

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS

Prado, Lucia H.

26/07/2017

Instituto Sabato

División Física de Metales - Centro Atómico Bariloche

INTRODUCCIÓN

OBJETIVO

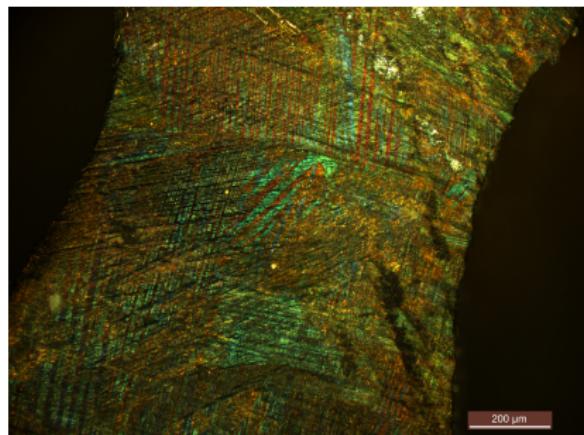
TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA

Características

- En estado sólido
- Sin difusión
- De primer orden

Formas de transformación

- Por temperatura (M_s y M_f)
- Por tensiones (Strain Induced Martensite)



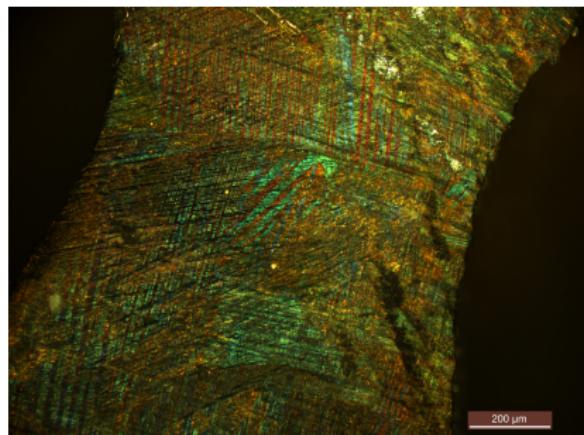
TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA

Características

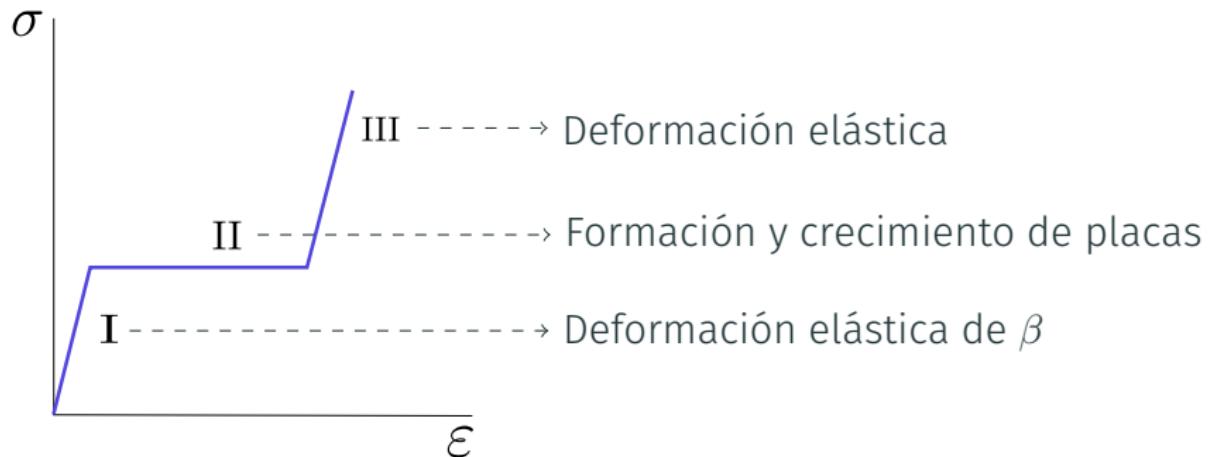
- En estado sólido
- Sin difusión
- De primer orden

Formas de transformación

- Por temperatura (M_s y M_f)
- Por tensiones (Strain Induced Martensite)



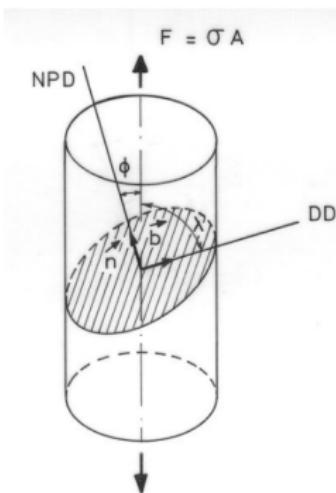
TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA



TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA

Ley de Schmid

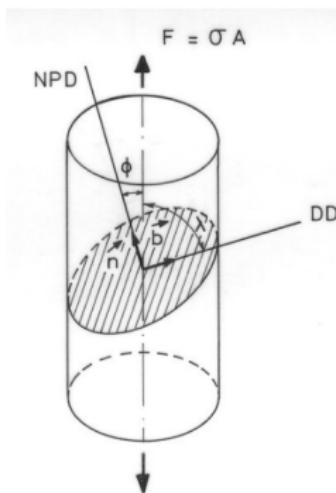
$$\tau_R = \sigma \cos(\lambda) \cos(\phi)$$



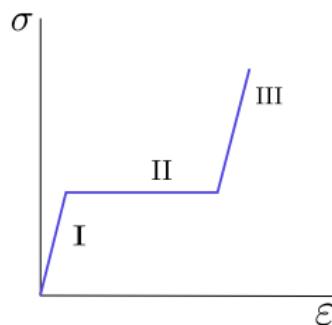
TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA

Ley de Schmid

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



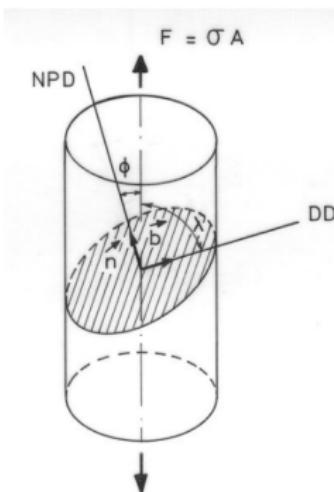
Monocristal



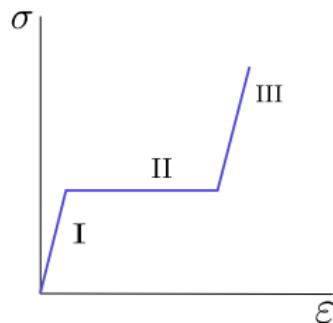
TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA

Ley de Schmid

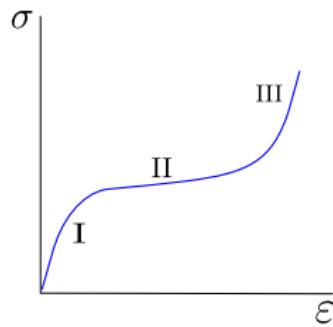
$$\tau_R = \sigma \cos(\lambda) \cos(\phi)$$



Monocristal



Policristal

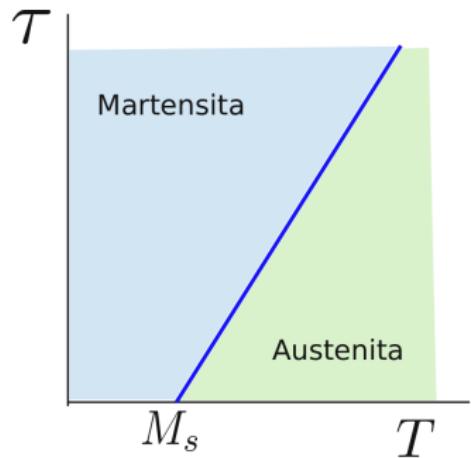


TENSIÓN DE TRANSFORMACIÓN

Clausius-Clapeyron

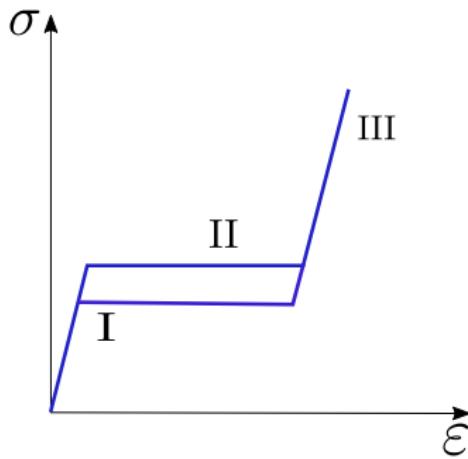
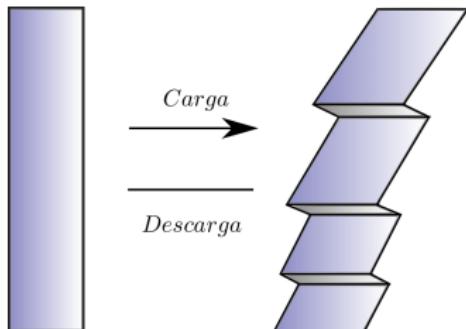
$$\frac{d\tau_R}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V}$$

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



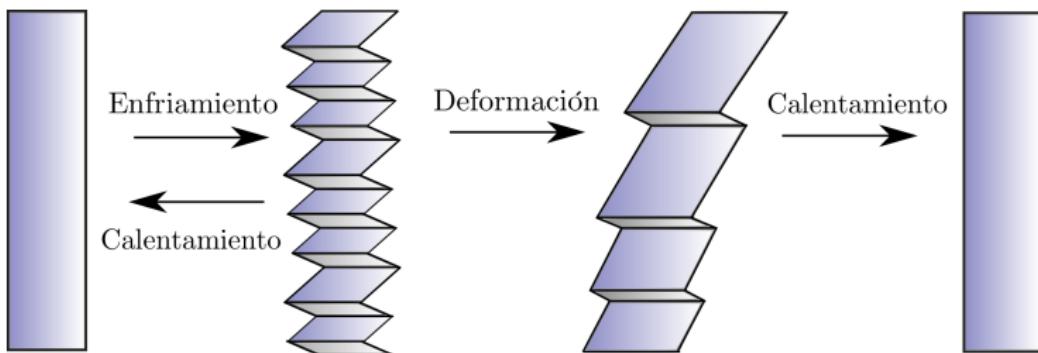
PSEUDOPLASTICIDAD

Fricción por movimiento de interfasas y creación de defectos.

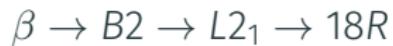
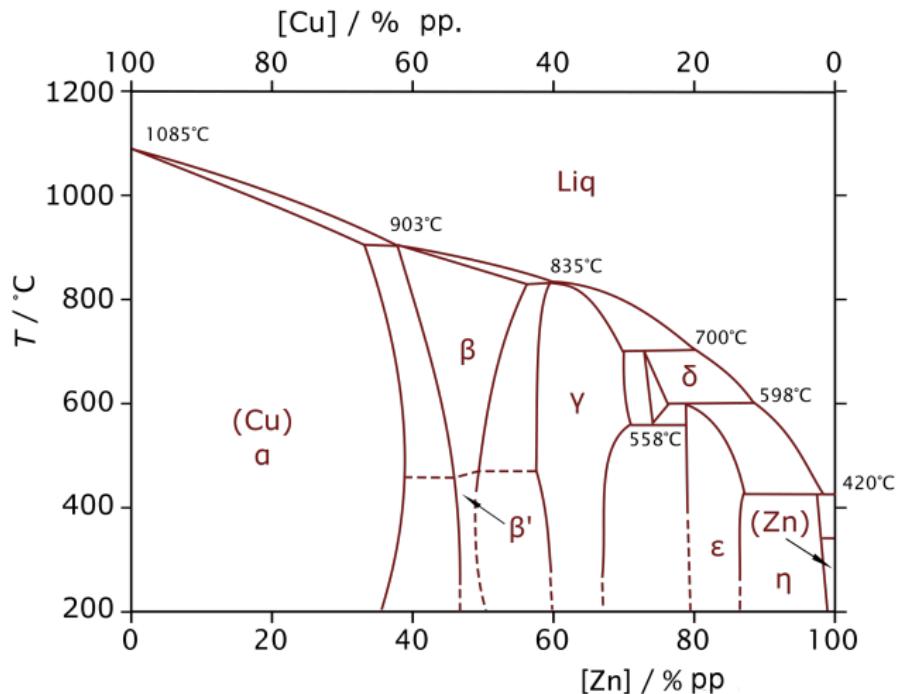


MEMORIA DE FORMA

- Forma inicial en estado austenítico
- Enfriamiento a $T < M_s$
- Deformación en estado martensítico
- Calentamiento a $T > A_f$



ALEACIÓN Cu-ZN-AL

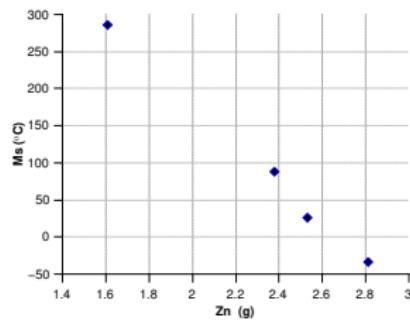


M_s

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

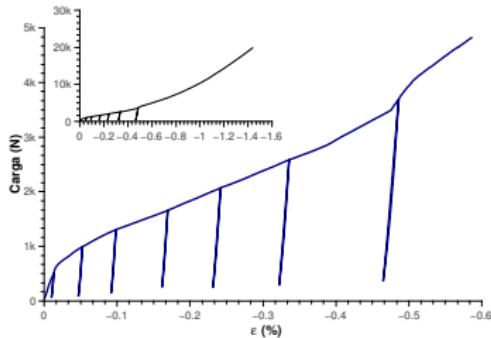
$$M_s[K] = 2686 - 6400C_{Zn} - 9000C_{Al}$$

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



Estructuras celulares

ESPONJAS METÁLICAS



- Lineal-elástico → flexión de las paredes
- Colapso de la estructura → Fluencia o fractura
- Densificación

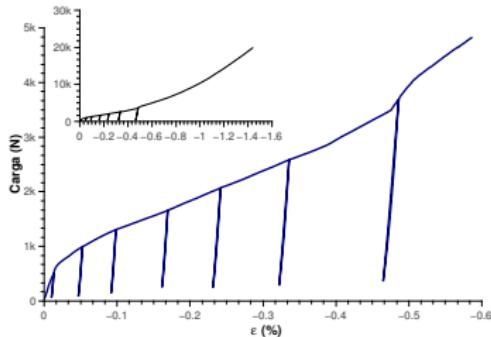
Principal parámetro: Densidad específica $\frac{\rho^*}{\rho_s}$

Principal forma de caracterizar las propiedades mecánicas

$$\frac{F^*}{F_s} = A \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n$$

sirve para rigidez de la estructura, tensión de colapso de la estructura σ^{pl} , Deformación en bandas a 45°

ESPONJAS METÁLICAS



- Lineal-elástico → flexión de las paredes
- Colapso de la estructura → Fluencia o fractura
- Densificación

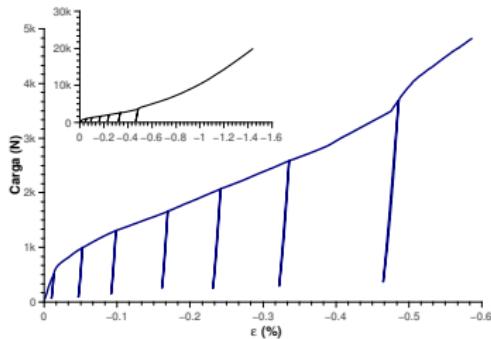
Principal parámetro: Densidad específica $\frac{\rho^*}{\rho_s}$

Principal forma de caracterizar las propiedades mecánicas

$$\frac{F^*}{F_s} = A \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n$$

sirve para rigidez de la estructura, tensión de colapso de la estructura σ^{pl} , Deformación en bandas a 45°

ESPONJAS METÁLICAS



- Lineal-elástico → flexión de las paredes
- Colapso de la estructura → Fluencia o fractura
- Densificación

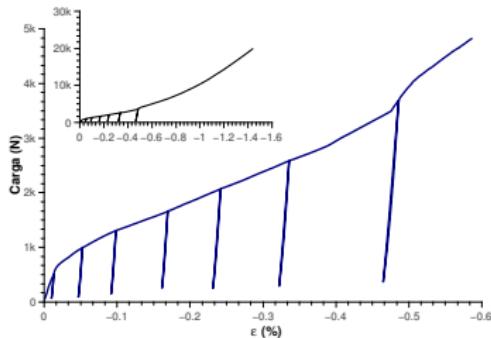
Principal parámetro: Densidad específica $\frac{\rho^*}{\rho_s}$

Principal forma de caracterizar las propiedades mecánicas

$$\frac{F^*}{F_s} = A \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n$$

sirve para rigidez de la estructura, tensión de colapso de la estructura σ^{pl} , Deformación en bandas a 45°

ESPONJAS METÁLICAS



- Lineal-elástico → flexión de las paredes
- Colapso de la estructura → Fluencia o fractura
- Densificación

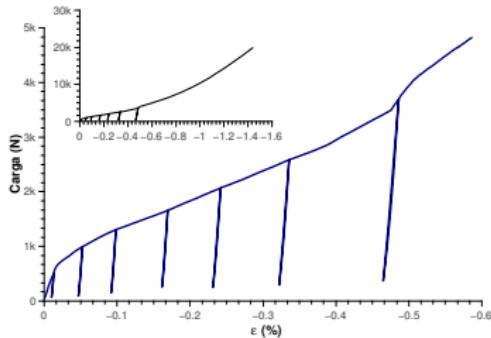
Principal parámetro: Densidad específica $\frac{\rho^*}{\rho_s}$

Principal forma de caracterizar las propiedades mecánicas

$$\frac{F^*}{F_s} = A \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n$$

sirve para rigidez de la estructura, tensión de colapso de la estructura σ^{pl} , Deformación en bandas a 45°

ESPONJAS METÁLICAS



- Lineal-elástico → flexión de las paredes
- Colapso de la estructura → Fluencia o fractura
- Densificación

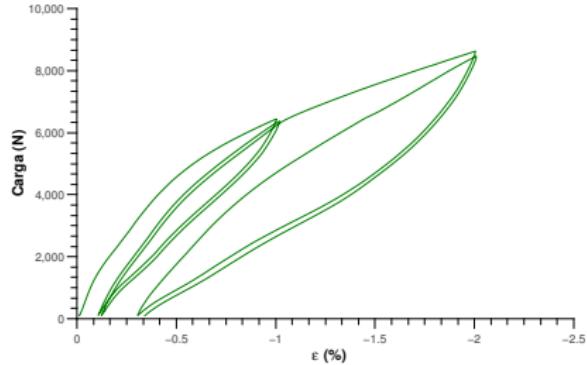
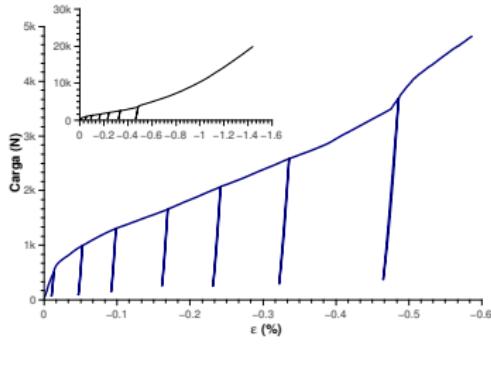
Principal parámetro: Densidad específica $\frac{\rho^*}{\rho_s}$

Principal forma de caracterizar las propiedades mecánicas

$$\frac{F^*}{F_s} = A \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n$$

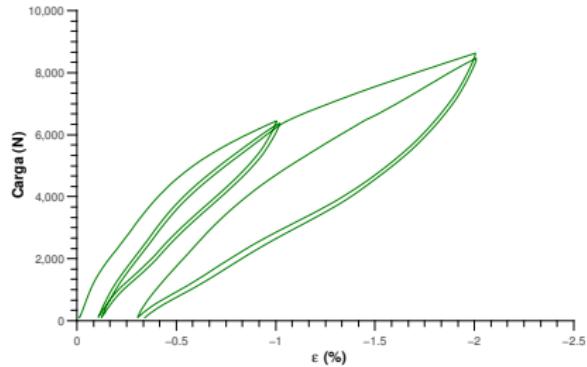
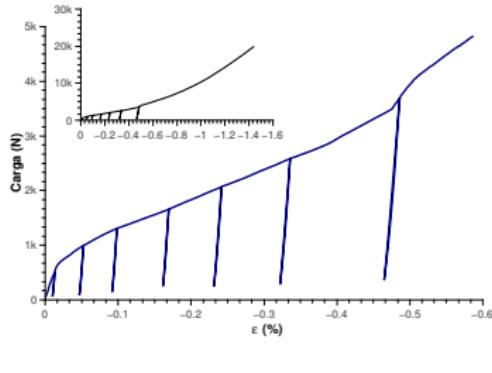
sirve para rigidez de la estructura, tensión de colapso de la estructura σ^{pl} , Deformación en bandas a 45°

ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS



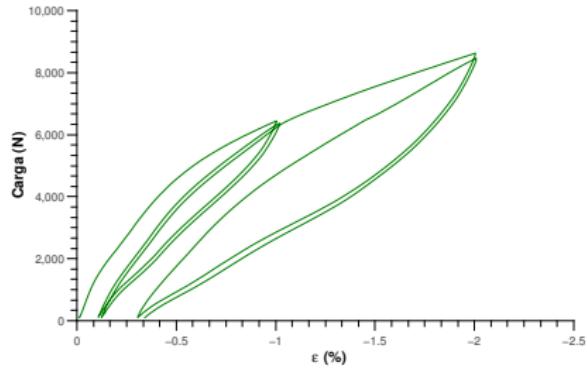
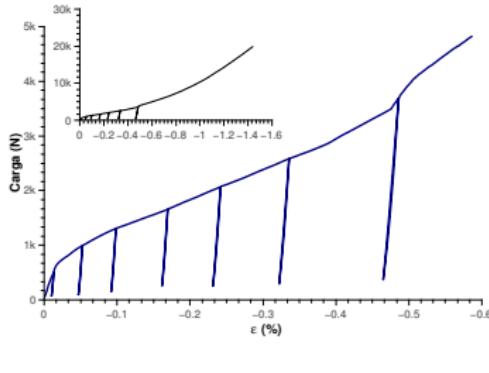
- Gran capacidad de deformación
- Recuperación de la forma inicial
- Disipación de energía por el efecto pseudoelástico

ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS

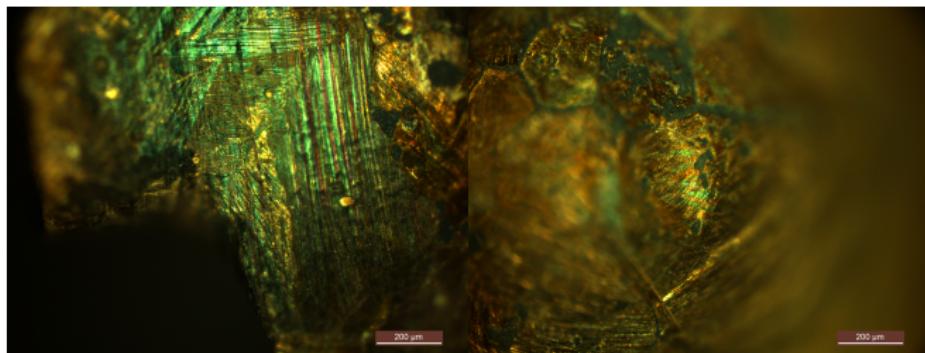
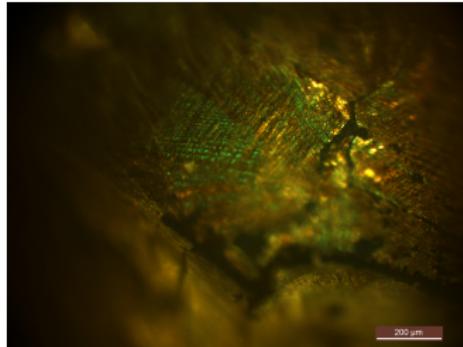


- Gran capacidad de deformación
- Recuperación de la forma inicial
- Disipación de energía por el efecto pseudoelástico

ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS



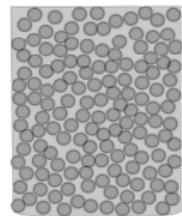
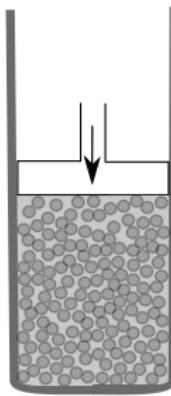
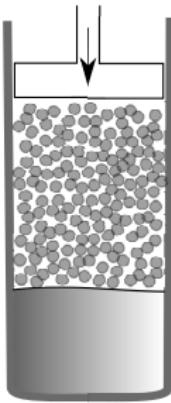
- Gran capacidad de deformación
- Recuperación de la forma inicial
- Disipación de energía por el efecto pseudoelástico



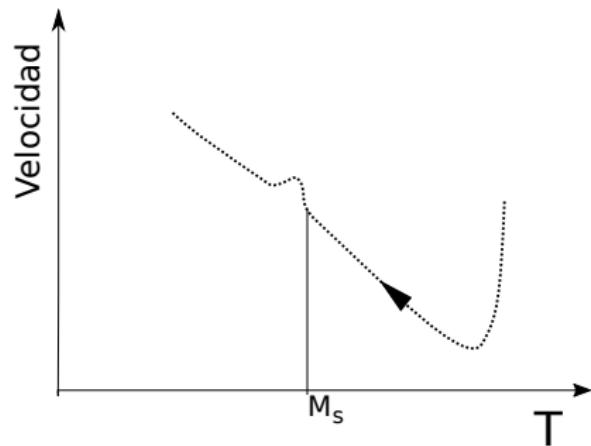
PREPARACIÓN DE LA ALEACIÓN

- Cu: 50 % ácido nítrico (al 65 %) - 50 % agua
- Zn: 60 % ácido nítrico (al 65 %) - 40 % agua
- Al: 60 % agua - 30 % ácido clorhídrico (al 37 %) - 10 % ácido fluorhídrico (al 48 %)

MÉTODO DE FABRICACIÓN DE ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS

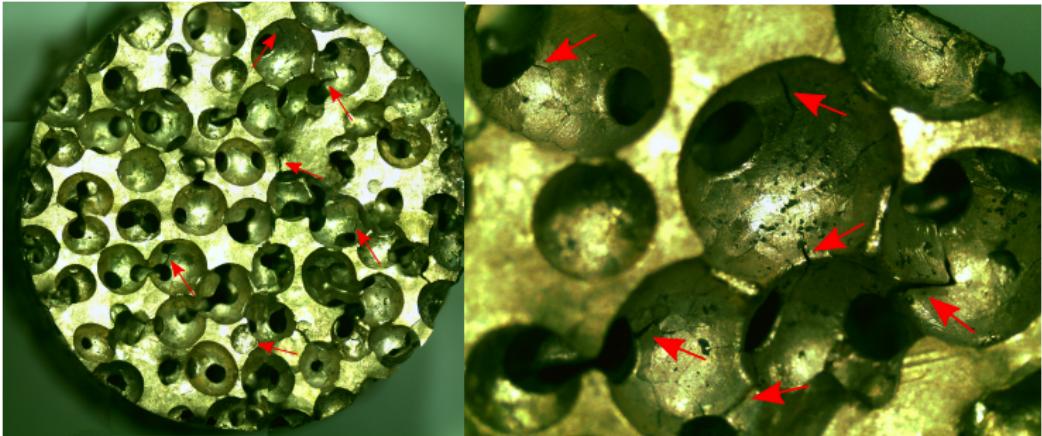


MEDICIÓN DE LA M_s



MOTIVACIÓN

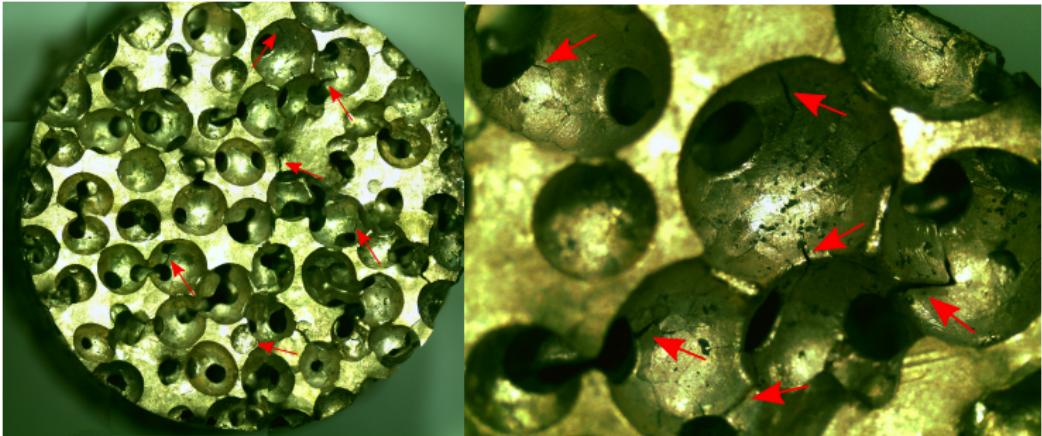
MOTIVACIÓN



Ensayos de distintas esponjas → fisuras intergranulares →
Modificar tamaño de grano

Comportamiento mecánico de la estructura +
transformaciones = Muy complejo!! → buscamos método
sencillo para entender lo que sucede y poder seguir la
integridad estructural de la esponja.

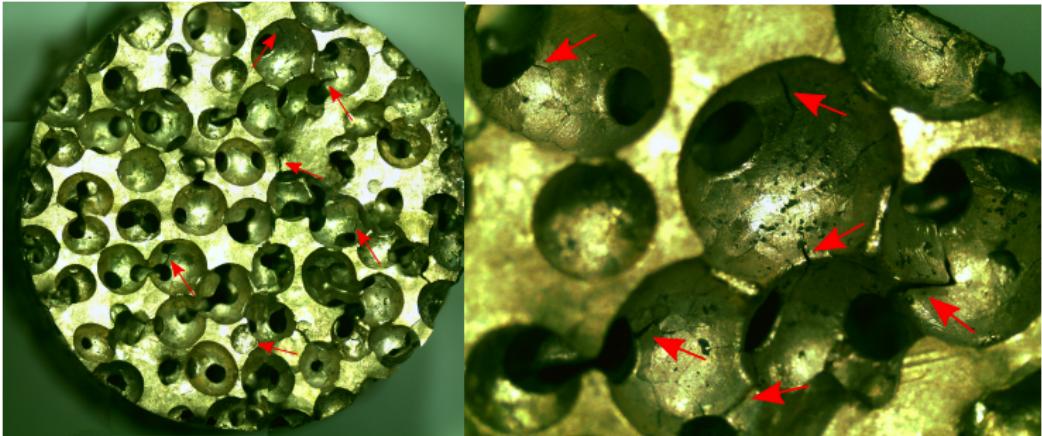
MOTIVACIÓN



Ensayos de distintas esponjas → **fisuras intergranulares** →
Modificar tamaño de grano

Comportamiento mecánico de la estructura +
transformaciones = Muy complejo!! → buscamos método
sencillo para entender lo que sucede y poder seguir la
integridad estructural de la esponja.

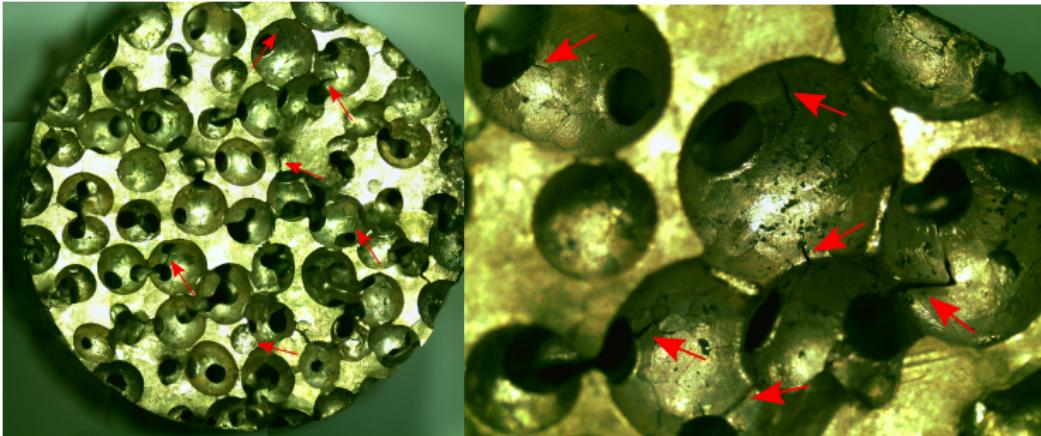
MOTIVACIÓN



Ensayos de distintas esponjas → fisuras intergranulares →
Modificar tamaño de grano

Comportamiento mecánico de la estructura +
transformaciones = Muy complejo!! → buscamos método
sencillo para entender lo que sucede y poder seguir la
integridad estructural de la esponja.

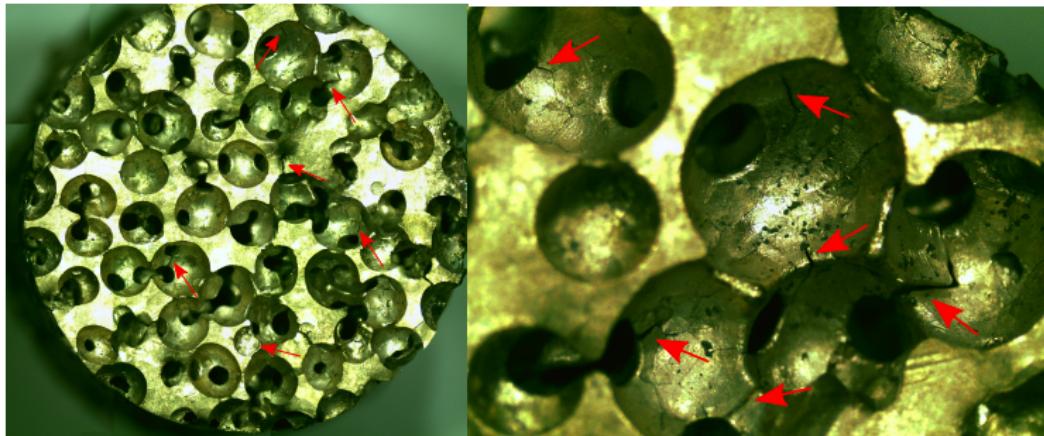
MOTIVACIÓN



Ensayos de distintas esponjas → fisuras intergranulares →
Modificar tamaño de grano

Comportamiento mecánico de la estructura +
transformaciones = Muy complejo!! → buscamos método
sencillo para entender lo que sucede y poder seguir la
integridad estructural de la esponja.

MOTIVACIÓN



Ensayos de distintas esponjas → fisuras intergranulares →
Modificar tamaño de grano

Comportamiento mecánico de la estructura +
transformaciones = Muy complejo!! → buscamos método
sencillo para entender lo que sucede y poder seguir la
integridad estructural de la esponja.

DISMINUCIÓN TAMAÑO DE GRANO

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	%pp AlB_2	Método	Horno
Botón 1	18,866	0,005	1	Inducción
Botón 2	18,564	0,5	1	Resistivo
Botón 3	14,129	0,5	2	Resistivo
Botón 4	18,383	0,5	2	Resistivo

Método 1: Aleación + AlB_2 papel aluminio + Cu

Método 2: Aleación + $AlB_2 \rightarrow$ prensado de pastillas



DISMINUCIÓN TAMAÑO DE GRANO

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	%pp AlB_2	Método	Horno
Botón 1	18,866	0,005	1	Inducción
Botón 2	18,564	0,5	1	Resistivo
Botón 3	14,129	0,5	2	Resistivo
Botón 4	18,383	0,5	2	Resistivo

Método 1: Aleación + AlB_2 papel aluminio + Cu

Método 2: Aleación + $AlB_2 \rightarrow$ prensado de pastillas



DISMINUCIÓN TAMAÑO DE GRANO

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	%pp AlB_2	Método	Horno
Botón 1	18,866	0,005	1	Inducción
Botón 2	18,564	0,5	1	Resistivo
Botón 3	14,129	0,5	2	Resistivo
Botón 4	18,383	0,5	2	Resistivo

Método 1: Aleación + AlB_2 papel aluminio + Cu

Método 2: Aleación + $AlB_2 \rightarrow$ prensado de pastillas



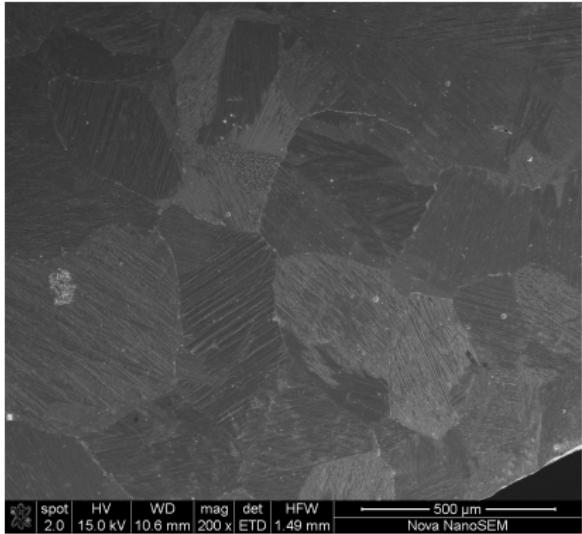
DISMINUCIÓN TAMAÑO DE GRANO

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	%pp AlB_2	Método	Horno
Botón 1	18,866	0,005	1	Inducción
Botón 2	18,564	0,5	1	Resistivo
Botón 3	14,129	0,5	2	Resistivo
Botón 4	18,383	0,5	2	Resistivo

Método 1: Aleación + AlB_2 papel aluminio + Cu

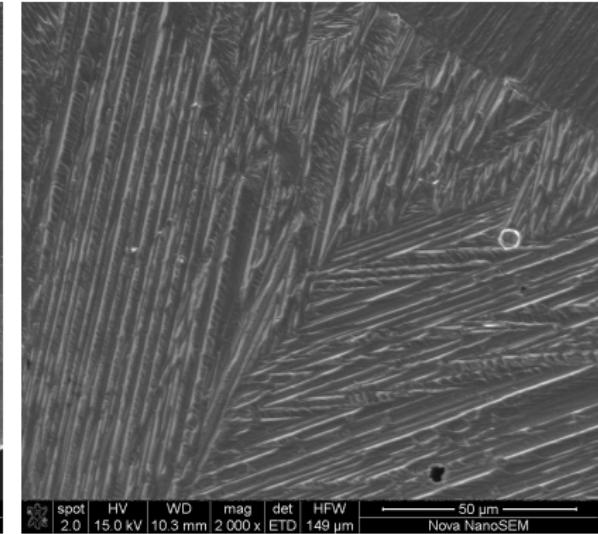
Método 2: Aleación + $AlB_2 \rightarrow$ prensado de pastillas





spot HV WD mag det HFW
2.0 15.0 kV 10.6 mm 200 x ETD 1.49 mm

500 µm



spot HV WD mag det HFW
2.0 15.0 kV 10.3 mm 2 000 x ETD 149 µm

50 µm

DISMINUCIÓN TAMAÑO DE GRANO

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	%pp AlB_2	Método	Horno
Clavo 1	8	0,5	III	Resistivo
Clavo 2	8	0,05	III	Resistivo
Clavo 3	8	-	IV	Resistivo
Clavo 4	8	0,005	IV	Resistivo

Método III: Aleación + AlB_2 papel aluminio + Cu

Método IV: Aleación + $AlB_2 \rightarrow$ prensado de pastillas



DISMINUCIÓN TAMAÑO DE GRANO

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	%pp AlB_2	Método	Horno
Clavo 1	8	0,5	III	Resistivo
Clavo 2	8	0,05	III	Resistivo
Clavo 3	8	-	IV	Resistivo
Clavo 4	8	0,005	IV	Resistivo

Método III: Aleación + AlB_2 papel aluminio + Cu

Método IV: Aleación + $AlB_2 \rightarrow$ prensado de pastillas



DISMINUCIÓN TAMAÑO DE GRANO

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	%pp AlB_2	Método	Horno
Clavo 1	8	0,5	III	Resistivo
Clavo 2	8	0,05	III	Resistivo
Clavo 3	8	-	IV	Resistivo
Clavo 4	8	0,005	IV	Resistivo

Método III: Aleación + AlB_2 papel aluminio + Cu

Método IV: Aleación + $AlB_2 \rightarrow$ prensado de pastillas



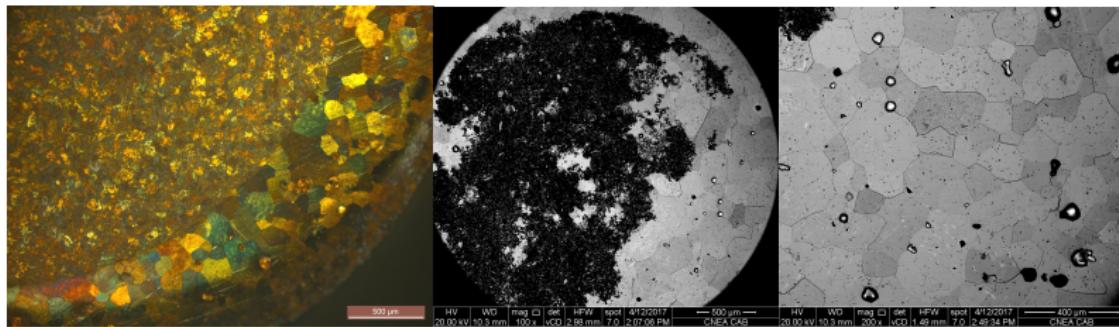
DISMINUCIÓN TAMAÑO DE GRANO

Muestra	$Cu - Zn - Al(g)$	%pp AlB_2	Método	Horno
Clavo 1	8	0,5	III	Resistivo
Clavo 2	8	0,05	III	Resistivo
Clavo 3	8	-	IV	Resistivo
Clavo 4	8	0,005	IV	Resistivo

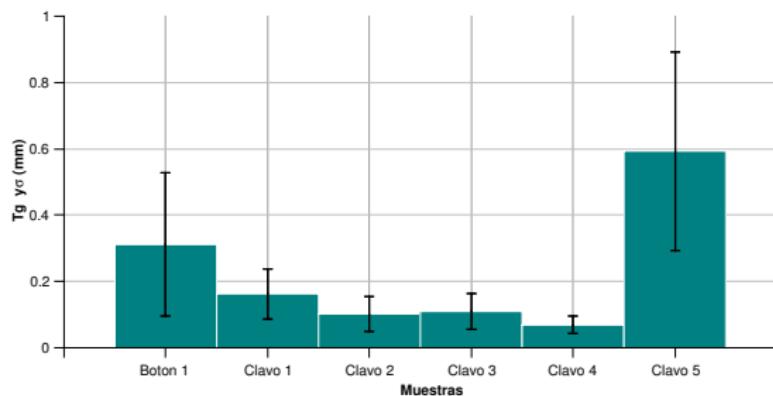
Método III: Aleación + AlB_2 papel aluminio + Cu

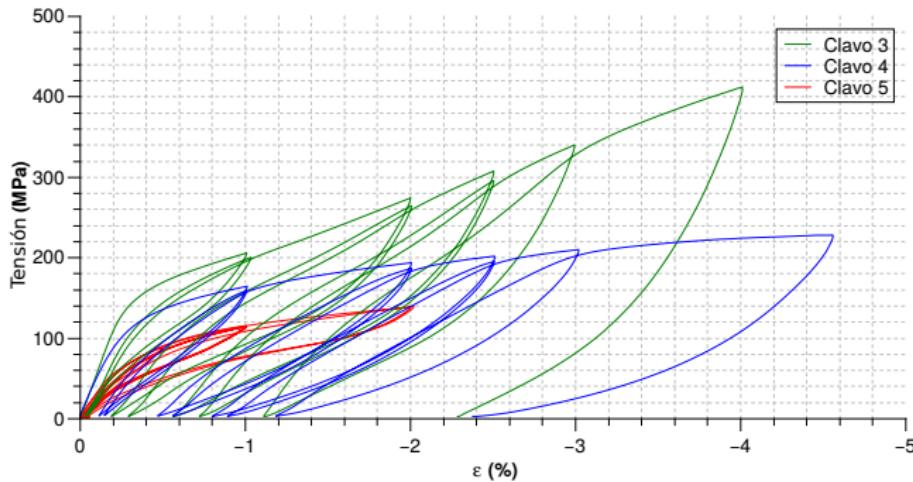
Método IV: Aleación + $AlB_2 \rightarrow$ prensado de pastillas





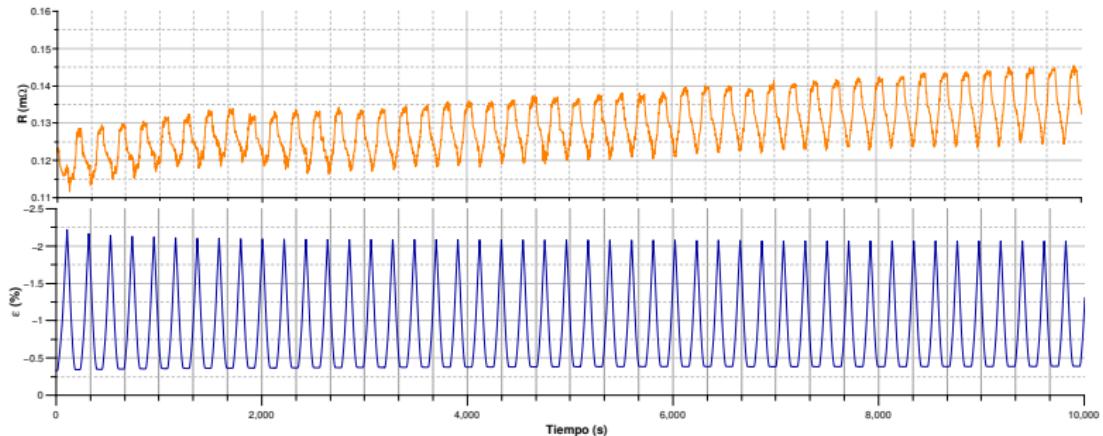
Muestra	wt %AlB ₂	Método de fabricación	$\bar{t}_g(mm)$	σ
Clavo 5	-	-	0.59	0.30
Botón 1	0,005	I	0.31	0.22
Clavo 1	0,50	III	0.16	0.08
Clavo 2	0,05	III	0.10	0.05
Clavo 3	-	IV	0.11	0.05
Clavo 4	0,005	IV	0.07	0.03



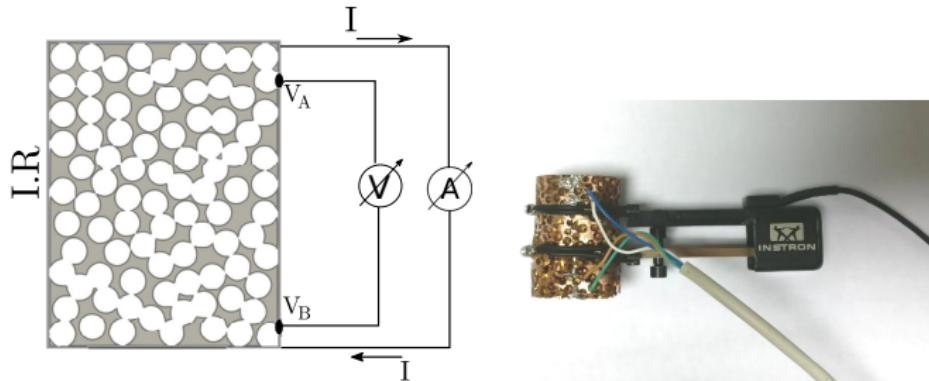




Introducción



METODO CUATRO PUNTAS

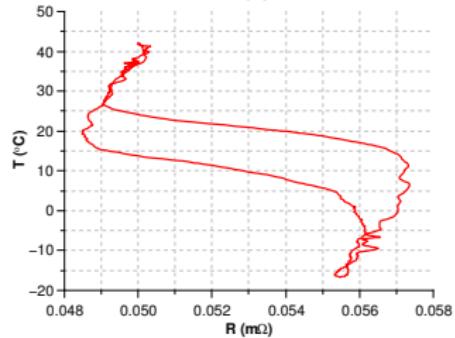
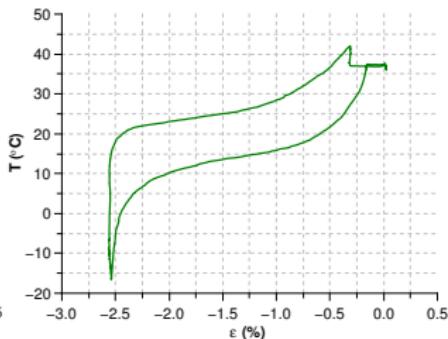
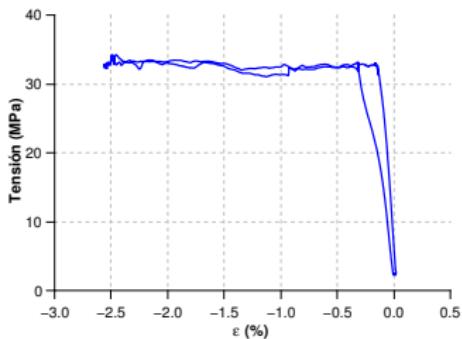


$$V^+ = V_A + I^+ \cdot R - V_B$$

$$V^- = V_A + I^- \cdot R - V_B$$

$$V^+ - V^- = [I^+ + I^-]R \longrightarrow R = \frac{V^+ - V^-}{(I^+ + I^-)}$$

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l}$$



Descripción histéresis

$$R_0 = \rho \frac{l_0}{A_0} \quad (1)$$

donde R_0 (Ω) es la resistencia inicial, ρ (Ωm) es la resistividad, l_0 es el largo inicial y A_0 la sección inicial.

$$l = l_0 * (1 + \varepsilon) \quad y \quad A = \frac{A_0}{(1 + \varepsilon)}$$

Por lo tanto,

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

De esta manera, $(1 + \varepsilon)^2$ es un factor que relaciona el cambio de la resistencia con los cambios geométricos de la muestra.

$$\rho_M = f \rho_A$$

$$R_M^0 = f R_A$$

En este caso se está tomando en cuenta la compresión que sufre la muestra al transformar, que generará una disminución en la resistencia, y entonces llegará al valor R_M . Por lo tanto tendremos:

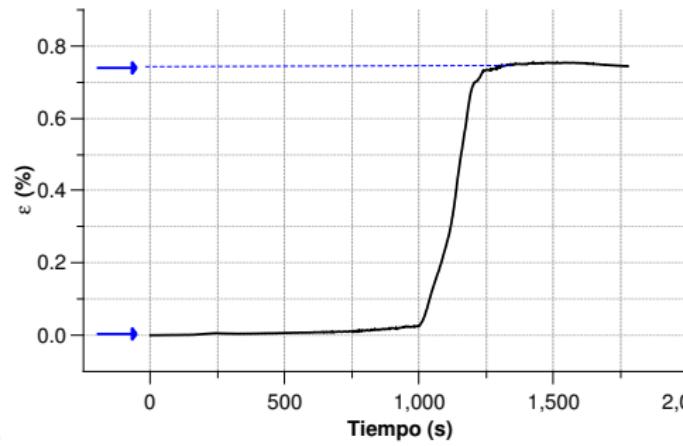
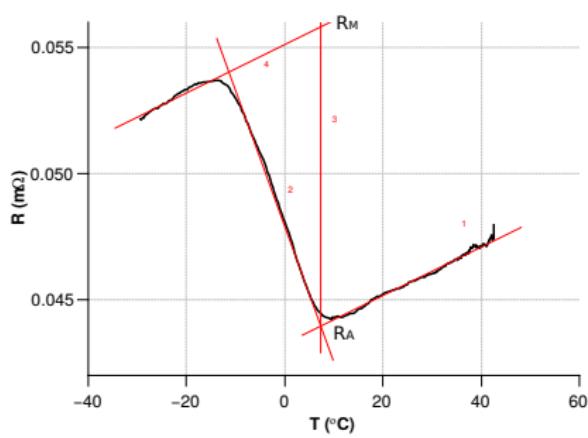
$$R_M = f' R_A$$

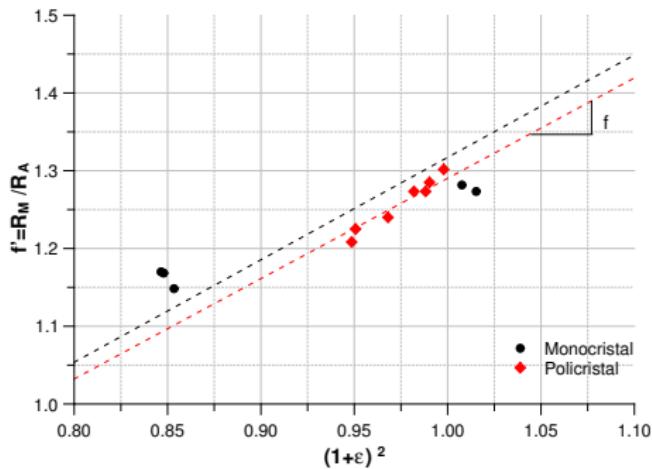
donde f' es el factor que relaciona las resistencias en un experimento real. Como $R_M = R_M^0(1 + \varepsilon)^2 = f' R_A$ se llega a:

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

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

Esta ecuación relaciona los valores de resistencia al transformar, tomando en cuenta los cambios geométricos en la muestra.



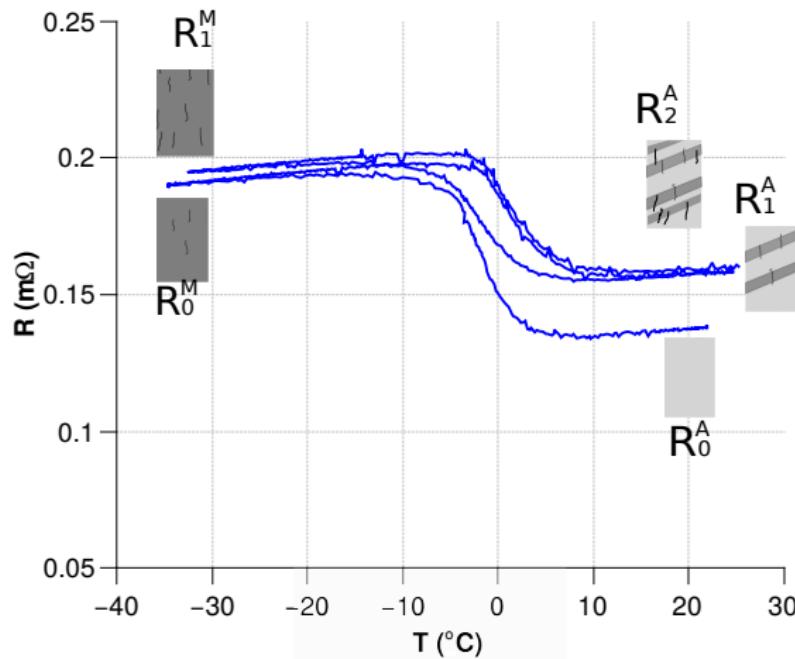


Tensión (MPa)	ε (%)	$f' = \frac{R_M}{R_A}$
0	0.76	1.27
1.93	0.37	1.28
17.4	-7.60	1.15
31.0	-7.90	1.17
46.5	-8.00	1.17
Referencia	8.00	1.73

Cuadro 1: Monocristal

Tensión (Mpa)	ε (%)	$f' = \frac{R_M}{R_A}$
0	-0.10	1.30
0	-0.60	1.27
0	-0.50	1.28
2.04	-0.90	1.27
18.4	-1.60	1.24
32.7	-2.60	1.21
49.1	-2.50	1.23

Cuadro 2: Polycristal



Al concluir un ciclo de transformación a martensita y volver a austenita, la resistencia estará dada por:

$$R_i^A = \rho^A \frac{L_0}{A_i} (1 - b_i) + \rho^M \frac{L_0}{A_i} b_i = \rho^A \frac{L_0}{A_i} [1 + b_i(f - 1)] \quad (3)$$

Donde ahora $0 < b_i < 1$ representa la fracción de martensita retenida luego de ese ciclo de transformación y $(1 - b_i)$ la aleación restante que transforma a austenita. En este punto, la resistencia estará dada por la austenita, martensita retenida, y además por la rotura de la estructura. Por ejemplo luego del primer ciclo de transformación será R_1^A en la figura. Si en el estado inicial la esponja esta compuesta solo por austenita y no presenta ninguna rotura su resistencia estará dada por:

$$R_0^A = \rho^A \frac{L_0}{A_0} \quad (4)$$

Por lo tanto en el ciclo i de transformación la resistencia en estado austenítico será:

$$R_i^A = R_0^A \frac{A_0}{A_i} [1 + b_i(f - 1)] = R_0^A a_i [1 + b_i(f - 1)] \quad (5)$$

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

$$R_i^M = \rho^M \frac{L_0}{A_i} \quad (6)$$

Si el parámetro f relaciona las resistividades en estado austenítico y martensítico, entonces:

$$f = \rho^M / \rho^A \longrightarrow R_i^M = f R_0^A \frac{A_0}{A_i} = R_0^A a_i f \quad (7)$$

Esponja	Ensayo	R^M	R^A	A_0/A
1	1	0.040	0.031	1.009
1	2	0.046	0.034	1.061
1	3	0.058	0.042	1.067
1	4	0.089	0.068	1.010
2	1	0.015	0.011	0.992
2	2	0.017	0.013	1.007

Esponja	Ensayo	R^M	R^A	b
1	1	0.031	0.031	0.033
1	2	0.035	0.034	0.139
1	3	0.044	0.042	0.166
1	4	0.069	0.068	0.044
2	1	0.011	0.011	0.029
2	2	0.013	0.012	0.054

Conclusiones