



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1787A -

ANNO: 2015

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Iannizzi Giada

MATERIA: Progettazione protesi e organi artificiali - Prof.  
Bignardi

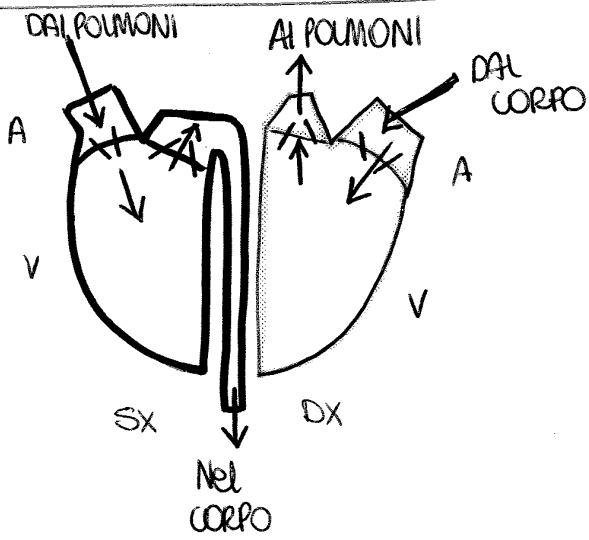
Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

# FUNZIONAMENTO CUORE

(1)



## VALVOLE:

- ATRIO-VENTRICOLARI
  - dx: **TRICUSPIDE**
  - sx: **BISCUSPIDE**
- SEMILUNARI : cuore - resto circolazione

uscita del ventricolo SX (circ. arteriosa)

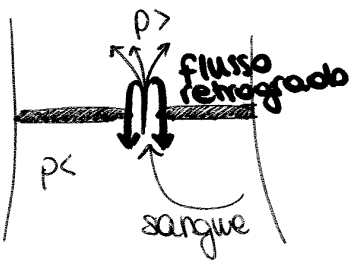
**VALVOLA AORTICA**

uscita del ventricolo DX

**VALVOLA POLMONARE**

## FAUIMENTO delle VALVOLE (ferio / protese):

- **INCOMPETENZA** : durante la diastole i foglietti devono essere chiusi, ma se non lo sono ermeticamente ci sarà flusso retrogrado verso il ventricolo dall'esterno.



- **STENOSI** : inspessimento dei foglietti che causa un restringimento della sez. disponibile al fluido. (sez dell'impianto idraulico in idraulica).

↓ aumenta la RESISTENZA al flusso ↓  
 ↓ aumentano le forze convettive (il cuore deve fare + lavoro)  
 ↓ aumenta Re e può portare alla turbolenza ↓  
 si rompono i GR, si attivano le piastrine che creano micro-emboli che possono arrivare al cervello.

### Ulteriori cause:

- febbri reumatiche: ↑  $\text{Ca}^{2+}$
- difetti congeniti: incompetenza grave
- infezioni batteriche

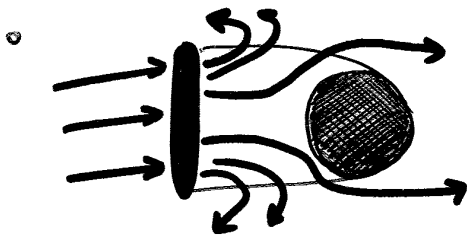
Valvole + affette: MITRALE, AORTICA, TRICUSPIDE.

↓ efficienza. Rimedio
 

- intervento chirurgico (riparazione)
- impianto sostitutivo (sostituto funzionale)

# FLUSSI :

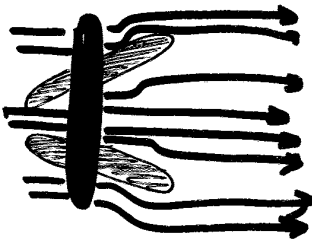
(3)



Flusso lateralizzato molto ≠ dal fisiologico



Flusso ancora lateralizzato



Flusso molto + fisiologico

Esistono valvole biologiche.

Tessuto animale

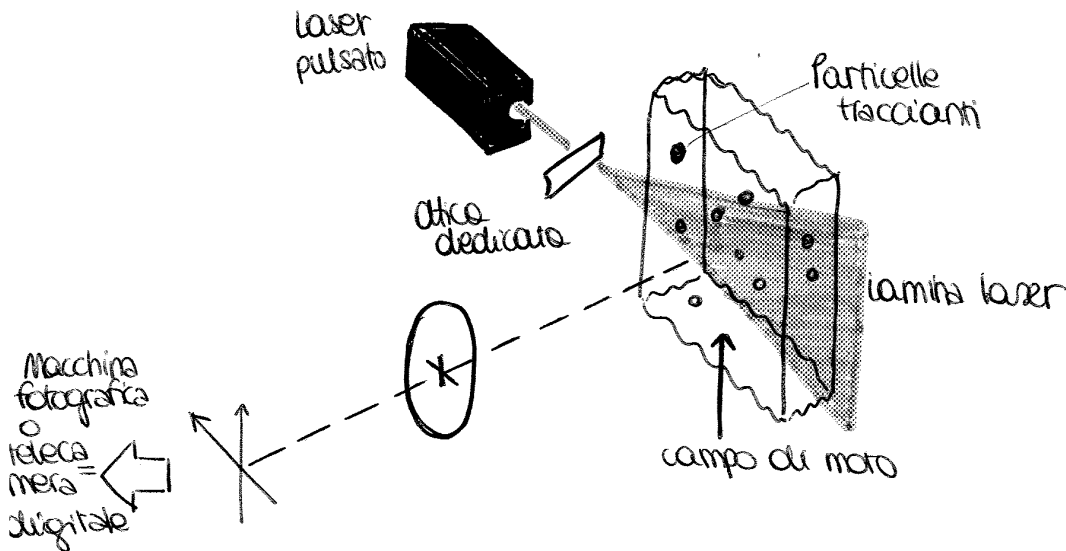
→ stented : supporto metallico

↘ stentless : senza supporto. I foglietti sono cuciti.

Artificiale vs biologico !

## "9 COMANDAMENTI" per la PROGETTAZIONE

- ① Prevenzione emboli : aggregati di masse dovuti ad emodinamica alterata
- ② Lunga durata :
- ③ Semplicità del dispositivo per essere impiantato
- ④ Meno invasivi possibili : non deve lasciare troppi segni dopo l'intervento
- ⑤ Il dispositivo non deve portare alla turbolenza sia per la dissipazione di energia sia per gli sforzi di taglio che possono modificare e distruggere le particelle corpuscolate.
- ⑥ Minimizzazione del danno delle particelle corpuscolate del sangue
- ⑦ Riduzione del rumore dei foglietti. →



↳ a 90° rispetto al campo di moto

↳ [particelle] minima  
cumulativo rumore

↑ # particelle per unità di volume, le immagini si sovrappongono e interferiscono generando il fenomeno di speckle: distribuzione casuale di intensità luminosa prodotta da sovrapposizione e interferenza delle immagini

Misura spostamento medio e quindi velocità media.

Particelle:

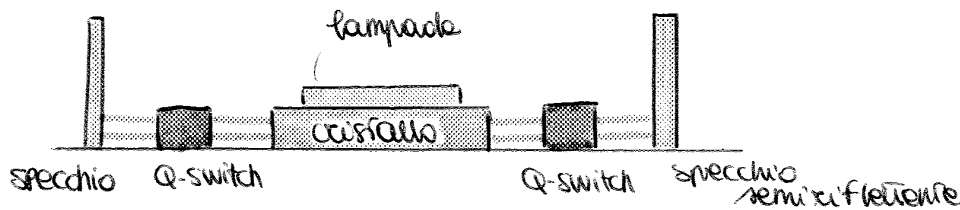
- '800 : fumo
- anni + recenti : latte
- attualmente : silincon carby

### SORGENTE LUMINOSA

Si eccitano dei modi in una cavità e fin tanto che sono eccitati si amplificano fino a produrre un fascio collimato con spot gaussiano. Devo produrre una LAMA → Ottica dedicata.

2 tipi di sorgente:

- LASER CONTINUO CON OTTURATORE MECCANICO: l'inerzia dell'otturatore era alta e i  $\Delta t$  troppo brevi non venivano colti. Non era in grado di emettere una potenza elevata per tutto il tempo.
- LASER PULSATO: fornisce alta E per brevi  $\Delta t$  in modo ripetuto. Cicli successivi ripetuti.



Lampade eccita il cristallo, si instaura flusso di fotoni tra Q-switch (interruttore ad altissima precisione che si apre per valori di  $\Delta t$   $\approx$  secondi) e specchio semiriflettente. Se la cavità ha una lunghezza ben definita, si dice che la dimensione della cavità stessa è risonante. Lampade ha emissione di tipo gaussiano. A  $t^*$  ha intensità max ed

- o coppia di immagini
- o calcolo della trasformata di Fourier
- o immagini nel dominio della freq
- o faccio prodotto delle trasformate
- o antitrasformata per ottenere il dominio del tempo.

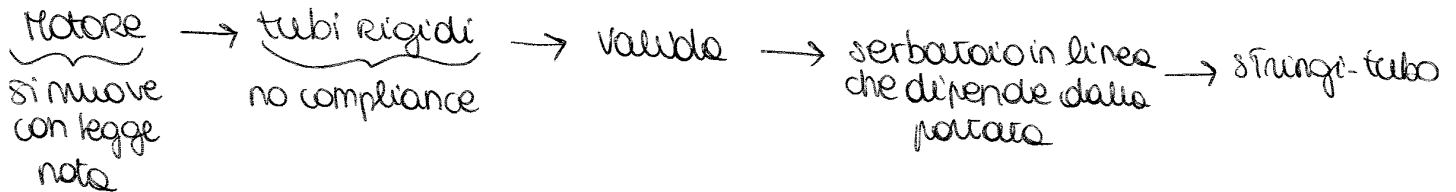
## Applicazioni PIV per protesi valvolari

Replicare le condizioni di lavoro che la valvola incontrerà.

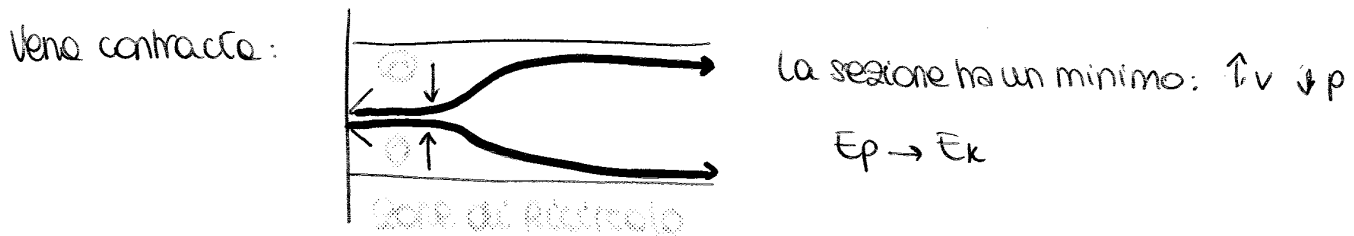
Forma d'onda e carico meccanico ( $\nabla P$ )  $\approx$  alle condizioni fisico.

Impedenza meccanica : Inertanza, capacità / conduttanza, resistenza  
 serbatoio chiuso con fluido e aria. Effetto capacitivo  
 stringi-tubo

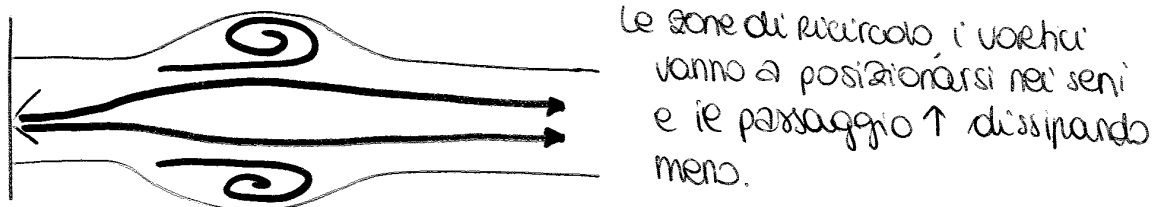
CIRCUITO:



A valle della protesi deve esserci una struttura che simuli la radice aortica con i seni di Valsalva, xkè esistono?



Con i seni di Valsalva:



# TECNICHE DI RIVASCOLARIZZAZIONE

(9)

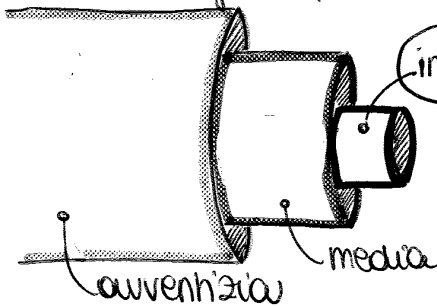
Rivascolarizzazione = rendere nuovamente operativo un distretto vascolare che non è più operativo per una patologia.

Viene meno la perfusione sanguigna e cause della formazione di placche (x fluidodinamica alterata)

4 zone principalmente

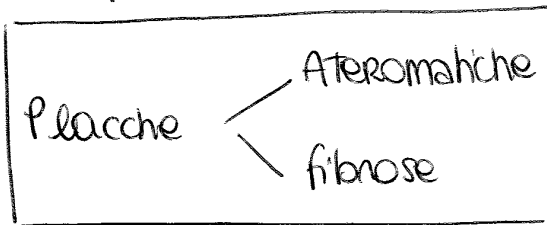
- arterie coronarie
- biforcazione carotidea
- biforcazione iliaca
- branching aortico

Si formano per elevate forze di frizione lungo le pareti del vaso. Altre cause: molto cibo, fumo, alcool, predisposizione genetica, ipertensione.



→ Cells epiteliali che contengono meccanoceettori che sentono le forze e le traducono in segnali chimici x attivare una cascata di...

**SAVO**: ↑ portata → ↑ gittata → ↑ velocità → ↑ sforzi sulle pareti che vengono percepiti dai meccanoceettori → ↑  $\phi$  vaso  
↓  
se questo non avviene = formazione di placche



Si formano per accumulo di grasso quando la parete del vaso è discontinua. Il sist immunitario reagisce in modo incontrollato.

Nucleo molle ricoperto da mat fibrosa. Molto calcifici.

Si possono rompere.

Soluzione alle placche?

- Bypass aorto-coronario (CABG)
- Angioplastica (percutanea) (PTCA)
- Stent

## BYPASS

Operazione chirurgica eseguita dal cardiocirurgo.



↓  
Toracotomia  
CEC



... (non utilizzare ...)

17

Cambiamenti della geometria del vaso in seguito alle sollecitazioni:  
 lo stent deve seguire tutto.

◦ CORONARIE:  Bending e torsione   
 Sollecitazione continua

◦ BIFURCAZIONE CAROTIDEA: piegamenti/rotazioni del collo.

Parametri da osservare

- Distribuzione degli sforzi di taglio sulla parete
  - Velocità nel vaso
  - Zone di ricircolo
  - Profilo di velocità
- } disturbo del flusso

Caratteristiche stent ideali		Specifiche di progetto
1) RAGGIUNGERE AGEVOLMENTE LA LESIONE	→	FLESSIBILE
2) POSIZIONE CORRETTA ALL'INTERNO DELLA LESIONE	→	VISIBILE IN SCOPA
NON DEVE ACCORCIARSI DURANTE L'ESPANSIONE	→	ACCORCIAMENTO NULLO
3) AVERE MINIMA TROMBOGENICITÀ	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ COPERTURA CON CARBOFILM (biocompatibilità)</li> <li>◦ SPIGOLI ARROTONDATI (non sta del sangue e no trombo)</li> <li>◦ SUPERFICI LUCIDE (no trombo problema di lucidatura)</li> <li>◦ STRUTTURA SOTTILE</li> </ul>
4) GARANTIRE PERVIETÀ del VASO	→	RESISTENZA ALLA COMPRESIONE RADIALE (alimenti collare)
5) MINIMA ALTERAZIONE dell'ELASTICITÀ del VASO	→	ACCOPPIAMENTO ELASTICO OTTIMALE CON LA PARETE DEL VASO III STESSA PROP. MECCANICHE del VASO. MISMATCH: concentraz. sforzi che porta alla frattura.

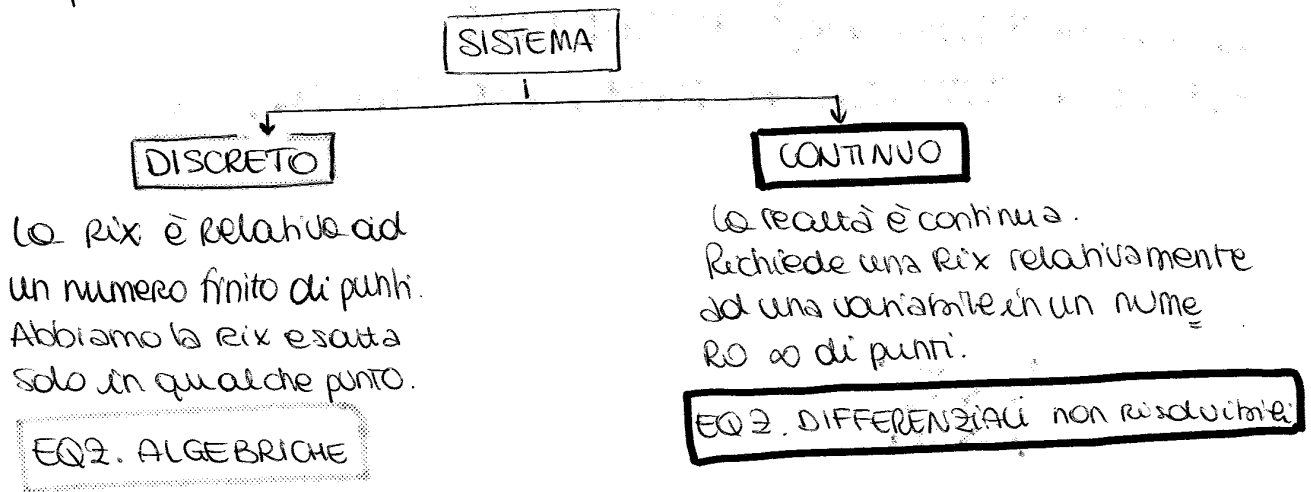
→



# INTRODUZIONE AL METODO DEGLI ELEMENTI FINITI

È necessario discretizzare l'elemento. Devo scrivere eqz che descrivono l'elemento, costruisco la matrice di rigidità che lega forze e spostamenti (una velementino). Assembrò le varie matrici per ottenere una sola grande con molti qd. A questo punto si risolve.

1. Ideallizzazione del sistema (modello)
2. Formulazione delle eqz
3. Soluzione delle eqz
4. Interpretaz e valuta dei risultati

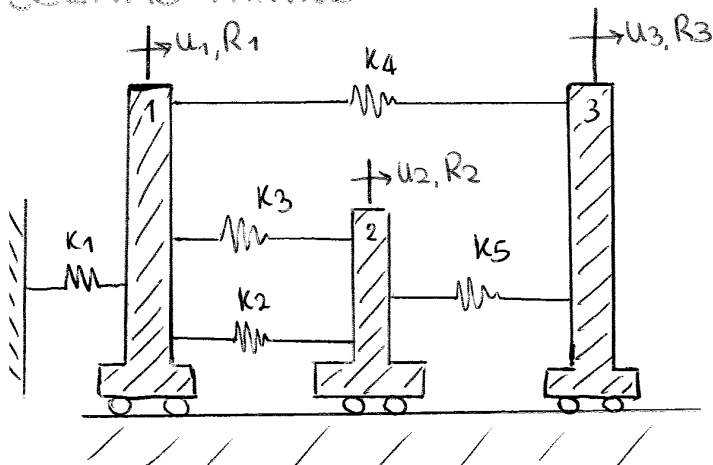


Analizziamo un sist discreto nel quale otteniamo soluz in **TUTTO** l'elemento.

- 2 nodi → asse
- 4 nodi → volume
- 8 nodi → tutto e all'interno dell'elemento

le forze d'inerzia non vengono considerate perchè gli spostamenti sono molto lenti.

ESEMPIO PRATICO :



Sist idealizzato:

- rotelle ideali: non ha massa
- carrello: ha solo massa, ∞ rigido

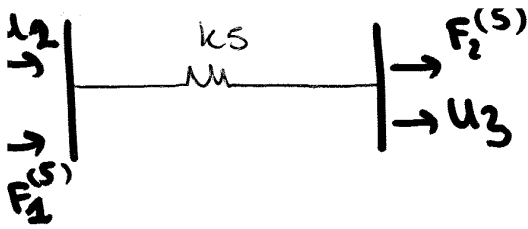
DATE LE FORZE DEVO

TROVARE GLI SPOSTAMENTI

QUANTI SPOSTAMENTI? DIPENDE DAI PUNTI.

CI SERVONO

3 FORZE e 3 SPOSTAM.



$$k_5 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1^{(5)} \\ F_2^{(5)} \end{Bmatrix}$$

③

Abbiamo scritto gli spostamenti degli elementi come quelli delle strutture ( $u_1, u_2$ ). Dobbiamo verificare le eqz di congruenza per non creare buchi nella struttura.

①  $F_2^{(1)} + F_1^{(2)} + F_1^{(3)} + F_1^{(4)} = R_1$

②  $F_2^{(2)} + F_2^{(3)} + F_2^{(5)} = R_2$

③  $F_2^{(4)} + F_2^{(5)} = R_3$

Vogliamo ottenere:  $[k] \{u\} = \{R\}$

$\swarrow$  caratteristiche struttura  
 $\downarrow$  incognita  
 $\searrow$  note

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}$$

$$\{R\} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{Bmatrix}$$

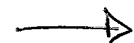
Le F degli elementi scompaiono.

$$[K] = \sum_{i=1}^5 [k]_i$$

Matrice di rigidità

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 + k_4 & -k_2 - k_3 & -k_4 \\ -k_2 - k_3 & k_2 + k_3 + k_5 & -k_5 \\ -k_4 & -k_5 & k_4 + k_5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{Bmatrix}$$

A questo punto la matrice è una matrice di numeri.

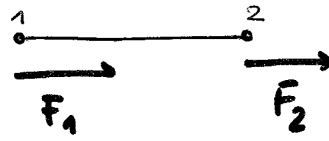




$$\{f\} = \{u_1, u_2\}^T$$

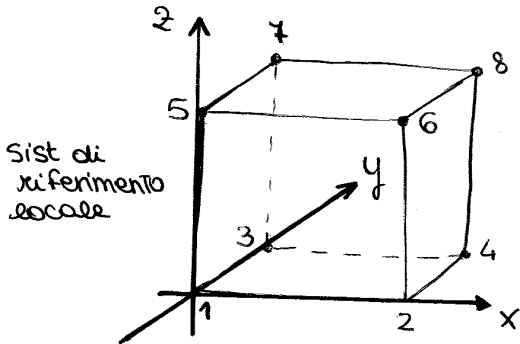
È il vettore delle forze nodali:

$$\{F\} = \{Q_1, Q_2\}^T$$



Elemento a 2 GdL che si sposta lungo  $x$ . Debbo determinare funzione che approssimi questo spostamento.

### ELEMENTO SOLIDO: ESAEDRO A 8 NODI



Lo spostamento nello spazio di uno qualsiasi dei punti appartenenti all'elemento potrà essere scomposto secondo gli assi coordinati cartesiani, perciò il vettore che descrive il campo degli spostamenti risulta:

$$\{\delta\} = \{u, v, w\}^T$$

- Ogni componente dipende da  $x, y, z: u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)$
- L'elemento si può spostare nelle 3 direzioni

Gli spostamenti nodali dell' $i$ -esimo nodo valgono:

$$\{f_i\} = \{u_i, v_i, w_i\}^T$$

vettori di numeri  
 $8 \times 3 = 24$  numeri

perciò  $[k] = 24 \times 24$

Il vettore delle forze nodali agenti mese'  $i$ -esimo nodo:

$$\{F_i\} = \{F_{x_i}, F_{y_i}, F_{z_i}\}^T$$

Riassumendo:

$$\vec{s} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix}$$

$$\{f_i\} = \{u_1, v_1, w_1, u_2, \dots, w_{24}\}^T$$

numeri

Funzioni

$$\{F_i\} = \{F_{x_1}, F_{y_1}, F_{z_1}, F_{x_2}, \dots, F_{z_{24}}\}^T$$



$[A]$  è invertibile:

$$\begin{aligned} u_1 &= \alpha_1 \\ \alpha_2 &= \frac{u_2 - u_1}{L} \\ \alpha_2 &= \frac{u_2}{L} - \frac{u_1}{L} \end{aligned}$$

$$\rightarrow [A]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{L} & +\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{matrix} \rightarrow \alpha_1 \\ \rightarrow \alpha_2 \end{matrix}$$

$\downarrow$                        $\downarrow$   
 $u_1$                        $u_2$

(8)

$$\{\delta(x)\} = [\phi(x)] [A]^{-1} \{f\} = [N] \{F\}$$

$\alpha$

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & -x/L \\ x/L & \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \phi & \phi \end{pmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} [1, x]$$

$2 \times 2$        $2 \times 1$       =  $2 \times 1$   
 ~~$1 \times 2$~~

ESEMPIO ESAEDRO

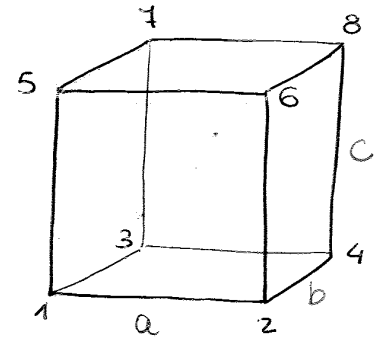
obiettivo:  $u = [N_1] \{F\}$

$\downarrow$

Prima riga della matrice delle funzioni di forma

Avendo  $u, v, w$  indipendenti con 8 nodi ciascuno, il sistema è + complesso e quindi devo ripetere 3 volte il procedimento.

$$[N] = \begin{bmatrix} [N_1] \\ [N_2] \\ [N_3] \end{bmatrix}$$



Coordinate punti:

- $P_1(0,0,0)$     $P_2(a,0,0)$     $P_3(0,b,0)$     $P_4(a,b,0)$     $P_5(0,0,c)$     $P_6(a,0,c)$
- $P_7(0,b,c)$     $P_8(a,b,c)$

Prendendo:

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z + \alpha_5 xy + \alpha_6 x^2 + \alpha_7 y^2 + \alpha_8 xy^2$$

$$\begin{cases} u_1 = \alpha_1 \\ u_2 = \alpha_1 + \alpha_2 a \\ u_3 = \alpha_1 + \alpha_3 b \\ u_4 = \alpha_1 + \alpha_2 a + \alpha_3 b + \alpha_5 ab \\ u_5 = \alpha_1 + \alpha_4 c \\ u_6 = \alpha_1 + \alpha_2 a + \alpha_4 c + \alpha_6 ac \\ u_7 = \alpha_1 + \alpha_3 b + \alpha_4 c + \alpha_7 bc \end{cases}$$

$[A]$

$$u_8 = \alpha_1 + \alpha_2 a + \alpha_3 b + \alpha_4 c + \alpha_5 ab + \alpha_6 ac + \alpha_7 bc + \alpha_8 abc$$



5. È necessario scrivere il legame tra tensioni e campo delle deformazioni. (17)  
 In ogni punto dell'elemento il materiale è sottoposto a tensioni.

Campo Tensioni:

$$\{\sigma(x_k)\}$$

⇒ un legame tra  $\{\sigma(x_k)\}$  e  $\{\varepsilon(x_k)\}$ :

$$\{\sigma(x_k)\} = [D] \{\varepsilon(x_k)\}$$

Matrice di elasticità del materiale: dipende dal materiale. Può essere anisotropo e isotropo.

$$\begin{pmatrix} \sigma \\ \sigma \\ \sigma \\ \tau \\ \tau \\ \tau \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \text{contributo} & \text{contributo} \\ \sigma \text{ nelle} & \sigma \text{ nelle} \\ \varepsilon & \gamma \\ \hline \text{contributo} & \text{contributo} \\ \tau \text{ nelle} & \tau \text{ nelle} \\ \varepsilon & \gamma \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon \\ \varepsilon \\ \gamma \\ \gamma \\ \gamma \end{pmatrix}$$

**6x6**

ANISOTROPO: mi servono meno di 36 coeff. perché  $[D]$  è simmetrica. Ne bastano 21. Applico  $\sigma$  e ottengo  $\gamma$  [matrice è piena].

ISOTROPO: 2 e 3 volte  $\sigma$ , quindi i componenti membri sono due a coppia. Non ho contributo  $\sigma$  nelle  $\gamma$  né  $\tau$  nelle  $\varepsilon$ . Quindi 2 coeff. modulo elastico ( $E$ ) e poisson ( $\nu$ ).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu(\sigma_y - \sigma_z))$$

ESEMPIO ASTA

$$\{\sigma(x)\} = \{\sigma_x\} \quad \{\sigma(x)\} = E \{\varepsilon(x)\}$$

$$[D] = [E]$$

ESEMPIO ESAEDRO

Abbiamo tutti i termini:  $\varepsilon, \gamma, \sigma$  e  $\tau$ .

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}$$

→

$$\{ \epsilon(x_k) \} = [B] \{ f \} \quad \{ \sigma(x_k) \} = [D] \{ \epsilon(x_k) \} \quad (13)$$

$$\boxed{\{ \sigma \} = [D] [B] \{ f \}}$$

$\{ f \} =$  spostamenti veri  
 $[B] \{ f \} = \epsilon$  vere  
 $[D] =$  matrice costitutiva

Lavoro totale virtuale delle tens interne risulta:

$$L_{int} = \int \underbrace{\{ f^* \}^T [B]^T}_{\{ \epsilon^* \}^T} \underbrace{[D] [B] \{ f \}}_{\{ \sigma \}} dV \quad \{ f^* \} \neq \{ f \} \text{ sono numeri}$$

$$L_{int} = \underbrace{\{ f^* \}^T}_{\text{è influente}} \left[ \int [B]^T [D] [B] dV \right] \{ f \}$$

$$L_{int} = L_{est}$$

$$\cancel{\{ f^* \}^T} \left[ \int [B]^T [D] [B] dV \right] \{ f \} = \cancel{\{ f^* \}^T} \{ f \}$$

$$\boxed{\{ f \} = \left[ \int [B]^T [D] [B] dV \right] \{ f \}}$$

Confrontando con la relaz di rigidità:  $\{ F \} = [k] \{ f \}$   
 possiamo esplicitare  $[k]$ :

$$\boxed{[k] = \int [B]^T [D] [B] dV}$$

Sono valori approssimati

Nel caso in cui siano presenti forze esterne di sup  $\{ p \}$  e forze di volume  $\{ v \}$

$$L_{est} = \{ f^* \}^T \{ F \} + \int \{ f^* \}^T [N]^T \{ p \} dS + \int \{ f^* \}^T [N]^T \{ v \} dV$$

introduco un altro termine energetico.

$$\{ F \} + \{ F_p \} + \{ F_v \} + \{ F_e \} + \{ F_\sigma \} = [k] \{ f \}$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} = + \frac{1}{L^2} + \frac{1}{L^2} = \frac{2}{L^2}$$

ESEMPIO ASTA

$$[k] = \int [B]^T [D] [B] dV$$

normalmente  $[D]$  è cost  
 sono indipendenti dalle coordinate di integrazione

$$\rightarrow [k] = [B]^T [D] [B] \int dV$$

$$\boxed{[k] = E \frac{2}{L^2} \cdot KA = \frac{2EA}{L}}$$