

**CAD/CAM**  
Computer-Aided Design and Manufacturing

**SIMULAZIONE NUMERICA:**  
**FEM – Finite Element Method**

**CAE**  
Computer-Aided Engineering

**Simulazione Numerica:**

- ↳ BEM Boundary Element Method
- ↳ FVM Finite Volume Method
- ↳ Meshless Method
- ↳ FEM Finite Element Method

**Simulazione numerica: i vantaggi**

- ✓ riduce il numero di costosi progetti di prototipi di stampi
- ✓ migliora la progettazione dell'attrezzatura e ne allunga la durata
- ✓ riduce gli scarti di materiale
- ✓ riduce il tempo di sviluppo del prodotto
- ✓ migliora la qualità del prodotto

**Dominio tecnologico**

Processi di formatura di materiali metallici



Caratteristica: grandi deformazioni

- ↳ Codici general purpose
- ↳ Codici per lavorazione lamiera
- ↳ Codici per formatura massiva

**Analisi agli elementi finiti**

	Flow Formulation	Solid Formulation	Dynamic Formulation
Equazioni di equilibrio	Quasi-statico	Quasi-statico	Dinamico
Modello del materiale	Rigido - plastico/ Rigido - viscoplastico	Elasto - plastico/ Elasto - viscoplastico	Elasto - plastico/ Elasto - viscoplastico
Struttura FEM	Matrice di rigidezza	Matrice di rigidezza	Matrice di rigidezza e di massa
Dimensione dell'incremento di tempo	Media	Grande	Molto piccola
Tempo di elaborazione per incremento	Medio	Lungo	Breve
Precisione nel calcolo della distribuzione delle tensioni	Elevata/Media	Elevata	Scarsa

**Flow formulation**

Materiale trattato come fluido incomprimibile

Materiale rigido-plastico

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV - \int_{S_f} T_i \delta u_i dS = 0$$

**Soluzione del problema: trovare un campo di velocità che soddisfi la condizione di incomprimibilità**

- Moltiplicatori di Lagrange
- Penalty function

$$\dot{\epsilon}_v = 0$$

## Solid formulation

Materiale elasto-plastico

$$\int_{V_0} \frac{\partial \dot{p}_i}{\partial X_i} \partial u_i dV_0 = 0$$

## Dynamic formulation

Considera il termine delle masse

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_V \rho a_i \delta u_i dV - \int_{S_T} T_i \delta u_i dS = 0$$

## Discretizzazione del continuo

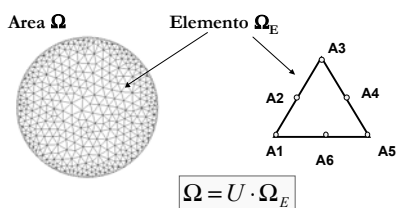
### MESH

discretizzazione di un continuo mono-bi-tridimensionale in sottodomini più piccoli, detti ELEMENTI, connessi tra loro da NODI

⇒ domini superficiali vengono suddivisi in sottodomini triangolari o quadrangolari

⇒ domini di volume vengono suddivisi in tetraedri o esaedri

## Discretizzazione del continuo



Il valore delle grandezze lontano dai nodi viene calcolato mediante funzioni di approssimazione, dette funzioni di forma

## Tipologie di elementi

⇒ 2D: topologicamente nodi + lati



Elemento triangolare lineare e quadratico



Elemento rettangolare lineare e quadratico

⇒ 3D: topologicamente nodi + lati + facc



Elemento 3D lineare a 8 nodi



Elemento 3D tetraedrico a 4 nodi

## Categorie di simulazione

Comportamento del materiale



- Rigido-plastico
- Elasto-plastico
- Visco-plastico
- Elasto-visco-plastico

Caratteristiche geometriche



- Bidimensionali (2D)
- Tridimensionali (3D)

Influenza della temperatura



- Isoterma
- Termo-meccanica accoppiata

## Dati di input

### Parametri geometrici

- ✓ Geometria della billetta
- ✓ Geometria dello stampo

### Parametri del materiale

- ✓ Comportamento reologico
- ✓ Dati termici
- ✓ Temperatura

### Parametri di processo

- ✓ Moto della pressa
- ✓ Temperatura
- ✓ Lubrificante
- ✓ Scambio termico

## Dati di output

### Componente:

- ✓ Flusso
- ✓ Profili di velocità
- ✓ Distribuzione di:
  - deformazione
  - velocità di deformazione
  - tensione
  - temperatura
- ✓ Difetti

### Stampi:

- ✓ Deformata elastica
- ✓ Distribuzione di:
  - deformazione
  - tensione
  - temperatura
- ✓ Carichi applicati
- ✓ Usura

## Remeshing

**Costruzione di una nuova mesh in caso di:**

- ⇒ eccessiva distorsione degli elementi
- ⇒ penetrazione dello stampo nel pezzo



Trasferimento dei valori calcolati dalla vecchia alla nuova mesh

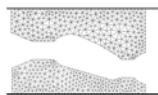
## Tipologie di stampi

⇒ Stampi rigidi



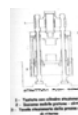
⇒ Stampi deformabili: distribuzione dei parametri di processo

- Elastici
- Elasto-plastici



## Legge del moto degli stampi

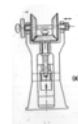
✓ Pressa idraulica



✓ Pressa meccanica



✓ Pressa a vite



✓ Maglio



## Comportamento del materiale

Carichi di forgiatura nei processi di formatura massiva

Microstruttura (composizione chimica, fasi, dimensione del grano, segregazioni, ..)

Parametri di processo (temperatura, deformazione, velocità di deformazione)

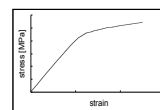
Tensione di flusso del materiale

$$\sigma = f(T, \epsilon, \dot{\epsilon}, S)$$

## Comportamento del materiale

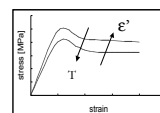
Formatura a freddo

La risposta del materiale dipende dalla deformazione



Formatura a caldo

La risposta del materiale dipende dalla deformazione, velocità di deformazione e temperatura



## Comportamento del materiale

### VISCO-PLASTICO

Si trascura la componente elastica della deformazione.

Il comportamento del materiale è assimilato a quello di un fluido non newtoniano per il quale la viscosità dipende dalla velocità di deformazione.

Il comportamento del materiale può essere descritto mediante la legge di Norton-Hoff

$$\sigma = K \cdot \dot{\epsilon}^n \cdot \epsilon^m \cdot \exp(\beta / T)$$

$n$ : sensibilità all'incrudimento

$m$ : sensibilità alla velocità di deformazione

$\beta$ : sensibilità alla temperatura

## Comportamento del materiale

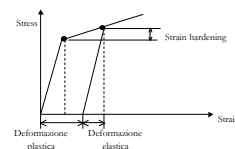
### ELASTO-PLASTICO

In ogni istante si può separare la componente elastica della deformazione da quella plastica:

$$\epsilon = \epsilon_p + \epsilon_e$$

La componente elastica è descritta mediante la legge elastica lineare:

$$\Delta \epsilon = \frac{1+\nu}{E} \sigma + \frac{3\nu}{E} p l$$



## Comportamento del materiale

### ELASTO-PLASTICO

La descrizione delle variabili legate alla componente plastica è basata sul criterio di Von Mises:

$\sigma_{eq} = \sigma_0$ : deformazione plastica

$\sigma_{eq} < \sigma_0$ : deformazione elastica

$\sigma_{eq} > \sigma_0$ : configurazione impossibile

$\sigma_0$  è la tensione di snervamento

$\sigma_0$  è funzione della deformazione e della temperatura

Caso elasto-viscoplastico:

$\sigma_0$  è anche funzione della velocità di deformazione

## Effetto della temperatura

La distribuzione delle temperature dipende principalmente da:

- ⇒ temperature iniziali della billetta e dello stampo;
- ⇒ generazione di calore dovuto alla deformazione plastica e all'attrito all'interfaccia billetta-stampi;
- ⇒ scambio termico tra il materiale in deformazione e gli stampi e tra il materiale e l'ambiente esterno.

Equazioni dell'analisi termo-meccanica accoppiata

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{T} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & 0 \\ 0 & [K^T] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix}$$

[C]

## Interfaccia: attrito

Lubrificazione all'interfaccia



Flusso del materiale, carichi di forgiatura, energia richiesta alle presse, difetti

1. Assenza di lubrificante
2. Condizioni di lubrificazione idrodinamica
3. Lubrificazione di tipo "boundary"

Ring compression test normalmente utilizzato per valutare l'attrito



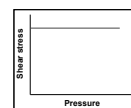
## Interfaccia: attrito

### Legge di TRESCA

$$\tau = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

$\sigma_0$  tensione di snervamento

$m$ : fattore di Tresca



$$0 \leq m \leq 1$$

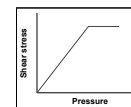
### Legge di COULOMB

$$\tau = \mu \cdot p$$

$\mu \cdot p < m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$

$$\tau = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

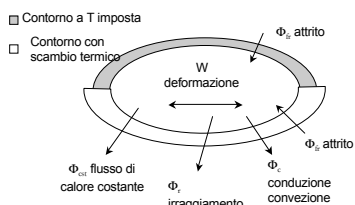
$\mu \cdot p > m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$



$\mu$ : coefficiente di Coulomb

## Interfaccia: scambio termico

L'EVOLUZIONE della TEMPERATURA risulta dalla competizione tra i fenomeni di conduzione e di dissipazione interne di calore, associati a determinate condizioni al contorno in termini di scambi termici o di temperature imposte.



## Interfaccia: scambio termico

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k \cdot \text{grad}T) + \dot{W}$$

Evoluzione della temperatura

Conduzione interna

Dissipazione interna legata al lavoro di deformazione

Irraggiamento:

$$\dot{\phi}_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - T_0^4)$$

Conduzione+Convezione:

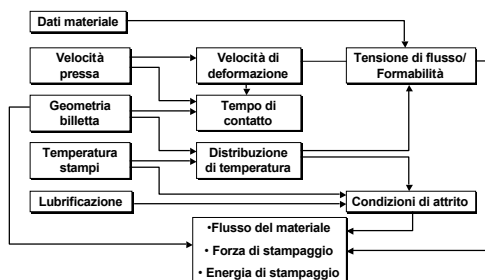
$$\dot{\phi}_c = h \cdot (T - T_0)$$

$h$ : coefficiente globale di scambio termico

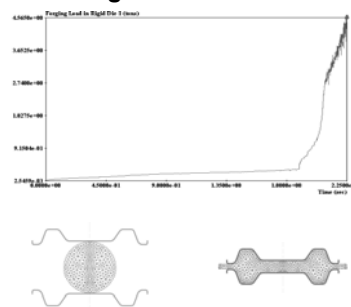
Attrito:

$$\dot{\phi}_f = \frac{b_1}{b_1 + b_2} \cdot \alpha \cdot K \cdot \Delta V^{p+1}$$

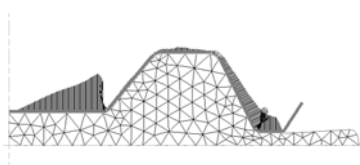
## Interazioni tra variabili di processo



## Diagrammi forza-corsa



## Profili di usura

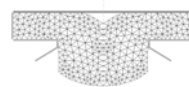


$$U = \int_0^t \sigma_n \cdot v_t dt$$

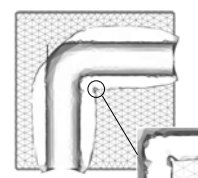
⇒ Consente una miglior progettazione degli stampi

## Difetti

Esempi di difetti legati al flusso del materiale



Piping in estrusione



Flusso convergente in bava

