

PROGETTAZIONE MECCANICA CON SIMULATION

Informazioni di base

Che cos'è SIMULATION?

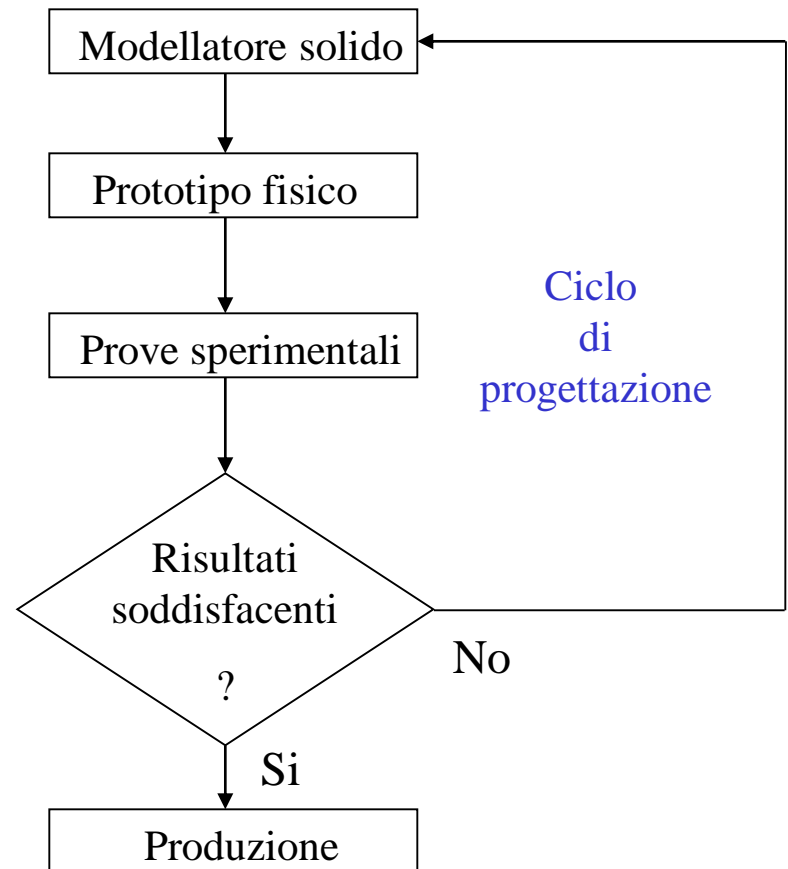
- SIMULATION è un software per sviluppare progettazioni essenzialmente meccaniche completamente integrato col modellatore solido SOLIDWorks
- SIMULATION comunque permette di utilizzare modelli solidi di singole parti e/o complessivi prodotti anche con altri modellatori (es.: ThinkDesign) purché i modelli siano esportati in formato IGES o STEP

Che cos'è SIMULATION?

- SIMULATION permette di eseguire calcoli strutturali relativamente al modello solido in fase di sviluppo
- Può quindi aiutare a rispondere a domande del tipo: quanto sicuro, efficiente ed economico è il progetto che si sta elaborando?

ITER DI PROGETTAZIONE TRADIZIONALE

- Si utilizza un modellatore solido per produrre un modello virtuale del sistema da costruire
- Si costruisce un prototipo fisico del modello virtuale
- Si sottopone il prototipo fisico ad una serie di prove sperimentali che simulano le effettive condizioni di utilizzazione (solitamente è necessario l'uso di una apposita strumentazione)
- In funzione dei risultati sperimentali ottenuti, si modifica il modello virtuale, si costruisce un altro prototipo fisico in accordo con quello virtuale appena definito, si ripetono le prove sperimentali e si prosegue con questo ciclo fino a quando i risultati della sperimentazione sono considerati soddisfacenti



Benefici dell' analisi

- L' analisi riduce il numero di cicli di progettazione (che sono dispendiosi sia economicamente e sia temporalmente)
- L' analisi riduce il costo con simulazioni numeriche applicate al modello solido virtuale riducendo il numero di test sperimentali necessari (è ridotto il numero di cicli di progettazione)
- L' analisi riduce il time to market
- L' analisi può favorire l' ottimizzazione del progetto simulando varie soluzioni progettuali e scenari di utilizzo prima di intraprendere scelte di progetto definitive

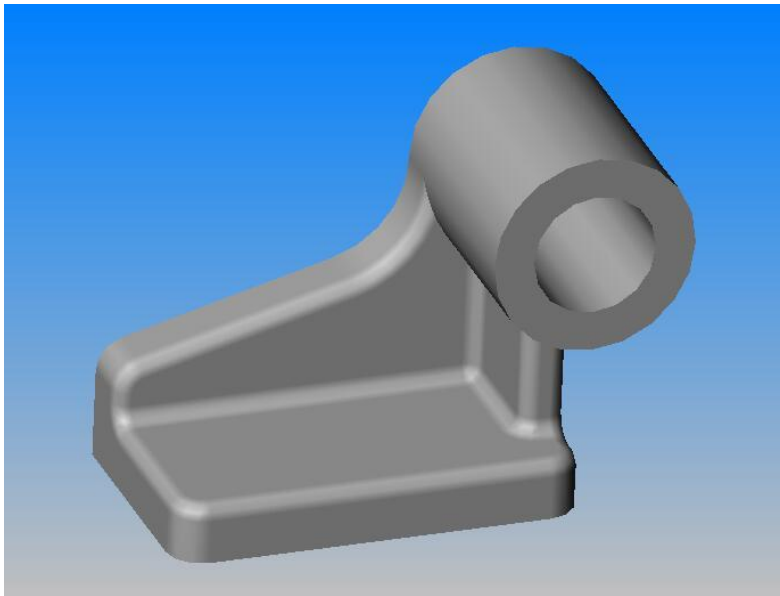
Il metodo degli elementi finiti

(FEM, Finite Element Method)

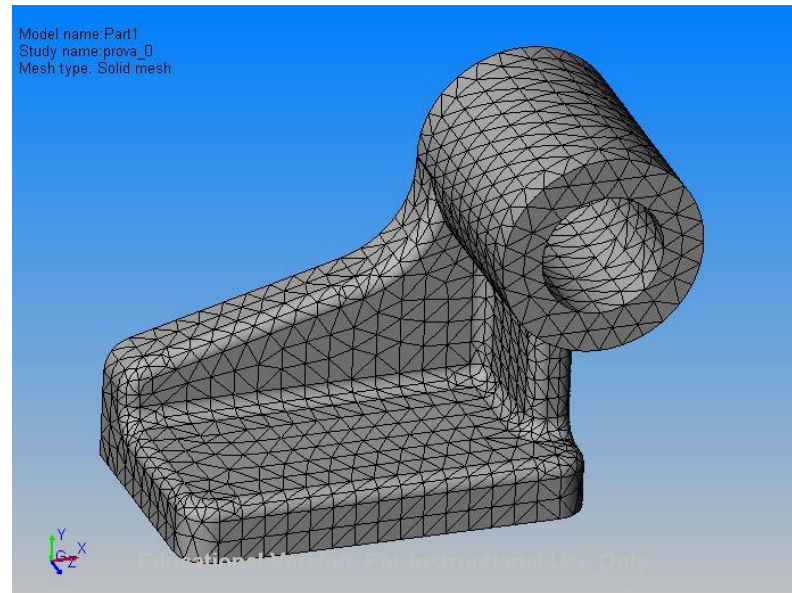
- Le soluzioni analitiche sono disponibili solo per problemi semplici. Inoltre tale soluzioni molto spesso si basano su ipotesi che nella realtà pratica non sono rispettate
- SIMULATION usa il metodo degli elementi finiti. L'analisi che utilizza tale metodo è detta anche Analisi agli elementi finiti o FEA (Finite Element Analisis)
- La FEA è molto generale. Può essere usata per risolvere problemi anche molto complessi per i quali non è possibile individuare una soluzione analitica
- La FEA è adatta ad essere implementata sui moderni calcolatori. E' universalmente riconosciuto che la FEA rappresenta il metodo di analisi più diffuso

Concetti principali nell' analisi di progetto FEM

- Con il metodo degli elementi finiti la risoluzione di un problema complesso viene ricondotto alla soluzione di molti problemi più semplici. Il modello virtuale è suddiviso in piccole parti di forma semplice denominate “elementi finiti”



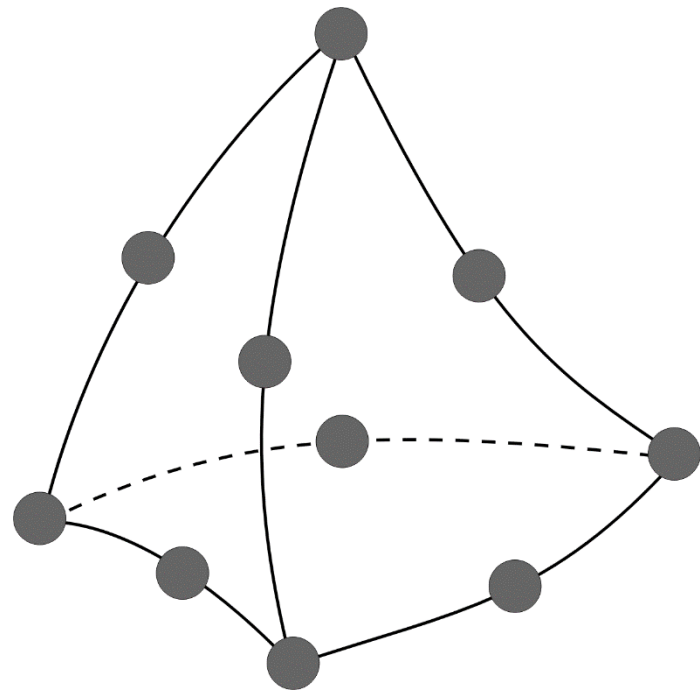
Modello CAD



Modello CAD suddiviso in elementi finiti

Concetti principali nell' analisi di progetto FEM

- Gli elementi, detti appunto elementi finiti, sono caratterizzati dalla presenza dei nodi. Le forze che sollecitano il modello virtuale così discretizzato si trasmettono da un elemento all' altro solo attraverso questi nodi che collegano tra loro gli elementi stessi



Elemento tetraedrale di tipo parabolico a 10 nodi

Concetti principali nell' analisi di progetto FEM

- Il comportamento di questi elementi, in termini di deformazione indotta dallo spostamento dei nodi provocato in generale dalle azioni applicate all' elemento i -esimo dagli elementi adiacenti è stato molto ben studiato ed è ben noto
- Il sistema di forze esterne che sollecita il sistema reale è quindi applicato al modello agli elementi finiti attraverso i nodi degli elementi stessi. E' quindi calcolato lo stato di tensione/deformazione nei singoli elementi che approssima quanto accadrebbe nel sistema fisico reale
- Lo spostamento di ciascun nodo è quantificato in termini di traslazione lungo direzioni x , y e z di un sistema cartesiano ortogonale. Queste traslazioni definiscono i gradi di libertà del nodo (DOF, Degrees of Freedom). Ogni nodo, evidentemente assimilato ad un punto nello spazio, ha 3 DOF

Concetti principali nell' analisi di progetto FEM

- Nei software di analisi strutturale del tipo di SIMULATION sono programmate le equazioni di equilibrio di ciascun nodo rispettando nel contempo anche la connettività tra tutti gli elementi finiti in cui si è discretizzato il modello solido
- Rispettare la connettività significa che lo spostamento di un nodo di un elemento è identico per tutti i nodi degli elementi adiacenti e connessi all' elemento in questione tramite lo stesso nodo

Concetti principali nell' analisi di progetto FEM

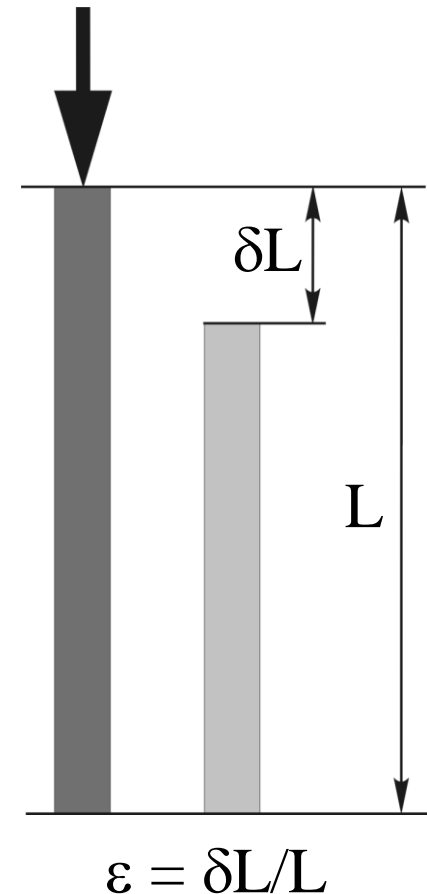
- Nell' analisi di sollecitazione le equazioni di equilibrio dei nodi contengono le incognite, ovvero gli spostamenti dei nodi stessi
- Tutti i coefficienti noti delle equazioni di equilibrio sono calcolati e/o definiti in funzione delle proprietà del materiale, dei vincoli, dei carichi e della geometria del sistema
- I programmi di analisi strutturale FEM costruiscono quindi un sistema algebrico lineare costituito dalle suddette equazioni di equilibrio e lo risolvono nelle incognite rappresentate dagli spostamenti dei nodi

Concetti principali nell' analisi di progetto FEM

- Noti gli spostamenti dei nodi è possibile risalire con facilità alle sollecitazioni che si instaurano nei nodi e anche all' interno di un qualunque punto del singolo elemento finito
- Il numero delle citate equazioni, con le corrispondenti incognite può essere anche molto elevato (possono definirsi centinaia di migliaia o milioni di equazioni) e corrisponde, formalmente, al numero complessivo dei DOF relativo a tutti i nodi con cui si è modellizzato il sistema reale

Concetti principali nell'analisi di progetto FEM

- Nell' analisi statica più semplice il solutore risolve il sistema lineare di equazioni calcolando per ogni nodo le componenti dello spostamento nelle tre direzioni x, y e z
- Quando questi spostamenti sono noti i programmi di analisi strutturale calcolano le deformazioni relative ε lungo varie direzioni per ciascun elemento finito
- Solo a questo punto il programma calcola le sollecitazioni in ciascun elemento finito



Tipi di analisi

Analisi statica o di sollecitazione

- E' il tipo più comune di analisi agli elementi finiti. Solitamente si suppone che il materiale segua la legge di Hooke e si considerano unicamente forze esterne costanti nel tempo
- Si opera quindi in regime sforzi-deformazioni lineare. Tutte le deformazioni sono considerate perfettamente elastiche per cui si suppone il sistema riprenda la forma originaria indeformata non appena i carichi sono rimossi
- Nell' analisi statica i software strutturali, in particolare SIMULATION, calcolano gli spostamenti, le deformazioni relative (opportunamente definite), le sollecitazioni e le forze di reazione

Tipi di analisi

Analisi statica o di sollecitazione

- Le forze di reazione sono sempre presenti perché equilibrano il sistema di forze esterne. I software strutturali prevedono sempre un vincolamento almeno isostatico del sistema sollecitato per evitare la labilità dello stesso
- Se il sistema ha la possibilità di muoversi di moto di corpo rigido la matrice dei coefficienti del sistema algebrico lineare che deve essere risolto nelle incognite spostamenti è singolare e quindi non sussiste la possibilità di ottenere una soluzione

Tipi di analisi

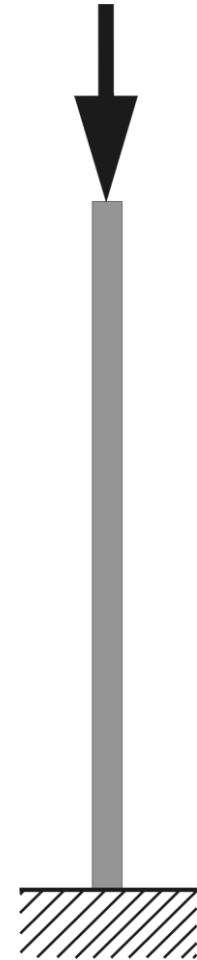
Analisi statica o di sollecitazione

- Alcuni software, tra cui SIMULATION, sono dotati di accorgimenti numerici tali per cui si riesce ad eliminare, in certe condizioni e con certi comandi, la singolarità numerica del problema e quindi è possibile risolvere alcuni problemi in cui sussistono possibili moti di corpo rigido
- Un materiale cede quando la sollecitazione raggiunge certi livelli limiti caratteristici del materiale stesso. Nel caso dell'analisi statica questi limiti sono opportunamente definiti in funzione del carico di snervamento o di quello di rottura

Tipi di analisi

Analisi di instabilità laterale

- Nelle strutture snelle in cui una o due dimensioni prevalgono fortemente sulla terza, in presenza di carichi anche di limitata entità si possono indurre deformazioni laterali così ampie da determinare la rottura del sistema (es.: caso delle aste caricate di punta). Questo fenomeno è denominato buckling
- Anche se i carichi sono ridotti, quando interviene il buckling le deformazioni sono così elevate che le corrispondenti sollecitazioni possono superare il carico di rottura del materiale



Tipi di analisi

Analisi di instabilità laterale

- I moderni software di analisi strutturale, tra cui anche SIMULATION, permettono di calcolare, sempre con la tecnica degli elementi finiti, i valori critici delle forze esterne che dovrebbero indurre l'instabilità laterale

Tipi di analisi

Analisi in frequenza, Modi naturali di vibrazione

- Qualunque sistema meccanico reale, opportunamente eccitato, tende a vibrare più o meno marcatamente con determinate frequenze caratteristiche chiamate frequenze naturali o autovalori del sistema
- In corrispondenza a ciascuna frequenza naturale il sistema si deforma in un modo caratteristico denominato automodo del sistema (mode shape)
- L'analisi in frequenza calcola le frequenze naturali associate agli automodi del sistema

Tipi di analisi

Analisi in frequenza, Modi naturali di vibrazione

- In teoria un corpo reale è caratterizzato da un numero infinito di automodi e quindi di frequenze naturali. Per tale corpo, modellizzato con gli elementi finiti, si definiscono tante frequenze naturali quanti sono i DOF del modello FEM corrispondente
- Nella maggior parte dei casi ha comunque interesse conoscere e calcolare solo alcuni degli automodi del sistema
- I software strutturali FEM, incluso SIMULATION, permettono un rapido calcolo delle frequenze naturali e dei relativi automodi compresi in un certo range di frequenze stabilite dall'utilizzatore del software

Tipi di analisi

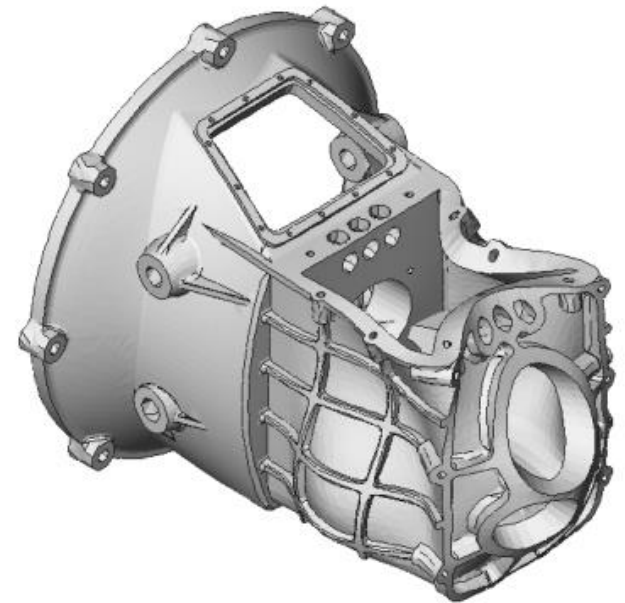
Analisi in frequenza, Modi naturali di vibrazione

- Conoscere le frequenze naturali di un sistema è importante: se le forze esterne variano nel tempo e definiscono frequenze di eccitazioni prossime e/o identiche ad una o più frequenze naturali del sistema si ha la cosiddetta risonanza
- Alla risonanza, se lo smorzamento è ridotto, si crea una situazione in cui il sistema sembra “cedere” via via sempre più nel tempo per cui gli spostamenti dello stesso aumentano progressivamente anche in presenza di forze eccitanti di ampiezza limitata

Tipi di analisi

Analisi in frequenza, Modi naturali di vibrazione

- Conseguentemente via via che il tempo trascorre le forze esterne fanno un lavoro che teoricamente tende sempre più rapidamente ad infinito e quindi viene ceduta sempre più energia al sistema che la incamera soprattutto sottoforma di energia di deformazione
- Si arriva quindi ad un punto tale che l'energia di deformazione del sistema è così elevata, ovvero gli spostamenti sono così grandi, che si supera ogni limite di sollecitazione e la struttura cede



Tipi di analisi

Analisi in frequenza, Modi naturali di vibrazione

- L'analisi in frequenza può quindi aiutare ad evitare fenomeni di risonanza indesiderati o pericolosi
- L'analisi in frequenza fornisce informazioni per risolvere problemi di risposta dinamica della struttura (operando in regime lineare è possibile combinare linearmente le risposte della struttura alle varie frequenze naturali per calcolare la risposta ad un sistema di forze esterne che varia in modo qualunque nel tempo)

Tipi di analisi

Analisi termica

- Si calcola la temperatura in ogni punto del modello noto il flusso di calore in entrata/uscita e le condizioni al contorno del modello stesso (es.: temperatura della superficie)

Tipi di analisi

Analisi di sollecitazione indotta da carico termico

- Differenze di temperatura tra zone diverse di un corpo vincolato o meno possono indurre deformazioni diverse nei vari punti della struttura
- Tale diversità di deformazione e/o vincoli che impediscano la dilatazione/contrazione derivante dal campo di temperature a regime o nel passaggio da una situazione termica ad un' altra inducono uno stato di sollecitazione dipendente direttamente dalla temperatura
- L' analisi di stress termico calcola quindi tali sollecitazioni e gli spostamenti corrispondenti con riferimento, nell'ambito di SIMULATION, ad un modello FEM

Tipi di analisi

Analisi di ottimizzazione

- Si fissa un obiettivo da raggiungere, per es. si desidera variare la forma di un pezzo in modo da minimizzarne il peso
- Si fissano i vincoli dell'ottimizzazione, per es. la massima sollecitazione ideale che non deve essere superata, le dimensioni limiti entro le quali individuare quelle che consentono la minimizzazione desiderata
- Le dimensioni che possono variare entro i limiti suddetti sono denominate variabili di ottimizzazione del progetto
- Il programma ricerca quindi la soluzione che più soddisfa alle condizioni imposte (ottimizzazione vincolata)
- E' ovvio che l'ottimizzazione può riuscire più o meno bene e sta al progettista valutare i risultati ottenuti

Tipi di analisi

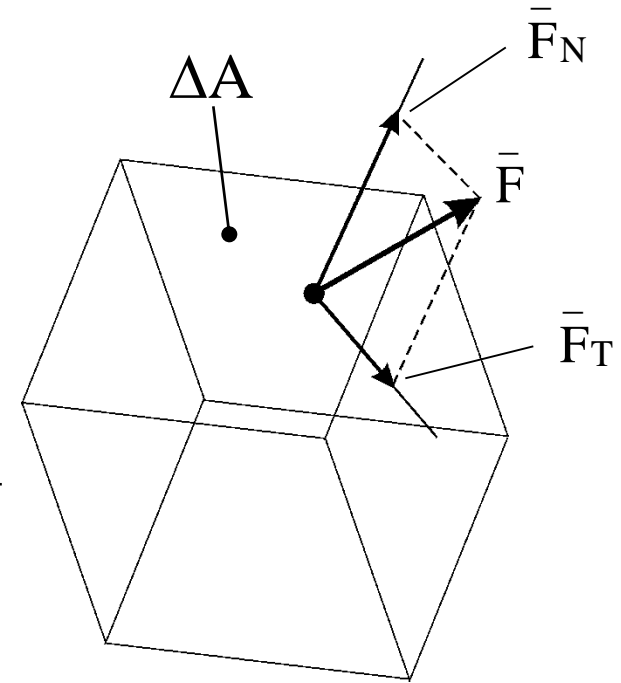
Altri tipi di analisi

- Analisi di sollecitazione non lineare: si deve utilizzare questa analisi quando le ipotesi che permettono di applicare l'analisi di sollecitazione statica lineare non sono più rispettate. Per es., se il materiale non segue la legge di Hooke si deve eseguire un'analisi non lineare
- Analisi della risposta dinamica: a differenza dell'analisi di sollecitazione statica, sono presenti forze d'inerzia che non possono essere trascurate
- Analisi fluidodinamica: è anche chiamata analisi CFD (Computational Fluid Dynamics). Si studia il moto dei fluidi associato o meno ad effetti termici (l'influenza contemporanea della temperatura definisce l'analisi termofluodinamica)
- Analisi elettromagnetica: risolve problemi di natura elettromagnetica (calcolo di campi elettrici, magnetici, forze attrattive-repulsive, ecc.)

Richiami

Le sollecitazioni normali e tangenziali

- Quando a un corpo è applicata una forza esso si deforma e genera delle forze interne che variano da un punto all'altro dello stesso
- Queste forze riferite all'unità di superficie sono denominate sollecitazioni
- Con l'espressione "sollecitazione in un punto di, per es., 50 MPa" si intende l'intensità della forza interna applicata in un punto e riferita ad un intorno di area del punto stesso tendente al valore nullo
- Considerando un volumetto cubico di materiale del corpo e una generica faccia del cubo, la componente \bar{F}_N della forza interna \bar{F} applicata al baricentro di tale faccia lungo la direzione perpendicolare alla faccia stessa definisce una sollecitazione normale $\bar{\sigma}$ quando l'area ΔA della faccia del cubetto tende a zero. In modo analogo, la componente \bar{F}_T , perpendicolare a \bar{F}_N , definisce la sollecitazione tangenziale $\bar{\tau}$



$$\bar{\sigma} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \bar{F}_N / \Delta A$$

$$\bar{\tau} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \bar{F}_T / \Delta A$$

Richiami

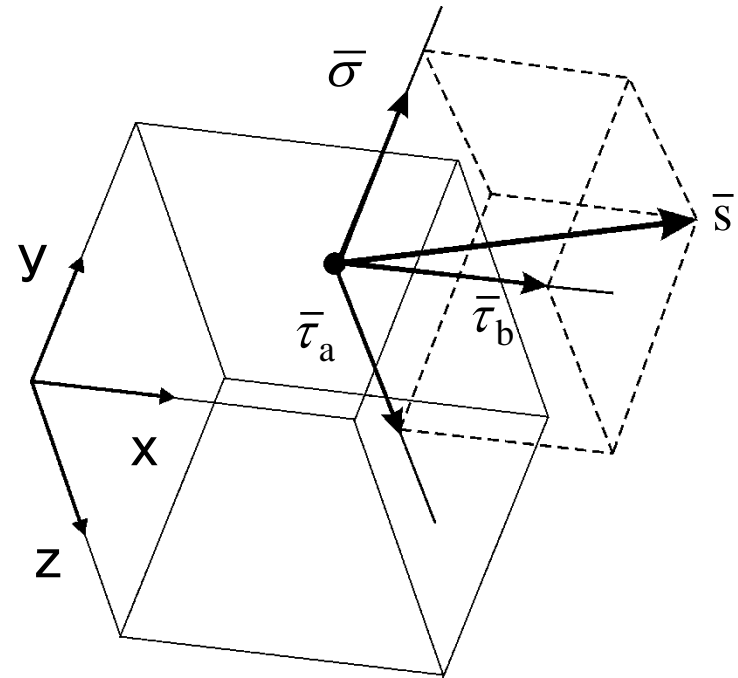
Le sollecitazioni normali e tangenziali

- Poiché la sollecitazione è definita come rapporto tra una forza e un' area e la forza è una grandezza vettoriale anche la sollecitazione è un vettore
- Comunemente però si parla di sollecitazione per es. di 50 Mpa facendo riferimento al valore del modulo del vettore sollecitazione
- In ogni caso si distingue tra sollecitazione normale e tangenziale

Richiami

Le sollecitazioni normali e tangenziali

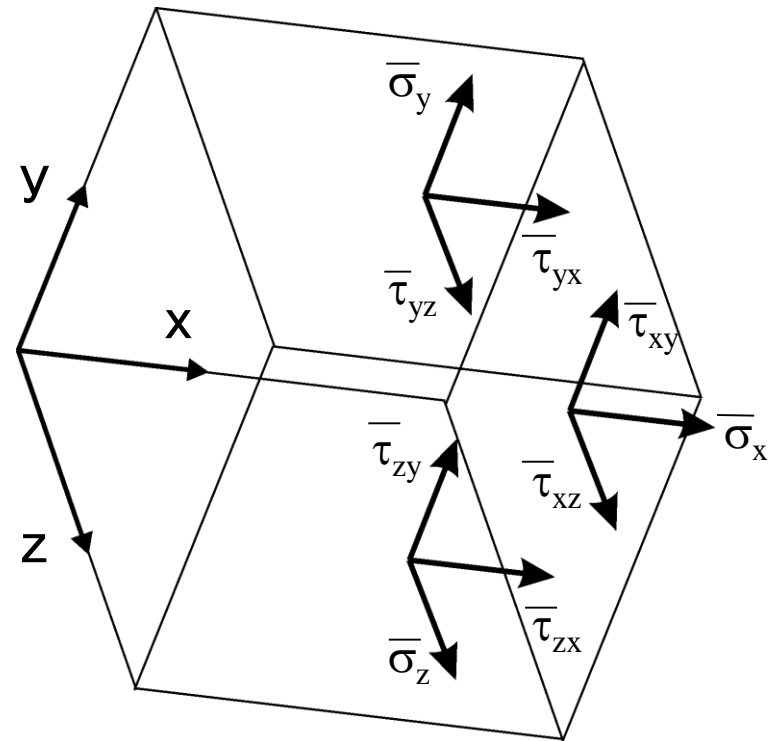
- Lo studio delle sollecitazioni parte dalla teoria dell'elasticità e fa riferimento ad un cubetto di materiale sollecitato da sei forze interne applicate alle rispettive facce nei corrispondenti baricentri
- Il limite tendente a zero delle aree delle facce suddette permette di definire tre sollecitazioni caratteristiche $\bar{\sigma}$, $\bar{\tau}_a$ e $\bar{\tau}_b$ per ciascuna faccia riferite ad un sistema cartesiano ortogonale di riferimento con gli assi disposti lungo tre spigoli concorrenti in un vertice del cubetto stesso



Richiami

Le sollecitazioni normali e tangenziali

- Per l'equilibrio alla rotazione del cubetto infinitesimo attorno ai tre assi baricentrici del cubetto stesso si dimostra che ogni coppia di sollecitazioni $\bar{\tau}$ relativa ad una faccia ha moduli identici e versi opposti a quelli della coppia di sollecitazioni $\bar{\tau}$ associata alla faccia opposta
- Per l'equilibrio alla traslazione del cubetto lungo i tre assi x, y e z risulta inoltre che ogni sollecitazione $\bar{\sigma}$ relativa ad una faccia ha modulo e verso opposto alla $\bar{\sigma}$ associata alla faccia opposta
- Ne deriva che per definire lo stato di sollecitazione del cubetto infinitesimo è sufficiente che siano note solo 6 delle complessive 18 sollecitazioni associate a tutte le sei facce del cubetto, in particolare $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_y$, $\bar{\sigma}_z$, $\bar{\tau}_{xy}$, $\bar{\tau}_{xz}$, $\bar{\tau}_{yz}$



Richiami

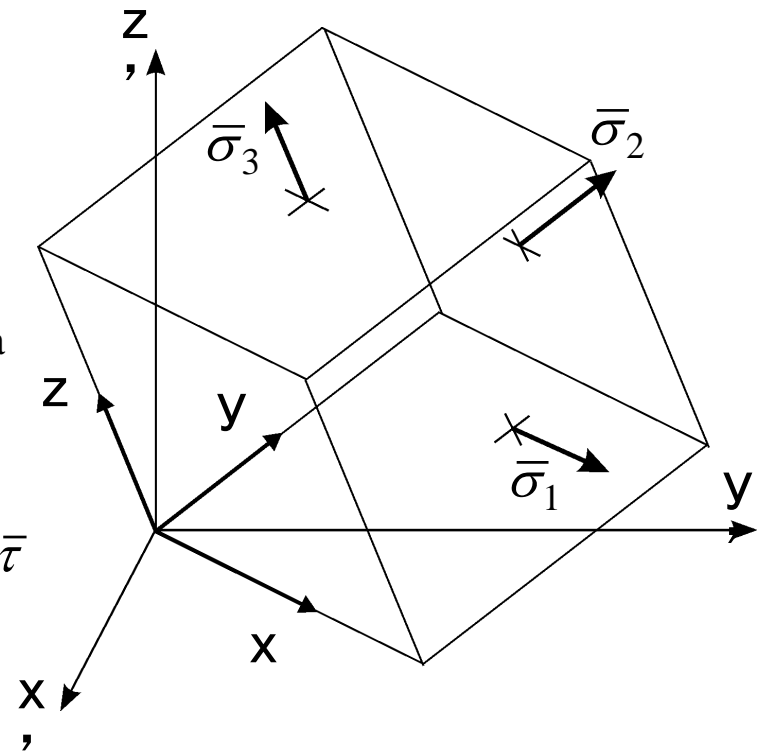
Le sollecitazioni normali e tangenziali

- In particolare, l'origine del sistema cartesiano ortogonale (x,y,z) coincidente con un vertice del cubetto elementare di materiale viene considerata come il generico punto del corpo su cui agiscono le 18 sollecitazioni $\bar{\sigma}$ e $\bar{\tau}$ precedentemente definite
- Naturalmente questo modo di porre le cose è un po' speculativo, ma il cubetto è infinitesimo, cioè le lunghezze dei suoi spigoli tendono a essere o sono praticamente nulle, quindi tutti gli otto vertici del cubetto tendono a coincidere in un solo punto e le origini dei vettori sollecitazione agenti sulle otto facce coincidono o tendono a coincidere in un solo punto, l'origine del sistema di riferimento
- D'altra parte le 18 sollecitazioni sono definite con riferimento alle facce del cubetto che, anche se sono infinitesime, hanno una loro giacitura, per cui ha proprio senso accettare questa speculazione e parlare quindi di sollecitazioni $\bar{\sigma}$ e $\bar{\tau}$ "in un punto" del materiale

Richiami

Le sollecitazioni principali

- Osserviamo ancora però che il cubetto infinitesimo di materiale può essere comunque orientato attorno al vertice scelto come origine del sistema di riferimento i cui assi sono solidali ai tre spigoli del cubetto stesso
- A parità di sistema di forze esterne applicato al corpo in esame ovviamente le forze interne applicate alle facce del cubetto varieranno in funzione dell'orientazione del cubetto (varia la giacitura delle facce)
- Si dimostra analiticamente che per ogni punto del corpo esiste un'orientazione particolare del cubetto tale per cui le sollecitazioni tangenziali $\bar{\tau}$ sulle facce dello stesso si annullano e risultano applicate solo sollecitazioni normali $\bar{\sigma}$
- Queste sollecitazioni normali, ottenute per una particolare orientazione del cubetto, sono denominate sollecitazioni principali $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$ e $\bar{\sigma}_3$



Richiami

Le sollecitazioni principali

- Le direzioni delle sollecitazioni principali sono le direzioni principali di sollecitazione
- In ogni punto del materiale si definiscono le sollecitazioni principali. Se nel punto risulta
 - a) $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\sigma}_3$ tutte $\neq 0 \Rightarrow$ stato di tensione triassiale nel punto
 - b) solo due tra $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\sigma}_3 \neq 0 \Rightarrow$ stato di tensione biassiale nel punto
 - c) solo una tra $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\sigma}_3 \neq 0 \Rightarrow$ stato di tensione monoassiale nel punto
- Dalla conoscenza delle sollecitazioni principali è sempre possibile ricavare le sollecitazioni normali e tangenziali riferite ad un qualunque piano passante per il punto in cui sono note le medesime sollecitazioni principali

Richiami

Criteri di resistenza

- Sono state avanzate differenti teorie, definite criteri di resistenza, sul modo in cui utilizzare le tensioni principali in un punto per poter definire una sollecitazione equivalente confrontabile con quelle ammissibili derivanti da prove sperimentali su provini
- Questa sollecitazione equivalente prende il nome di sollecitazione ideale e viene calcolata a partire dai moduli $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ dotati di opportuno segno delle tensioni principali
- La sollecitazione ideale può essere interpretata come un indice del pericolo di rottura del materiale nel punto
- Per come viene definita, la sollecitazione ideale è una grandezza scalare (un numero reale positivo)
- I vari criteri di resistenza forniscono differenti formulazioni della sollecitazione ideale (una sollecitazione di tipo normale) e sono stati elaborati per tener conto della natura del materiale (per es. fragile o duttile) e anche dello stato di sollecitazione (triassiale, biassiale o monoassiale)

Richiami

Criteri di resistenza: il criterio di Von Mises

- Uno dei criteri di resistenza più utilizzati è quello di Von Mises. E' particolarmente adatto al caso dei materiali duttili quali l'acciaio
- In questo caso la sollecitazione ideale σ_{id} è definita, in termini di sollecitazioni normali e tangenziali (moduli con segno) agenti sulle facce del cubetto elementare, dall'equazione

$$\sigma_{id} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}$$

- In termini di sollecitazioni principali σ_{id} è definita dall'espressione

$$\sigma_{id} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}$$

Intensità della sollecitazione

Stress Intensity

- Questo parametro viene definito come differenza tra i moduli delle sollecitazioni principali massima e minima
- E' utilizzato per definire una sollecitazione ideale nell'ambito di un' altra teoria di resistenza, quella della massima sollecitazione di scorrimento (criterio di Tresca, valido ancora per i materiali duttili)