



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1437A -

ANNO: 2015

# A P P U N T I

STUDENTE: De Amicis

MATERIA: Stampi e Processi di Formatura, Prof. Antonelli

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.**

## 1 Lezione

Per i processi di stampaggio lamiera gli stampi sono relativamente semplici ma è necessaria una simulazione del processo di stampaggio per evitare difetti nei componenti stampati.

### Teoria della plasticità

Sottoinsieme della meccanica del continuo (corpo deformabile: la fisica studia corpo continuo indeformabile, l'evoluzione è che sia deformabile per deformazione elastica, plastica, viscosa, ...). I materiali metallici sono composti da ioni con una nuvola di elettroni di valenza liberi di muoversi (legame metallico).

Non sono visti come corpi continui, già a livello di grani cristallini ogni grano ha dei piani atomici differenti (ha orientazioni preferenziali), in tal modo ogni grano è diverso dall'altro (comportamento granulare).

A livello macroscopico però possiamo considerarli continui (trascuriamo la struttura granulare). Per la propagazione dei difetti (cricche) è importante considerare la struttura granulare del materiale. Ma non si riesce a studiare il materiale a livello globale (MACROPLASTICITA') considerando il comportamento puntuale, a livello del singolo grano (MICROPLASTICITA'). Sono modelli teorici diversi a se stanti.

Con i software ad elementi finiti potrei usare entrambe le teorie ma la mesh è un problema perchè se ne faccio una che considera il materiale a livello macroscopico e una a livello microscopico avrei errori nel risultato.

La microtecnologia crea questo problema (componenti microscopici) Nello spessore ho il posto per un singolo grano cristallino, e se la lamiera si rompe ciò avviene lungo il bordo grano.

In questo caso non è corretto separare le due teorie. Si ha una teoria intermedia (Mesoplasticità) Studia le deformazioni di un corpo continuo formato da grani.

### Curva tensione deformazione $\sigma$ - $\epsilon$

Provino sottoposto a trazione in una direzione e misuro l'allungamento in quella direzione.

$\sigma_n$  (tensione nominale) =  $\frac{F}{A}$  dove per A si intende la sezione iniziale del provino

$e = \frac{\Delta L}{L_0}$  dove  $L_0$  è la lunghezza iniziale del provino.

Queste grandezze sono comode da calcolare quando non sono troppo differenti da quelle reali (campo della progettazione).

$\sigma_r$  (tensione reale) =  $\frac{F}{A}$  dove per A si intende la sezione istantanea del provino

$$d\epsilon = \frac{dL}{L} \quad \epsilon = \int_0^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

Per i processi che analizziamo si utilizzano i parametri reali.

Gli acciai moderni non hanno il punto A (vedi fig. Sotto) nel passaggio tra elastico e plastico (tranne per acciai da imbutitura).

deformazione piana perciò scriverò  $\varepsilon^2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{L_2}{L_0}$  (lunghezza dopo laminazione).

Dopo la prova di trazione  $\varepsilon = \varepsilon^2 + \ln \frac{L}{L_2}$  Lo stesso discorso vale per il provino 3.

Collego le 3 curve ottengo la curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  che mi descrive il comportamento su un ampio intervallo di deformazione (campo di estensione maggiore).

Parametri che influenzano le prove:

1. Temperatura

Al crescere di questa l'incrudimento diminuisce. Le dislocazioni possono muoversi più facilmente. La resistenza a rottura e snervamento diminuisce, aumenta la duttilità.

Temperature giuste per le prove:

Per stampaggio a caldo dovrei fare la prova a 1200°C

Per lo stampaggio a freddo metto il provino nel macchinario a temp. ambiente e poi raggiunge anche i 100°C (dovrei fare prove diverse).

2. Velocità di deformazione

L'influenza della velocità di deformazione aumenta all'aumentare della temperatura (poco influente T amb, molto di più a T elevate) Ci sono quindi molte prove da fare, effettuate da pochi centri e messi in tabelle che consultano le aziende, purtroppo i materiali non hanno sempre le stesse caratteristiche che sono riportate in tabella (normale variabilità di produzione del materiale).

Nello stampaggio lamiere i materiali utilizzati sono all'incirca sempre gli stessi (al limite si ricorre all'esperienza).

Per materiali nuovi ci possono essere problemi perché possono non essere ben caratterizzati e non si ha esperienza.

3. Pressione (tensione media sul materiale)

Al crescere di essa aumenta la vita utile del componente. La pressione idrostatica chiude le cavità evita la coalescenza delle cavità (ad es. nell'estrusione si ha allungamento a rottura molto maggiore rispetto allo stampaggio).

4. Dimensione dei grani

Più è piccolo il grano maggiore sarà la resistenza del materiale. Migliorano le sue caratteristiche meccaniche.

N.b. le prove di trazione avvengono a velocità quasi statica e a temperatura di 20 °C mentre lo stampaggio avviene a temperature elevate e a velocità elevate ( $10^4$ )

Effetto Bauschinger

Se fermo la prova prima dell'instabilità ho ritorno elastico e se poi effettuo una compressione si nota che il materiale ha una resistenza inferiore (per raggiungere  $\varepsilon_0$  ho bisogno di una tensione di compressione molto inferiore della  $\sigma$  di trazione).

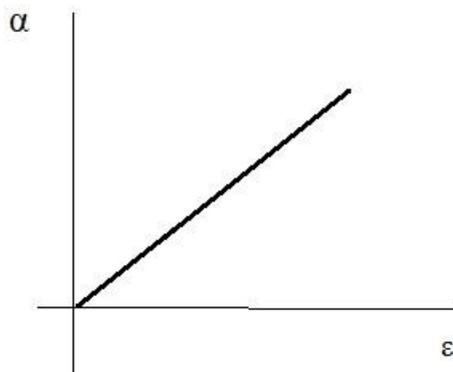
L'ipotesi di elasticità lineare ( $E = \text{cost}$ ) è utilizzata nei software ed è accettabile, invece l'incrudimento non è possibile considerarlo costante:  $H \neq \text{costante}$   
 Per inserire la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  nel codice del software potrei prendere una serie di punti e dare le corrispondenze  $\sigma^p = \epsilon^p$  da prove di compressione e trazione.



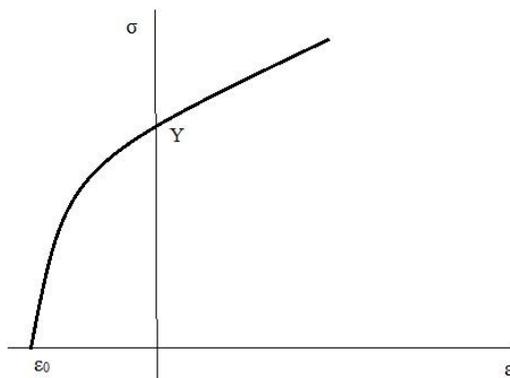
Ma normalmente si ha un andamento oscillatorio lungo la curva, causa vibrazioni errori numerici, oscillazioni, effetto Bauschinger ecc... crisi del codice, non hanno senso tali valori. Inoltre provando su più provini si ottengono più curve, quale si usa? Come si capisce quando si ha il passaggio da campo elastico a quello plastico? Non lo possiamo sapere e ne il codice lo può prevedere. Inoltre si hanno variazioni con la temperatura, con la velocità di deformazione ecc...  
 Ci vuole un modello teorico del comportamento del materiale da mettere nel codice del software.

Modelli utilizzati:

- Materiale elastico lineare



- Materiale rigido plastico ( si deforma solo dalla tensione di snervamento in poi)



Correggo la formula precedente con una deformazione residua anche se non è così.

$$\sigma = C (\epsilon + \epsilon_0)^n$$

La deformazione non ha un significato (serve solo a far tornare i conti) solo motivi numerici. E' definita PRE-STRAIN ma non rappresenta una def. Residua o dovuta a una pre lavorazione. Non è una legge facile da caratterizzare, da verificare.

Per caratterizzare la POWER LAW si scrive: (interpolarizzazione lineare)

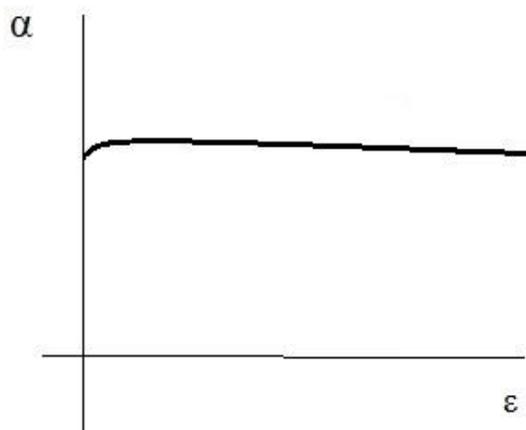
$$\ln \sigma = \ln C + B \ln \epsilon \rightarrow Y = A + BX$$

e tramite la regressione lineare si trovano i valori di A e B.

Con tale legge non riesco a separare la  $\epsilon_0$  e  $n$  (dipendono uno dall'altro). Sono costretto a fare delle ipotesi su un parametro per ottenere  $n$  o viceversa. Devo dare al codice anche la legge tensione-velocità di deformazione: influenza della velocità di deformazione.

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m$$

Nello stampaggio a caldo il materiale segue una curva del tipo (quasi costante)



Leggero addolcimento. Vi è restaurazione dinamica, aumenta duttilità e diminuisce la  $\sigma$  di deformazione. I grani si riposizionano per essere più uniformi e il materiale più facile da lavorare.

La legge di Hook dice che:

$$\sigma_x = [\epsilon_x - \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)] E$$

nel campo elastico il materiale si deforma e volume costante se  $\nu = \frac{1}{2}$

i metalli non hanno  $\nu = \frac{1}{2}$  quindi nella deformazione elastica cambiano volume mentre in quella plastica il volume resta costante

gli elastomeri (gomme) hanno invece  $\nu = \frac{1}{2}$

Lezione 13/03/2014

solo nella prova di trazione (prima dell'instabilità)  $\sigma$  <sup>quindi  $\sigma$</sup>   $F$  e  $\epsilon$  uniformi in tutte le sezioni

nelle prove di compressione ciò non avviene

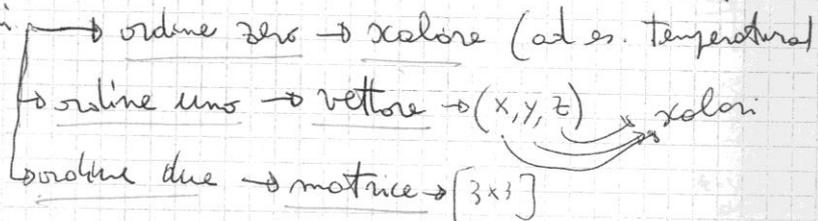
difficili tra prove di trazione e compressione in campo elastico

Basics della plasticità

Notazione tensoriale

Lo scalare  $\rightarrow$  per gestire grandezze indipendenti del sistema di riferimento

Lo diversi ordini



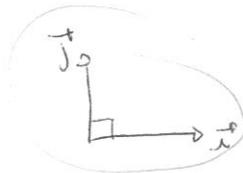
differenza matrice - matrice

Lo non c'è differenza tra righe e colonne (non sono orientate)

Lo è lo stesso mettere i valori in righe o in colonne

Lo sono matrici orientate

in realtà  $\vec{i} \cdot \vec{i} = 1$   
 $\vec{i} \cdot \vec{j} = 0$

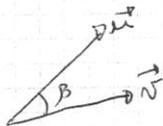


Analogamente  $\vec{e}_i \cdot \vec{e}_j = \delta_{ij}$

$\vec{u} \cdot \vec{v} = u_i \cdot v_i = u_1 v_1 + u_2 v_2 + u_3 v_3$

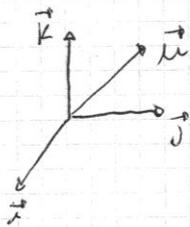
sono diversi perché i prodotti con pedici diversi sono nulli.

Prodotto scalare tra due vettori



$\vec{u} \cdot \vec{v} = u \cdot v \cdot \cos(\beta)$

Mi interessano gli angoli di un vettore rispetto a  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  e  $\vec{k}$  nello spazio



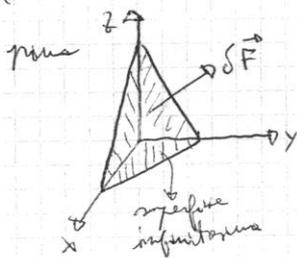
coseni direttori

$\begin{cases} l = \cos \beta_x \\ m = \cos \beta_y \\ n = \cos \beta_z \end{cases}$

$l^2 + m^2 + n^2 = 1$

in notazione ters.  $\vec{l}_i = (l, m, n) = (l_1, l_2, l_3)$

Rappresentazione delle tensioni  
 (meccanica del continuo, corpo deformabile)

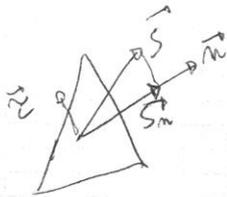


non posso applicare la forza ad un punto  
 la forza si distribuisce su ogni superficie  
 seconda dell'inclinazione della superficie  
 ho tre forze sulle tre superfici  
perpendicolari a x, y e z  
 l'equilibrio con la componente  
 di forza lungo ognuna direzione

Il Tensore degli sforzi è simmetrico e definito positivo

↳ i suoi autovalori sono reali

Se vogliamo sapere la <sup>tensione</sup> ~~forza~~ in direzione normale alla generica superficie



$$S_m = S_i \cdot l_i = \underbrace{\sigma_{ij}}_{S_i} \cdot l_j \cdot l_i$$

$$S_m = \sigma_{11} \cdot l_1 \cdot l_1 + \sigma_{22} \cdot l_2 \cdot l_2 + \dots = \sigma_x \cdot l^2 + \tau_{xy} \cdot l \cdot m + \tau_{xz} \cdot l \cdot n + \dots$$

Ci sono dei piani in cui ho solo tensione normale?

$$\underbrace{\sigma_{ij}}_{\text{tensione spezia}} \cdot l_j = (\underbrace{\delta_{ij} \sigma_m}_{\text{tensione normale}}) \cdot l_j$$

↳ si ha se

$$(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m) \cdot l_j = 0$$

↓

$$\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m = 0$$

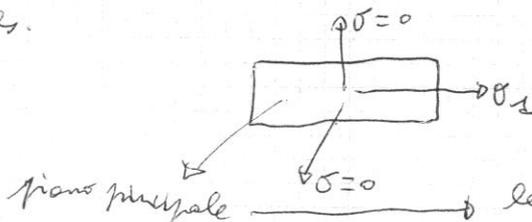
Zero del polinomio caratteristico

↳ si ha quando si annulla il determinante della matrice composta

i possibili valori che assume  $\sigma_m$  sono autovalori → tensioni principali  
 i coefficienti direttori corrispondenti  $l_i$  sono autovettori → direzioni principali

se le tensioni principali coincidono ho un piano  $\sigma$  e l'intero spazio come direzioni principali (ad es. pressione idrostatica → una terna qualsiasi è principale)

ad es.



le tensioni su questo piano sono tutte normali

le direzioni principali del tensore deviatorico coincidono con le dir. prin. del tensore normale

poniamo il polinomio caratteristico uguale a zero

$$\hookrightarrow s^3 - J_1 s^2 - J_2 s - J_3 = 0$$

$J_1, J_2, J_3$  sono gli INVARIANTI del Tensore deviatorico degli sforzi

$J_1 = \sigma_{ii} = \sigma_m \cdot 3 = 0$  → perché nel tensore deviatorico  $\sigma_m$  è nullo

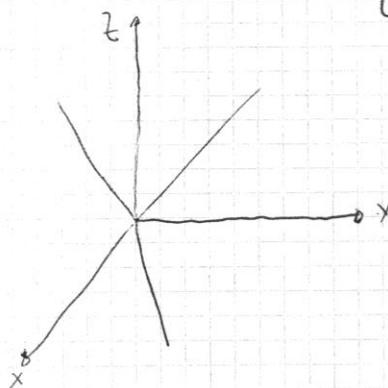
Lo perché  $\sigma_m = \frac{\sigma_{ii}}{3}$   $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow J_1 = 0$

$J_2 = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \cdot \sigma_{ij} = \frac{1}{2} (\sigma_{11} \cdot \sigma_{11} + \sigma_{22} \cdot \sigma_{22} + \dots)$   $J_2 = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \cdot \sigma_{ij}$

$J_3 =$

Un'altra direzione con proprietà interessanti è quella OTTAEDRICA

La direzione equidistante dai 3 versori

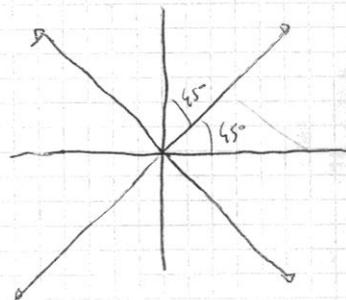


nello spazio ho gli ottanti

otto direzioni



nel piano  $x, y$



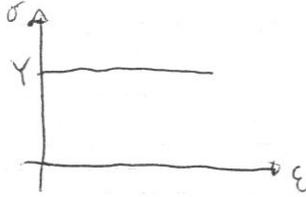
una direzione per quadrante

mi interessa il piano  $\perp$  alla direzione ottaedrica

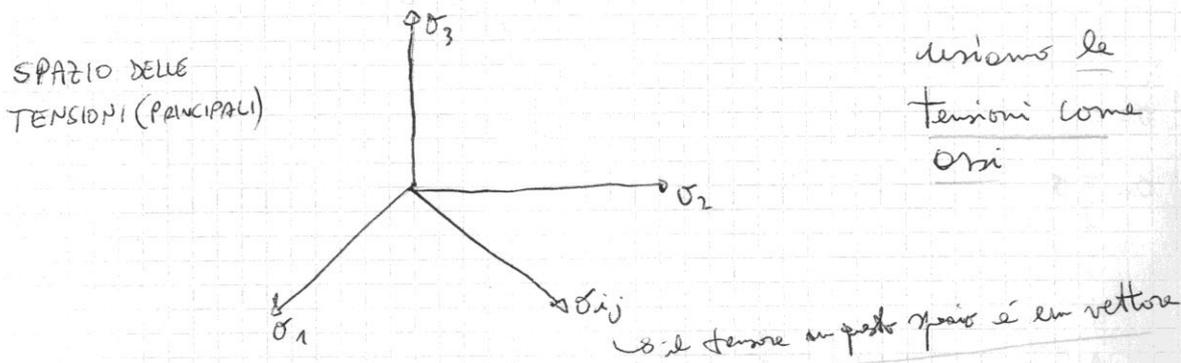
$l^2 + m^2 + n^2 = 1$       $l^2 = m^2 = n^2 = \frac{1}{3}$       $l = m = n = \frac{\sqrt{3}}{3}$

Per materiali metallici

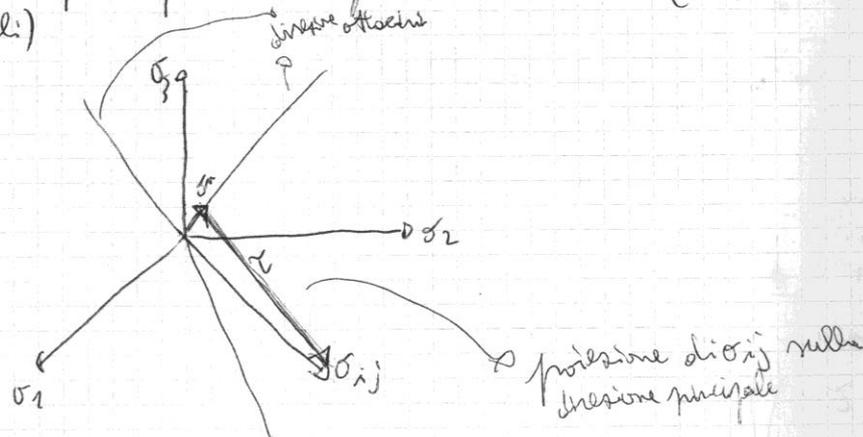
raggiunto un certo valore di tensione il materiale si deformerà permanentemente se riduco la tensione la deformazione cessa, ~~cessa~~ non può essere la stessa perché il materiale è in modo (deformazione)



Passiamo ad una rappresentazione grafica dei tensori (nel sistema di rif. principale sono solo 3 componenti e sono rappresentabili)



definisco anche in questo spazio un piano ottaedrico (equidistante dai piani principali)



$\sigma_m = \sigma_m$  non mi interessa  $\rightarrow$  mi interessa solo ciò che è nel piano ottaedrico e non ciò che è normale ad esso  $\rightarrow$  tensione media

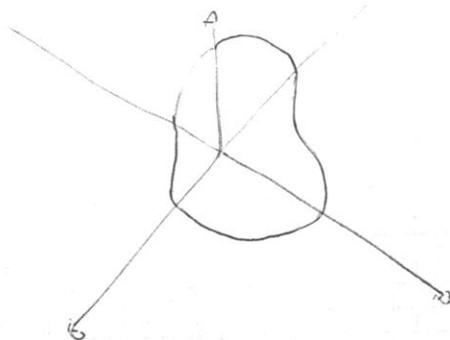
$$\tau = \sqrt{\frac{2}{3} J_2}$$

$$\sigma_m = \sigma_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} + \sigma_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} + \sigma_3 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 3 \sigma_m \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \sigma_m \cdot \sqrt{3}$$

$$\tau = \sqrt{3} \tau_{\text{ottaedrico}}$$

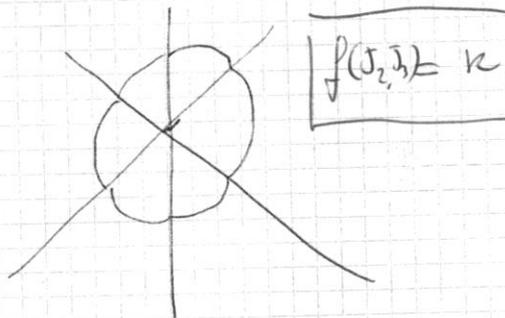
3 piani paralleli al piano ottaedrico e sono la stessa  $\tau$  ma diversa  $\sigma_m$  da una  $\sigma_m$  a  $\sigma_m$

La curva deve essere simmetrica rispetto a  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$



deve essere simmetrica anche rispetto a  $-\sigma_1, -\sigma_2, -\sigma_3$

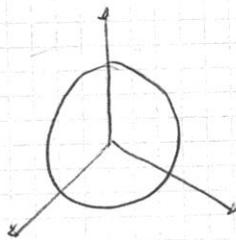
deve quindi avere 6 simmetrie



La circonferenza ha 6 simmetrie

$$f(\sigma_2, \sigma_3) = K$$

Espressione di una superficie indipendente dal sistema di ref.  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$   
 perché la sua non ha importanza



Quando la tensione si trova in questa superficie si ha deformazione plastica

$$\sigma_{ij} = \tau \propto \sqrt{J_2}$$

$$\sigma_{ij} \in f(\sigma_1, \sigma_2)$$

Se  $\sigma_{ij} \in$  dei valori sopportati dal piano per solo def. elastica  $\sigma_{ij}$  non può essere superiore perché aumenta la vel. di def. ma non la tensione

altro eq. della circonferenza  $\rightarrow R^2 = K$

$$R^2 = K$$

raggio costante

$$J_2 = K^2$$

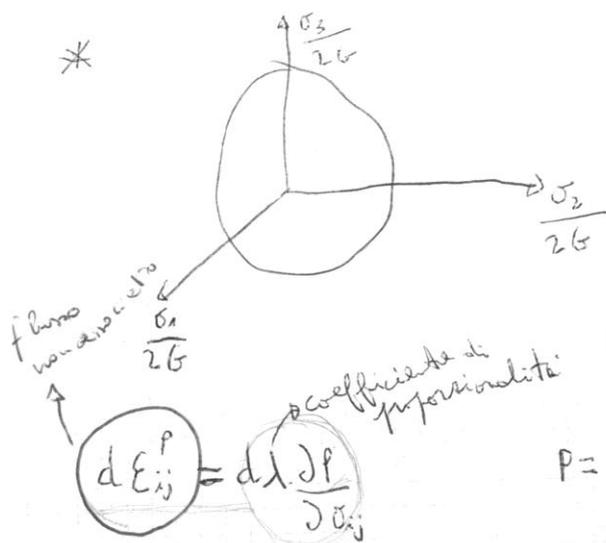
$$R \propto |\sigma_{ij}|$$

$$f(\sigma_1, \sigma_2) = K$$

$$df = \sum \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} = 0$$

$\rightarrow$  gradiente = normale alla superficie  
 non mi ricordo in che modo normale alla superficie  
 non solo modo o orientazione

\*



Obtengo le tensioni per il modello elastico e ottengo le deformazioni

In condizioni di plasticizzazione il materiale mantiene deformazione di tipo elastico  $\epsilon_p$  non // lungo le normali alla funzione di flusso

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$$

Tuttavia non si come potenziale  $f \rightarrow P \equiv f$

$P =$  potenziale plastico  
 non  $P$  e non  $f$  perché la deformazione plastica non è dettata rimozione energia dissipata delle forze superficiali di plasticità

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$$

**PLASTICITÀ ASSOCIATIVA**

Seconda Von Mises

$$f = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} = k^2 = J_2$$

$$\frac{d(\frac{1}{2} x^2)}{dx} = x$$

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial (\frac{1}{2} s_{ij} s_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} = d\lambda s_{ij}$$

**LEGGE DI PRANDTL-REUSS**

la relazione costitutiva è suff. a definire  $\epsilon^p$  vogliamo dire che è legame di stato evolutivo complesso.  $\sigma$  non influenza la  $\epsilon^p$

la variazione di deformazione plastica è proporzionale alla tensione deviatorica  $(s_{ij})$

per strappi lamiere non si usa quasi mai Von Mises

**vincoli anonomi**

no funzione diretta tra deformazione e tensione

$$\epsilon_{ij}^p \neq f(s_{ij})$$

il valore di  $s_{ij}$  non mi dice nulla sul valore di  $\epsilon_{ij}^p$

$$\epsilon_{ij}^p = \int_0^{\epsilon_{ij}^p} d\epsilon_{ij}^p$$

deformazioni indipendenti dalla tensione

cade la biunivocità

dopo aver raggiunto la tensione di plasticità la deformazione del materiale cambia con l'evoluzione della tensione elastica

quando ritorno la tensione la deformazione permane oppure se applico tensione e poi imposto la def. torna a zero

La scelta è una via di mezzo tra due modelli.  
 Al livello industriale si usa il modello isotropo perché più  
 semplice da utilizzare.

Caratteristiche della plasticità:

- 1) Volume costante
- 2) rispetto di un criterio di plasticità
- $\epsilon^p \neq f(\sigma)$  (dipendere da cond. al contorno  $\rightarrow d.h$ )
  - $\hookrightarrow$  è una variabile di stato  $\rightarrow$  mantenere "memoria" del suo stato precedente
  - (non istantanea)
  - $\hookrightarrow$  come la forza e la def. elastica

Tensione equivalente  $\rightarrow$  è uno scalare che rappresenta un comportamento  
 equivalente ad una prova di trazione

$\sigma_{eq} \rightarrow \frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = K^2$   
 $\hookrightarrow$  tension limit

$\hookrightarrow$  se lo applico nella prova di trazione ho:

$\sigma_1 \neq 0 \rightarrow \frac{1}{2}[\sigma_1^2 + \sigma_1^2] = K^2 \rightarrow \sigma_1^2 = K^2$   
 quando  $\sigma = Y$  ho def. plastica  $\rightarrow K = Y \rightarrow \sigma_1^2 = Y^2$

con le tensioni equivalenti  $\rightarrow \sigma_{eq}^2 = Y^2 \rightarrow \sigma_{eq} = Y$

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

$\hookrightarrow$  prossimare tutti i valori possibili  $\rightarrow$  quando vale  $Y$  ho def. plastica  
 $\downarrow$   
è una variabile

$$L_v = \int \sigma_{11} d\epsilon_{11}^p + \sigma_{22} d\epsilon_{22}^p + \dots$$

Definiamo una deformazione equivalente  $\epsilon_{eq}^p$  avente la proprietà

che:  $L_v \equiv \int \sigma_{eq} d\epsilon_{eq}^p = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p$

$$d\epsilon_{eq}^p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(d\epsilon_1^p - d\epsilon_2^p)^2 + (d\epsilon_2^p - d\epsilon_3^p)^2 + (d\epsilon_3^p - d\epsilon_1^p)^2}$$

$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot S_{ij}$  da legge di Prandtl - Reuss

$\sigma_{ij} \cdot d\epsilon_{ij}^p = \sigma_{eq} \cdot d\epsilon_{eq}^p = \underbrace{\sigma_{ij} \cdot S_{ij}}_{\dot{S}_{ij}} d\lambda$  per Von Mises

$d\lambda = \frac{\sigma_{eq}}{S_{ij} \cdot S_{ij}} \cdot d\epsilon_{eq}^p$        $\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2}} S_{ij} \cdot S_{ij}$

$d\lambda = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} S_{ij} \cdot S_{ij} \cdot d\epsilon_{eq}^p}{\frac{2}{3} \cdot \frac{3}{2} S_{ij} \cdot S_{ij}} = \frac{\sigma_{eq} \cdot d\epsilon_{eq}^p}{\frac{2}{3} \sigma_{eq}^2} = \frac{3}{2} \frac{d\epsilon_{eq}^p}{\sigma_{eq}}$

per PRANDTL-REUSS

$d\epsilon_{eq}^p = \frac{3}{2} d\epsilon_{eq} \frac{S_{ij}}{\sigma_{eq}}$   
 ↳  $\frac{S_{ij}}{\sigma_{eq}}$  = modulo della tensione

↳ indica la direzione delle tensioni

la tensione <sup>equivalente</sup> totale si ridistribuisce secondo le direzioni delle tensioni deviatoriche

per la prova di trazione

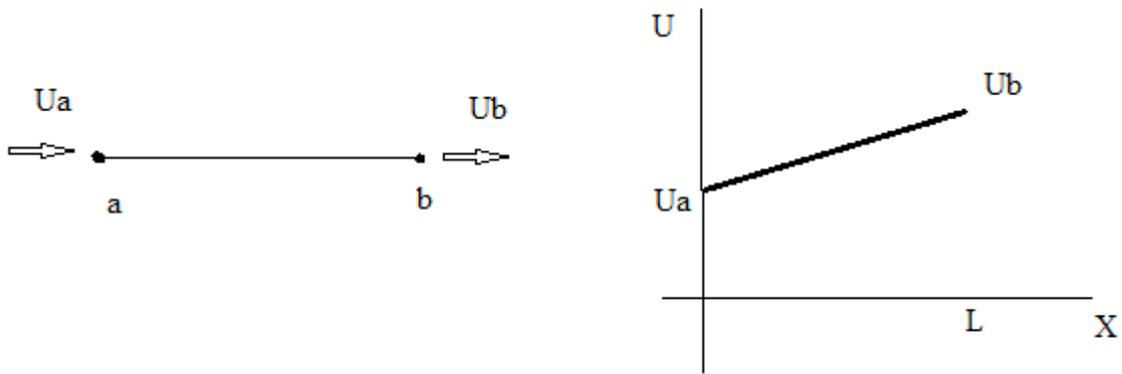
$\epsilon_{eq} = \epsilon_1$        $\sigma_{eq} = \sigma_1$

$d\epsilon_1^p = \frac{3}{2} \cdot d\epsilon_1 \frac{\frac{2}{3} \sigma_1}{\sigma_1} = d\epsilon_1$

soluzione analitica possibile solo con grandi semplificazioni  
 ↳ soluzione numerica  
 ↳ load es. tensioni e def. uguali d'appetito

- 1 equilibrio statico forze  $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0$
- 1 Costitutive plastiche  $f(\sigma_2, \sigma_1) = 0$
- 1 legge di flusso plastico (legge costitutiva)  $d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$
- 1 legge di incrinamento  $\sigma_{eq} = H(\epsilon_{eq}^p, \epsilon_{eq}^p, T)$
- 1 equazione di compatibilità  $\nabla \cdot \epsilon = 0$  → soluzione del campo di spostamenti

↳ le  $\gamma$  devono essere vicini a zero  
 ↳  $\gamma_{eq} = \gamma_{yx}$



Comportamento vero dell'asta → non è una semplificazione per elementi più complessi diventa un'approssimazione

Scrivo un polinomio che vale 1 quando  $x=0$  e vale 0 quando  $x=L$  e un secondo polinomio che vale 0 quando  $X=0$  e vale 1 quando  $X=L$ .

Spostamento totale = somme dei due polinomi.



**- Funzioni di forma per l'elemento monodimensionale a 2 nodi.**

$$N_a = 1 - \frac{x}{L} \quad N_b = \frac{x}{L} \quad u(x) = u_a N_a(x) + u_b N_b(x)$$

Esiste un solo polinomio di grado n che passa per n punti.

Il polinomio trovato è l'unico che può descrivere gli spostamenti dell'asta

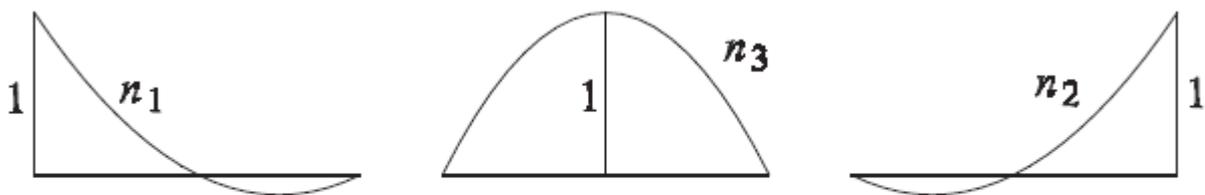
$$u(x) = u_a \left(1 - \frac{x}{L}\right) + u_b \left(\frac{x}{L}\right) = u_a + x \frac{u_b - u_a}{L}$$

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} = \frac{u_b - u_a}{L}$$

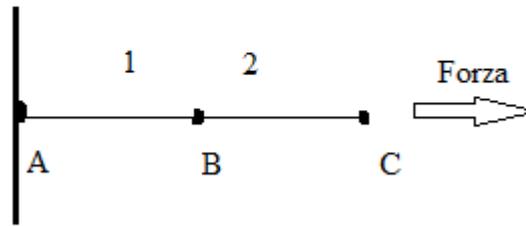
I nodi non devono per forza essere agli estremi dell'elemento → se aumento il numero di nodi avrà un polinomio di grado maggiore.

$N_a$  e  $N_b$  si chiamano funzioni di forma

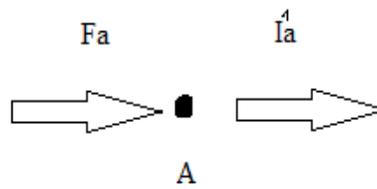
Considero elemento asta con tre nodi avrò:



**Funzioni di forma per l'elemento monodimensionale a 3 nodi.**

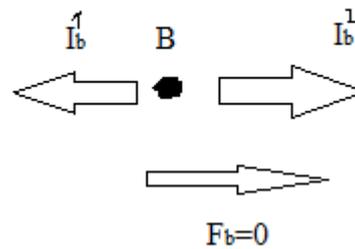


Equilibrio al nodo A



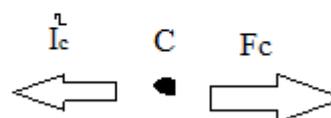
Una forza è applicata dal vincolo e una forza è interna di reazione  
 $U_a=0$

Equilibrio al nodo B

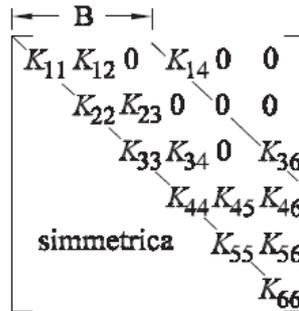


$F_b=0$  (ipotizzo che non ci sia)

Equilibrio al nodo C

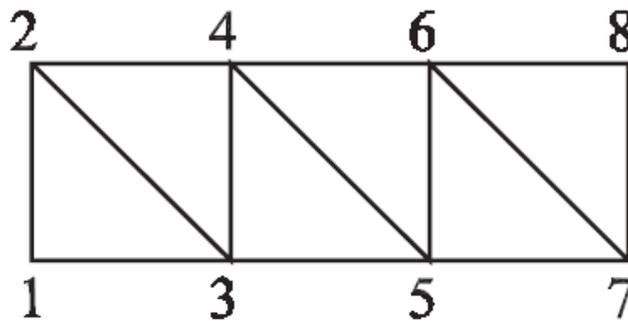


$F_c=F$



$$B = G(M+1)$$

Dove G sono i gradi di libertà per nodo e M la massima differenza nella numerazione tra i nodi struttura collegati tra di loro con un elemento. Per minimizzare la semiampiezza di banda occorre minimizzare tale differenza nella numerazione dei nodi. Si numerano i nodi consecutivamente lungo la dimensione più piccola della struttura.

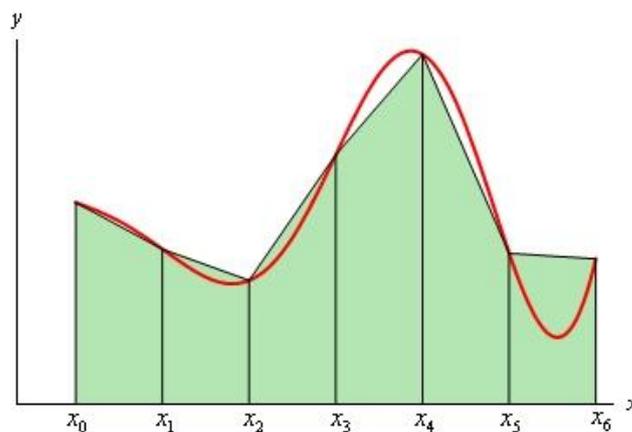


N.b. Avrei mal condizionamento se impongo sia lo spostamento che la forza in un punto è un errore → sistema mal condizionato

Il metodo permette di ottenere una soluzione quasi esatta, sfrutta le capacità di calcolo dei calcolatori, semplifica da equ. Diff. a equ. Lineari.

### Integrazione numerica

Ad es. si può applicare il metodo dei trapezi ai punti scelti sulla funzione



I punti di integrazione non corrispondono ai nodi ma ci sono dei punti nell'elemento che rendono

problema e così via.

Vado avanti per incrementi successivi. Risolvo il problema un po' per volta, e ad ogni incremento risolvo con il metodo iterativo.

$$U_0=0 \quad F-I(U_0)=0$$

Posto  $U_1=U_0+\Delta U$

- 1)  $F^1-I(\Delta U)=0$
- 2)  $F^2-(U^1+\Delta U)=0$  \*
- 3) .....

Se a questo passo uso  $J(U^1)$  il metodo è esplicito, se uso la  $J(U^1+\Delta U)$ , il metodo è implicito → stima degli  $U^1+\Delta U$

Si risolve un problema statico con un metodo incrementale iterativo. Il metodo è implicito perché ad ogni incremento si inserisce il valore dello spostamento alla fine dell'incremento.

Per gli incrementi di spostamento il software usa un parametro  $t$  compreso tra 0 e 1 (è espresso come Time dal software ma non è il tempo → il processo è statico!!! È solo un parametro)

Il software lo usa in maniera tale che in 0 non c'è nessun spostamento in 1 questo è massimo.

Questo vale sia per le forze sia per i vincoli. Si suppone quindi un  $\Delta t$  e il software aggiorna i valori di  $F$  e  $U$  in maniera proporzionale e lineare.

## Lezione

Alcuni materiali hanno una dipendenza della resistenza anche dalla velocità di deformazione.

Quindi c'è una dipendenza dal tempo in questo caso.

Un primo problema sono i buchi e le superfici sovrapposte nei CAD che diventano problemi nella creazione della mesh.

Un altro problema è che il residuo è elevato non si ha convergenza. Nello stampaggio di metalli si usano elementi con il numero minimo di nodi (4 normalmente) (a differenza di altri ambiti in cui servono molti nodi (es. con 5 nodi ho una funzione di 4° grado, rappresentazione corretta della freccia a flessione).

La matrice di rigidità è molto grande e va calcolata ogni iterazione di ogni incremento, il software permette in alcuni casi di riutilizzare la matrice jacobiana per diverse iterazioni.

In realtà si usano elementi a integrazione ridotta.

L'obiettivo è quello di determinare i punti nei quali le tensioni sono calcolate con lo stesso grado di precisione con il quale sono calcolati gli spostamenti nodali.

Per calcolare tensione e deformazione dell'elemento si usano dei punti di integrazione (punti di Gauss).



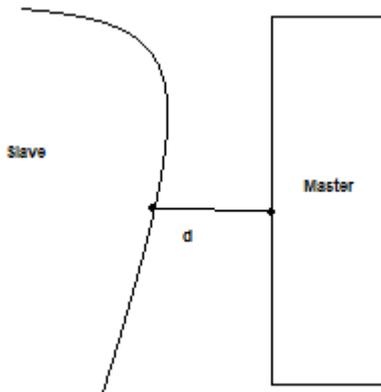
altezza e base  
rimangono costanti

Noi non usiamo gli elementi triangolari perché se deformato un triangolo mantenendo in deformato la base posso solo deformare mantenendo in deformato l'altezza ( area costante, in 3D volume costante).

Si deformano in maniera prestabilita quelli quadrangolari hanno maggiore, libertà di deformazione. I triangoli sono compatibili ad area o volume costante. Nei problemi che analizziamo c'è sempre il problema del contatto, il contatto va controllato nodo per nodo.

Considero due superfici → definisco una superficie MASTER e una superficie SLAVE.

Proietto i nodi della superficie slave sulla superficie master → ottengo la distanza d.



$d=0$  contatto chiuso

$d>0$  contatto aperto

$d<0$  interferenza o compenetrazione

Devo scegliere superfici master la cui normale sia facile da individuare (piani, archi di circonferenza).

Quindi prendiamo come superficie master lo STAMPO ( lo stampo lo consideriamo indeformabile, infinitamente rigido e si deforma in campo elastico)

Quando effettuiamo un incremento si passa da contatto aperto a interferenza e quindi devo ridurre l'incremento a reiterare finché non ottengo  $d=0$ .

Due modi per gestire questo problema:

- 1) Lagrangiani
- 2) Funzione di Penalità

### Lagrangiani

Calcoliamo l'energia di deformazione e sommiamo l'energia di contatto.

$$L = \sigma \epsilon dV + M f(d) \quad \text{dove } M \text{ è un numero molto grande}$$

M viene scelto molto grande in modo tale che se d è nulla o positiva la funzione è nulla, se  $d < 0$   $f(d) = -d$  perché  $d < 0$ . Alla minima interferenza esplose questo termine  $M(-d)$  molto grande e si vede

$$I_1 = \sigma_1 A_1$$

•  $t = \Delta t$

$$F - I_1 = m_1 \ddot{u}_1 \quad u_1 = (F - I_1) / m_1$$

$$\ddot{u}_1 = (F - I_1) / m_1$$

Sul nodo 2 c'è solo la forza di reazione  $I_1 = m_2 \ddot{u}_2$

$$\ddot{u}_2 = I_1 / m_2$$

$$\dot{u}_1 = \int \ddot{u}_1 dt \quad \dot{u}_2 = \int \ddot{u}_2 dt$$

$$\dot{\epsilon}_1 = (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) / L \quad \epsilon_1 = \int \dot{\epsilon}_1 dt$$

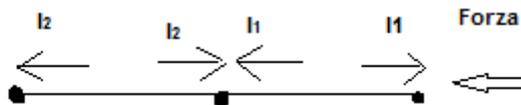
$$\sigma_1 = E \epsilon_1$$

$$I_1 = \sigma_1 A_1$$

$$\dot{\epsilon}_2 = \dot{u}_2 / L \quad \epsilon_2 = \int \dot{\epsilon}_2 dt$$

$$\sigma_2 = E \epsilon_2$$

$$I_2 = \sigma_2 A_2$$



Itero finché la forza di reazione eguaglierà F e l'accelerazione sarà nulla.

I metodi dinamici espliciti risolvono perciò problemi del tipo

$P - I = M \ddot{u}$  (dove accelerazione masse nodali) e M matrice masse nodali P forze esterne e I forze interne

I non deve essere calcolato da K u ma si calcola elemento per elemento

M è diagonale → la massa che interessa un modo è quella degli elementi che vi convergono.

Facilmente invertibile →  $u = M^{-1} (P - I)$

Con questi metodi perciò:

- Non devo calcolare la matrice di rigidezza
- Non devo risolvere sistemi di equ. Differenziali ma si inverte la matrice delle masse → metodi più rapidi → si possono usare molti più elementi → il tempo di calcolo non è più proporzionale a  $n^2$  (matrici di ordine  $n \times n$ ) ma è proporzionale a  $n$  (n equazioni una per ogni nodo).

Sono espliciti perché nel calcolo di ogni iterazione uso le forze di reazione calcolate nell'incremento precedente.

I metodi di soluzione espliciti hanno un difetto: instabilità (diverso dalla precisione)

Instabilità → si introduce all'inizio un errore anche molto piccolo alla fine otterrò errori molto

La compressione a caldo assicura resistenza meccanica, chiuderà cavità materiale per compressione. La ricristallizzazione permette di avere grani cristallini fini, le caratteristiche meccaniche migliorano. Sovrametallo molto contenuto; si può avere net shape forging → si ottiene direttamente il prodotto finito senza lavorazioni successive.

### Svantaggi forgiatura

Non riesco a ottenere con poco lavoro la forma desiderata, per colpa dell'attrito. La parte superiori si incollano alle superfici dello stampo.

Se non metto pareti laterali il pezzo si imbottisce, se le metto ottengo la forma che voglio ma serve una forza anche 10 volte superiori e ho sovrappressioni locali che possono provocare la rottura dello stampo. Nelle zone morte posso avere deformazioni non uniformi. Non è giustificata per piccole serie.

Quando il pezzo è scaldato è di un colore che va da giallo a bianco ma lo strato di ossido di ferro non permette di vederlo. Fragile e scuro non mette luci.

Si stacca durante la fucinatura. L'ossido di ferro funge da lubrificante (permette di non usare i lubrificanti). Dal punto di vista ingegneristico non è controllabile come processo di lubrificazione, se si stacca l'ossido non ho più lubrificante.

Come lubrificanti si usano saponi, per l'estrusione mpare si usa polvere di vetro (ad alta temperatura diventa liquido e ha una bassa adiabaticità).

I fucinati sono pezzi di grandi dimensioni stampati a caldo mentre gli stampati sono di dimensioni ridotte, di solito sono assialsimmetrici, perché pezzi assialsimmetrici sono più facili da stampare (devo solo controllare l'imbottimento). In uno stampo chiuso il lavoro di stampaggio è il doppio e la simmetria fa sì che le deformazioni sono quasi uguali in tutte le direzioni.

Lo stampaggio a freddo è solo di pezzi simmetrici, a caldo mi limito a controllare l'imbottimento.

Indefinito = materiale di partenza (ad es. lingotti, bilette, blumi,

Definito = spezzone di indefinito, si perde un po' di materiale, sfrido, le estremità del lingotto si tolgono, vengono buttate

Greggio di stampaggio = forgiato

Finito = forgiato dopo lavorazioni di asportazione di truciolo

Billette = barre di sezione quadrata e rettangolare

Barra (tondo) = barra di sezione circolare

### Stato del materiale prima della forgiatura

Crudo = nessun trattamento termico

Ricotto = se ho problemi a segare il materiale

Bonificato = si bonifica dopo la forgiatura

Si usano per forgiatura acciai autotemprati → si temprano raffreddandosi in aria calma

Normalizzazione → meno costosa e più rapida della ricottura

I processi di forgiatura sono:

Bollitura = per saldare (saldatura autogena) il materiale riscaldandolo e mettendo a contatto le parti.

Ricalcatura = fucinatura con stampi che si muovono parallelamente all'asse del pezzo

**1 scopo:** aumentare la larghezza del pezzo **2 scopo:** dopo la troncatura la superficie non è piana → operazione simile alla sfacciatura

in finitura la prima operazione è la ricalcatura. Può avvenire anche in modo guidato

Andamento fibre = i grani cristallini (effetto deformazione) si allineano → effetto della deformazione.

## Camera scarta bava

La metto solo nello stampo superiore o inferiore per economicità, per contenere la bava in eccesso e senza aumentare ulteriormente la forza di stampaggio.

## Guida stampo

Stampaggio a freddo: boccole e colonne assicurano la precisione

Stamp. a caldo: superfici coniche che si inseriscono una nell'altra per guidare lo stampo.

Presa di ferro: sporgenza del pezzo per afferrarlo che poi verrà rimossa. Di solito gli stampi sono multipli.

## Tranciatura bava fase delicata:

1. tranciatura diretta, punzone e matrice allineati, grandi forze assorbite quindi deformazioni.
2. Tranciatura indiretta, schiaccio il pezzo (che fa da matrice) con un punzone e il pezzo fa staccare la bava. Massimo imbarcamento del pezzo.

Stampi di foratura e tranciatura bava: semplici, dotati solo del contorno. Si usurano perciò montati su porta stampi per essere sostituiti.

I punzoni sono posizionati su piastre porta stampo per essere facilmente sostituiti. I pezzi sono montati a mano solitamente (pezzi stampaggio relativamente piccoli e piccole serie)

## **Imbutitura (Ultima lezione)**

Il premilamiera evita che la lamiera si innalzi durante il processo. La forza non è elevata, perciò non provoca deformazioni (si è ampiamente in ambito plastico, qualche MPa di pressione). Giochi tra punzone e matrice per evitare rigature (questo è difficile da simulare).

Se ho una pressa a doppio effetto (o azione) ho due attuatori idraulici uno per il premilamiera e uno per il punzone (in questo modo la forza che applico è costante).

Se le possibilità economiche sono limitate ho un solo attuatore che comanda il punzone e sul premilamiera agisce un cuscino ad aria compressa o olio (serbatoio).

Attraverso un sistema approssimabile ad una molla trasmettiamo una forza dal punzone al premilamiera.

Il punzone scende, mentre il premilamiera è fermo. La discesa del punzone carica la molla e cresce la pressione con cui il premilamiera schiaccia la lamiera ma non segue rigidamente il moto del punzone. (Vantaggio: ritorno economico ---- > risparmio un attuatore Svantaggio: la pressione non è costante e non ho una legge corretta per descriverla).

Per estrarre il pezzo stampato, una volta sollevato il punzone, utilizzerò un estrattore. Questa parte non la simulo ma "disintegro il tutto". (Ovvi i motivi: riduco i tempi di calcolo)

!!!La simulazione trascura molti dettagli: se non si dimensiona opportunamente l'estrattore (troppo piccolo o lamiera incastrata) ci può essere deformazione ma al Pc non lo vedo.

Cosa si ottiene con l'imbutitura?

Otteniamo una coppa e un bordo orizzontale. Si evita di far andare tutto il materiale sulla parete verticale e lo si tiene sotto il premilamiera, perchè così posso guidare la lamiera.

Tale parte verrà tolta con il processo di rifilatura. La parte in eccesso è il fuorifigura. Quindi devo

Come per i processi di laminazione si introduce l'anisotropia , qui normale:

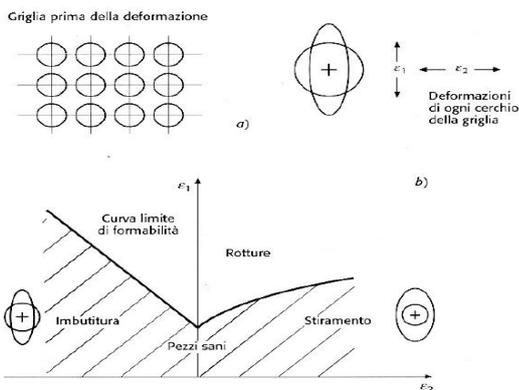
$$\frac{\epsilon_b}{\epsilon_s}$$

Prendiamo un provino dalla lamiera o lo deformato mediante prova di trazione.  $\epsilon_b$  è la deformazione in direzione della larghezza e  $\epsilon_s$  in direzione dello spessore ( lo spessore non si deve ridurre troppo altrimenti la lamiera non è lavorabile).

Gli acciai per imbutitura hanno valori pari a 3. Nella simulazione ne teniamo conto con il criterio di plasticità, criterio di Hill e non di Von Mises

$$A(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + B(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \dots$$

le costanti mi attenuano il peso della tensione, fornisco l'anisotropia e il programmi mi calcola le costanti.



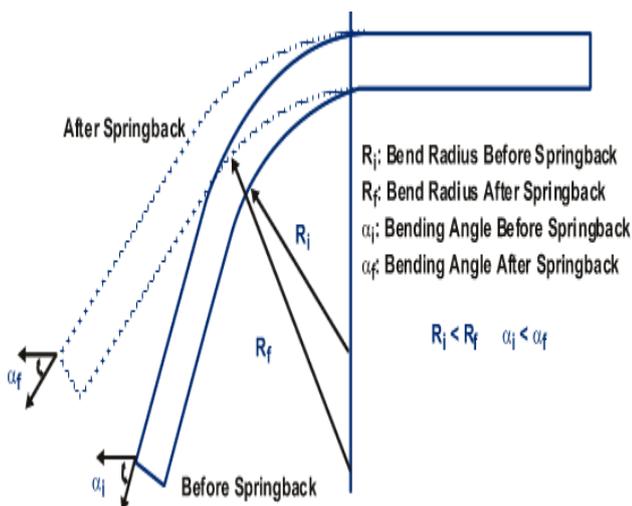
### Curva limite di formabilità

$\epsilon_1$  (deformazione massima sul piano lamiera) E' positiva. Se fosse negativa come la  $\epsilon_2$ , avremmo solo compressione e non deformato. C'è una curva per ogni materiale. La deformazione dello spessore lo ricavo dall'anisotropia e comunque la somma delle deformazione è nulla (processo di deformazione a volume costante).

Aspetti:

- 1) processo soggettivo: è l'operatore, grazie all'esperienza, a definire il raggiungimento di instabilità e di formabilità
- 2) diagramma statico: metto la deformazione finale che ho ottenuto a fine processo (ma non la storia della deformazione), a monte il materiale subisce più deformazioni ( dai rompigrinze alla variazione della direzione del moto). Si snervam si danneggia quindi il limite di deformabilità diminuisce. Non tengo conto di ciò. E' stata creata prima della simulazioni. I primi prototipi di stampi sono in resina. Si ottenevano pezzi di prova. Sulla lamiera da stampare si disegna un cerchio. Dopo il processo se avevo una  $\epsilon_1$  di trazione e una  $\epsilon_2$  negativa avevo altrimenti un ellissoide più grande del cerchio. Confrontando poi il semiassse maggiore e quello minore con il raggio, trascurando se ci fosse stato la rotazione degli assi principali capivo il tipo di deformazione

### Spring back



Ritono elastico, è naturale. Concluso il processo di stampaggio le tensioni elastiche vengono rilasciate, la deformazione plastica è recuperata. Presente in tutti i processi e in questo caso è importante (alcune zone sono deformate in zona elastica). Quindi cambia la forma.

Cambia sia il raggio sia l'angolo di piegatura.

## Abacus-Esercitazioni

Abaqus lo usiamo come simulatore statico implicito.

Documentations→manuale→example problem manuale →1.1 →1.3→ 1.3.1→ricalcatura provino circolare

Abaqus→standard→solutore statico implicito  
→explicit→ solutore dinamico esplicito

Figure 1.3.1-1 simulazione bidimensionale sul piano di simmetria dell'oggetto assialsimmetrico 3D ( l'asse di simmetria è la verticale per default)

Ipotesi e semplificazioni:

- lo stampo è considerato corpo rigido ( indicato con una linea, superficie di contatto)
- si simula soltanto ¼ del provino per risparmiare tempo di calcolo
- si considera come se tutti e due gli stampi si muovessero ( nella realtà solo uno)
- si usa metà oggetto

Crea modella database→ Abaqus standard

Zona in basso→interfaccia linea di comando

module→a seconda del modulo cambiamo i pulsanti

part→definizione geometrica

property→ definizione caratteristiche ( meccaniche, termiche, ecc)

assembly→ per mettere insieme più parti

step → definizione gruppi di operazioni che si intendono fare ( ad es. prima si fa scendere il premi lamiera poi si fa scendere il punzone ecc) → in ogni step cambiano le condizioni al contorno

interection→ si definiscono attrito, superfici di contatto tra le parti messe insieme in assembly

load→ applico i carichi e condizioni vincolari non al singolo elemento ma all'insieme

mesh→ effettua la mesh

job→ fa partire la simulazione

visualitation→ per richiamare il postprocessore

testo centrale per inferenza

creiamo lo stampo

-  → appoggiamo.
- creab. righe

 crea una linea orizzontale

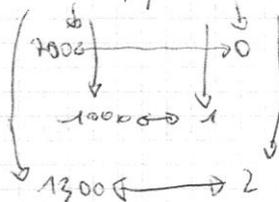
 per dimensione

lungo linee in modo equivalente (reference point) e cui si danno le rotte/parole

↳ menu a tendina → tools → reference point + elemento al punto (o da le coordinate nella barra in basso) ↓ lo mette lo stesso dello stampo

**Property** parte: pezzo

 → edit materiale  
 ↳ mechanical elastic  
 ↳ elasticity → modulo di ~~Young~~ <sup>Young</sup>, poisson ratio  
 ↳ plasticity → plastic → yield, plastic strain



per creare una linea

 → OK

↓ modificare  
 → edit curve

dimore in history output  
domen → dt → tempo  
every movements: 1

displacement →  $\nabla$  manifold

Interaction

→ selezione superficie motor (stato vertebrale)

↳ lato verso il peso  $\nabla$

selezione superficie slave

↳ regione di movimento → selezione superficie superiore e laterale del peso (con punto shift)

finite sliding

node to surface

degree of something 0, 1, 2

adjustment → se i nodi sono vicini durante il contatto

test a low a destra



targeted

friction foundation; penalty

facile costante per il suo peso inferiore

Load

$\nabla$  no sliding condition

2 ore  
results

10/06/2024

abbiamo aumentato l'alturas del pezzo  $\rightarrow$  deformazione =  $\ln 2 = 0,7$   
media

a contatto con gli stenci la deformazione è minore rispetto alle  
parte centrale del pezzo

se gli elementi tetraedrici si deformano molto i risultati  
sono comunque accettabili

se però gli elementi diventano triangolari i risultati non sono corrette  
con i codici impliciti non si può risolvere il problema (a parte  
per elementi più piccoli in poche alcuni punti)

con codici espliciti  $\rightarrow$  mesh adattative  $\rightarrow$  spostamento nodi  
quando la distorsione è troppo elevata per ritornare a forme  
più regolari (per il livello CAD, no tensioni e deformazioni)

fattore di riaccamento =  $\frac{\text{diametro}}{\text{spessore}}$   $\frac{\text{alturas}}{\text{diametro}}$

è il rapporto a elevato e ha più di un indovimento



La linea dell'inflessione  
è la trazione in  
questo punto

<3 se no posso avere  
instabilità

$\downarrow$   
e non introduce simmetrie  
nel modello il software  
non la considera

mesh adattativa

Lo consente di considerare processi con forti distorsioni degli elementi  
Lo il tempo di calcolo di integrazione negli espliciti risparmiando i calcoli  
invece degli elementi si sono avere elementi tutti molto piccoli

condizioni al contorno

no limiti sulle dimensioni del pezzo (diventano l'ingombro)

pezzi  $\geq 8$  volte profondità impronta  
~~di diametro~~

$$\frac{\text{diametro impronta}}{\text{diametro sfera}} < 0,375$$

prendiamo un pezzo sfera 10 mm e largo 30 mm

problema omisimmetrico  $\rightarrow$  si simula mezzo sfera (e metà pezzo)

il pezzo rimane libero la parte che analizziamo

Le condizioni di vincolo per rendere il pezzo isotattile

un piano su cui è appoggiato (vincolo in dir. verticale)

un piano sul lato verticale esterno (per vincolo in dir. orizz.)

all'interno c'è vincolo di simmetria

Le deformazioni elastiche devono essere uniformi reversibili (dobbiamo essere sufficientemente lontani dal bordo)

piccole modifiche nei materiali alterano molto i risultati

materiale = acciaio un troppo duro per non avere impronta troppo piccola ( $R_{p0.2} = 600 \text{ MPa}$ ,  $R_m = 1200 \text{ MPa}$ )

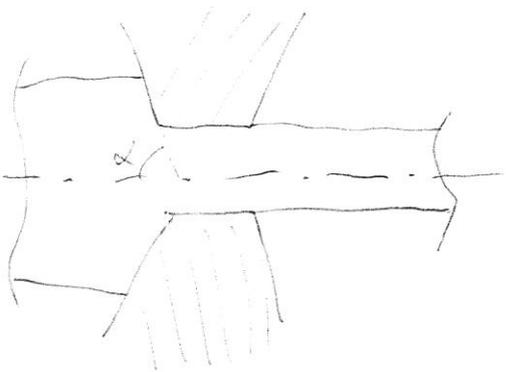
non sappiamo valore attrito sfera-pezzo  $\rightarrow$  si confrontano risultati di simulazione e sperimentali

facile una prima prova senza attrito (frictionless)

" " " " con attrito di incollaggio  $\rightarrow$  con modo e contatto con le stampi non si misura più (contacting friction)

15/09/2014

Simulazione trafilatura - o problema cinematico



$$\phi_5 \rightarrow \phi_{4,2}$$

$$\alpha = 12^\circ$$

$$\mu = 0,08$$

$$Y = 400 \text{ MPa}$$

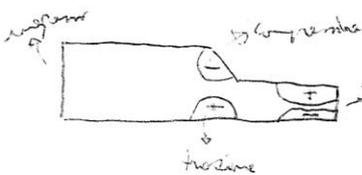
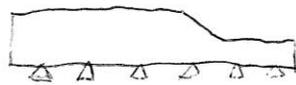
$$\begin{cases} \sigma = 300 \text{ MPa} \\ E = 1 \end{cases}$$

simulazione discreta di un processo continuo

↳ condizioni al contorno adatte a considerare una sezione di filo e a considerare lo stato nel tempo

Condizioni al contorno:

- simmetria nell'asse dello spessore



la distribuzione delle tensioni non è uniforme  
 a causa per lo spessore totale delle  
 sezioni interne abbiamo le stesse condizioni

nella simulazione la tensione dovuta al rullo che trafilava non si considera (come solo a tenere dritto il filo)

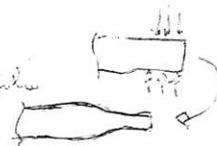
In realtà la trazione del filo viene considerata soprattutto una trazione su tutta la sezione di uscita (resonanza piena) anche se nella realtà è forte solo sul diametro esterno e lo stesso si incurva

contanti nel tempo:

- ruolo dello spessore già con la forma



- ricerca su parte dello spessore (come nella realtà)



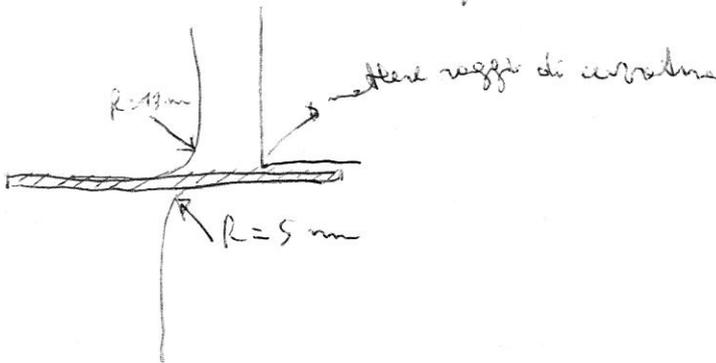
22/06/2013

Indentazione profonda di una sfera elastica

$$\epsilon = \left(\frac{v}{k}\right)^{1/2}$$

disegnare curva per deformazione da 0 a 0,5

Lo spessore molto più grande della sfera



la lamiera deve rimanere piana

1° step applico forza (step breve)

2° step passo dentro matrice e mettilo

3° step togliere il controllo di contatto fermando la lamiera e verificare il ritorno elastico

si usano elementi shell (trave in 2D)

Lo spessore forza di taglio

Rappresentazione della mesh della lamiera

cogni nodo corrisponde una linea (spessore)

23/05/2014

Sintesi intuitiva con metodi approssimati (gran statica)  
 risolvere fenomeni inerziali (si accettano ma piccoli)  
 ↳ accelerazioni, velocità  
 in circuiti ↔ en. dif. plastiche

~~propagazione~~ sollecitazioni meccaniche che si propagano nell'oggetto  

 l'intervallo di tempo tra un incremento  
 e l'altro deve essere inferiore al tempo  
 di propagazione dell'onda

ipotesi:  
~~massima~~ tutte sollecitazioni = costanti  
 esplicito  
 il tempo di calcolo aumenta con il quadrato dei gradi di libertà  
 del corpo  $t \propto n^2$

esplicito  
 se hai  $n$  contatti hai  $n$  forze reattive (non c'è il problema  
 di garantire la non penetrazione come nei codici impliciti)  
 il tempo di calcolo proporzionale al numero di nodi  $t \propto n$

implicito non hanno spostamenti  
 la soluzione non si blocca → da sempre un risultato (anche sbagliato)

il colpo è una lancia con una palla a bassa velocità:



se lo colpisce ad alta velocità



noi vogliamo il gran  
 caso → sollecitazioni  
 distribuite

però controllando la velocità si rischia di avere la pessima distribuzione della deformazione (non sempre esagerare)

↓  
 em. anulare < em. dif. plottino ⇒  $E_c < 5 \div 10 E_t$  = ALLIE  
↓  
totale

velocità del fenomeno & velocità del min ⇒  $v_p < 1 \times C_s \sqrt{\frac{50 \text{ m}}{5}}$

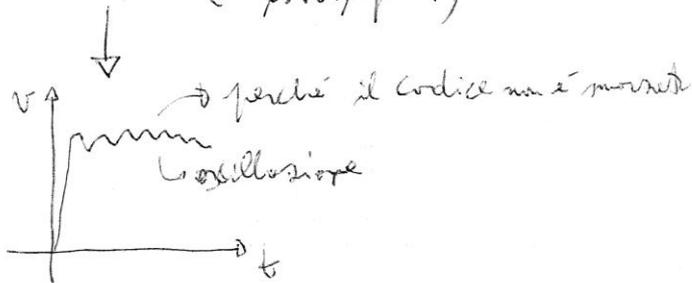
si fa una prova salaria a  $50 \frac{\text{m}}{s}$  poi si abbassa a  $25 \frac{\text{m}}{s}$

il controllo l'è. chetico

↓  
 $\frac{1}{2} m v^2$  → riducendo la velocità della rete l'è. chetico si rischia di 4 volte

nessa la velocità  
 finale ho stato delle  
 tensioni non rimane costante

si controlla la velocità di un punto della lamiera ad es. il punto centrale (history plot)



se oscilla così: non va bene

i punti alle estremità non devono vibrare troppo  
 elementi non troppo piccoli → 100 mm di lamiera → 50 elementi  
 e uniformi

## Ultima lezione abacus

Output → aggiungere STH

History plot → visualizza forza e spostamento punzone

Create → new model

Import → model

Part → Sheet/Die → tasto destro → elimina

Step → eliminare gli step di stampaggio

Load → eliminare carichi e vincoli

Step → generare step statico implicito

Model → edit → model → restart → read data from job

\*Visualizzazione\*

viewer → overlay plot → create → alla fine dello step → plot overlay

getting started with abacus

predefine fields create

export a print Tinf

Von Mises,  $PEE\phi$  (def equ. Plastica) è la stessa prima e dopo il ritorno elastic.

→ mostra Deformazione principale e tensione principale nel piano della lamiera

Tensione normale media ( $\sigma$  Press) non è molto corretta perché usano elementi shell

Spessore (STH)

Energia nel tempo : cinetica ALLKE // totale interna ALLIE

Per stampare andamenti → history plot → create XY data

Report → print XY data per avere i dati in tabella ( file formato ASCII)

## INTRODUZIONE

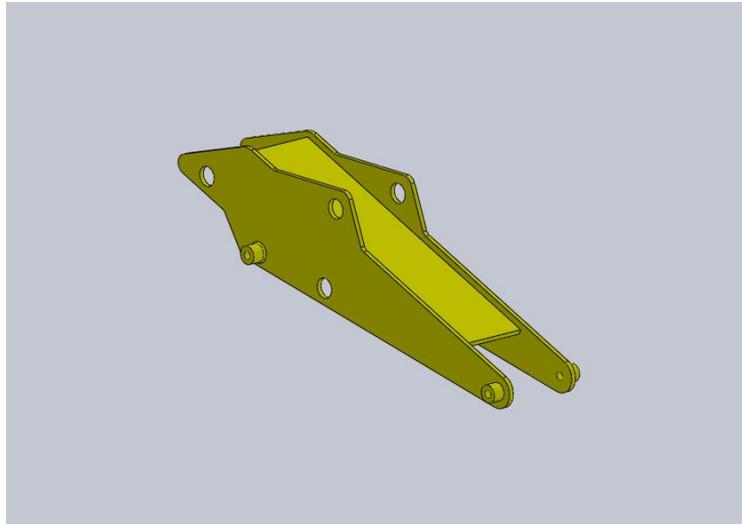


Figura 1 - Componente sul quale è stato effettuato lo studio

L'obiettivo di questa esercitazione consiste nella progettazione di uno stampo a iniezione per la produzione del componente rappresentato in Figura 1 e nella descrizione della lavorazione di uno dei due tasselli mediante lavorazione CNC. L'oggetto in questione è un giocattolo in materiale polimerico, e rappresenta una parte del braccio di una riproduzione in scala di una macchina escavatrice. Il software utilizzato è VISI20.

Il disegno del componente da studiare, realizzato tramite software CAD, è stato importato nell'ambiente di simulazione e da lì sono state svolte tutte le scelte progettuali che hanno portato alla realizzazione dello stampo. Nella Figura 2 è rappresentato il complessivo da cui è stato estratto il componente.



Figura 2 - Complessivo da cui è stato estratto il componente

configurazione ideale, poiché in questo modo, è possibile collocare nelle posizioni migliori gli attacchi di colata che consentono l'ottimale riempimento della cavità. Quest'ultima, a sua volta, comporta una migliore qualità del componente realizzato.

L'analisi di sforno è un passaggio fondamentale al fine di ottenere una corretta estrazione del pezzo. Infatti impostare una spoglia errata comporterebbe la creazione di sottosquadri che andrebbero a contrastare l'estrazione del componente stesso. Nel caso in questione, scegliendo adeguatamente il piano di separazione, è stata ottenuta una situazione di sforno ottimale, che non ha reso necessaria una eventuale modifica della geometria del pezzo. Si ha unicamente un problema di spoglia minima in corrispondenza delle estremità dei bracci anteriori del pezzo, un fenomeno del tutto irrilevante poiché non va a compromettere la funzionalità del pezzo. In Figura 5 è possibile osservare la configurazione del piano di separazione dello stampo.

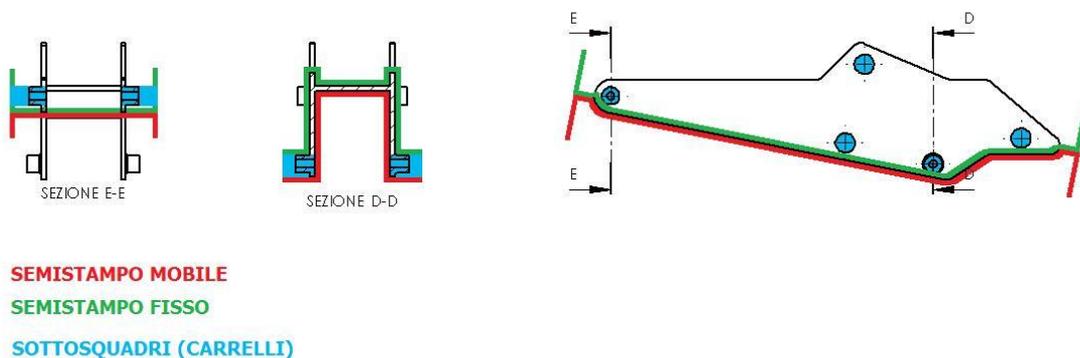


Figura 5 - Piano di separazione dello stampo

I sottosquadri sono delle irregolarità geometriche che impediscono una corretta estrazione del pezzo dallo stampo alla fine del processo. Nella Figura 6 è rappresentato un esempio evidente di sottosquadro.

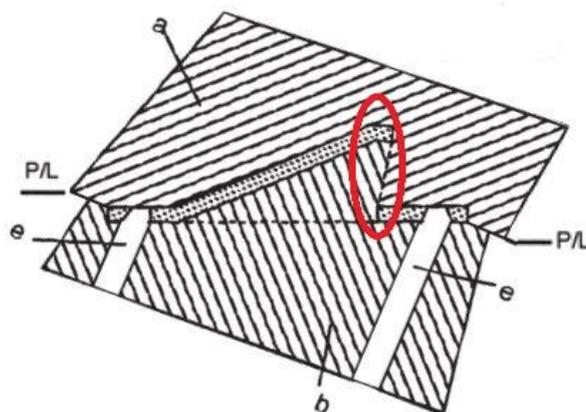


Figura 6 - Sottosquadro

Come si può notare, a causa della geometria non ottimale del componente, il pezzo stesso tenderebbe ad impedire l'apertura degli stampi. Questi problemi si possono risolvere tramite una variazione del piano di separazione o l'impiego di elementi mobili come carrelli e tasselli.

Nell'esempio studiato, una volta definito il piano di separazione, i sottosquadri sono

raffreddamento. Nella Figure 8-9 sono rappresentati i due tasselli, superiore ed inferiore identici per le due impronte.

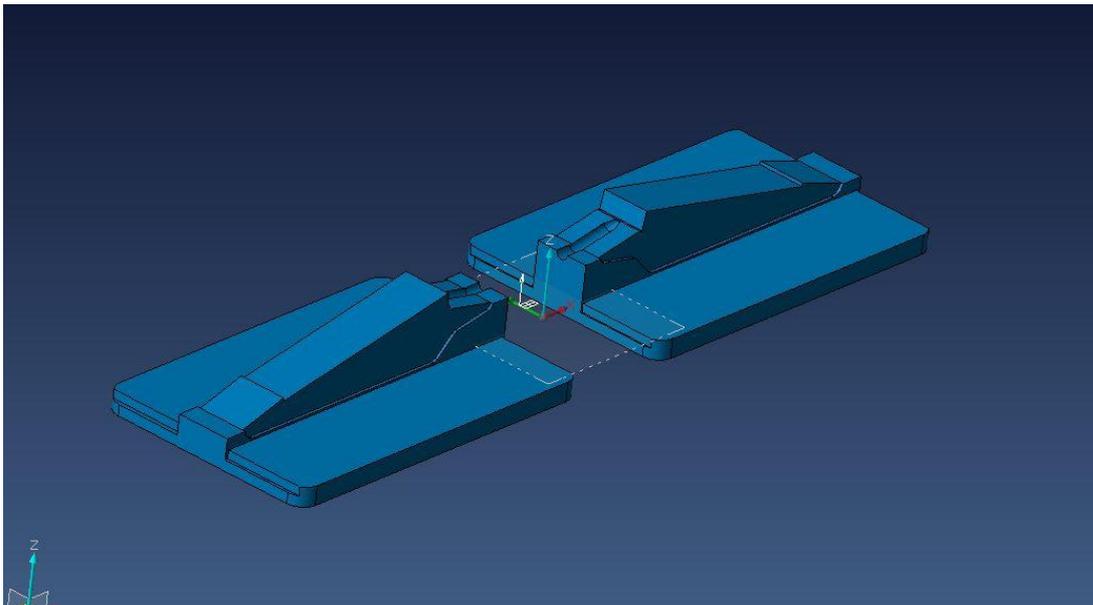


Figura 8 - Tasselli inferiori

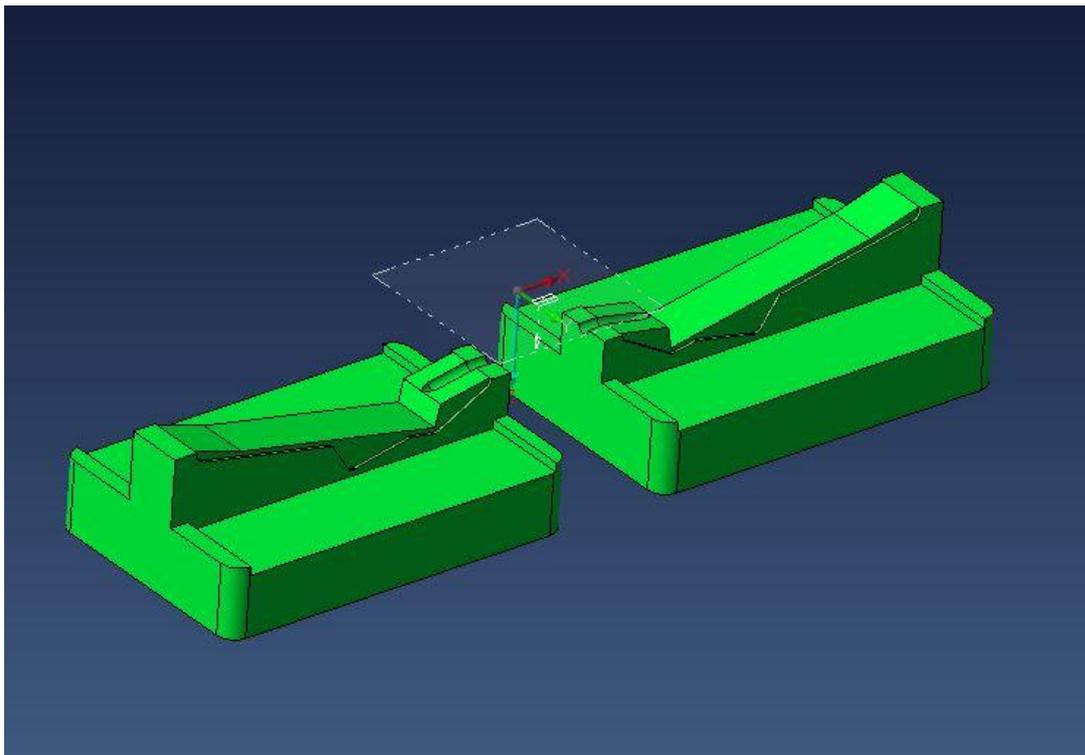


Figura 9 - Tasselli superiori

Una volta definiti i tasselli si può proseguire all'inserimento degli elementi standard. L'anello di centraggio permette di allineare lo stampo con la piastra fissa della pressa, e quindi, l'accoppiamento con l'ugello lato iniezione; la boccia di iniezione, posizionata mediante un foro sull'anello di centraggio, rappresenta il punto di ingresso del materiale polimerico, si accoppia con l'ugello permette il passaggio del fuso. Nella Figura 10 è possibile osservare la configurazione di tutti gli elementi standard posizionati nello stampo.

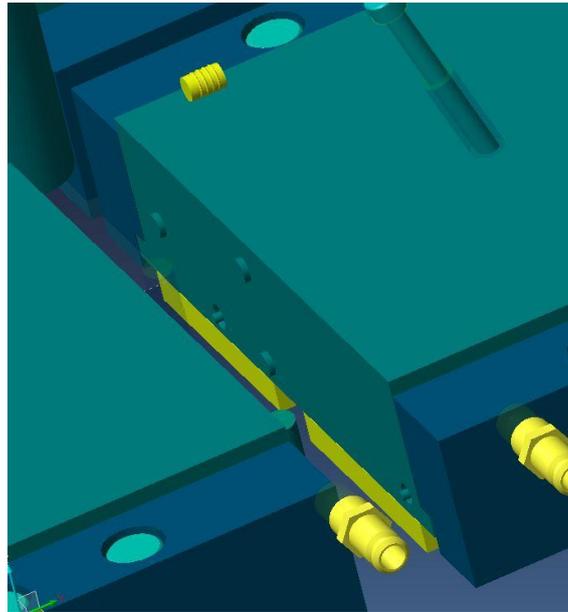


Figura 11 - Carrelli, particolare

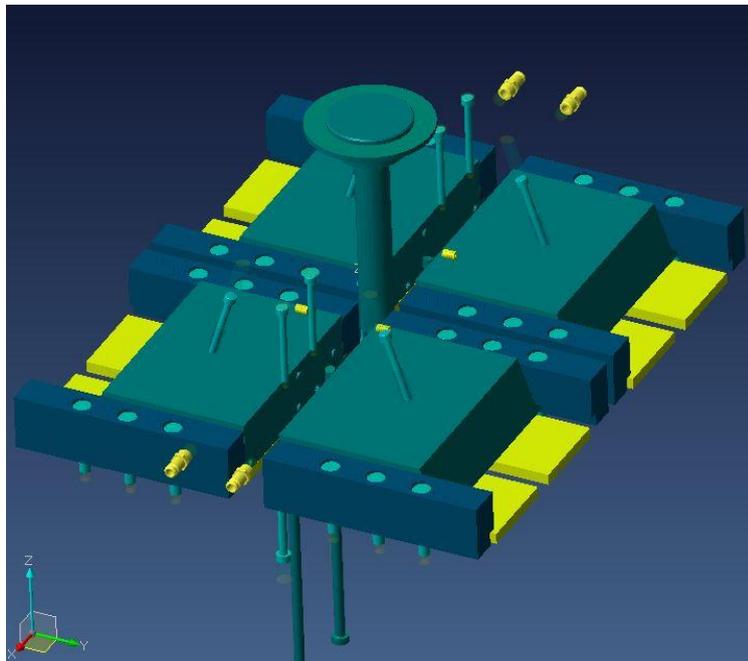


Figura 12 - Configurazione degli elementi mobili

Per quanto riguarda i canali di alimentazione, il polimero passa nella boccia e si dirama successivamente lungo due canali. Questi si dirigono in direzioni opposte per raggiungere le due impronte dello stampo. L'attacco di iniezione è stato posizionato in corrispondenza della parte posteriore centrale del pezzo. Questa posizione, dalle simulazioni effettuate durante il corso di "Progettazione di processo con metodi numerici" è quella ottimale sia dal punto di vista del corretto riempimento sia per la qualità ottenuta. Questo è testimoniato anche dal fatto che, anche nel pezzo reale, l'impronta di iniezione è situato in quella stessa posizione. I dati geometrici dei canali di iniezione sono i seguenti:

**Gate:**

- Tipologia: Iniezione conica
- Diametro 1: 1 mm

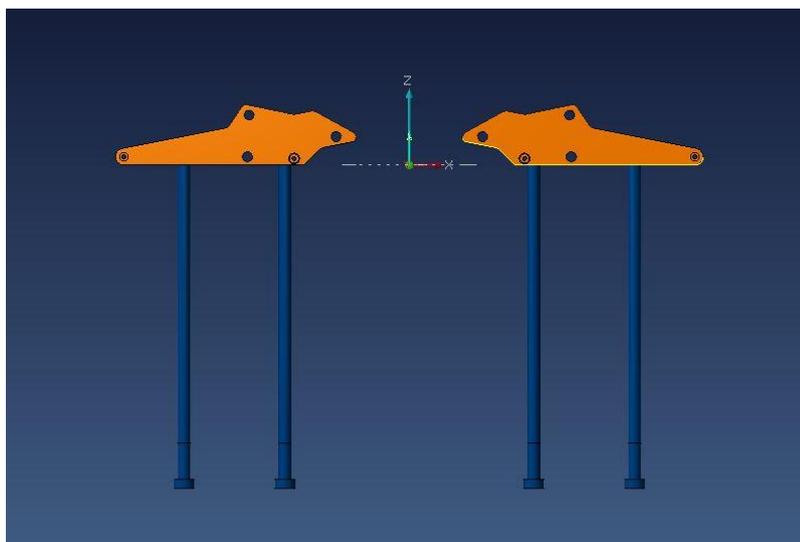


Figura 14 - Sistema di estrazione

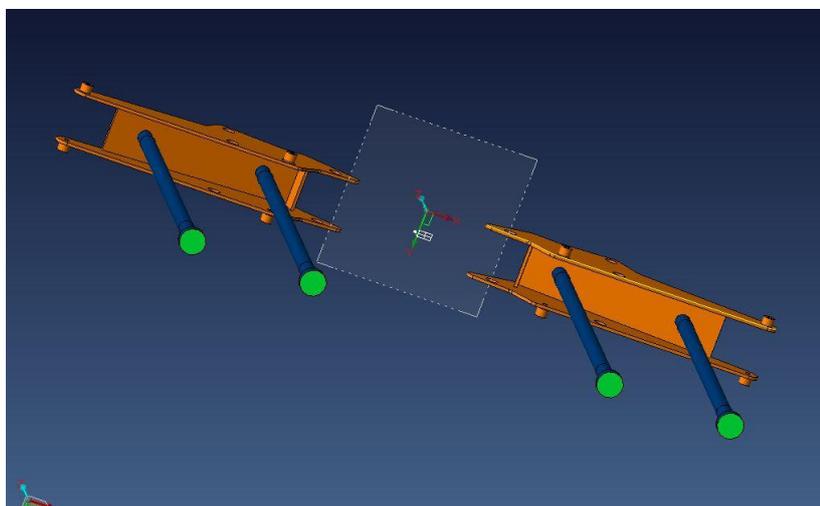


Figura 15 - Sistema di estrazione2

Il sistema di raffreddamento, a causa delle dimensioni piccole del pezzo, è piuttosto ridotto. E' caratterizzato infatti da un gruppo singolo di canali per ogni impronta. Questi sono posizionati sul tassello superiore e hanno una forma a "C". Nelle Figure 16-17 viene

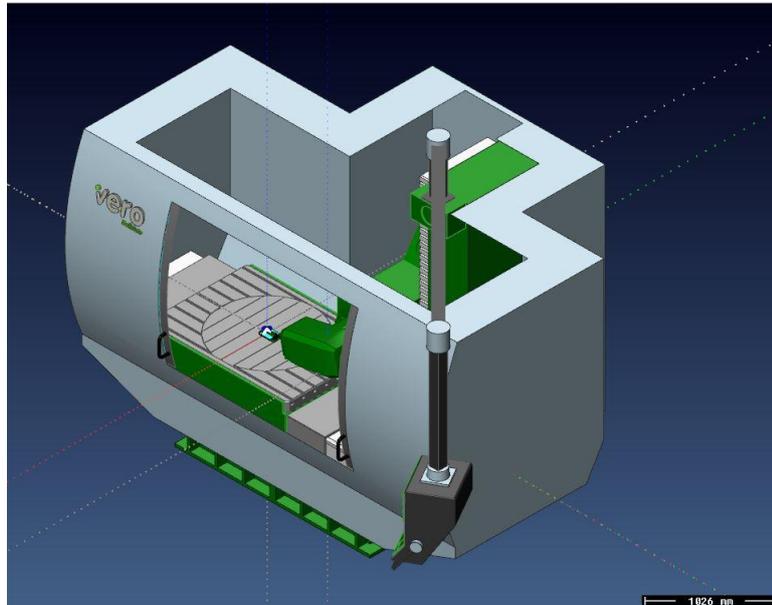


Figura 18 - Fresatrice Standard Milling

Il componente lavorato è il tassello inferiore. Viste le ripetute simulazioni, dato che il componente in questione presenta superfici oblique, si è proceduto ad ulteriori finiture su tali piani, mantenendo una buona qualità senza aumentare i costi di produzione. Si è così giunti a una serie di 3 lavorazioni principali.

#### ▪ Sgrossatura

Una volta effettuata la spianatura del grezzo in cui sono stati eliminati 2 mm di sovrametallo, è stata effettuata una sgrossatura con una punta piatta dal diametro di 10 mm. Nella Figura 19 si può osservare l'operazione e il percorso utensile.

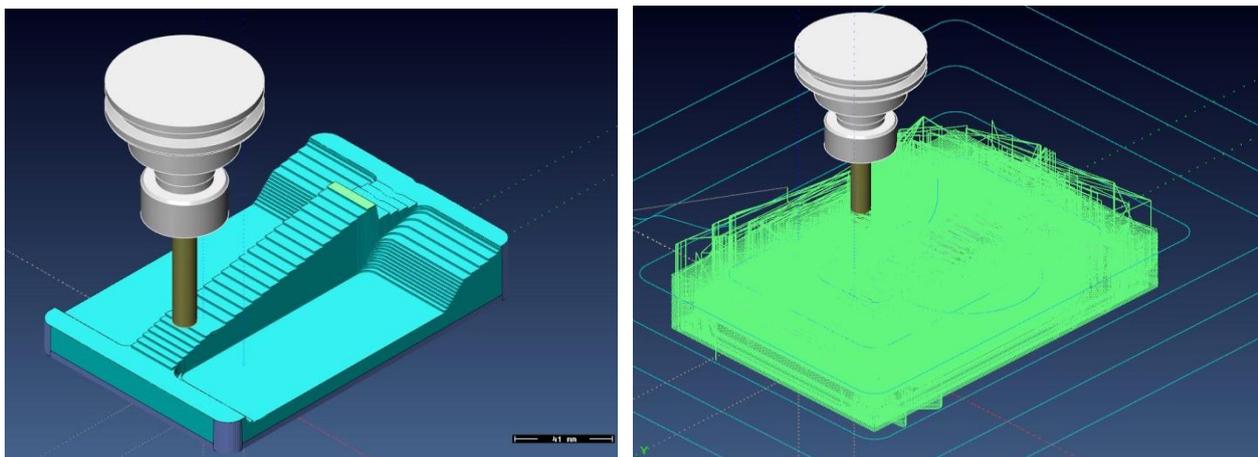


Figura 19 - Operazione di sgrossatura e relativo percorso utensile

#### ▪ Finitura

Successivamente è stata effettuata la finitura. Viene eseguita tramite una fresa dalla punta sferica di 6 mm. È una delle operazioni più delicate poiché si desidera ottenere una superficie con bassi valori di rugosità, in modo da garantire una battuta perfetta con il tassello femmina nelle zone dei canali di iniezione e nel contorno. Nella Figura 20 si può

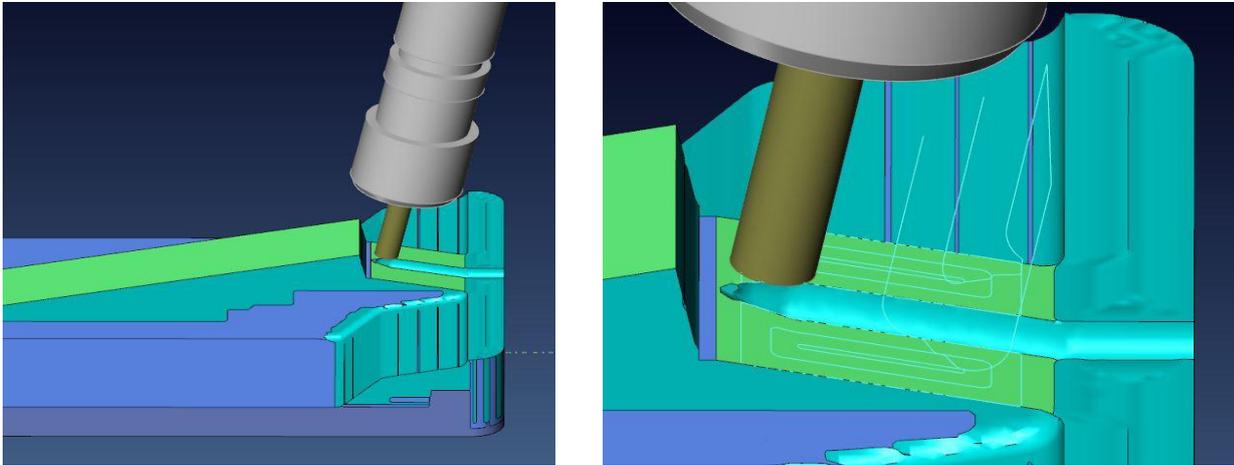


Figura 23 - Finitura superficie obliqua posteriore e relativo percorso utensile

La parete verticale è stata lavorata con una fresa piatta dal diametro di 10 mm in quanto il codolo della fresa da 6 mm andava a cozzare sul tassello inferiore durante la lavorazione; nella Figura 24 è rappresentata la lavorazione.

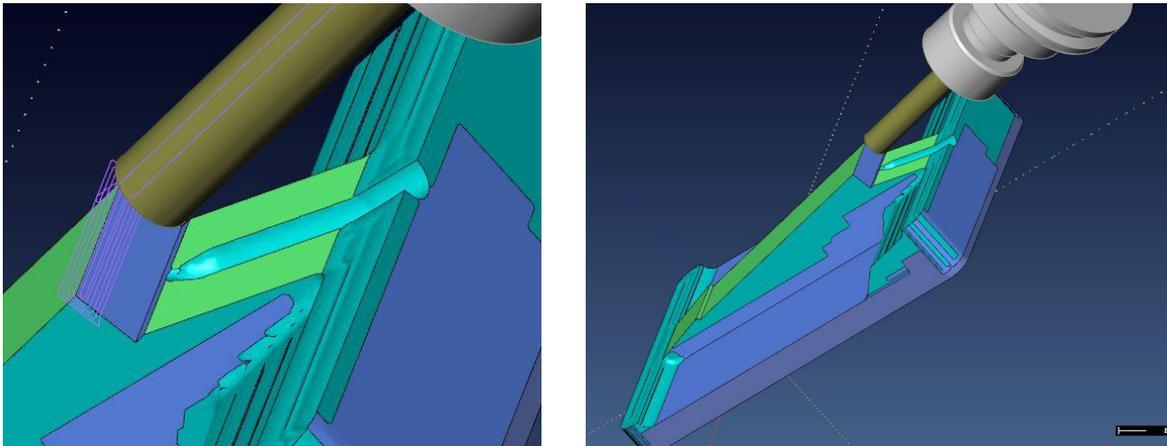


Figura 24 - Finitura superficie verticale e relativo percorso utensile

Nella Figura 25 è rappresentato l'andamento delle tolleranze nella lavorazione; come si può notare la presenza di sovrametallo è minima.

## PREVENTIVAZIONE

La trattazione analitica prevede inizialmente il calcolo dello stampo ad una singola impronta, per poi considerare il numero ottimale di impronte che permette di minimizzare i costi.

Il costo dello stampo a singola impronta si divide in tre parti:

- Costo di progettazione
- Costo di fabbricazione
- Costo di collaudo e messa a punto

Il secondo termine è quello che pesa di più sul totale; infatti, mentre il costo di progettazione e il costo di collaudo e messa a punto insieme compongono un 30% del costo totale, il costo di fabbricazione rappresenta il 70% del totale.

Il costo di uno stampo monoimpronta si calcola dunque come:

$$C_{s1} = C_{prog} + C_{fab} + C_{collmp}$$

Conoscendo le percentuali di incidenza, si può dunque ottenere il costo dello stampo ad una impronta con la seguente espressione:

$$C_{s1} = \frac{C_{fab}}{0.7}$$

Si va dunque a determinare il costo di fabbricazione come:

$$C_{fab} = C_p + C_{inc} + C_l$$

dove  $C_p$  rappresenta il costo delle piastre,  $C_{inc}$  il costo di incastellatura e degli accessori (elementi standard meno il sistema di estrazione) e  $C_l$  il costo di lavorazione per ottenere le figure.

Il costo delle piastre si determina con la seguente espressione:

$$C_p = 516.46 + 0.925 \cdot 10^{-3} \cdot A_p \cdot h^{0.4}$$

dove  $A_p$  è l'area delle piastre in  $\text{mm}^2$ , funzione del particolare da stampare, e  $h$  è l'ingombro complessivo dei due inserti ( $h_{matrice} + h_{punzone}$ ).

$C_{inc}$  si determina in base ai costi degli elementi standard ottenuti dai cataloghi dei fornitori.  $C_l$ , costo di lavorazione, si divide in diverse componenti:

1. Dispositivo di estrazione:

$$C_1 = 2.5 \cdot N_E \cdot M$$

dove  $N_E$  è il numero stimato di estrattori, determinato come:

$$N_E = 0.05 \cdot \sqrt{A}$$

con  $A$  corrispondente alla proiezione del particolare da stampare. Vengono dunque

dove  $k_3$  dipende dal grado di complessità.

Una volta determinato il costo di fabbricazione, si può dunque risalire al costo totale di uno stampo monoimpronta. Per il caso in questione sono stati effettuati i calcoli, rappresentati in Tabella 4:

Dati base		Costo di lavorazione	
Lunghezza pezzo (mm)	145	Numero estrattori	2
Larghezza pezzo (mm)	27	Costo orario del processo (€/h)	40
Margine (mm)	75	<b>C uno (€)</b>	<b>200</b>
Ingombro (mm <sup>2</sup> )	3915	Geom interne	13
		Fori/Dep interne	0
		Geom esterne	11
		Fori/Dep esterne	0
		Xi	0,13
		Xe	0,11
		<b>C due (€)</b>	<b>294</b>
		<b>C tre (€)</b>	<b>477</b>
		<b>C quattro (€)</b>	<b>5200</b>
		<b>C cinque (€)</b>	<b>0</b>
		<b>C sei (€)</b>	<b>0</b>
		k1 (opaco,standard)	0,15
		<b>C sette (€)</b>	<b>116</b>
		k2 (numerose circa +- 0,25mm)	0,05
		<b>C otto (€)</b>	<b>15</b>
		k3 (più di quattro gradini)	0,25
		<b>C nove (€)</b>	<b>626</b>
		<b>Costo lavorazione (€)</b>	<b>6927</b>

Costo delle piastre	
Area proiettata (mm <sup>2</sup> )	52215
h_punzone (mm)	31
h_matrice (mm)	35
h (mm)	66
<b>Costo_piastre (€)</b>	<b>775</b>

Costo incastellatura	
Anello centraggio	20
Colonne guida	48
Boccola iniezione	40
Innesti raffreddamento	5
Tappi raffreddamento	3
<b>Costo incastellatura (€)</b>	<b>116</b>

Tabella 4 - Componenti costo di fabbricazione

Si ottengono dunque i seguenti valori del costo di fabbricazione e di conseguenza del costo totale dello stampo con una impronta, illustrati in Tabella 5:

<b>Costo Fabbricazione</b>	<b>7818</b>
<b>Costo Stampo Monoimpronta</b>	<b>11168</b>

Tabella 5 - Calcolo costo stampo monoimpronta

Una volta definiti questi costi, si procede con la determinazione del minimo costo totale degli N pezzi da produrre. Il costo totale è dato dall'espressione seguente:

$$C_{tot} = C_S + C_T + C_M$$

dove  $C_S$  è il costo dello stampo a  $i$  impronte,  $C_T$  il costo di trasformazione e  $C_M$  il costo della materia prima.

- Il costo dello stampo si ricava da:

Dati produzione	
Tempo ciclo (h) (20s)	0,005555556
Numero pezzi	200000
Costo fisso pressa (k0)	22,5
Coeff esponenziale	0,7
N impronte ottimale	1,981432244
<b>N impronte scelto</b>	<b>2</b>
Costi fissi	
k1 coeff lineare pressa	0,15
Forza di chiusura monoimpr (kN)	115
Costo Materiale al pezzo (€)	0,013545
<b>Costo Materiale produzione (€)</b>	<b>2709</b>

<b>COSTO TOTALE (€)</b>	<b>52518</b>
-------------------------	--------------

Tabella 6 - Calcolo numero impronte ottimale e costo totale stampo

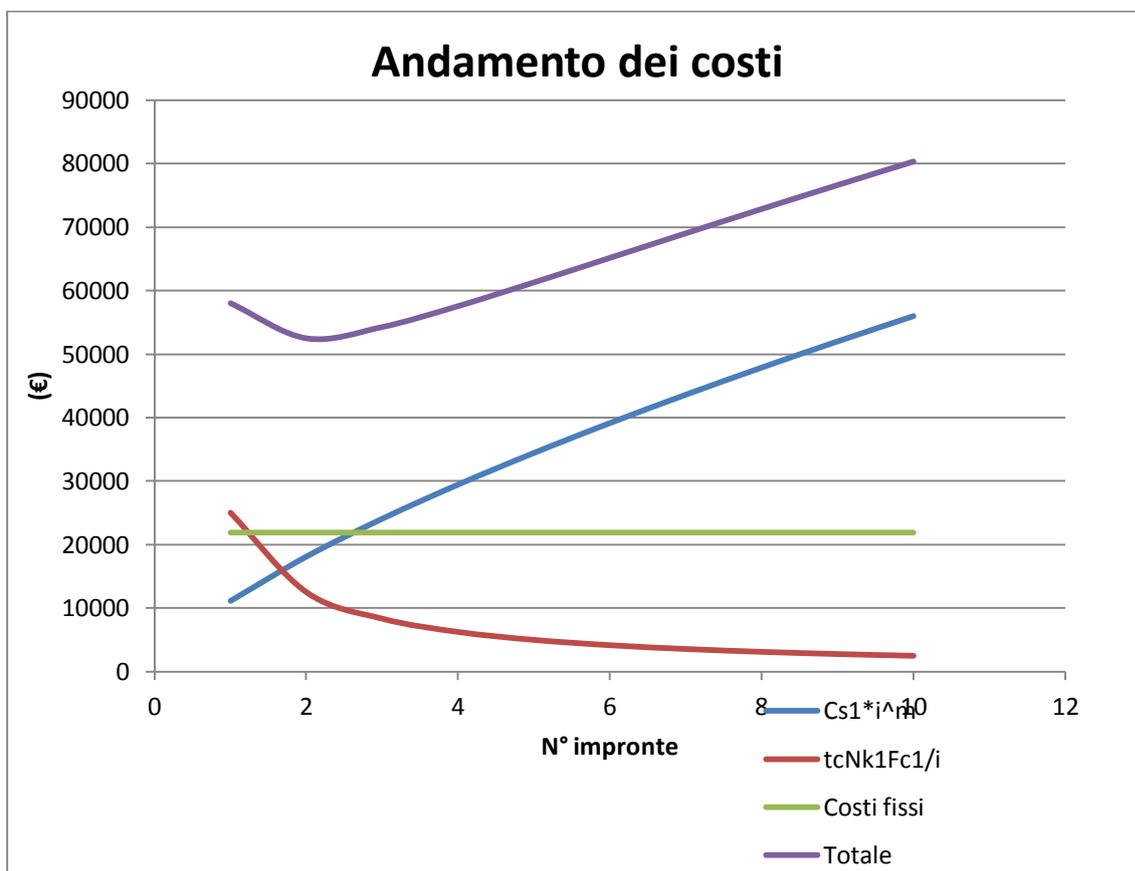


Figura 26 - Andamento dei costi

Come si può notare nella Figura 26 il minimo costo totale si osserva proprio in corrispondenza del numero di impronte ottimale ottenuto.

Il costo analitico è stato confrontato con un applicativo online, reperibile dal sito :

<http://www.custompartnet.com/>

Andando ad inserire i parametri richiesti è stato ottenuto il risultato osservabile in Figura 27:

produzione.

Le funzioni relative all'inserimento, durante la progettazione, di componenti specifici degli stampi (quali ad esempio gli elementi standard) risultano semplici da utilizzare ma l'esecuzione di modifiche a seguito di variazioni progettuali presenta delle difficoltà.

I comandi meno intuitivi sono quelli relativi al disegno bidimensionale e tridimensionale. La realizzazione di geometrie complesse (anche bidimensionali) e la modifica di solidi non sono semplici da effettuare. Lo stesso discorso vale per l'orientamento delle parti nello spazio rispetto a sistema di riferimento. Le difficoltà riscontrate in questo ambito forse sono dovute all'abitudine di utilizzare software dedicati al disegno quali Autocad o Solidworks. Si tratta comunque di funzioni indispensabili (ad esempio nella modifica geometrica dei carrelli) che potrebbero essere migliorate.

La fase più difficile da realizzare è stata quindi quella di sagomatura dei tasselli lungo il piano di divisione dello stampo (definito da una curva complessa).

È stato semplice invece, passare da uno stampo mono-impronta ad uno pluri-impronta, grazie ai comandi di specchiamento degli elementi, per evitare di dover utilizzare uno stampo a tre piastre per il corretto orientamento dei canali di iniezione e per ottimizzare il costo dello stampo stesso.

### Esempio 10 - Stampo a due impronte per flacone (dispenser per colla)

Si tratta in questo caso di uno stampo a due impronte per iniezione di un "dispenser" per colla, caratterizzato da una filettatura interna e una esterna. Un maschio svitabile genera la filettatura interna, mentre quella esterna è generata mediante una cavità scomponibile.

#### Il pezzo stampato

Il dispenser in PE-HD (polietilene ad alta densità) viene avvitato sul flacone che contiene l'adesivo ed è stato disegnato per l'applicazione goccia a goccia dell'adesivo stesso. Un cappuccio, anch'esso in polietilene ad alta densità, viene avvitato sul dispenser predetto, chiudendolo (figure 1 e 2).

#### Lo stampo

Lo stampo a due cavità, visibile in figura 3, presenta due maschi fissi (9) per formare il profilo interno del pezzo. Detti maschi sono collocati in

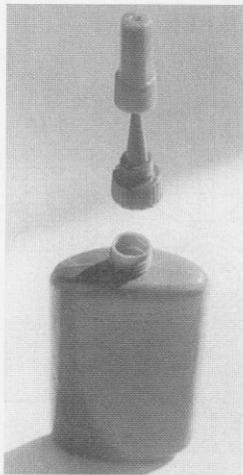


Fig. 1 - Dispenser per contenitore di adesivo e relativo cappuccio filettato.  
Sopra: il cappuccio filettato, al centro: il dispenser, sotto: il flacone.

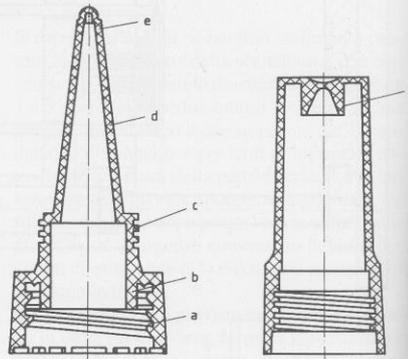


Fig. 2 - Dispenser (a sinistra) e cappuccio filettato (a destra).

a: filettatura interna, b: sede conica di tenuta, c: filettatura esterna, d: tubo dispenser, e: puntale, f: sede conica.

manicotti rotativi filettati (10) dotati di dentatura integrata in presa con un pignone (20).

I maschi filettati (10) sono guidati assialmente mediante bussole filettate (12) la cui filettatura ha lo stesso passo di quello della filettatura interna del dispenser.

Il pignone (20) è montato su una bussola di bronzo con filettatura a passo rapido (21), bussola che viene supportata da 2 cuscinetti a rulli conici (19) alloggiati nel semistampo mobile (a scopo di maggiore scorrevolezza di rotazione). Una vite di acciaio (17) è impegnata nella bussola (21) predetta. La vite è trattenuta nel semistampo fisso.

La filettatura esterna (c) sul dispenser viene generata mediante la cavità scomponibile (6). Le due metà della cavità sono parte del semistampo mobile e si aprono lateralmente. Un totale di quattro perni inclinati (23) montati nel semistampo fisso, comandano il movimento delle parti della cavità scomponibile. I blocchi (24) tengono in posto le metà di ciascuna cavità scomponibile in modo da togliere il carico sui perni inclinati (23) quando lo stampo è chiuso. Le mezze cavità accolgono inoltre le materozze con punto di iniezione capillare a partire dalla bussola di iniezione fino alle cavità stesse.

46 Esempio 10

gono così svitati dalla filettatura generata sui pezzi stampati. Questi ultimi non possono ruotare poiché trattenuti dalle cave profonde 0,5 mm previste sul loro bordo inferiore e che si impegnano sulle corrispondenti dentellature delle bussole (7).

Con l'apertura sulla divisione I, le metà delle cavità iniziano anch'esse il loro movimento di apertura, cosicché i pezzi stampati aderiscono soltanto alla superficie frontale della bussola scanalata una volta che l'apertura sul piano I è completata.

Due catene a rulli (25) sono messe in tensione col movimento di apertura sul piano I. Dette catene sono regolabili in posizione tra la piastra di estrazione (22) e la piastra portastampo (28) sul semistampo fisso.

Avviene quindi l'apertura in corrispondenza del piano II e, con l'aiuto delle bussole coniche (8) che vi sono montate, la piastra di estrazione espelle i pezzi stampati e le materozze rimuovendoli dalle bussole dentellate. La corsa d'a-

pertura sul piano II è limitata dai perni d'arresto (16).

Il pignone presenta 100 denti e i maschi filettati 40 denti. La posizione assiale di ciascun maschio può essere così regolata a incrementi di  $1/40$  del passo della filettatura.

Per la ripresa del gioco sulla bussola filettata a passo rapido, la vite (17) può essere ruotata agendo sulla sua estremità quadrata e fissata in posizione mediante la ranella di aggiustaggio (26).

Il gioco dei cuscinetti a rulli conici può essere a sua volta ripreso con l'aiuto della ghiera filettata (18).

La disposizione prescelta per il meccanismo di svitamento ha il vantaggio che lo stampo è rapidamente operativo appena installato sulla macchina. Con questa soluzione, tuttavia, va fatta attenzione che la vite a passo rapido non risulti molto scentrata rispetto all'asse della macchina poiché genera un momento sulle piastre portastampo durante l'apertura dello stampo.

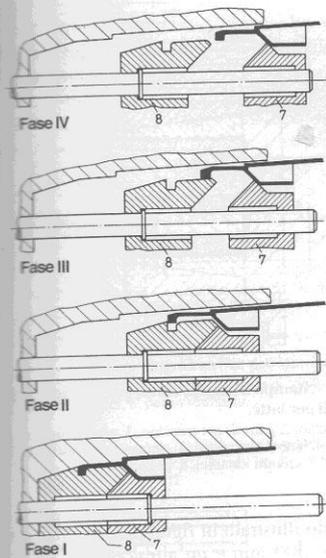


Fig. 2 - Sequenza di estrazione.

**Fase II**

L'anello estrattore (7) viene spinto avanti dal perno estrattore (9). Il pezzo stampato viene sfilato dal maschio mentre i sottosquadra continuano a spingere l'anello di estrazione (8). La parte conica del maschio abbandona ora la superficie interna del pezzo stampato, il cui diametro diminuisce in conseguenza del ritiro, in modo che il bordo generato nell'anello (8) possa essere estratto dal recesso. Si ha poi l'arresto dell'anello (8).

**Fase III**

L'anello estrattore (7) spinge ora completamente fuori dall'anello (8) il bordo del pezzo stampato.

**Fase IV**

L'anello (7) incontra un arresto. Il pezzo stampato viene espulso con getto d'aria. Il getto d'aria utilizzato a questo scopo viene diretto verso la parte interna del pezzo mediante l'inserto valvola (11). Prima che lo stampo venga aperto, l'aria compressa viene forzata sotto lo spigolo di fondo del contenitore, attraverso il semistampo che porta la cavità, allo scopo di facilitare la rimozione del pezzo dalla cavità stessa.

guida.

102 Esempio 35

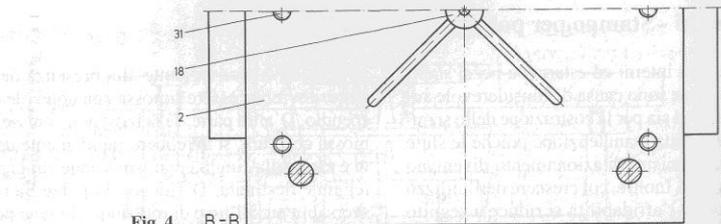


Fig. 4

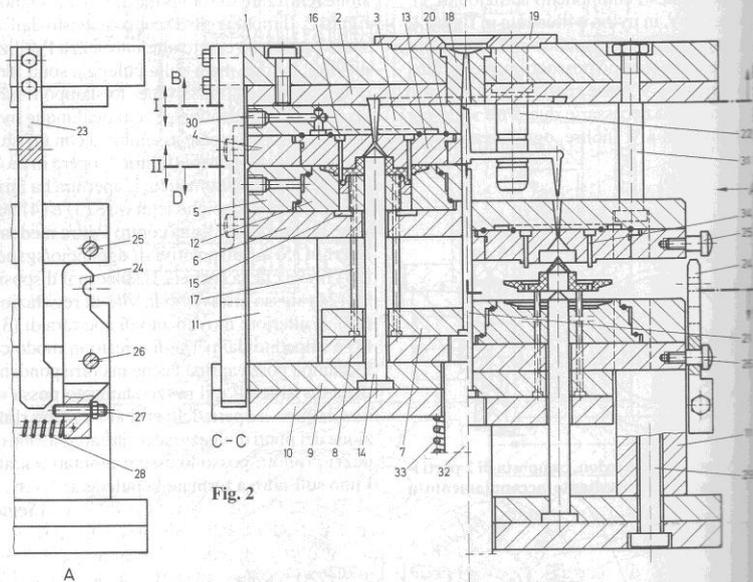


Fig. 2

Fig. 5

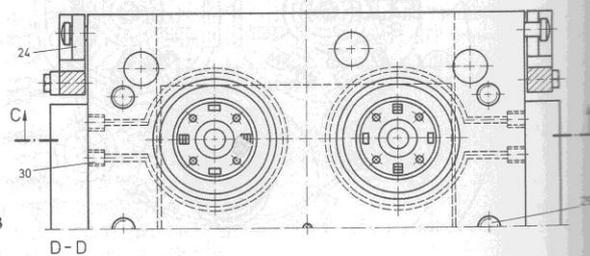
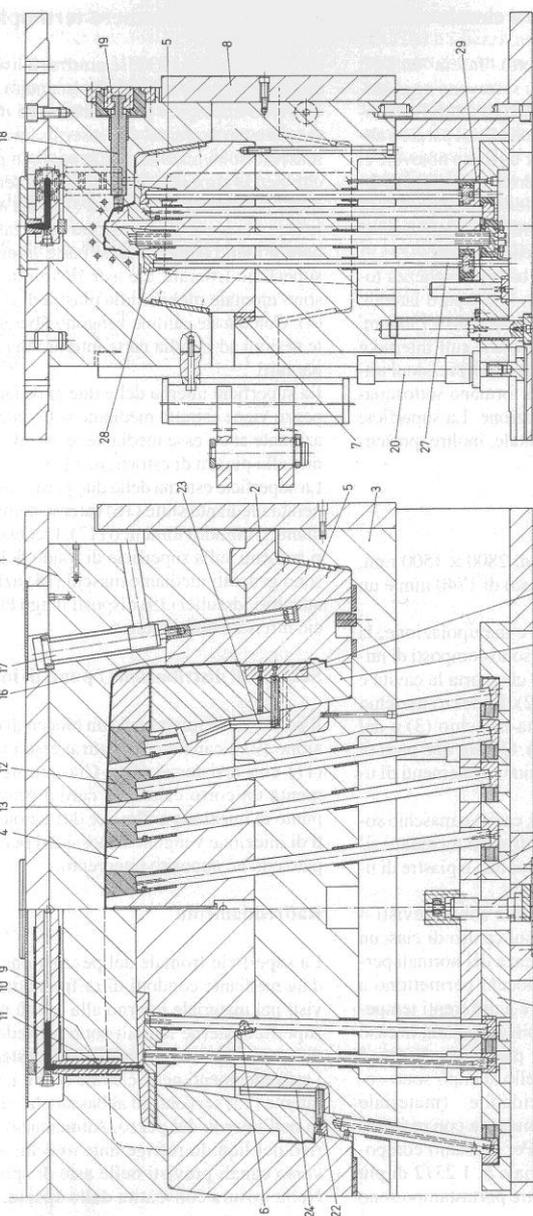


Fig. 3

Figg. da 2 a 5 - Stampo a 4 cavità per iniezione di elementi per puleggia a V, in nylon.

1, 2: piastre porta stampo fisse, 3: piastre superiori di raffreddamento, 4: piastra superiore porta cavità, 5: piastra inferiore porta cavità, 6: piastra supporto, 7, 8: piastre estrazione, 9, 10: piastre porta stampo lato mobile, 11: distanziale, 12: inserto cavità inferiore, 13: inserto cavità superiore, 14: perno-maschio, 15: inserto, 16: barra piatta, 17: perno estrazione, 18: bussola estrazione, 19: anello centraggio, 20: o-ring, 21: estrattore della carota, 22: perno guida, 23: barra di ritenuta, 24: dispositivo di aggancio/sgancio, 25: perno dispositivo di aggancio/sgancio, 26: perno-fulcro, 27: vite regolazione, 28: molla, 29: vite, 30: connessione per acqua raffreddamento, 31: perno arresto, 32: perno estrattore, 33: molla, 34: perno.



**Fig. 1 e 2 - Stampo a canale caldo per paraurti "fascia".**  
 1: blocco cavità, 2: elemento di riempimento, 3: piastra porta maschio, 4: gruppo maschio, 5: piastra di usura, 6: elemento di usura, 7: blocco a cuneo, 8: blocco guida, 9: blocco distribuzione a canale caldo, 10: nastro di riscaldamento, 11: ugello a canale caldo, 12: canne, 13: asta di spinta, 14: piastra estrattore, 15: slitta interna, 16: piastra esterna, 17: cilindro idraulico, 18: perno-maschio, 19: azionamento maschio, 20: cilindro idraulico, 21, 22: blocco, 23, 24: guide, 25: piastra estrazione, 26: cilindro idraulico, 27: asta estrazione, 28: blocco di spinta, 29: estrattore di cavità.