quando questa ruota, sono soggette alternativamente a sollecitazioni di trazione e di compressione.

L'esperienza mostra che sotto l'azione di sforzi variabili nel tempo, un dato componente può rompersi dopo un dato numero di cicli, mentre se lo stesso carico è applicato in maniera stazionaria la rottura non avviene. Questo fenomeno è ben illustrato, nella pratica comune, dalla rottura causata dalla ripetuta flessione, a mani nude, di un pezzo di filo metallico; lo stesso filo di ferro, applicando un carico costante a mani nude, non subirebbe alcun danno.

Dopo la rottura a fatica, sulla superficie di frattura di un dato pezzo si possono in genere evidenziare due zone distinte; in una le facce a contatto sono lisce mentre nell'altra si possono notare i segni di una rottura fragile.

Storicamente, il fenomeno sembrava dovuto ad un cambiamento della struttura cristallina del metallo, sotto l'azione di carichi ripetuti: pertanto gli è stato dato il nome di rottura a fatica. In seguito, si è capito che il fenomeno aveva origine puramente locale: più precisamente, esso consiste nell'insorgere nel propagarsi delle inevitabili microcricche presenti nel materiale; col tempo le microcricche aumentano di dimensione, diventando cricche vere e proprie fino alla rottura improvvisa del pezzo stesso.

Per questo la rottura per fatica è essenzialmente di tipo fragile: se si esamina la superficie di frattura, si nota una zona liscia, che è appunto quella in cui si è propagata la fessura, mentre la zona non fessurata ha un aspetto ruvido, in quanto in essa si è avuto un cedimento brusco ed istantaneo quando l'area della sezione residua non è risultata più sufficiente per resistere al carico applicato.

L'analisi teorica della resistenza a fatica è molto difficile, in quanto la natura della rottura per fatica dipende dalla particolarità della struttura molecolare e cristallina del materiale. Pertanto, lo schema del mezzo continuo che viene usato normalmente nella scienza delle costruzioni, per questo caso non è più sufficiente per giungere a modelli validi. Infatti, per poter pervenire ad una teoria sufficientemente esauriente della resistenza a fatica è necessario conoscere le particolarità della struttura dei cristalli e dei legami intercristallini, utilizzare gli strumenti ed i metodi della statistica e della teoria della probabilità.

Attualmente, i fondamenti fisici della teoria dei solidi non hanno ancora raggiunto un livello tale per poter sviluppare dei metodi di calcolo della resistenza a fatica. Si è pertanto costretti, mantenendosi nei limiti che le ipotesi di mezzo continuo impongono, a continuare la classificazione dei fatti sperimentali, dall'insieme dei quali si cerca di ricavare delle regole generali che permettono di fare dei calcoli attendibili ed affidabili. Pertanto, al giorno d'oggi la teoria della resistenza a fatica si esaurisce nella classificazione e sistematizzazione dei fatti sperimentali.

Lo scopo fondamentale dello studio della fatica è in definitiva quello di riuscire a fornire una previsione sulla vita strutturale del dato pezzo quando sono date alcune

informazioni che definiscono il ciclo della sollecitazione periodica. Infatti, nella fig. 11.31, vengono definite alcune grandezze caratteristiche del fenomeno ripetitivo:

- Il periodo T , come distanza temporale tra due eventi in cui il carico assume lo stesso valore dopo avere percorso un intero ciclo;
- Il valore medio della sollecitazione σ_m ;
- L'ampiezza del ciclo alternato σ_a , come differenza massima tra il valore assunto dalla sollecitazione e di valore medio, oppure l'ampiezza massima del ciclo σ_{max} .

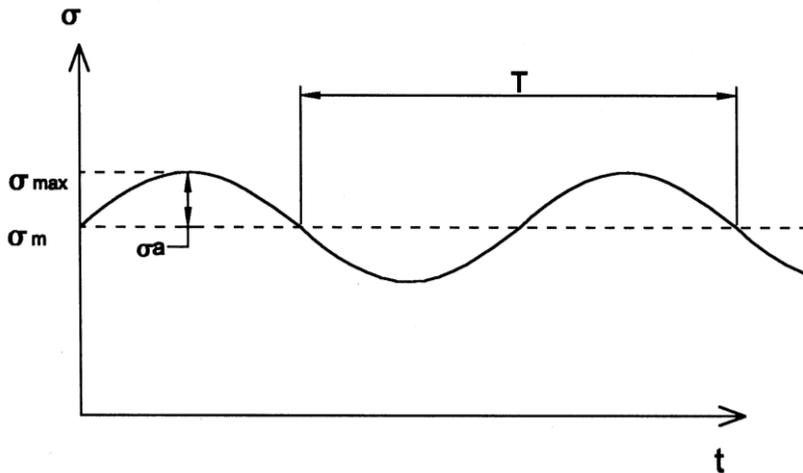


Fig. 11.31

La forma più espressiva e diffusa per rappresentare la vita a fatica di un dato elemento è la curva di Woehler, rappresentata in fig. 11.32, che fornisce il numero di cicli a rottura posti in ascissa, in funzione della sollecitazione massima σ_{max} , o della sollecitazione alternata σ_a . Questo grafico si ricava nel modo seguente: mediante prove ripetute, che comportano la rottura di un elevatissimo numero di provini, e che pertanto sono piuttosto dispendiose, si può determinare il numero di cicli N che il campione può sopportare prima della rottura, in funzione di σ_{max} del ciclo. Tenuto conto che il numero di cicli di vita cresce rapidamente al diminuire del valore di σ_{max} , in genere in ascissa si usa una scala logaritmica. L'esperienza mostra che per la maggior parte dei materiali metallici ferrosi è possibile indicare uno sforzo massimo per cui il materiale non si rompe qualunque sia il numero di cicli cui è sottoposto. Tale sforzo è denominato limite di fatica oppure resistenza a fatica.

Per i metalli non ferrosi, come pure per gli acciai sottoposti a trattamento di tempera, non è possibile determinare il numero di cicli per cui un campione possa resistere senza la successiva rottura a fatica. Per questi materiali si introduce quindi il concetto di resistenza a fatica convenzionale, che viene definita come la

sollecitazione cui un dato pezzo può resistere per un numero di cicli pari a 10^8 senza subire rottura a fatica.

Poiché l'inizio della rottura per sollecitazioni cicliche è provocato dalla formazione di una incrinatura locale nel materiale, è evidente che le condizioni di finitura superficiale sono di fondamentale importanza ai fini della resistenza a fatica.

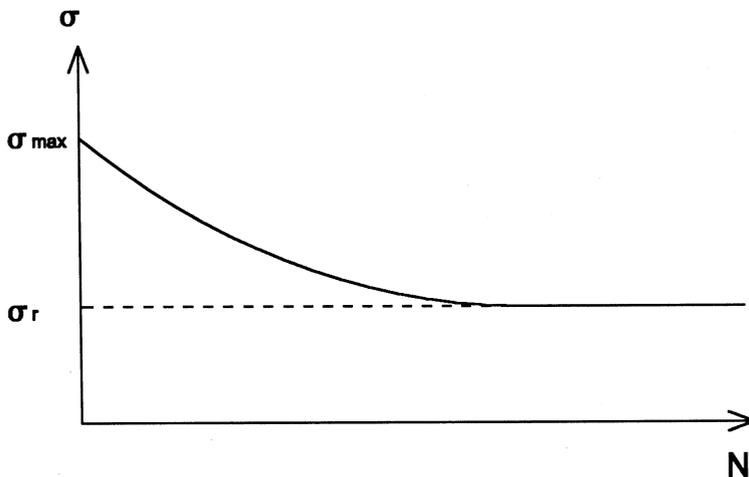


Fig. 11.32

Risulta infatti chiaro dagli stessi motivi per cui un dato pezzo manifesta fenomeni di rottura per fatica, che questo limite di fatica aumenta con la levigatezza e purezza della sua superficie. Infatti, se la superficie è a finitura grossolana, con presenza di piccoli difetti superficiali, sotto carichi opportuni la resistenza a fatica diminuisce a parità di resistenza al carico statico.

Quindi, per aumentare la resistenza a fatica è necessario ottenere un elevato grado di purezza della superficie, soprattutto in prossimità di zone in cui si può evidenziare una concentrazione degli sforzi. Conseguentemente, molte possibilità tecnologiche per l'aumento della resistenza a fatica di un componente, e quindi della sua vita utile, vengono offerte dai metodi speciali di finitura superficiale.

Generalmente, i pezzi importanti che lavorano in condizioni critiche di sollecitazione vengono di solito rettificati ed in seguito lucidati, come il caso di bielle ed alberi motore; il procedimento di nitrurazione superficiale assicura risultati eccellenti in particolare dove esistono zone di concentrazione degli sforzi.

Il limite di fatica può essere aumentato anche mediante laminazione a freddo della superficie, mentre ottimi risultati riguardo la vita a fatica vengono ottenuti mediante l'utilizzo della pallinatura della superficie, che consiste nel lavorare la superficie del pezzo con un getto di pallini di ghisa o di acciaio; in particolare

questo trattamento genera sull'elemento uno strato superficiale con sforzi residui di compressione, che ostacola il formarsi di incrinature locali.

Nel calcolare la resistenza a fatica di un pezzo, oltre alle condizioni della superficie, è necessario tenere conto delle dimensioni del pezzo stesso: infatti le esperienze per la determinazione del limite di fatica di provini di diverse dimensioni hanno mostrato il modo chiaro che la resistenza a fatica si riduce con l'aumentare delle dimensioni.

Questo è un ulteriore elemento che mostra come gli sforzi massimi non caratterizzano completamente il processo di rottura per fatica. Infatti, mentre le grandezze dello sforzo massimo governano l'inizio della formazione di una cricca, il suo sviluppo successivo è determinato da condizioni locali e dipende, in maniera sostanziale, dalla forma e dalle dimensioni del pezzo stesso; d'altra parte, all'aumentare delle dimensioni del pezzo, cresce anche la probabilità di avere difetti strutturali in regioni in cui si manifestano sforzi elevati, il che, conseguentemente, aumenta la probabilità di nascita, formazione e sviluppo di una cricca.

Come già accennato, la presenza di fori e di intagli in un pezzo ne riducono la vita a fatica a causa della concentrazione degli sforzi; e l'effetto dell'intaglio, ad esempio, è assai più ingente che non la semplice riduzione di sezione che esso

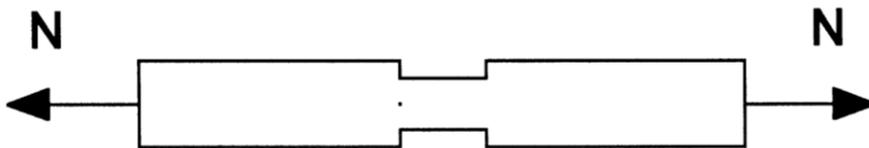


Fig. 11.33

provoca: in altre parole, fig. 11.33, gli sforzi nei punti in cui si ha una brusca variazione della sezione trasversale sono molto superiori al valore del semplice rapporto forza/area.

È appena il caso di accennare ad un altro tipo di sollecitazione periodica, indotta da variazioni notevoli di temperatura, che causa il fenomeno della fatica termica; questo fenomeno è caratterizzato da sollecitazioni periodiche di bassa frequenza ma di elevata ampiezza, tale da rasentare il campo plastico.

Per affrontare il fenomeno della fatica e tenerne conto fin dalla fase di progetto preliminare sono stati sviluppati e messi a punto alcuni criteri di progetto che hanno lo scopo fondamentale di garantire la tenuta a fatica dell'elemento da progettare.

I principali criteri sono i seguenti:

- Safe - life
- Fail - safe

- Damage tolerance

Una struttura progettata secondo il criterio safe-life (vita sicura) è una struttura che deve essere in grado di rimanere integra per un assegnato numero di ore di volo, al termine delle quali viene ritirata dal servizio, indipendentemente dal fatto che abbia subito o meno dei danneggiamenti visibili. Quindi, in questo criterio di progetto è necessario eseguire preventivamente delle prove o simulazioni di carico per verificare che la struttura sia in grado di operare senza alcun danno per un periodo di tempo anche quattro volte superiore al tempo di vita operativa. Ovviamente, il limite di questo criterio è che impone dei coefficienti di sicurezza assai elevati, e quindi conseguentemente comporta dei costi economici assai elevati.

Una struttura progettata secondo il criterio fail-safe, assai diffusa nel campo aeronautico, deve essere concepita in modo da possedere una resistenza residua anche dopo la rottura di un componente; in pratica questo tipo di struttura deve essere in grado di tollerare il cedimento di uno o più componenti principali, riuscendo ad offrire una riserva di resistenza. Una struttura fail-safe è quindi iperstatica, di modo che altri elementi possano assolvere il compito di quello in cui si è manifestata la rottura, oppure è disegnata in modo che la propagazione di una fessura o cricca possa essere arrestata in tempo utile.

Questa esigenza, stabilita ad esempio da norme militari americane, richiede che la struttura danneggiata abbia la possibilità di sopportare determinati carichi senza compromettere sensibilmente l'efficienza del velivolo, il modo che questo possa concludere la propria missione con un grado di sicurezza ancora molto elevato. Naturalmente, a tale criterio deve essere abbinato quello di ispezionabilità per il rilevamento del componente danneggiato e per la sua facile sostituzione.

Una struttura progettata secondo il criterio di damage tolerance (tolleranza al danno) è tale per cui si ammette la possibilità di esistenza di difetti (iniziali, di fatica, di corrosione, di tensocorrosione, eccetera) nella struttura stessa, senza che però ne venga messa in dubbio la sicurezza di esercizio durante la vita prevista.

In pratica, devono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

- Se si generano dei difetti, la struttura deve essere in grado di sopportarli senza conseguenze catastrofiche per l'integrità della struttura stessa;
- L'individuazione del difetto deve essere fatta in tempo utile e la velocità di propagazione dello stesso deve essere la più lenta possibile, il modo tale che lo si possa individuare in tempo utile.

Questo criterio richiede controlli periodici, il che impone, nelle parti meno accessibili della struttura, la progettazione e la realizzazione secondo il criterio safe-life.