



FACULTAD DE INGENIERIA  
en acción continua...



# ESTUDIOS NUMÉRICOS DE COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO/VISCOPLÁSTICO CON CINEMÁTICA DE GRANDES DEFORMACIONES

Claudio Careglio  
*Facultad de Ingeniería*  
*Universidad Nacional de Cuyo (Argentina)*



Asociación de Universidades  
GRUPO MONTEVIDEO

*MINISIMPOSIO CIENCIA E INGENIERIA DE MATERIALES*  
XXVI Jornadas de Jóvenes Investigadores  
Asociación de Universidades Grupo de Montevideo (AUGM)  
Mendoza, 18 octubre de 2018

# Líneas de investigación

---

En este contexto se investiga:

- 1. Problemas de comportamiento no lineal del material
  - Elastoplasticidad con grandes deformaciones (*escala del Continuo y Nano escala*)
  - Elastoviscoplasticidad con grandes deformaciones
  - Viscoelasticidad con grandes deformaciones
- 2. Problemas con no linealidad geométrica
- 3. Problemas de contacto (elastoplástico)

Desarrollo de códigos:

- SOGDE3D (three-dimensional large strain finite element code),
- Kaliske1D/2D (viscoelastic codes),
- entre otros.

# Modelo numérico

---

1. Cinemática de grandes deformaciones
2. Modelo Constitutivo
3. Formulación diferencial
4. Principios variacionales
  - a) Funcional de Hu-Washizu
5. Implementación numérica
  - a) Predictor elástico - Corrector plástico
  - b) Integración de la ecuación constitutiva
6. Aproximación por Elementos Finitos
  - a) Elementos Q1/P0, etc

# Cinemática de grandes deformaciones

- En términos del tensor gradiente de deformación

- Para el caso elastoplástico

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^e \mathbf{F}^p$$

- En la configuración deformada:

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2} (\mathbf{1} - \mathbf{b}^{-1}) \quad \mathbf{b}^{-1} = \mathbf{F}^{-T} \mathbf{F}^{-1}$$

$$\mathbf{e}^e = \frac{1}{2} (\mathbf{1} - \mathbf{b}^{e-1}) \quad \mathbf{b}^{e-1} = \mathbf{F}^{e-T} \mathbf{F}^{e-1}$$

- Luego:

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}^e + \mathbf{e}^p$$

- Asimismo:

$$\mathbf{d} = \mathcal{L}_v(\mathbf{e}), \quad \mathbf{d}^e = \mathcal{L}_v(\mathbf{e}^e) \quad \mathbf{d} = \mathbf{d}^e + \mathbf{d}^p$$

$$\mathbf{d}^p = \mathcal{L}_v(\mathbf{e}^p)$$

- Para el caso viscoplástico

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^e \mathbf{F}^{vp} \quad \mathbf{e} = \mathbf{e}^e + \mathbf{e}^{vp}$$

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}^e + \mathbf{d}^{vp}$$

# Modelo constitutivo

- Descomposición aditiva:

$$\psi = \psi^e(\mathbf{e}^e) + \psi^p(\zeta)$$

- Para metales:

$$\mathbf{F}^e = \mathbf{1}$$

$$\mathbf{b}^{e-1} = \mathbf{g}$$

- Es posible escribir:

$$\psi^e = \frac{1}{2} \lambda \text{tr}(\mathbf{e}^e)^2 + \mu (\mathbf{e}^e : \mathbf{e}^e)$$

- Luego:

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{\partial \psi^e(\mathbf{e}^e)}{\partial \mathbf{e}^e} = \lambda \text{tr}(\mathbf{e}^e) \mathbf{1} + 2\mu \mathbf{e}^e$$

- Modelo J2:

$$f(\mathbf{s}, \bar{e}^p) = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}} - Y(\bar{e}^p)$$

- Regla de flujo:

$$\mathbf{d}^p = \dot{\gamma} \mathbf{n} = \dot{\gamma} \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{n}\|}$$

# Modelo constitutivo

- Condiciones de carga/descarga:

$$\dot{\gamma} \geq 0;$$

$$f(\mathbf{s}, \bar{e}^P) \leq 0;$$

$$\dot{\gamma} f(\mathbf{s}, \bar{e}^P) = 0.$$

- Leyes de endurecimiento:

- Lineal
- No lineal (potencia)

- Tensor elástico espacial

$$\mathbf{a}^e = \lambda \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} + 2\mu \mathbf{I}$$

- Tensor tangente elastoplástico espacial:

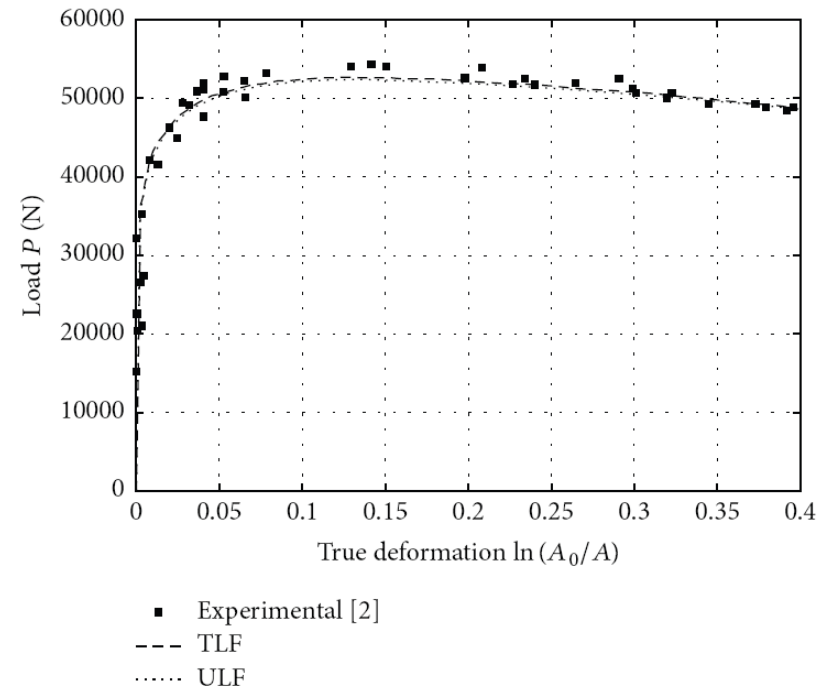
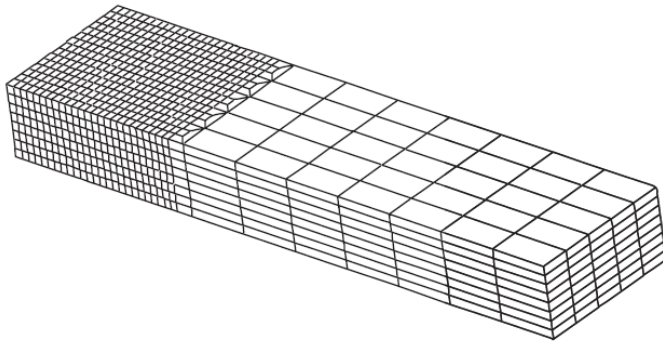
$$\mathbf{a}^{ep} = \mathbf{a}^e - \frac{(\partial f / \partial \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{a}^e) \otimes (\mathbf{a}^e : \partial f / \partial \boldsymbol{\sigma})}{\partial f / \partial \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{a}^e : \partial f / \partial \boldsymbol{\sigma} + H}$$

$$\mathbf{I} = 1/2(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk})$$

$$H = \partial Y / \partial \bar{e}^P$$

# Elastoplasticidad con grandes deformaciones

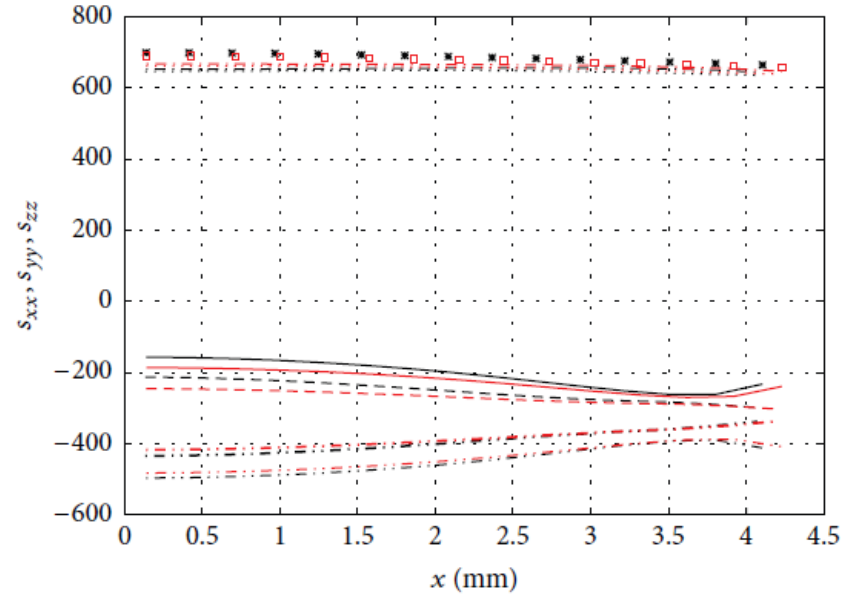
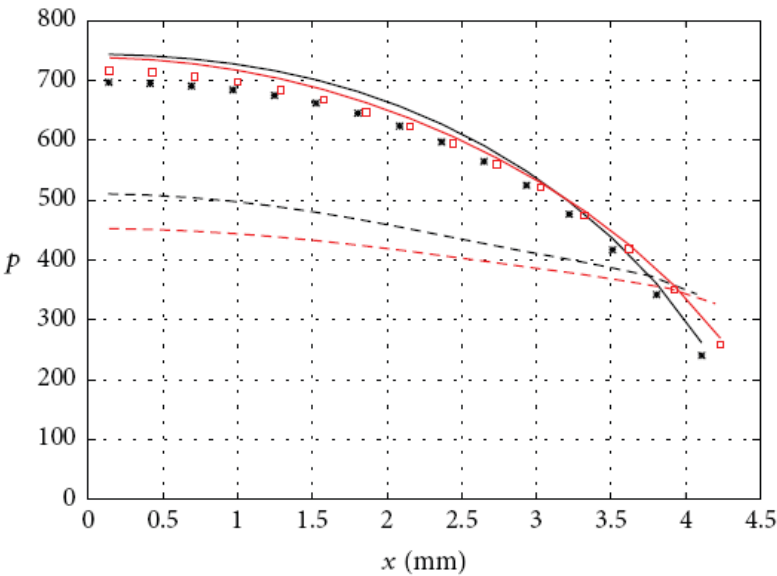
- Ensayo de tracción simple en grandes deformaciones en probetas rectangulares:
  - Utilizado para calibrar ecuaciones constitutivas en presencia de deformaciones finitas y plasticidad
  - En la zona de la estricción hay plasticidad con grandes deformaciones y un estado triaxial de tensiones.
  - Respuesta mecánica local y global del ensayo de tracción simple de probetas rectangulares en post-estricción [1].
    - Dos formulaciones diferentes de Elementos Finitos (TLF y ULF)



[1] Careglio, C., et al.; "Global and local mechanical responses for necking of rectangular bars using Updated and Total Lagrangian finite element formulations". Mathematical Problems in Engineering, 1-12, 2016.

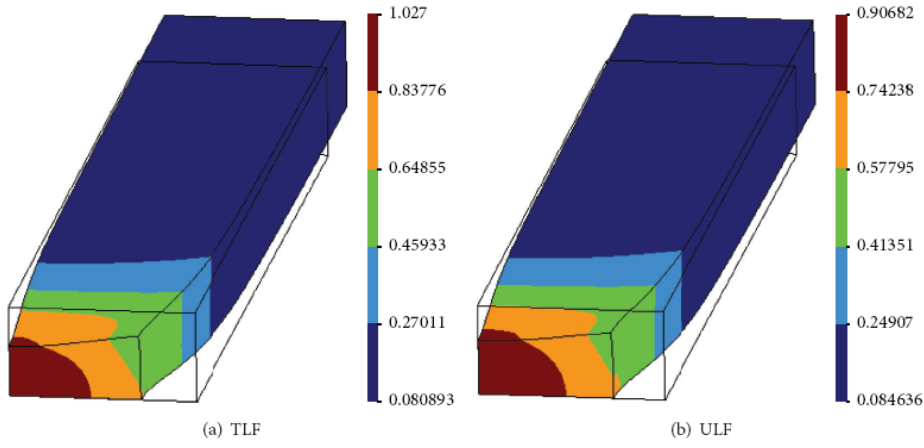
[2] Cabezas, E., et al. ; "Experimental and numerical analysis of the tensile test using sheet specimens", Finite Elements in Analysis and Design, 40(5-6), 555-575, 2004.

# Elastoplasticidad con grandes deformaciones



- TLF, PS line
- - - TLF, FS line
- ULF, PS line
- - - ULF, FS line
- × TLF, PS line (cylindrical)
- ULF, PS line (cylindrical)

- TLF, PS Line ( $s_{xx}$ )
- - - TLF, FS Line ( $s_{xx}$ )
- ULF, PS Line ( $s_{xx}$ )
- - - ULF, FS Line ( $s_{xx}$ )
- ⋯ TLF, PS Line ( $s_{yy}$ )
- ⋯ TLF, FS Line ( $s_{yy}$ )
- ⋯ ULF, PS Line ( $s_{yy}$ )
- ⋯ ULF, FS Line ( $s_{yy}$ )
- ⋯ ULF, FS Line ( $s_{yy}$ )
- ⋯ ULF, FS Line ( $s_{yy}$ )
- × TLF, PS Line ( $s_{yy}$ , cylindrical)
- ULF, PS Line ( $s_{yy}$ , cylindrical)
- ⋯ TLF, PS Line ( $s_{zz}$ )
- ⋯ TLF, FS Line ( $s_{zz}$ )
- ⋯ ULF, PS Line ( $s_{zz}$ )
- ⋯ ULF, FS Line ( $s_{zz}$ )
- × TLF, PS Line ( $s_{zz}$ , cylindrical)
- ULF, PS Line ( $s_{zz}$ , cylindrical)



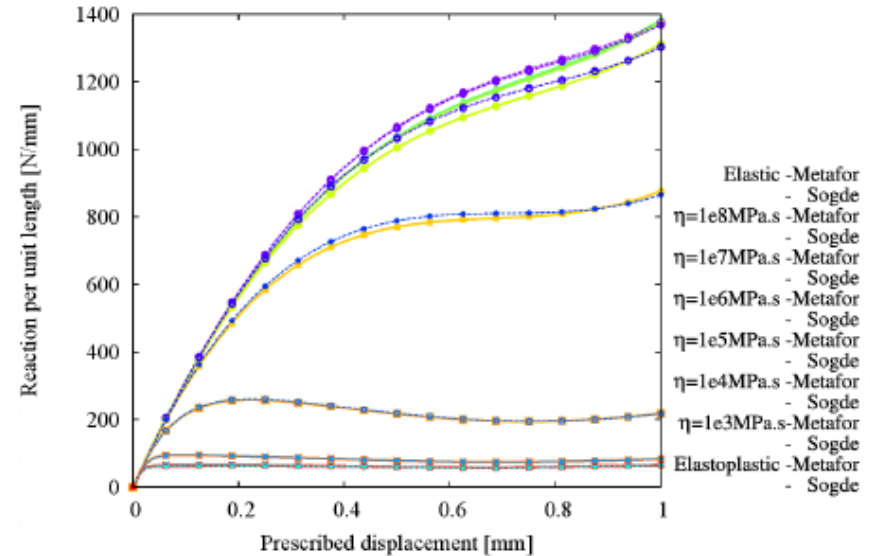
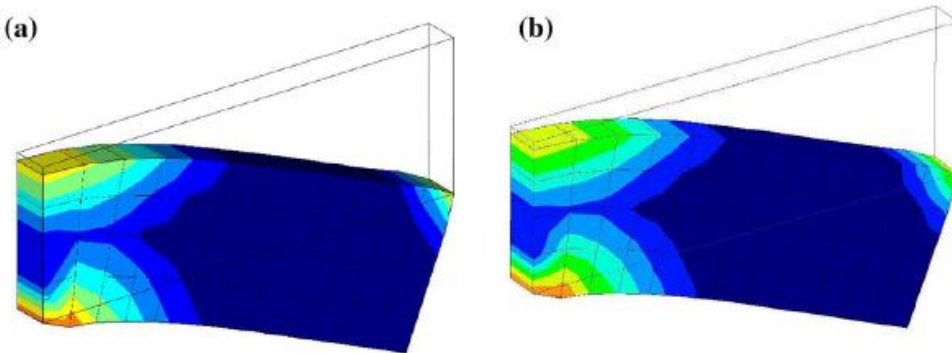
[1] Careglio, C., et al.; "Global and local mechanical responses for necking of rectangular bars using Updated and Total Lagrangian finite element formulations". Mathematical Problems in Engineering, 1-12, 2016.



# Viscoplasticidad con grandes deformaciones

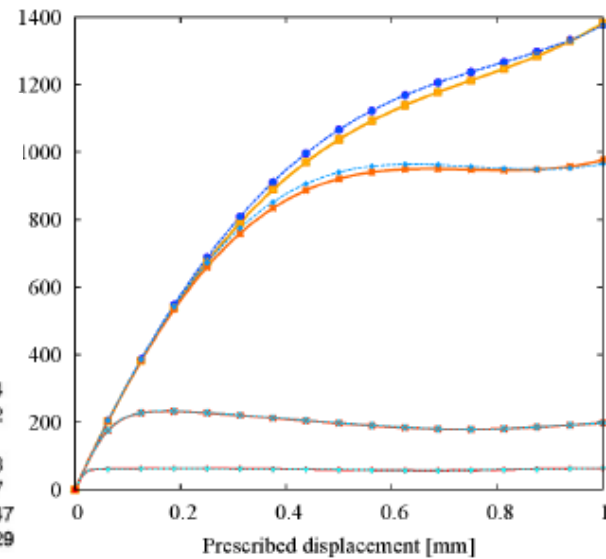
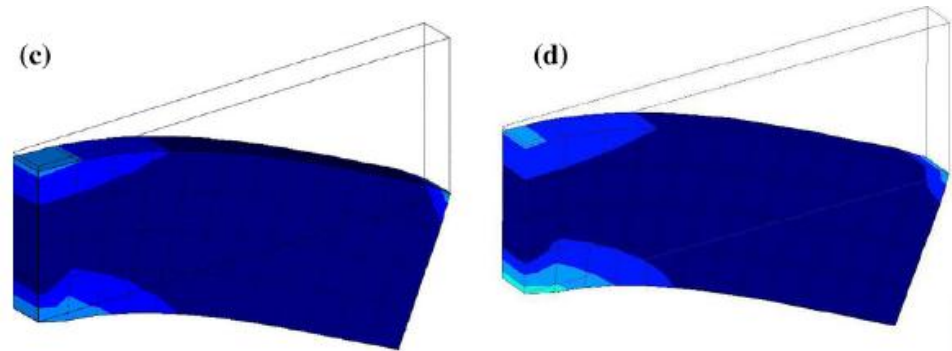
- Resultados ( $n$ : exponente de endurecimiento,  $m$ : parámetro de sensibilidad a la velocidad de deformación,  $\eta$ : parámetro de viscosidad):

$m=1$  and  $\eta=1e4\text{MPa s}$  (modelos hipoelástico e hiperelástico):

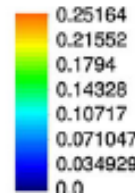


(a)  $m = 1$

$m=3$  and  $\eta=1e4\text{MPa s}$  (modelos hipoelástico e hiperelástico):

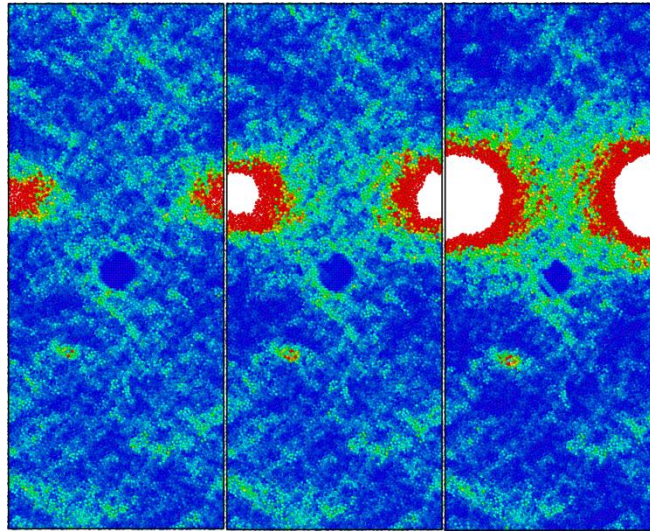


(b)  $m = 3$

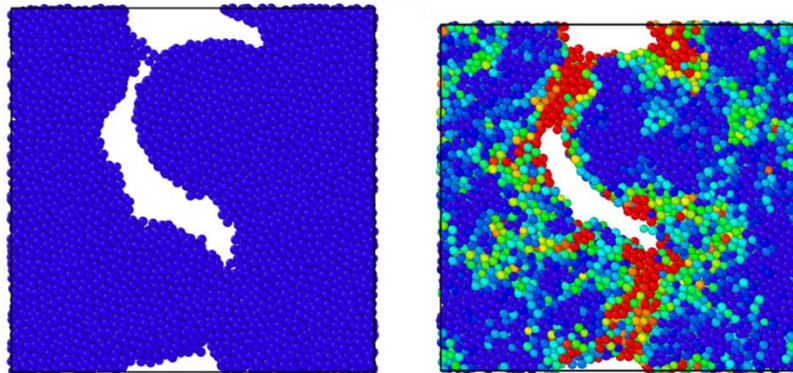


# Elastoplasticidad con grandes deformaciones (Nanoescala)

- Respuesta mecánica de BMGs con partículas nanocrystalinas embebidas.



- Respuesta mecánica de BMGs con porosidad (nanoglass)



[4] Manelli, A., Ardiani, F., Careglio, C. and Bringa, E.; "Mechanical properties of a Cu<sub>46</sub>Zr<sub>54</sub> bulk metallic glass with embedded crystalline nano particles". PANACM2015, pp.156-165, 2015. CPCI (ISI) and Scopus database.

[5] Ardiani, F., Manelli, A., Ruestes, C., Careglio and Bringa, E.; "Atomistic study of the mechanical properties of a sintered bulk metallic glass (nanoglass)". PANACM2015, pp.166-176, 2015. CPCI (ISI) and Scopus database.