



PROGETTAZIONE DEI PROCESSI DI FORMATURA SUPERPLASTICA

Solo in corrispondenza di una ristretta gamma di valori di temperatura e di velocità di deformazione un materiale mostra comportamento *superplastico*. Se, durante il processo di deformazione, queste grandezze si discostano dai valori ottimali, le proprietà superplastiche risultano fortemente pregiudicate.

Per sfruttare in modo completo le potenzialità offerte dai processi di formatura superplastica è indispensabile un'accurata *progettazione del processo tecnologico*.

Lo scopo della progettazione è quello di definire il processo di fabbricazione in modo che sia garantito, in ogni istante della formatura, un comportamento del materiale superplastico ottimale.



PROGETTAZIONE DEI PROCESSI DI FORMATURA SUPERPLASTICA

Nel caso della formatura superplastica delle lamiere metalliche i parametri di lavorazione da definire sono:

- ⊗ la temperatura;
- ⊗ il ciclo di carico pressione-tempo;
- ⊗ lo spessore iniziale della lamiera.



SCELTA DELLA TEMPERATURA NELLA PROGETTAZIONE DEI PROCESSI DI FORMATURA SUPERPLASTICA

$$T > 0.5T_f$$

La temperatura ottimale varia generalmente, in funzione della lega metallica utilizzata, tra i 400 C ed i 1000 C.

Si tratta di temperature comunemente raggiunte nei processi di lavorazione per deformazione plastica a caldo dei metalli convenzionali. Pertanto, il "know-how", sviluppato in questo settore, può essere sfruttato per la progettazione del sistema di riscaldamento della lamiera e del controllo della temperatura durante il *processo di formatura superplastica*.

È necessario distribuire in maniera opportuna gli elementi riscaldanti all'interno dello stampo tenendo in considerazione la geometria che il prodotto assume durante la formatura, al fine di ottenere un *campo di distribuzione della temperatura il più possibile uniforme*.



DETERMINAZIONE DEL CICLO OTTIMALE DI CARICO PRESSIONE-TEMPO

Una delle condizioni fondamentali da rispettare durante un processo di formatura superplastica è la **costanza della velocità di deformazione**.

Avere in ogni punto del materiale la stessa velocità di deformazione è praticamente impossibile, in quanto in ogni punto si hanno diversi livelli di deformazione, in funzione della geometria del prodotto. Quindi, è necessario garantire che ogni punto del materiale in lavorazione sia sottoposto ad una velocità di deformazione interna ad un campo di riferimento.



DIMENSIONAMENTO DELLO SPESSORE INIZIALE DELLA LAMIERA NELLA PROGETTAZIONE DEI PROCESSI DI FORMATURA SUPERPLASTICA

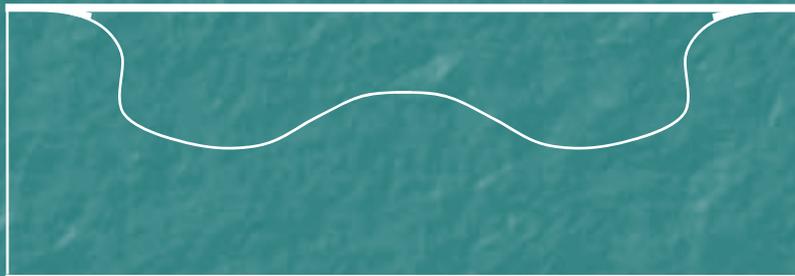
Le grandi deformazioni, necessarie per sagomare forme complesse in un'unica operazione, possono causare **forti assottigliamenti nella lamiera**.

La **previsione della distribuzione finale degli spessori** è di grande importanza per prevenire l'insorgere di pericolose rotture del componente, durante la formatura o successivamente in esercizio.

E' chiaro che la **distribuzione finale degli spessori** del prodotto è fortemente influenzata dallo **spessore iniziale della lamiera**.



DIMENSIONAMENTO DELLO SPESSORE INIZIALE DELLA LAMIERA NELLA PROGETTAZIONE DEI PROCESSI DI FORMATURA SUPERPLASTICA



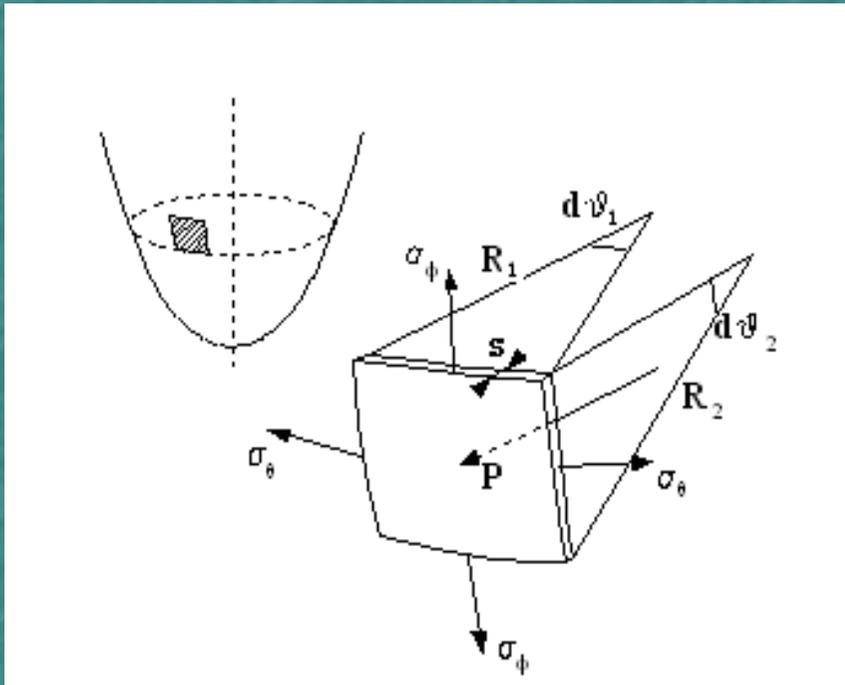
Durante il processo di formatura, all'interno del materiale si genera un **campo di deformazione variabile**, in quanto vi sono delle zone che partecipano alla formatura maggiormente rispetto ad altre, in funzione del disegno dello stampo.

È possibile impiegare **lamiere a spessore variabile**. In questo modo, aggiungendo materiale nelle zone maggiormente deformate, è possibile conseguire, a fine formatura, un andamento degli spessori più uniforme.



MODELLAZIONE ANALITICA DEL PROCESSO DI FORMATURA SUPERPLASTICA

ANALISI DELLE TENSIONI IN CORPI SOGGETTI A PRESSIONE IDROSTATICA



Trascurando la forza d'inerzia agente sull'elementino e la componente degli sforzi lungo lo spessore, σ_s , rispetto alle altre due componenti (stato di tensione biassiale), per l'equilibrio dell'elementino si può scrivere:

$$2\sigma_\varphi \operatorname{sen}\left(\frac{d\theta_2}{2}\right) \cdot (sR_1 d\theta_1) + 2\sigma_\theta \operatorname{sen}\left(\frac{d\theta_1}{2}\right) \cdot (sR_2 d\theta_2) = p \cdot (R_1 d\theta_1 R_2 d\theta_2)$$

Ponendo: $\operatorname{sen}\left(\frac{d\vartheta}{2}\right) = \frac{d\vartheta}{2}$ si ottiene $\frac{\sigma_\varphi s}{R_2} + \frac{\sigma_\theta s}{R_1} = p$



MODELLAZIONE ANALITICA DEL PROCESSO DI FORMATURA SUPERPLASTICA

Nel modellare il comportamento dei materiali superplastici, è lecito trascurare le deformazioni elastiche. È necessario fare riferimento ad una teoria che permetta di correlare le tensioni alle deformazioni in *campo plastico*.

TEORIA DELL'ELASTICITÀ	TEORIA DELLA PLASTICITÀ
REVERSIBILE	NON REVERSIBILE
DIPENDE SOLO DALLO STATO INIZIALE E FINALE DI SFORZO E DI DEFORMAZIONE	DIPENDE DALLA STRADA SEGUITA PER RAGGIUNGERE LO STATO FINALE
$\sigma=fz(\varepsilon)$ $fz=E(\text{costante})$	$\sigma=fz(\varepsilon)$ fz non è una costante



MODELLAZIONE ANALITICA DEL PROCESSO DI FORMATURA SUPERPLASTICA

Per la rappresentazione di un complesso stato di sforzo o di deformazione si ricorre di frequente a funzioni di invariante di sforzi e di deformazioni.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Le relazioni tra gli sforzi e le deformazioni per un solido plastico ideale sono chiamate espressioni di Levy-Mises:

$$d\varepsilon_1 = \frac{2}{3} d\lambda \left[\sigma_1 - \frac{1}{2} (\sigma_2 + \sigma_3) \right]$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{2}{3} d\lambda \left[\sigma_2 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \right]$$

$$d\varepsilon_3 = \frac{2}{3} d\lambda \left[\sigma_3 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) \right]$$



MODELLAZIONE ANALITICA DEL PROCESSO DI FORMATURA SUPERPLASTICA

Essendo $d\lambda = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}}$ le relazioni di Levy-Mises assumono la forma seguente:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_1 &= \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_1 - \frac{1}{2} (\sigma_2 + \sigma_3) \right] \\ d\varepsilon_2 &= \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_2 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \right] \\ d\varepsilon_3 &= \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_3 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \end{aligned}$$

Modulo di Young E

Modulo di Poisson ν

Queste relazioni sono simili a quelle relative ad un solido elastico!



MODELLAZIONE ANALITICA DEL PROCESSO DI FORMATURA SUPERPLASTICA

Determinazione dello stato di tensione di un elementino di materiale

1) stato di tensione biassiale bilanciato

$$\text{Hp: } \sigma_s = 0; \quad \sigma_\varphi = \sigma_\vartheta$$

$$\frac{\sigma_\varphi s}{R_1} + \frac{\sigma_\vartheta s}{R_2} = p \quad \longrightarrow \quad R_1 = R_2 = \rho; \quad \sigma_\varphi = \sigma_\vartheta = p\rho/2s$$

$$d\varepsilon_1 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right] \quad d\varepsilon_2 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right] \quad d\varepsilon_3 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right]$$

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_\vartheta \quad \varepsilon_s = -2\varepsilon_\varphi = -2\varepsilon_\vartheta$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{\sqrt{2}}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ d\bar{\varepsilon} &= \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \bar{\sigma} &= \sigma_\varphi = \sigma_\vartheta \\ \bar{\varepsilon} &= 2\varepsilon_\varphi = 2\varepsilon_\vartheta = -\varepsilon_s \end{aligned}$$



MODELLAZIONE ANALITICA DEL PROCESSO DI FORMATURA SUPERPLASTICA

Determinazione dello stato di tensione di un elementino di materiale

2) stato di deformazione piana

$$\text{Hp: } \varepsilon_g = 0; \quad \varepsilon_g + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_s = 0 \quad \longrightarrow \quad \varepsilon_\varphi = -\varepsilon_s$$

$$\frac{\sigma_\varphi s}{R_2} + \frac{\sigma_\theta s}{R_1} = p \quad \longrightarrow \quad R_2 = \infty; \quad \sigma_\theta = p\rho/s$$

$$d\varepsilon_1 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right] \quad d\varepsilon_2 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right] \quad d\varepsilon_3 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right]$$

$$\sigma_\varphi = 2\sigma_g \quad \sigma_s = 0$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{\sqrt{2}}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ d\bar{\varepsilon} &= \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_\varphi \\ \bar{\varepsilon} &= -\frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_s \end{aligned}$$



MODELLAZIONE ANALITICA DEL PROCESSO DI FORMATURA SUPERPLASTICA

STATO DI TENSIONE BIASSIALE BILANCIATO

$$\sigma_s = 0 \quad \bar{\sigma} = \sigma_\varphi = \sigma_\vartheta = \frac{p\rho}{2s}$$

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_\vartheta \quad \varepsilon_s = -2\varepsilon_\varphi \quad \bar{\varepsilon} = -\varepsilon_s$$

STATO DI DEFORMAZIONE PIANA

$$\sigma_s = 0 \quad \sigma_\varphi = 2\sigma_\vartheta \quad \bar{\sigma} = \sqrt{3}\sigma_\vartheta$$

$$\varepsilon_\vartheta = 0 \quad \varepsilon_\varphi = -\varepsilon_s \quad \bar{\varepsilon} = -\frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_s$$



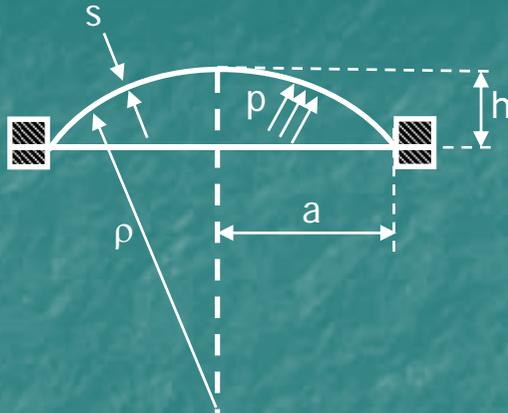
PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

Modello di Jovane

- 1) Il materiale è isotropo.
- 2) Il volume resta costante.
- 3) La deformazione elastica è trascurabile.
- 4) Il materiale non incrudisce ed il limite elastico è così basso che può essere trascurato.
- 5) Il rapporto spessore/diametro della membrana è molto piccolo e l'effetto di piegatura è trascurabile.
- 6) In ogni istante la membrana è equivalente ad una porzione di sfera soggetta ad una pressione interna, in modo che la curvatura e lo spessore siano uniformi ed in ogni punto della membrana si realizzi uno stato di deformazione biassiale bilanciato.
- 7) La membrana è bloccata rigidamente lungo il contorno e il vincolo è assimilabile ad una cerniera senza attrito.



PROCESSO DI FORMATURA LIBERA



Modello di Jovane

Dalle relazioni dello stato di tensione biassiale bilanciato:

$$\bar{\sigma} = \frac{p\rho}{2s}; \varepsilon_s = \ln \frac{s_0}{s} \Rightarrow \dot{\bar{\varepsilon}} = -\frac{1}{s} \frac{ds}{dt}$$

$$\rho^2 = a^2 + (\rho - h)^2 \Rightarrow \rho = \frac{a^2 + h^2}{2h}$$

$$s = \frac{\pi a^2 s_0}{\pi(a^2 + h^2)}$$

Volume del disco iniziale

Area della superficie della calotta sferica all'istante considerato ($2\pi\rho h$).

$$\bar{\sigma} = \frac{a}{4s_0} \frac{(1+H^2)^2}{H} p$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{2H}{1+H^2} \frac{dH}{dt}$$

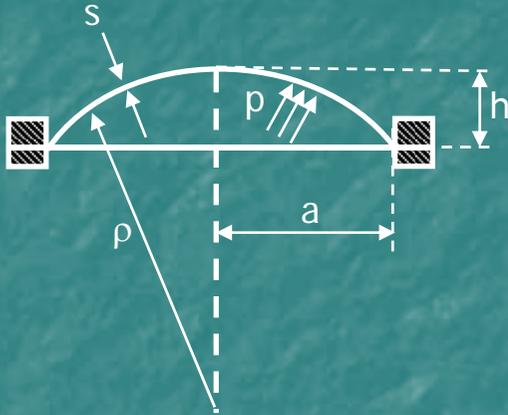
introduciamo il parametro adimensionale

$$H = \frac{h}{a}$$



PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

Modello analitico: processo a pressione costante



$$H = \frac{h}{a}$$

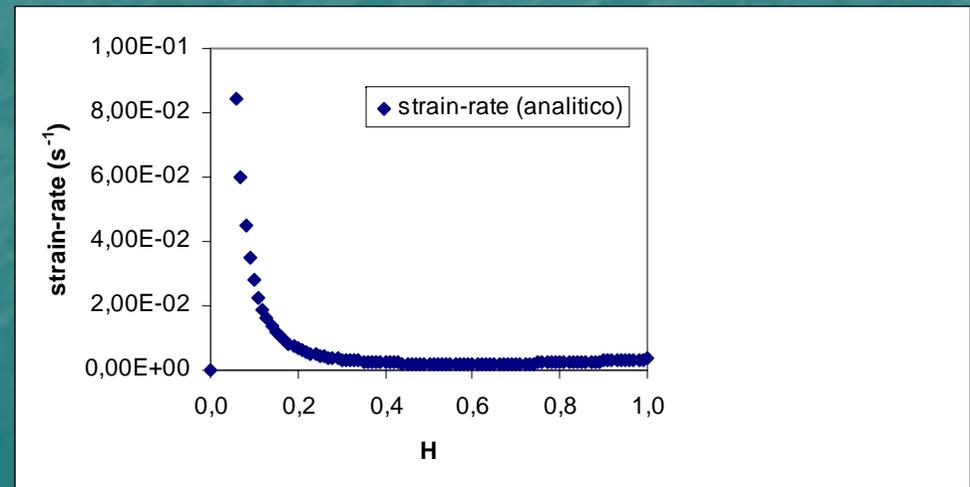
$$\bar{\sigma} = \frac{a}{4s_0} \frac{(1+H^2)^2}{H} p$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{2H}{1+H^2} \frac{dH}{dt}$$

Si consideri un processo di formatura libera con:

$s_0=0.48$ mm $a=17.5$ mm $p=0.29$ MPa

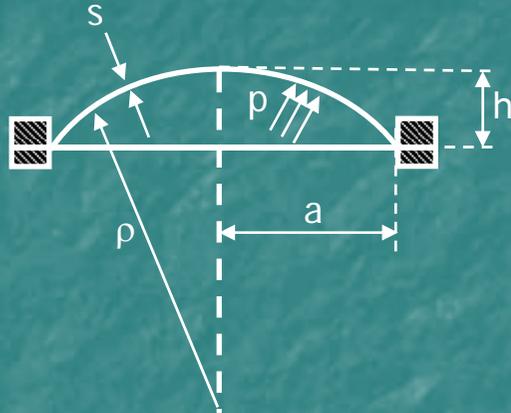
$K=135$ $m=0.45$





PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

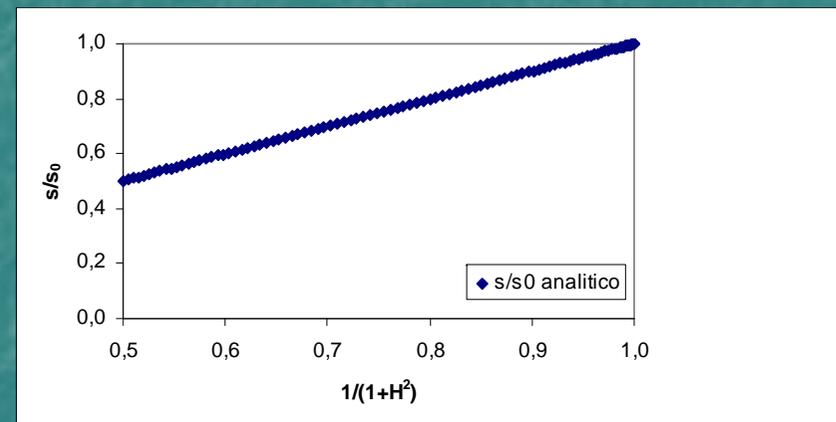
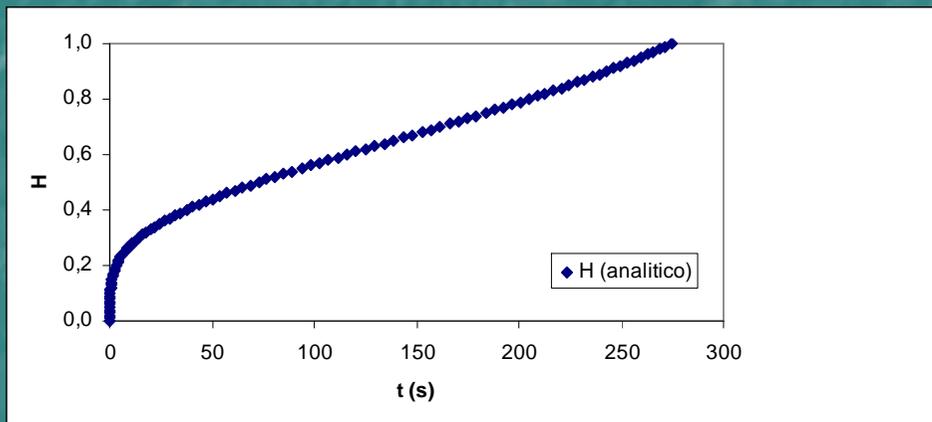
Modello analitico: processo a pressione costante



$$H = \frac{h}{a}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{a}{4s_0} \frac{(1+H^2)^2}{H} p$$

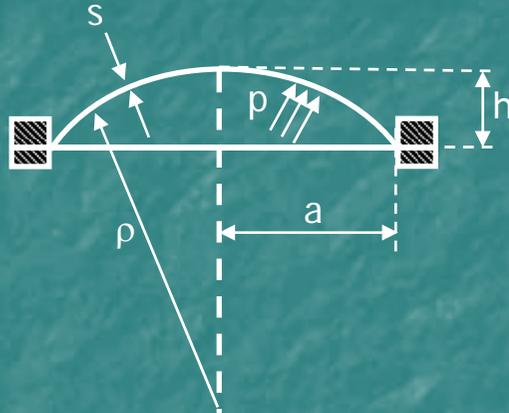
$$\bar{\epsilon} = \frac{2H}{1+H^2} \frac{dH}{dt}$$





PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

Modello analitico: processo a velocità di deformazione costante



$$H = \frac{h}{a}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{a}{4s_0} \frac{(1+H^2)^2}{H} p$$

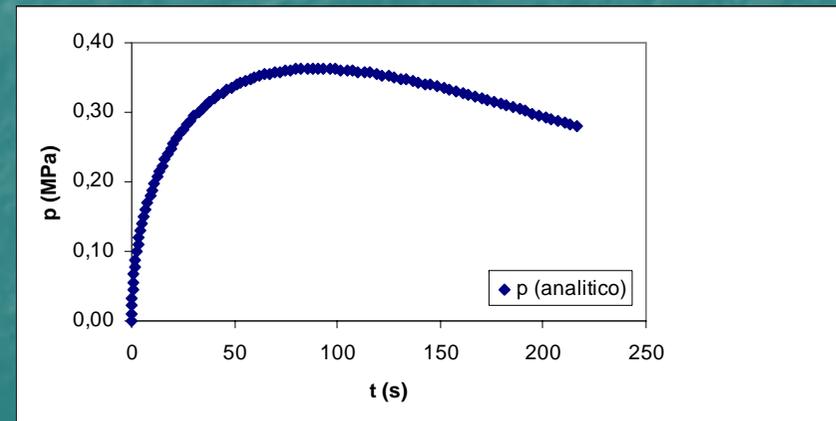
$$\bar{\dot{\epsilon}} = \frac{2H}{1+H^2} \frac{dH}{dt}$$

Si consideri un processo di formatura libera con:

$$s_0 = 0.48 \text{ mm} \quad a = 17.5 \text{ mm}$$

$$K = 135 \quad m = 0.45$$

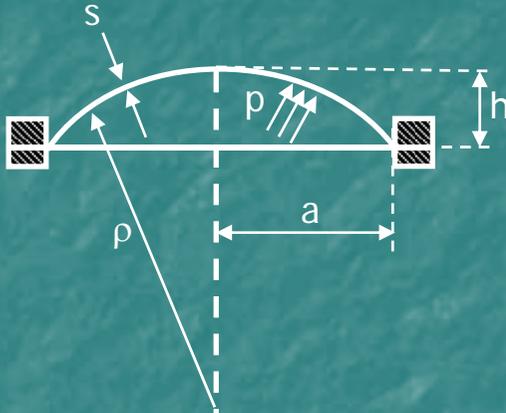
$$\bar{\dot{\epsilon}}_{\text{opt}} = 0.0032$$





PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

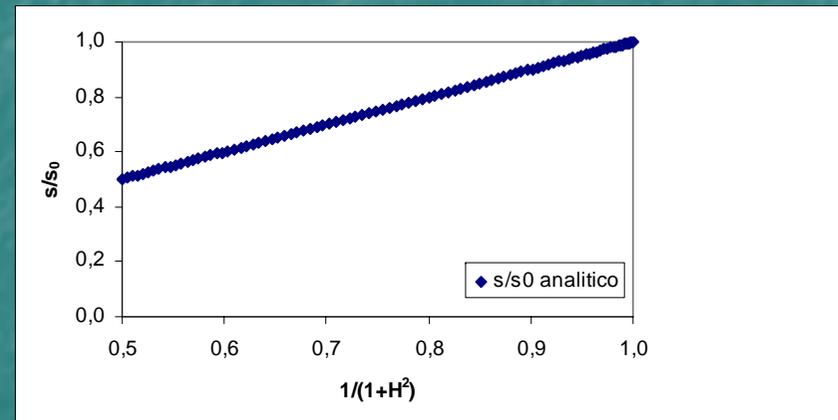
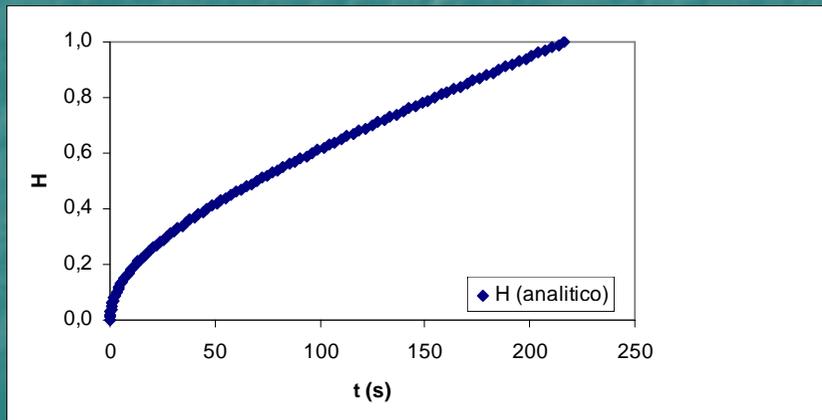
Modello analitico: processo a velocità di deformazione costante



$$H = \frac{h}{a}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{a}{4s_0} \frac{(1+H^2)^2}{H} p$$

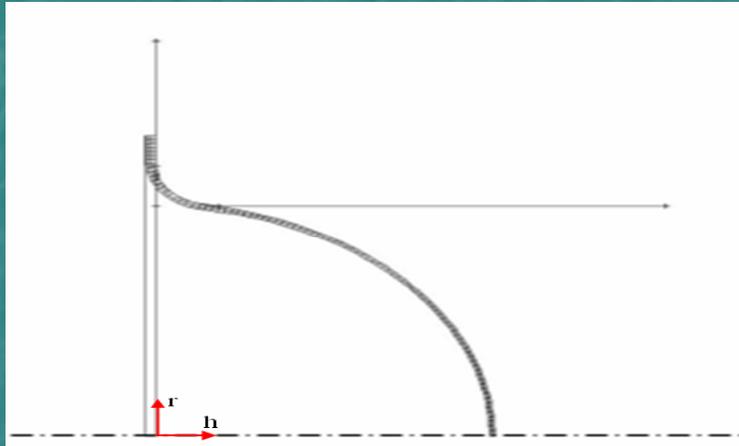
$$\bar{\epsilon} = \frac{2H}{1+H^2} \frac{dH}{dt}$$





PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

Modello numerico: processo a pressione costante

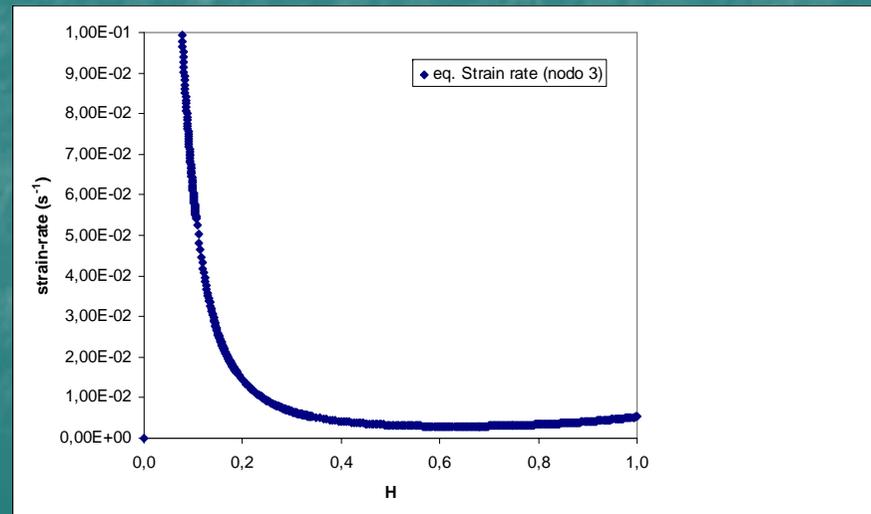


Si consideri un processo di formatura libera con:

$s_0=0.48$ mm $a=17.5$ mm $r_{\text{racc}}=3$ mm $p=0.29$ MPa

$K=135$ $m=0.45$

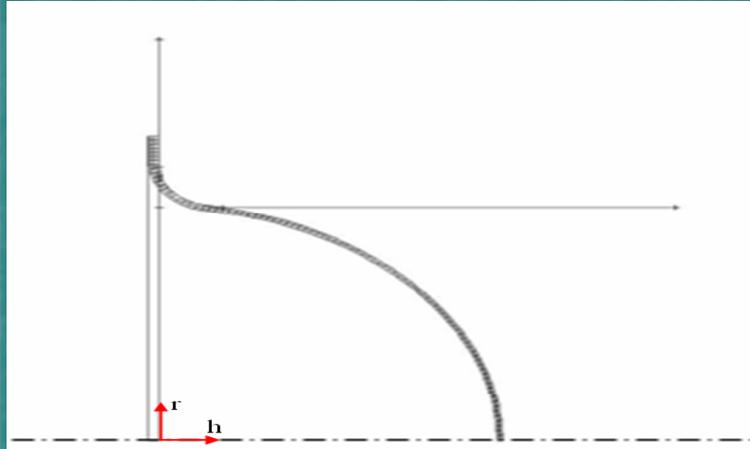
$$H = \frac{h}{a}$$





PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

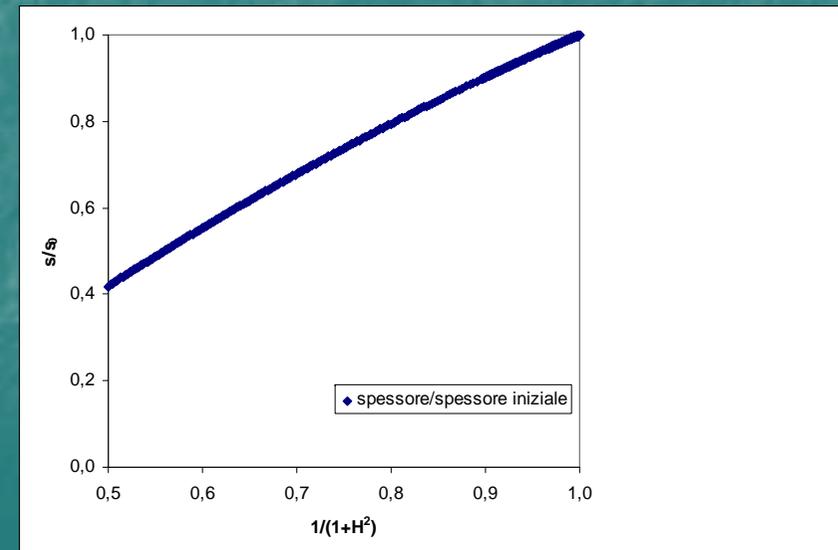
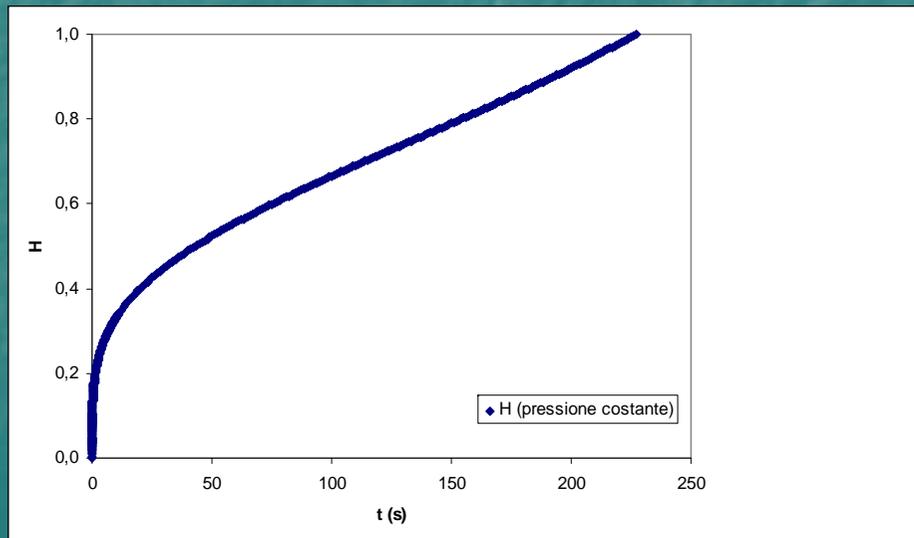
Modello numerico: processo a pressione costante



Si consideri un processo di formatura libera con:
 $s_0=0.48$ mm $a=17.5$ mm $r_{\text{racc}}=3$ mm $p=0.29$ MPa

$K=135$ $m=0.45$

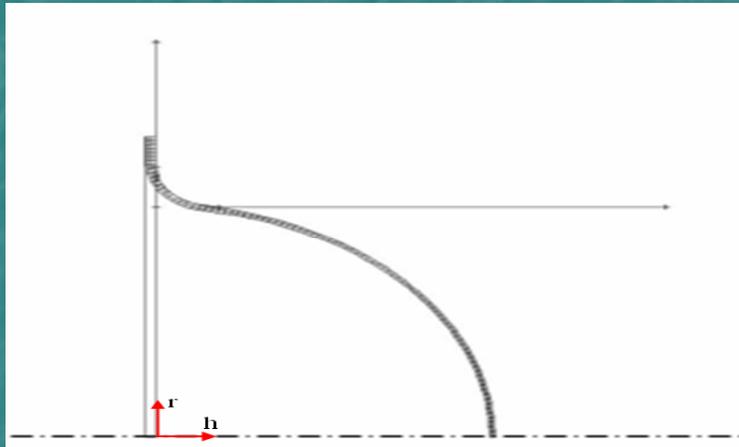
$$H = \frac{h}{a}$$





PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

Modello numerico: processo a velocità di deformazione costante

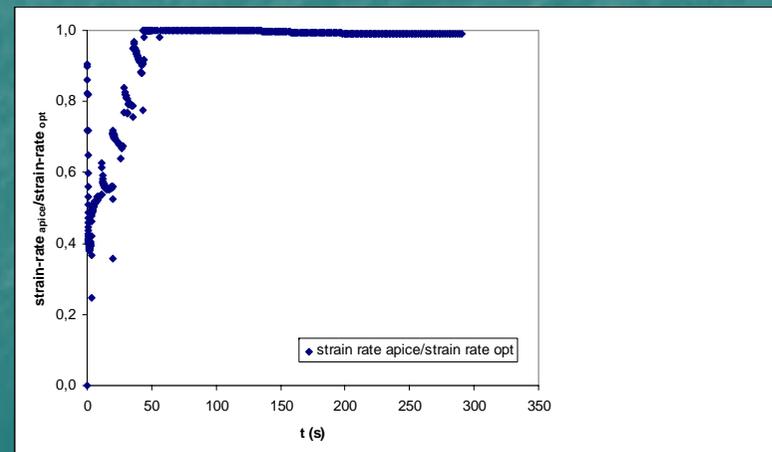
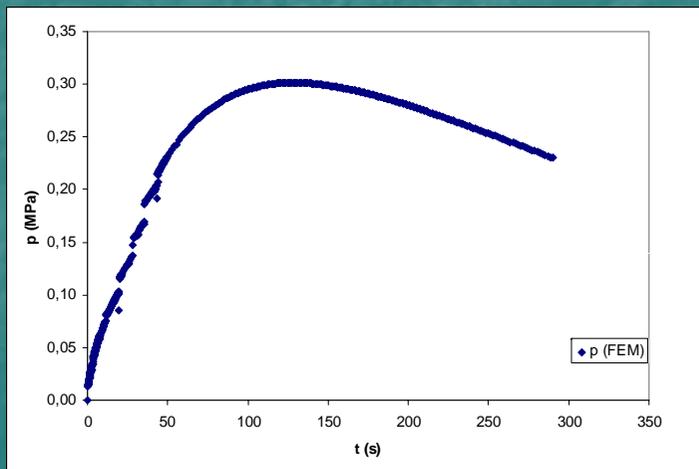


Si consideri un processo di formatura libera con:

$$s_0 = 0.48 \text{ mm} \quad a = 17.5 \text{ mm} \quad r_{\text{racc}} = 3 \text{ mm}$$

$$K = 135 \quad m = 0.45 \quad \bar{\epsilon}_{\text{opt}} = 0.0032$$

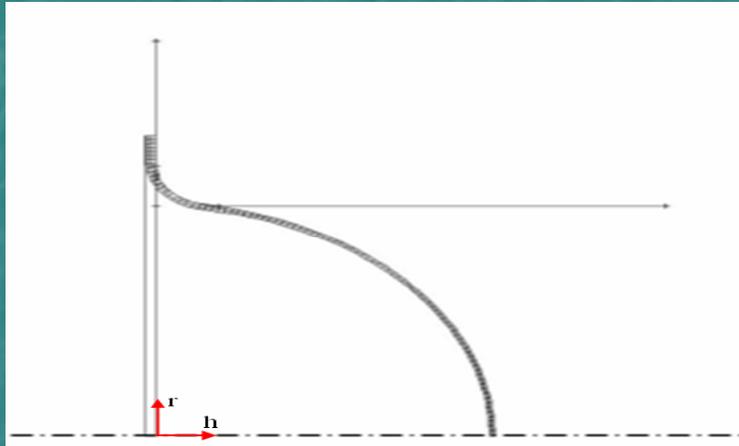
$$H = \frac{h}{a}$$





PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

Modello numerico: processo a velocità di deformazione costante

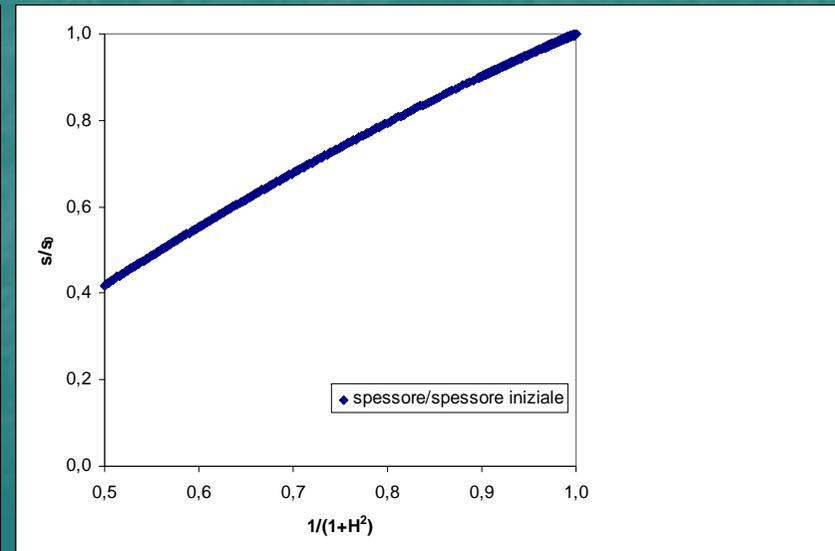
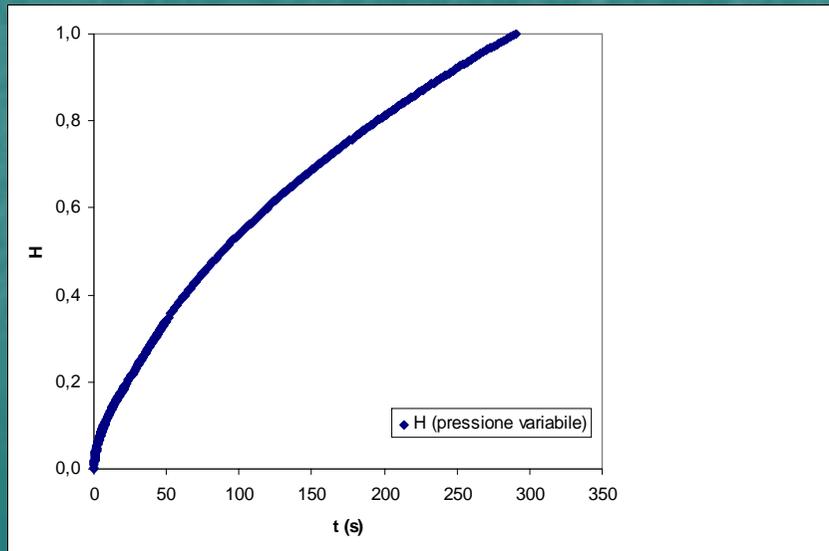


Si consideri un processo di formatura libera con:

$$s_0 = 0.48 \text{ mm} \quad a = 17.5 \text{ mm} \quad r_{\text{racc}} = 3 \text{ mm}$$

$$K = 135 \quad m = 0.45 \quad \bar{\epsilon}_{\text{opt}} = 0.0032$$

$$H = \frac{h}{a}$$





PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

Confronto modelli analitico-numerico: processo a pressione costante

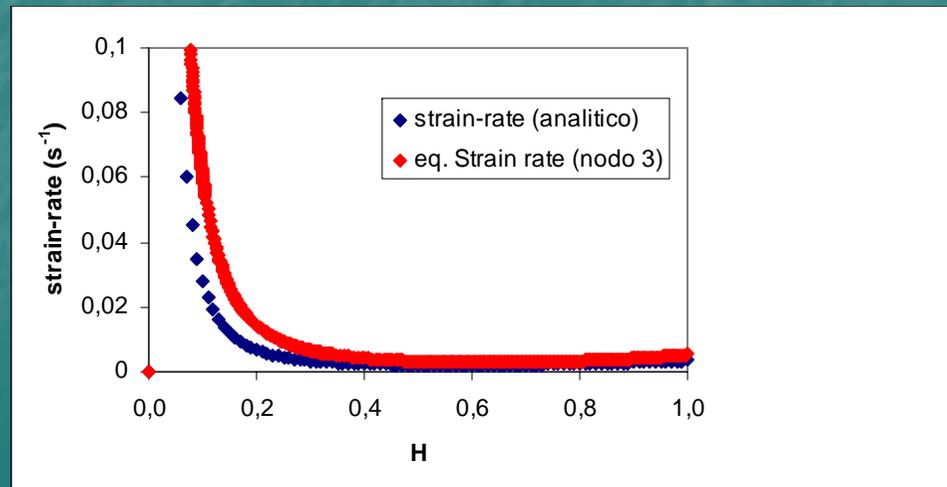


Si consideri un processo di formatura libera con:

$s_0=0.48$ mm $a=17.5$ mm $r_{\text{racc}}=3$ mm $p=0.29$ MPa

$K=135$ $m=0.45$

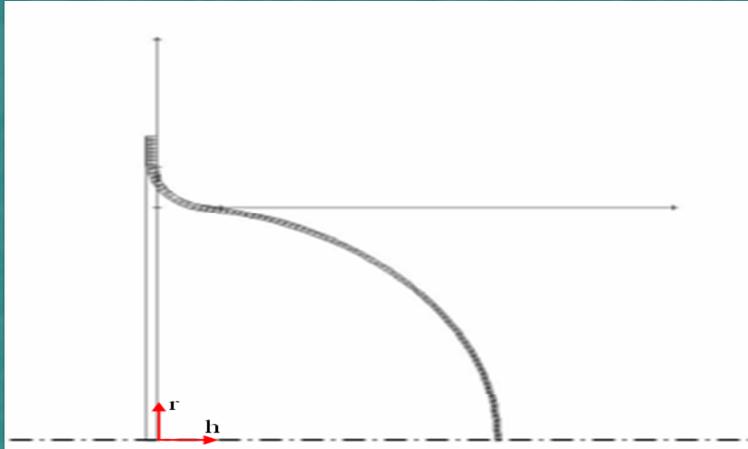
$$H = \frac{h}{a}$$





PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

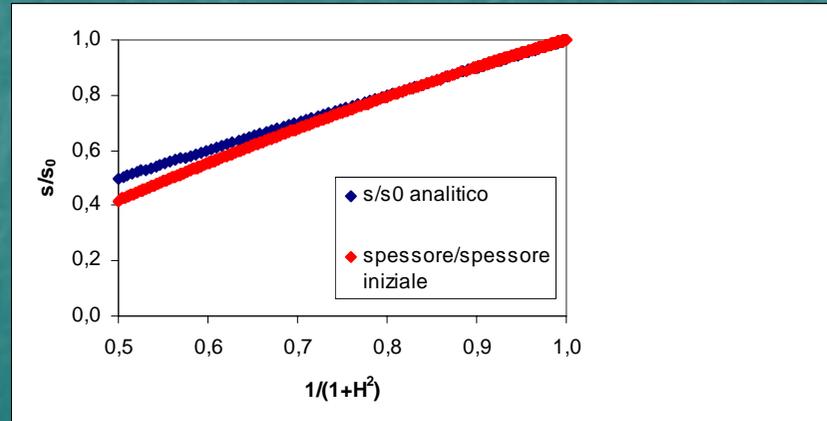
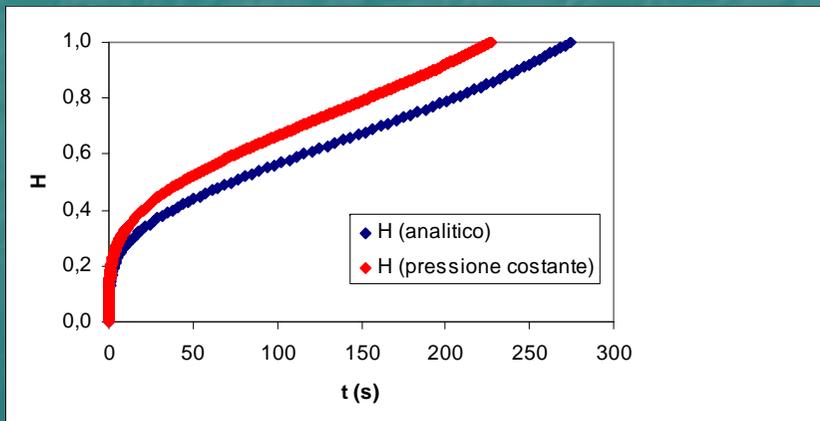
Confronto modelli analitico-numerico: processo a pressione costante



Si consideri un processo di formatura libera con:
 $s_0=0.48$ mm $a=17.5$ mm $r_{\text{racc}}=3$ mm $p=0.29$ MPa

$K=135$ $m=0.45$

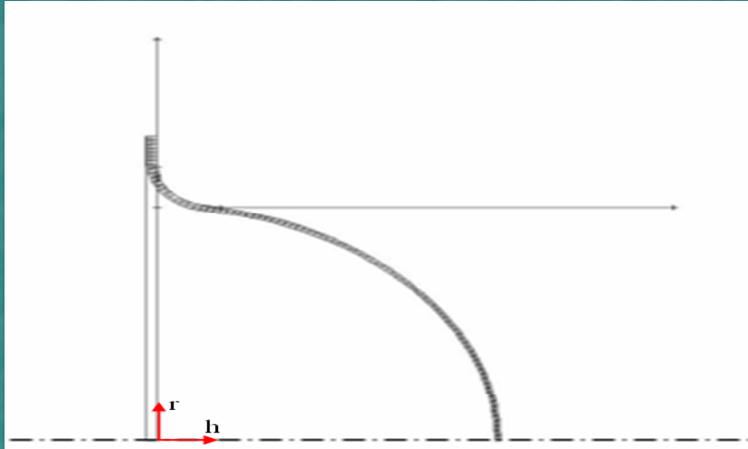
$$H = \frac{h}{a}$$





PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

Confronto analitico-numerico: velocità di deformazione costante

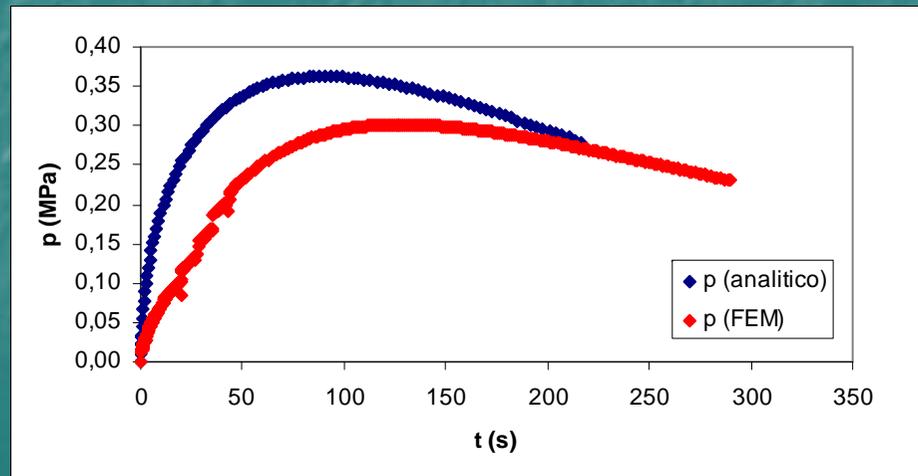


Si consideri un processo di formatura libera con:

$$s_0=0.48 \text{ mm} \quad a=17.5 \text{ mm} \quad r_{\text{racc}}=3 \text{ mm}$$

$$K=135 \quad m=0.45 \quad \bar{\dot{\epsilon}}_{\text{opt}}=0.0032$$

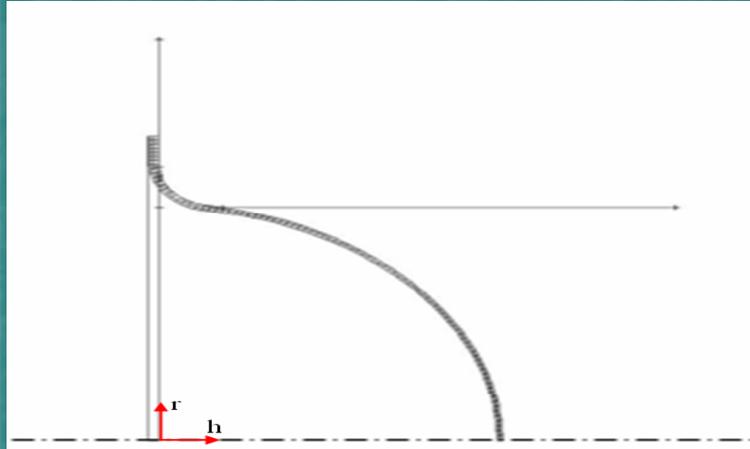
$$H = \frac{h}{a}$$





PROCESSO DI FORMATURA LIBERA

Confronto analitico-numeric: velocità di deformazione costante



Si consideri un processo di formatura libera con:

$$s_0 = 0.48 \text{ mm} \quad a = 17.5 \text{ mm} \quad r_{\text{racc}} = 3 \text{ mm}$$

$$K = 135 \quad m = 0.45 \quad \bar{\dot{\epsilon}}_{\text{opt}} = 0.0032$$

$$H = \frac{h}{a}$$

