

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS

Prado, Lucia H.

26/07/2017

Instituto Sabato

División Física de Metales - Centro Atómico Bariloche

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

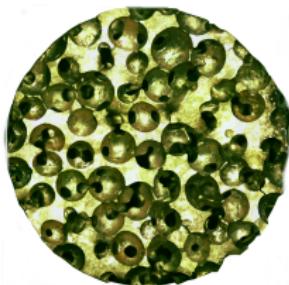
Esponjas pseudoelástica

=

Aleación de CuZnAl

+

Estructura celular



Organización del trabajo:

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

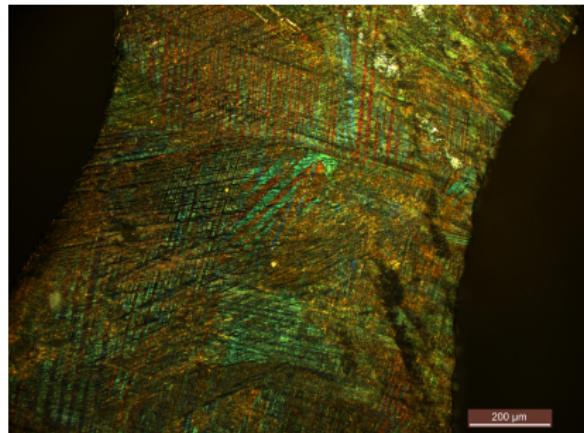
TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA

Características

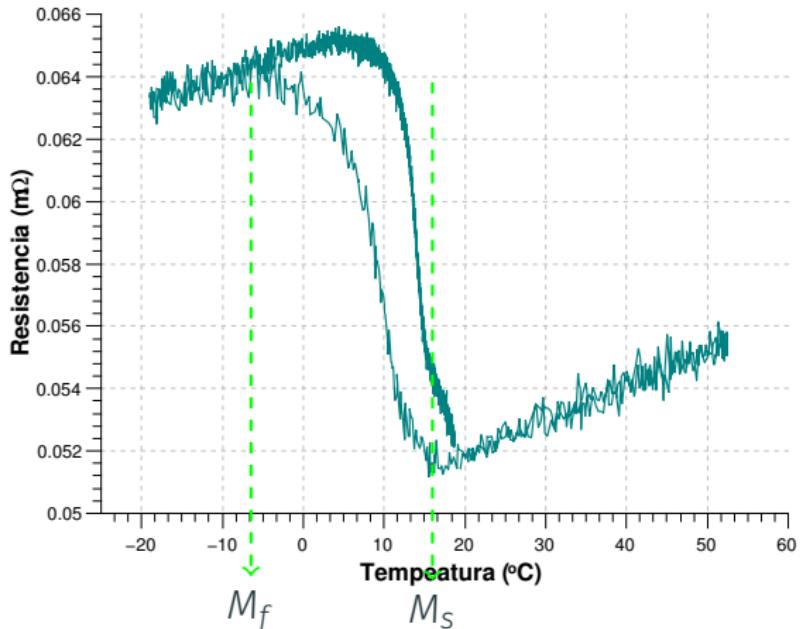
- En estado sólido
- Sin difusión
- De primer orden

Formas de transformación

- Inducida térmicamente (M_s y M_f)
- Inducida por tensiones (Strain Induced Martensite)



TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA INDUCIDA TÉRMICAMENTE



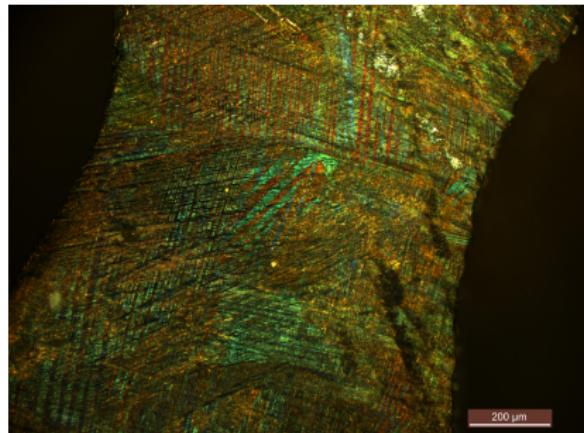
TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA

Características

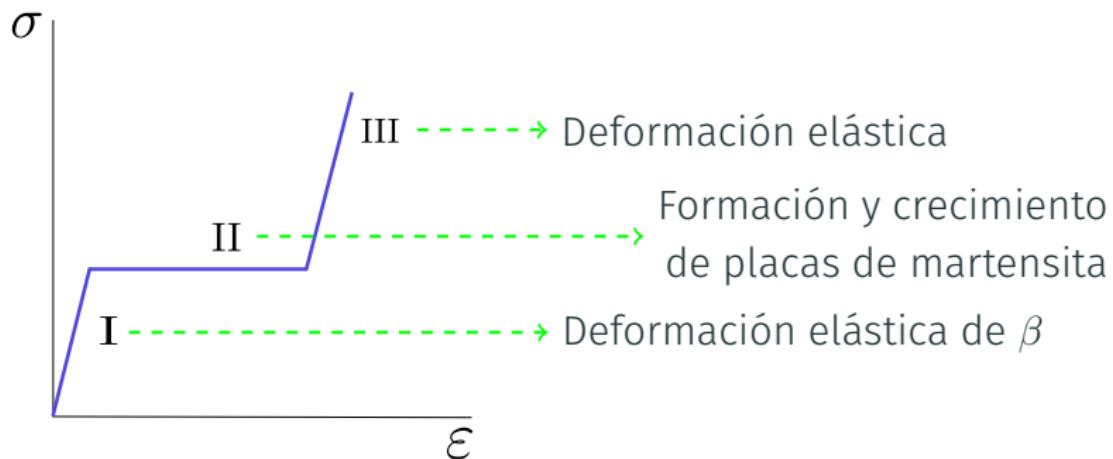
- En estado sólido
- Sin difusión
- De primer orden

Formas de transformación

- Inducida térmicamente (M_s y M_f)
- Inducida por deformación? (Strain Induced Martensite)



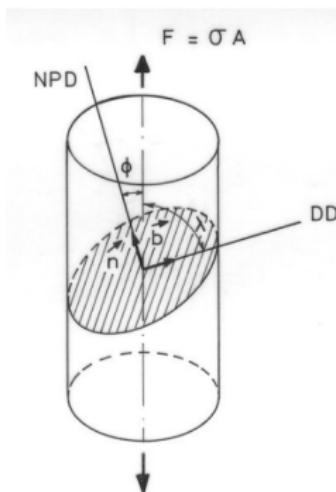
TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA INDUCIDA POR DEFORMACIÓN



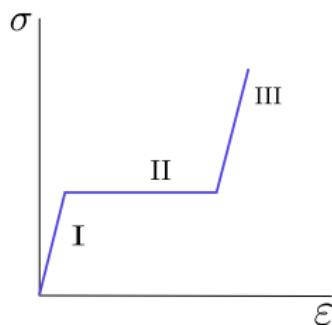
TRANSFORMACIÓN EN MONOCRISTALES Y POLICRISTALES

Ley de Schmid

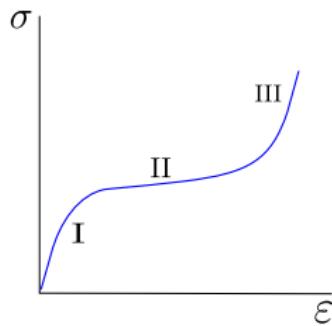
$$\tau_R = \sigma \cos(\lambda) \cos(\phi)$$



Monocristal



Policristal

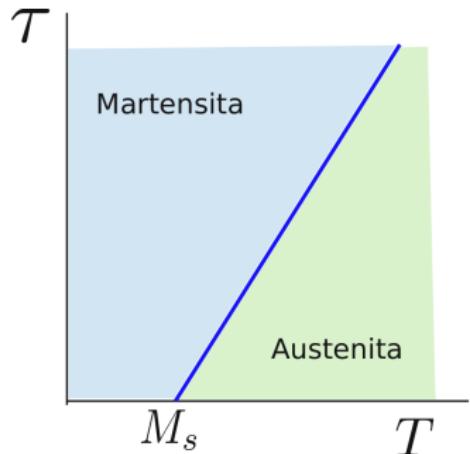


VARIACIONES EN LOS PARÁMETROS DE TRANSFORMACIÓN

Clausius-Clapeyron

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

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

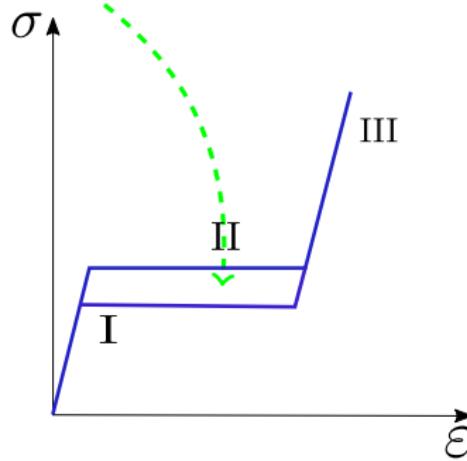
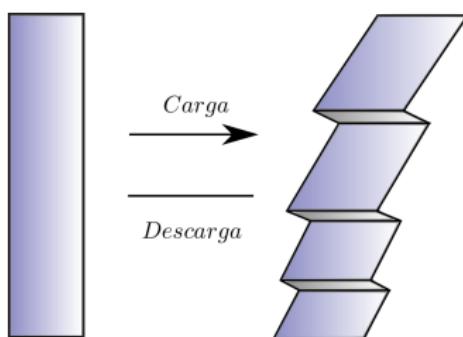


Falta variación de ancho de la histéresis

Poner solo τ (en el gráfico puse τ , y en el de transf. x deformación pu

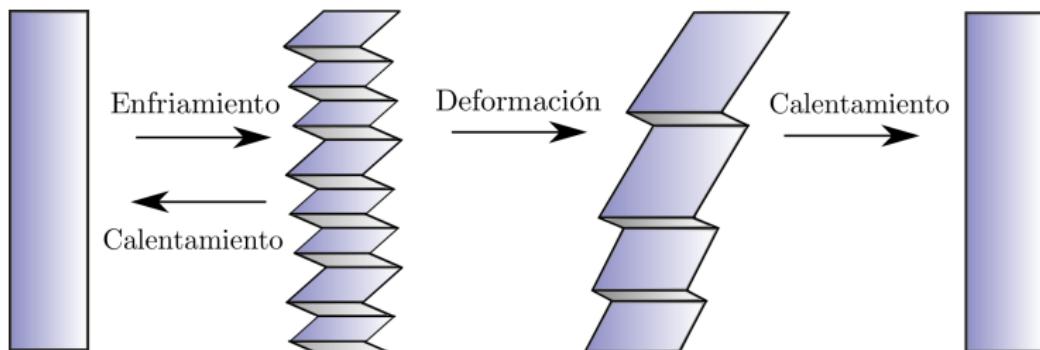
PSEUDOPLASTICIDAD

Gasto de energía debido a la fricción en el movimiento de interfaces y creación de defectos.

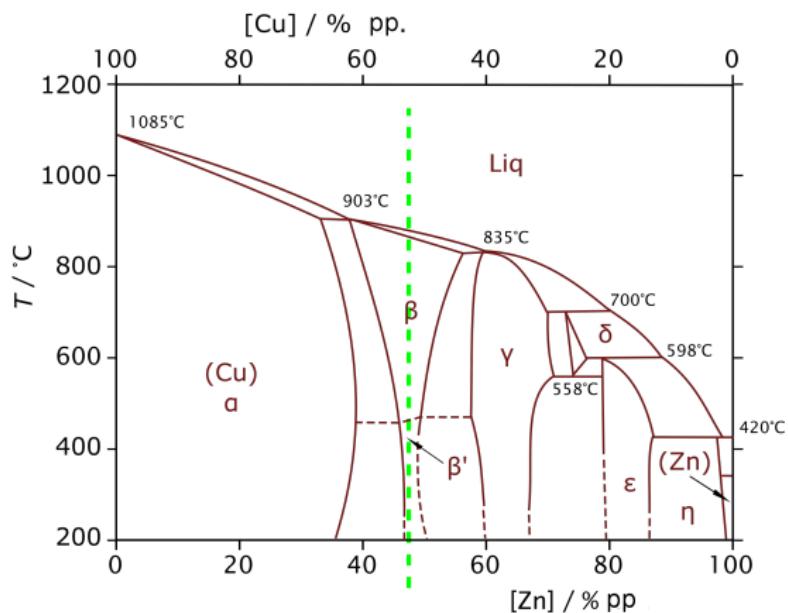


MEMORIA DE FORMA

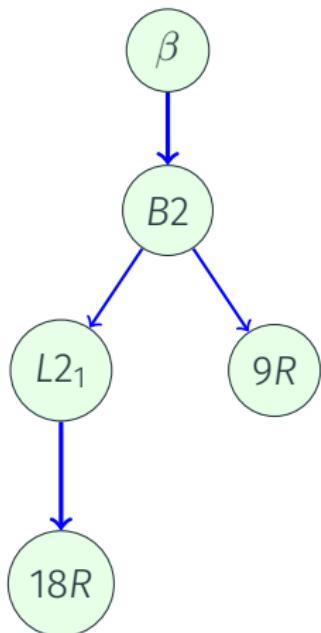
- Forma inicial en estado austenítico
- Enfriamiento a $T < M_s$
- Deformación en estado martensítico
- Calentamiento a $T > A_f$



ALEACIÓN CU-ZN-AL



$$\frac{e}{a} = 1,48$$

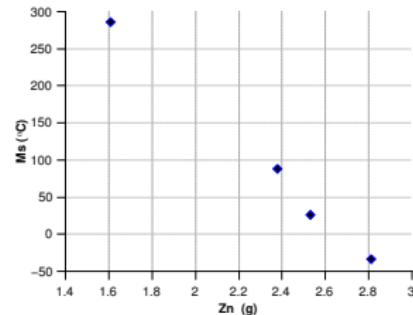


M_s

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

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

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

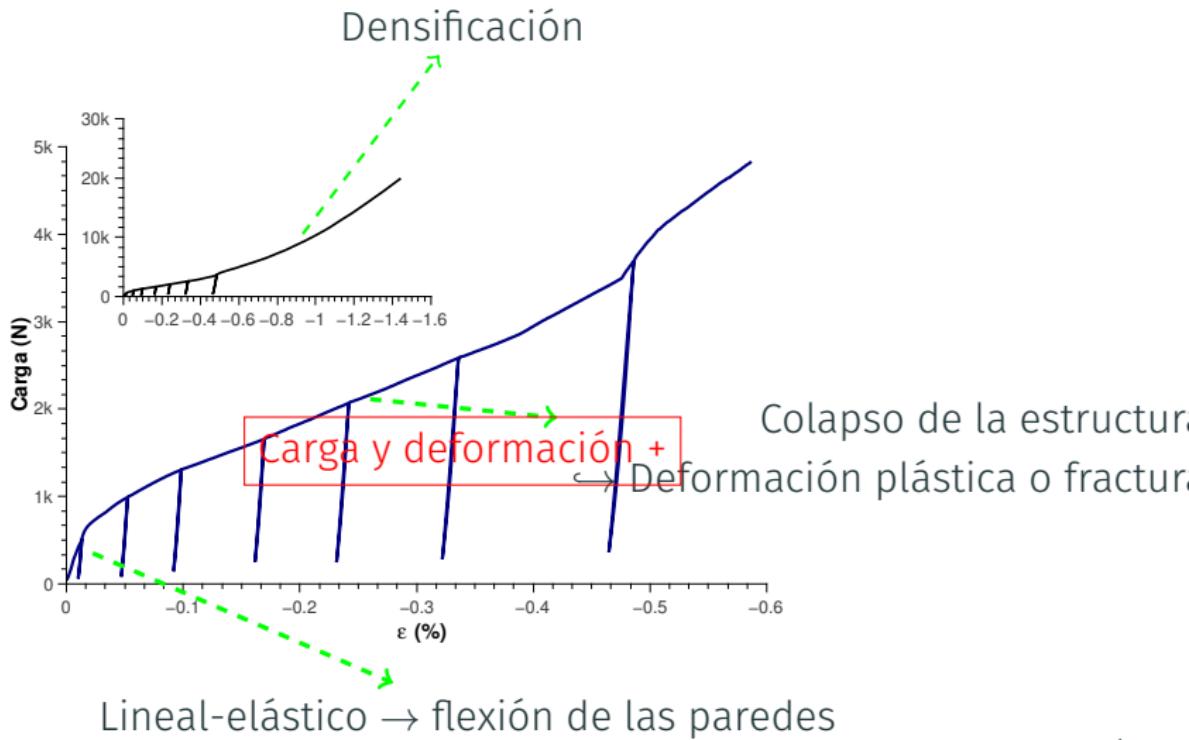


Explicar relación entre fórmulas y la M_s buscada

ESTRUCTURAS CELULARES

introducción con ejemplos de estructuras celulares

ESPONJAS METÁLICAS



ESPONJAS METÁLICAS

EXPLICAR MEJOR ESTAS FÓRMULAS

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

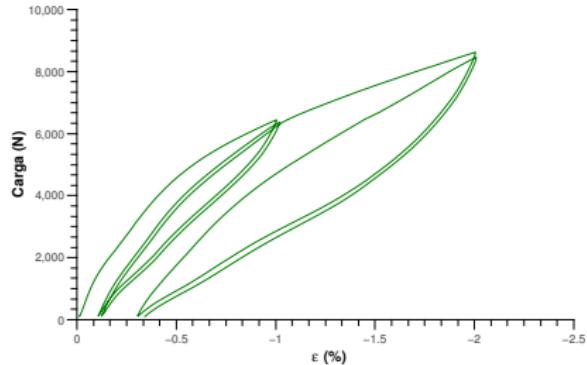
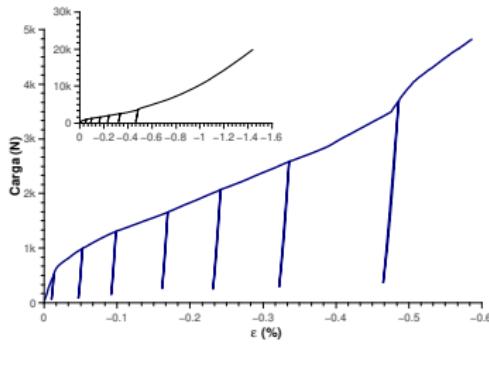
Principal forma de caracterizar las propiedades mecánicas

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

sirve para rigidez de la estructura, tensión de colapso de la estructura σ^{pl} , y muchas otras propiedades mecánicas.

ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS

SIMPLIFICAR Y EXPLICAR PASO POR PASO LA CURVA DE LA ESPONJA



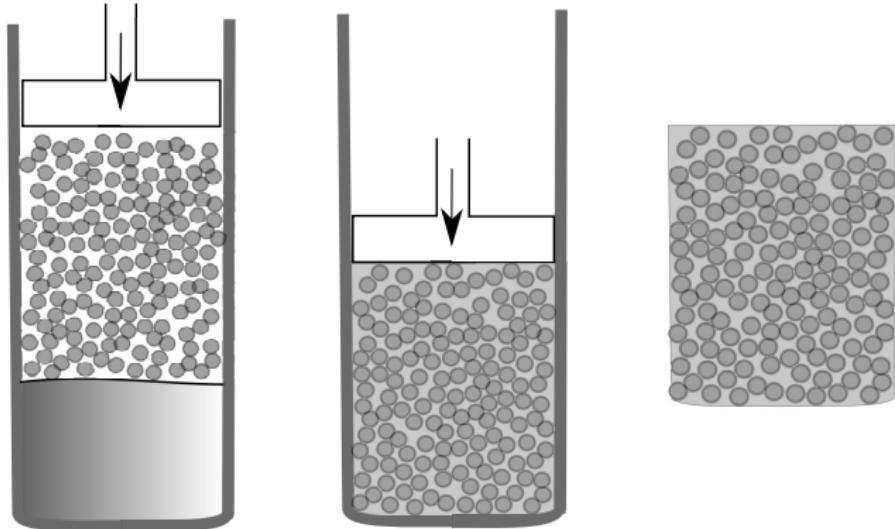
- Gran capacidad de deformación
- Recuperación de la forma inicial
- Disipación de energía por el efecto pseudoelástico

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 %)

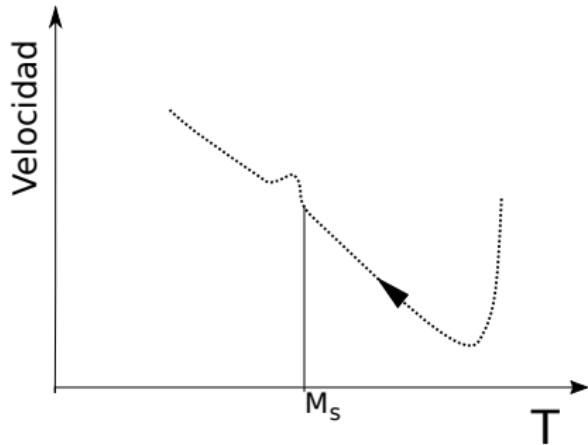


MÉTODO DE FABRICACIÓN DE ESPONJAS PSEUDOELÁSTICAS





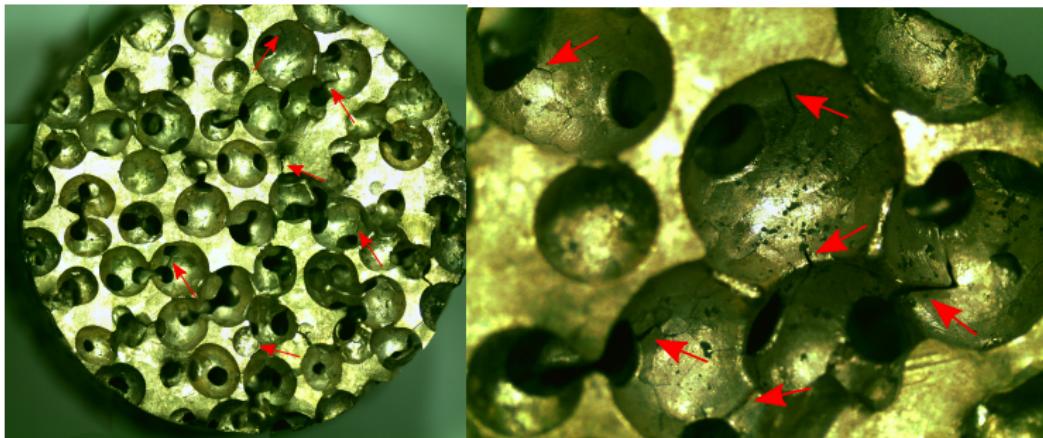
MEDICIÓN DE LA M_s



ESQUEMA DE COMO MEDIMOS CON LA ESTUFA Y EL TERMO CON N

MOTIVACIÓN

MOTIVACIÓN



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

Principal método para refinar el tamaño de grano → Boro →
 AlB_2

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



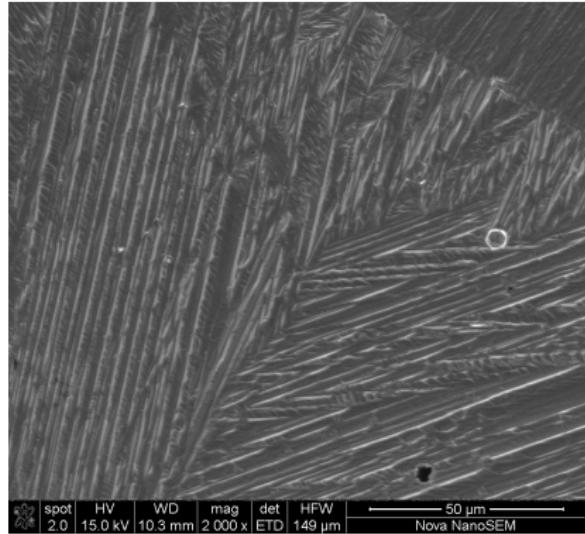
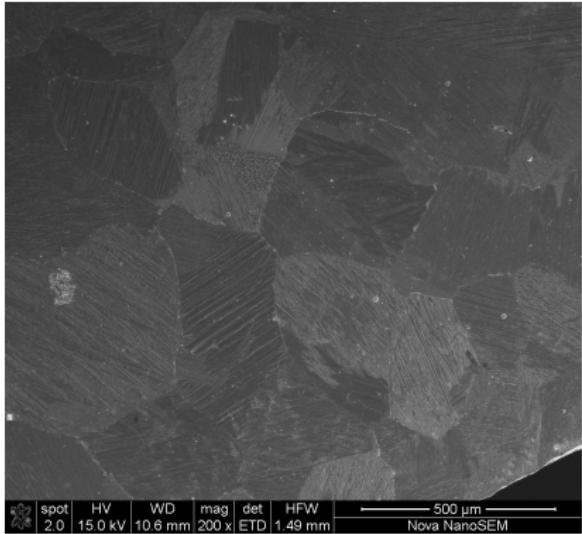
DISMINUCIÓN TAMAÑO DE GRANO

| 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





EXPLICAR COMO ES LA MOLIENDA MECÁNICA

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



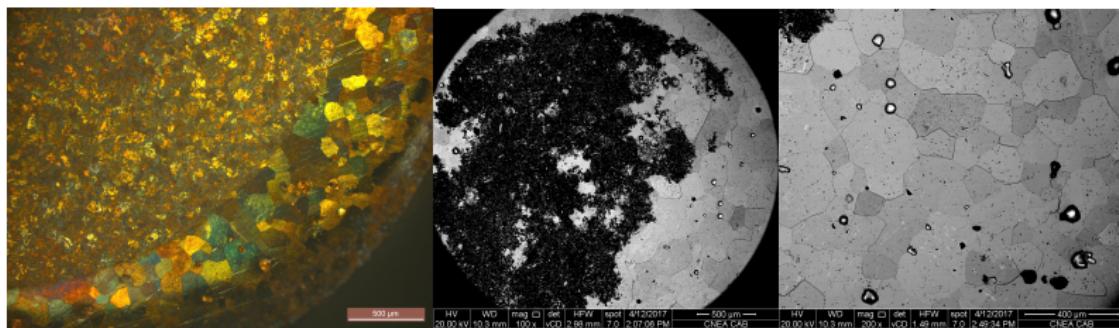
DISMINUCIÓN TAMAÑO DE GRANO

| 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





500 μm

HV 20.00 kV WD 10.5 mm Mag 100x vCD 2.88 mm HFW spot 4/12/2017

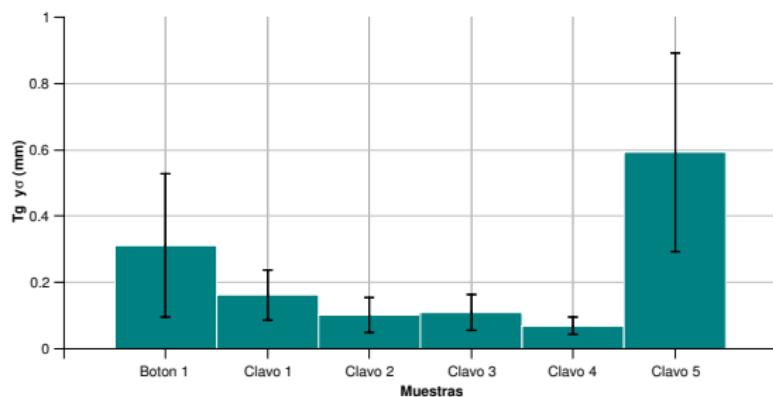
CNEA CAB

500 μm

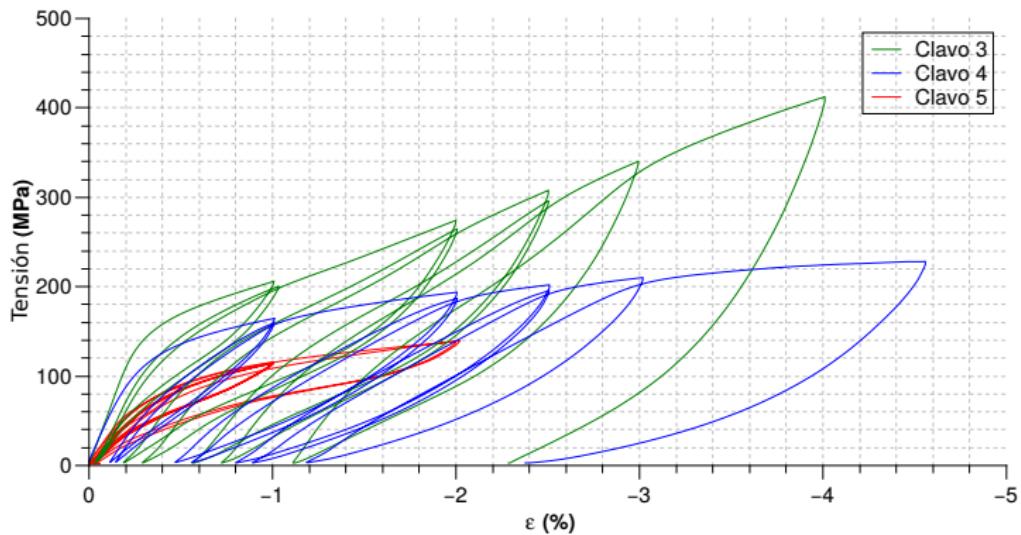
HV 20.00 kV WD 10.5 mm Mag 200x vCD 1.48 mm HFW spot 4/12/2017

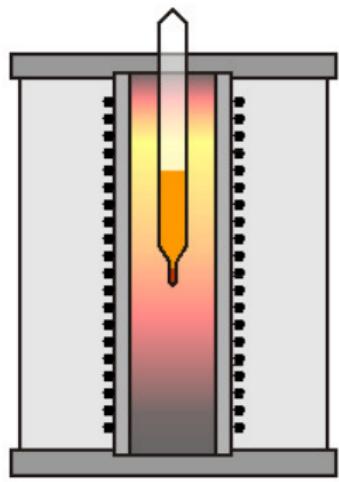
CNEA CAB

| 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 |



SIMPLIFICAR Y EXPLICAR GRÁFICOS PARA QUE SE ENTIENDA MEJOR





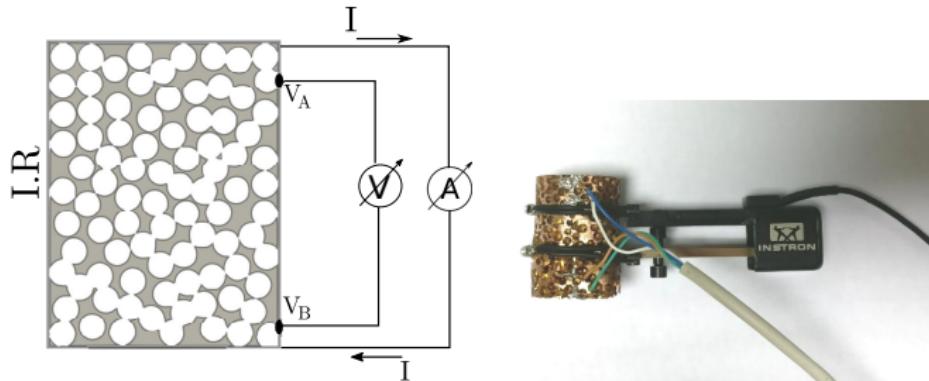
EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURA Y SEGUIMIENTO DE LA TRANSFORMACIÓN

LUEGO DE MODIFICAR EL TAMAÑO DE GRANO QUEREMOS HACER UN SEGUIMIENTO DE LA INTEGRIDAD DE LA ESPONJA.

ADEMÁS SERIA ÚTIL VER COMO SE DEFORMA Y VA TRANSFORMANDO.

QUEREMOS UN MÉTODO QUE SEA SENCILLO Y SE PUEDA UTILIZAR IN-SITU SIN TENER QUE SACAR EL DISPOSITIVO DE FUNCIONAMIENTO

METODO CUATRO PUNTAS



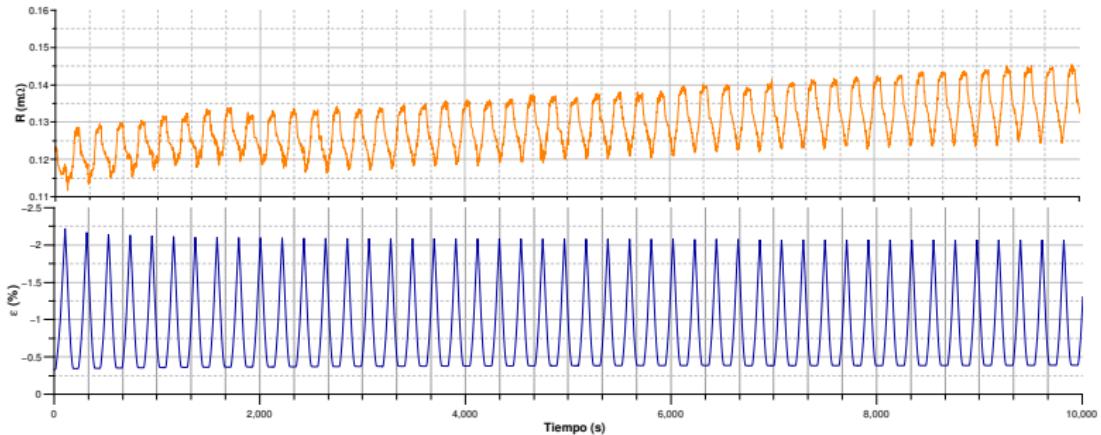
$$V^+ = V_A + I^+ \cdot R - V_B$$

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

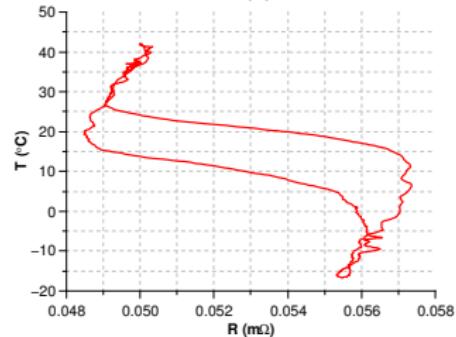
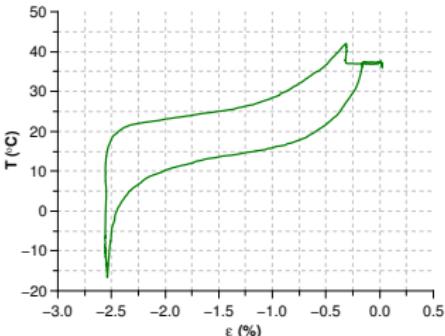
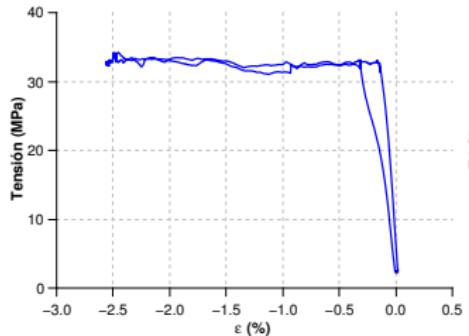
$$V^+ - V^- = [I^+ + I^-]R \longrightarrow R = \frac{V^+ - V^-}{(I^+ + I^-)}$$

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

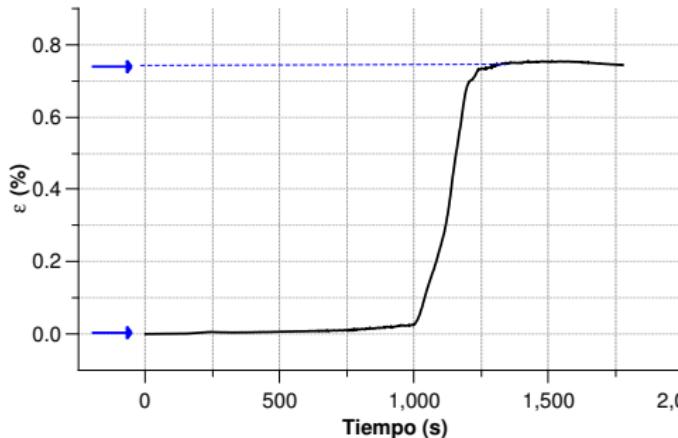
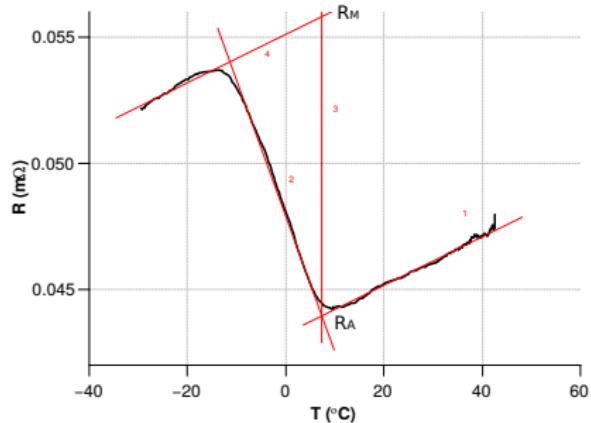
PRIMERAS MEDICIONES



MEDICIONES REALIZADAS



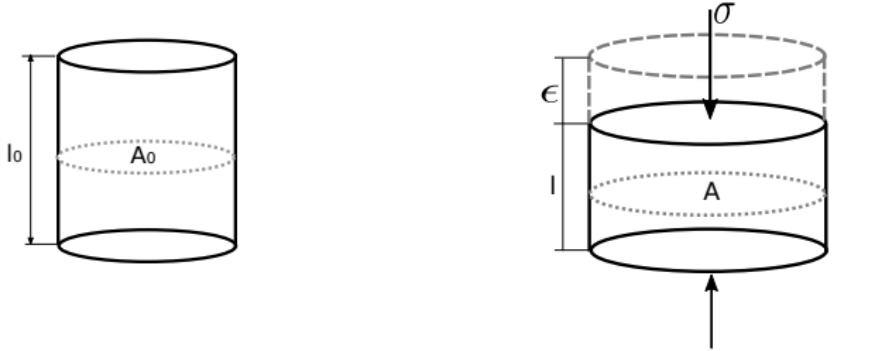
EJEMPLO DE COMO SE TOMARON LOS VALORES DE RESISTENCIA



MUESTRAS ANALIZADAS

Foto de muestras cilíndricas y clavo

VARIACIÓN EN LA RESISTENCIA POR COMPRESIÓN



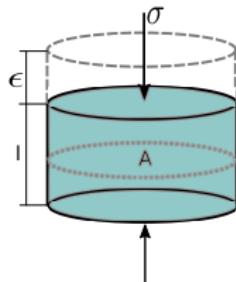
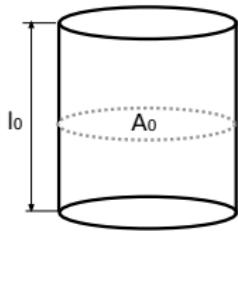
$$R_0 = \rho \frac{l_0}{A_0}$$

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

$$A = \frac{A_0}{(1 + \varepsilon)}$$

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

VARIACIÓN EN LA RESISTENCIA POR COMPRESIÓN Y TRANSFORMACIÓN



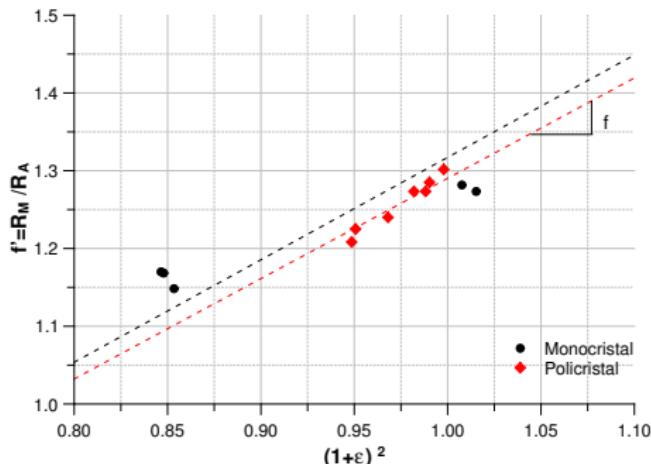
$$\rho_M = f \rho_A$$

$$R_M = f' R_A$$

$$R_M^0 = f R_A$$

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

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



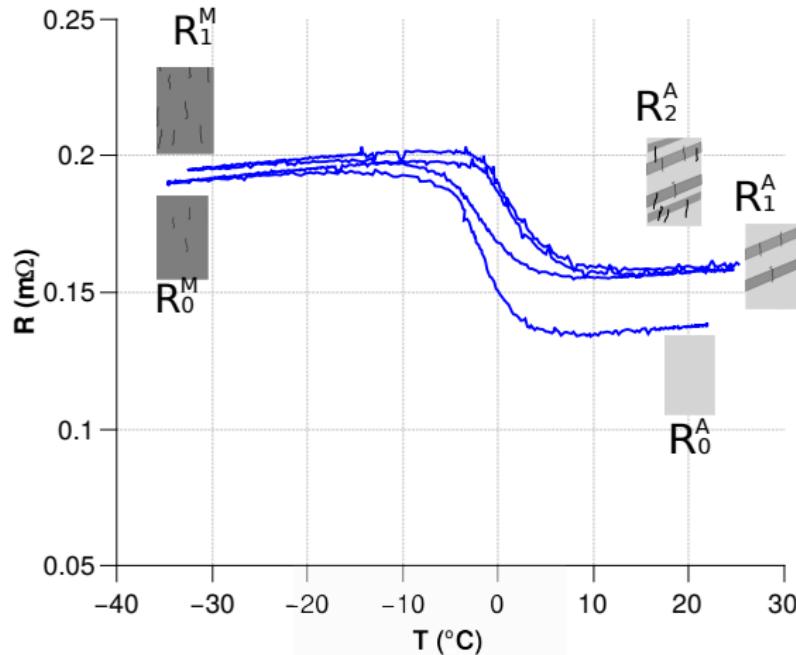
| Tensión (MPa) | ε (%) | $f' = \frac{R_M}{R_A}$ |
|---------------|-------------------|------------------------|
| 0 | 0.76 | 1.27 |
| 1.93 | 0.37 | 1.28 |
| 17.4 | -7.60 | 1.15 |
| 31.0 | -7.90 | 1.17 |
| 46.5 | -8.00 | 1.17 |
| Referencia | 8.00 | 1.73 |

Cuadro 1: Monocristal

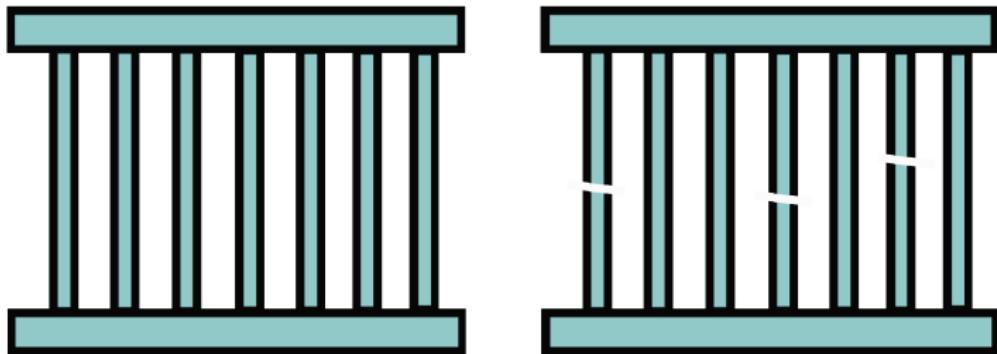
| Tensión (Mpa) | ε (%) | $f' = \frac{R_M}{R_A}$ |
|---------------|-------------------|------------------------|
| 0 | -0.10 | 1.30 |
| 0 | -0.60 | 1.27 |
| 0 | -0.50 | 1.28 |
| 2.04 | -0.90 | 1.27 |
| 18.4 | -1.60 | 1.24 |
| 32.7 | -2.60 | 1.21 |
| 49.1 | -2.50 | 1.23 |

Cuadro 2: Polycristal

MEDICIONES CON ESPONJA



ROTURA DE ESPONJAS



$$A_0$$

$$A_i = ?$$



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

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 :

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

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

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

RESULTADOS DE A_0/A Y b

EN VEZ DE LAS TABLAS VOY A PONER LOS DISTINTOS GRAFICOS DE LOS ENSAYOS PARA EXPLICAR MEJOR LA SECUENCIA DE LO QUE FUIMOS HACIENDO E INTERCALADO LOS VALORES DE b Y ROTURA.

| 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