

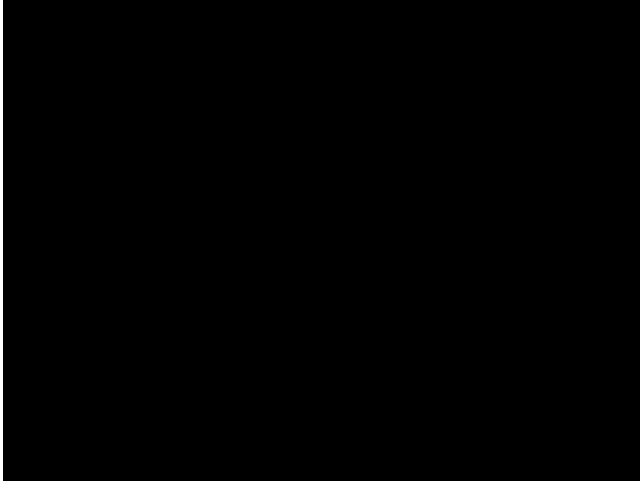
NOÇÕES DE PLASTICIDADE

**SEP277 – PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO E
NÃO-CONVENCIONAIS**

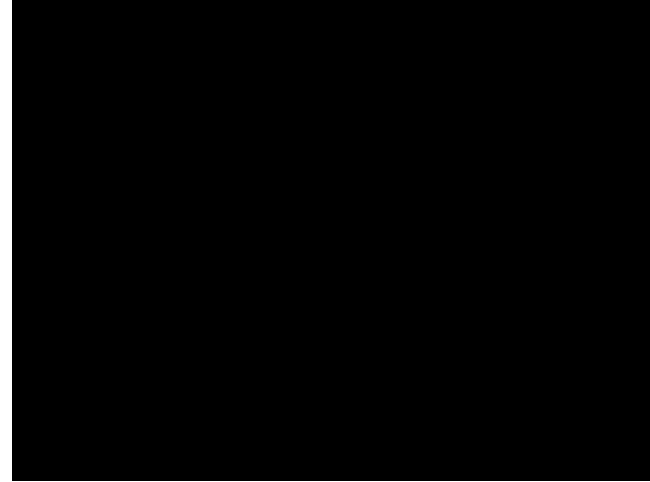
**AULA 1
NOÇÕES DE PLASTICIDADE**

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

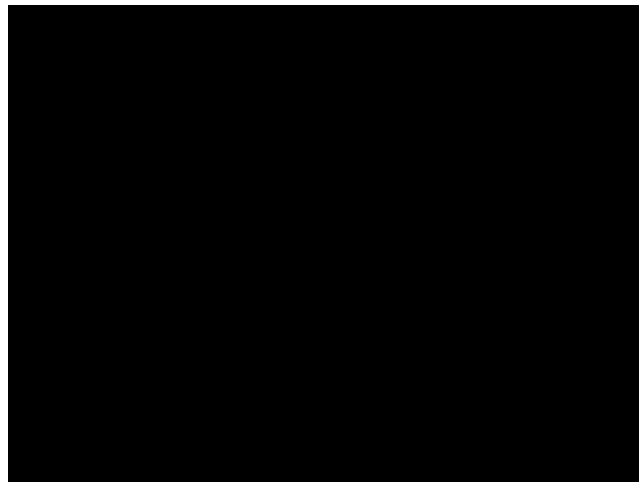
Forjamento manual



Forjamento em prensa

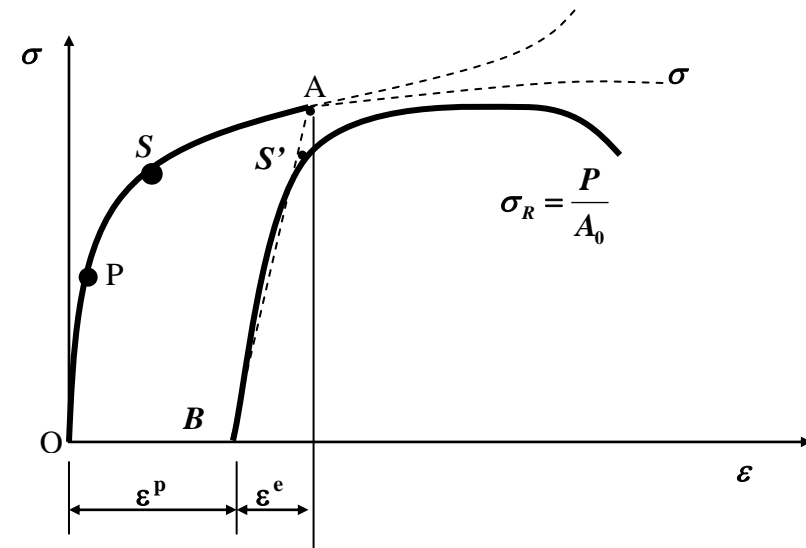
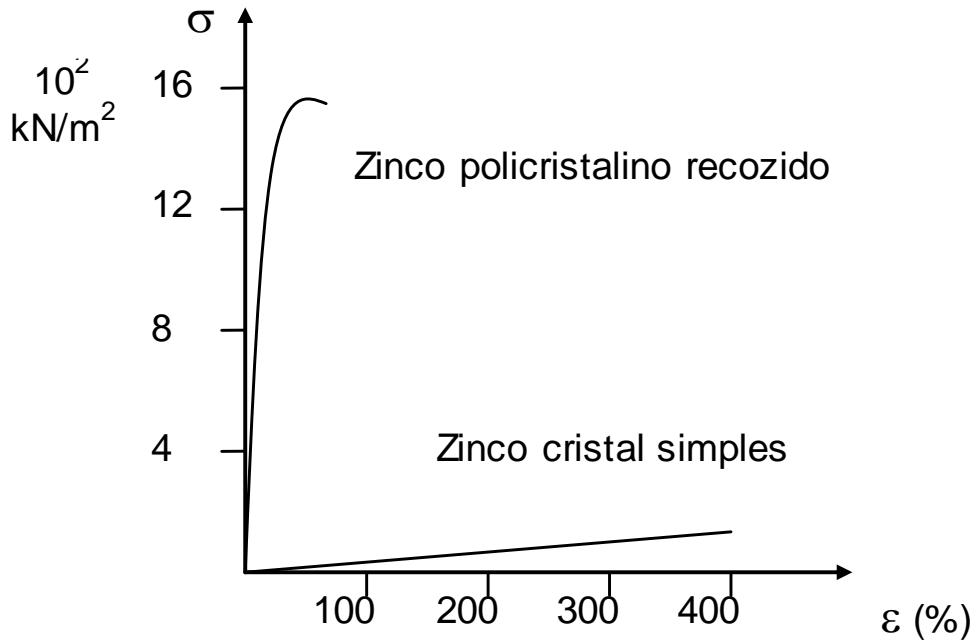


Forjamento em serie



NOÇÕES DE PLASTICIDADE

Típicas curvas de tensão-deformação



$$\sigma_t = \frac{F}{A_0}$$

Deformação de engenharia

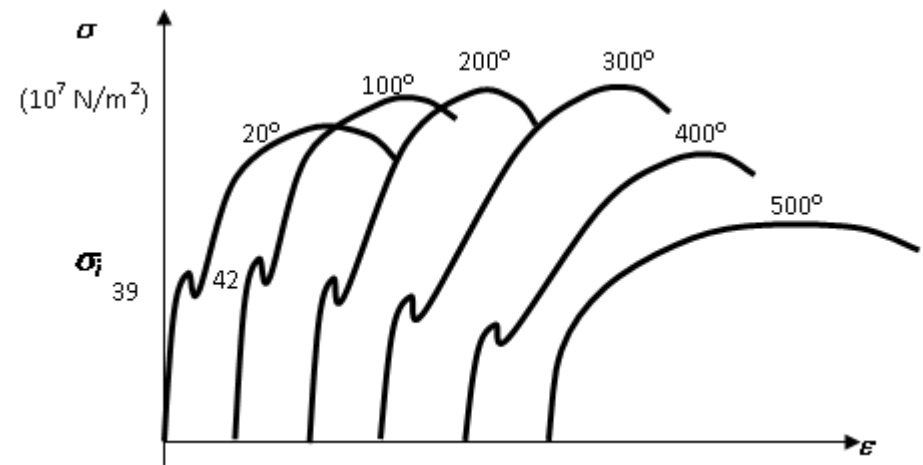
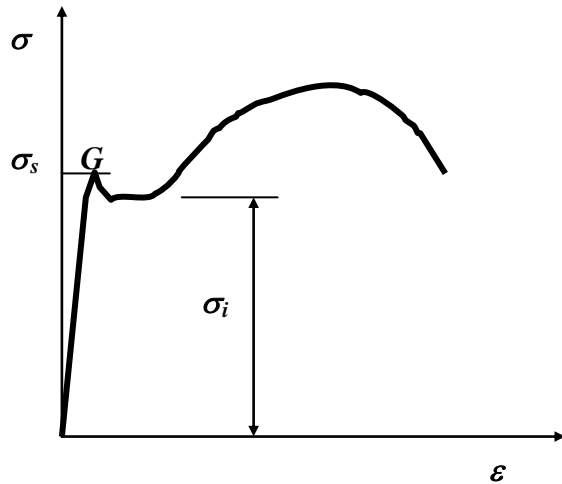
$$e = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l_0} = \frac{1}{l_0} l \Big|_{l_0}^l = \frac{(l - l_0)}{l_0}$$

Deformação verdadeira

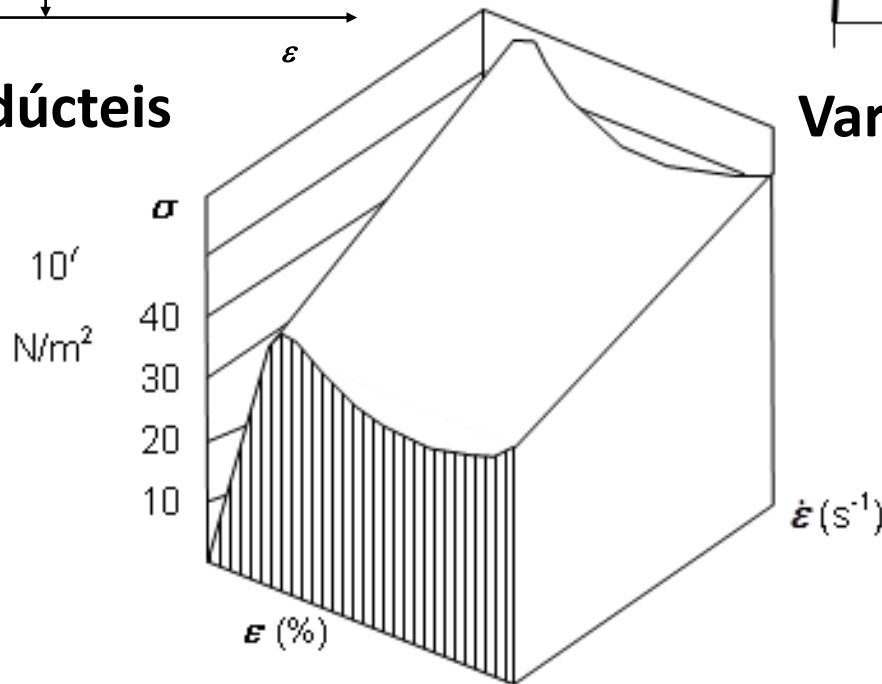
$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln(l) \Big|_{l_0}^l = \ln(l) - \ln(l_0) = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

Típicas curvas de tensão-deformação



Aços dúcteis



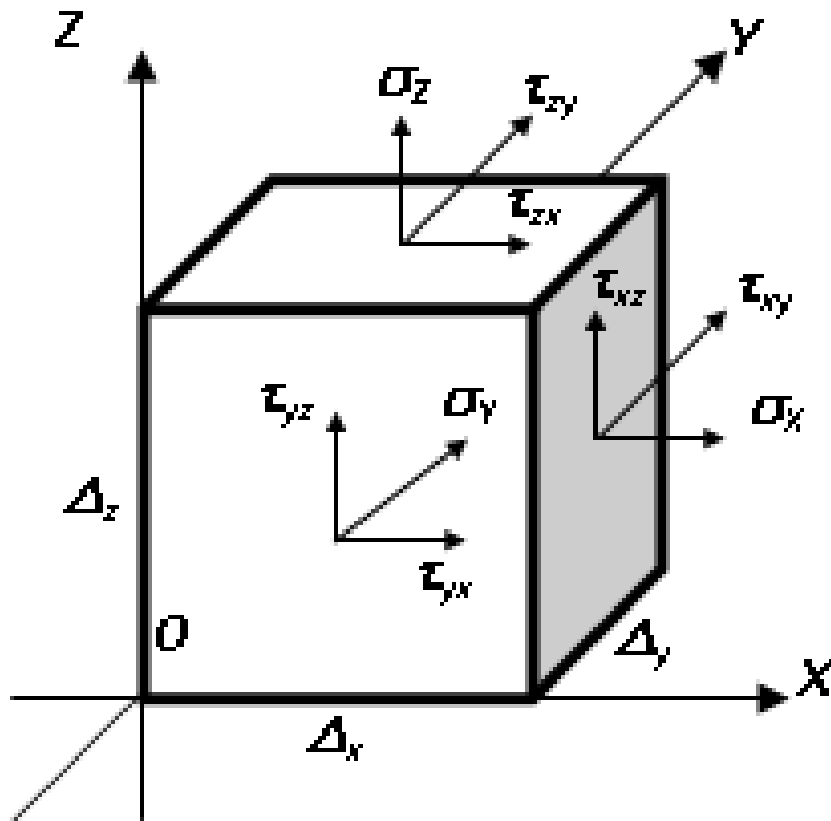
Variações com a temperatura

Variações com a taxa de deformação

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de tensões



Estado geral de tensões em 3D

$$\tau_{zx} = \tau_{xz}$$

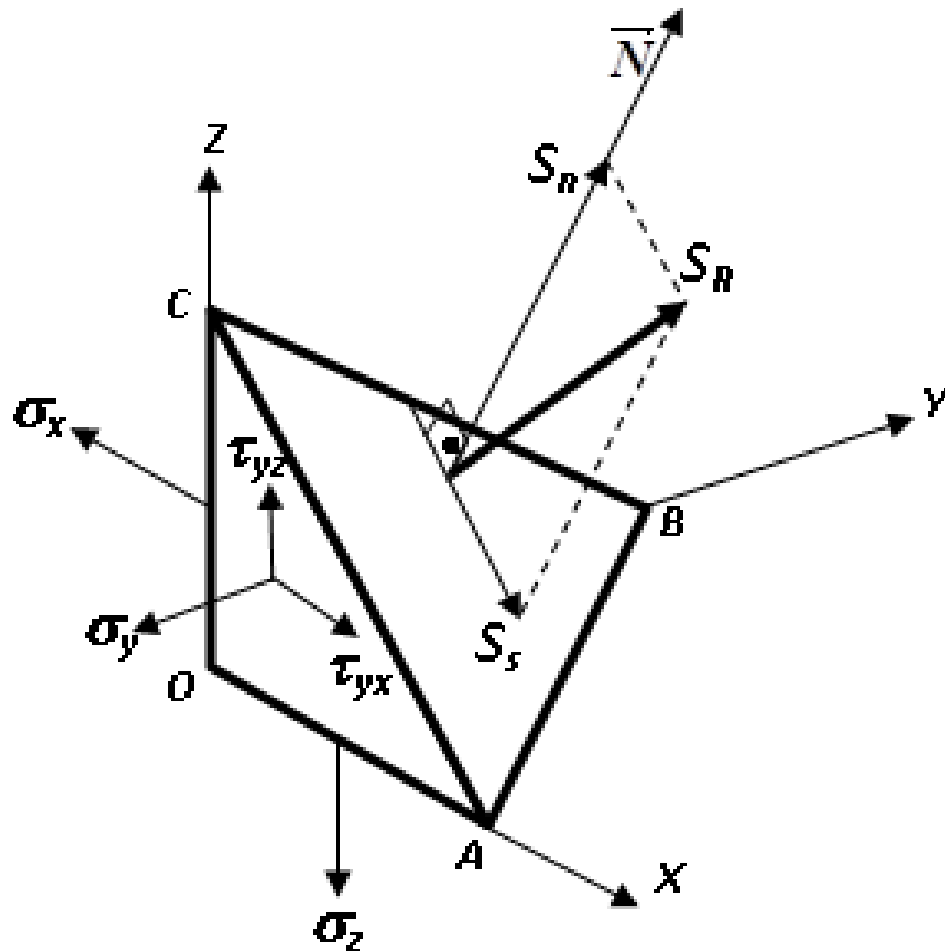
$$\tau_{zy} = \tau_{yz}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS
- o estado de tensões



Tensões internas

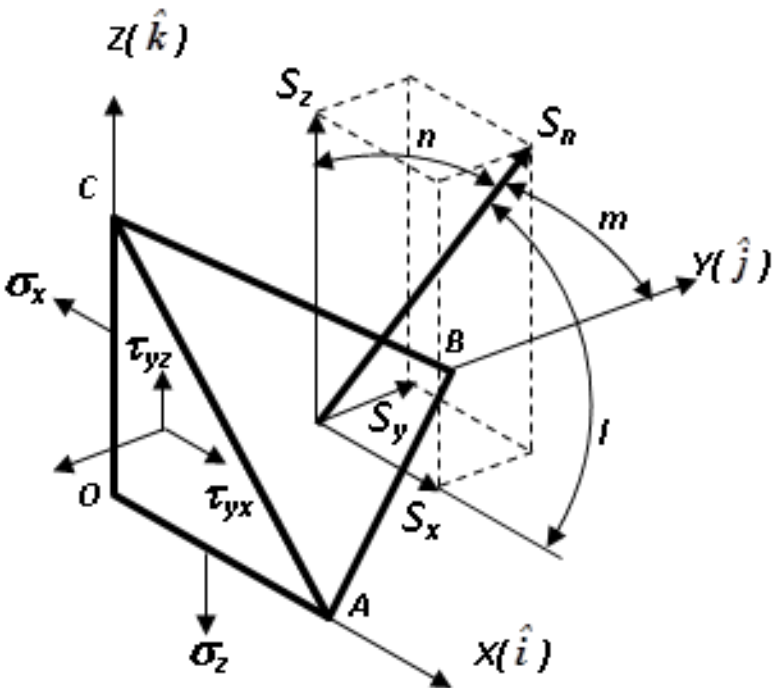
$$S_R = \sqrt{S_n^2 + S_s^2}$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de tensões

$$S_R = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}$$



$$S_x \cdot (1) = \sigma_x \cdot (l) + \tau_{xy} \cdot (m) + \tau_{xz} \cdot (n)$$

$$S_y \cdot (1) = \sigma_y \cdot (m) + \tau_{xy} \cdot (l) + \tau_{yz} \cdot (n)$$

$$S_z \cdot (1) = \sigma_z \cdot (n) + \tau_{yz} \cdot (m) + \tau_{xz} \cdot (l)$$

$l, m, n =$ cossenos diretores de S_R

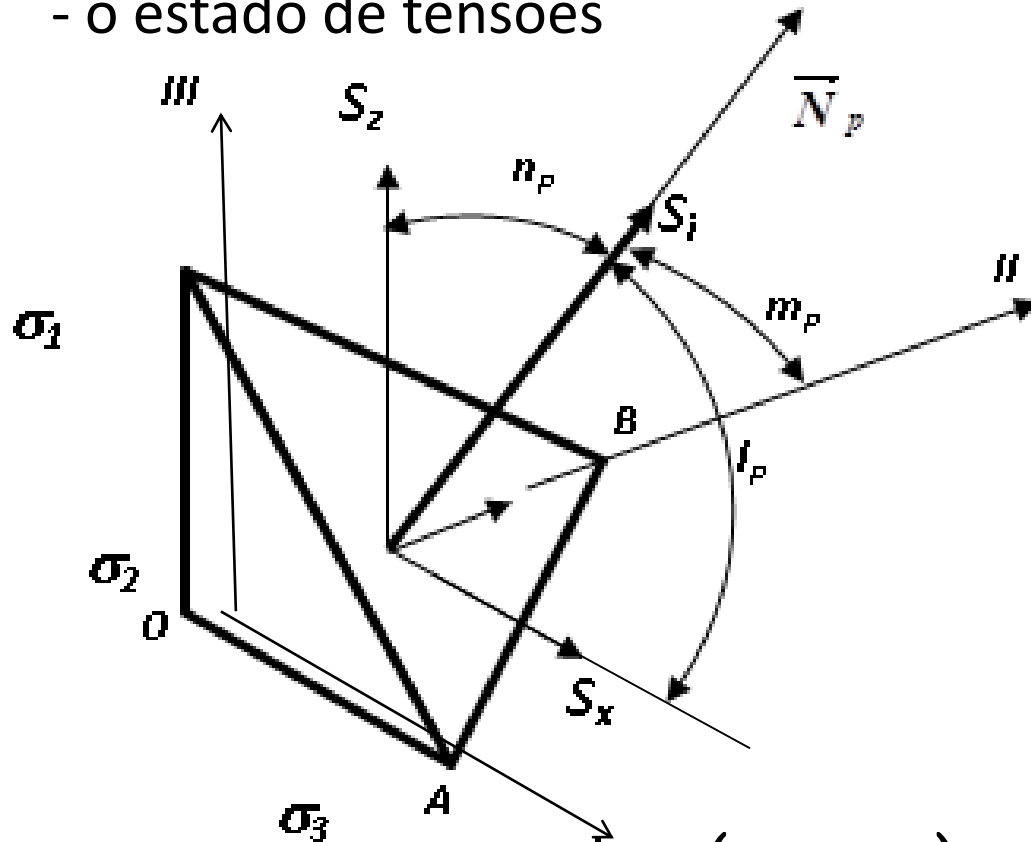
$$S_n = \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2(\tau_{xy} lm + \tau_{yz} mn + \tau_{zx} nl)$$

$$S_S^2 = S_R^2 - S_n^2$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de tensões



**Tensões Principais –
cisalhamento nulo**

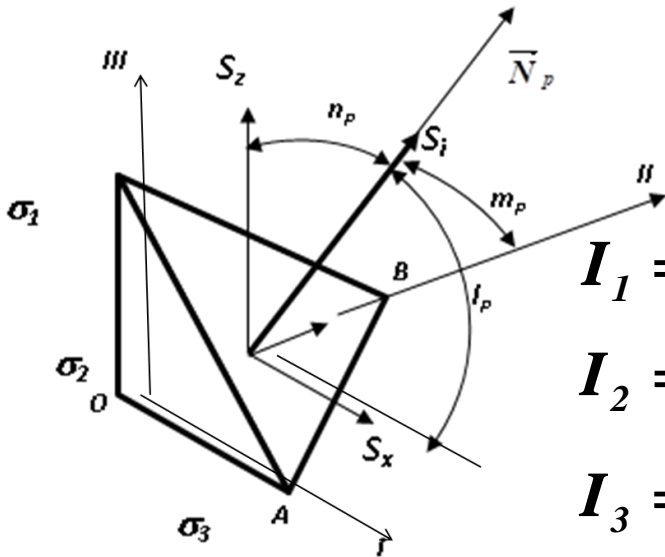
$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - S_p) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - S_p) & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - S_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_p \\ m_p \\ n_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de tensões

**Tensões Principais –
cisalhamento nulo**



$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$I_2 = -(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)$$

$$I_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - (\tau_{yz}^2 \sigma_x + \tau_{xz}^2 \sigma_y + \tau_{xy}^2 \sigma_z)$$

$$I_1 = \sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III}$$

$$I_2 = \sigma_I \cdot \sigma_{II} + \sigma_{II} \cdot \sigma_{III} + \sigma_I \cdot \sigma_{III}$$

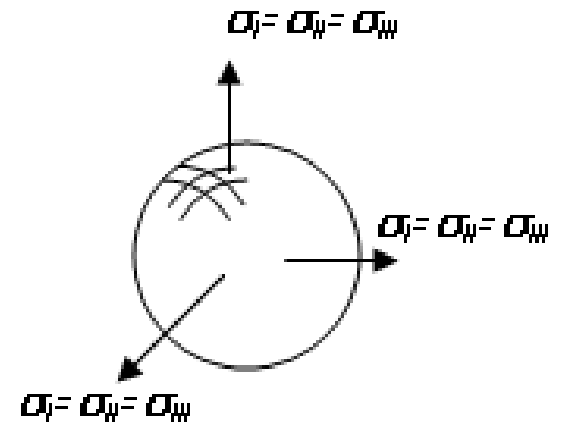
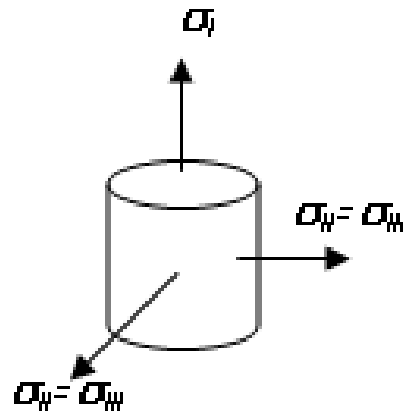
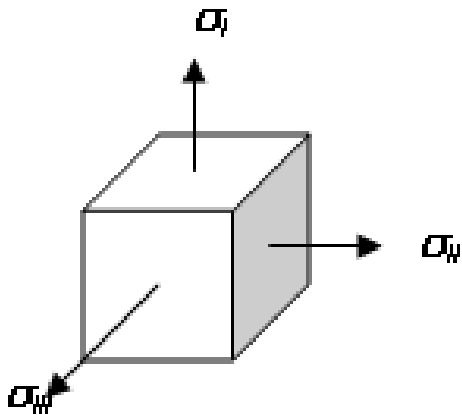
$$I_3 = \sigma_I \cdot \sigma_{II} \cdot \sigma_{III}$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3} I_1 = \frac{1}{3} (\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III}) = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS - o estado de tensões

Principais estados de tensão



(a) Estado triplo

(b) Estado cilíndrico

(c) Estado esférico

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de tensões

Tensão equivalente

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2]}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]}$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS - o estado de tensões

Cisalhamento puro

$$\sigma_x = 0$$

$$\sigma_y = 0$$

$$\sigma_z = 0$$

$$\tau_{xy} = T$$

$$\tau_{yz} = 0$$

$$\tau_{zx} = 0$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3}T$$

OU

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}}\bar{\sigma} = 0,577S$$

Tração uniaxial

$$\sigma_x = S$$

$$\sigma_y = 0$$

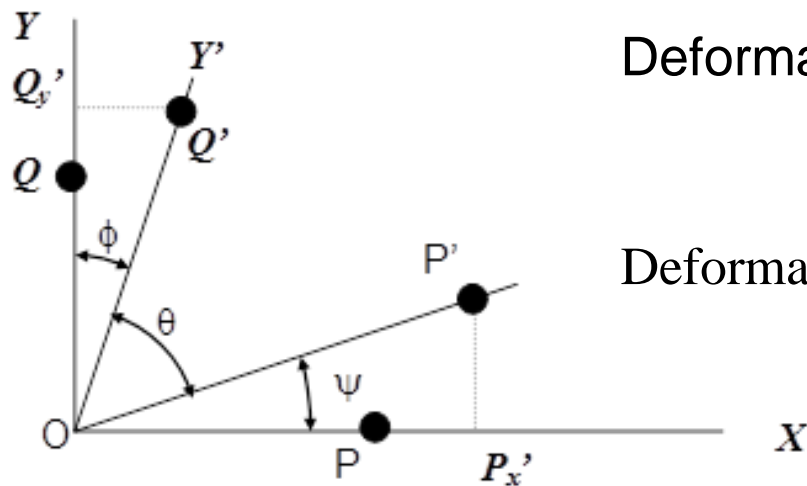
$$\sigma_z = 0$$

$$\bar{\sigma} = S$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de deformações



Deformação na direção OY: $OY = \frac{OQ' - OQ}{OQ}$

Deformação na direção OX: $OX = \frac{OP' - OP}{OP}$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{OQ'_y - OQ}{OQ} = \frac{QQ'_y}{OQ}$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{OP'_x - OP}{OP} = \frac{PP'_x}{OP}$$

$$\psi = \varepsilon_{yx} = \frac{P'P'_x}{OP}$$

Ângulo de cisalhamento

$$\frac{\pi}{2} - \theta$$

$$\phi = \varepsilon_{xy} = \frac{Q'Q'_y}{OQ}$$

$$\phi + \psi = \frac{\pi}{2} - \theta = \gamma_{xy}$$

Portanto: $\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{xy} = \gamma_{xy}$

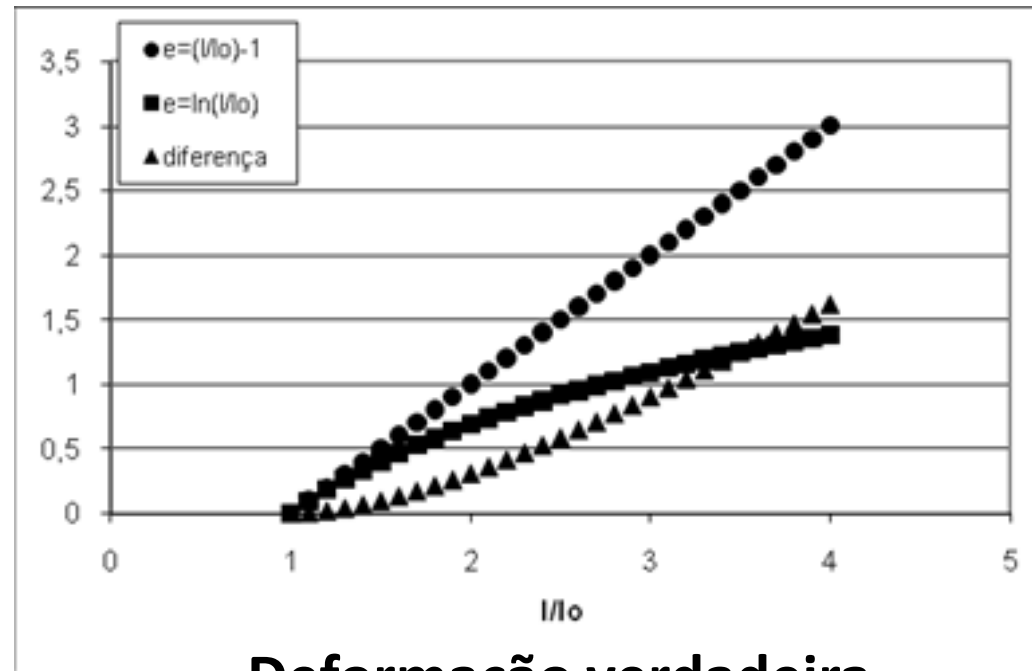
NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de deformações

Estado tridimensional de deformações

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zx} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$



Deformação de engenharia

$$e = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l_0} = \frac{1}{l_0} l \Big|_{l_0}^l = \frac{(l - l_0)}{l_0}$$

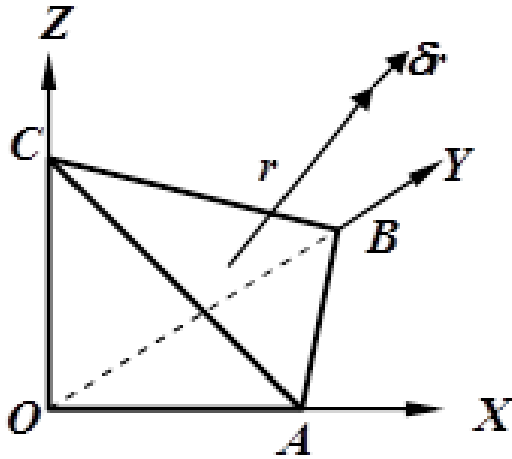
Deformação verdadeira

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln(l) \Big|_{l_0}^l = \ln(l) - \ln(l_0) = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de deformações



Deformações internas

$$\begin{vmatrix} (\varepsilon_x - \varepsilon) & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & (\varepsilon_x - \varepsilon) & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & (\varepsilon_x - \varepsilon) \end{vmatrix} = 0$$

$$J_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

$$J_2 = -(\varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_x \varepsilon_z + \varepsilon_y \varepsilon_z) + (\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)$$

$$J_3 = \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z + 2\varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{zx} - (\varepsilon_x \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_y \varepsilon_{zx}^2 + \varepsilon_z \varepsilon_{xy}^2)$$

$$J_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

$$J_2 = -(\varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3 \varepsilon_1)$$

$$J_3 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de deformações

Deformação efetiva

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})^2 + (\varepsilon_{II} - \varepsilon_{III})^2 + (\varepsilon_{III} - \varepsilon_I)^2}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)}$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de deformações

Taxas de deformação

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial (u_x)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial (u_x)}{\partial t} = \frac{\partial v_x}{\partial x}$$

Assim:

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad \dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}$$
$$\dot{\varepsilon}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y} \quad \dot{\gamma}_{yz} = \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y}$$
$$\dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad \dot{\gamma}_{xz} = \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x}$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

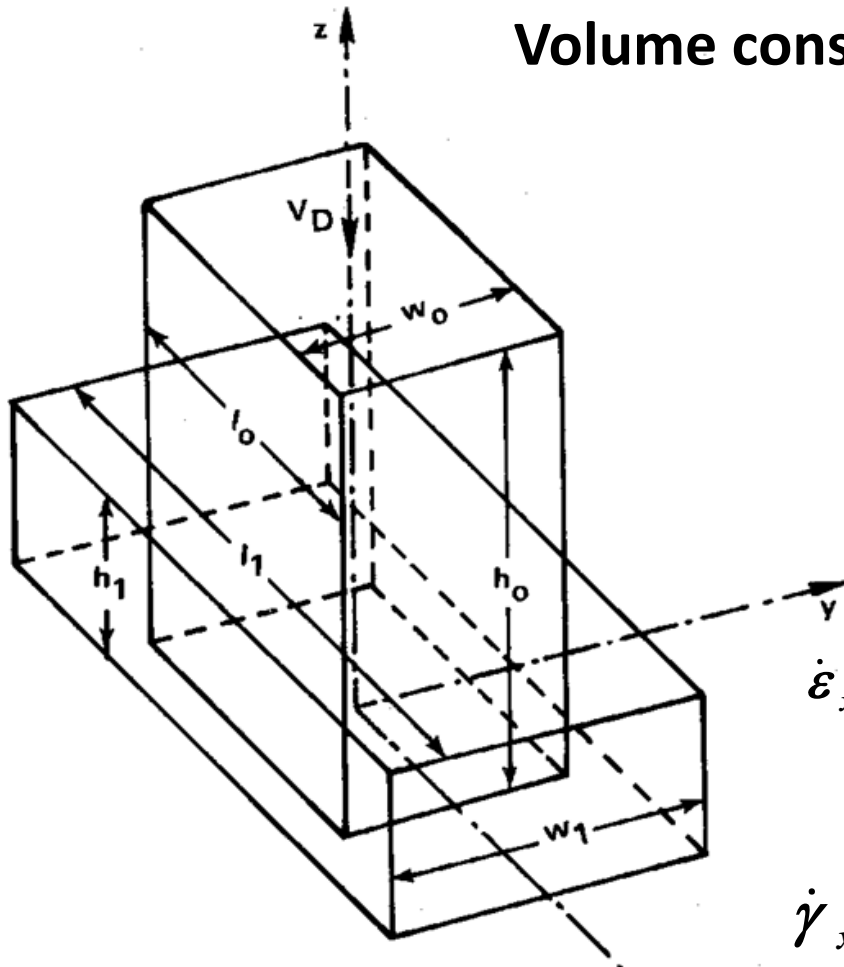
MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de deformações

Volume constante

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0$$

$$\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z = 0$$



$$v_x = \frac{V_D}{2h} x \quad v_y = \frac{V_D}{2h} y \quad v_z = -\frac{V_D}{2h} z$$

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{\partial v_x}{\partial x} = V_D/2h \quad \dot{\varepsilon}_y = V_D/2h; \quad \dot{\varepsilon}_z = -V_D/h$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \dot{\gamma}_{xz} = \dot{\gamma}_{yz} = 0$$

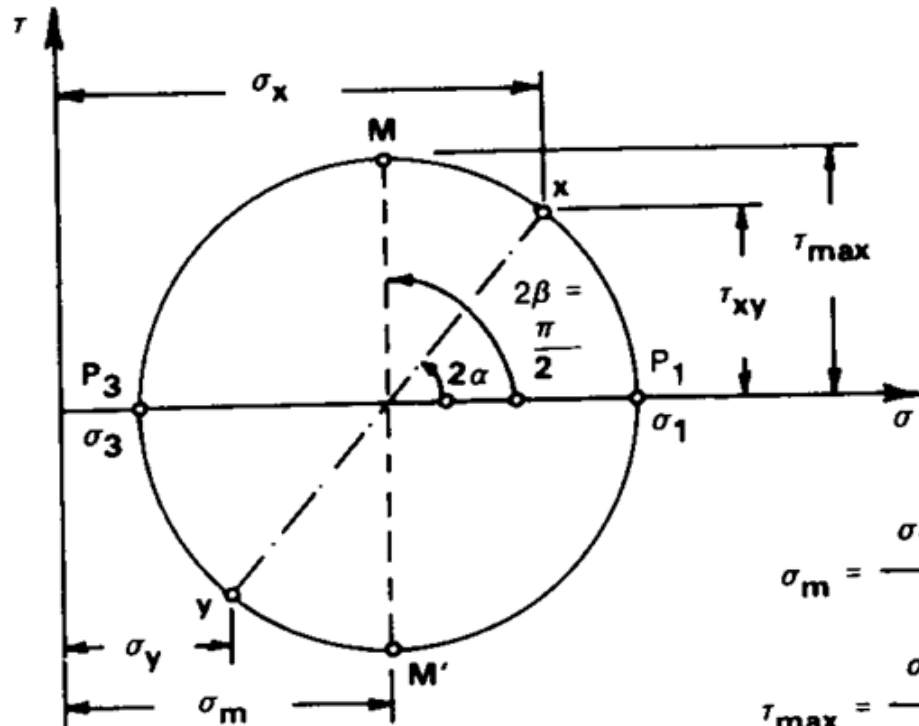
NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

- o estado de deformações

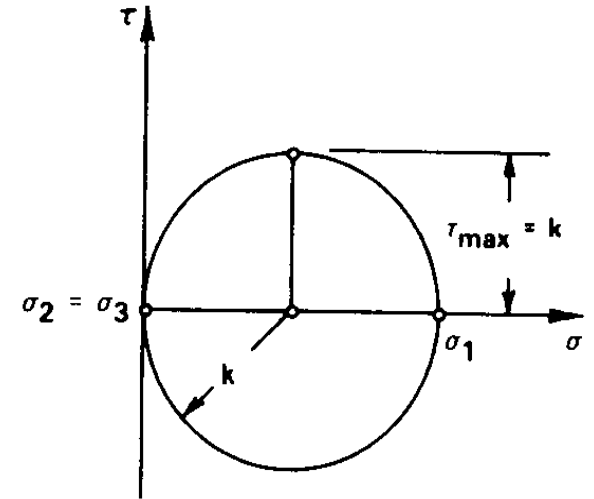
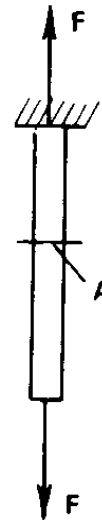
Critérios de escoamento - TRESCA

$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$$



$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$



$$k = \frac{S}{2}$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS
- o estado de deformações

Critérios de escoamento - VonMISES

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

$$\left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\}^{1/2} = k$$

$$\left\{ \frac{3}{2} [(\sigma_1 - \sigma_m)^2 + (\sigma_2 - \sigma_m)^2 + (\sigma_3 - \sigma_m)^2] \right\}^{1/2} = k$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS – Relações tensão-deformação

Região elástica

$$e_{xx} = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_y + \sigma_z) + \alpha T_x$$

$$\{e_{ij}\} = |S| \{\sigma_{ij}\} + \alpha T_{ij} \delta_{ij}$$

$$e_{yy} = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_z) + \alpha T_y$$

Forma matricial

$$e_{zz} = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) + \alpha T_z$$

$$\gamma_{xy} = \frac{(1+\nu)}{E} \tau_{xy}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{(1+\nu)}{E} \tau_{xz}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{(1+\nu)}{E} \tau_{yz}$$

$$\begin{pmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ e_{zz} \\ e_{xy} \\ e_{xz} \\ e_{yz} \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} + \alpha \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\{\sigma_{ij}\} = |S|^{-1} \{\epsilon_{ij}\}$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

– Relações tensão-deformação

Região elástica

Deformação plana

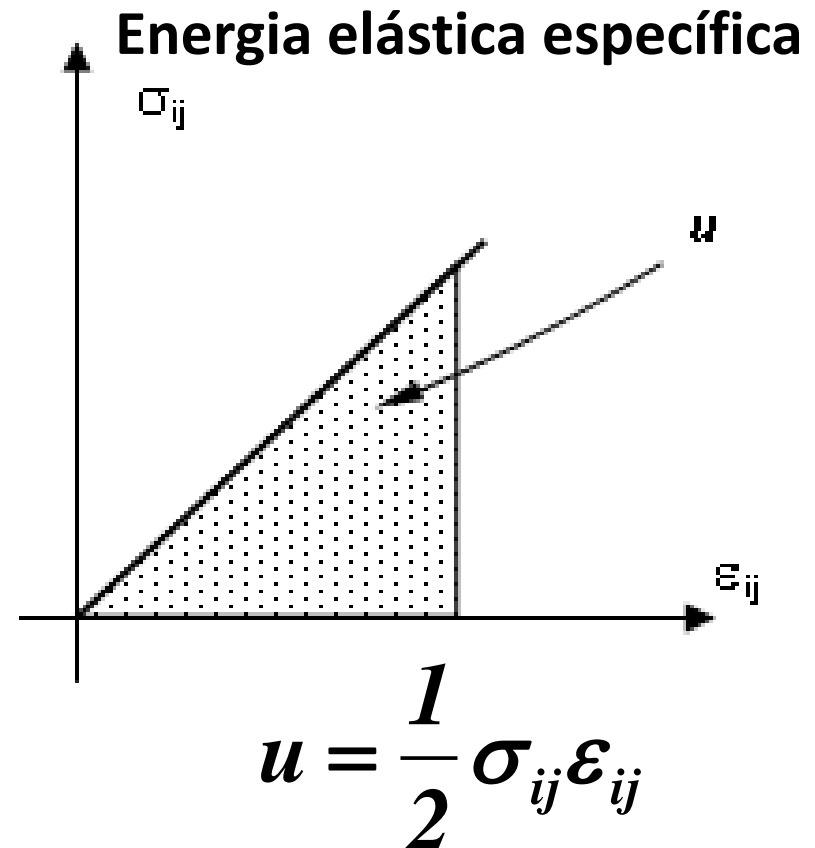
$$\gamma_{zz} = \gamma_{xz} = 0 \quad \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$$

Tensão uniaxial

$$\sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

$$\sigma_x = E e_{xx} \quad e_{xx} = \frac{1}{2} \sigma_x$$



NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS
– Relações tensão-deformação

Região Plástica

Depende do caminho percorrido pelo material

$$\dot{\varepsilon}_1 = \lambda(\sigma_1 - \sigma_m)$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \lambda(\sigma_2 - \sigma_m)$$

$$\dot{\varepsilon}_3 = \lambda(\sigma_3 - \sigma_m)$$

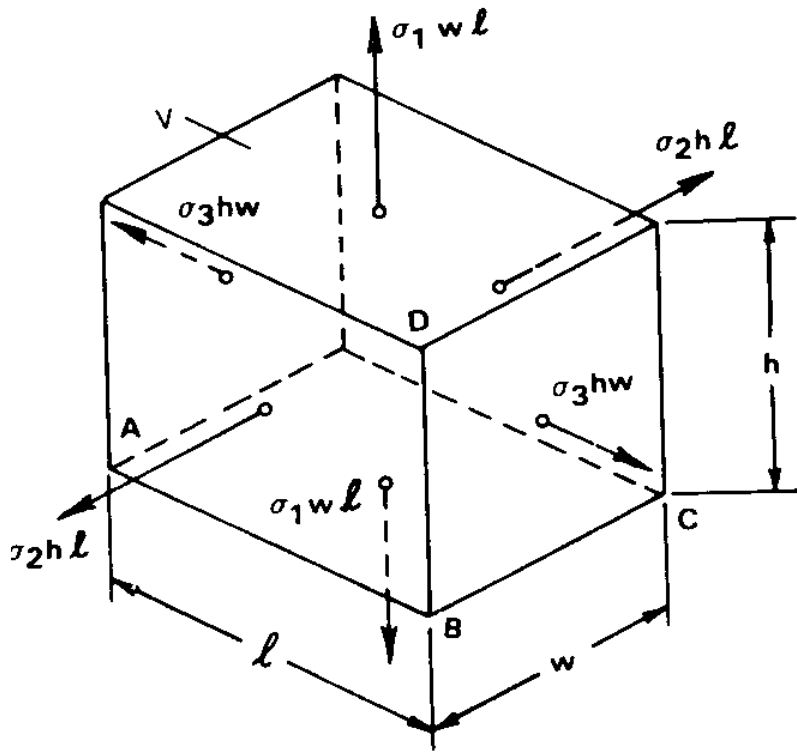
$$d\varepsilon_1 = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} (\sigma_1 - \sigma_m)$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\bar{\sigma}} (\sigma_1 - \sigma_m)$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

– Potência e energia de deformação



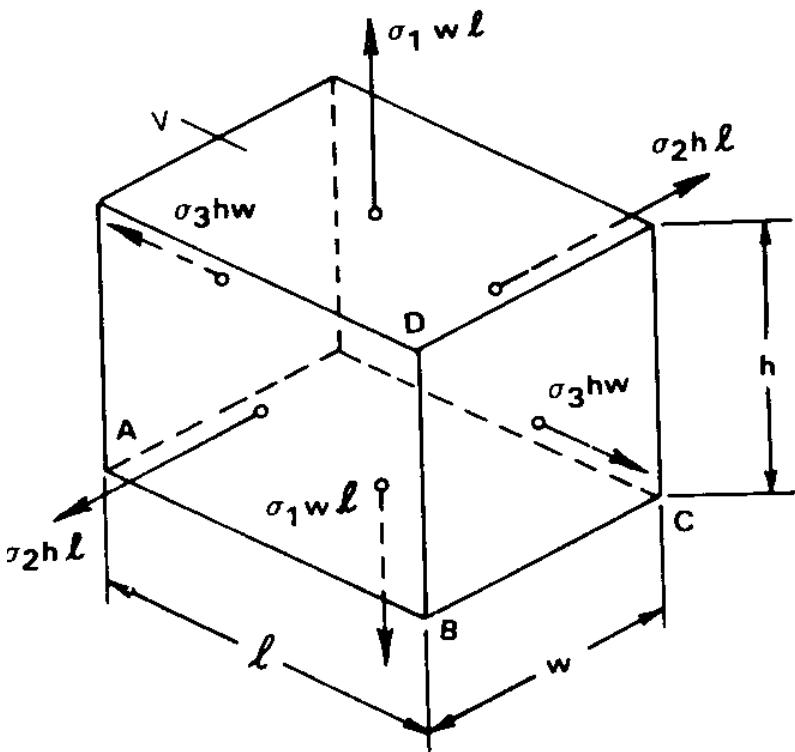
$$\begin{aligned} P &= \sigma_1 w l v_h + \sigma_2 h l v_w + \sigma_3 w h v_l \\ &= \sigma_1 w l h \dot{\epsilon}_1 + \sigma_2 w l h \dot{\epsilon}_2 + \sigma_3 w l h \dot{\epsilon}_3 \\ &= (\sigma_1 \dot{\epsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\epsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\epsilon}_3) V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= V \int_{t_0}^{t_1} (\sigma_1 \dot{\epsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\epsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\epsilon}_3) dt \\ W &= V \left(\int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 + \int_0^{\epsilon_2} \sigma_2 d\epsilon_2 + \int_0^{\epsilon_3} \sigma_3 d\epsilon_3 \right) \end{aligned}$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

MODELO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DOS METAIS

– Potência e energia de deformação



$$dW = (\sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3) V$$

$$P = \frac{dW}{dt} = (\sigma_1 \dot{\varepsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\varepsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\varepsilon}_3) V$$

$$dW = \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} V$$

$$P = \bar{\sigma} \dot{\bar{\varepsilon}} V$$

$$\bar{\sigma} \dot{\bar{\varepsilon}} = \sigma_1 \dot{\varepsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\varepsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\varepsilon}_3$$

$$\dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3 = 0$$

$$\sigma_m (\dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3) = 0$$

$$\bar{\sigma} \dot{\bar{\varepsilon}} = \dot{\varepsilon}_1 (\sigma_1 - \sigma_m) + \dot{\varepsilon}_2 (\sigma_2 - \sigma_m) + \dot{\varepsilon}_3 (\sigma_3 - \sigma_m)$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{\varepsilon}_1^2 + \dot{\varepsilon}_2^2 + \dot{\varepsilon}_3^2)}$$

$$\bar{\varepsilon} = \int_{t_0}^t \dot{\bar{\varepsilon}} dt$$

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

ATRITO EM CONFORMAÇÃO DE METAIS

Não obedece as leis de atrito de Coulomb

$$\tau = \sigma_n \mu \quad \tau = f \sigma_n = \frac{m}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}$$

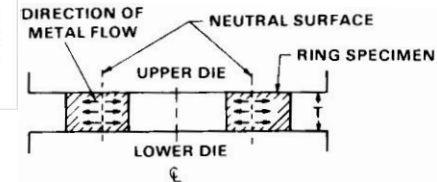
- $m = 0.05$ a 0.15 para forjamento à frio de aços, ligas de alumínio e cobre usando lubrificantes comuns de sabão fostatado ou óleo.
- $m = 0.2$ a 0.4 para forjamento à quente de aços, ligas de cobre e alumínio usando lubrificantes a base de grafite (água-grafite ou óleo-grafite)
- $m = 0.1$ a 0.3 para forjamento à quente de ligas de titânio e ligas de alta resistência à alta temperatura usando lubrificantes à base de vidro.
- $m = 0.7$ a 1.0 quando não se emprega lubrificantes, isto é, em laminação à quente de placas ou lingotes e extrusão não lubrificada de ligas de alumínio

NOÇÕES DE PLASTICIDADE

ATRITO EM CONFORMAÇÃO DE METAIS

Material	Temperatura do corpo de provas, °C	Fator de cisalhamento (m)	Tempo de contato	Relações do anel (a)	Sistema de lubrificação
6061 Al	426	0,4	0,038	6:3:0,5	(b)
	426	0,31	0,047	6:3:1	(b)
	426	0,53	0,079	6:3:2	(b)
Ti-7Al-4-Mo	955	0,42	0,033	3:1,5:0,25	(c)
	955	0,42	0,044	3:1,5:1	(c)
	1750	0,7	0,056	3:1,5:0,25	(c)
403 SS	982	0,23	0,029	3:1,5:1	(c)
	982	0,24	0,039	3:1,5:1	(c)
	982	0,34	0,047	3:1,5:1	(c)
	1065	0,28	0,06	3:1,5:1	(c)
	1120	0,35	0,06	3:1,5:1	(c)
Waspaloy	1150	0,18	0,06	3:1,5:1	(c)
17-7PH SS	1065	0,28	0,06	3:1,5:1	(c)
	1150	0,35	0,06	3:1,5:1	(c)
Ti-6Al-4V	927	0,3	0,06	3:1,5:1	(c)
	955	0,46	0,06	3:1,5:1	(c)
Inconel 718	1093	0,18	0,06	3:1,5:1	(c)
	1150	0,33	0,06	3:1,5:1	(c)
Ti-8Al-1Mo-1V	955	0,27	0,06	3:1,5:1	(c)
	982	0,27	0,06	3:1,5:1	(c)
Udimet	1120	0,4	0,06	3:1,5:1	(c)
7075 Al	370	0,37	0,06	5:3:1	(b)
	426	0,31	0,06	5:3:1	(b)

(a) Dimensões dos anéis em polegadas, DE: DI: E; (b) pré-cobertura "Caustic" + cobertura de grafite "Dag 137" (Acheson) sobre corpo de provas e spray de grafite Deltaforge 43 (Acheson) na matriz; (c) cobertura à base de vidro moído Deltaforge 347 (Acheson) nos corpos de prova e grafite Deltaforge 43 (Acheson) na matriz.



NOÇÕES DE PLASTICIDADE

Método Variacional de solução da E.D.O.

HUEBNER

estrutura discretizada

funcional

$$I(T) = \iint_D \left[\frac{k_x}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{k_y}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 - \tilde{Q}T \right] d_x d_y + \int_{S^2} \left(qT + \frac{1}{2} hT^2 - hTT_\infty \right) d_S$$

$I(T^{(e)})$ mínimo

funcional discretizado

$$\frac{\partial I(T^{(e)})}{\partial T_i} = 0, i = 1, 2, \dots, r$$

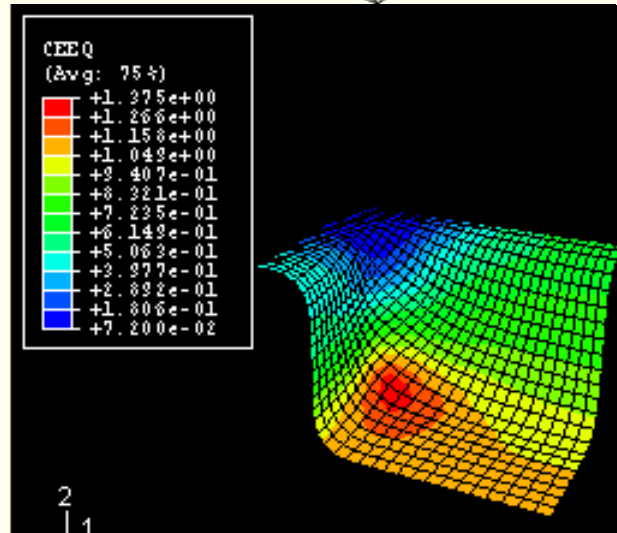
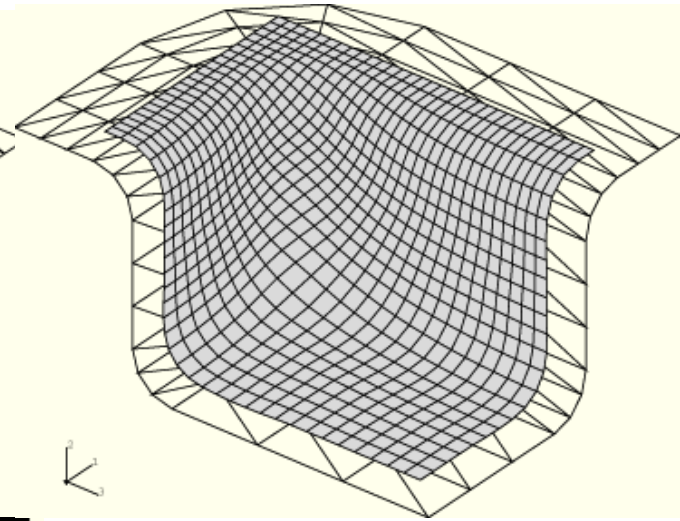
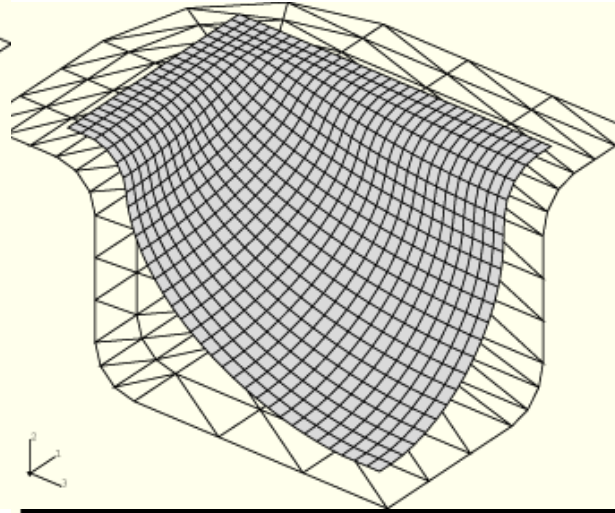
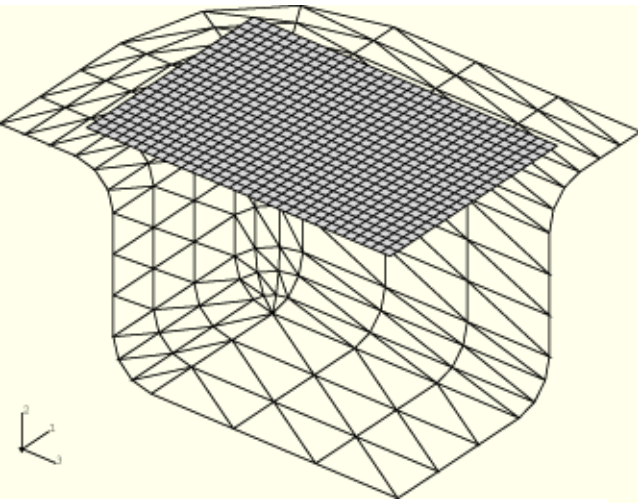
∴ para elemento inteiro:

$$[k_c]^{(e)} \{T\}^{(e)} = \{Q\}^{(e)} - \{q\}^{(e)} - [k_h]^{(e)} \{T\}^{(e)} + \{qT_\infty\}^{(e)}$$

= comporta/o geral de um ele/o térmico bidimensional

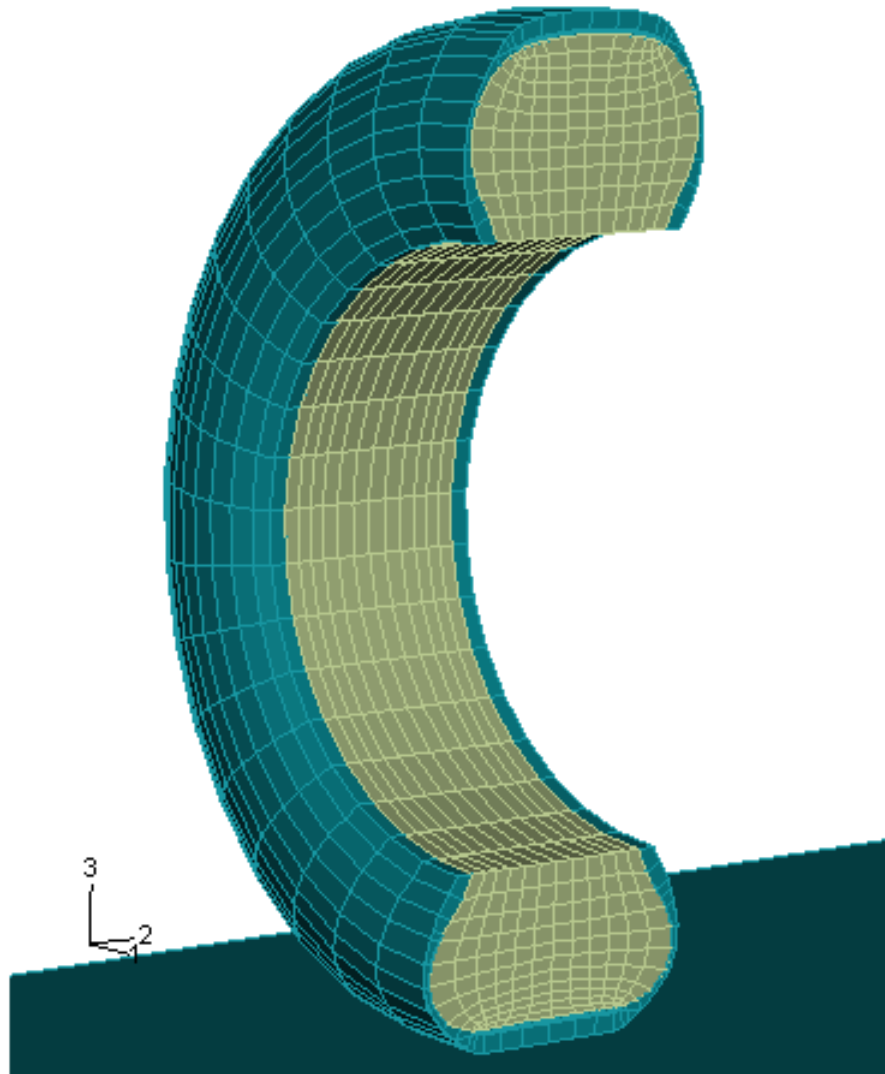
NOÇÕES DE PLASTICIDADE

EXEMPLO DE UMA OPERAÇÃO DE REPUXO



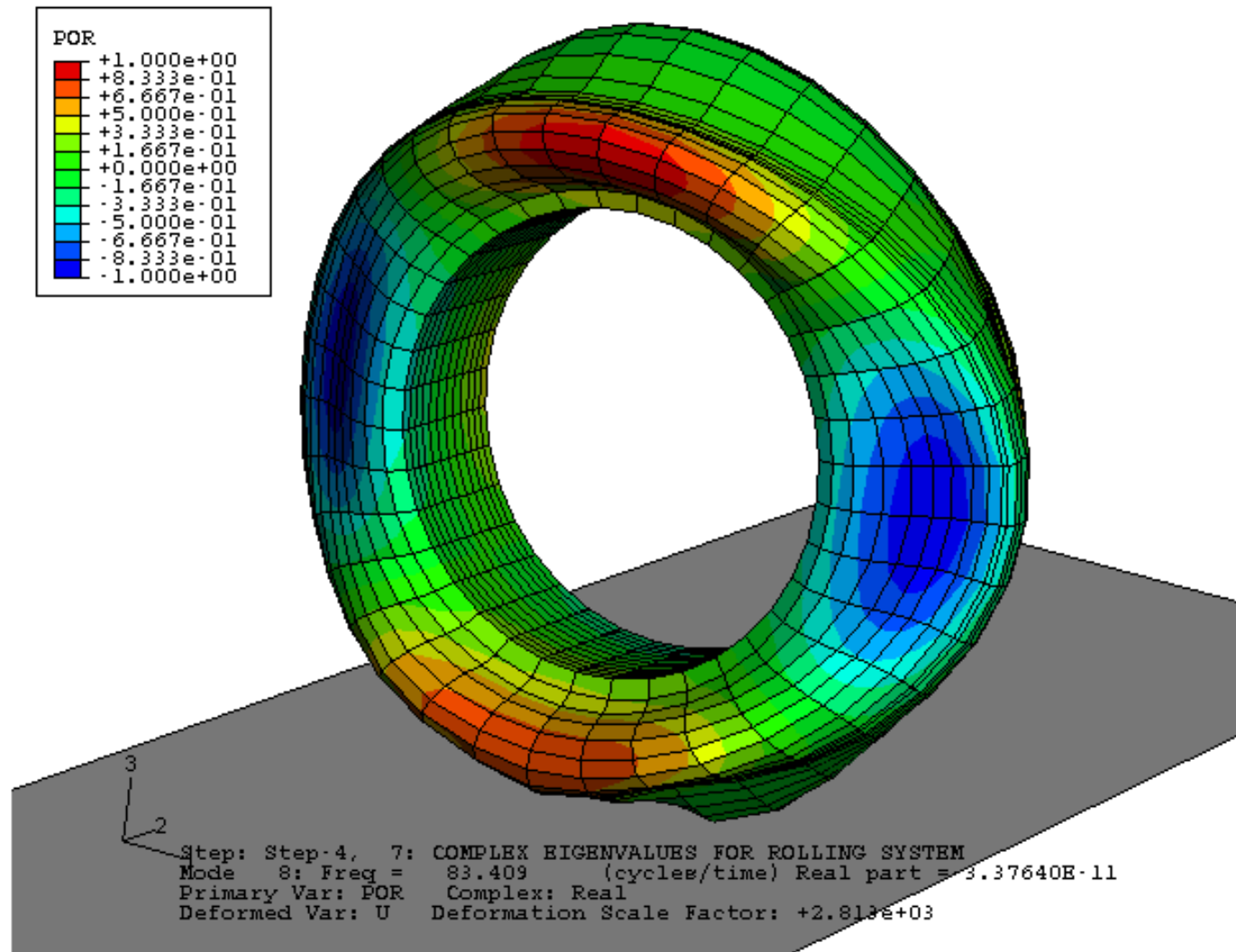
NOÇÕES DE PLASTICIDADE

EXEMPLO DE MODELAGEM DE PNEUS



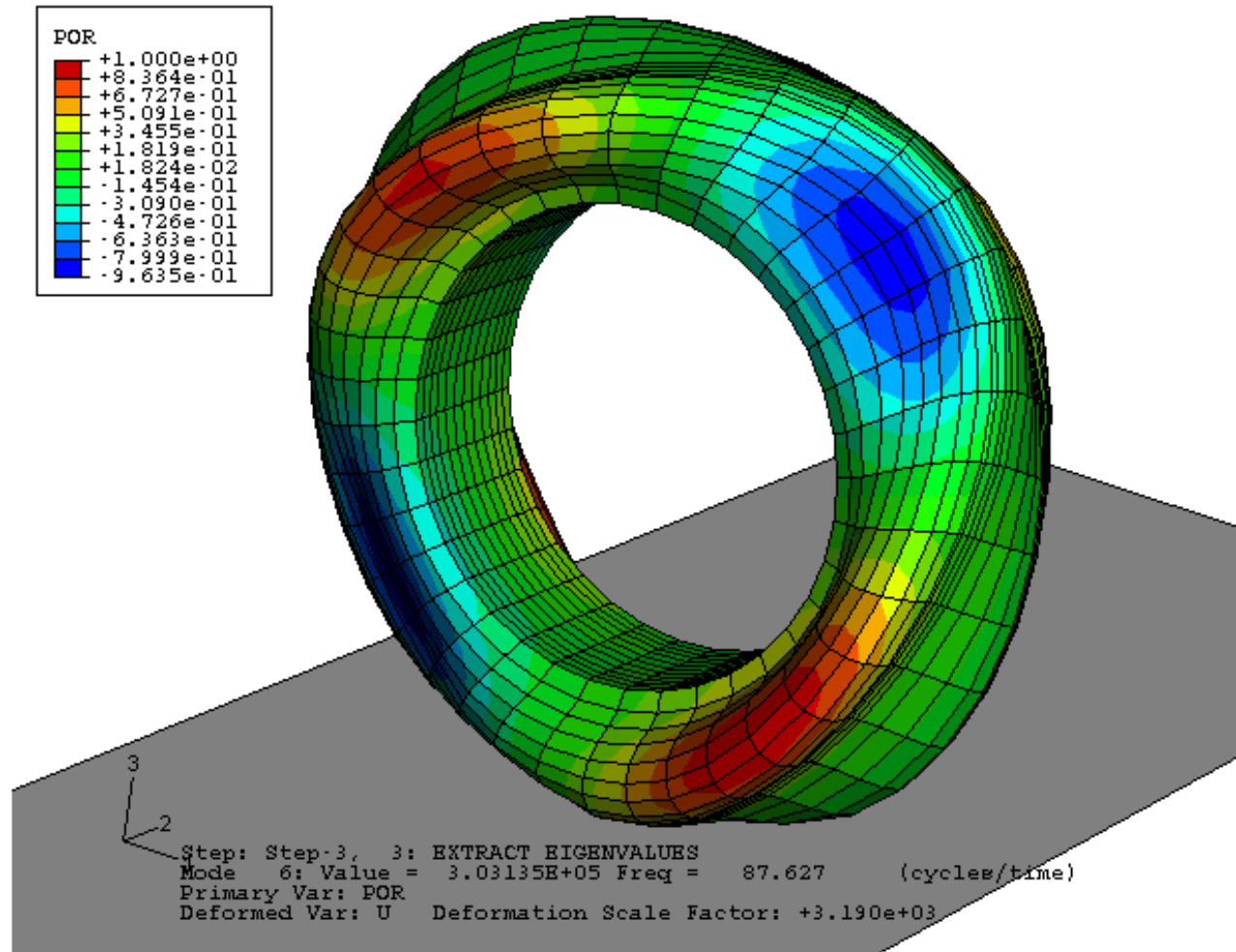
NOÇÕES DE PLASTICIDADE

EXEMPLO DE MODELAGEM DE PNEUS

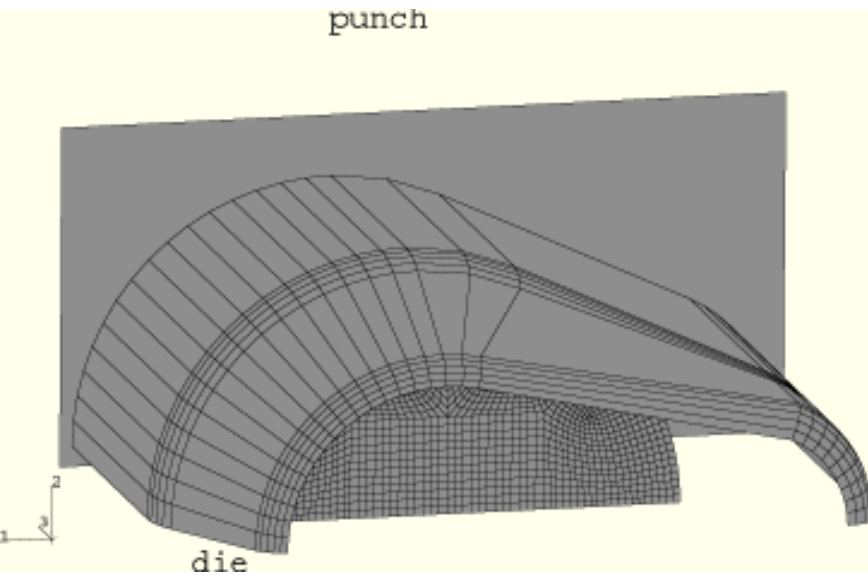


NOÇÕES DE PLASTICIDADE

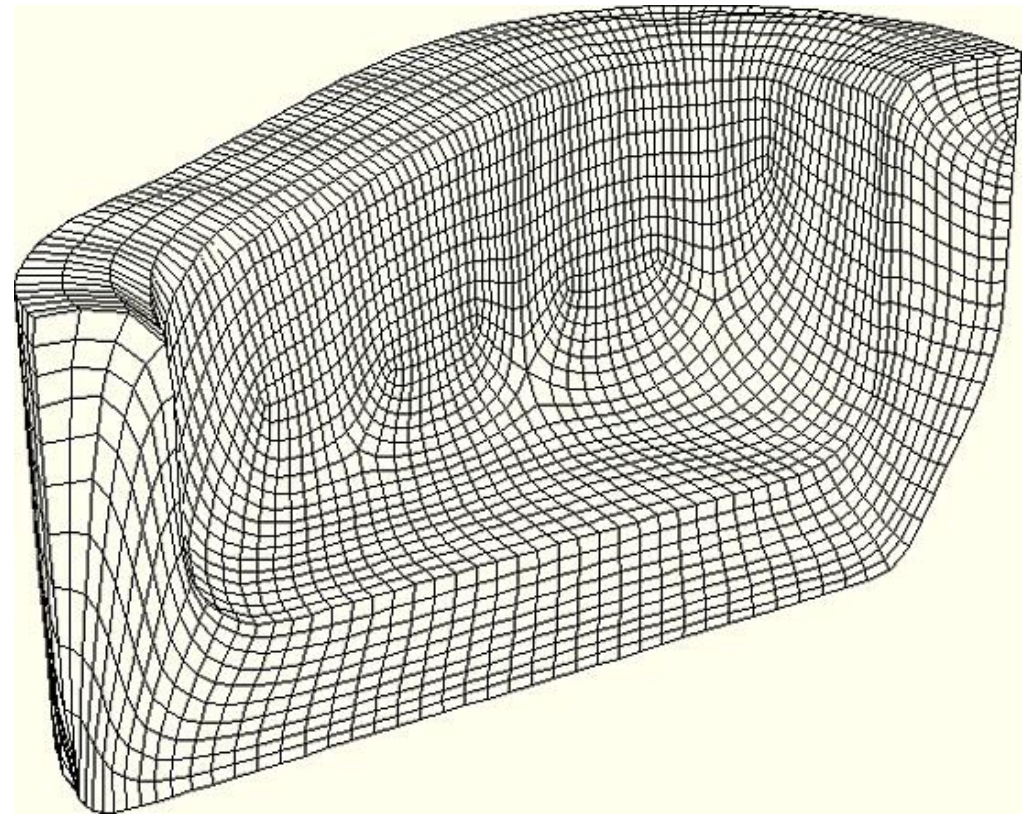
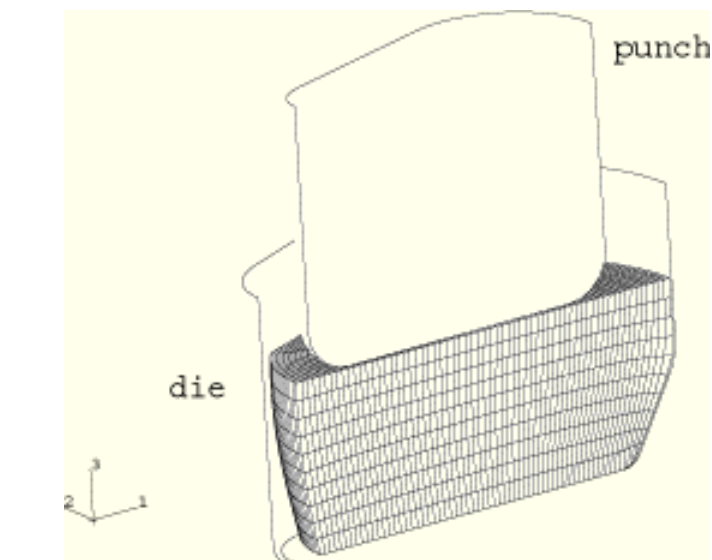
EXEMPLO DE MODELAGEM DE PNEUS



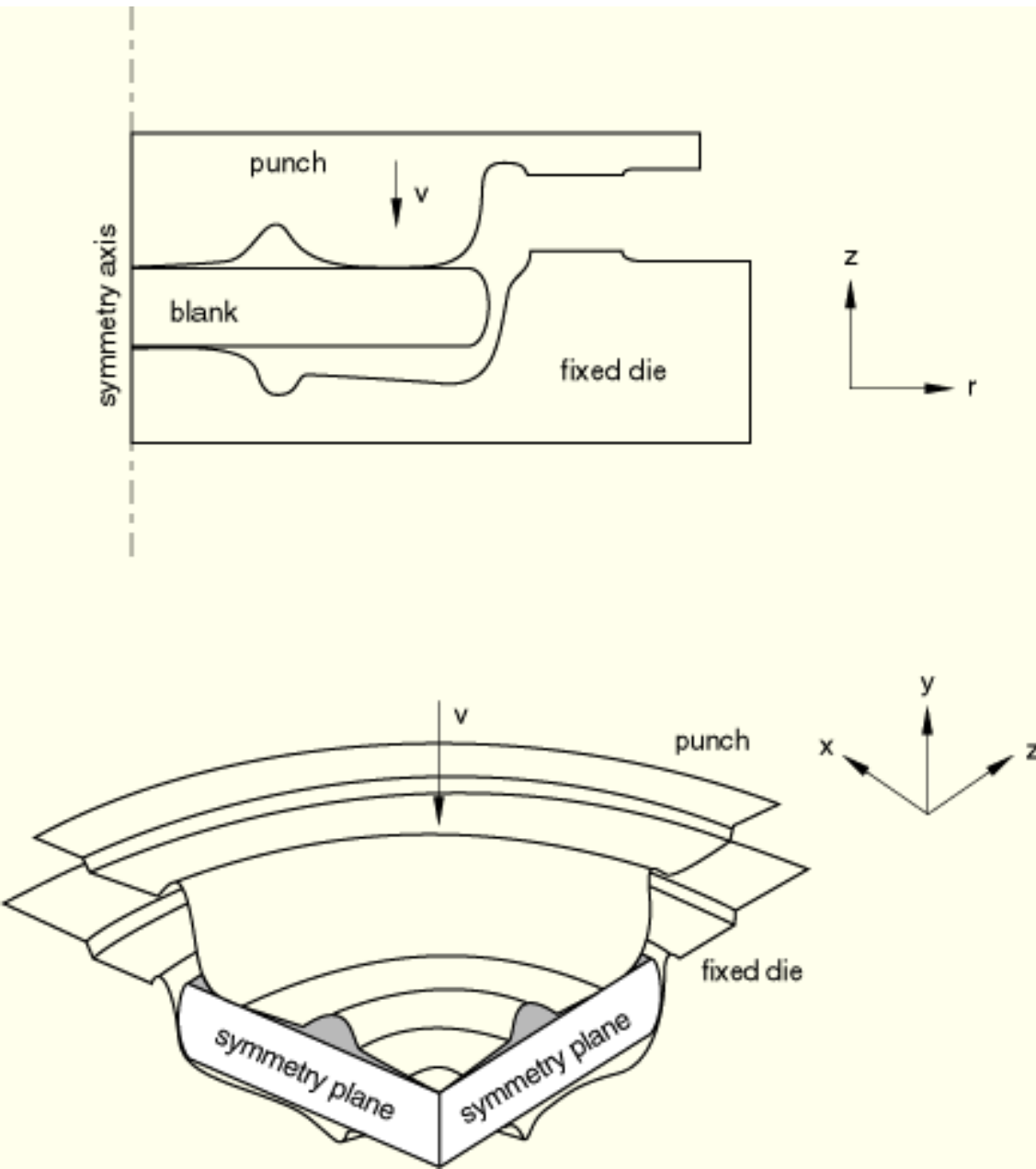
NOÇÕES DE PLASTICIDADE



EXEMPLO OPERAÇÕES MÚLTIPLAS



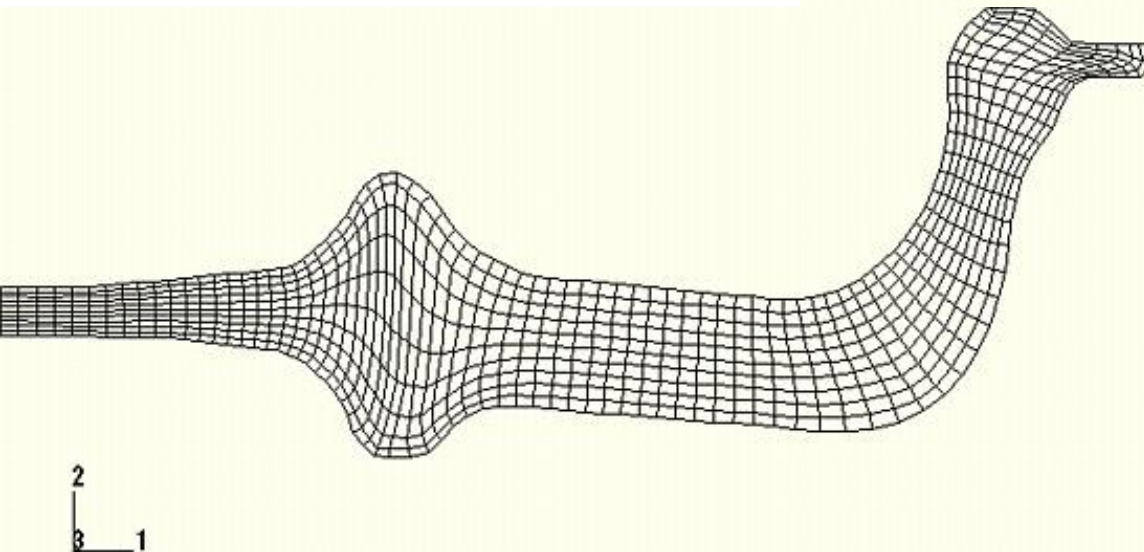
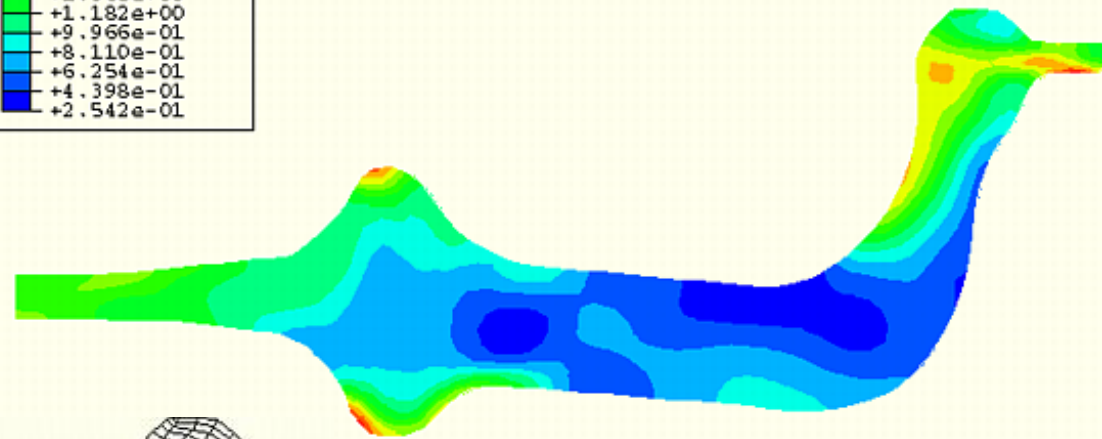
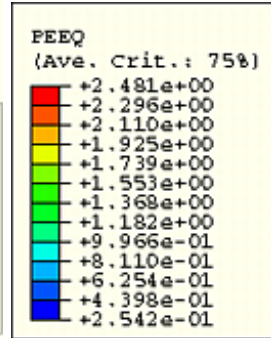
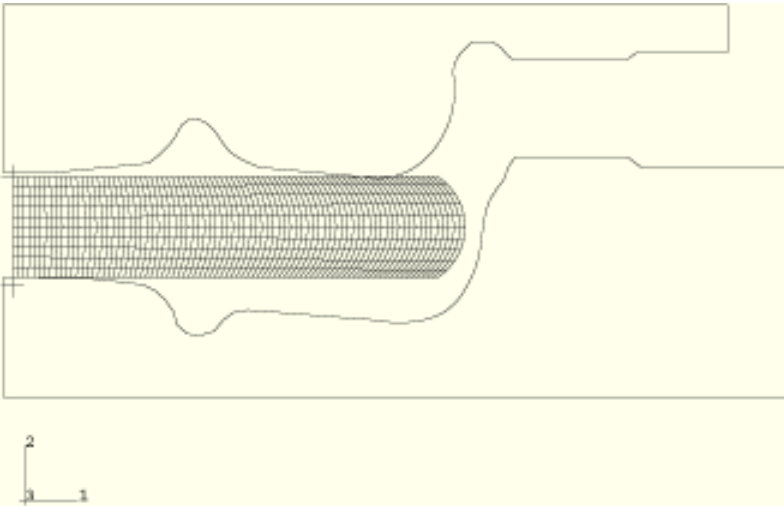
NOÇÕES DE PLASTICIDADE



OPERAÇÕES COMPLEXAS

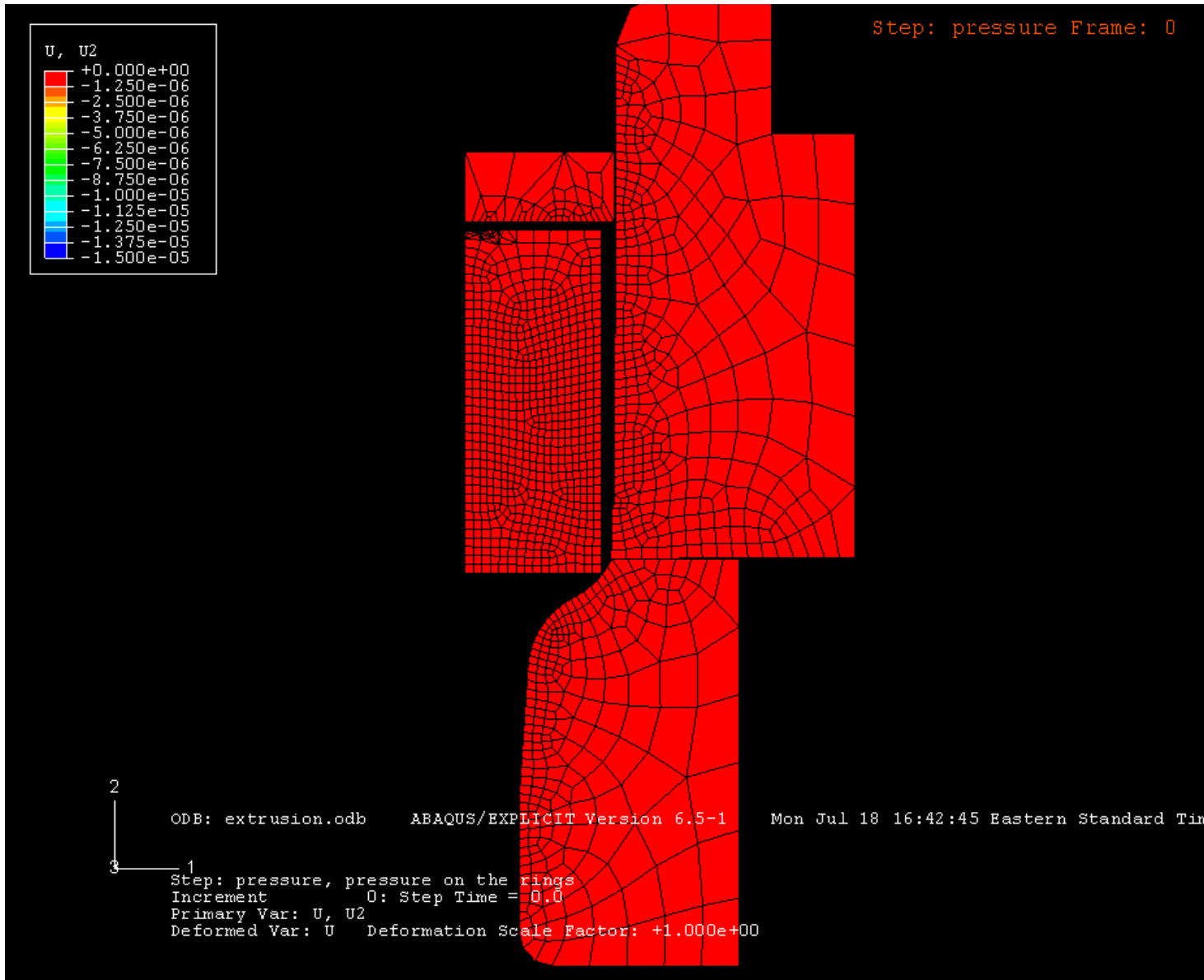
NOÇÕES DE PLASTICIDADE

OPERAÇÕES COMPLEXAS



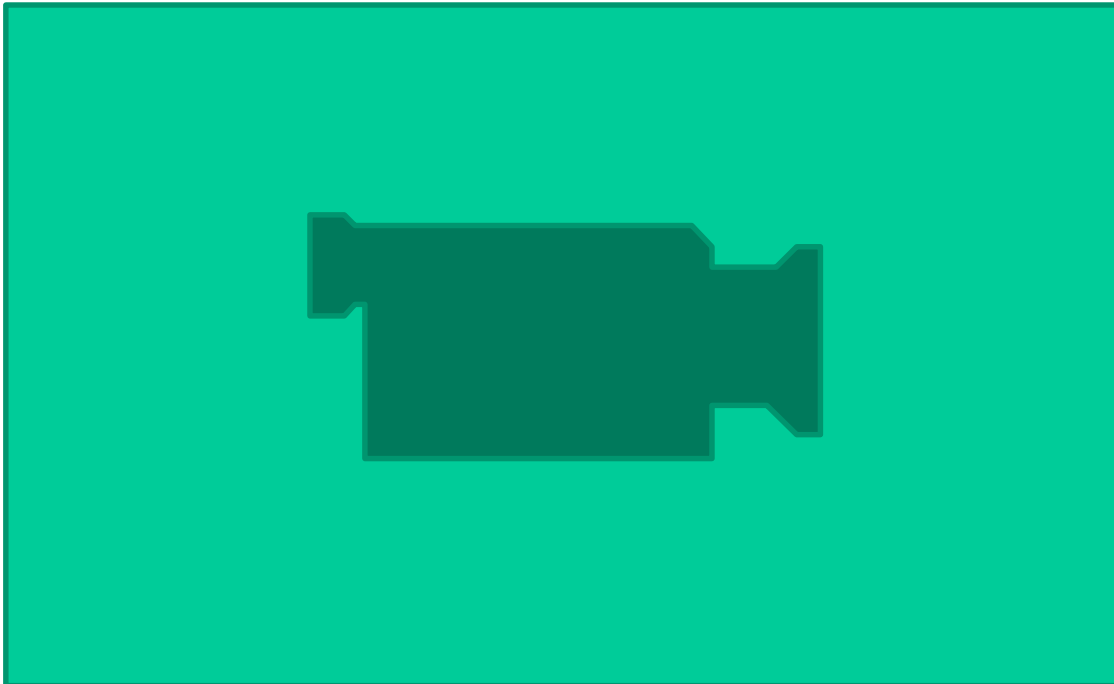
NOÇÕES DE PLASTICIDADE

Forjamento de
válvulas:
Extrusão



NOÇÕES DE PLASTICIDADE

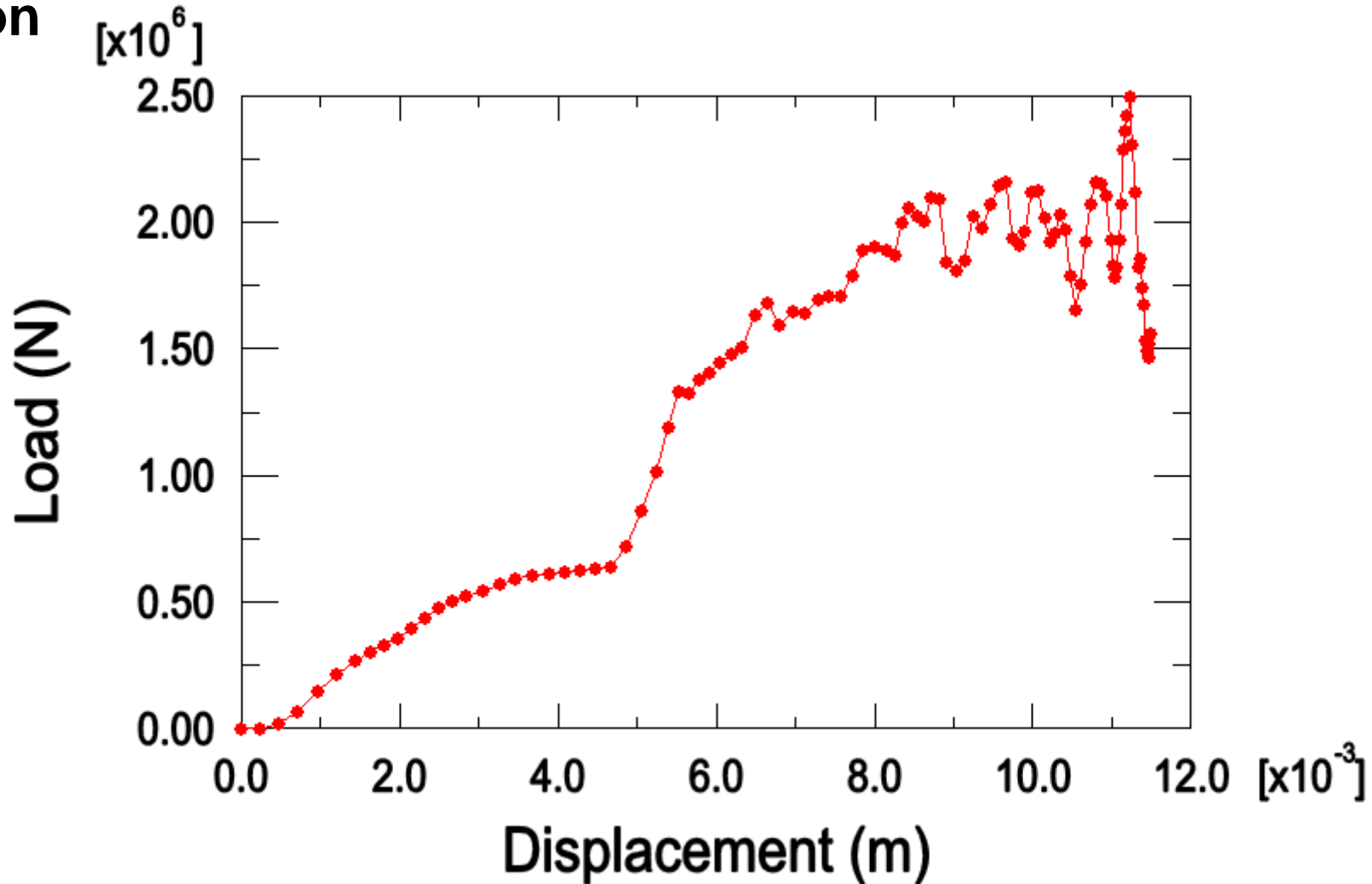
Forjamento de
válvulas:
Cunhagem



NOÇÕES DE PLASTICIDADE

Forjamento de
válvulas:
Parâmetros

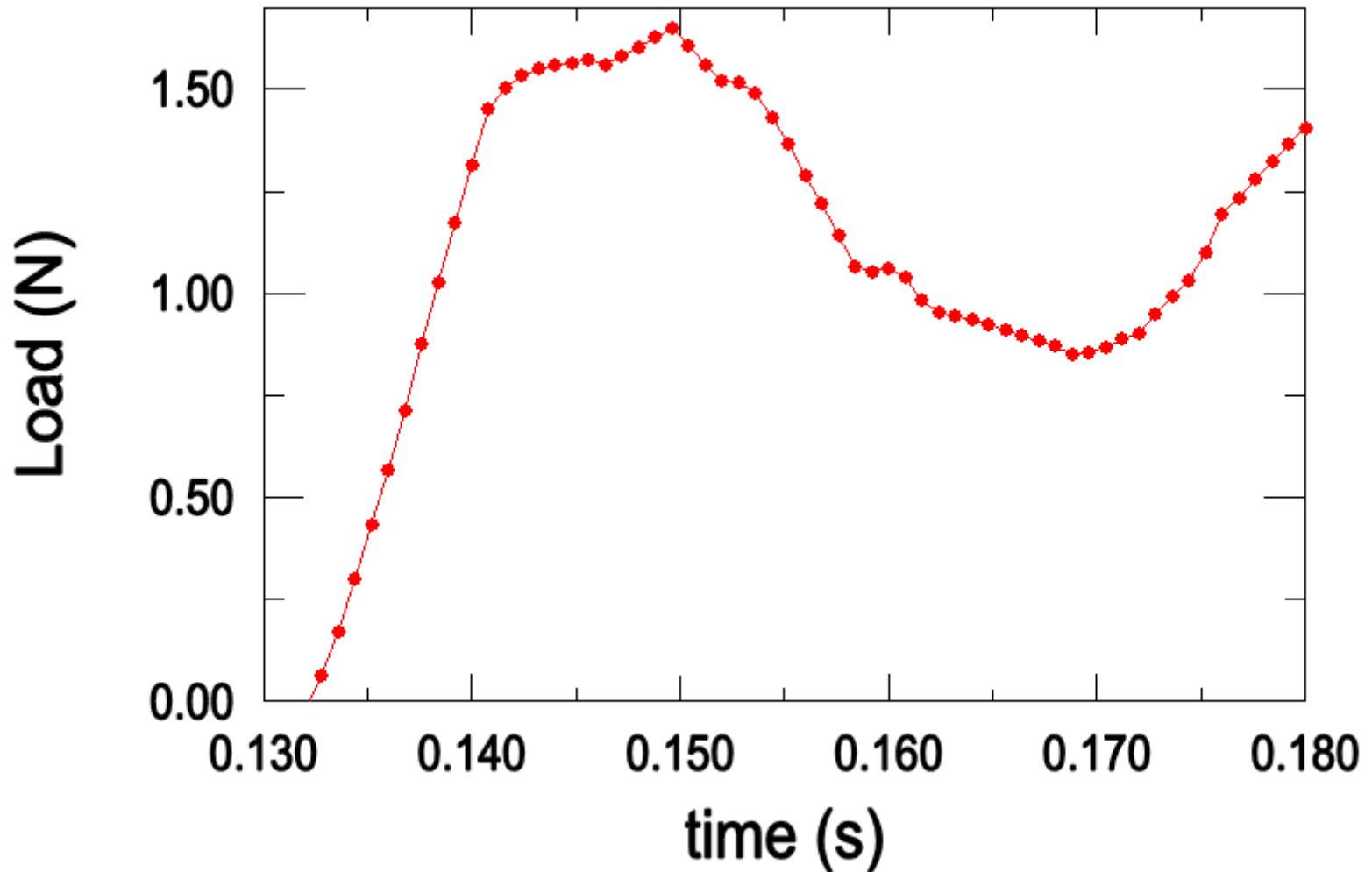
Extrusion
load



NOÇÕES DE PLASTICIDADE

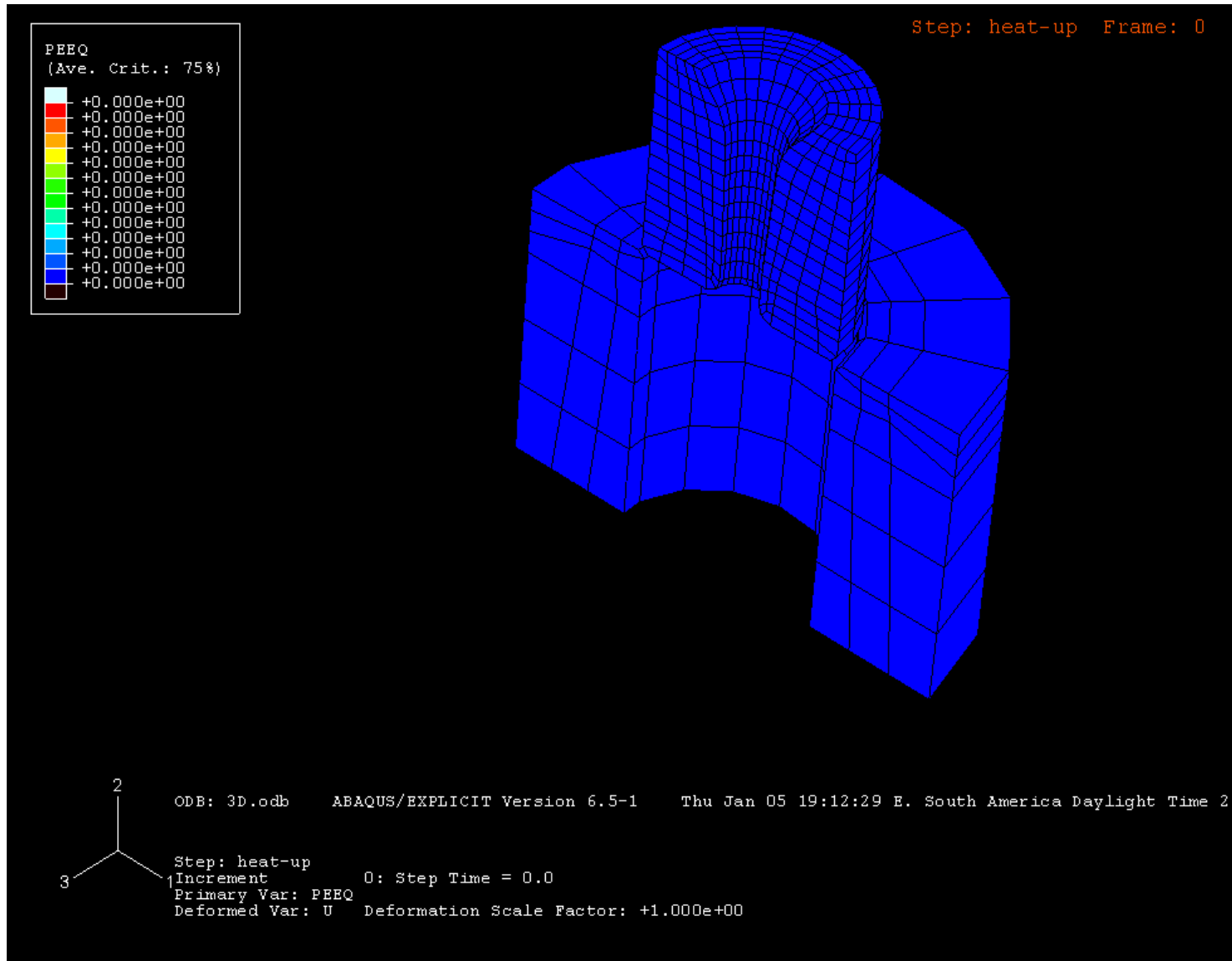
Forjamento de
válvulas:
Parâmetros

Coining
load $[\times 10^6]$



NOÇÕES DE PLASTICIDADE

Inserção de matriz de cerâmica a quente



NOÇÕES DE PLASTICIDADE

Inserção de matriz de cerâmica a quente

