

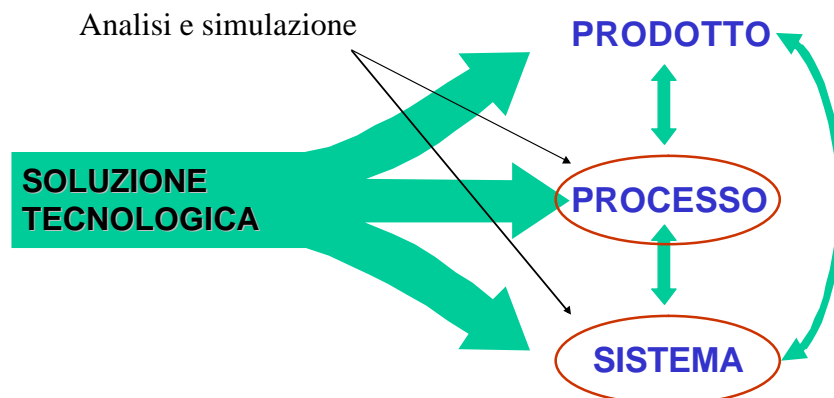
# ANALISI E SIMULAZIONE DEI PROCESSI/SISTEMI

- Argomenti

- Il metodo **IDEF**
- Il ruolo della simulazione in produzione.
- **La simulazione dei sistemi produttivi** (p.e. simulazione a eventi).
- **La simulazione dei processi produttivi** (p.e. simulazione FEM).

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 1/56

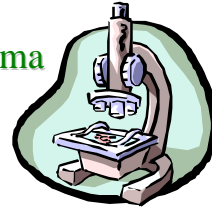
## Prodotto/processo/sistema



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 2/56

## Analisi dei processi e dei sistemi

- Oggetto dell'analisi:
  - il funzionamento di un processo/sistema
    - per conoscerlo (o riconoscerlo)
    - descriverlo
    - prevederlo
- Scopo dell'analisi
  - Prendere decisioni informate
    - Es. decidere velocità di taglio (**processo**)
    - Es. scegliere numero di torni (**sistema**)



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 3/56

## Analisi dei processi e dei sistemi

- I modelli



Si definisce “**stato**” del processo/sistema l’insieme di variabili necessarie per descrivere il processo/sistema in un determinato periodo relativamente all’obiettivo dello studio

Lo stato può essere espresso attraverso “**variabili di stato**”

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 4/56

## Tipologie di modelli

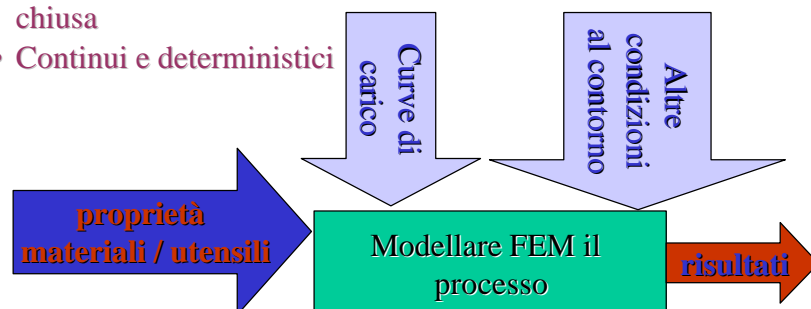
- Metodi di analisi/descrizione/modellazione
  - modello fisico (prototipo, realtà virtuale, sperimentazione)
  - modello relazionale
  - modello logico-matematico
    - risolvibili in forma chiusa
    - risolvibili tramite da simulazione
- Andamento temporale
  - Modelli STATICI (variabili di stato non cambiano col tempo)
  - Modelli DINAMICI (variabili di stato cambiano col tempo)
    - Continui
    - Discreti
- Effetto del caso
  - Modelli DETERMINISTICI (probabilità non influenza input, stato o output)
  - Modelli STOCASTICI (input e/o struttura modello variano casualmente)

m  
o  
d  
e  
l  
l  
i  
F  
E  
M

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 5/56

## La simulazione FEM (Finite Element Method)

- Metodi di modellazione computazionale (o numerici)
  - Descrizione di processi fisici (*tecnologici*)
  - Descrizione (modello) logico-matematica
    - Modelli logico-matematici non risolvibili in forma analitica chiusa
    - Continui e deterministici



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 6/56

## Metodi di modellazione computazionale

- Il punto di partenza è un modello fisico continuo
  - **Partial / ordinary differential equations (ODE / PDE)**
  - Navier-Stokes equations for fluid flow
  - Schrodinger equations for waves / quantum
- Nella maggior parte dei casi la soluzione analitica non esiste
  - Occorre utilizzare metodi numerici
    - finite elements FEM
    - finite differences FDM
    - Newton-Raphson
    - Runge-Kutta

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 7/56

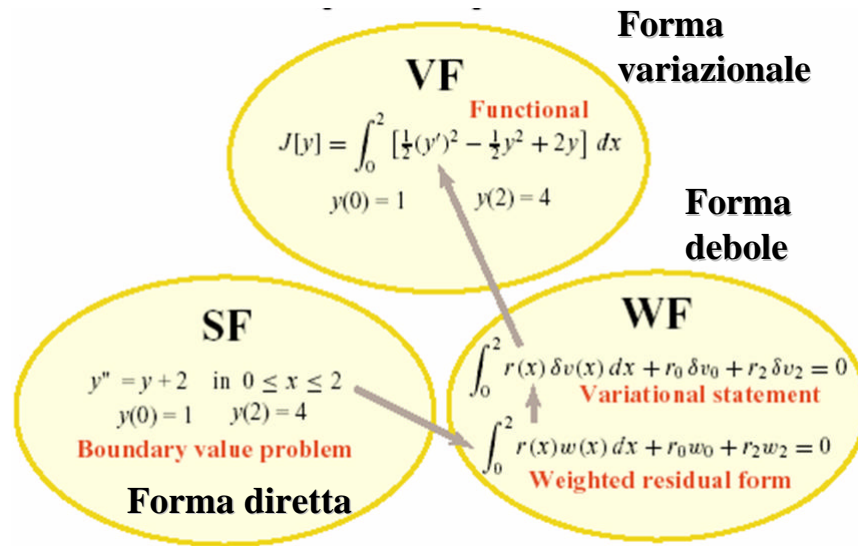
## Metodi computazionali per ODE/PDE

### Soluzione in 3 forme diverse possibili

- **SF Strong Form**
  - system of *ordinary or partial differential equations* in space and/or time, complemented by appropriate boundary conditions. Occasionally this form may reduce to algebraic equations.
- **WF Weak Form**
  - *weighted integral statement* that "relaxes" the point-by-point enforcement of the SF into a domain-averaging statement.
- **VF Variational Form**
  - *functional* whose stationary conditions generate the WF and SF.
    - *Variational Calculus* is a set of rules and techniques to pass from one form to another

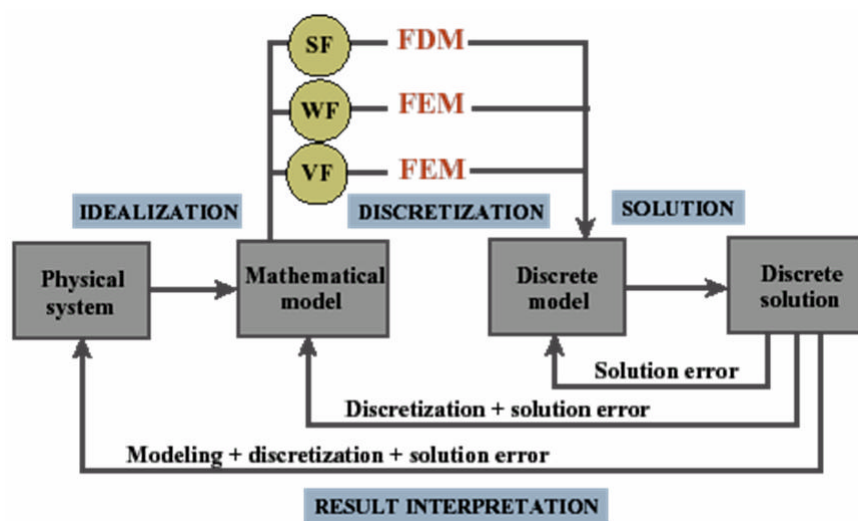
M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 8/56

# Metodi computazionali per ODE/PDE



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 9/56

# Metodi computazionali per ODE/PDE



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 10/56

## Strumenti software per metodi computazionali

- General-purpose languages (Fortran)
- Support packages
- Spreadsheets (Excel)
- Simulation languages (Femlab, Matlab)
- High-level simulation packages
  - General purpose
  - Dedicati

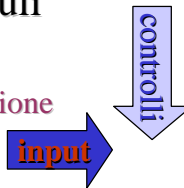
M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 11/56

## Metodi computazionali per ODE/PDE

- Si usano ormai software commerciali
- Sono normalmente divisi in 3 moduli

### Pre/processor

- GUI che consente di impostare la simulazione
  - Discretizzazione spaziale (mesh)
  - Condizioni al contorno e curve di carico
  - Parametri materiale



### Solver

- Modulo che esegue il calcolo

risolvere FEM

### Post/processor

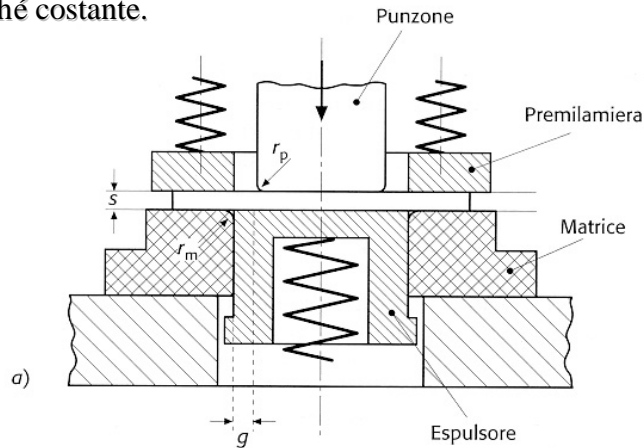
- GUI che consente di visualizzare i risultati della simulazione



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 12/56

## Imbutitura

Operazione mediante la quale è possibile ottenere da una lamiera piana una forma concava, mantenendone lo spessore medio pressoché costante.



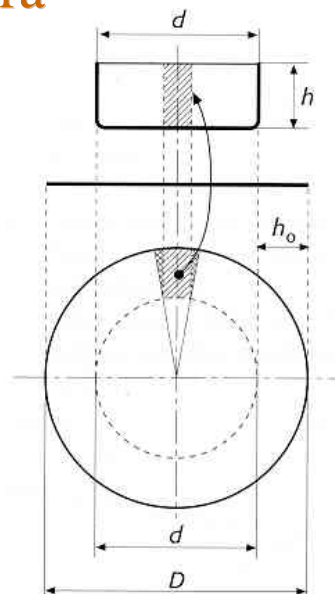
M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 13/56

## Imbutitura

### Premilamiera

- Serve a impedire che il materiale costituente i triangoli tratteggiati tenda a formare delle pieghe.

- Lubrificazione
  - Va controllata



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 14/56

# Imbutitura

## Stato di sollecitazione

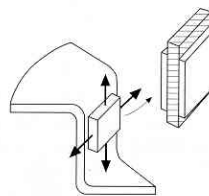
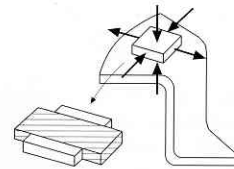
Trazione radiale  $\Rightarrow$  punzone

Compressione normale  $\Rightarrow$  prelamiera

Compressione circonferenziali  $\Rightarrow$  riduzione del diametro

Trazione verticali  $\Rightarrow$  punzone

Trazione circonferenziali  $\Rightarrow$  punzone che impedisce contrazioni del diametro



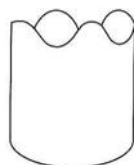
M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 15/56

# Imbutitura

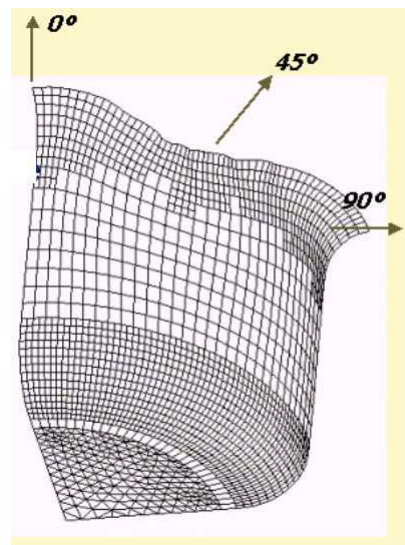
## Effetto anisotropia planare

Se  $R_0$  e  $R_{90}$  sono diversi il materiale si comporta diversamente nelle differenti direzioni

se  $\Delta R$  è  
'orecchie



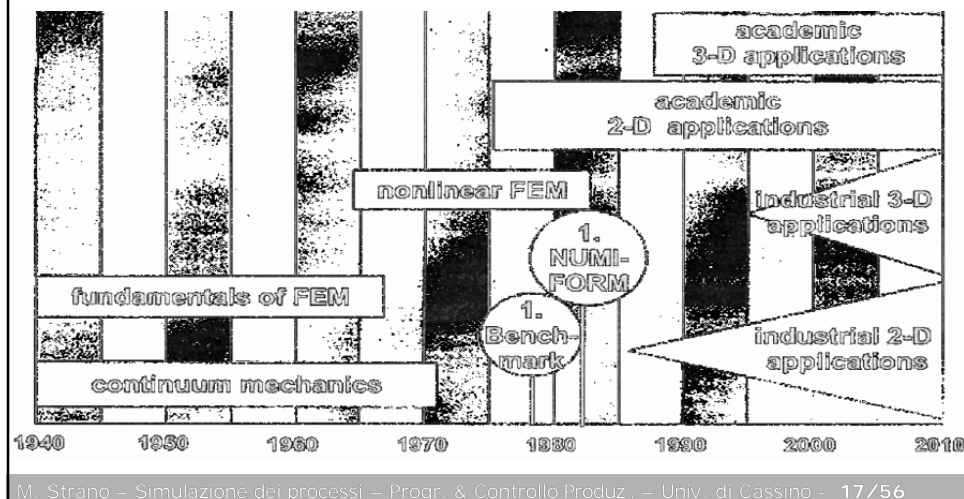
no



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 16/56

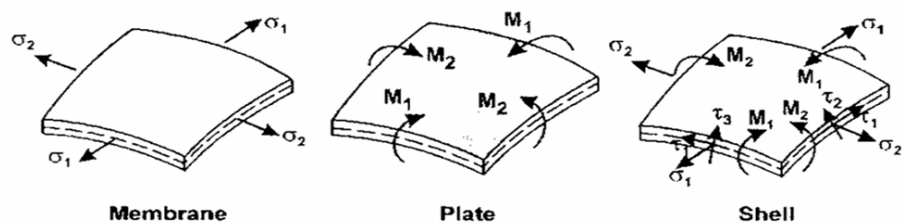


## La simulazione FEM dei processi di deformazione plastica



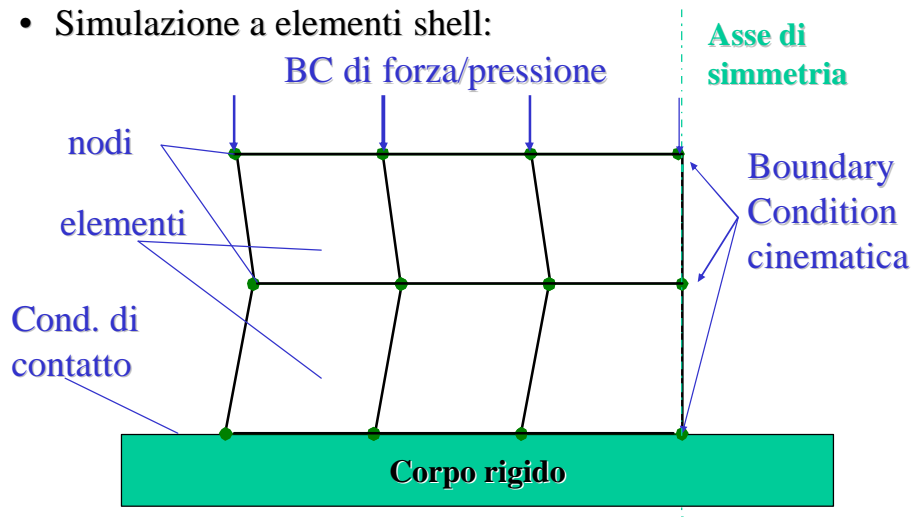
## La simulazione FEM dei processi di deformazione plastica

- **Tipi di elementi**
  - Membrane
  - Plate
  - Shell
  - Solidi



## La simulazione FEM dei processi di deformazione plastica

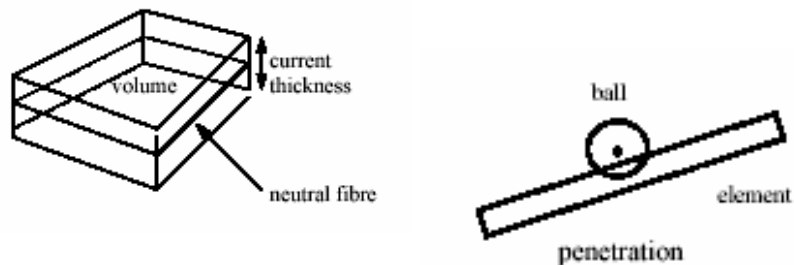
- Simulazione a elementi shell:



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 19/56

## FEM: il problema del contatto

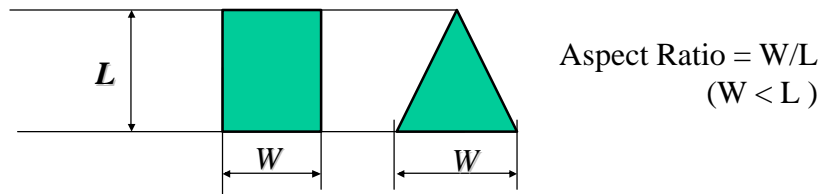
- Problema del contatto:
  - Spessore della shell e controllo della penetrazione



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 20/56

## FEM: gli elementi shell

- Elementi quadrangolari
  - Computazionalmente più efficienti
    - Ma maggiore difficoltà per geometrie complesse
    - “Hourglassing”
- Elementi triangolari
  - Ottimi per geometrie complesse



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 21/56

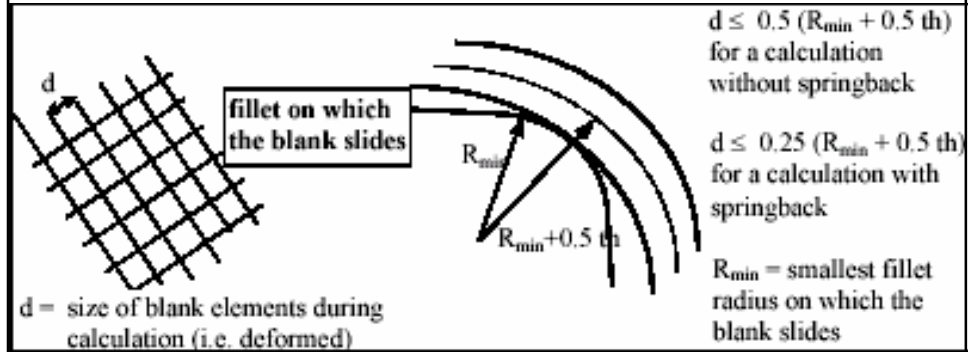
## FEM: gli elementi shell

- buona qualità della mesh:
  - Calcolo veloce ed accurato
- qualità della mesh
  - Aspect ratio  $W/L$ 
    - Non deve essere troppo piccolo
  - Massimo angolo interno
    - Non deve essere troppo grande
  - Warping
    - Grado di torsione dell'elemento (non deve essere alta)



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 22/56

## FEM: dimensione mesh



Al crescere del numero di elementi la dimensione della matrice di rigidezza  $K_s$  aumenta

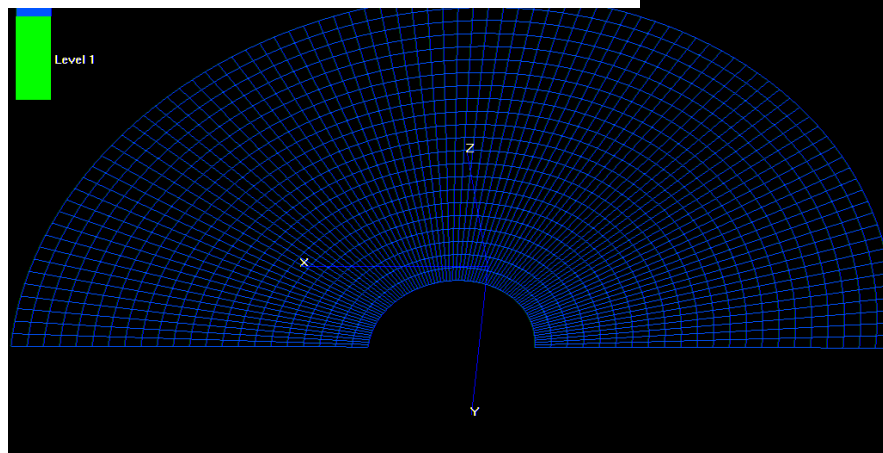


Adaptive meshing

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 23/56

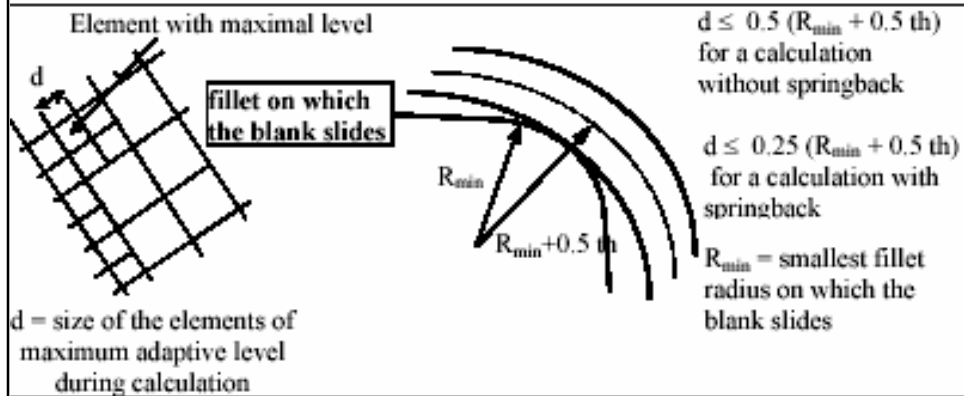
## FEM: dimensione iniziale mesh

- Adaptive meshing con elementi shell quadrangolari



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 24/56

## FEM: dimensione mesh



*With adaptive meshing*

Al crescere del numero di elementi la dimensione della matrice di rigidità  $K_s$  aumenta



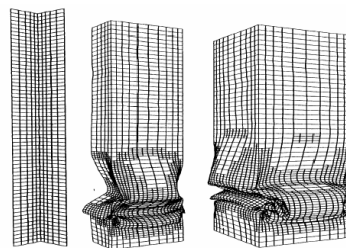
M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino – 25/56

## Tecnologia degli elementi finiti

### • L'adaptive remeshing

#### – Criteri di remeshing

- **h-adaptivity**
  - Si raffina selettivamente la dimensione della mesh
- **p-adaptivity**
  - Si aumenta selettivamente il grado delle funzioni di forma (rarissimo)
- **r-adaptivity**
  - Si costruisce una mesh nuova, spostando nodi o creando nuovi elementi
- **In tutti i casi serve un indicatore per innescare il remeshing**
  - Si può usare l'uniformità dello strain rate, dello stress o dello spessore o la curvatura della lamiera



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino – 26/56

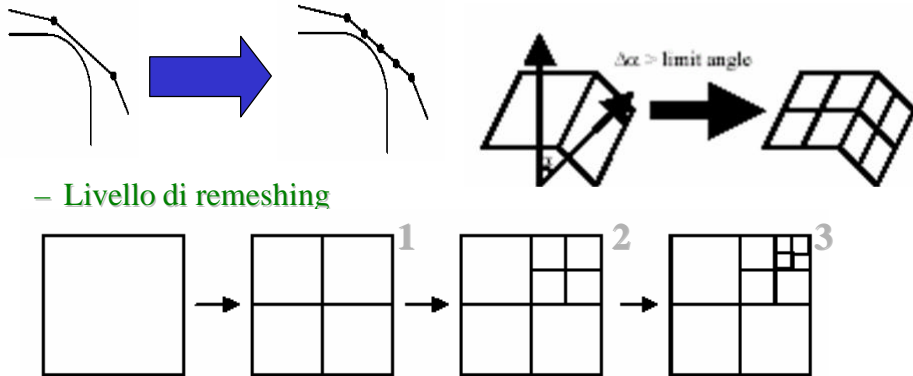
## Tecnologia degli elementi finiti

- L'adaptive remeshing

- Indicatore di refinement: curvatura della lamiera

- Vicinanza con utensili a piccolo raggio di curvatura

- Angolo tra elementi adiacenti



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 27/56

## FEM: software commerciali

- vari tipi

- general purpose, incentrati su ODE/PDF



- general purpose, incentrati su problema fisico

- Meccanica
    - Termica
    - Fluidodinamica
    - Elettromagnetismo



Ls-dyna



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 28/56

## FEM: software commerciali

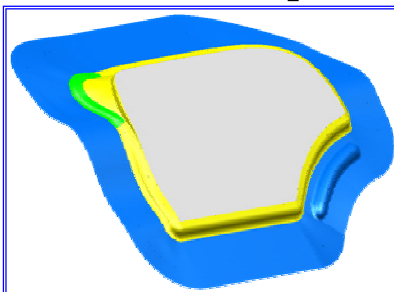
- vari tipi
  - special purpose,  
incentrati su un  
problema specifico
    - p.e. in metal forming
      - Bulk forming
        - » MSC superform
        - » DEFORM
      - Sheet forming
        - » PAM-STAMP



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 29/56

## Progettazione processo

- Scelta dei parametri operativi relativi alla geometria degli stampi e del semilavorato;
- Scelta dei parametri operativi relativi al processo



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 30/56

## Metodo FEM (fasi della simulazione)

- **Disegno e discretizzazione (suddivisione in elementi finiti) del semilavorato**
  - disegno degli stampi e di tutte le attrezzature che intervengono nel processo
  - assegnazione di tutte le grandezze necessarie per la simulazione (caratteristiche meccaniche dei materiali, condizioni di attrito, parametri atti a definire il movimento degli stampi ed altri)
- **Decodifica del disegno e generazione automatica del file dei dati per la successiva elaborazione**
- **Analisi numerica**
- **Presentazione dei risultati**

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 31/56

## Metodo FEM (aspetti peculiari)

- **Condizioni di simmetria**
  - Simmetria assiale
  - Piani di simmetria
- **Modelli di attrito**
  - coulombiano
- **Modellizzazione dei rompigrinza**
  - Realistica o semplificata
- **Calcolo del ritorno elastico**
  - Formulazione implicita al termine del processo di formatura
- **Tipo di elementi utilizzati nella simulazione della formatura delle lamiere**
  - Shell o brick 2D (in caso di simmetria assiale)

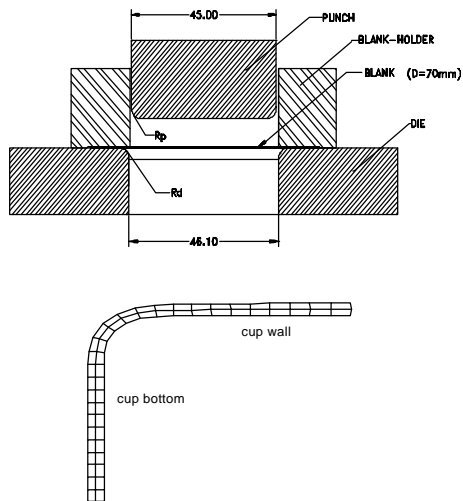
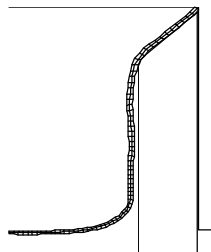
M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 32/56



## Condizioni di simmetria

- Assialsimmetria

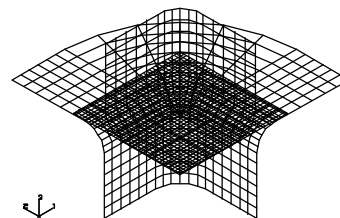
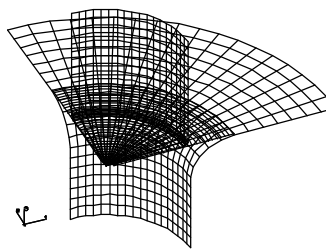
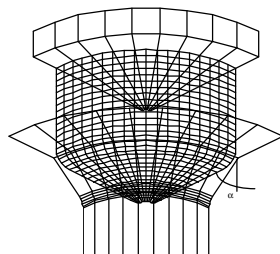
$$\epsilon_r = \epsilon_\theta$$



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 33/56

## Condizioni di simmetria

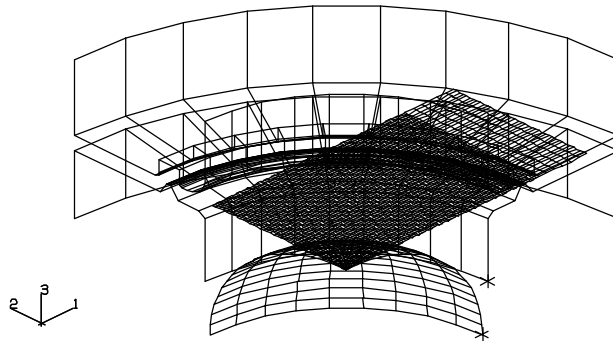
- 3D
- Piani di simmetria



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 34/56

## Condizioni di simmetria

- 3D
- Piani di



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 35/56

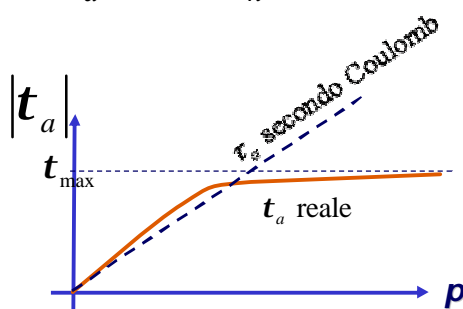
## Modelli di attrito

### Modello di Coulomb

$$f_a = m \cdot f_n$$

Coefficiente d'attrito

$$t_a = m \cdot s_n$$



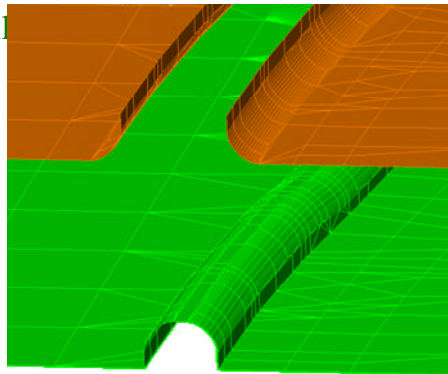
- Il modello vale solo quando le pressioni in gioco non sono molto elevate
- Nel *metal forming*, le pressioni sono invece spesso elevate, e in questo caso le caratteristiche dei materiali dovrebbero entrare nel modello
- In particolare  $t_a$  non può essere maggiore della resistenza massima a taglio  $t_{max}$  del materiale più tenero

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 36/56

## Modellizzazione dei rompigrinza

- Metodo realistico

- I drawbead vengono modellizzati con la loro geometria reale, come corpi rigidi:
- **Vantaggio:** accuratezza dell'incertezza sul coefficiente di attrito reale
- **Svantaggio:** necessità di mesh molto raffinata sotto il rompigrinza



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 37/56

## Modellizzazione dei rompigrinza

- Metodi semplificati

- Sono metodi specifici di ogni codice commerciale che consentono l'introduzione di forze esterne che simulano l'effetto dei rompigrinza
- **Vantaggio:** sono computazionalmente molto efficienti
- **Svantaggi:**
  - Non simulano l'effettiva deformazione che subisce la lamiera sotto il rompigrinza, ma solo l'effetto di contrasto del draw-in che subisce il restante pezzo
  - Richiedono la definizione, spesso con criteri poco oggettivi, di svariati parametri numerici

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 38/56

## Calcolo del ritorno elastico

- Metodo più diffuso
  - La simulazione è eseguita in 2 fasi successive
    1. Deformazione plastica: simulazione del processo di formatura con approccio elasto/visco-plastico, schema di integrazione temporale **esplicito**, senza il calcolo del ritorno elastico
    2. Ritorno elastico: rimozione degli utensili (graduale o improvvisa), approccio elasto-plastico e schema di integrazione temporale **implicito**
      - Modellizzazione più corretta degli sforzi istante per istante

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 39/56

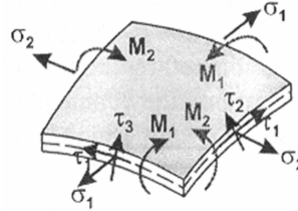
## Tecnologia degli elementi finiti

- Gli elementi shell
- Integrazione degli elementi shell
  - Punti di integrazione sul piano e lungo lo spessore
  - Il problema dell'hourglassing
  - Il problema dello shear locking
  - Il problema del drilling
- La modellizzazione del contatto
- Criteri di adaptive remeshing
- Il problema del time step

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 40/56

## Tecnologia degli elementi finiti

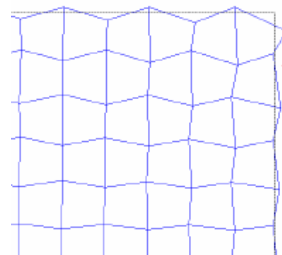
- Gli elementi shell
  - Trasmettono sforzi e momenti
  - $\sigma_3$  è costante
  - Possono essere triangolari o quadrangolari
    - rispettivamente a 3 o 4 nodi (funzioni di forma bilineari)
    - oppure di ordine più elevato (funzioni di forma paraboliche, cubiche, ecc.)
  - Hanno 5 o 6 g.d.l. per nodo
  - Seguono solitamente la teoria dei gusci di Mindlin
  - Possono essere piatti o curvi
  - Sono quasi sempre isoparametrici



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 41/56

## Tecnologia degli elementi finiti

- Il problema dell'hourglassing
  - È spesso innescata da carichi concentrati
  - Come si verifica la presenza dell'hourglassing?
    - Se la mesh è a “zig-zag”
    - Se i displacements nodali sono alti ma gli strains sono bassi
    - Se l'algoritmo non converge nel caso di codice a schema implicito di integrazione temporale
  - Come si risolve il problema?
    - Infittendo la mesh
    - Usando un algoritmo numerico di controllo apposito
    - Usando elementi con maggior rank di integrazione



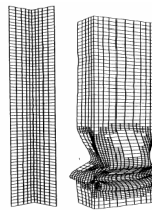
M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 42/56

# Tecnologia degli elementi finiti

## • La modellizzazione del contatto

### – Tipi di interfacce

- **Rigid-flex:**  
Utensile rigido - lamiera
- **Flex-flex**  
Utensile elastico – lamiera  
Lamiera - lamiera
- **Self contact**  
Lamiera con se stessa  
(folding, buckling)



Difficoltà crescente

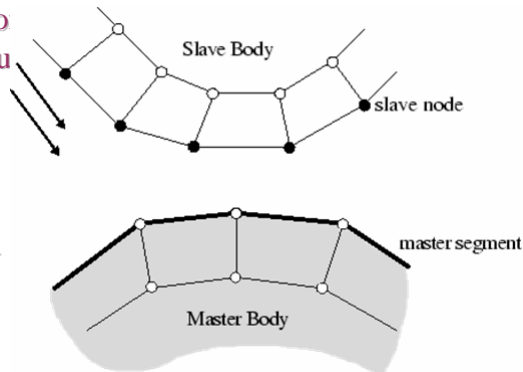
M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 43/56

# Tecnologia degli elementi finiti

## • La modellizzazione del contatto

### – Approccio penalty

- **Definito identificando le superfici su cui controllare la presenza di penetrazione slave attraverso una su**
  - L'interfaccia può essere one way o two way
- **Ad ogni time step si verifica la presenza di penetrazione**



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 44/56

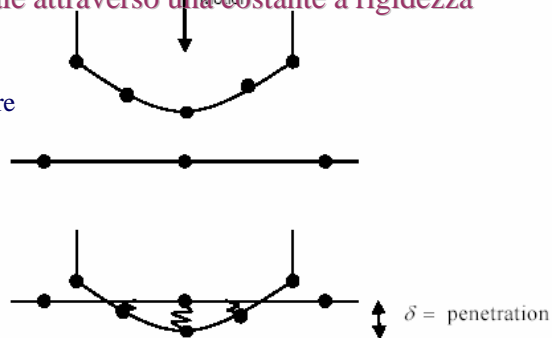
# Tecnologia degli elementi finiti

## • La modellizzazione del contatto

### – Approccio penalty

- Se la penetrazione è avvenuta, si applica al nodo una forza ad essa proporzionale attraverso una costante di rigidità

- La rigidità della molla (penalty constant) è in genere proporzionale alla dimensione degli elementi

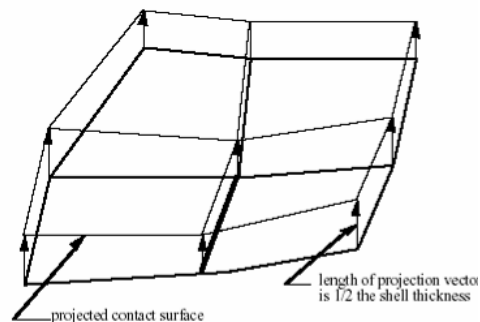


M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 45/56

# Tecnologia degli elementi finiti

## • La modellizzazione del contatto

- Le dimensioni delle mesh di entrambe le superfici, specie se curve, devono essere simili
- È utile differenziare tra attrito statico e dinamico
- Bisogna evitare che un corpo deformabile possa “vedere” più di un corpo rigido dallo stesso lato
- Ci si ricordi che le superfici shell rappresentano la “midsurface”, quindi il contatto avviene ad una distanza pari alla somma dei semispessori
  - Una corretta modellizzazione degli offset è importante



M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 46/56

## Tecnologia degli elementi finiti

- La modellizzazione del contatto

- Potenziali instabilità da contatto:

- eccessiva penetrazione
    - hourglassing, shell drilling o eccessive deformazioni localizzate dovute al contatto
    - vibrazioni della posizione dei nodi

- Come contenere le instabilità da contatto

- Diminuire la dimensione della mesh di entrambe le superfici
    - Usare l'adaptive remeshing
    - Diminuire il time step
      - quindi rallentare il processo per simulazioni esplicite
    - Aumentare artificialmente la contact thickness
      - la penetrazione viene rilevata in anticipo
    - Aumentare o diminuire il penalty factor
      - a seconda del problema

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 47/56

## Tecnologia degli elementi finiti

- L'adaptive remeshing

- Vantaggi

- Consente un calcolo accurato ma contenendo il numero degli elementi
    - Il risparmio in termini di tempo di calcolo non è elevatissimo poiché il time step è comunque controllato dall'elemento più piccolo

- Svantaggi

- Si rischiano instabilità nella distribuzione degli stress tra un istante ed il successivo
    - Per evitare gli errori legati agli elementi iniziali più grossolani, occorre
      - Usare algoritmi di look-ahead
      - Aumentare la frequenza di remeshing

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 48/56



## Tecnologia degli elementi finiti

- Il problema del time step
  - Esiste un valore critico del time step, da non superare, che dipende dalla lunghezza caratteristica dell'elemento  $L_{min}$ , dal suo modulo di elasticità  $E$ , dal peso specifico  $\rho$

$$\Delta t_{cr} = \frac{L_{min}}{c} \quad c \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

- Per abbreviare la simulazione si può:
  - Aumentare artificialmente la massa della lamiera
  - Diminuire artificialmente la durata del processo

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 49/56

## Tecnologia degli elementi finiti

- Il problema del time step
  - In tutti i casi, si introducono degli errori e dunque occorre
    - Assicurarsi a priori che:
      - Le leggi di moto imposte abbiano delle rampe di accelerazione dolci
      - Non ci siano penetrazioni iniziali
    - Verificare a posteriori che:
      - La lamiera non abbia delle vibrazioni innaturali
      - Gli stress non si propaghino seguendo onde d'urto piuttosto che trasmissione quasi-statica
      - L'energia cinetica della lamiera non superi il 5-10% dell'energia interna

M. Strano – Simulazione dei processi – Progr. & Controllo Produz. – Univ. di Cassino - 50/56