Prof. Angelo Serafino Caruso, Docente di Meccanica, Macchine ed Energia
Istituto Tecnico Industriale "E. Majorana" – Rossano (CS)

Le mie lezioni: Sollecitazioni e Deformazioni(1/4^)

Sollecitazioni, Deformazioni e Tensioni interne

Sollecitazioni a Fatica

Le Sollecitazioni Semplici

Sollecitazioni Composte, Tensioni Interne

Travi Caricate di Punta, Formula di Eulero

https://thedallasgeek.files.wordpress.com/2011/01/io-robot-copy.jp

<u>Sollecitazioni, Deformazioni e Tensioni interne</u>

Ogni elemento strutturale è soggetto a forze e momenti o coppie di forze che rappresentano le forze esterne in equilibrio con le reazioni vincolari.
Supporremo, inoltre, di ragionare con corpi omogenei (caratteristiche fisiche e meccaniche invariabili e in tutti i punti) e isotropi (caratteristiche elastiche identiche in tutte le direzioni) e, per comodità, di forma prismatica o cilindrica con le sezioni normali e baricentriche all'asse tali che, ogni fila di punti rappresenta una "fibra".
Le forze si classificano in concentrate (agenti su un punto) e **distribuite** (lineari, piane e volumiche).
Si distinguono, in forze costanti o carichi statici che non mutano nel tempo, **dinamiche** applicate istantaneamente in tempi brevi, ad esempio gli urti, e **variabili nel tempo e nel valore** con legge sinusoidali, note come sollecitazioni a fatica.

*Queste azioni, producono **deformazioni** sul corpo vincolato connesse alla natura del materiale, all'entità delle forze,alle dimensioni e alla forma del corpo.*

*Esse sono **elastiche** se il corpo, al cessare delle azioni,*

*ritorna allo stato originario, altrimenti saranno **permanenti o plastiche**.*

L'elemento strutturale, o meglio, la trave risponde con una

Variazione di lunghezza delle fibre longitudinali e/o

con uno scorrimento tra le sezioni contigue.

Oltre ciò la trave reagisce con le forze di coesione

molecolare che si sviluppano internamente ad essa per contrapporsi

alle sollecitazioni esterne che sono conosciute come

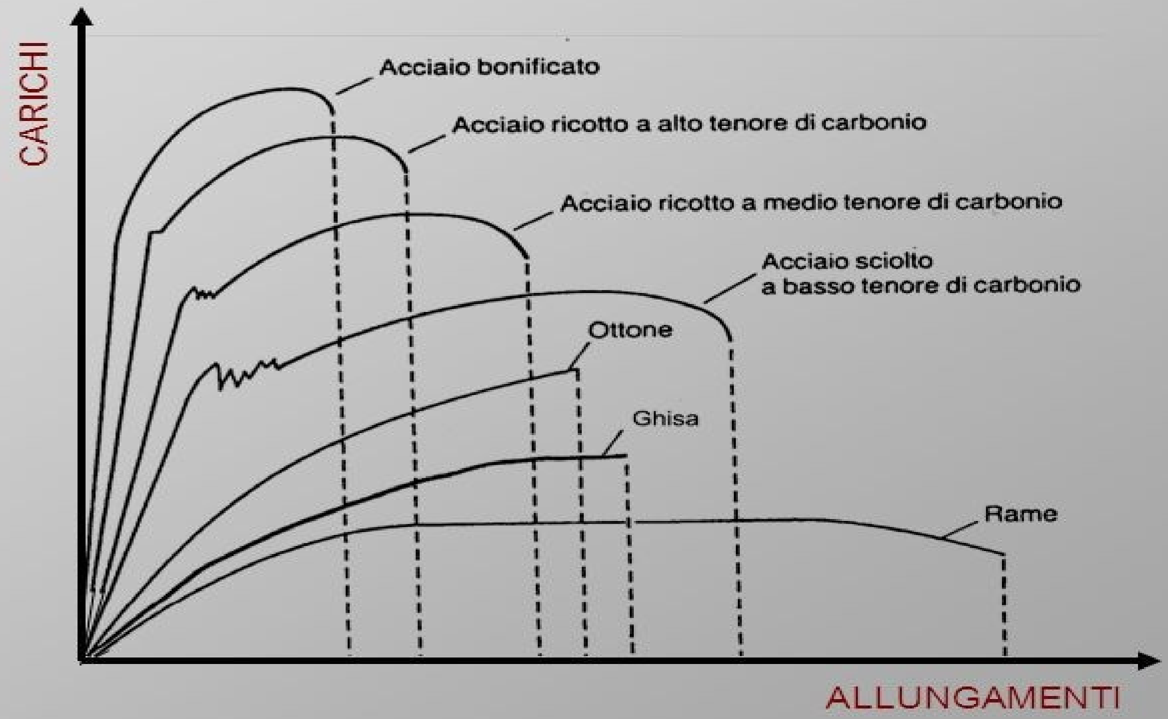
tensioni interne o sforzo** e vengono indicate con σ **(sigma=tensione normale, agente sul piano longitudinale, cioè lungo l'asse della trave)

*e τ **(tau=tensione tangenziale, agente sul piano trasversale alla trave)**.*

Caratteristiche Meccaniche dei Materiali, Prova di Trazione

bing.com/images

Diagramma carichi-allungamenti di materiali diversi



La prova di trazione è la più importate e significativa
da eseguire sulla Macchina Universale.
La figura precedente (Diagramma tensioni, σ-allungamenti, ε)
affianca le prove di trazione di materiali diversi molto usati in meccanica
la cui fase elastica si ferma ancora prima dello snervamento
(curva seghettata) e della "strizione" della provetta
cioè nella zona dove vale la Legge di Hooke (Scienziato del XVIIsec.):
"Forza e deformazione sono proporzionali" e "gli effetti si sovrappongono".
In generale, nel campo delle costruzioni antisismiche, civili e edili,
si preferiscono gli acciai con alto/medio/basso tenore di carbonio caratterizzati
dalla fase di snervamento nel campo elasto/plastico.
Questa fase è molto interessante perché il materiale, è vero che
cede repentinamente, ma, incrudendosi, si rompe a carichi più elevati.

Carico di Sicurezza

Gli organi delle macchine si devono dimensionare in modo che non superino il carico al limite dell'elasticità che non è di facile determinazione, Infatti, ritornando al diagramma (σ-ε), lo snervamento nell'acciaio bonificato, nell'ottone, nella ghisa e nel rame non si manifesta, per cui per determinarlo occorre riferirsi al carico unitario di scostamento di 0,2% dalla proporzionalità ($R_{p0,2}$).

Per gli acciai, soggetti allo snervamento, per essere in sicurezza è necessario, nelle verifiche statiche e dinamiche dei pezzi che compongono gli organi delle macchine, essere certi che il valore della **tensione interna** (σ_{max}) sia inferiore alla **tensione limite di pericolo** (σ_{limite}) che poniamo = $R_{rottura}$ o $R_{snervamento}$.

In realtà nella verifica e nella progettazione non si pone mai come base del calcolo la $R_{rottura}$ (materiali fragili) o la $R_{snervamento}$ (materiali duttili) perché, nel funzionamento, non si può escludere il superamento accidentale di questi valori per cause diverse come: difetti nel materiale, montaggio ed esecuzione, carichi gravosi imprevisti, ecc.

Quindi, si pone a base del calcolo, una frazione della tensione limite:

Tensione Normale Ammissibile Statica o Carico di Sicurezza

$\sigma_{ams} = \sigma_{limite}/g \geq \sigma_{max}$ con "g" Grado di Sicurezza

Tensione Tangenziale Ammissibile Statica

$\tau_{ams} = \sigma_{ams}/\sqrt{3} = 0{,}577\ \sigma_{ams} \geq \tau_{max}$

Il grado di sicurezza, $g = R/\sigma_{ams} = 2{,}3 \sim 3$

ed è il rapporto tra la tensione di rottura (R_r) o quella di snervamento (R_s) fratto la tensione massima nei punti più pericolosi.

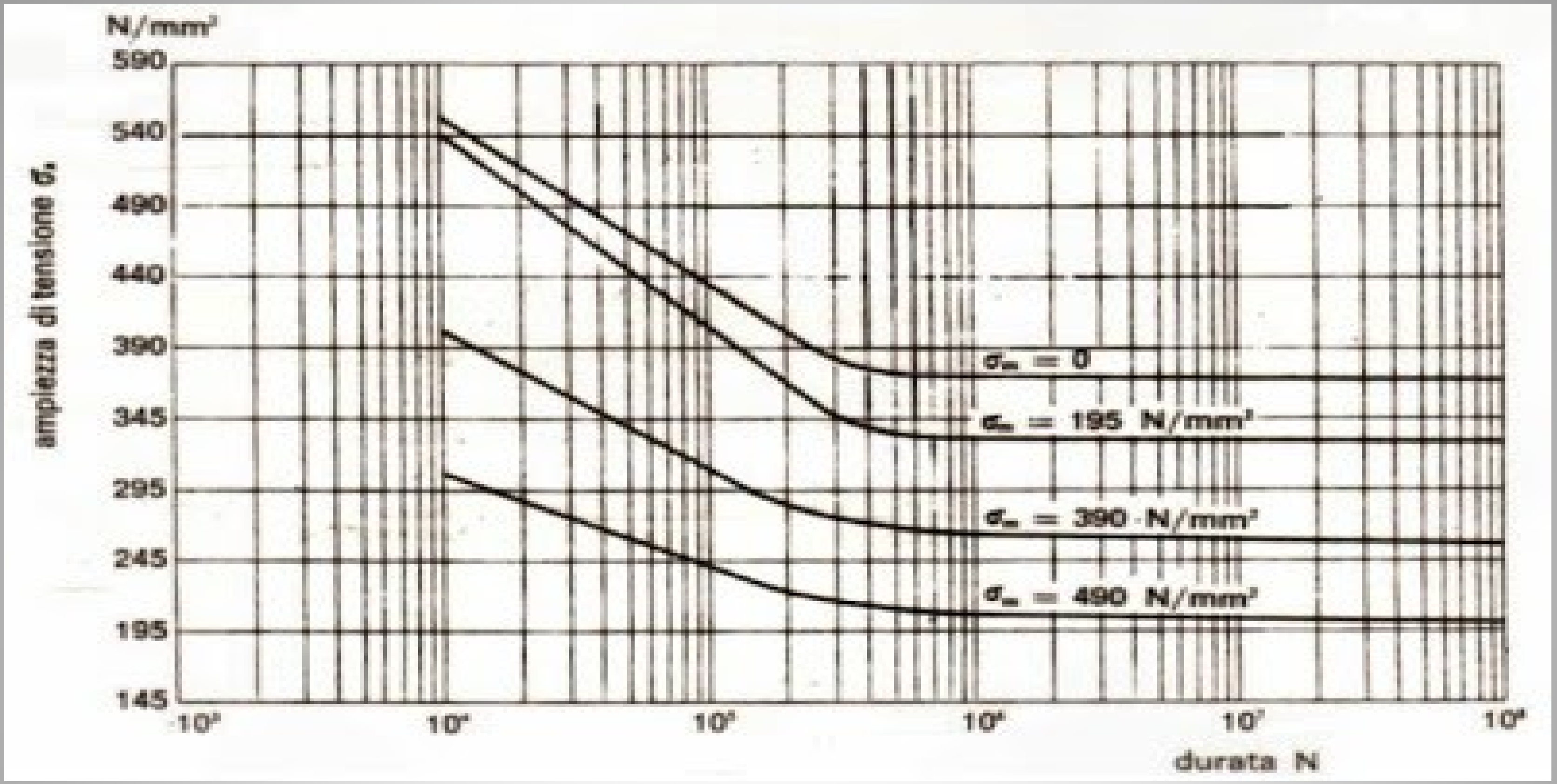
Per scegliere il grado di sicurezza occorre molta esperienza:
Più il calcolo è sommario e più è incerto è il comportamento del materiale, più alto deve essere.

Comunque, all'uopo, basta consultare manuali, testi e tabelle.

Sollecitazioni a Fatica (Esposizione, n. 2)

In meccanica, dove le sollecitazioni dinamiche sono variabili nel tempo e nel valore, le forze si applicano istantaneamente e in tempi brevi,
si parla di sollecitazioni a fatica.
L'Ing. Wöhler (XIX sec.) delle Ferrovie, fu il primo ad accorgersi di questo fenomeno che affliggeva gli assiali delle carrozze ferroviarie che si rompevano, per fatica a flessione rotante (ciclo alterno simmetrico), molto al di sotto del limite statico di rottura.
I risultati delle prove ottenute li ha rappresentati sul diagramma di cui, in ascissa, il numero dei cicli che provocano la rottura, e in ordinata, le ampiezze della tensione corrispondente al carico massimo in ogni ciclo.
Ogni curva rappresenta un acciaio e sono sfalsate ma tutte rapidamente decrescenti nel verso delle ascisse crescenti, il tratto finale è orizzontale e quasi parallelo all'asse delle ascisse la cui ordinata corrisponde al valore limite di resistenza a fatica al di sotto del quale la provetta resiste

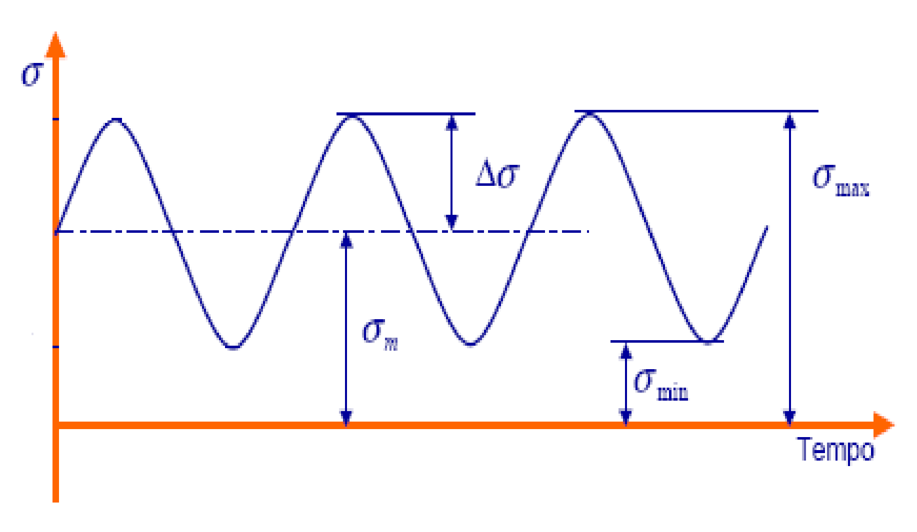
anche ad un numero infinito di cicli, come rappresentato qui sotto.



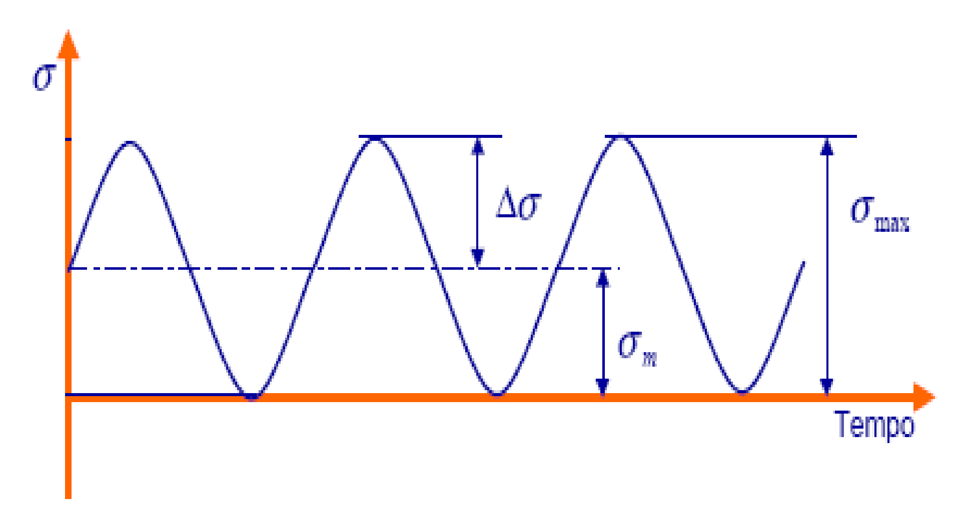
Curva di Wöhler

*Dunque, un materiale soggetto a cicli ripetitivi e periodici hanno una resistenza inferiore a quelli sollecitati staticamente della stessa intensità e si distinguono in **sollecitazione pulsante o alternata.***

Ciclo Pulsante: La tensione varia tra due limiti dello stesso segno.

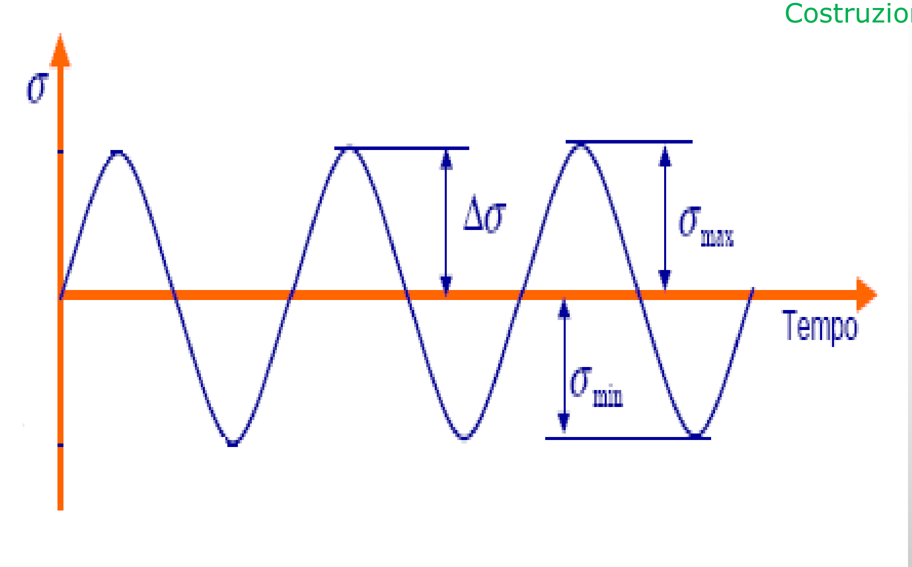


Ciclo dello Zero, caso particolare di sollecitazione pulsante, σmin =0

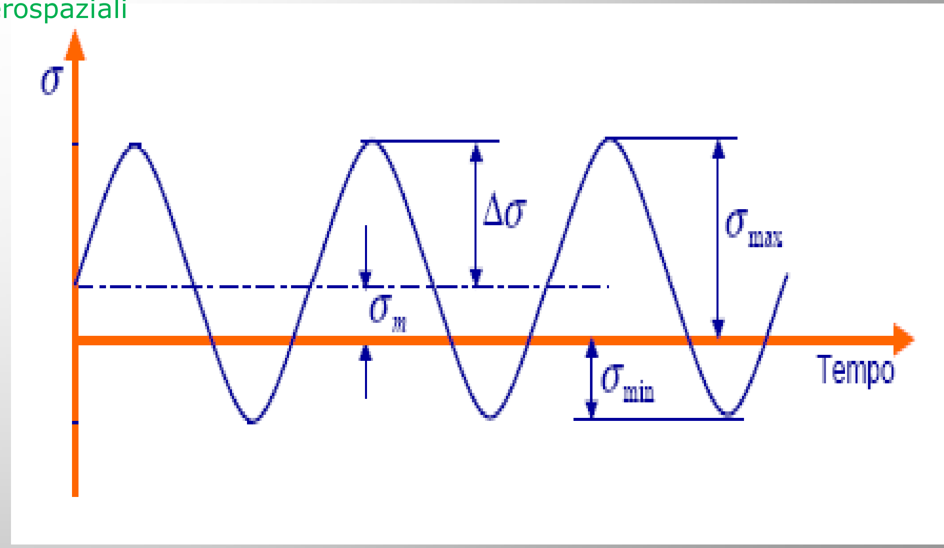


Estratto Internet,
by Ing.Carlo Andreotti
Tecnologie delle
Costruzioni Aerospaziali

Ciclo Alterno Simmetrico



Ciclo Alterno Asimmetrico



In definitiva, riassumendo, possiamo scrivere che, per gli acciai, il limite di resistenza a fatica equivale a: $\sigma_{pulsante}=1,5\ \sigma_{alternata}$

e, in mancanza di dati sperimentali, per una sollecitazione normale, la

Tensione Ammissibile a Fatica

$\sigma_{amf}=\sigma_{ams}\ (2/3+(1/3\ \sigma_{min}/\sigma_{max}))$

e vale pure per le sollecitazioni tangenziali

Se $\sigma_{min}=\sigma_{max}$ la sollecitazione è statica, infatti, $\sigma_{amf}=\sigma_{ams}$

Per le sollecitazioni a fatica pulsante dallo zero con $\sigma_{min}=0$

Si ha, $\sigma_{amf} = 2/3\ \sigma_{ams} = 0,66\ \sigma_{ams}$

Per le sollecitazioni a fatica alternata con $\sigma_{min}=-\sigma_{max}$

Si ha, $\sigma_{amf} = 1/3\ \sigma_{ams} = 0,33\ \sigma_{ams}$

Per la Tensione Tangenziale Ammissibile a Fatica Pulsante

Si ha, $\tau_{amf} = 2/3\ (\sigma_{ams}/\sqrt{3}) = 0,38\ \sigma_{ams}$

Per la Tensione Tangenziale Ammissibile a Fatica Alternata:

$\tau_{amf} = 1/3\ (\sigma_{ams}/\sqrt{3}) = 0,19\ \sigma_{ams}$

Le Sollecitazioni Semplici

Trazione e Compressione

È il caso di una trave rettilinea a sezione costante in equilibrio sotto l'azione di una forza assiale " N" di trazione coincidente con l'asse geometrico del solido tendente ad allungare le fibre di Δl (ε = allungamento relativo) con conseguente traslazione delle sezioni trasversali lungo l'asse longitudinale (nel caso di compressione bisogna aggiungere il segno meno).

Secondo la legge di Hooke, detta anche di proporzionalità, fra tensioni e deformazioni: $\sigma = E\varepsilon$

Ma le tensioni interne assumono lo stesso valore per tutti i punti della sezione S di area A, si ha $\sigma = N/A$

e l'allungamento relativo, $\varepsilon = \Delta l/li = lf - li/li$ (lunghezze finali e iniziali)

Sostituendo si ha, $\sigma = E\,\Delta l/li$ e, siccome, $N/A = E\,\Delta l/li$ si ha

$\Delta l = N\,li/EA$ (EA è la rigidezza a trazione)

(E=Modulo di elasticità normale o di Young esso è la qualità del materiale [N/mmq])

Quindi, ricavato dalla $\sigma = N/A$ il valore massimo della tensione "σ_{max}"
e assumendo la Tensione Ammissibile Statica "σ_{ams}" o Carico di Sicurezza,
dovrà essere $\sigma_{max} \leq \sigma_{ams}$ (**Equazione di Stabilità**)
valida sia per i calcoli di progetto che di verifica.

Nei calcoli di progetto si pone $N/A \leq \sigma_{ams}$
dove $\sigma_{ams} = R_m/g_r$ o R_s/g_s
(a secondo se riferita alla rottura o allo snervamento)

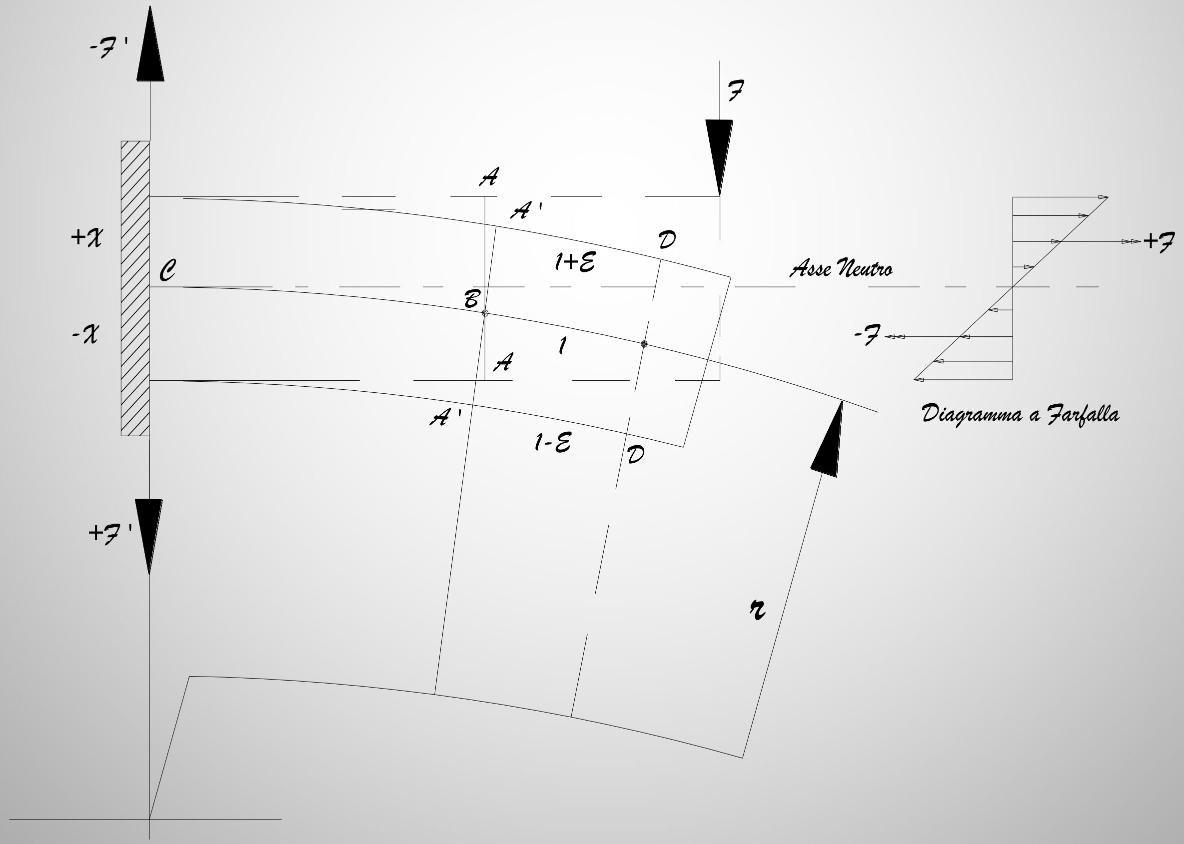
Quindi, l'area della sezione $A = N/\sigma_{ams}$
e stabilita la forma si calcola la sezione
(ad esempio, se circolare si calcola il diametro, se quadrata, il lato)

Per la verifica si ricalcola con la $N/A \leq \sigma_{ams}$,
introducendo nella formula l'area, appena trovata, e la forza data.

Sollecitazione a Flessione

Una trave è soggetta a flessione quando è incastrata ad un estremo ed è sollecitata da una forza sull'altro.

La forza "F", traslata nel punto "C", da una coppia di rotazione, giacente nel piano passante per il suo asse, equilibrante.



L'effetto della coppia incurva la trave mettendo
in ruotare le sezioni trasversali.

Le fibre superiori all'asse neutro, che non subisce variazioni, si allungano mentre quelle inferiori si accorciano.

Consideriamo le due sezioni A'-A' e D-D a distanza unitaria, dopo la deformazione l'asse neutro varrà 1, mentre le fibre superiori varranno $1+\varepsilon$ e quelle inferiori $1-\varepsilon$.

Per le fibre tese: $(1+\varepsilon)/1=(r+x)/r > (1+\varepsilon)r=(r+x)1 > \varepsilon r=x$

$$\varepsilon=x/r$$

Lo stesso vale per le fibre compresse, quindi, gli allungamenti e gli accorciamenti delle fibre sono direttamente proporzionali alla loro distanza dall'asse neutro e inversamente proporzionali al raggio di curvatura.

Moltiplicando o l'allungamento o l'accorciamento unitario per il Modulo di Elasticità Normale "E" del materiale si ha: $\sigma = E\varepsilon > \sigma = E\,x/r$

che possiamo scrivere come, $\sigma = E/r\ x$

Siccome, E ***dipende dal materiale, r dalla deformazione***

si può affermare che le sollecitazioni unitarie, in una trave soggetta a flessione, sono direttamente proporzionali alla loro distanza dall'asse neutro.

Osservando il Diagramma a Farfalla della distribuzione delle sollecitazioni interne si evidenzia che le risultanti +F' e –F', equidistanti dall'asse neutro, formano una Coppia di Rotazione di Momento, detto Momento Resistente, $Mr = E/r\,I$

dove "I" è il Momento Quadratico di Superficie della sezione rispetto all'asse neutro.

Per l'equilibrio sarà $Mf = Mr = E/r\ I$ *(Equazione di deformazione Elastica alla Flessione)*

per arrivare al calcolo del Raggio di Curvatura, $r = EI/Mf$

L'equazione di stabilità a flessione si ottiene moltiplicando i membri per "x" per ottenere: $Mf\ x = \sigma\ I$

$\sigma = Mf(x/I)$ *ma* $I/x = Wf$ *(Modulo di resistenza a Flessione)* e si ottiene la formula canonica

$\sigma_{max} = Mf / Wf$

Nei calcoli di progetto si pone $\sigma_{max} \leq \sigma_{ams}$

$Mf / Wf \leq \sigma_{ams}$

è riferita al punto più lontano dall'asse neutro e non importa se si trova sopra o sotto l'asse.

Bisogna stare molto attenti quando il materiale non risponde allo stesso modo a trazione e compressione, tipo la ghisa e il cemento armato, perché, in questo caso necessita una verifica sia per le fibre superiori che per quelle inferiori. Ed è consigliabile, per far lavorare al meglio il materiale, utilizzare sezioni non simmetriche con la sezione più grande reagente al carico maggiore.

Per la verifica si usa: $Wf \geq Mf / \sigma_{ams}$

e da Wf si ricavano le dimensioni della sezione,

per la sezione rettangolare, ad esempio, è $Wf = bh^2/6$

e per quella circolare, $Wf = \pi\, d^3/32$

Sollecitazione a Taglio

Si verifica questa sollecitazione quando la forza tende a recidere la trave, si ha scorrimento netto tra le sezioni adiacenti, è un cesoiamento.

Il taglio è sempre accompagnato dal momento flettente che, se è minimo, si trascura.

La trave risponde all'azione esterna con le Tensioni Tangenziali (τ) di segno opposto allo sforzo sostenuto.

Quindi, St = T*l*/GA

St è lo scorrimento subito dalla sezione A rispetto a quella adiacente distante *l* a causa della forza "T", G è il Modulo di Elasticità Tangenziale che per i materiali metallici vale 2/5E [N/mmq]

La Tensione Tangenziale o Sollecitazione Unitaria di Taglio

τ = T/A

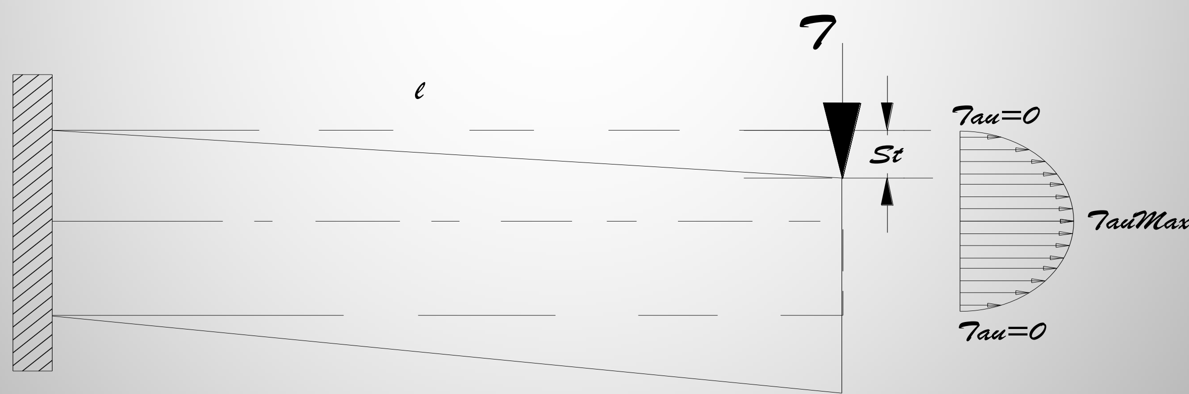
La trave deve essere "tozza" (corta e larga) per poter trascurare l'effetto della flessione, le sezioni nonostante lo scorrimento St devono mantenersi piane. E, per la legge di Hooke,

la relazione tra scorrimento e tensioni tangenziali si esprime come:

τ = G S e con S = St/l si ha St = Tl/GA che è quella di partenza.

Per il calcolo di progetto e verifica: $\tau_{max} \leq \tau_{ams}$

con $\tau_{ams} = \sigma_{ams}/\sqrt{3} = 0{,}577\ \sigma_{ams}$, già incontrata.



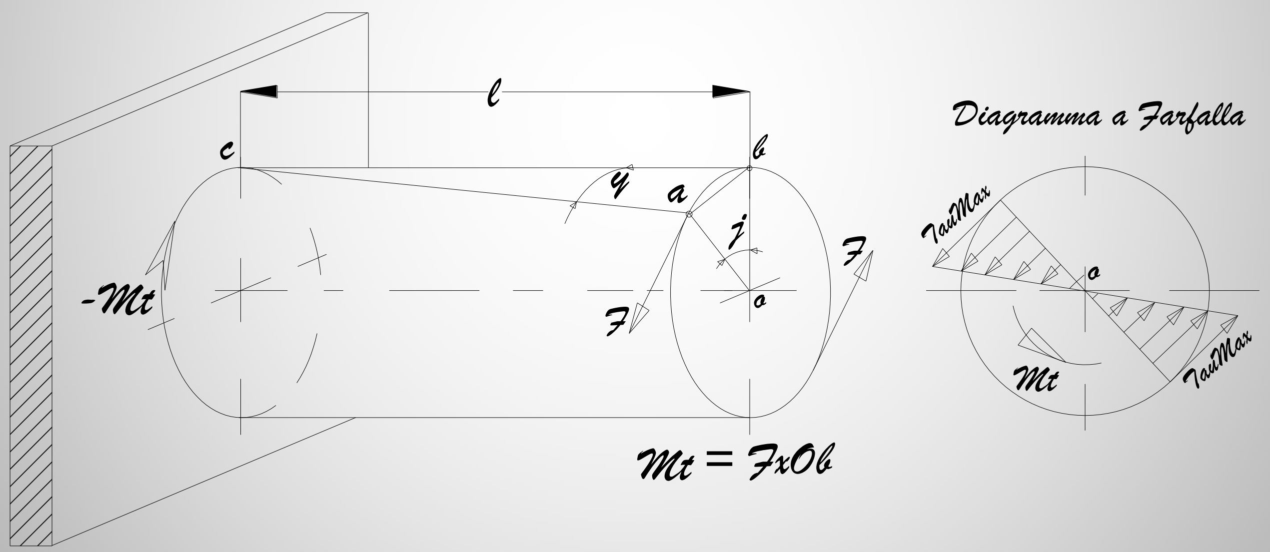
La figura evidenzia la Tensione Tangenziale (tau):
Massima sull'asse neutro e Nulla ai bordi estremi.
È proprio il contrario della Sollecitazione di Flessione.
Ciò comporta una certa attenzione in presenza di travi sollecitate
sia a Flessione che a Taglio perché, in questo caso,
è necessario verificare la sezione in corrispondenza dell'asse neutro
a flessione e la sezione sulle fibre esterne a taglio.

Sollecitazione a Torsione

Gli organi meccanici, per la maggior parte, sono sollecitati a torsione.
Si ha torsione nell'albero, si preferisce parlare di alberi più che
di travi per ovvi motivi, quando la risultante delle forze esterne applicate è
una coppia agente sul piano di una sezione trasversale.
Le sezioni contigue ad essa, ruotano intorno all'asse dell'albero e
scorrono nel senso della coppia torcente.
Le generatrici torcendosi si tendono configurandosi a eliche,
solo l'asse neutro non subisce deformazioni e le fibre
più sollecitate sono quelle più periferiche.
In figura è il caso di una trave a mensola in cui uno degli estremi è
incastrato per cui risponde con un momento uguale e contrario al momento
applicato all'altro estremo libero, i momenti torcenti sono
costanti lungo tutta la trave.

Consideriamo il tratto "l", la sezione libera ruota rispetto all'altra fissa di un angolo "j ", detto angolo di torsione, esso è tanto più grande quanto maggiore e la distanza tra le sezioni.

La fibra "c-b" rispetto alla "c-a" subisce una deformazione angolare "y" che è lo scorrimento pari a: ab/l



Le fibre longitudinali sono soggette, quindi, solo allo scorrimento "γ" e non subiscono sensibili variazioni di lunghezza (ε), né hanno tensioni normali (σ), hanno però le Tensioni Tangenziali (τ) che agiscono nel piano della sezione e sono massime in periferia e nulle al centro (diagramma a farfalla).

Secondo la legge di Hooke, $\tau = G\gamma$ fino ad arrivare alla

$$M_t = G\, j/l\ I_p \;>>\; j = M_t\, l/G I_p$$

(I_p è il Momento Quadratico Polare della sezione rispetto al centro)

Tralasciando i passaggi matematici: $\tau_{max} = M_t\,(d/2)/I_p$

e ponendo il Modulo di Resistenza a Torsione, $W_t = I_p/(d/2)$ si ha:

$\tau_{max} = M_t/W_t$ che è l'Equazione di Sollecitazione a Torsione

Per il calcolo di progetto e verifica: $\tau_{max} \leq \tau_{ams}$

con $\tau_{ams} = \sigma_{ams}/\sqrt{3} = 0{,}577\ \sigma_{ams}$ e $W_t = M_t/\tau_{ams}$, già viste.

Sollecitazionei Composte, Tensioni Interne

In pratica gli organi di una struttura o di una macchina
sono assoggettati a più azioni concomitanti e le tensioni interne, per
l'equilibrio, devono bilanciare l'effetto complessivo.
Quando su un corpo agiscono tensioni dello stesso tipo,
si ricorre al, già visto, principio di sovrapposizione degli effetti.
Cioè, nella sezione in cui agisce la forza assiale "N"
e il momento flettente "Mf" che attivano, perpendicolarmente
al piano della sezione e parallelamente ad essa,
le σ (Sigma, Tensioni Normali), esse si sommano nella tensione risultante.
Così è anche per il taglio "T" e il momento torcente Mt che azionano
nel piano della sezione le τ (Tau, Tensioni Tangenziali).
Invece, quando le tensioni σ e τ agiscono insieme e contemporaneamente
nei loro piani (Es.N+Mt o N+T o Mf+Mt o Mf+T)
si ha uno stato biassiale o bidimensionale di tensione.

In questo caso si adotta la σ_{ideale} che, comunque, è una tensione monoassiale: $\sigma_{id} = \sqrt{(\sigma^2 + 3\tau^2)}$

e, le equazioni di stabilità già viste, diventano:

$\sigma_{id} \leq \sigma_{ams}$ (statica) e $\sigma_{id} \leq \sigma_{amf}$ (a fatica)

Trazione (compressione) e Flessione: $\sigma_{max} = \sigma_N \pm \sigma_f = \pm N/A \pm Mf/Wf$

Taglio e Torsione: $\tau_{max} = \tau_T \pm \tau_t = \pm 4/3(T/A) \pm Mt/Wt$

Trazione (compressione) e Torsione: $\sigma_{id} = \sqrt{(N/A + 3\,Mt/Wt)}$

Flessione e Torsione: $\sigma_{id} = \sqrt{(Mf/Wf)^2 + 3(Mt/Wt)^2} = \sqrt{(Mf/Wf)^2 + 3(Mt/4Wf)^2}$

con $Wt = 2Wf$ e (Momento Flettente Ideale) $Mfid = \sqrt{Mf^2 + 3/4\,Mt^2}$ si ha:

$\sigma_{id} = \sqrt{Mfid/Wf} \leq \sigma_{ams}$ **attenzione è meglio** $\leq \sigma_{amf}$

Infatti, nel caso di flesso-torsione, le fibre, ogni mezzo giro dell'albero, sono sottoposte alternativamente e simmetricamente a trazione e a compressione, creando il fenomeno "insidioso" della fatica che porta a rottura il sistema.

Sempre nel caso della flesso-torsione si segnala **la formula di Pomini**, pratica e approssimata ma molto utile almeno in prima analisi, per il calcolo del Momento Flettente Ideale:

$Mfi = Mf + 0{,}2\ Mt$ per $Mf > Mt$ e

$Mfi = 0{,}6\ (Mf + Mt)$ per $Mf < Mt$

Travi Caricate di Punta

Una trave o un pilastro, lungo e snello, soggetto a compressione, anche baricentrica, se tende a inflettersi lateralmente è in “presso-flessione”.
In questo caso si genera un Momento Flettente Esterno “Me=Pe”che incurva il pilastro di un’eccentricità “e”, distanza tra la retta d’azione del carico di punta “P” (A-B) e l’asse della deformata in mezzeria, detta anche freccia, come nella figura seguente.
Le tensioni interne al pilastro reagiscono con un Momento Flettente Interno “Mi” che vorrebbe riportare il pilastro nella configurazione rettilinea iniziale.
L’equilibrio è Instabile se Me>Mi, Stabile se Me<Mi,
Indifferente se i momenti sono uguali e, in questo caso, esiste un valore della forza di compressione, detto Carico Critico, che lo porta al collasso.
Quindi, l’inflessione laterale del pilastro, inizia, spontaneamente, nello stato d’equilibrio indifferente non solo per i difetti interni o per il disassamento del carico ma anche per leggeri aumenti del valore del carico critico.

Il dimensionamento delle travi o dei pilastri caricati di punta si effettua con le formule empiriche di Eulero, di Rankine e con il Metodo Omega.

Formula di Eulero (Matematico del XVIII sec.)

Il Carico Critico che corrisponde a Me=Mi è

$$F_c = \pi^2 E I_{min} / l_o^2$$

F_c: Carico Critico capace di produrre un principio di deformazione [daN]

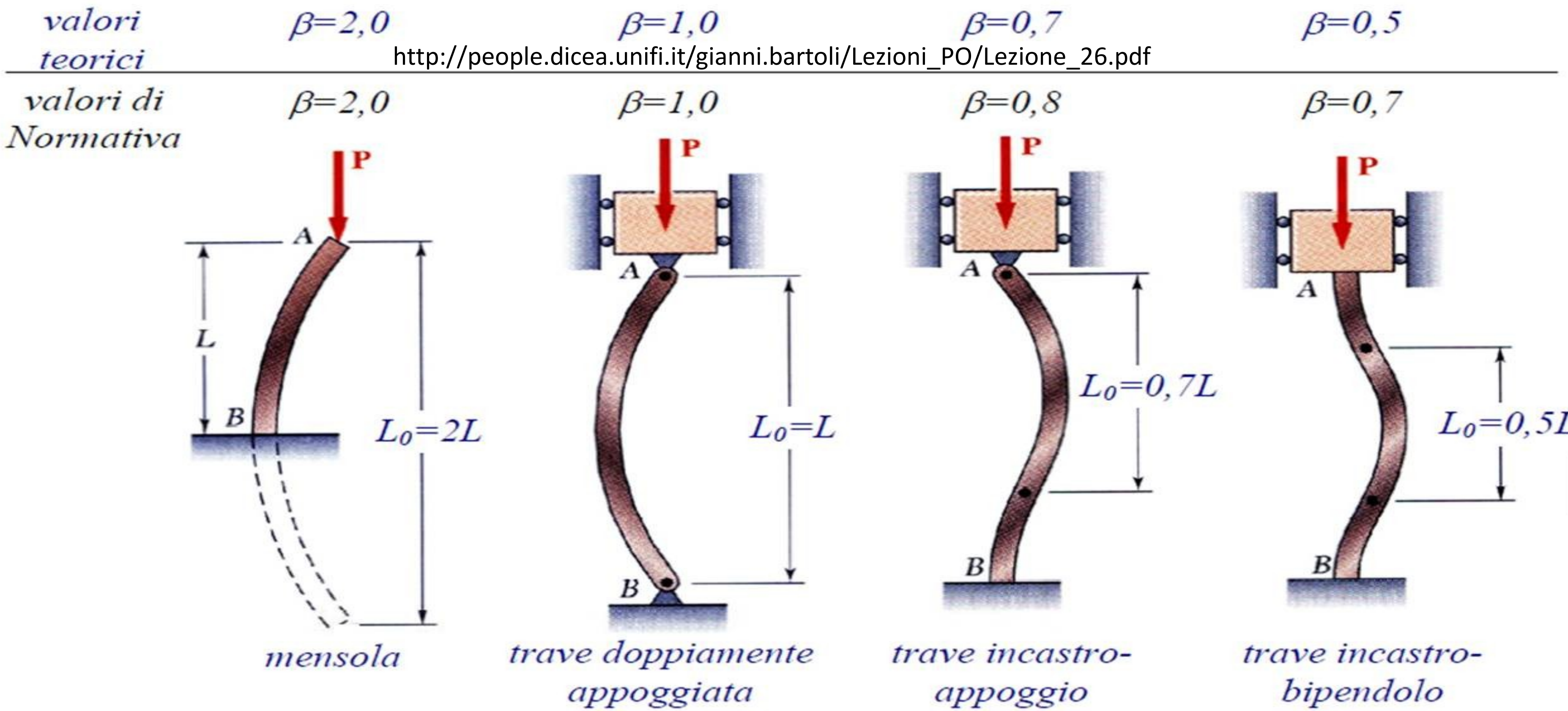
E: Modulo di Elasticità Longitudinale del materiale [daN/mm²]

I_{min}: Momento Quadratico Minimo della sezione trasversale rispetto all'asse neutro [mm²]

l_o: Lunghezza Libera d'Inflessione, dipende dai vincoli.

Il Carico di Punta ($F=F_c/m$) che il solido può sopportare, in condizioni di sicurezza, deve essere inferiore a F_c per cui "m" (coefficiente di sicurezza) assume valori alti, specialmente per sollecitazioni dinamiche.

http://people.dicea.unifi.it/gianni.bartoli/Lezioni_PO/Lezione_26.pdf



Definito il carico si affrontano le Tensioni Critiche:

$$\sigma_{cr} = F_c / A = \pi^2 E I_{min} / A\, l_o^2, \text{ per } I_{min} = A\, z^2_{min}$$

segue (Raggio d'Inerzia) $z_{min} = \sqrt{I_{min}/A}$

$$\sigma_{cr} = \pi^2 E / (l_o / z_{min})^2$$

Sia, $\lambda = lo/z$ il Rapporto di Snellezza, si ha:

$$\sigma_{cr} = \pi^2 E / \lambda^2$$

Quindi, la tensione critica è funzione della snellezza "λ" e della caratteristica meccanica "E" che varia in funzione dell'iperbole di Eulero. Inoltre, bisogna adottare sezioni cave per avere grandi valori di "I", con area modeste. Meglio sezioni circolari cave e a cassone, a scapito dei profilati.

Infine, utilizzare acciai comuni, piuttosto che ad alta resistenza più costosi, perché il carico critico non dipende dal carico di rottura Rm del materiale ma da "E" che è uguale per tutti gli acciai.

e per la stabilità: $\sigma = \sigma_{cr}/m = \pi^2 E / m \lambda^2$

con m = coefficiente di sicurezza già visto.

Applicabilità

(Eulero) 105 ≤ λ (Rankine) ≤ 75 (compressione semplice) per gli acciai

(Eulero) 100 ≤ λ (Rankine) ≤ 45 (compressione semplice) per i legnami

(Eulero) 80 ≤ λ (Rankine) ≤ 35 (compressione semplice) per la ghisa

Formula di Rankine

$F = N/A \leq \sigma_{ams}/1+a\,\lambda^2 = \sigma_{amp}$ (Tensione Ammissibile a Carico di Punta)

N/A: Compressione Semplice

σ_{ams}: Tensione Ammissibile a Compressione Semplice

F: Carico Massimo sopportabile in condizioni di sicurezza [N]

a: Coefficiente Numerico che dipende dal materiale, invece dovrebbe dipendere dal rapporto di snellezza

Metodo Omega

$\sigma_w = N/A = \sigma_{ams}/w \;>>\; w\,N/A \leq \sigma_{ams}$

Prevede l'applicazione della comune equazione di stabilità alla compressione con il coefficiente numerico "w>1", variabile in relazione alla natura del materiale, alla snellezza della trave e al grado di sicurezza.

Infine,

gli argomenti non si esauriscono qui, ma saranno ripresi
con le esercitazioni scritte e pratiche, specifiche sui temi trattati,
da svolgere in classe durante l'orario scolastico.
Gli esercizi completeranno la lezione con i richiesti approfondimenti,
previo la lettura di tabelle e diagrammi specifici dei costruttori,
la consultazione del Manuale di Meccanica e le riflessioni
sul libro di testo e, all'occorrenza, ricerche su internet,
senza limitare, ovviamente, la frequenza dei laboratori.
Le lezioni frontali e i compiti in classe arricchiranno ulteriormente
la trattazione, anche se, ulteriori approfondimenti,
esulano dalla presente trattazione.