

# DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS

---

Lucia Helena PRADO

directora: Dra. Graciela BERTOLINO

codirector: Pierre ARNEODO LAROCHE

tutor: Dr. Alfredo HAZARABEDIAN

26/07/2017

Instituto Sabato

División Física de Metales - Centro Atómico Bariloche

# INTRODUCCIÓN

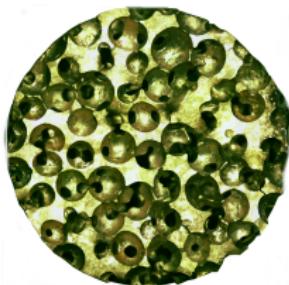
Esponjas pseudoelásticas

=

Aleación de CuZnAl

+

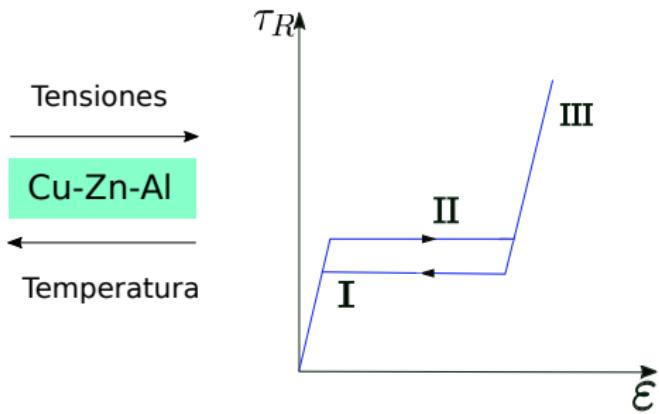
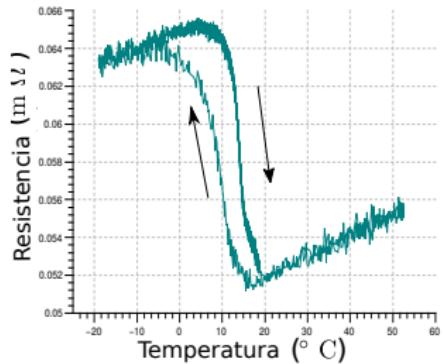
Estructura celular



## Organización del trabajo:

- Introducción teórica
- Modificación del tamaño de grano
- Integridad estructural y seguimiento de la transformación
- Conclusiones

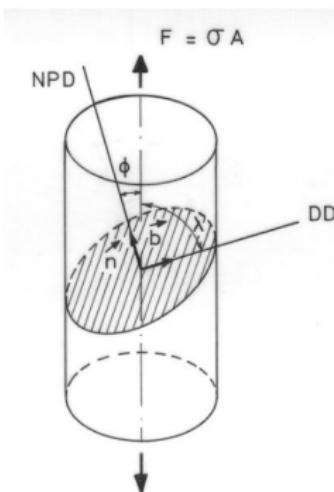
# TRANSFORMACIONES DE LA ALEACIÓN



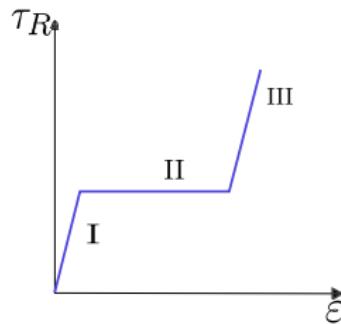
# TRANSFORMACIÓN EN MONOCRISTALES Y POLICRISTALES

## Tensión Resuelta

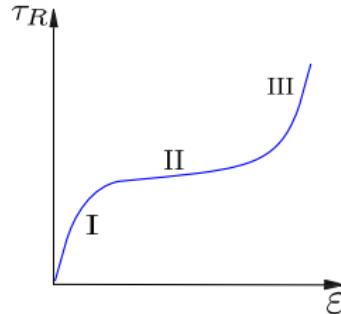
$$\tau_R = \sigma \cos(\lambda) \cos(\phi)$$



## Monocristal



## Policristal

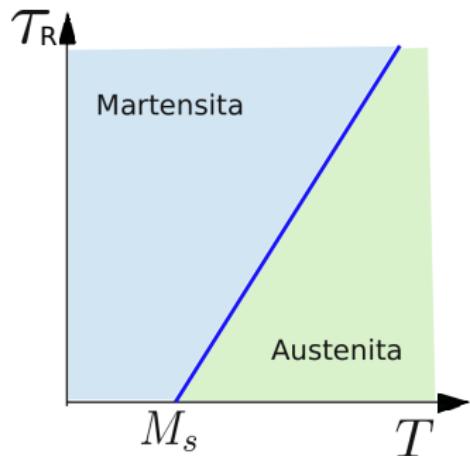


# VARIACIONES EN LOS PARÁMETROS DE TRANSFORMACIÓN

Clausius-Clapeyron

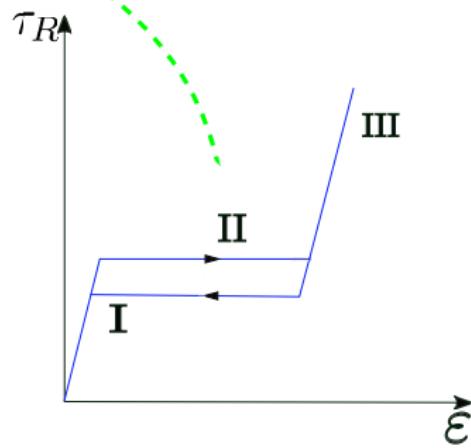
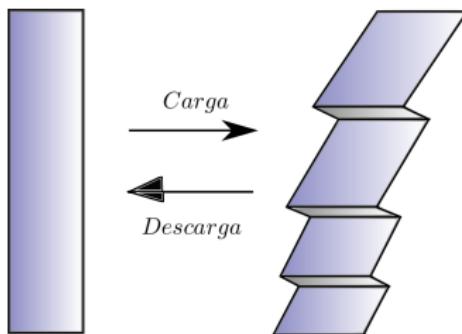
$$\frac{d\tau_R}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V}$$

- $\uparrow T \rightarrow \uparrow \tau_R$
- $\tau_R = 0 \rightarrow T = M_s$

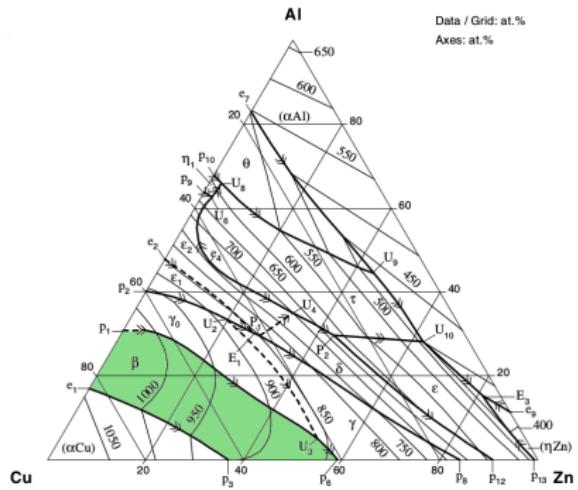


# DISIPACIÓN DE ENERGÍA

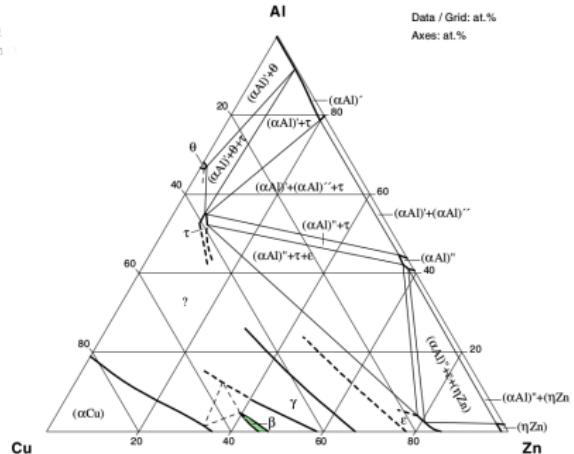
Disipación de energía debido a la fricción en el movimiento de interfasas y creación de defectos.



# ALEACIÓN Cu-Zn-Al



Liquidus



# CONCENTRACIÓN ELECTRÓNICA

## Concentración electrónica:

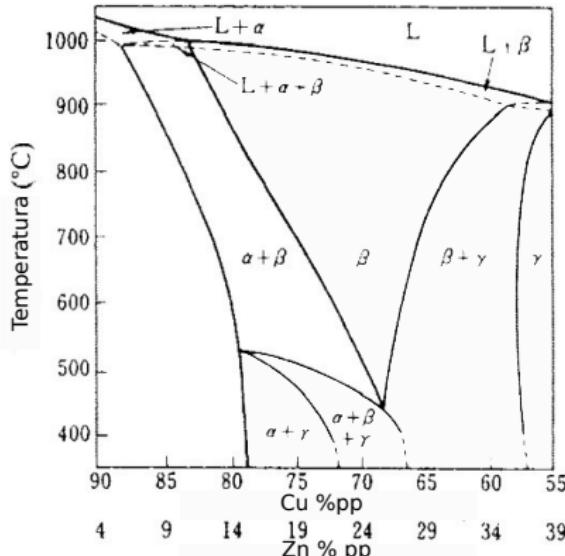
- Ag, Au, Cu: 1
- Be, Cd, Zn: 2
- Al: 3

⇒ Hume-Rothery

## Cu-Zn-Al

$$\frac{e}{a} = 1 + C_{Zn} + 2C_{Al}$$

Usamos  $e/a = 1,48$



$$Al = 6 \%pp$$

# TEMPERATURA DE TRANSICIÓN MARTENSÍTICA ( $M_s$ )

Concentración electrónica:

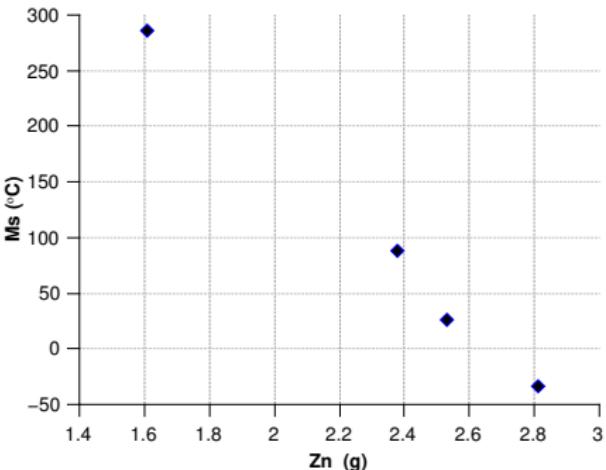
$$\frac{e}{a} = 1 + C_{Zn} + 2C_{Al}$$

Ecuación empírica para  $M_s$

$$M_s[K] = 2686 - 6400C_{Zn} - 9000C_{Al}$$

Composiciones:

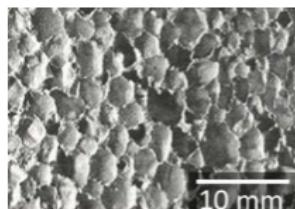
$$C_{Cu} + C_{Zn} + C_{Al} = 1$$



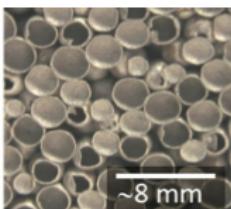
- Cu= 12, 53 g
- Al= 1, 28 g

# ESTRUCTURAS CELULARES

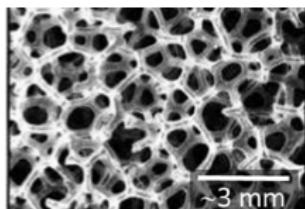
Celdas Cerradas



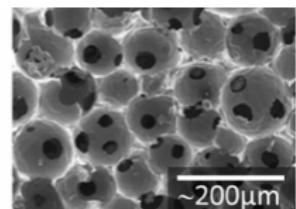
Celdas mezcladas



Celdas abiertas



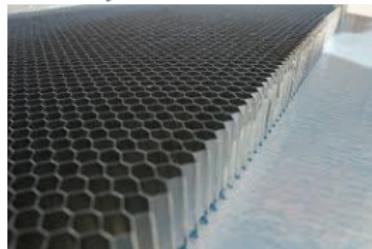
Celdas parcialmente abiertas



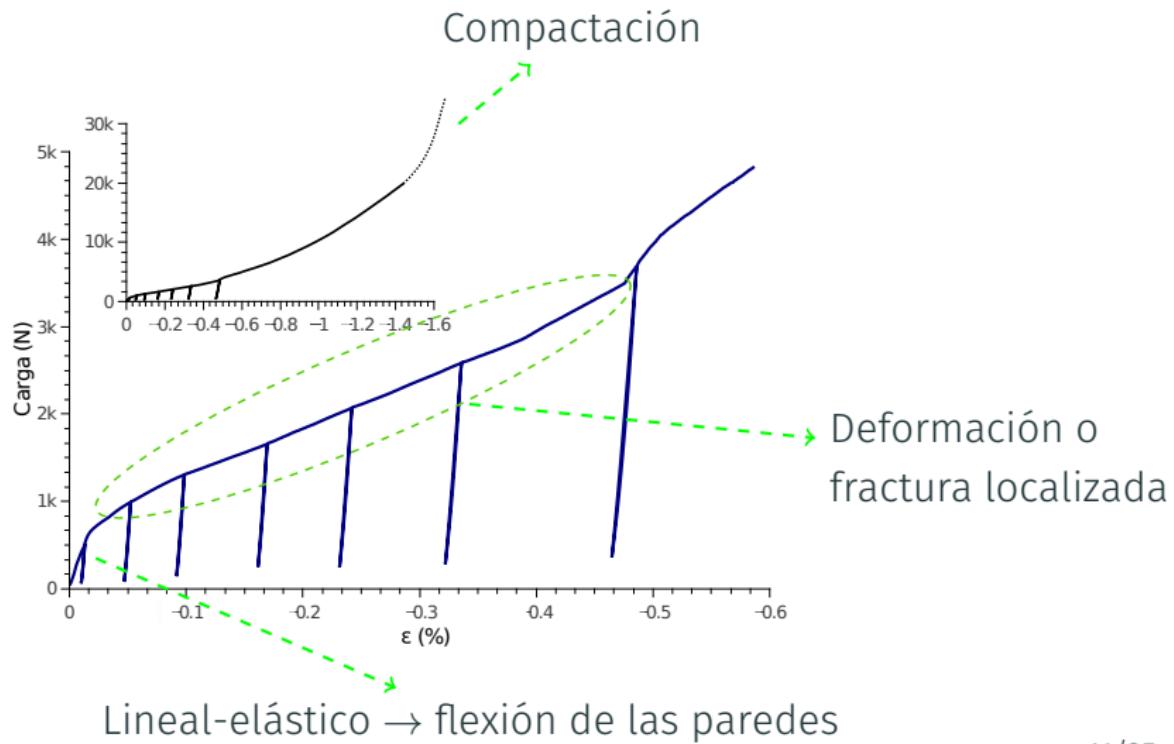
Cabina de tren



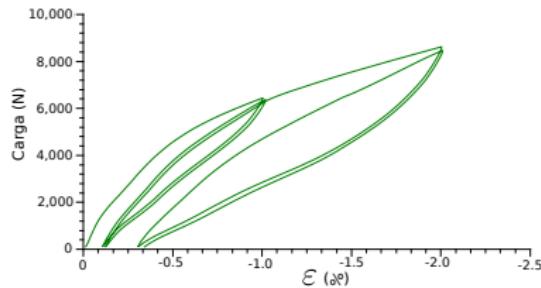
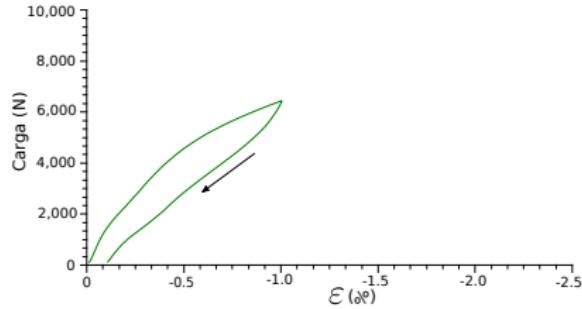
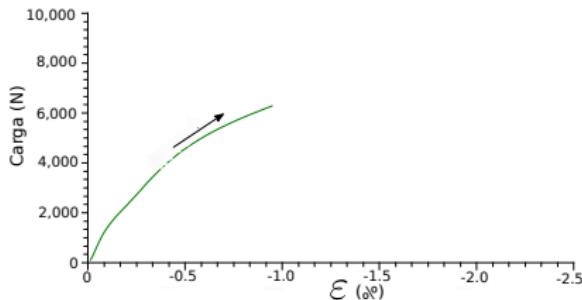
Honeycomb



# ESPONJAS METÁLICAS



# ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS

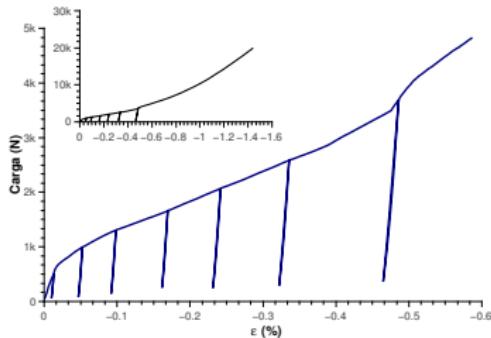


- Martensita retenida
- Deformación plástica
- Rotura de las paredes de las celdas

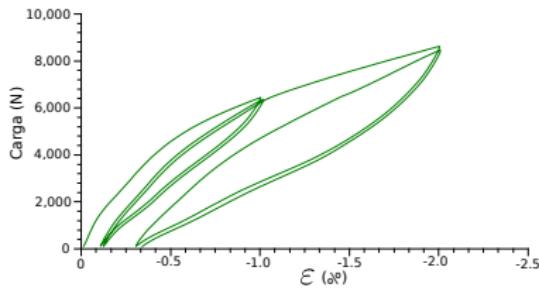
Esponja de Cu-Zn-Al de concentración electrónica 1,48, densidad específica 0,16 y poros entre 1,4 y 2,8 mm.

# ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS

Esponja elastoplástica

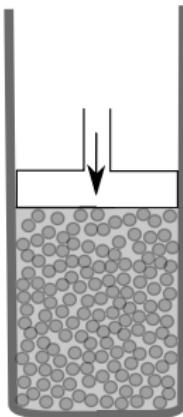
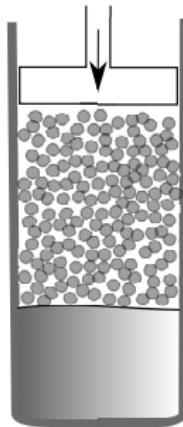


Esponja pseudoelástica



- Gran capacidad de deformación
- Recuperación de la forma inicial
- Disipación de energía

# MÉTODO DE FABRICACIÓN DE ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS



# MÉTODO DE FABRICACIÓN DE ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS

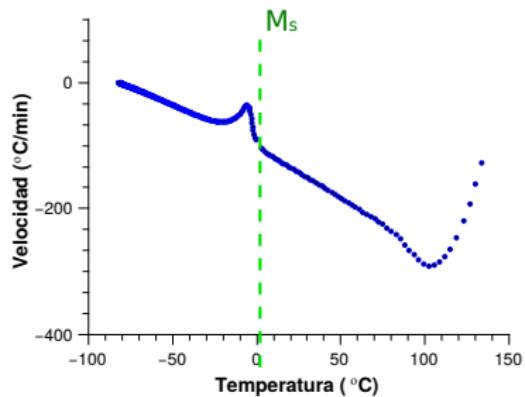


---

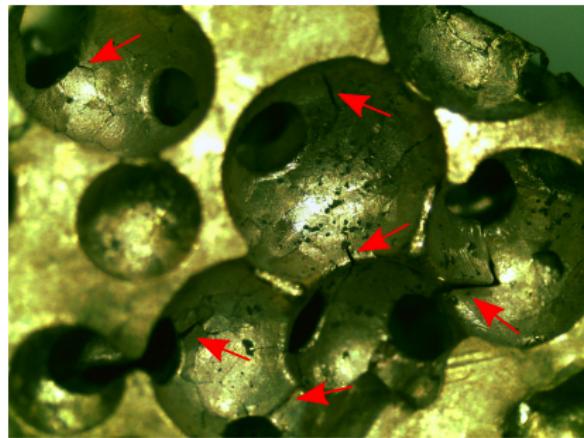
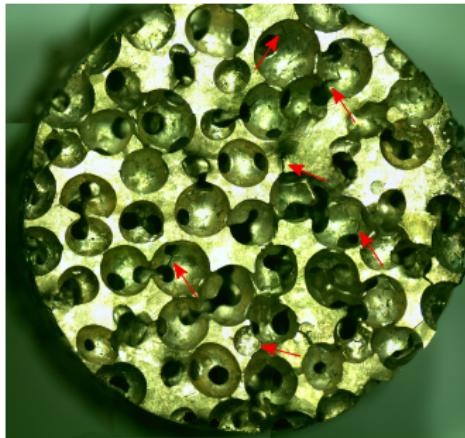
Largo	<i>35 mm</i>
Diámetro	<i>25 mm</i>
Densidad específica	$\sim 0,17$

---

# MEDICIÓN DE LA $M_s$



# FRACTURA INTERGRANULAR



Esponja de Cu-Zn-Al de concentración electrónica 1,48, densidad específica 0,16, diámetro de 23,4 mm y poros entre 1,4 y 2,8 mm.

# REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO

## Métodos de refinamiento

- Tratamientos termomecánicos
- Agentes refinadores



$\varnothing \sim 20mm$

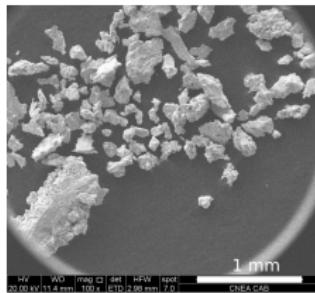
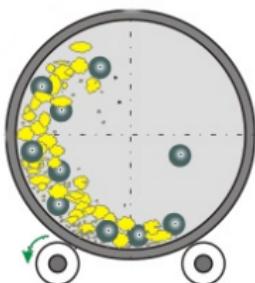
Principal agente refinador:  $B \rightarrow AlB_2$

Agregado de  $AlB_2$  en fundición → No incorporación

# MOLIENDA MECÁNICA

Refina y mezcla compuestos. Puede generar reacciones químicas y aumentar la solubilidad.

MECANISMO: Soldadura en frío, fractura y resoldadura de partículas



- 8 g de aleación
- Refinador  $AlB_2$
- 5 bolas de acero  $\varnothing 25\text{ mm}$
- 5 atm de argón
- 28 hs de molienda.

Fundición: Tubos de cuarzo con atmósfera de Ar.

# REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO

Muestra	%pp $AlB_2$	Método
Clavo 1	0,5	Molienda + Prensado
Clavo 2	0,05	Molienda + Prensado
Clavo 3	-	Molienda
Clavo 4	0,005	Molienda



$\varnothing_{Pastilla}$  5 mm

$L_{Pastilla}$  5 mm



$\varnothing_{Clavo}$  6 mm

$L_{Clavo}$  40 mm

$\varnothing_{Muestra}$  4,5 mm



$\varnothing_{Interno}$  6 mm

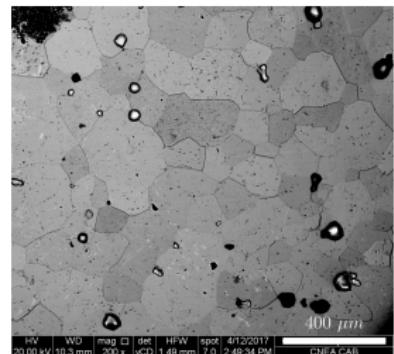
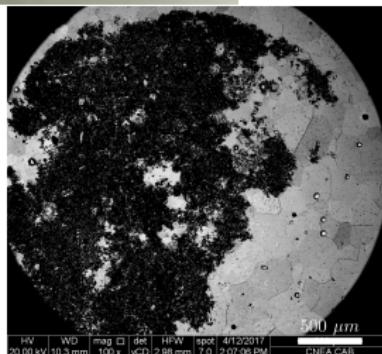
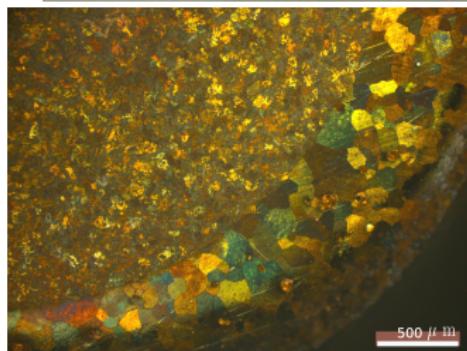
$L_{Polvo}$  60 mm

# MICROGRAFÍAS CLAVO 1

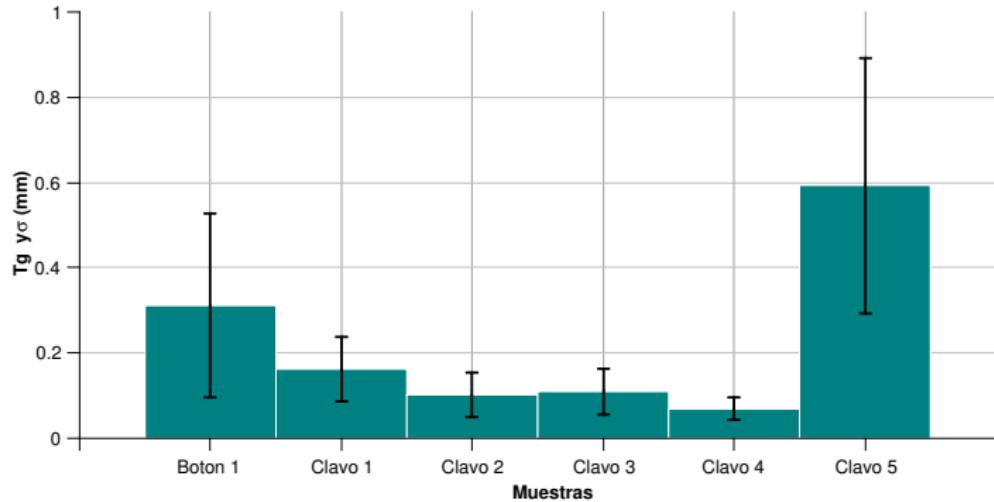


$\varnothing_{\text{Clavo}}$  6 mm

$L_{\text{Clavo}}$  70 mm



# TAMAÑOS DE GRANO OBTENIDOS



---

Botón 1

Fundición A+R

Clavo 1 y Clavo 2

Molienda + pastillas A+R

Clavo 3 y Clavo 4

Molienda + A+R

Clavo 5

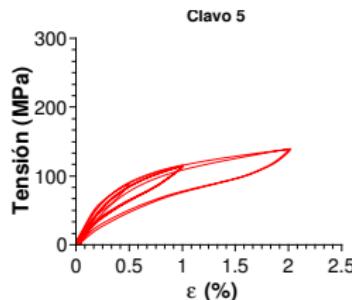
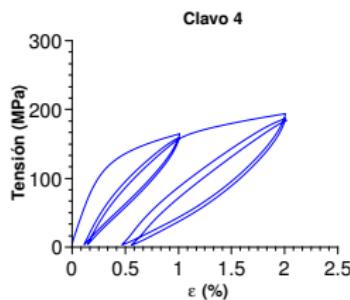
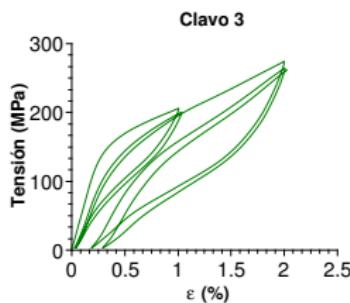
Fundición A

---

# CICLOS DE COMPRESIÓN DE LOS CLAVOS FABRICADOS

## Compromiso:

- Buena pseudoelastичidad
- Menor susceptibilidad a roturas por fractura intergranular



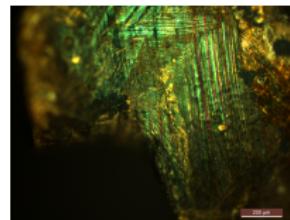
Fabricación de esponjas implica múltiples fundiciones de la aleación: Molienda + 0,005 %  $AlB_2$

# EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL Y SEGUIMIENTO DE LA TRANSFORMACIÓN

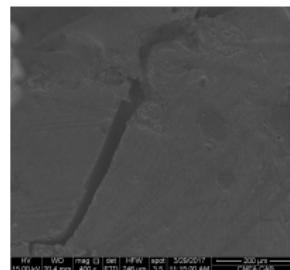
¿Qué ocurre?



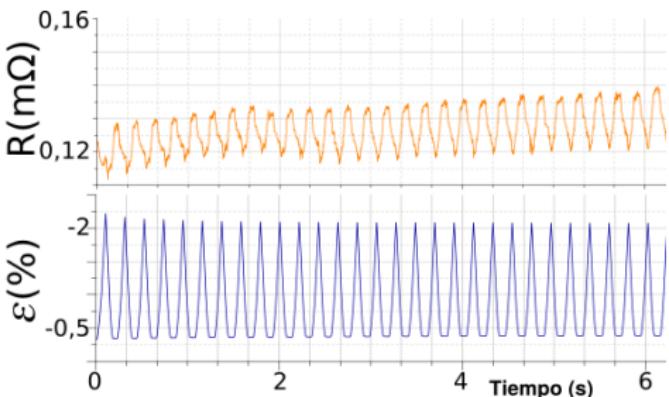
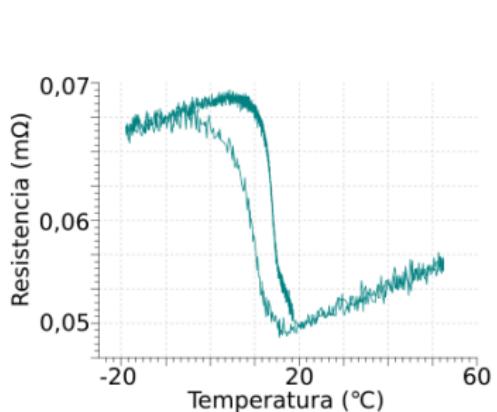
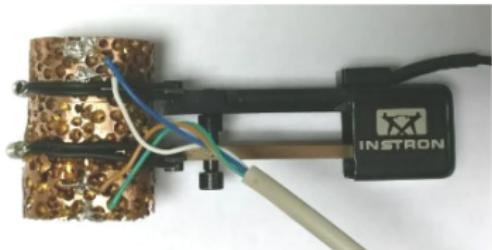
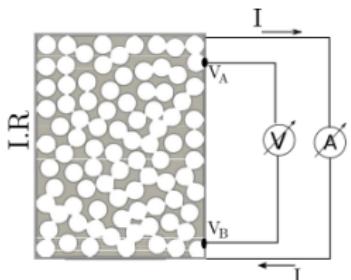
Procesos de transformación...



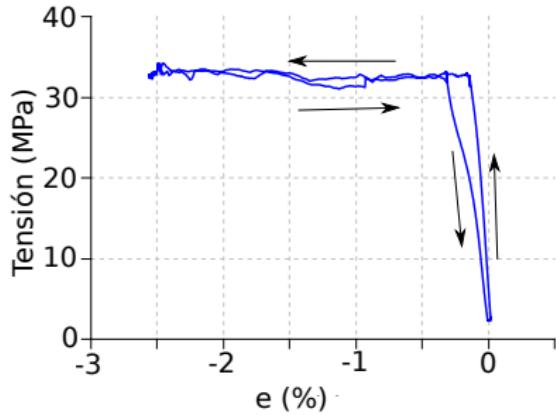
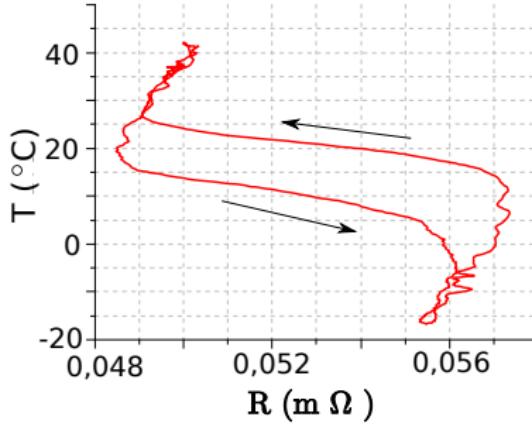
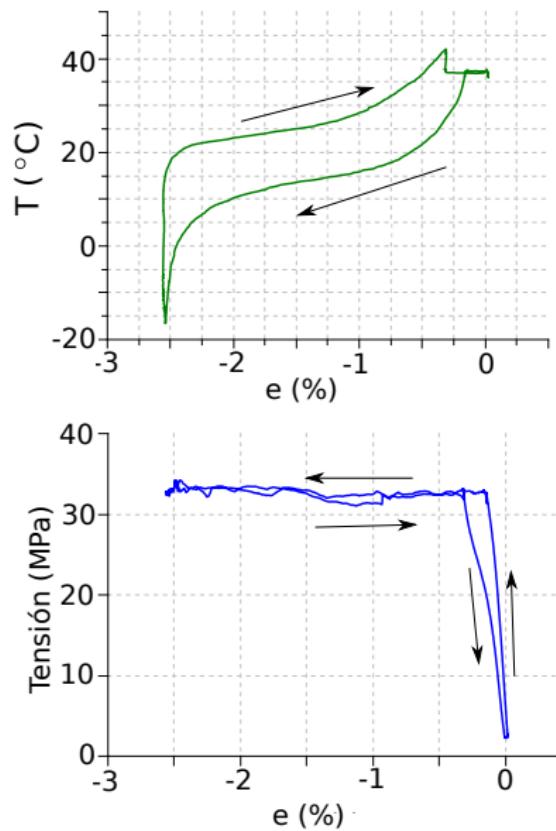
Integridad estructural...



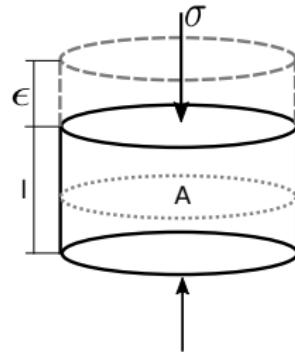
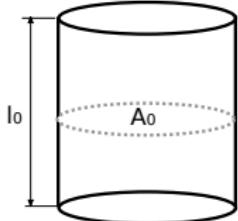
# MÉTODO CUATRO PUNTAS



# MEDICIONES REALIZADAS



# VARIACIÓN EN LA RESISTENCIA POR COMPRESIÓN



$$R_0 = \rho \frac{l_0}{A_0}$$

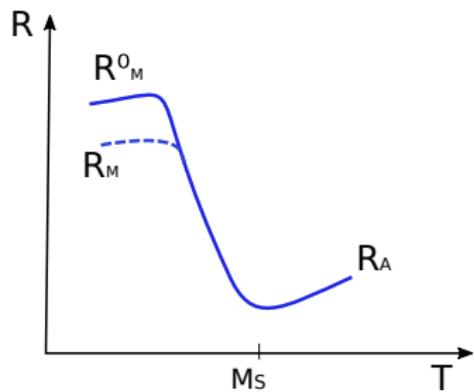
$$l = l_0 * (1 + \epsilon)$$

$$A = \frac{A_0}{(1 + \epsilon)^2}$$

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho(1 + \epsilon)^2 \frac{l_0}{A_0} = (1 + \epsilon)^2 R_0$$

Suponemos V=cte

# VARIACIÓN EN LA RESISTENCIA POR COMPRESIÓN Y TRANSFORMACIÓN



$$\rho_M = f \rho_A$$

$$R_M^0 = f R_A$$

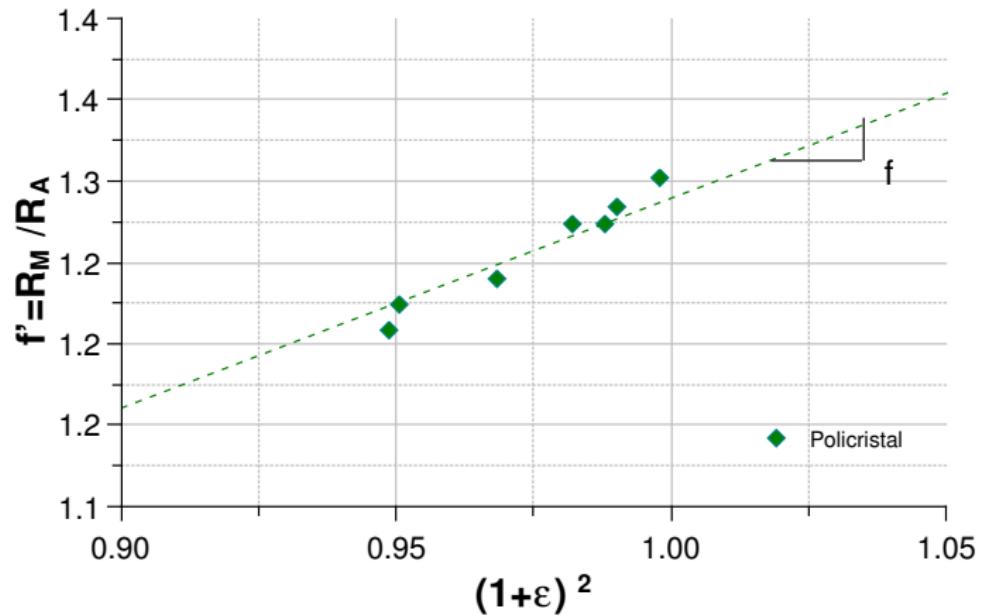
$$R_M = f' R_A$$

$$R_M = R_M^0 (1 + \varepsilon)^2 = f' R_A$$

$$R_M^0 (1 + \varepsilon)^2 = f' R_A$$

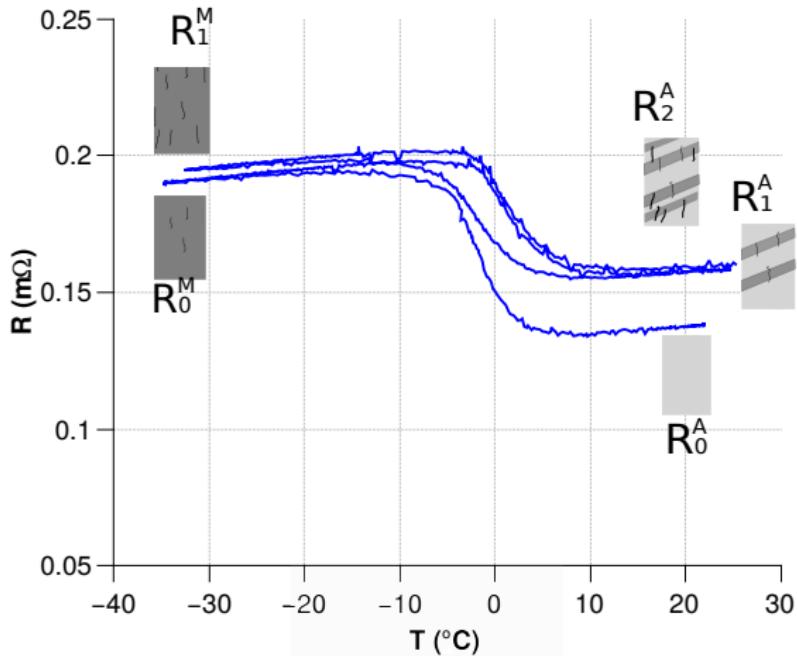
$$f' = f(1 + \varepsilon)^2$$

## RESULTADOS OBTENIDOS

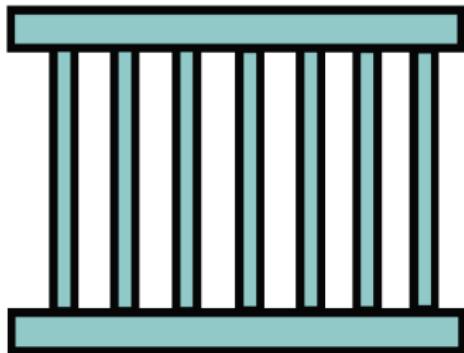


$$f' = f(1 + \varepsilon)^2$$

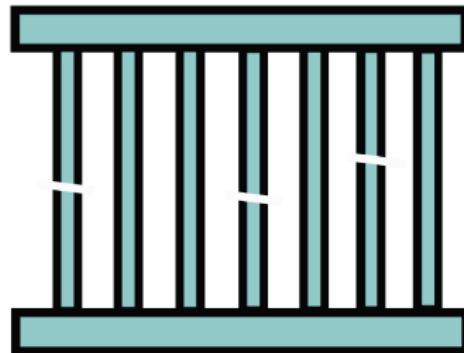
# MEDICIONES CON ESPONJA



## ROTURA DE ESPONJAS



$$A_0$$



$$A_i = ?$$

$$a_i = \frac{A_0}{A_i}$$

# ÁREA ESPECÍFICA Y MARTENSITA RETENIDA

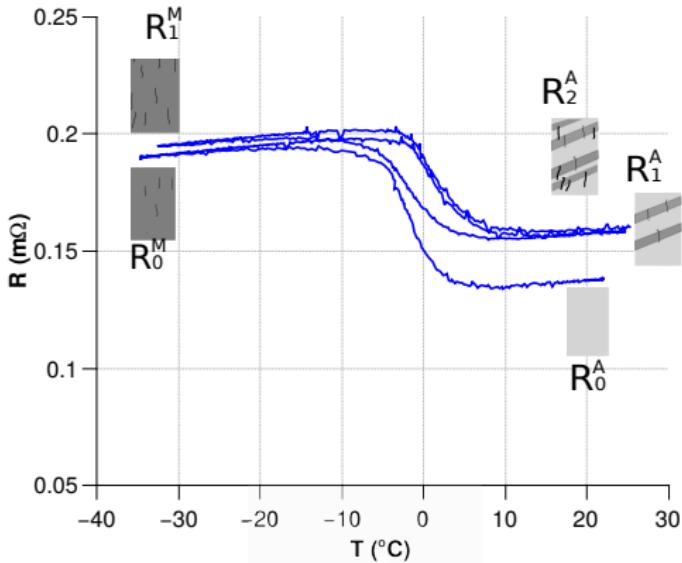
$$\text{Área específica: } a_i = \frac{A_0}{A_i}$$

Martensita retenida  $b_i$

$$f = \rho^M / \rho^A$$

$$R_i^A = R_0^A a_i [1 + b_i(f - 1)]$$

$$R_i^M = R_0^A a_i f$$



## ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Condición de ensayo	$a_i$	$b_i$
Esponja en estado austenítico		
Ciclo térmico	1,009	0,033
Ciclo térmico con una tensión cte de 4000 N		
Ciclo térmico	1,061	0,139
Ciclos de deformación hasta 2 %		
Ciclo térmico	1,067	0,166

$a_i$ = Sección relativa

$b_i$ = Fracción de martensita retenida

## RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES

- A partir de los ensayos de compresión corroboramos que gran parte de las fallas se dan de forma intergranular.
- A partir del uso de molienda mecánica se logró incorporar el  $AlB_2$ .
- Logramos un refinamiento marcado del tamaño de grano de la aleación por medio del agregado de  $AlB_2$ .
- También encontramos el efecto refinador debido a la molienda mecánica.
- Queda pendiente la utilización de este método para fabricar esponjas con menor tamaño de grano: **molienda mecánica +  $B$  o  $AlB_2$**

## RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES

- A partir de un método sencillo pudimos realizar el seguimiento de las transformaciones de fase y la integridad estructural de la esponja.
- Obtuvimos los parámetros relacionados a la martensita retenida y el área específica de la estructura.
- Las mediciones pueden realizarse con equipos sencillos y sin sacar el dispositivo de funcionamiento.
- Las aleaciones pseudoelásticas y las estructuras celulares fueron muy estudiadas en los últimos años. La combinación de ambas es muy prometedora y abre camino a muchas posibilidades que requerirán más estudio.

**¡MUCHAS GRACIAS!**

## MARTENSITA RETENIDA Y ROTURA

Resistencia inicial en estado austenítico sin rotura:

$$R_0^A = \rho^A \frac{L_0}{A_0}$$

Además  $f$  relaciona las resistividades de la austenita y martensita:

$$f = \rho^M / \rho^A$$

Luego del ciclo  $i$  de transformación:

$$R_i^A = \rho^A \frac{L_0}{A_i} (1 - b_i) + \rho^M \frac{L_0}{A_i} b_i = \rho^A \frac{L_0}{A_i} [1 + b_i(f - 1)]$$

$0 < b_i < 1$  fracción de martensita retenida

## MARTENSITA RETENIDA Y ROTURA

Cuando comienza a romperse, la resistencia será la inicial calculada  $R_0^A$  por un factor relacionado con el área específica  $A_0/A_i$ :

$$R_0^A = \rho^A \frac{L_0}{A_0}$$

$$R_i^A = \rho^A \frac{L_0}{A_i} [1 + b_i(f - 1)] = R_0^A \frac{A_0}{A_i} [1 + b_i(f - 1)]$$

$$R_i^A = R_0^A a_i [1 + b_i(f - 1)]$$

Si ahora comparamos la resistencia inicial en estado austenítico  $R_0^A$  con la resistencia en estado martensítico luego del ciclo  $i$  de transformación :

$$R_i^M = \rho^M \frac{L_0}{A_i}$$

$$f = \rho^M / \rho^A \longrightarrow R_i^M = f R_0^A \frac{A_0}{A_i} = R_0^A a_i f$$

$$R_i^M = R_0^A a_i f$$