

# **APÉNDICE**

## **A**

**Curvas de envejecido**

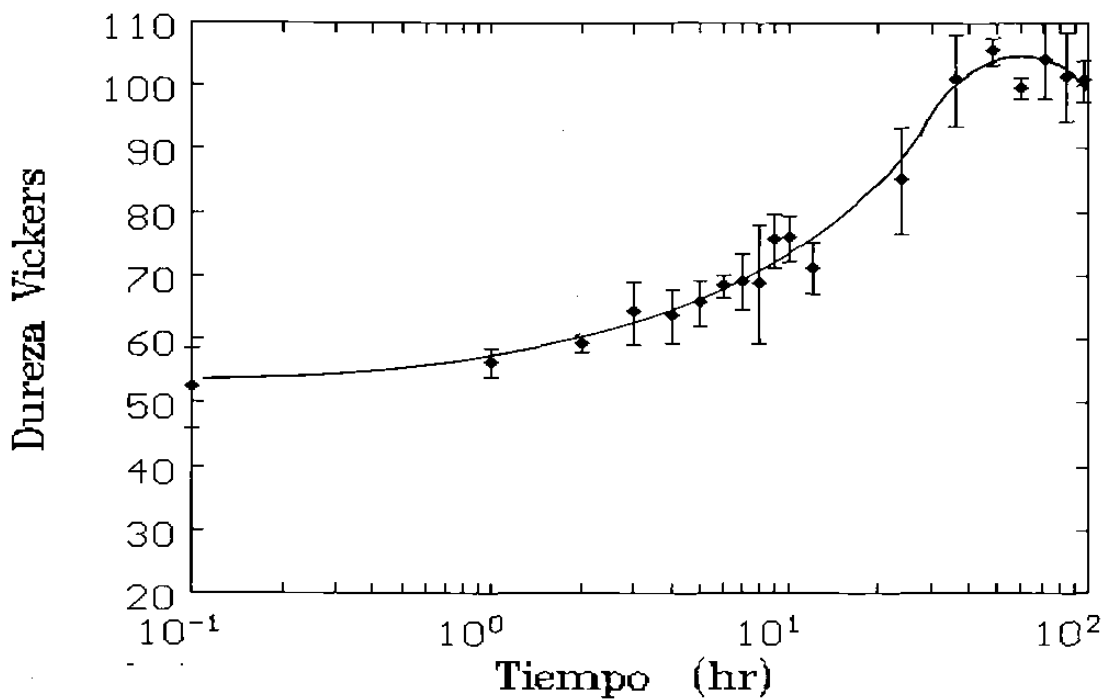


Figura A1.- Curva de envejecido para la muestra A a 130 °C.

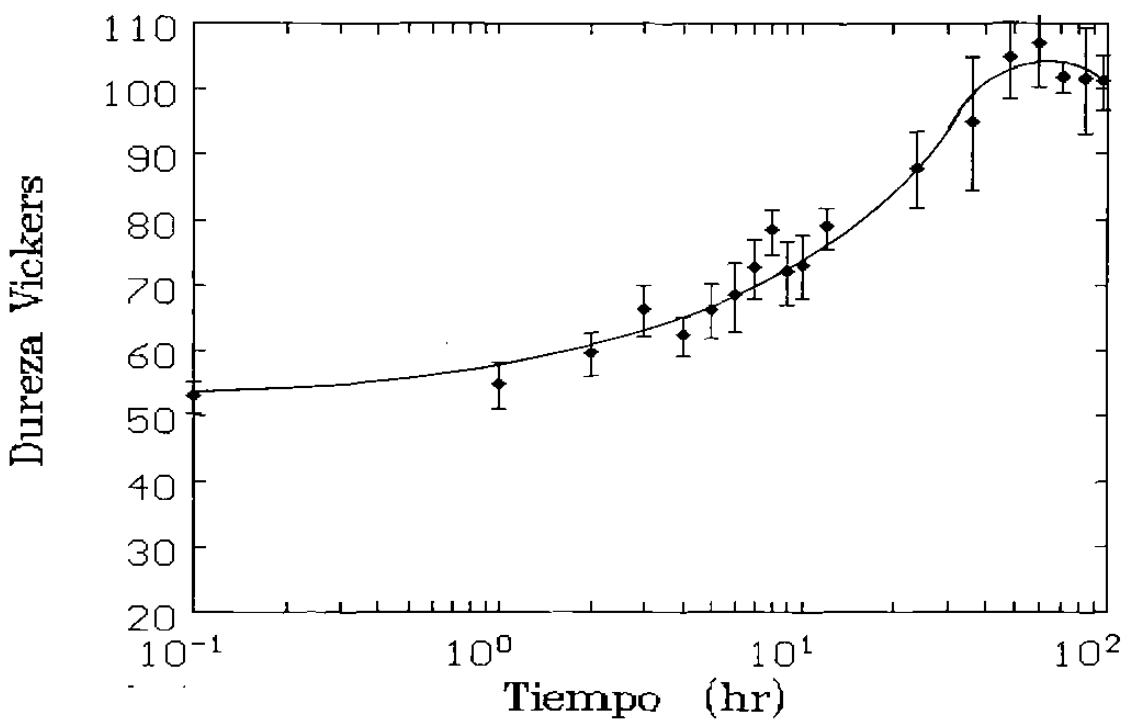


Figura A2.- Curva de envejecido para la muestra B a 130 °C.

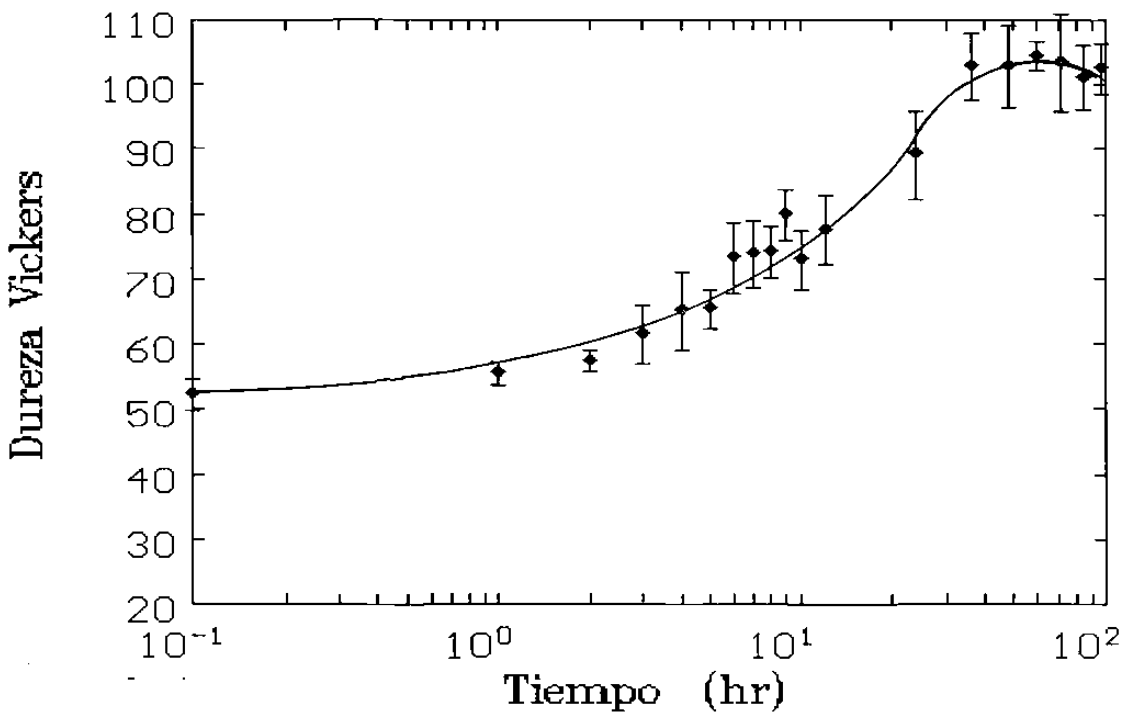


Figura A3.- Curva de envejecido para la muestra C a 130 °C.

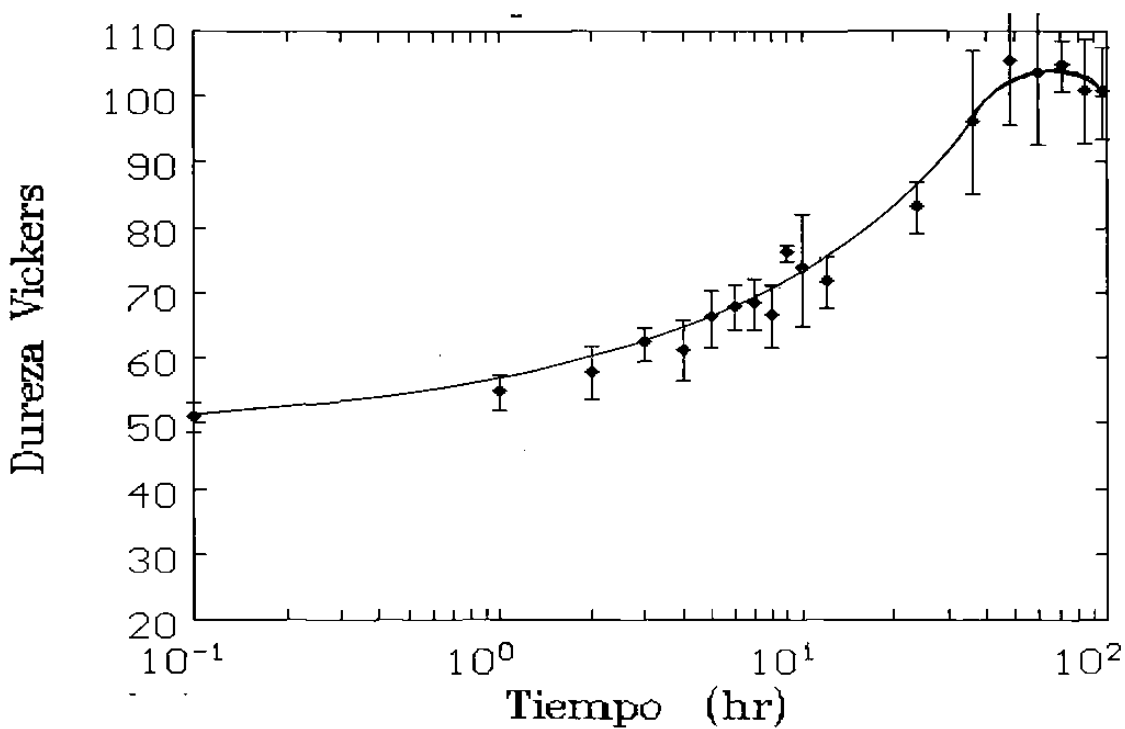


Figura A4.- Curva de envejecido para la muestra D a 130 °C.

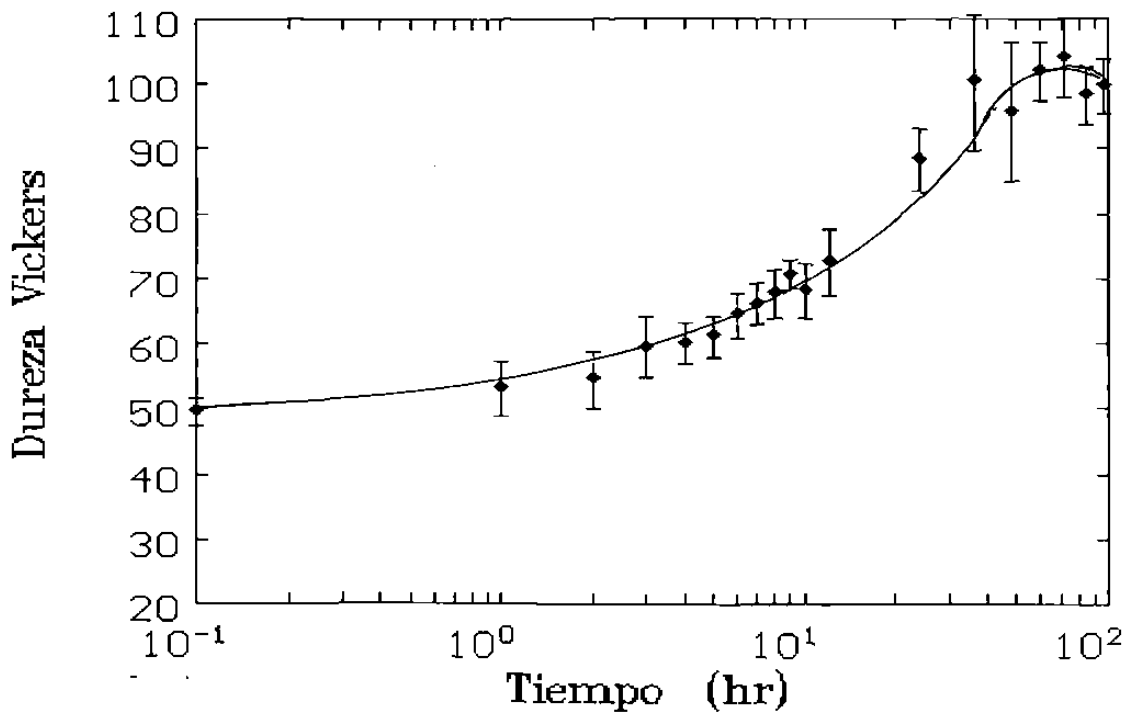


Figura A5.- Curva de envejecido para la muestra E a 130 °C.

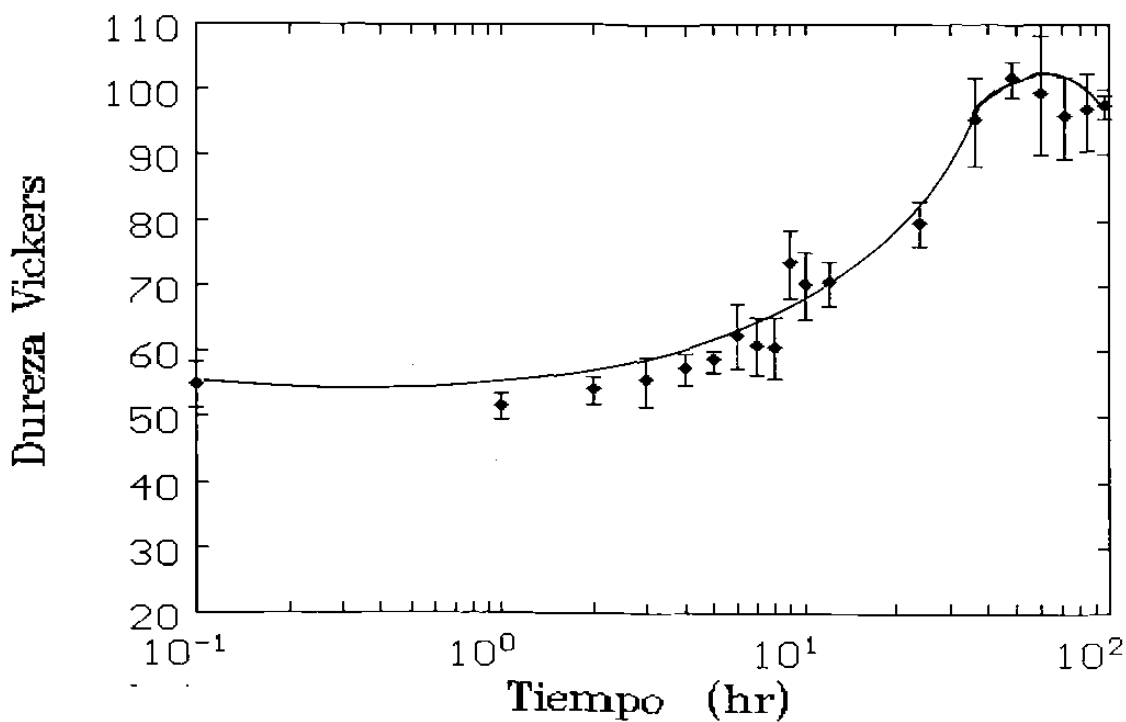


Figura A6.- Curva de envejecido para la muestra F a 130 °C.

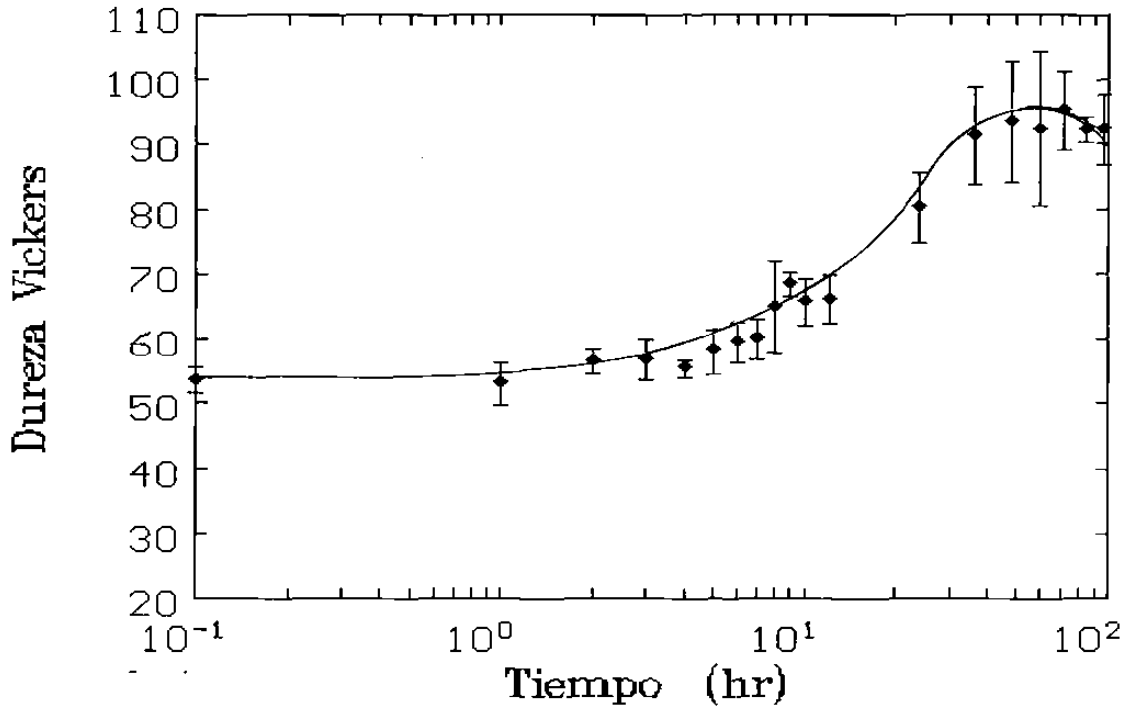


Figura A7.- Curva de envejecido para la muestra G a 130°C.

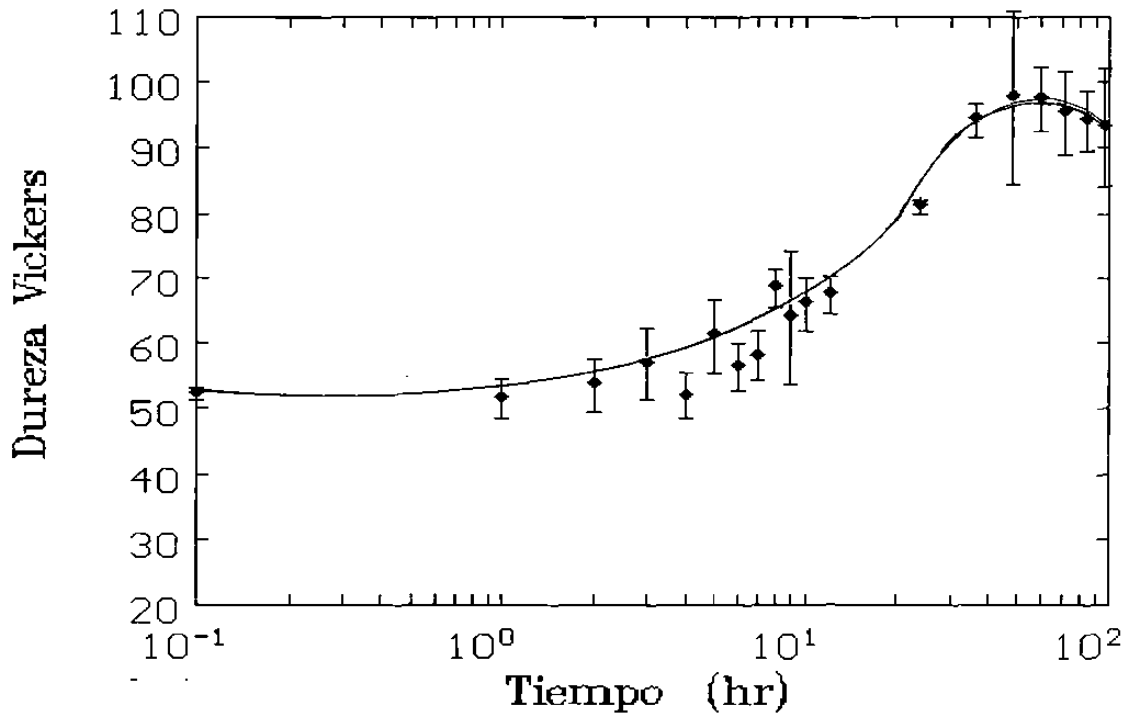


Figura A8.- Curva de envejecido para la muestra H a 130°C.

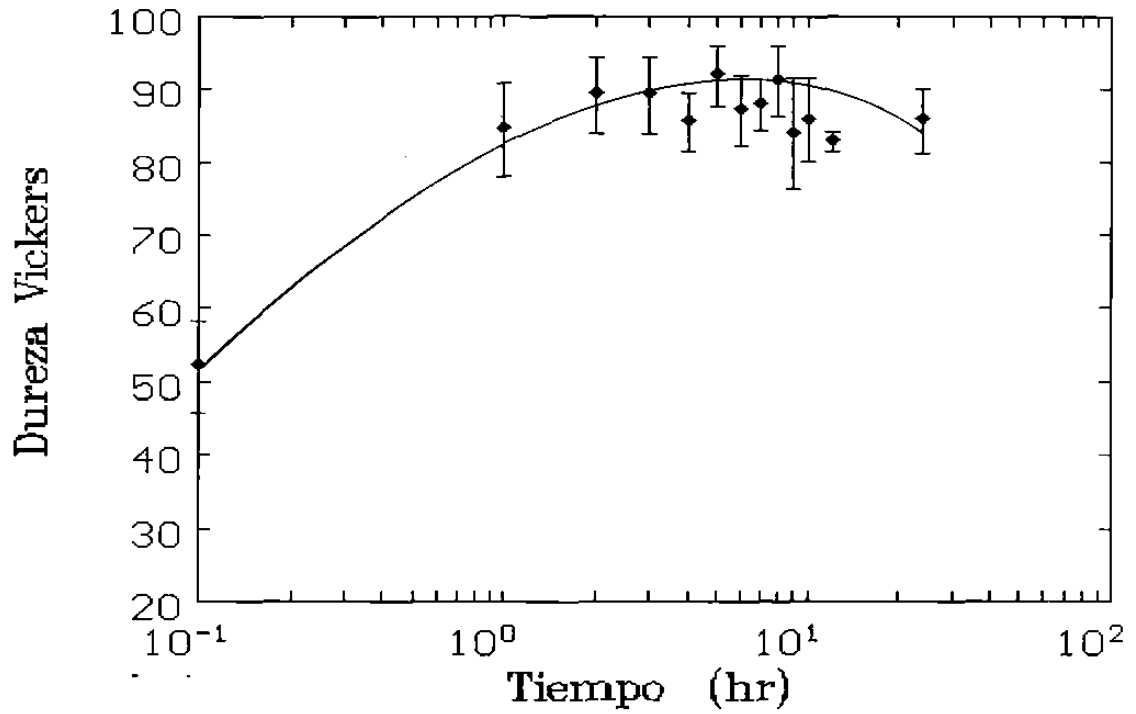


Figura A9.- Curva de envejecido para la muestra A a 180 °C.

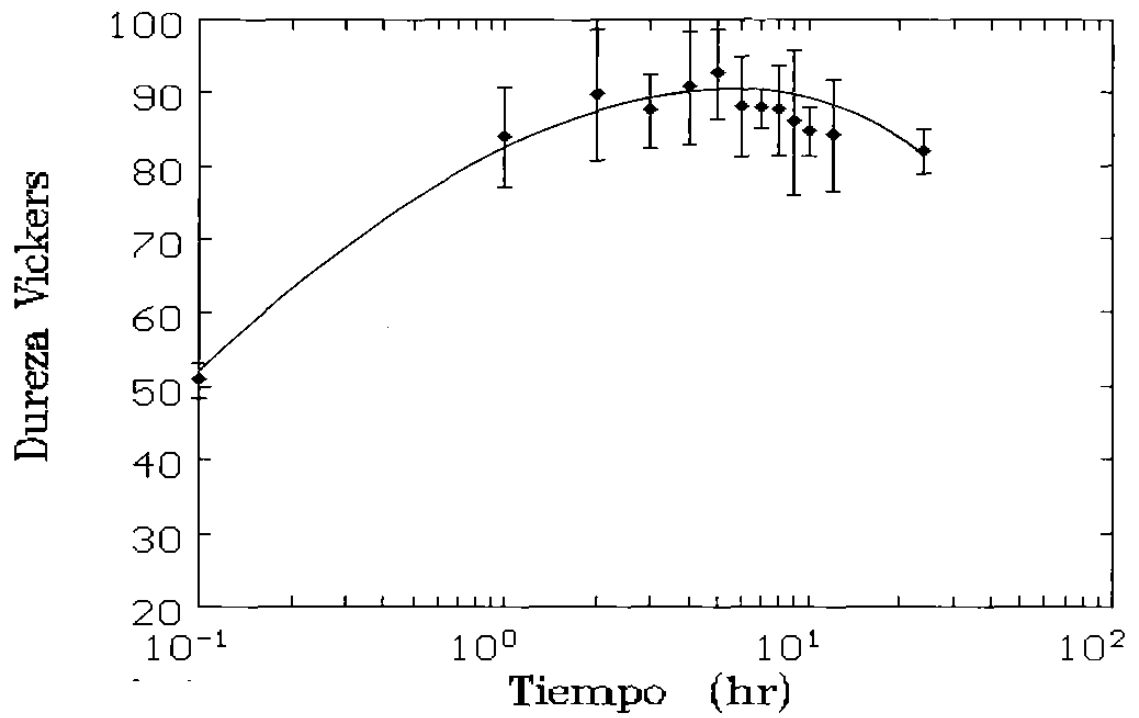


Figura A10.- Curva de envejecido para la muestra B a 180 °C.

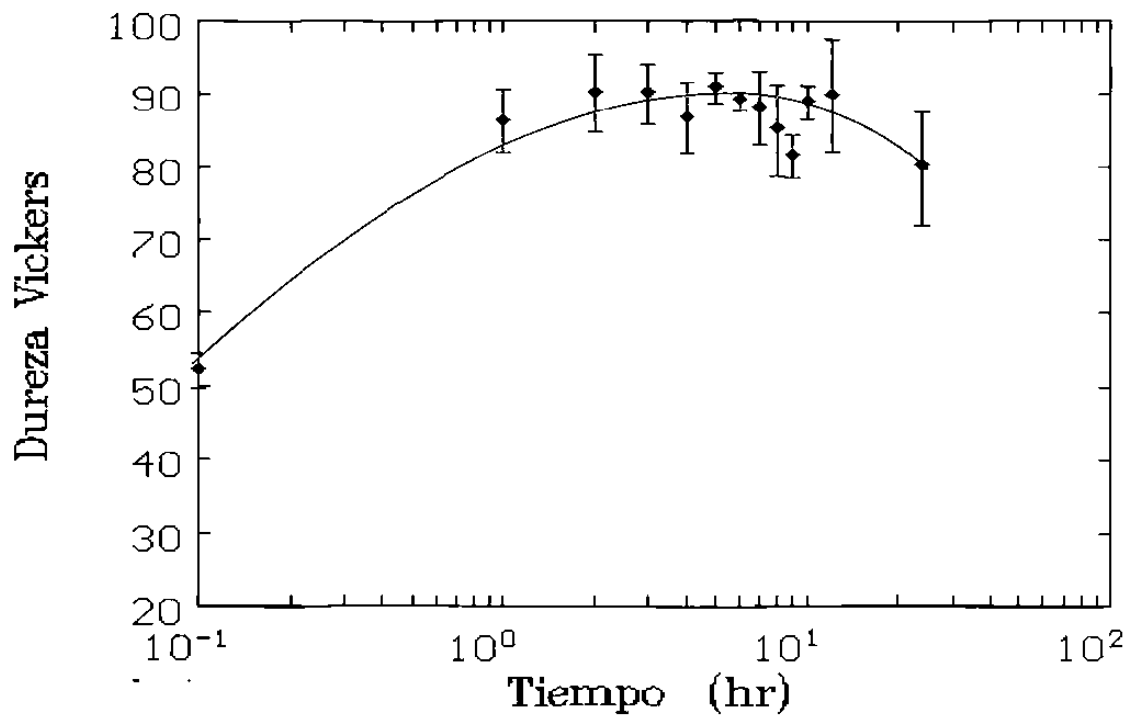


Figura A11.- Curva de envejecido para la muestra C a 180 °C.

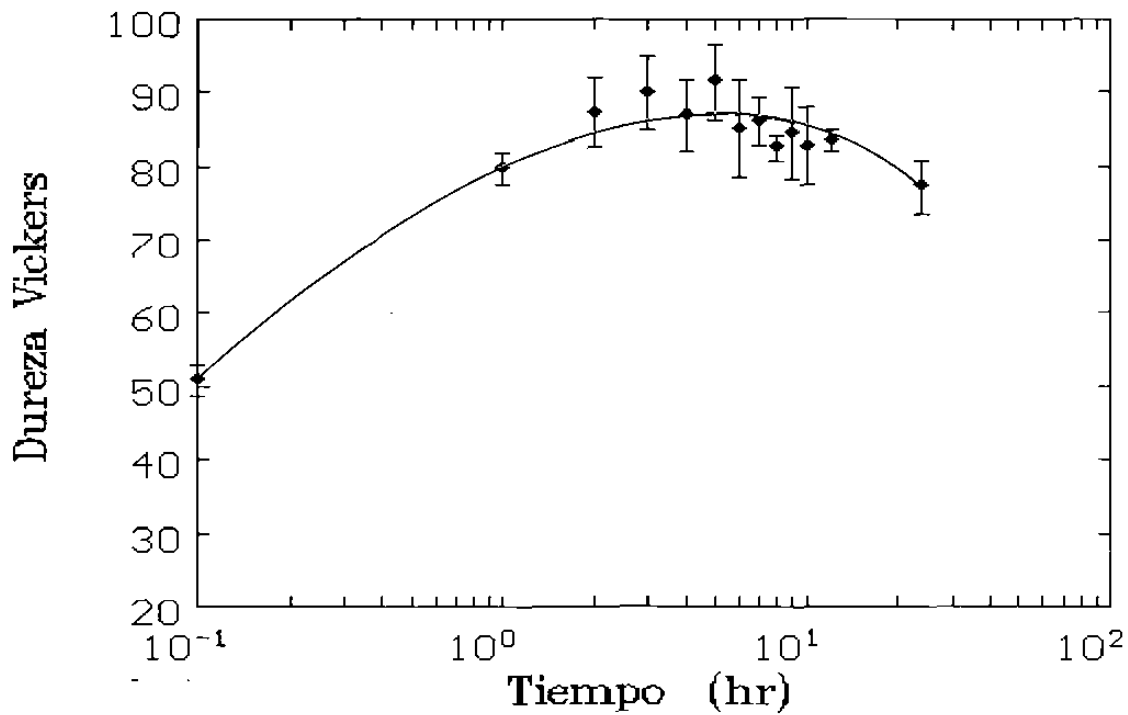


Figura A12.- Curva de envejecido para la muestra D a 180 °C.

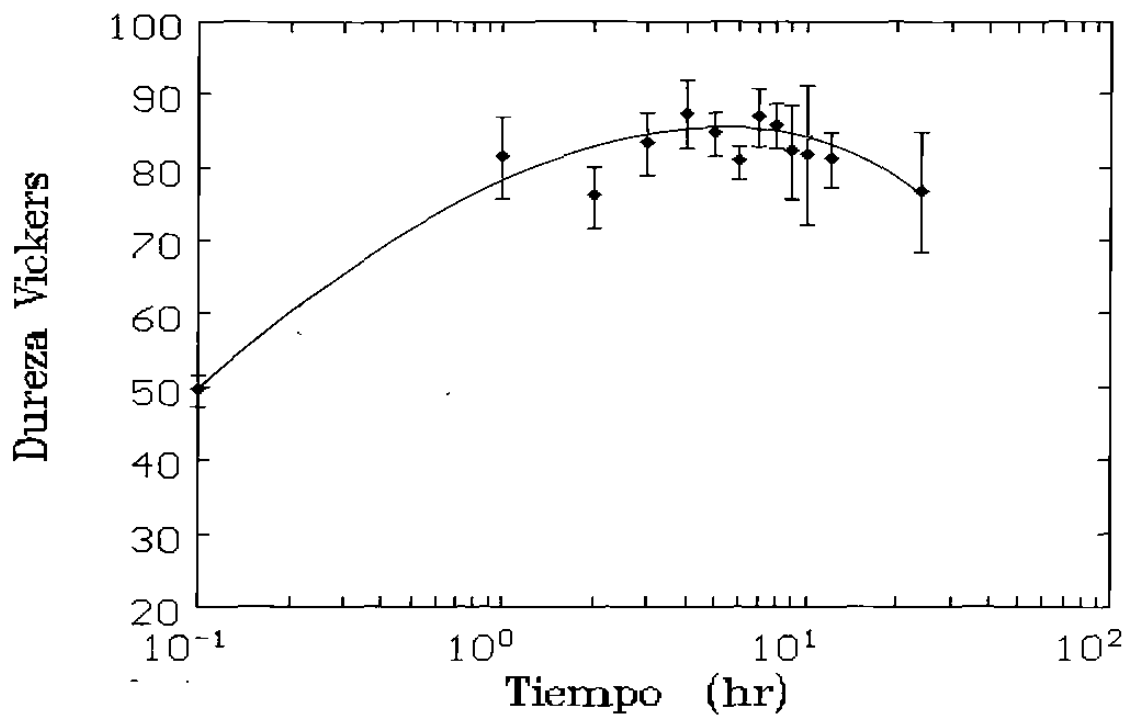


Figura A13.- Curva de envejecido para la muestra E a 180 °C.

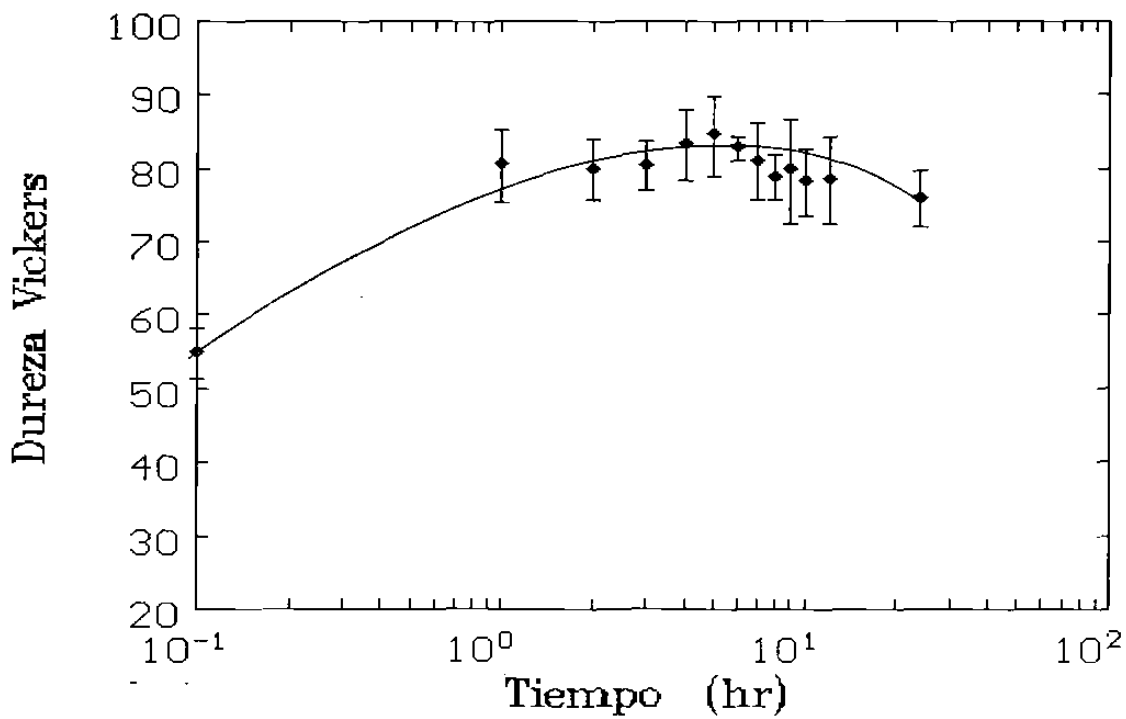


Figura A14.- Curva de envejecido para la muestra F a 180 °C.



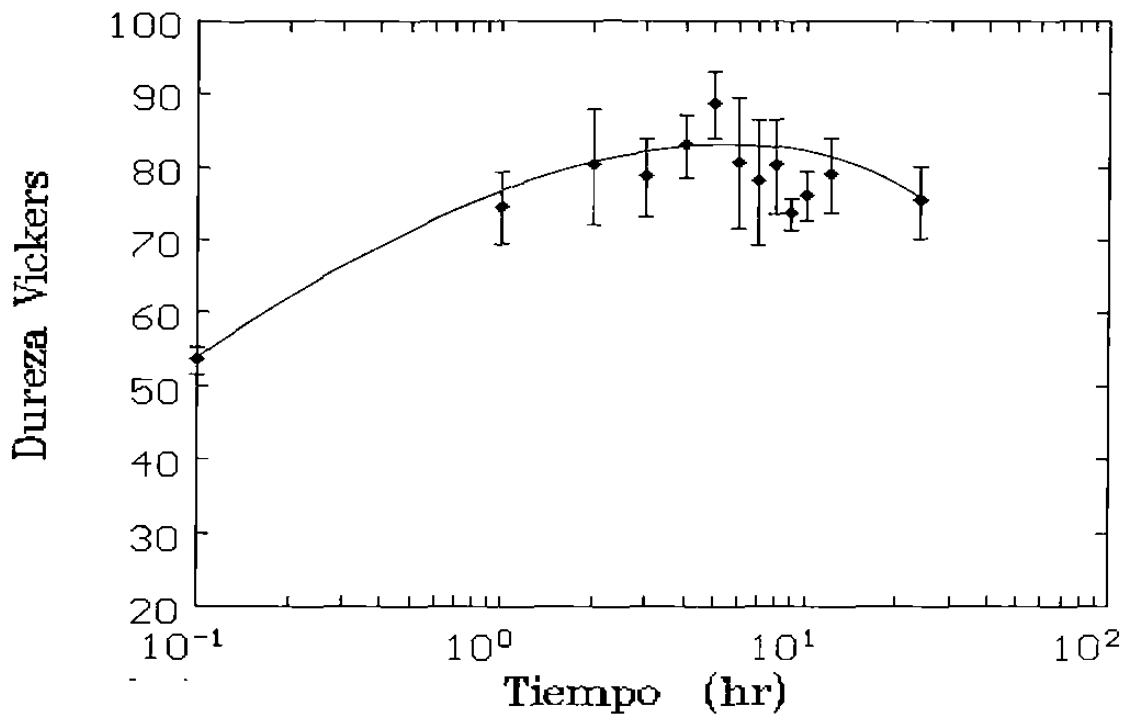


Figura A15.- Curva de envejecido para la muestra G a 180 °C.

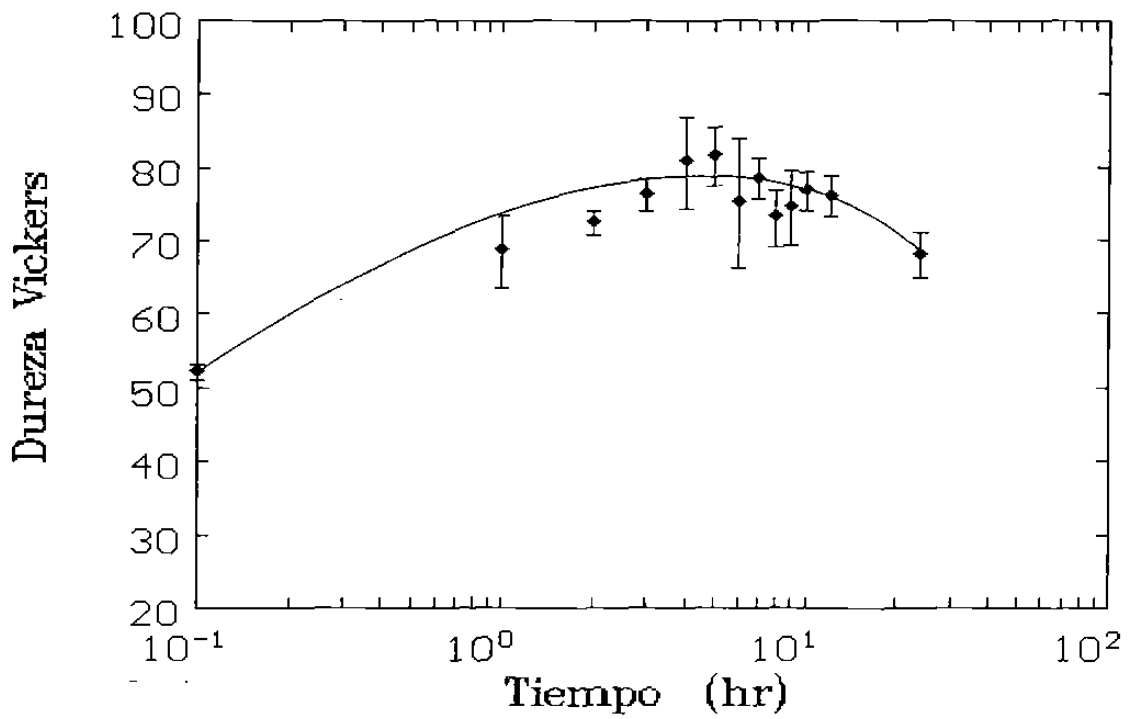


Figura A16.- Curva de envejecido para la muestra H a 180 °C.

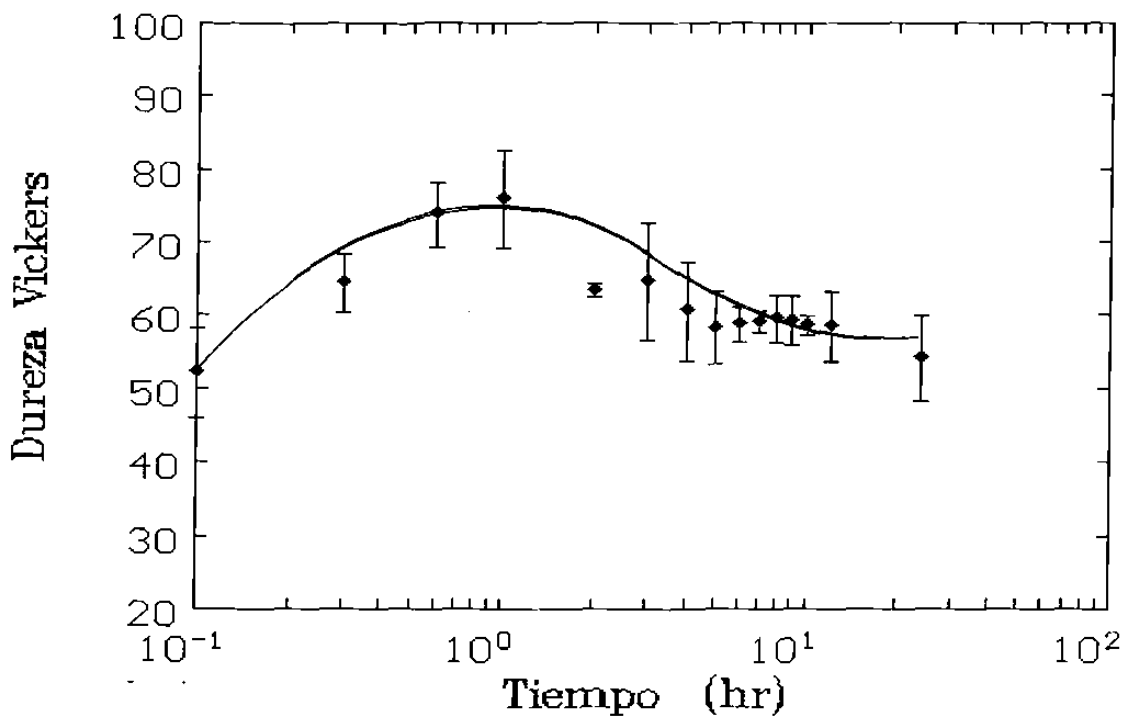


Figura A17.- Curva de envejecido para la muestra A a 230 °C.

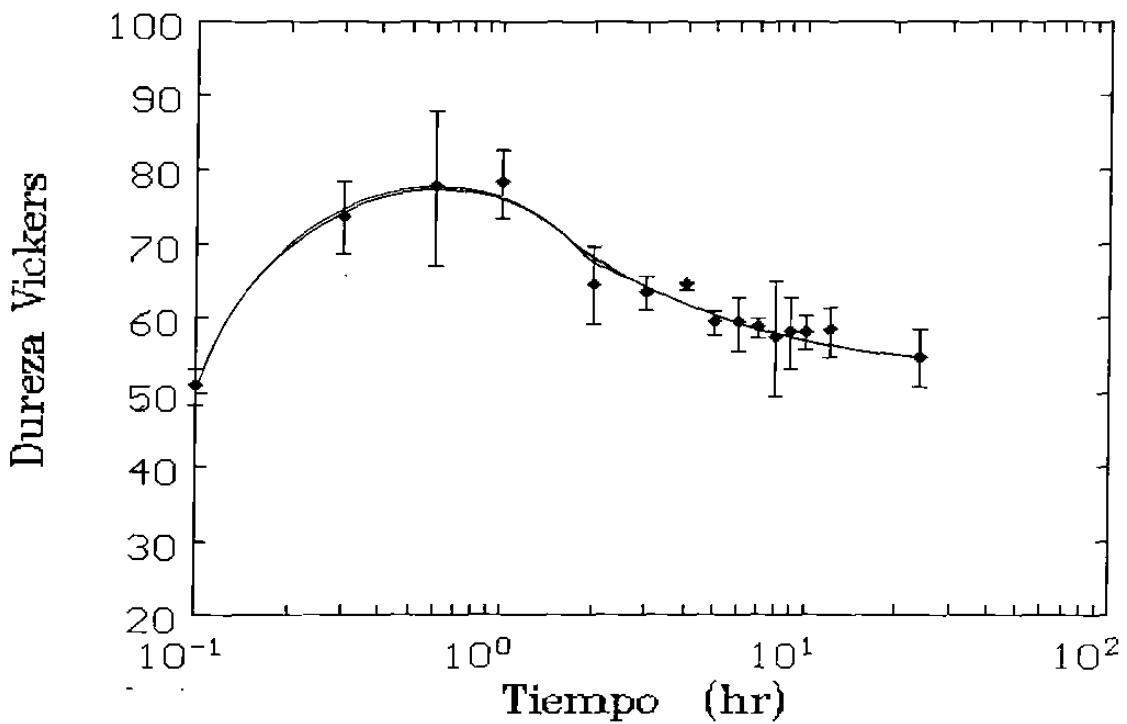


Figura A18.- Curva de envejecido para la muestra B a 230 °C.

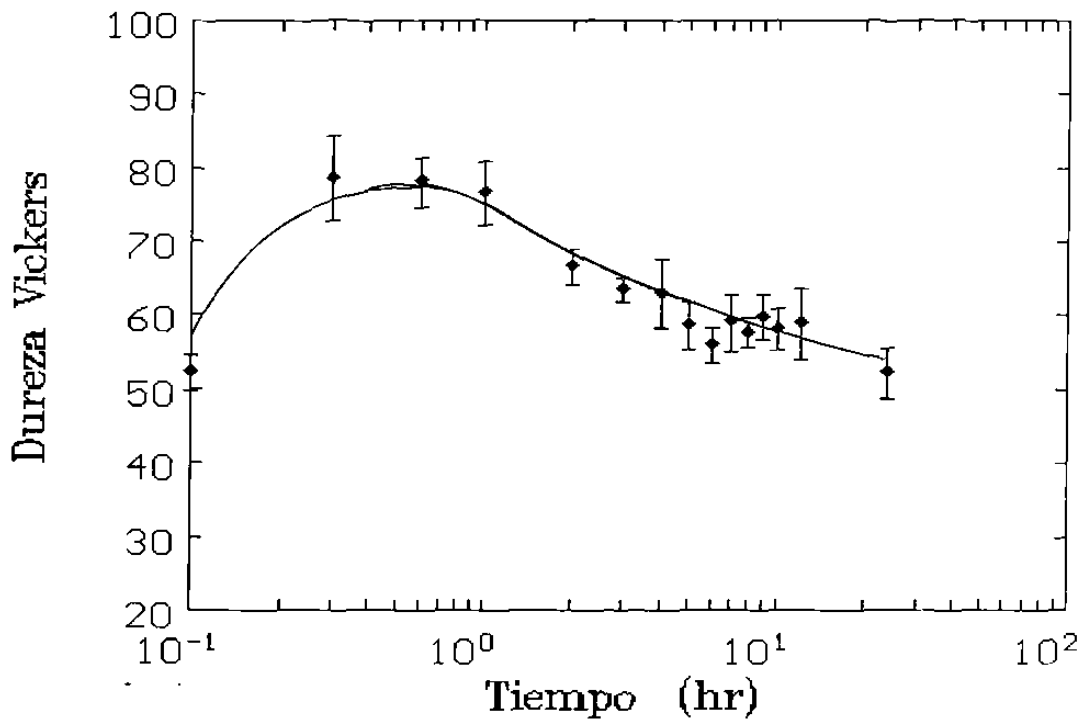


Figura A19.- Curva de envejecido para la muestra C a 230 °C.

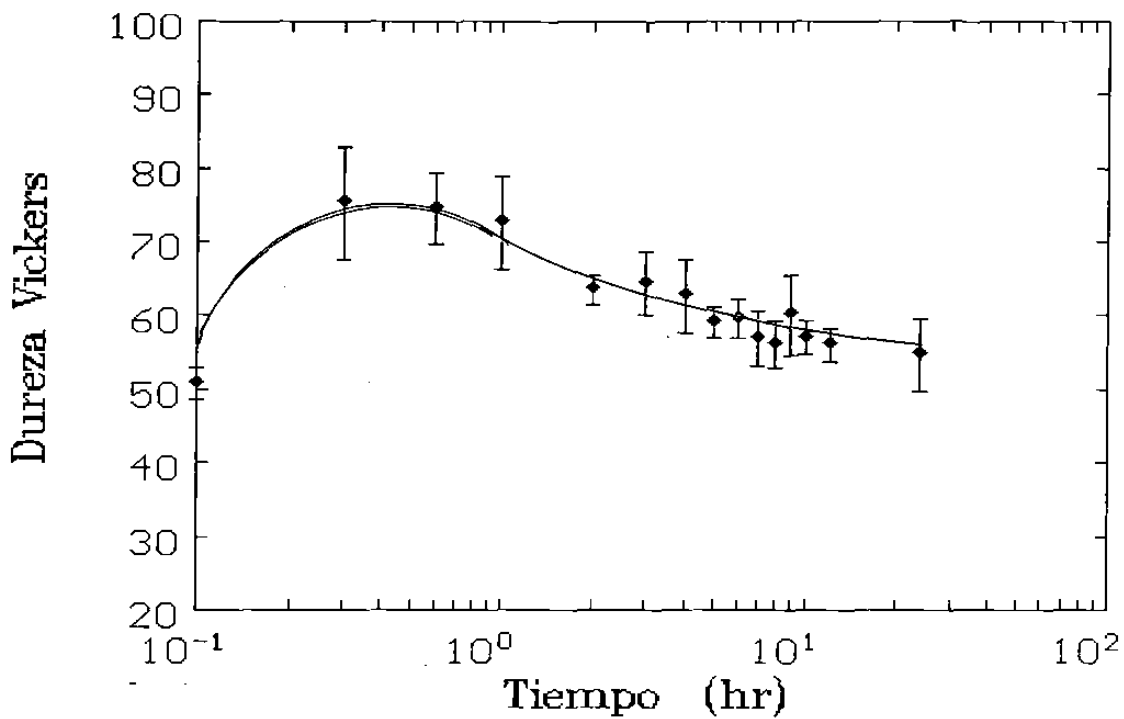


Figura A20.- Curva de envejecido para la muestra D a 230 °C.

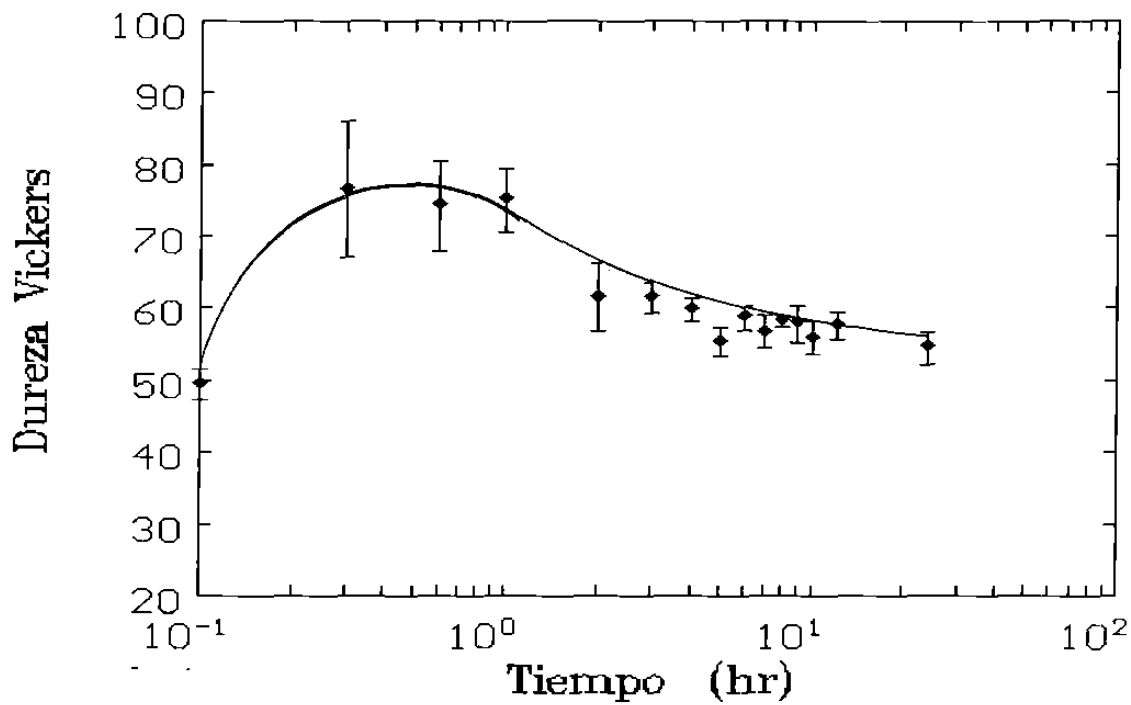


Figura A21.- Curva de envejecido para la muestra E a 230 °C.

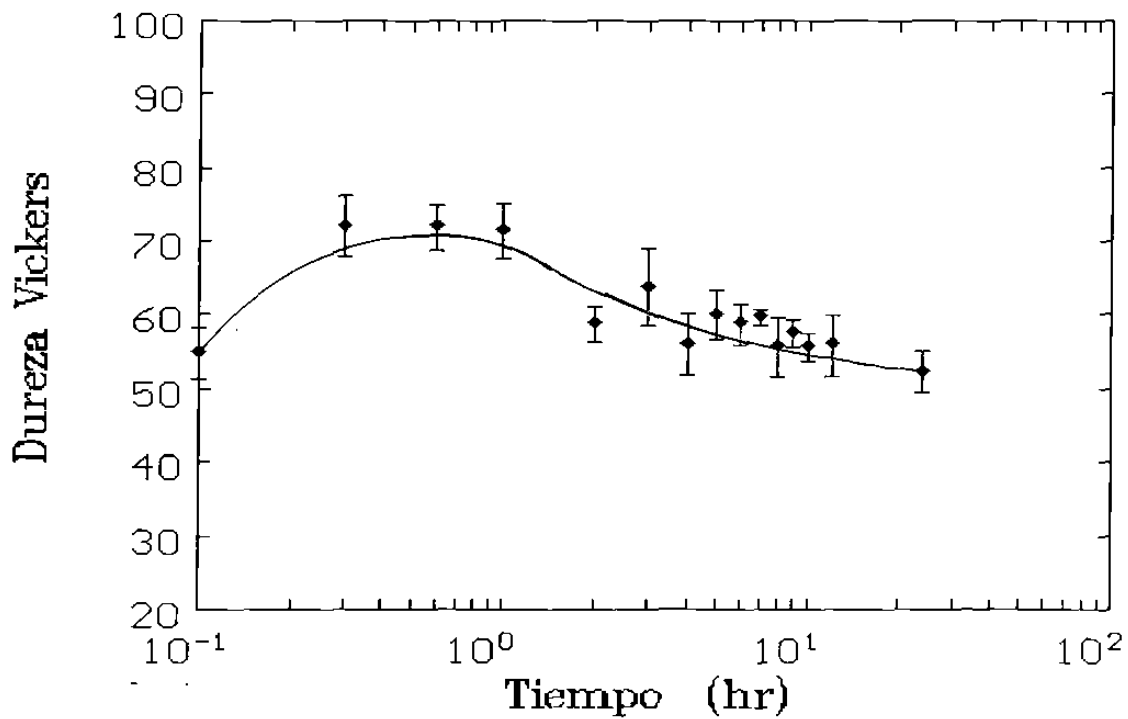


Figura A22.- Curva de envejecido para la muestra F a 230 °C.

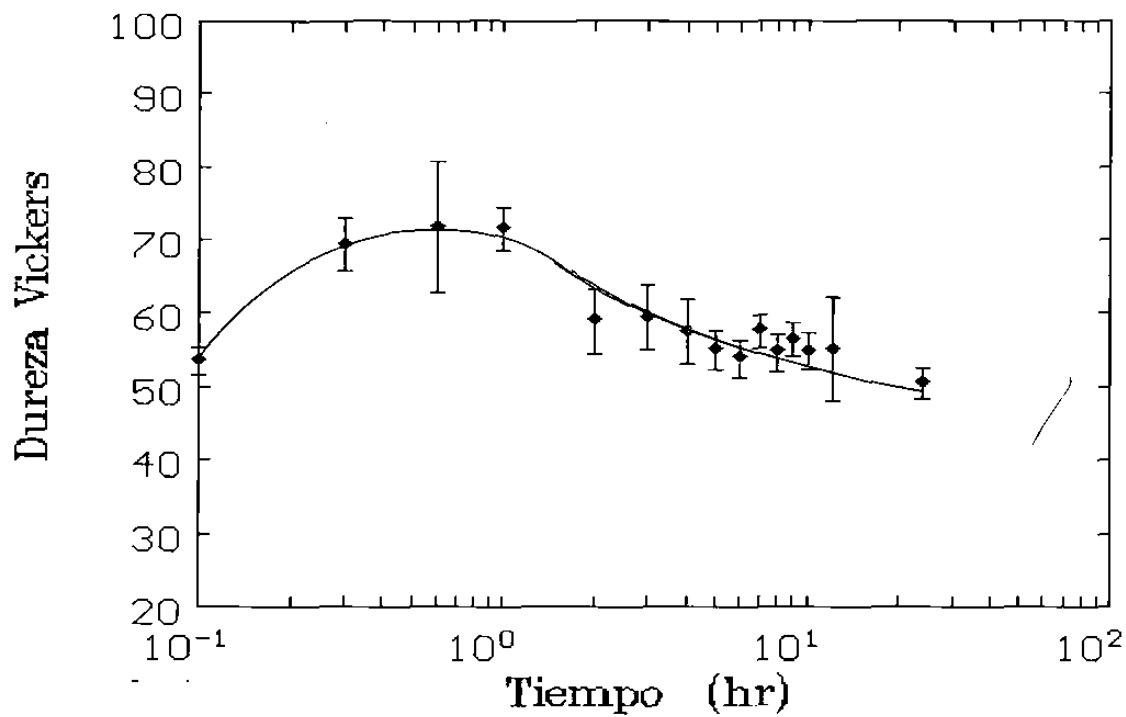


Figura A23.- Curva de envejecido para la muestra G a 230 °C.

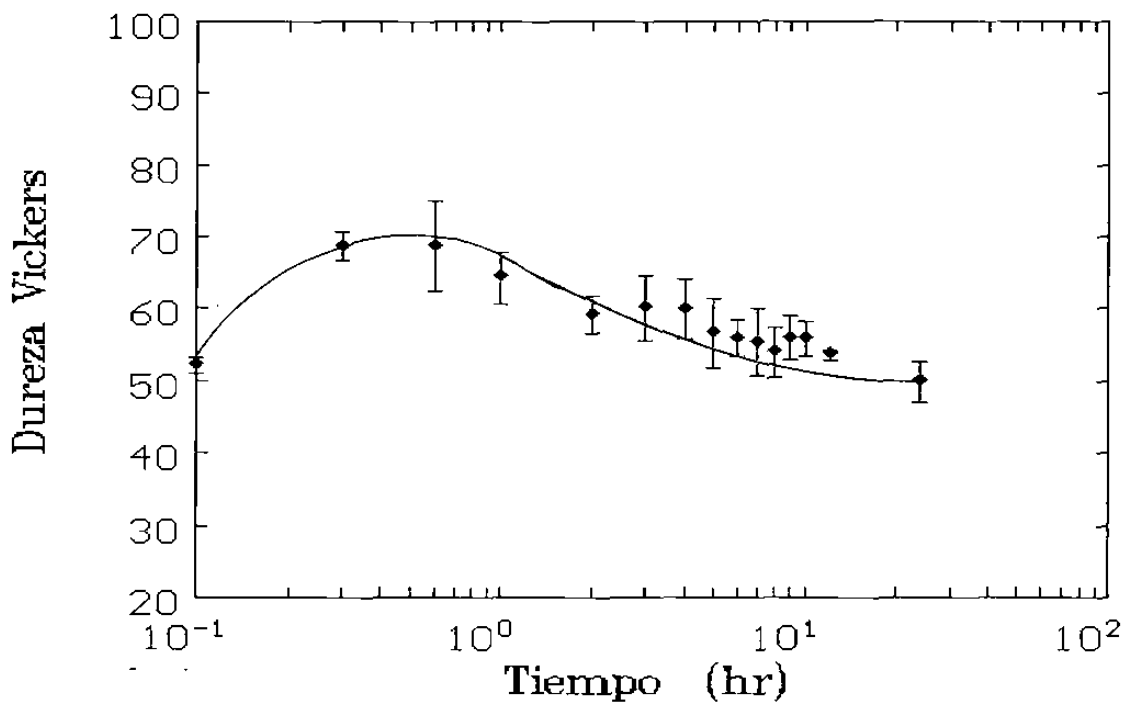


Figura A24.- Curva de envejecido para la muestra H a 230 °C.

# **APÉNDICE B**

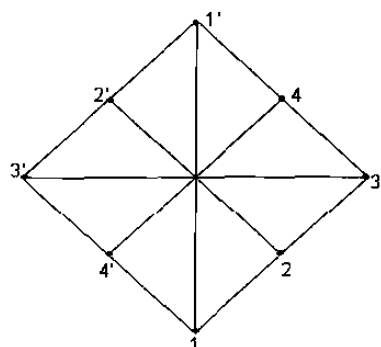
**Análisis de patrones de difracción**

Análisis B1.- Matriz de una muestra sobresaturada y enfrida lentamente ( $H_0$ ).

El patrón de difracción de la matriz se presenta en la Figura 5.19.

Las distancias se miden directamente de una pantalla conectada al MET.

De la micrografía electrónica de transmisión se obtuvieron directamente las siguientes distancias interplanares y ángulos entre ellas.



Distancias

$$d_1 = 1.42 \text{ \AA}$$

$$d_2 = 2.04 \text{ \AA}$$

$$d_3 = 1.43 \text{ \AA}$$

$$d_4 = 2.04 \text{ \AA}$$

Ángulos entre

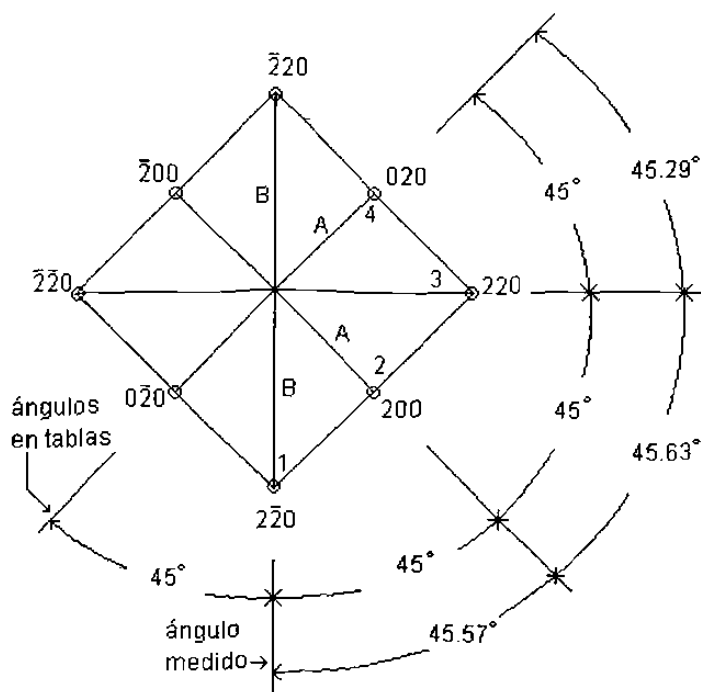
$$1 \text{ y } 2 = 45.57^\circ$$

$$2 \text{ y } 3 = 45.63^\circ$$

$$3 \text{ y } 4 = 45.29^\circ$$

Al comparar las distancias obtenidas con los de la (Ref 85) para el aluminio se encuentra:

distancia	distancia en referencia	Familia de planos h k L
$d_1 = 1.42$	(1.431)	(220)
$d_2 = 2.04$	(2.024)	(200)
$d_3 = 1.43$	(1.431)	(220)
$d_4 = 2.04$	(2.024)	(200)



Este patrón de difracción corresponde a la proyección de la estructura ccc con un eje de zona (001).

Los planos concuerdan tanto en las distancias como con el patrón de difracción referido.

Se calculan los ángulos entre planos para una estructura ccc

$$\cos \varphi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)}}$$

Sustituyendo Valores

	Ángulos del Patrón
$\varphi_{1-2}=45^\circ$	---- $45.57^\circ$
$\varphi_{2-3}=45^\circ$	---- $45.63^\circ$
$\varphi_{3-4}=45^\circ$	---- $45.29^\circ$

Se calcula el eje de zona

$$\begin{vmatrix} U & V & W \\ 2 & \bar{2} & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U & V & W \\ 0 & 0 & 4 \end{vmatrix} = [001]$$

Se compara con la red recíproca

$$\left. \begin{array}{l} (2\bar{2}0)(001) = 0 \\ (200)(001) = 0 \end{array} \right\} \text{Zona de Laüe de orden 1}$$

Se calcula el Parámetro de red.

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

$$a_n = d_n \sqrt{h_n^2 + k_n^2 + l_n^2}$$

$$a_1 = 4.0136 \text{ \AA}$$

$$a_2 = 4.08 \text{ \AA}$$

$$a_3 = 4.0446 \text{ \AA}$$

$$a_4 = 4.08 \text{ \AA}$$

$$a_{\bar{x}} = 4.055 \text{ i Promedio}$$

$$a_{\sigma_x} = 0.0267 \text{ i Desviación}$$

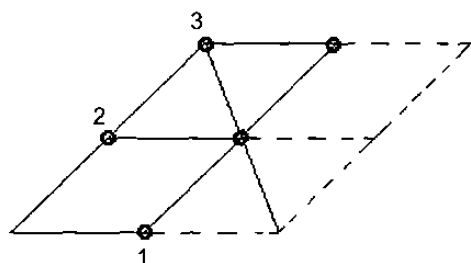
Conclusión: El patrón de difracción corresponde a una red cúbica de caras centradas, con un parámetro de red un poco mayor al convencional de aluminio (4.049Å) Referencia (86) lo que se debe de atribuir a los aleantes añadidos.



Análisis B2.- Precipitado en una muestra sobresaturada enfriada lentamente ( $H_0$ ).

El patrón de difracción es el mostrado en la Figura 5-20.

De la micrografía electrónica de transmisión se obtuvieron directamente las siguientes distancias interplanares y ángulos entre los puntos.



distancias  
 $d_1 = 1.22 \text{ \AA}$   
 $d_2 = 1.49 \text{ \AA}$   
 $d_3 = 1.22 \text{ \AA}$

Ángulos entre:  
 1 y 2 =  $65^\circ$   
 2 y 3 =  $67.13^\circ$

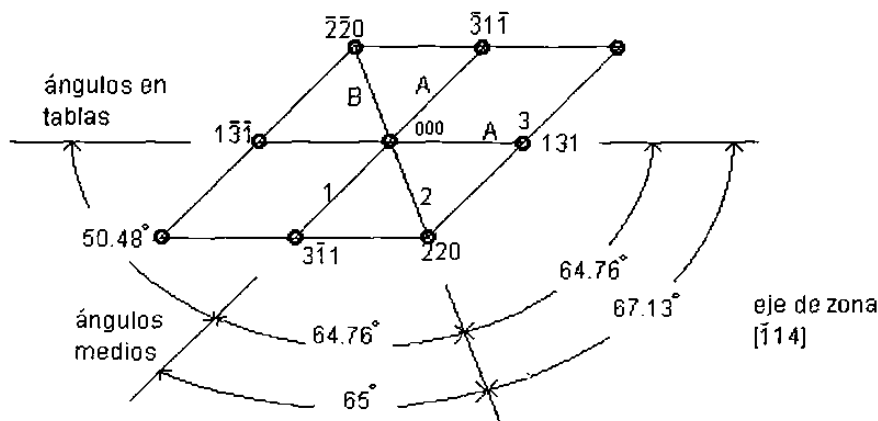
Al comparar las distancias obtenidas con los de la Referencia (85) para una red ccc se tiene:

distancia	Referencia	Familia de planos
$d_1 = 1.22 \text{ \AA}$	(1.221)	(113)
$d_2 = 1.49 \text{ \AA}$	(1.432)	(022)
$d_3 = 1.22 \text{ \AA}$	(1.221)	(022)

TABLAS

$$\frac{B}{A} = \frac{1.49}{1.22} = 1.22$$

1.73



Este patrón corresponde a la difracción de una estructura ccc con un eje de zona paralelo a la dirección  $[\bar{1}44]$ , Ref (85).

El Cálculo de los ángulos entre planos para la c.c.c.

$$\cos\varphi = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + l_1l_2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)}}$$

	obtenidos
$\varphi_{1-2}=64.76^\circ$	----- $65^\circ$
$\varphi_{2-3}=64.76^\circ$	----- $67.13^\circ$

Cálculo de eje de Zona

$$\begin{vmatrix} U & V & W \\ 3 & \bar{1} & 1 \\ 2 & 2 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U & V & W \\ \bar{2} & 2 & 8 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U & V & W \\ \bar{1} & 1 & 4 \end{vmatrix} \quad \text{eje de zona}$$

Se compara con el recíproco

$$\begin{aligned} (3 \bar{1} 1)(\bar{1} 1 4) &= \phi \\ (2 2 0)(\bar{1} 1 4) &= \phi \end{aligned} \quad \text{Zona de Laue de orden 1}$$

Cálculo del parámetro de la red.

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \qquad a_n = d_n \sqrt{h_n^2 + k_n^2 + l_n^2}$$

$$a_1 = 4.046 \text{ \AA}$$

$$a_2 = 4.214 \text{ \AA}$$

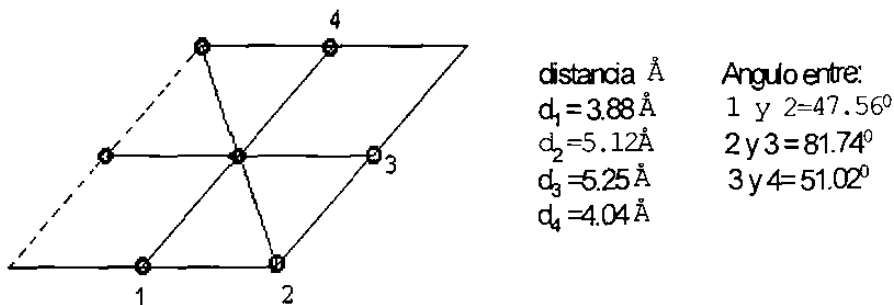
$$a_3 = 4.046 \text{ \AA}$$

Conclusión: El patrón de difracción corresponde a una estructura c.c.c con una ligera distorsión a lo largo de el plano (220), lo que se puede de atribuir a la formación incipiente de zonas GP, que son coherentes con los planos (220) Referencia (85).

Análisis B3.- Precipitado en una muestra con máxima dureza (B<sub>7</sub>).

El patrón de difracción es el mostrado en la Figura 5-22.

De la micrografía electrónica de transmisión se obtuvieron directamente las siguientes distancias interplanares y ángulos entre los puntos.

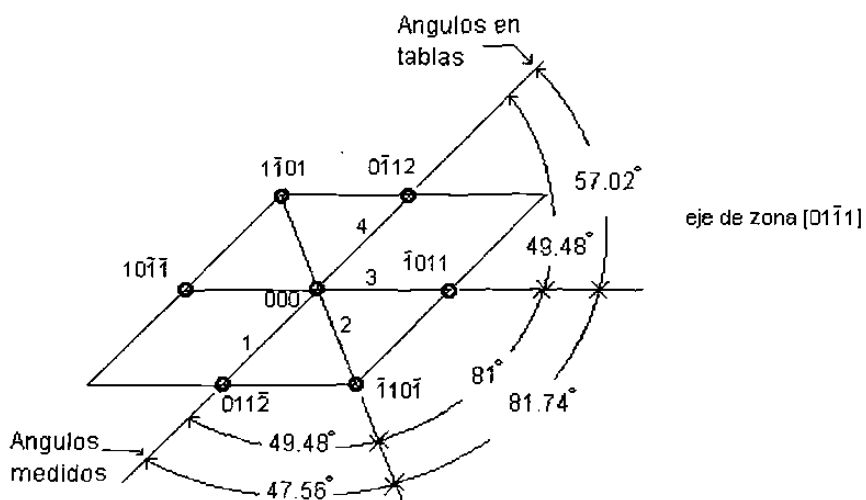


Mismo que se compara favorablemente con el patrón de una estructura hexagonal (Fig A4.4-f)(Ref 1)

Patrón

$$\frac{A}{B} = \frac{5.12}{3.88} = 1.314 \quad \text{ó} \quad \frac{5.25}{4.04} = 1.299 \quad \frac{A}{B} = 1.299$$

Se tiene el patrón de difracción.



Razón entre parámetro de red para Mg<sub>2</sub>Si (estructura hexagonal)

$$\frac{c}{a} = 1.7407 \quad (\text{Ref 1})$$

con esta relación y los índices de planos y fórmulas se puede comprobar los ángulos entre planos.

$$\cos\varphi = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + \frac{1}{2}(h_1k_2 - k_1h_2) + \frac{3}{4}\frac{a^2}{c^2}l_1l_2}{\sqrt{\left[ \left( h_1^2 + k_1^2 + h_1k_1 + \frac{3}{4}\frac{a^2}{c^2}l_1^2 \right) \left( h_2^2 + k_2^2 + h_2k_2 + \frac{3}{4}\frac{a^2}{c^2}l_2^2 \right) \right]}}$$

Fórmula	Medido
$\varphi_{12} = 50.0^0$	----- 51.02 <sup>0</sup>
$\varphi_{23} = 80.0^0$	----- 81.74 <sup>0</sup>
$\varphi_{34} = 50.0^0$	----- 47.56 <sup>0</sup>

Lo que indica que el patrón y la relación c/a es correcta.

Para obtener los parámetros de red se usa la relación c/a y las distancias y la fórmula siguiente.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3a^2}(h^2 + hk + k^2) + \frac{1}{c^2}l^2$$

$$c/a = 1.74$$

$a_1 = 6.3186 \text{ \AA}$	$c_1 = 10.9987 \text{ \AA}$
$a_2 = 6.6026 \text{ \AA}$	$c_2 = 11.4932 \text{ \AA}$
$a_3 = 6.77026 \text{ \AA}$	$c_3 = 11.785 \text{ \AA}$
$a_4 = 6.5791 \text{ \AA}$	$c_4 = 11.4523 \text{ \AA}$

$a_{\bar{x}} = 6.5676 \text{ \AA}$	$C_{\bar{x}} = 11.4323 \text{ \AA}$
$a_{\sigma_{\bar{x}}} = 0.161 \text{ \AA}$	$C_{\sigma_{\bar{x}}} = 0.2813 \text{ \AA}$

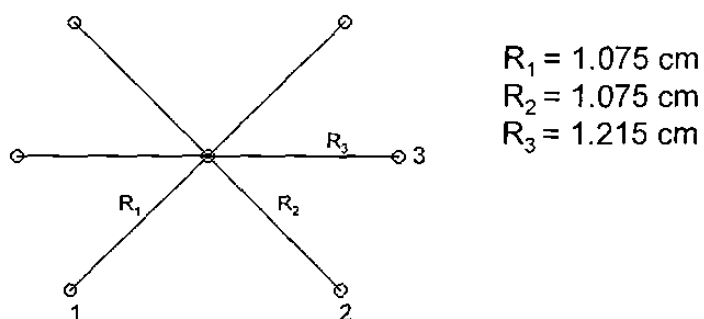
Conclusión: Estructura típica de un precipitado de Mg<sub>2</sub>Si en estado semicoherente β' (hexagonal).

Los parámetros representados para el Mg<sub>2</sub>Si con c=7.04 Å y a = 4.04 Å, los obtenidos son mayores posiblemente por el exceso de silicio y no haber llegado el precipitado a alcanzar su estabilidad.

#### Análisis B4.- Matriz de una muestra sobreenviejecida (H-24)

El patrón de difracción de la matriz se presenta en la Figura 5.27

En este caso las distancias se tomaron de la fotografía del patrón de difracción.

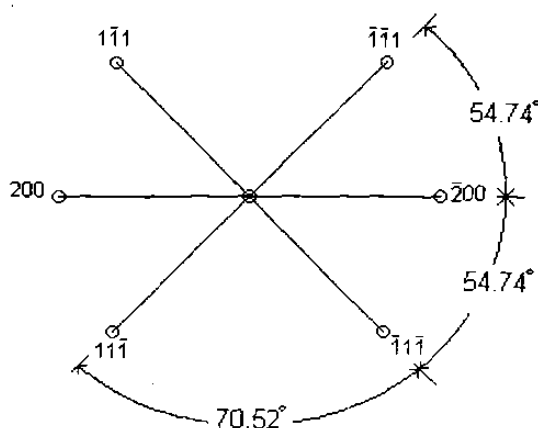


Se tomó una longitud de cámara de 100 cm y 200 Kv y se convierten las distancias en cm de la fotografía a Å.

$$R = \frac{D}{2} \qquad \frac{Dd}{2} = L\lambda \qquad d_n = \frac{\lambda L}{D/2} = \frac{(0.026)(100)}{R_n}$$

Distancia Å	Distancias en tablas Å	Familia de planos
$d_1=2.512$	2.338	(111)
$d_2=2.512$	2.338	(111)
$d_3=2.190$	2.025	(002)

El patrón de difracción



$$\begin{array}{c} \text{Eje de zona} \\ \left| \begin{array}{ccc} U & V & W \\ \bar{1} & 1 & \bar{1} \\ \bar{2} & 0 & 0 \end{array} \right| = \begin{array}{ccc} U & V & W \\ 0 & 2 & 2 \end{array} = [011] \end{array}$$

Se compara con la recíproca

$$\left. \begin{array}{l} (\bar{1}1\bar{1})(011) = 0 \\ (\bar{2}00)(011) = 0 \end{array} \right\} \text{Zona de Laue de grado 1}$$

El patrón coincide con las distancias de una estructura ccc(85)

Se calculan los ángulos entre planos (para ccc)

$$\cos\varphi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{(h_1^2 + h_2^2 + h_3^2)(k_1^2 + k_2^2 + l_2^2)}}$$

Sustituyendo valores

$$\begin{array}{l} \varphi_{1-2} = 70.52^\circ \\ \varphi_{2-3} = 54.74^\circ \end{array}$$

Estos ángulos corresponden al patrón de difracción de la zona [011],  
(ref 85).

$$\text{Dis}_{1-2} = 12.2 \text{ mm}$$

$$\text{Dis}_{2-3} = 10.98 \text{ mm.}$$

Relacionando los triángulos de  $R_1 - R_2 - \text{Dis}_{1-2}$ ,  $R_2 - R_3 - \text{Dis}_{2-3}$  y utilizando la ley de los Cosenos y la ley de los Senos se obtienen los ángulos.

$$\begin{array}{l} \varphi_{1-2} = 73.88^\circ \\ \varphi_{2-3} = 53.06^\circ \end{array}$$

Los ángulos de la red y el patrón coinciden.

Se calcula el parámetro de la Red.

$$a_n = d_n \sqrt{h_n^2 + k_n^2 + l_n^2}$$

$$a_1 = 4.35 \text{ \AA}$$

$$a_2 = 4.35 \text{ \AA}$$

$$a_3 = 4.38 \text{ \AA}$$

Conclusión: El patrón de difracción corresponde a una red cúbica de caras centradas, pero el parámetro de red no coincide con el del Aluminio por lo que se presume que la longitud de cámara tomada no es la correcta.

Para comprobar esta descalibración se hace el análisis sobre otra muestra similar.

Para saber cual es la longitud de cámara correcta se despeja de la fórmula usando la  $d$  del patrón y la  $R$  de la fotografía.

$$L\lambda = \frac{D}{2}d \qquad L = \frac{Rd}{\lambda} \qquad L_1 = \frac{1.035(2.338)}{(0.026)}$$

$$L_1 = 93.07 \text{ cm}$$

$$L_3 = 94.63 \text{ cm}$$

$$L_2 = 93.07 \text{ cm}$$

$$L_{\text{prom}} = 93.59 \text{ cm.}$$

Con  $L = 93.59 \text{ cm}$  se obtienen las distancias

$$d_1 = 2.351 \text{ \AA}$$

$$d_2 = 2.351 \text{ \AA}$$

$$d_3 = 2.351 \text{ \AA}$$

Se calculan los parámetros de red.

$$a_1 = 4.072 \text{ \AA}$$

$$a_3 = 4.006 \text{ \AA}$$

$$\bar{a}_x = 4.05 \text{ \AA}$$

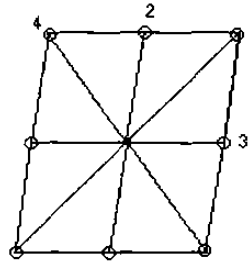
$$a_2 = 4.072 \text{ \AA}$$

$$a_{\sigma_{in}} = 0.031 \text{ \AA}$$

Estos parámetros son más cercanos a los del aluminio ( $a = 4.049 \text{ \AA}$ ) pero difieren un poco, debido a que existen elementos aleantes en solución sólida que distorsionan la red.

Análisis B5.- Matriz de una muestra sobresaturada enfriada rápidamente (A<sub>0</sub>).

El patrón de difracción de la matriz se presenta en la figura 5.26. En este caso se tomaron distancias a partir de la fotografía del patrón de difracción.



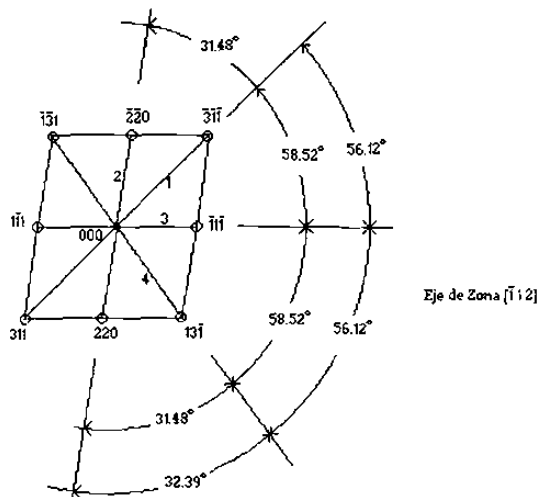
- R<sub>1</sub>= 1.982 cm
- R<sub>2</sub>= 1.679 cm
- R<sub>3</sub>= 1.035 cm
- R<sub>4</sub>= 1.982 cm

La longitud de cámara se tomó ahora como L = 93.07 cm, por lo tanto se convierten las distancias a 200 Kv.

$$R = \frac{D}{2} \quad \frac{Dd}{2} = \lambda L \quad d_n = \frac{\lambda}{\frac{D_n}{2}} L = \frac{L\lambda}{R_n} = \frac{(0.026)(93.07)}{R_n}$$

Distancia Å	Distancias Ref (85) Å	Familia de Planos
d <sub>1</sub> =1.2209	1.221	(1 1 3)
d <sub>2</sub> =1.441	1.432	(0 2 2)
d <sub>3</sub> =2.3357	2.338	(1 1 1)
d <sub>4</sub> =1.2209	1.221	(1 1 3)

Con las distancias de la referencia (85) que coinciden con el AL y el patrón de difracción de la figura A4.1 - e, se tiene





$$\begin{vmatrix} U & V & W \\ \bar{3} & \bar{1} & \bar{1} \\ \bar{2} & \bar{2} & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U & V & W \\ \bar{2} & 2 & 4 \end{vmatrix} = (\bar{1}12)$$

Se compara con la recíproca

$$\left. \begin{array}{l} (\bar{2}\bar{2}0)(\bar{1}12) = 0 \\ (\bar{3}\bar{1}\bar{1})(\bar{1}12) = 0 \end{array} \right\} \text{Zona de Laue de orden 1}$$

Con las distancias entre los puntos 1-2 y 2-3 se obtienen los ángulos por medio de la ley de los cosenos y senos.

$$\begin{array}{ll} \text{Dist}_{1-2} = 1.062 \text{ cm.} & \varphi_{1-2} = 32.39^\circ \\ \text{Dist}_{2-3} = 1.646 \text{ cm.} & \varphi_{2-3} = 56.12^\circ \end{array}$$

Obtención de ángulos entre planos por medio de fórmula.

$$\cos \varphi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)}}$$

$$\begin{array}{l} \varphi_{1-2} = 31.48^\circ \\ \varphi_{2-3} = 58.52^\circ \end{array}$$

Cálculo del parámetro de la red.

$$a_n = d_n \sqrt{h_n^2 + k_n^2 + l_n^2}$$

$$\begin{array}{ll} a_1 = 4.0492 \text{ \AA} & \\ a_2 = 4.0757 \text{ \AA} & a_{\bar{x}} = 4.0549 \text{ \AA} \\ a_3 = 4.0455 \text{ \AA} & a_{\sigma_{\bar{x}}} = 0.012 \text{ \AA} \\ a_4 = 4.0492 \text{ \AA} & \end{array}$$

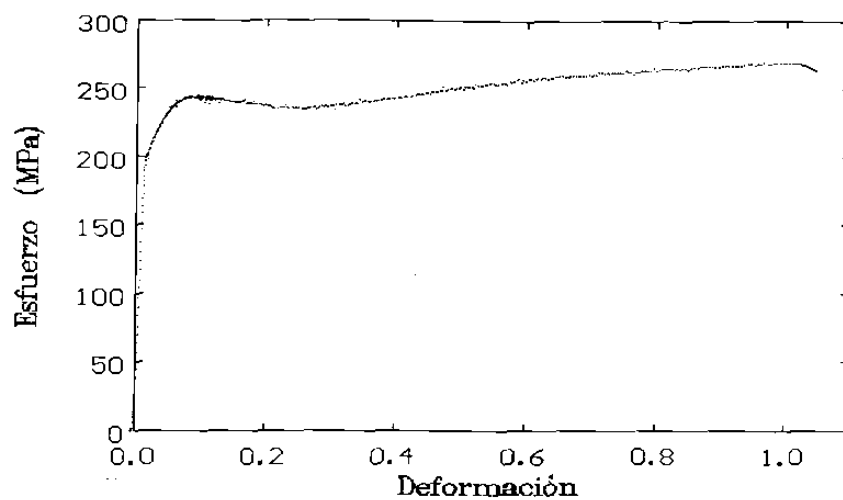
Conclusión: El patrón de difracción corresponde al del Aluminio con una estructura cúbica centrada en las caras, aun que con un parámetro de red un poco diferente.

Nota: La longitud de cámara es de  $L = 93.59^\circ$  como se pudo comprobar con este patrón de difracción.

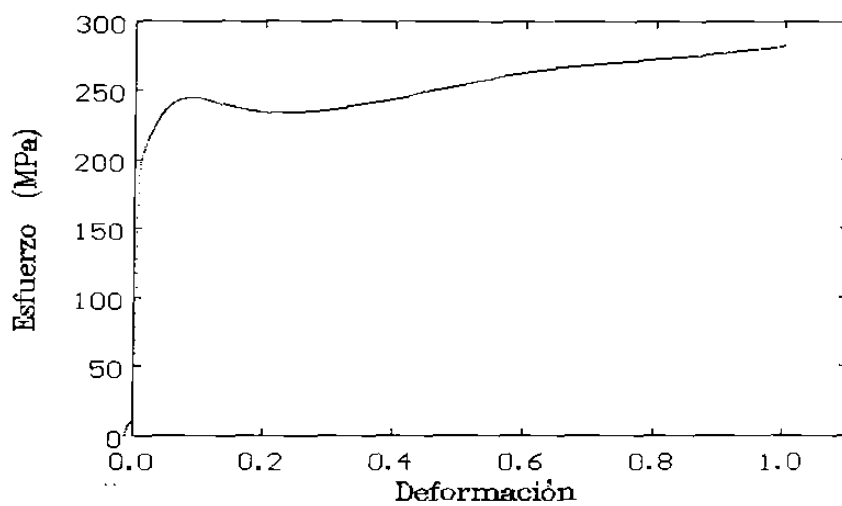
# **APÉNDICE**

## **C**

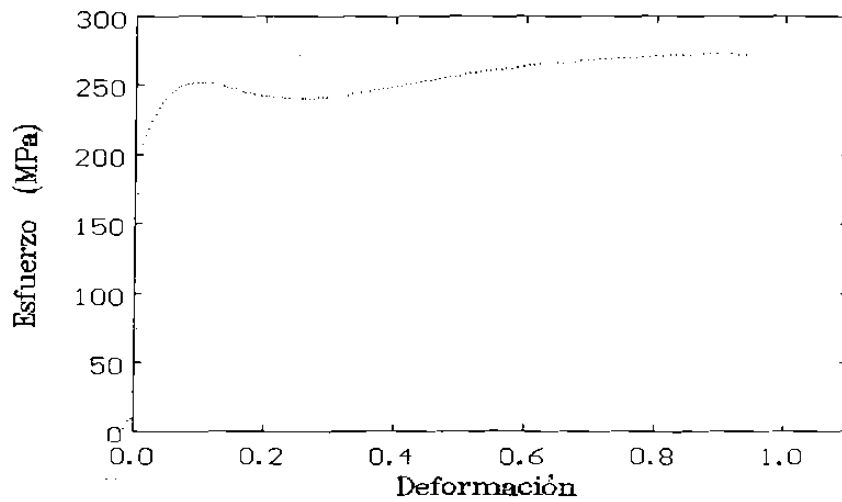
**Gráficas de compresión  
(Esfuerzo – Deformación Reales)**



A)

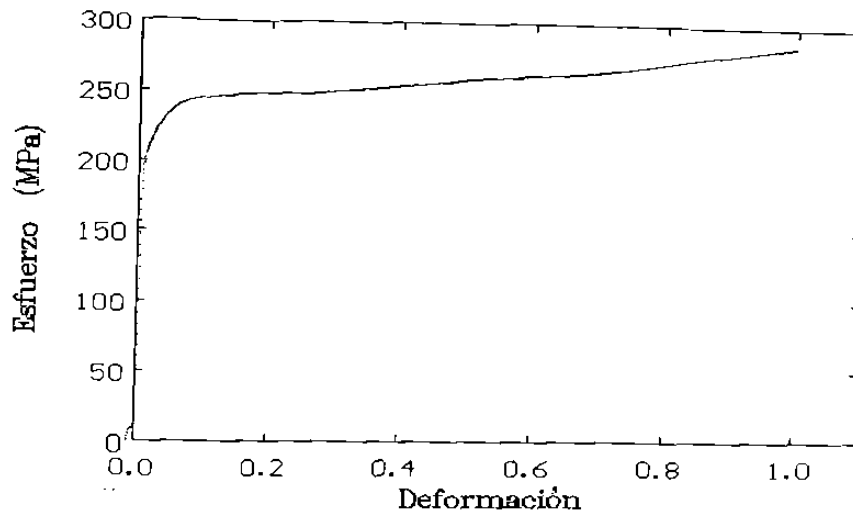


B)

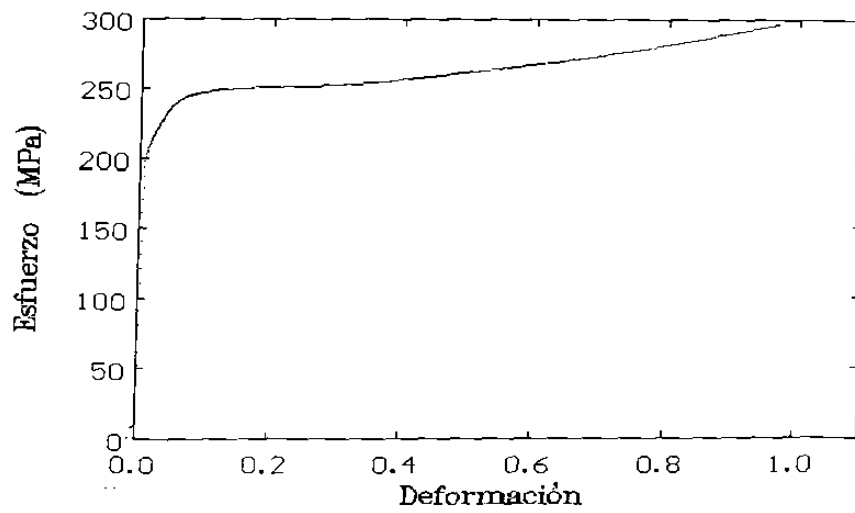


C)

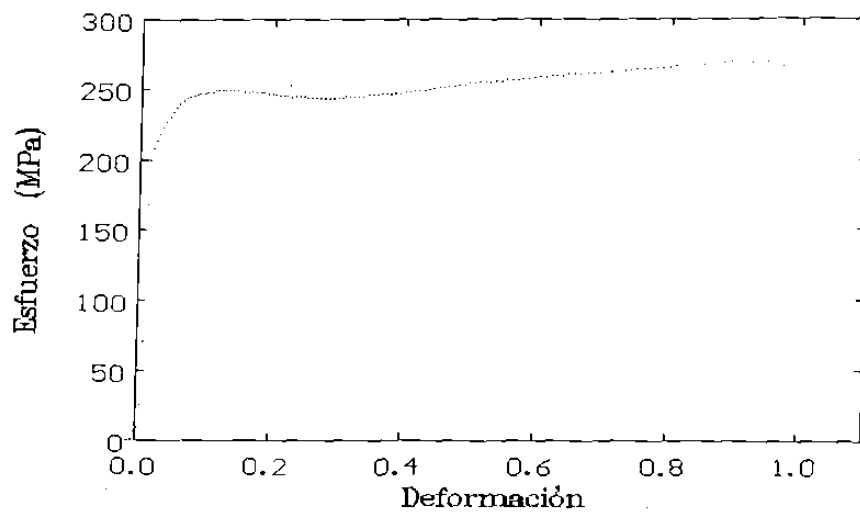
Figura C1.-Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras extruidas ensayadas en dirección longitudinal a diferentes velocidades de deformación. A)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  y C)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .



A)

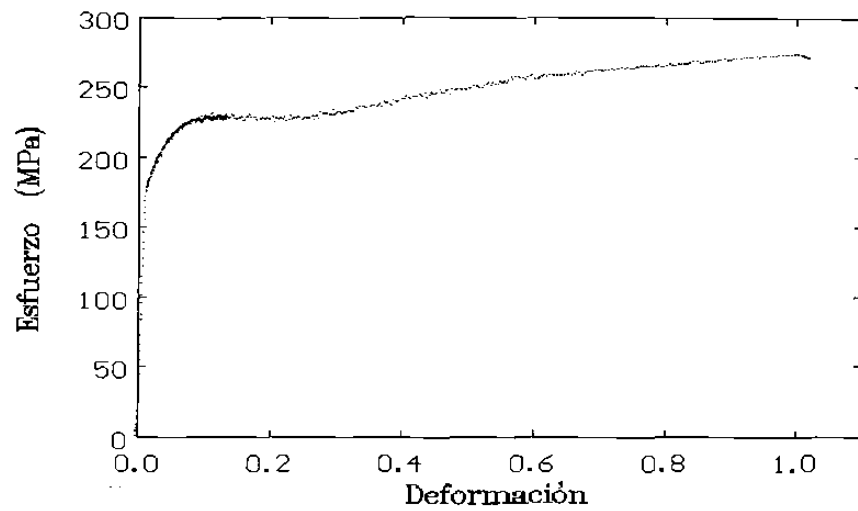


B)

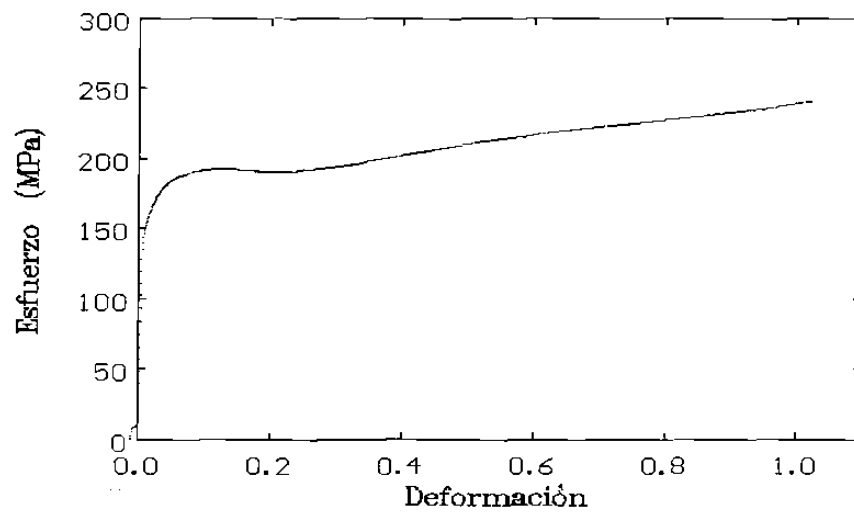


C)

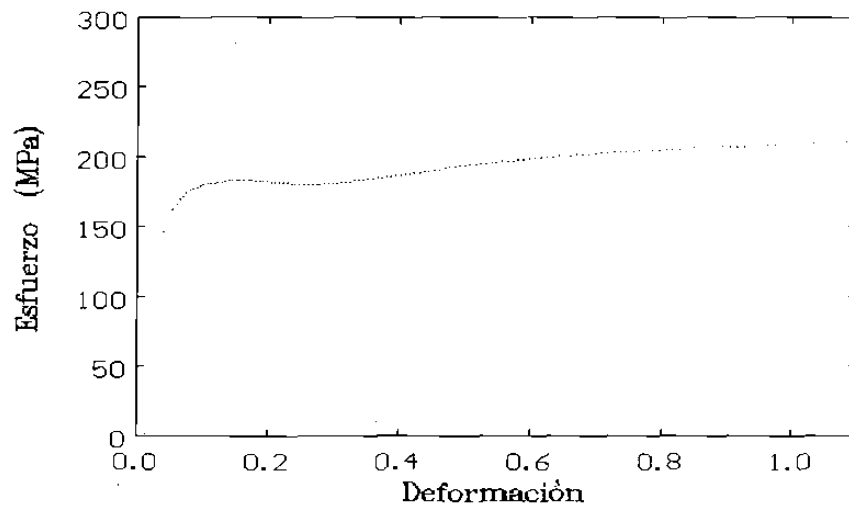
Figura C2.-Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras extruidas ensayadas en dirección perpendicular a diferentes velocidades de deformación. A)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  y C)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .



A)

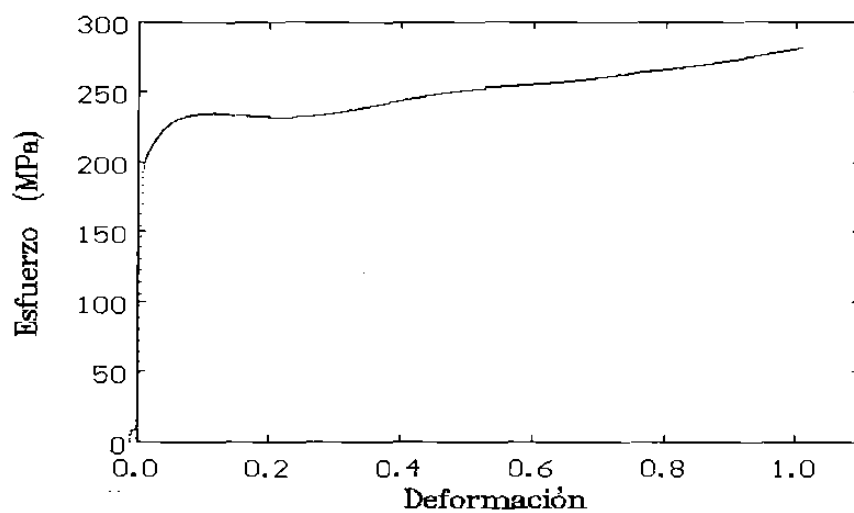


B)

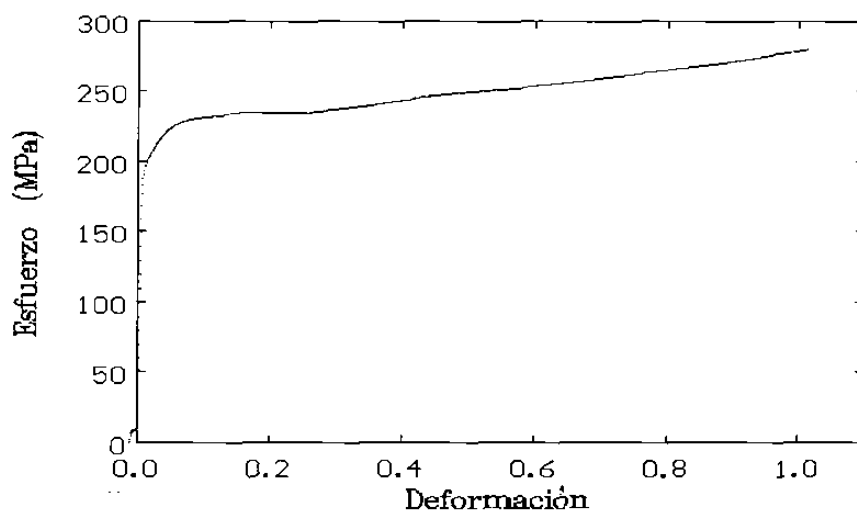


C)

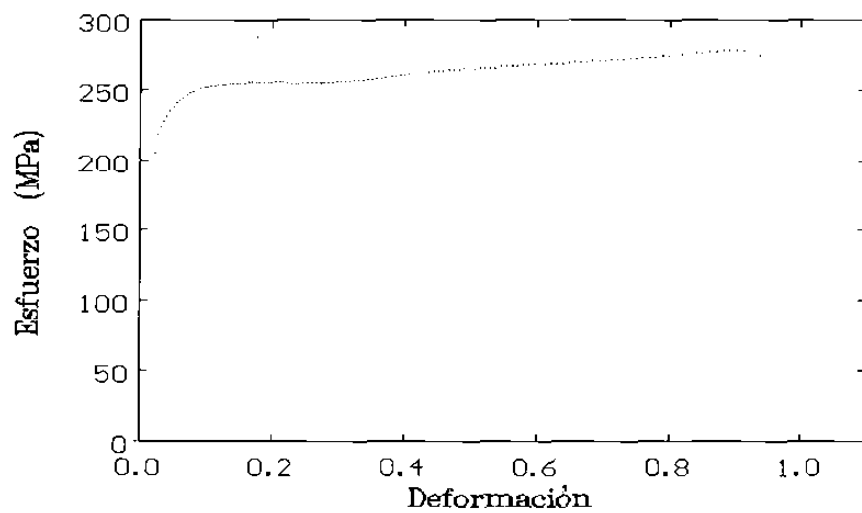
Figura C3.-Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras ensayadas de máxima dureza en dirección longitudinal a diferentes velocidades de deformación .A)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  y C)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .



A)

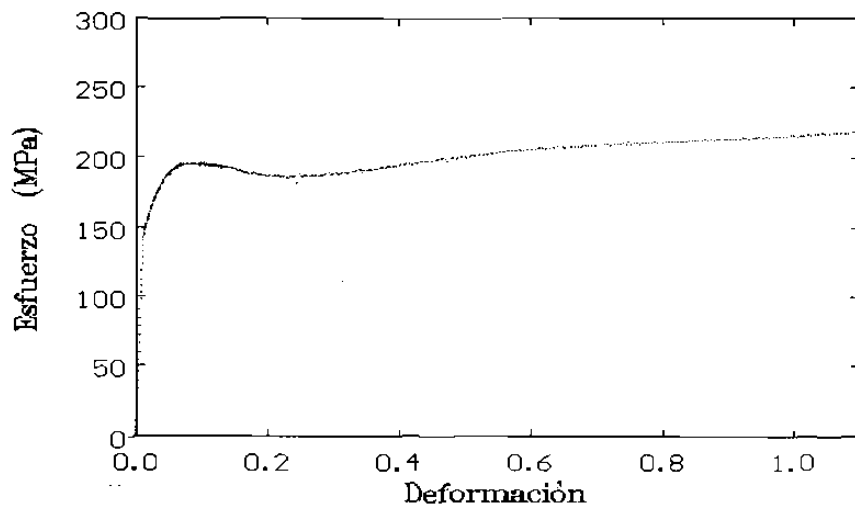


B)

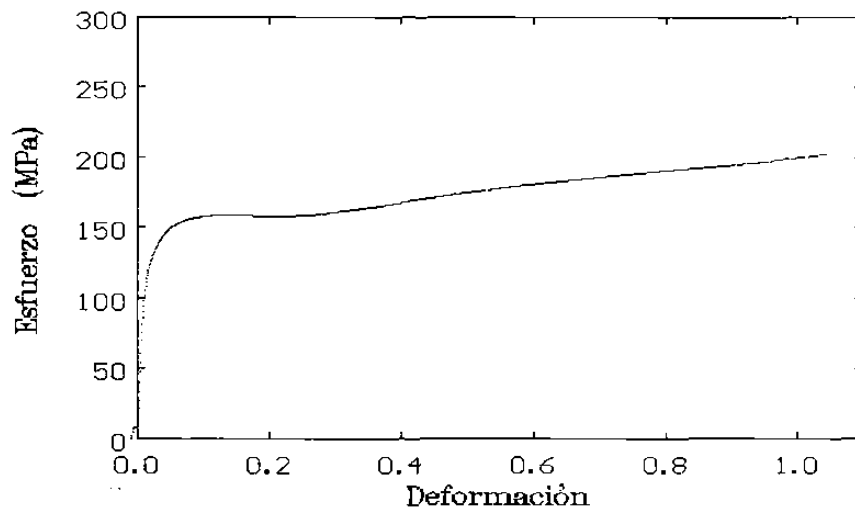


C)

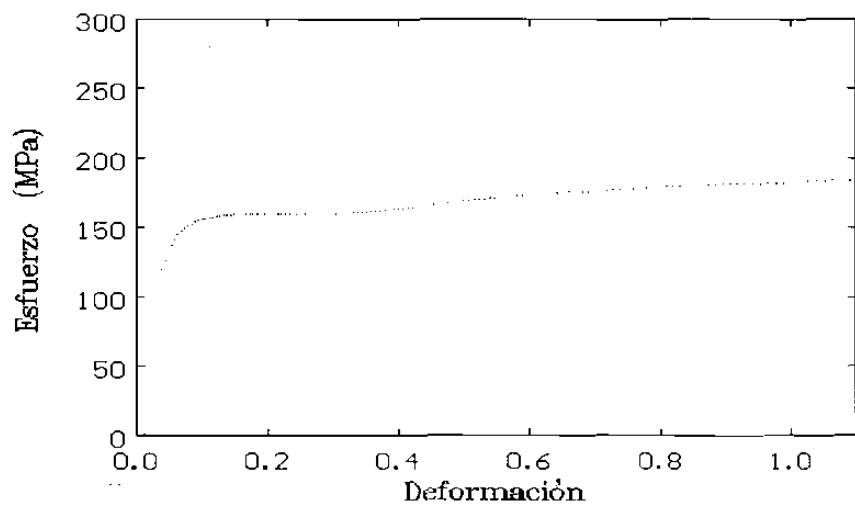
Figura C4.-Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras ensayadas de máxima dureza en dirección perpendicular a diferentes velocidades de deformación . A)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  , B)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  y C)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .



A)

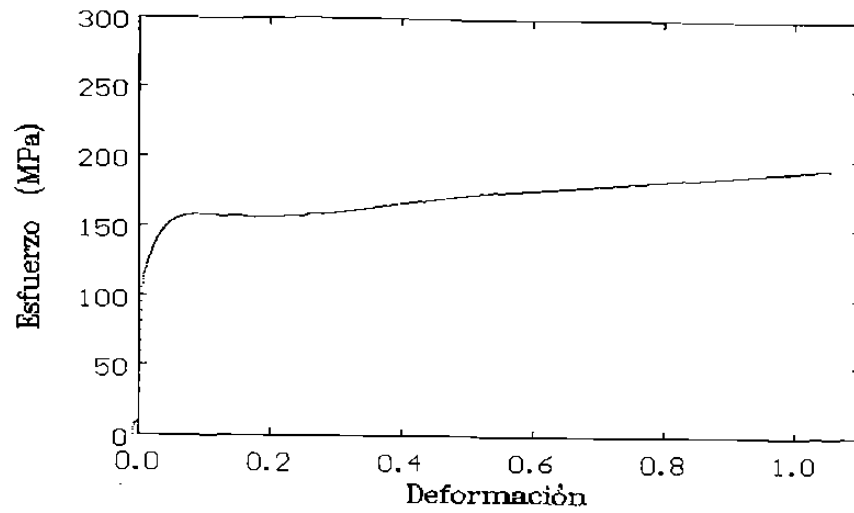


B)

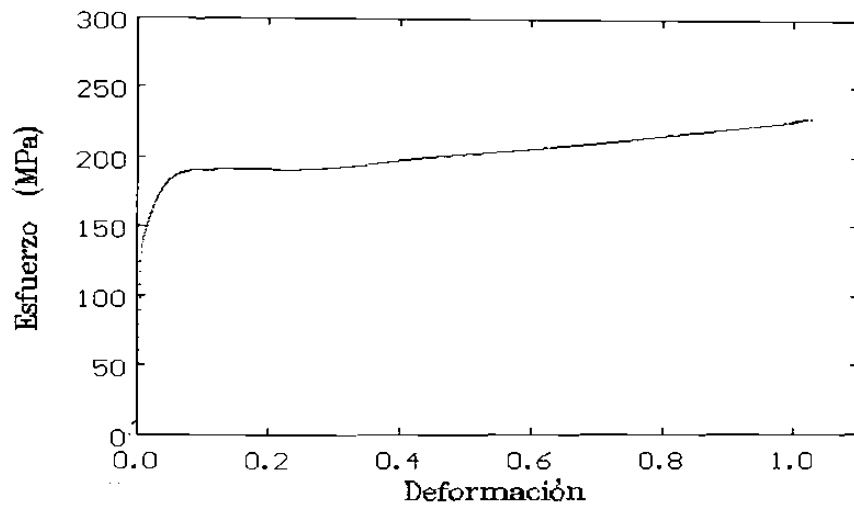


C)

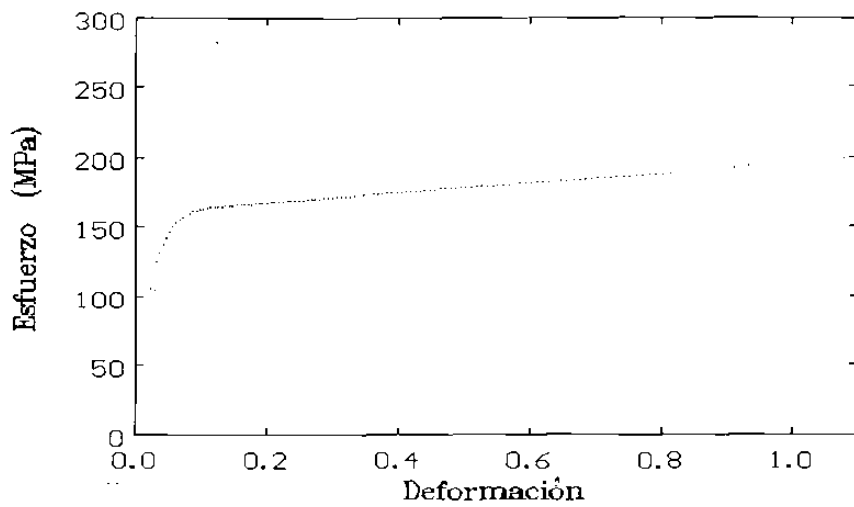
Figura C5.-Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras ensayadas sobreenviejadas en dirección longitudinal a diferentes velocidades de deformación . A)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  , B)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  y C)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .



A)



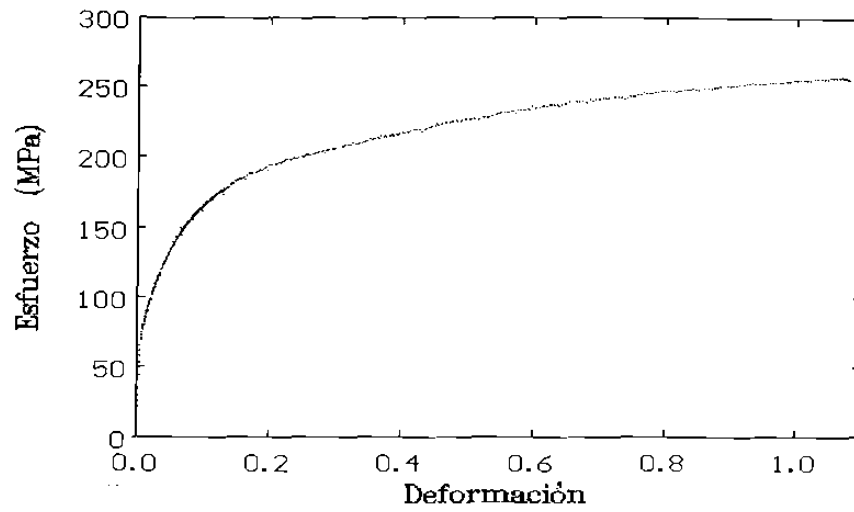
B)



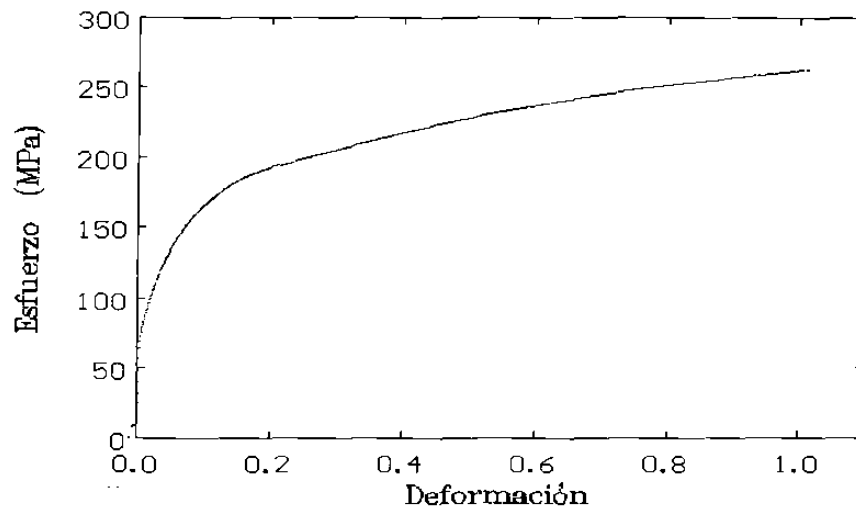
C)

Figura C6.- Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras sobreenvejecida en dirección perpendicular a diferentes velocidades de deformación . A)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  y C)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .

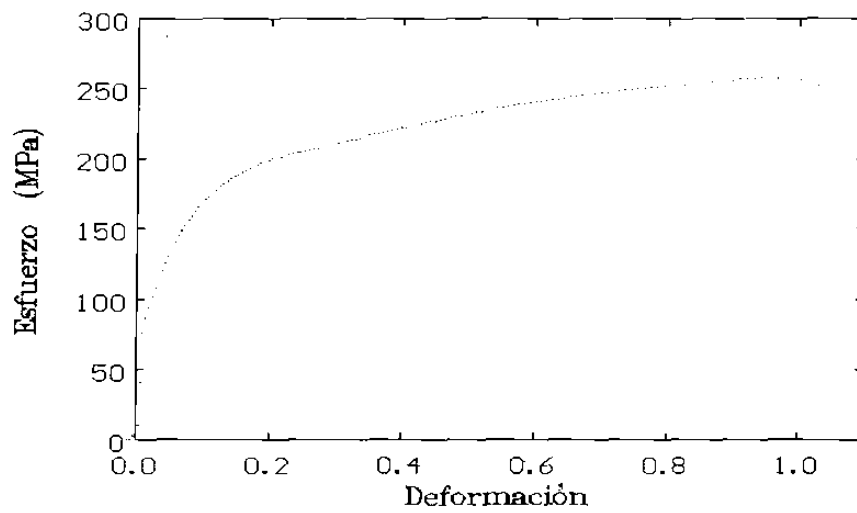




A)

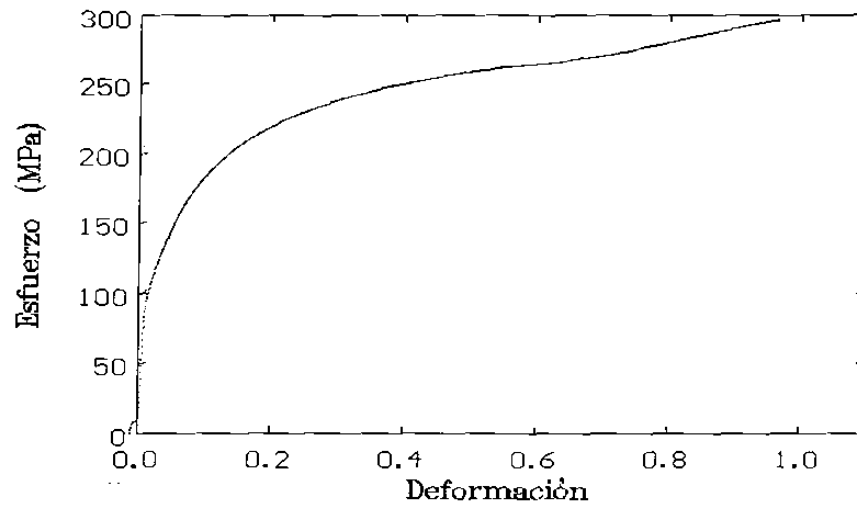


B)

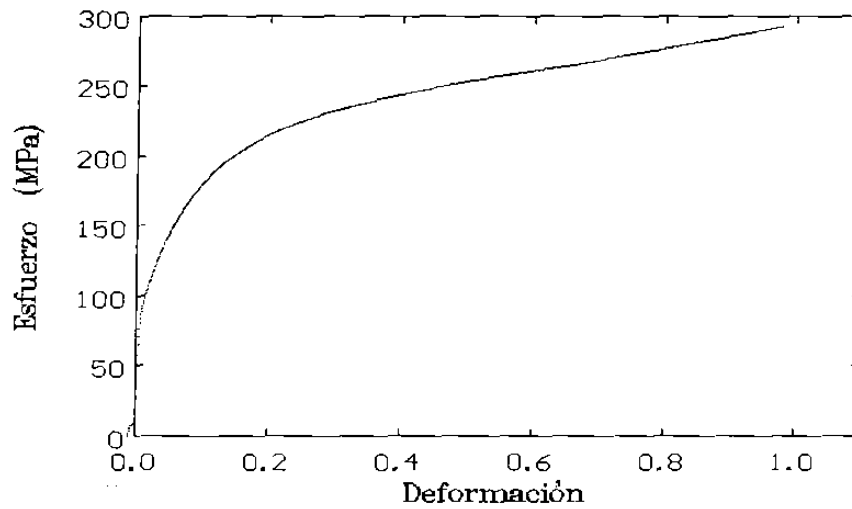


C)

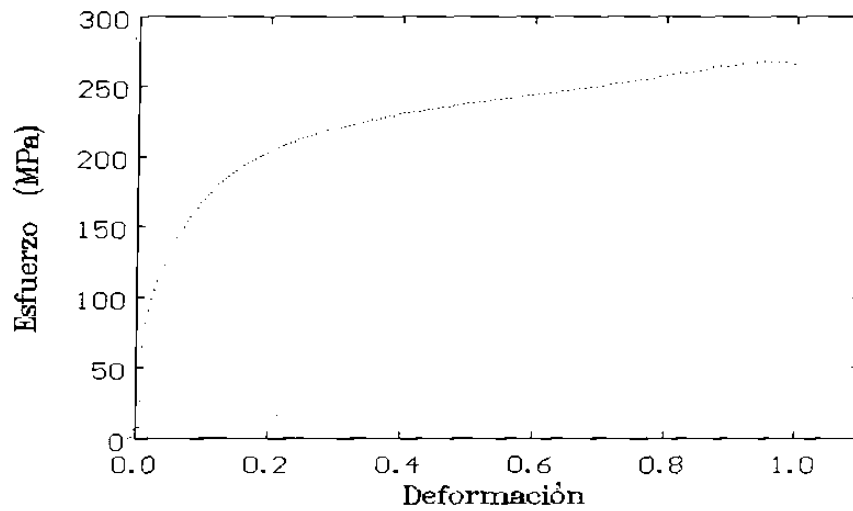
Figura C7.- Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras ensayadas sobresaturadas en dirección longitudinal a diferentes velocidades de deformación . A)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  y C)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .



A)

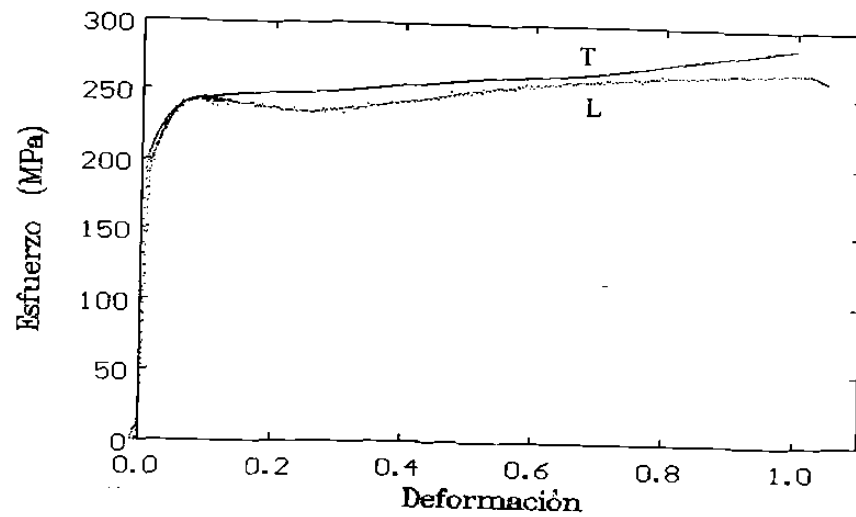


B)

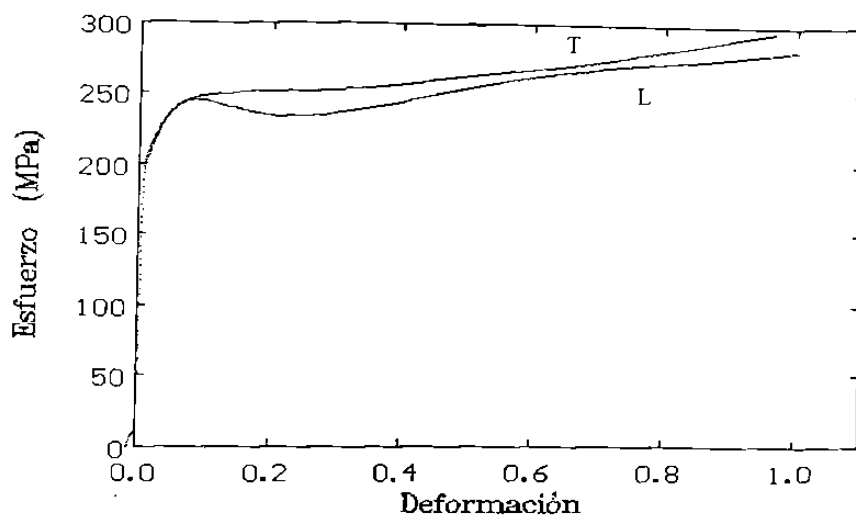


C)

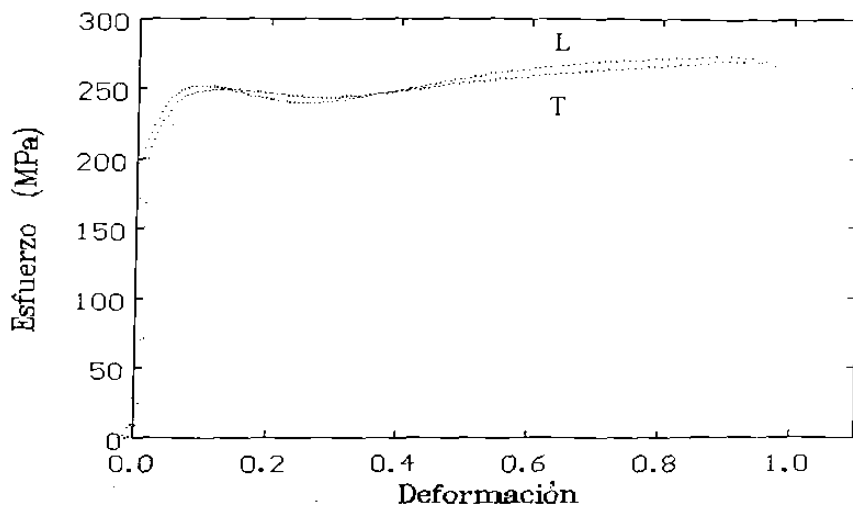
Figura C8.- Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras ensayadas sobresaturadas en dirección perpendicular a diferentes velocidades de deformación . A)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  y C)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .



a)

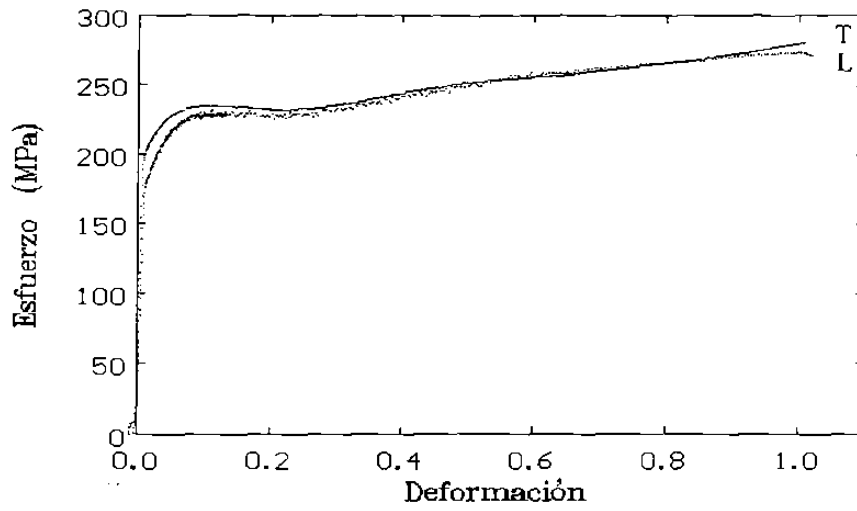


b)

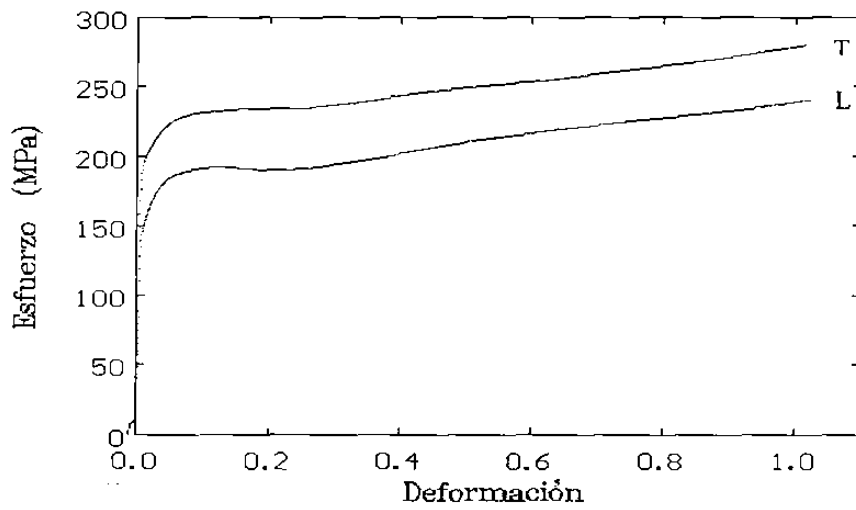


c)

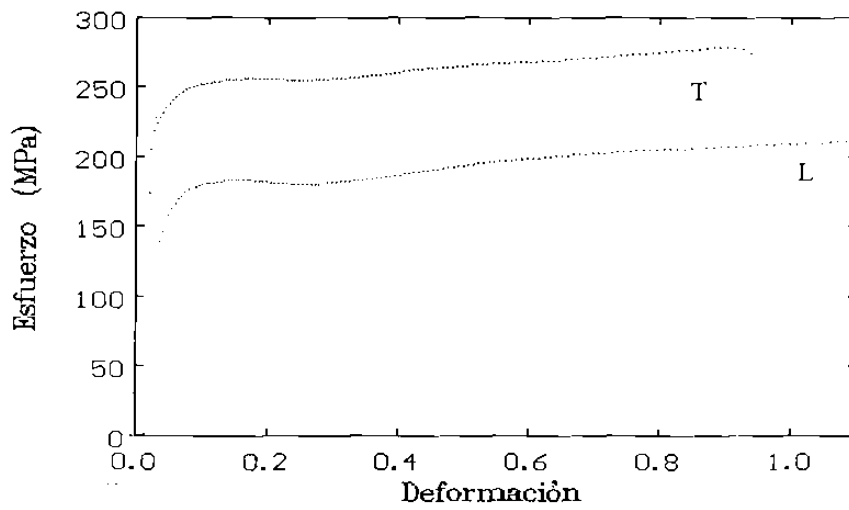
Figura C9.- Comparación de muestras extruidas ensayadas en dirección transversal y longitudinal a velocidad a)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , b)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , c)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .



a)

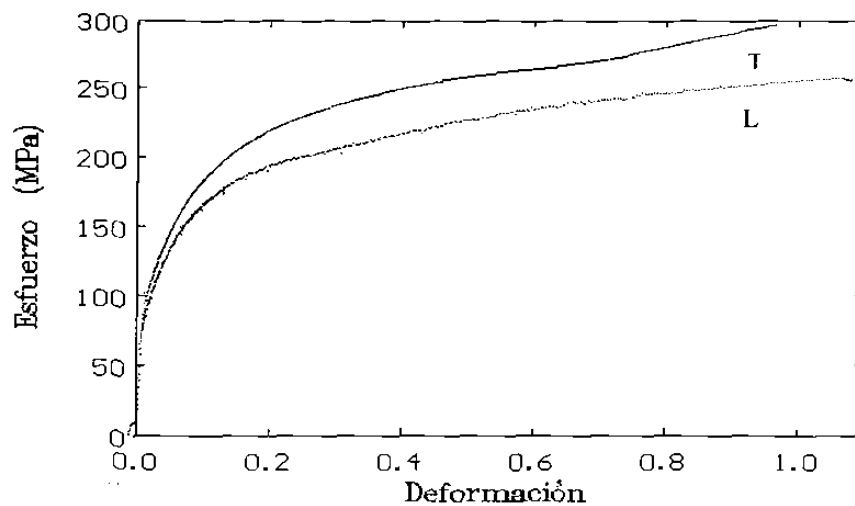


b)

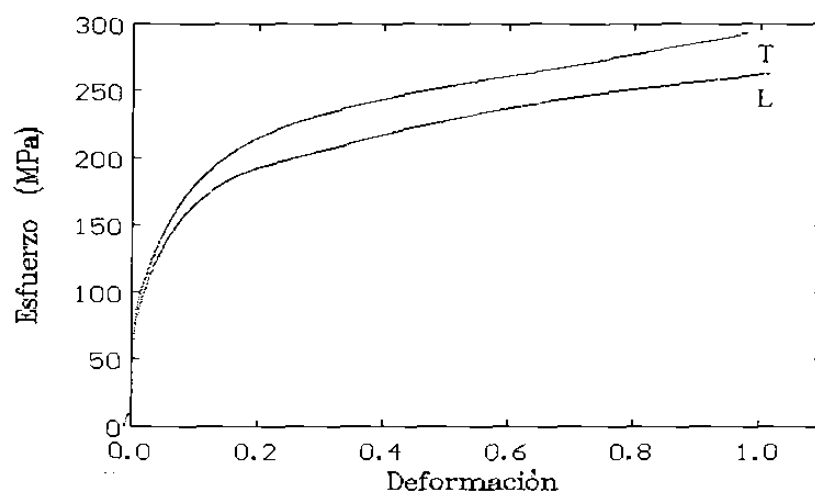


c)

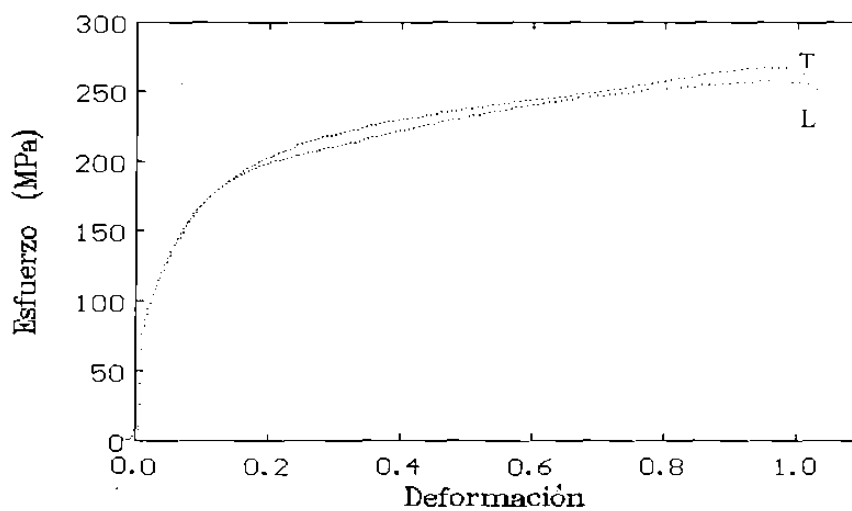
Figura C10.- Comparación de muestras a máxima dureza en dirección transversal y longitudinal a velocidad a)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , b)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , c)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .



a)

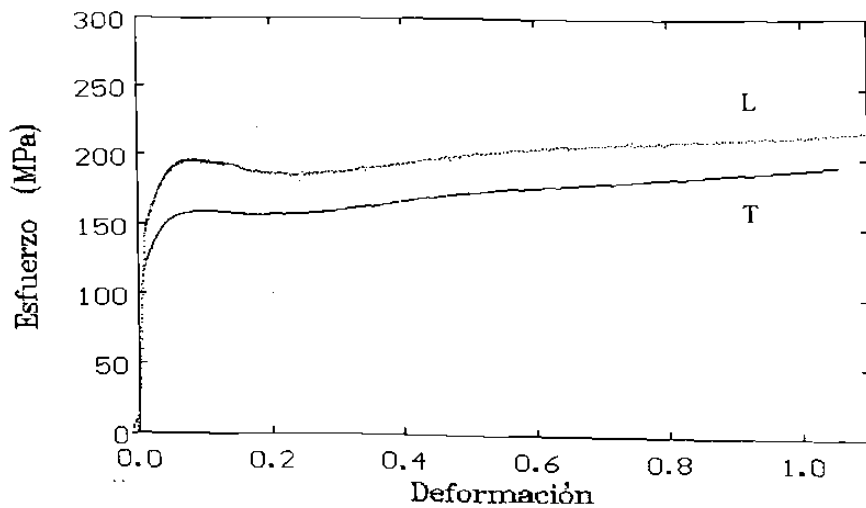


b)

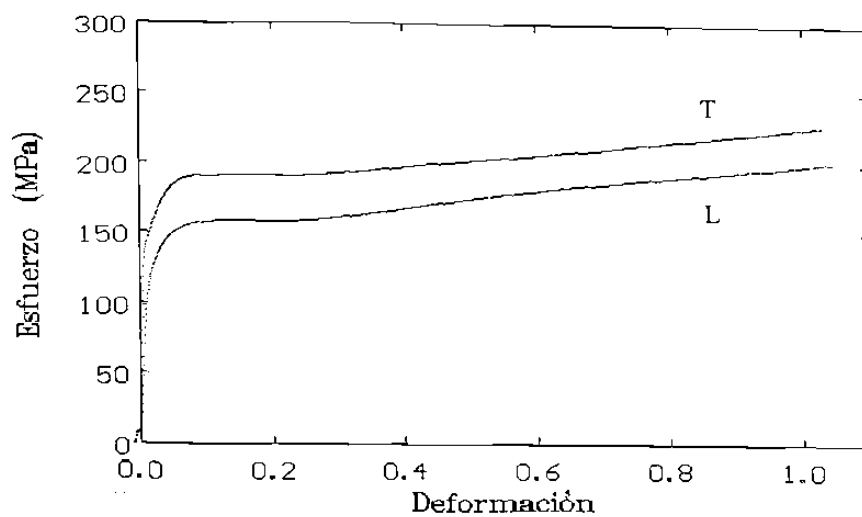


c)

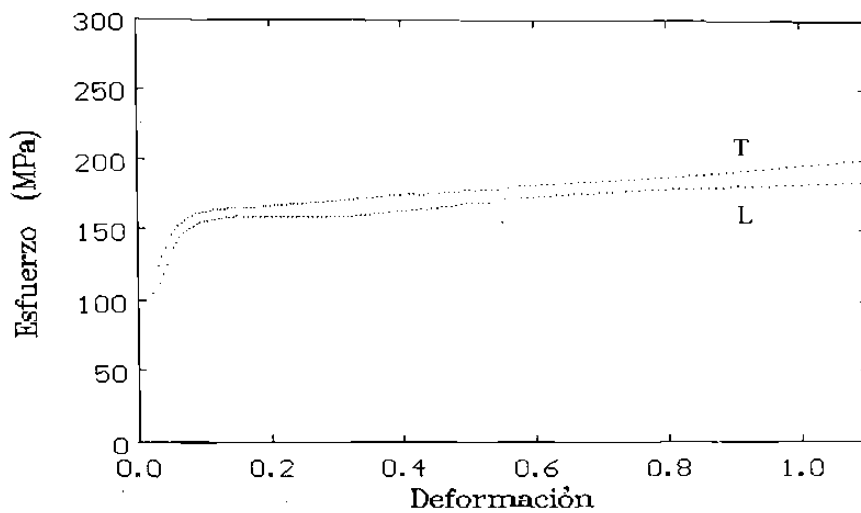
Figura C11.- Comparación de muestras sobresaturadas en dirección transversal y longitudinal a velocidad a)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , b)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , c)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .



a)



b)



c)

Figura C12.- Comparación de muestras sobreenviejadas en dirección transversal y longitudinal a velocidad a)  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , b)  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , c)  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .

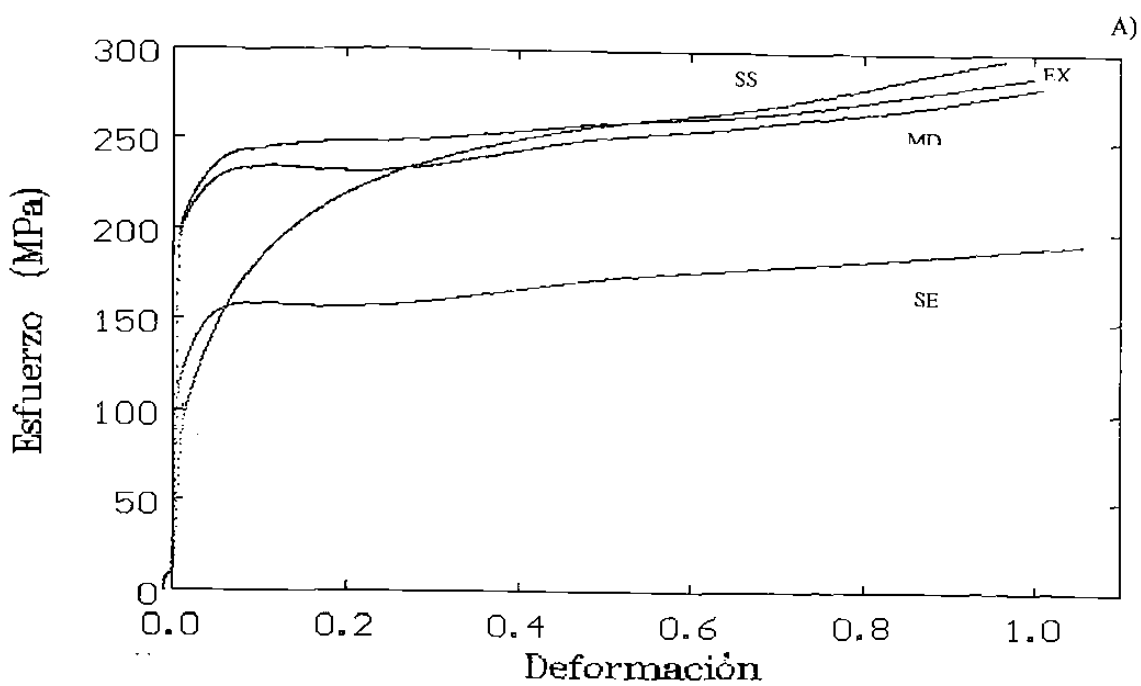
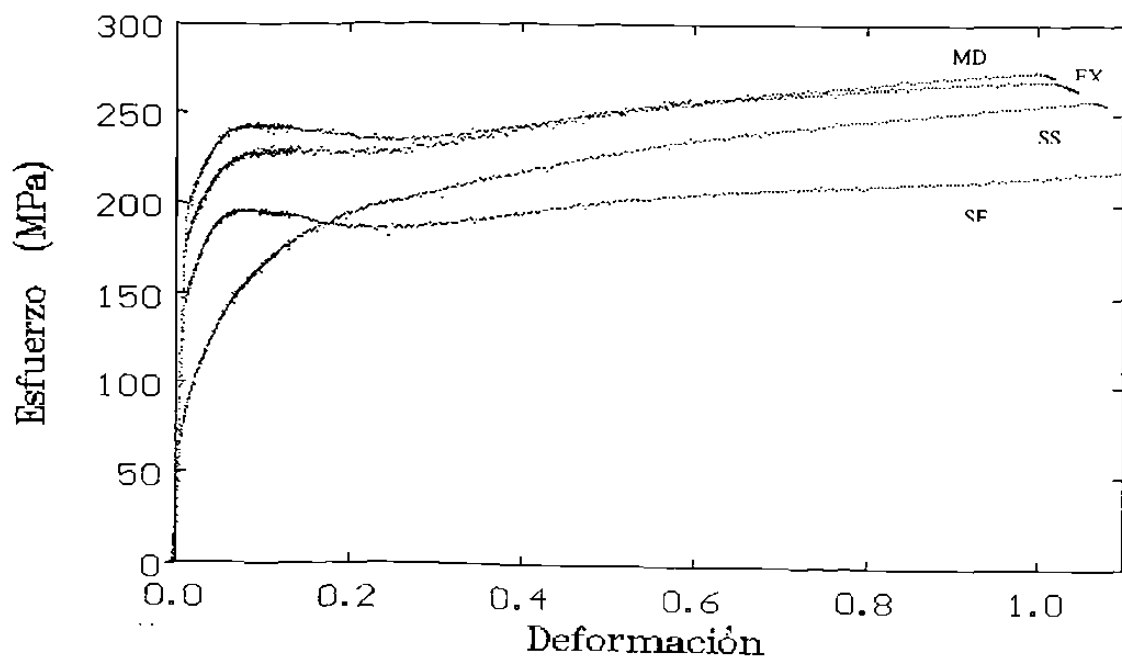


Figura C13.- Gráficas de compresión mostrando la diferencia entre los cuatro estados de tratamiento térmico, a una velocidad de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  A) longitudinal B) transversal.

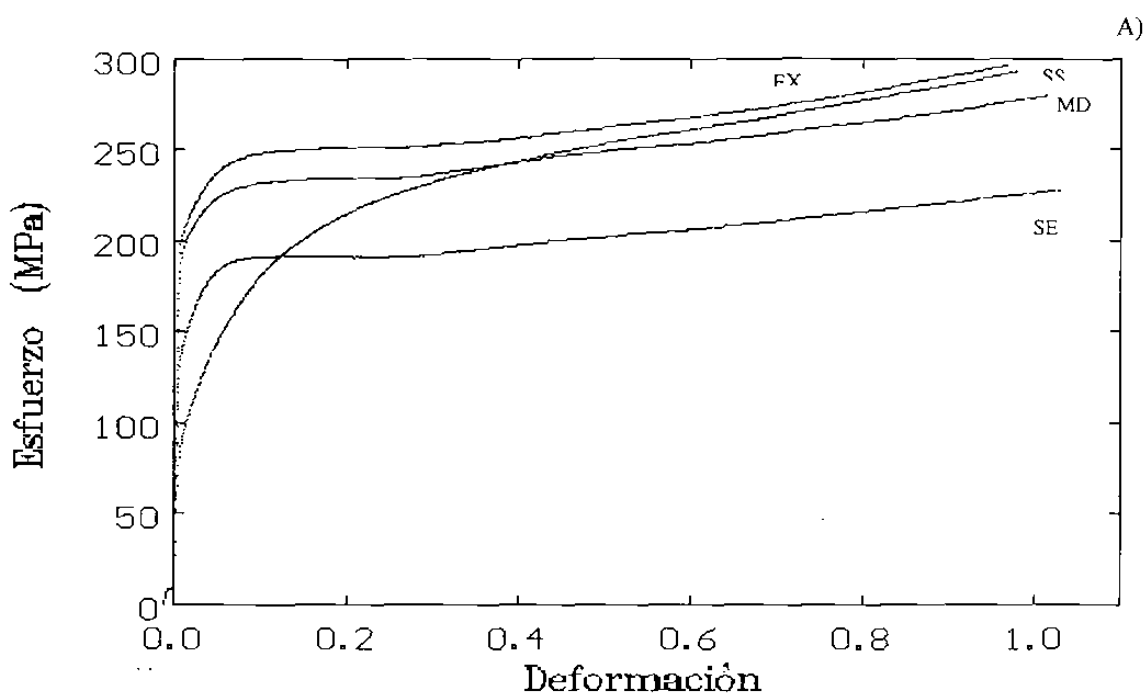
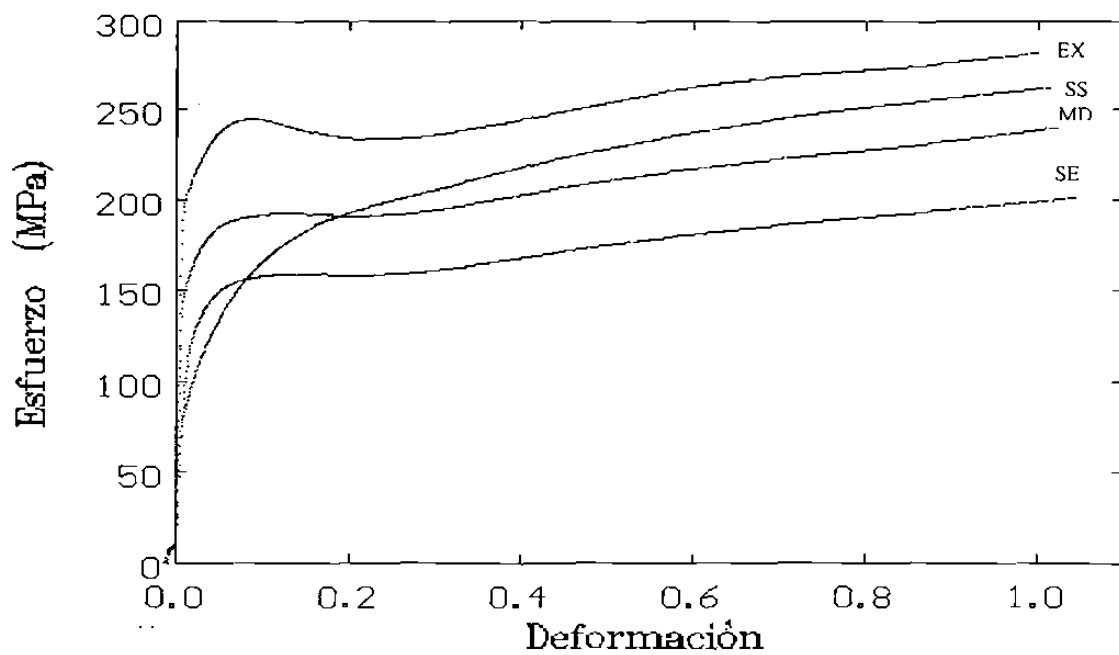
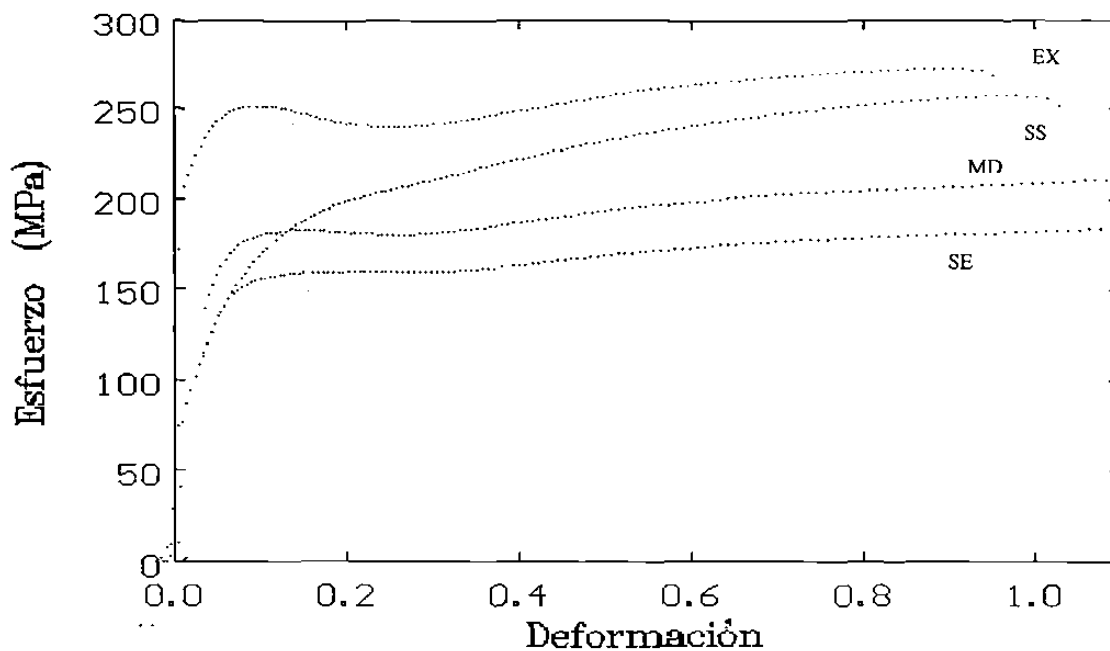
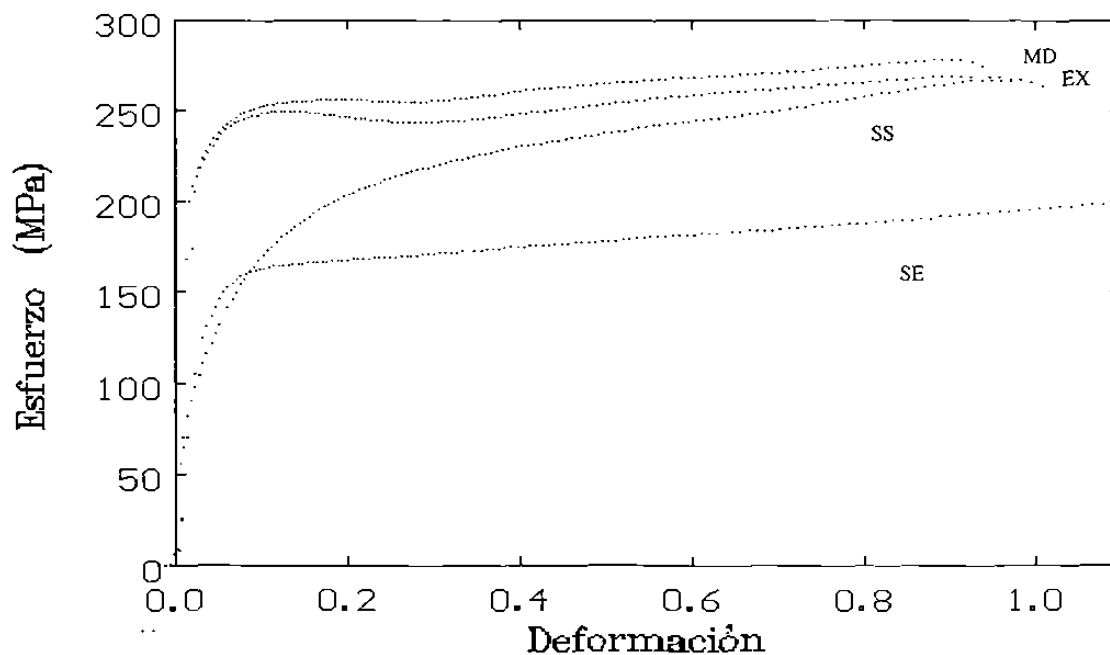


Figura C14.- Gráficas de compresión mostrando la diferencia entre los cuatro estados de tratamiento térmico, a una velocidad de  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  A) longitudinal B) transversal.



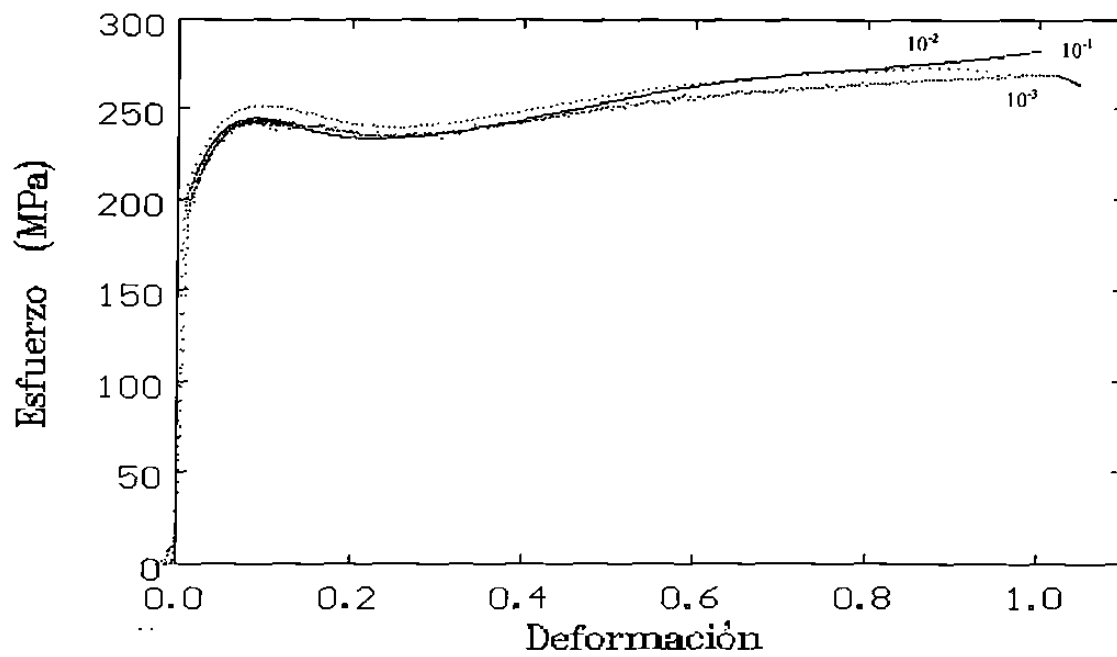


A)

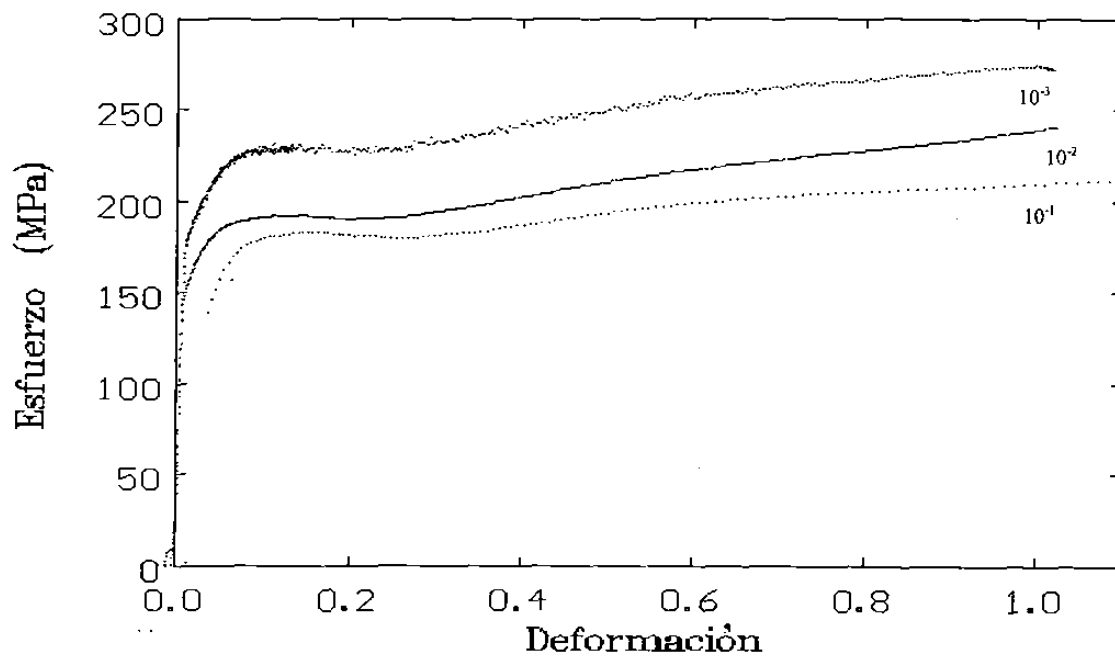


B)

Figura C15.- Gráficas de compresión mostrando la diferencia entre los cuatro estados de tratamiento térmico, a una velocidad de  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  A) longitudinal B) transversal.

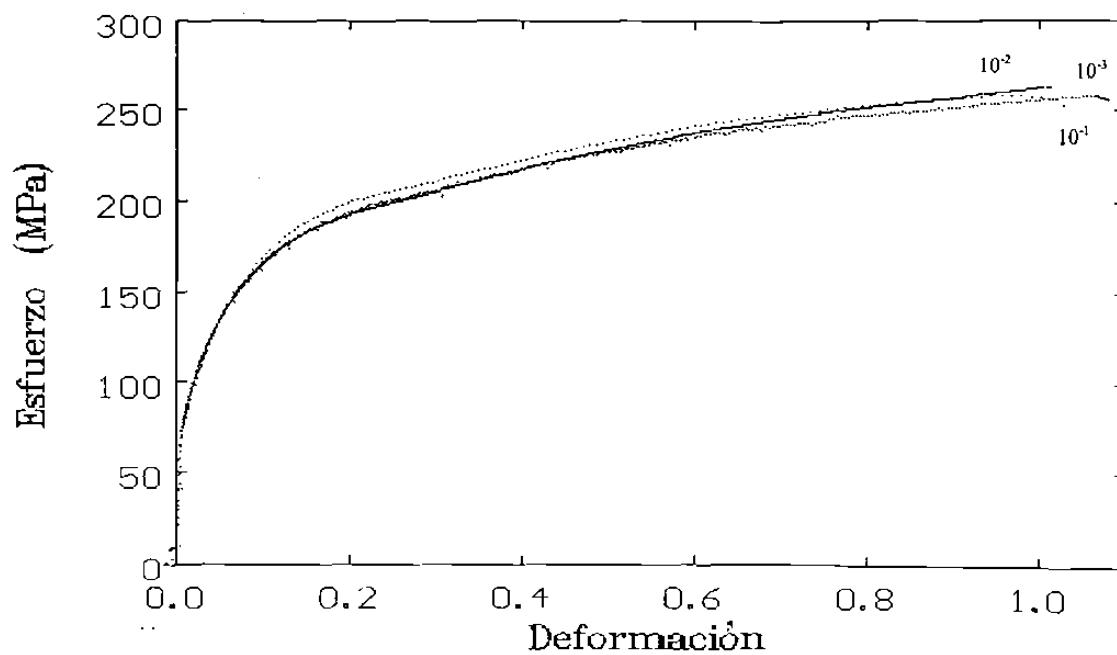


A)

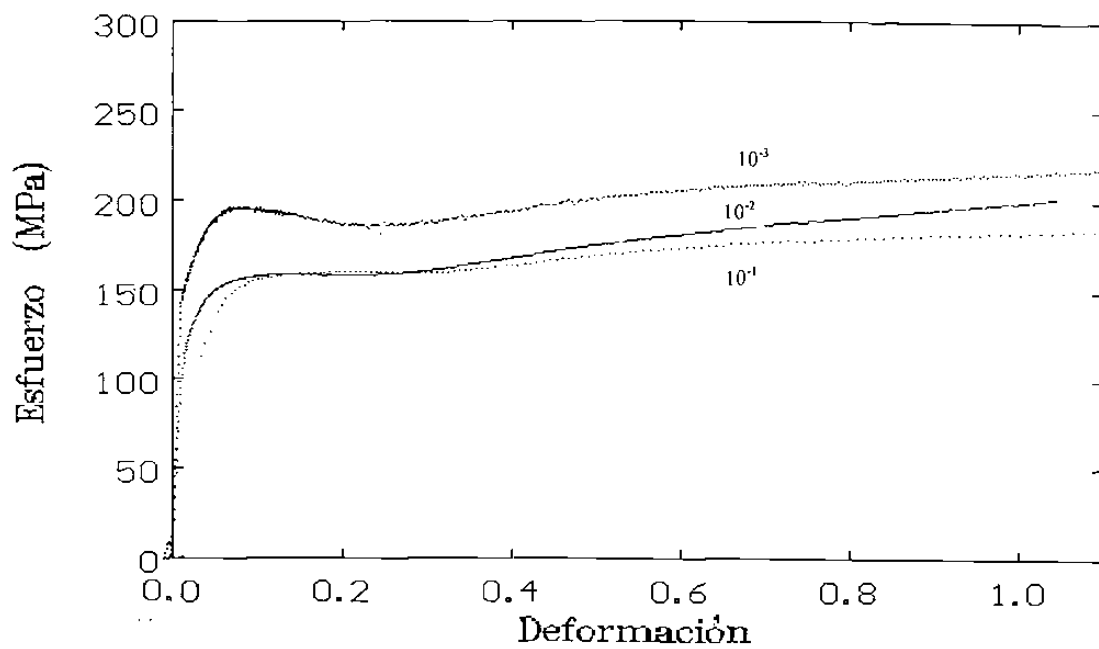


B)

Figura C16.- Comparación de gráficas de compresión sometidas a tres velocidades  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$  para muestras en dirección longitudinal A) Extruida B) Máxima dureza.

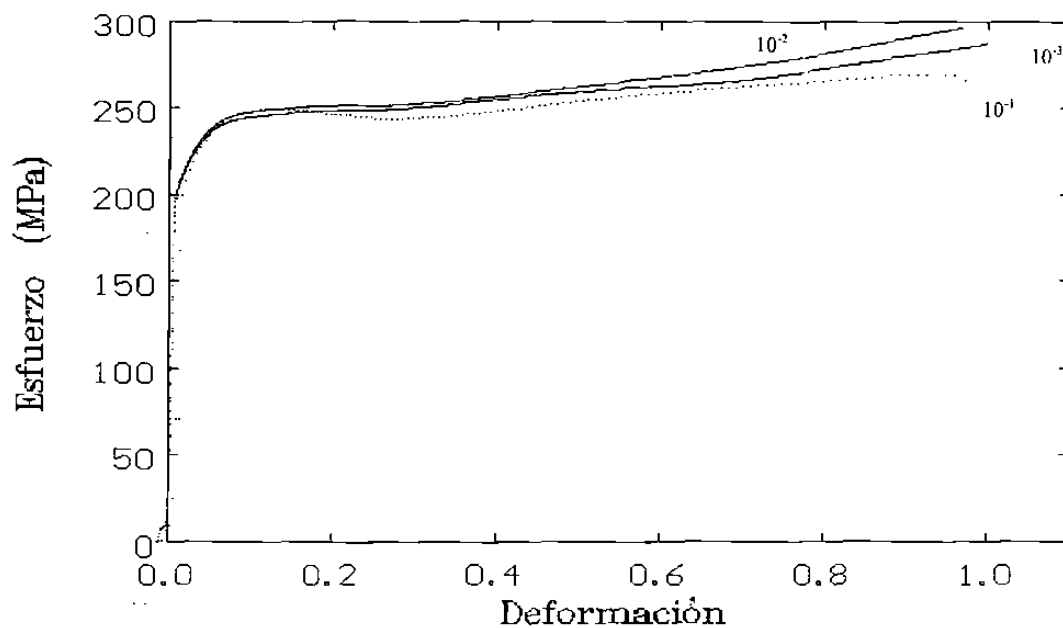


A)

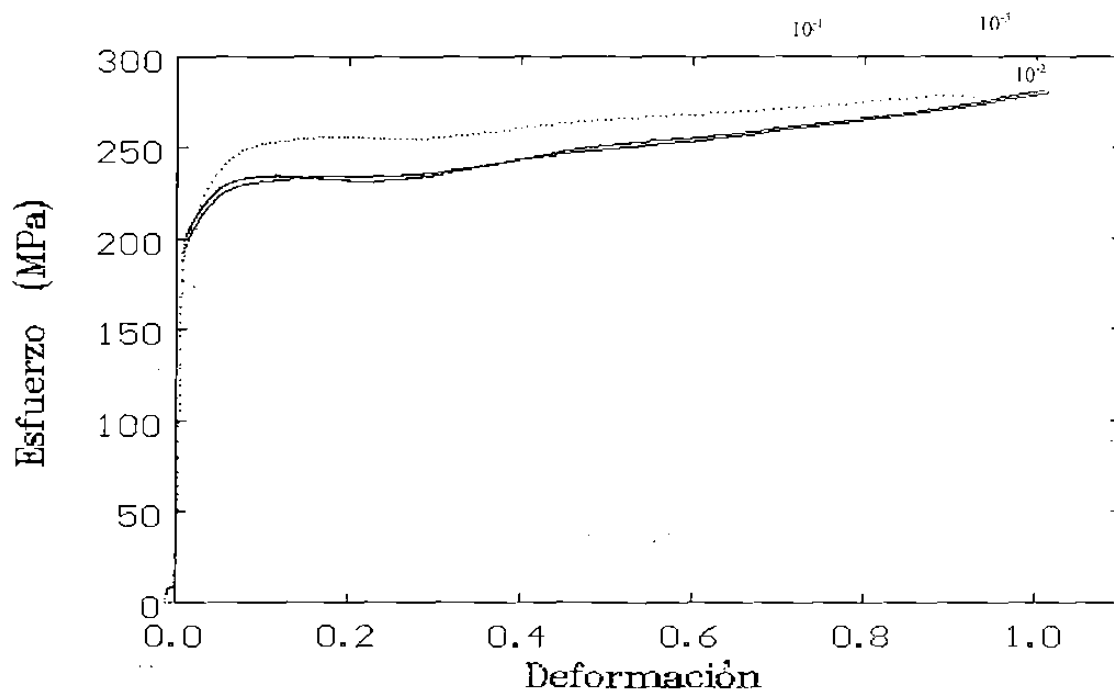


B)

Figura C17.- Comparación de gráficas de compresión sometidas a tres velocidades  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ , para muestras en dirección longitudinal A) Sobresaturada B) Sobrenvejecida.

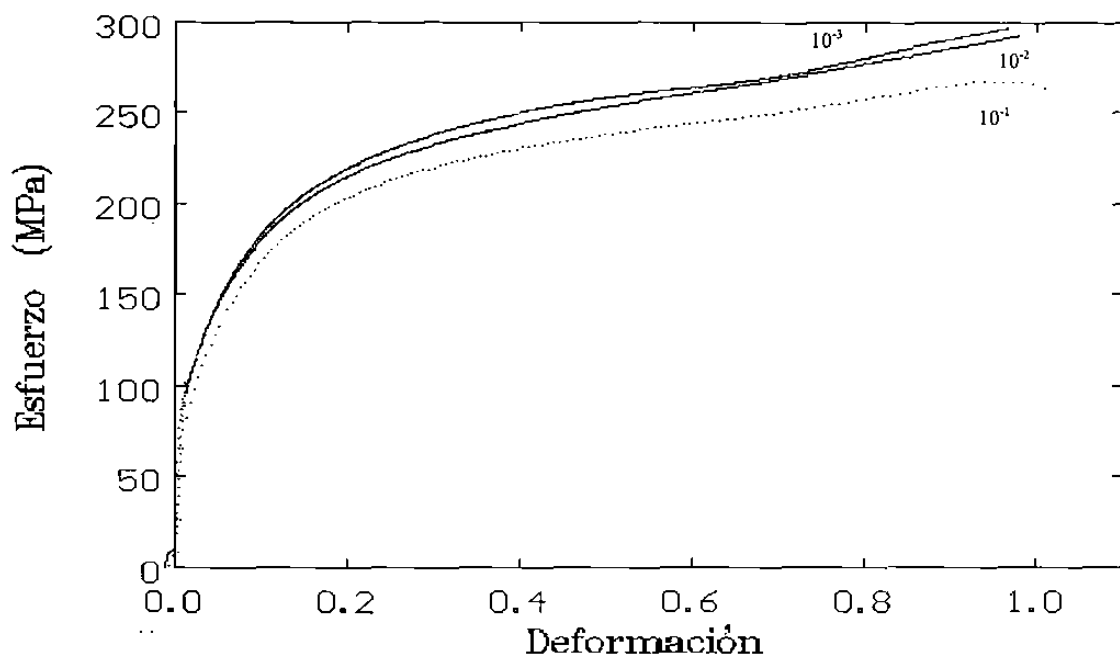


A)

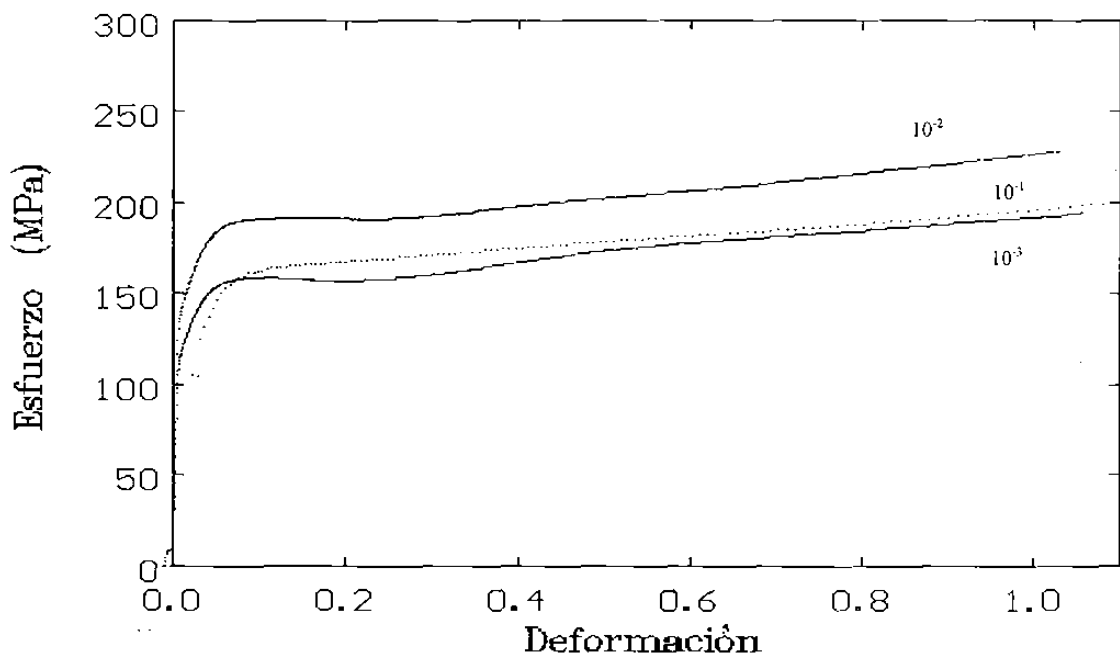


B)

Figura C18.- Comparación de gráficas de compresión sometidas a tres velocidades  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$  para muestras en dirección transversal A) Extruida B) Máxima dureza.



A)



B)

Figura C19.- Comparación de gráficas de compresión sometidas a tres velocidades  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ , para muestras en dirección transversal A) Sobresaturada B) Sobrenvejecida.

# LISTA DE FIGURAS

Figura	Contenido	Página
3.1	Diagrama de metales parcialmente solubles	95
3.2	Diagrama Seudobinario de Aluminio-Silicio de Magnesio	95
3.3	Crecimiento de un precipitado	96
3.4	Crecimiento de un precipitado en función del tiempo a una temperatura dada	96
3.5	Aumento de resistencia en función del tiempo a una temperatura dada	97
3.6	Respuesta al tratamiento de envejecido artificial en función de la temperatura y el tiempo	97
3.7	Representación de la distorsión de los planos de la red de la matriz cerca de la zona coherente GP	98
3.8	Sección del diagrama de la fase eutéctica de Al-Cu. La solubilidad de las zonas GP se muestra también	98
3.9	Representación de la variación de la distribución de las zonas GP con tiempo de envejecido ( $t_1 < t_2 < t_3$ )	99
3.10	Representación de la nucleación de precipitados sobre partículas preexistentes	99
3.11	Representación esquemática de una zona GP cortada por una dislocación	100
3.12	Representación esquemática de una dislocación pasando a través de precipitados incoherentes	100
3.13	Representación esquemática de la variación del esfuerzo de fluencia con respecto al diámetro de precipitado para el mecanismo de corte y de flexión	100
3.14	Variación de la temperatura y el tiempo para precipitar una cantidad constante de soluto	101
3.15	Curvas C, temperatura, tiempo, propiedades a 95 % del esfuerzo máximo para varias aleaciones	101
3.16	Relación del esfuerzo respecto al máximo alcanzable de función del tiempo isotérmico para la aleación a) 7075-T6, b) 2024-T4	102
3.17	Método para determinar el factor de rapidez ( $\tau$ ) usando la curva de enfriamiento y la curva C	103
4.1	Microestructura de una aleación de aluminio 6063 extruida en dirección: a) normal b) longitudinal al extruido.	104
4.2	Colocación de termopares en la muestra y tarjetas transductoras	105
4.3	Vista de la muestra durante el enfriamiento rápido	106
4.4	Empaquetado de muestras para el tratamiento de envejecimiento artificial	106
4.5	Colocación de las muestras en la estufa para realizar el tratamiento de envejecimiento artificial	106
4.6	Sección de la barra donde se muestra la posición longitudinal y transversal para la obtención de las muestras de compresión	107
5.1	Evolución térmica en las 8 secciones durante el tratamiento de solubilizado a 520 °C	108
5.2	Evolución térmica de las 8 secciones durante el tratamiento enfriamiento	108
5.3	Curvas de envejecimiento artificial a 130 °C en tres muestras enfriadas a diferentes velocidades	109
5.4	Curvas de envejecido artificial a 180 °C en tres muestras enfriadas a diferentes velocidades	109
5.5	Curvas de envejecido artificial a 230 °C en tres muestras enfriadas a diferentes velocidades	110
5.6	Curvas de envejecido artificial en una misma muestra sometida a tres temperaturas (130,180,230 °C)	110
5.7	Variación de la dureza máxima en función. A)De la distancia, B)De la velocidad de enfriamiento	111

5.8	Decremento en dureza máxima velocidad de enfriamiento	112
5.9	Decremento de la velocidad de enfriamiento en función de la temperatura mostrando el inicio y el final de la precipitación para la muestra (D).	112
5.10	Curva de la velocidad de enfriamiento mostrando el inicio y fin de la precipitación para la muestra (E). a) En función de la temperatura b) En función del tiempo.	113
5.11	Curva de la velocidad de enfriamiento mostrando el inicio y fin de los precipitados para la muestra (F). a) En función de la temperatura b) En función del tiempo.	114
5.12	Curva de la velocidad de enfriamiento en función de la temperatura mostrando el inicio y final de la precipitación para la muestra (G).	115
5.13	Curva de la velocidad de enfriamiento en función de la temperatura mostrando el inicio y final de la precipitación para la muestra (H).	115
5.14	Diagrama de precipitación durante enfriamiento continuo	116
5.15	Comparación del diagrama de precipitación en enfriamiento continuo con respecto al isotérmico deducido a partir de la pérdida de 0.05% en resistencia	116
5.16	Decremento de la dureza máxima en función del tiempo de permanencia en la zona de precipitación durante el enfriamiento continuo. a) escala normal b) escala log-log	117
5.17	Precipitado en una muestra sobresaturada enfriada mas lentamente 44,000X campo claro.	118
5.18	Figura 5.17 en campo obscuro	118
5.19	Patrón de difracción para la matriz de la figura 5.18	119
5.20	Patrón de difracción del precipitado de la figura 5.18	119
5.21	Precipitados encontrados en una muestra con máxima dureza 24,000X	120
5.22	Patrón de difracción para la matriz de la figura 5.21	120
5.23	Precipitados en muestra con máxima dureza 30,000X	121
5.24	Precipitados en muestra con máxima dureza 30,000X	121
5.25	Matriz de una muestra sobresaturada y enfriada a la velocidad máxima 50,000X	122
5.26	Patrón de difracción de la matriz de una muestra sobresaturada y enfriada a la máxima velocidad	122
5.27	Patrón de difracción de la matriz en una muestra sobrevejecida	123
5.28	Curvas de compresión a baja velocidad de deformación ( $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) en una sección transversal y longitudinal.	123
5.29	Curvas de compresión a diferentes tratamientos térmicos (extruido, máxima dureza, sobresaturado y sobrevejecido) a una velocidad baja de deformación ( $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ )	124
5.30	Curvas de compresión de una muestra con máxima dureza en sección longitudinal sometido a tres velocidades de deformación	124
6.1	Curva indicando la temperatura de solvus	125
6.2	diagrama de equilibrio indicando la temperatura de solvus	125
6.3	Gráfica doble logarítmica esfuerzo-vel.de deformación a diferentes deformaciones en una muestra extruida con dirección a) longitudinal, b) Transversal	126
6.4	Gráfica doble logarítmica esfuerzo-vel.de deformación a diferentes deformaciones en una muestra sobresaturada con dirección a) longitudinal, b) Transversal	127
6.5	Gráfica doble logarítmica esfuerzo-vel.de deformación a diferentes deformaciones en una muestra máxima dureza con dirección a) longitudinal, b) Transversal	128
6.6	Gráfica doble logarítmica esfuerzo-vel.de deformación a diferentes deformaciones en una muestra sobrevejecida con dirección a) longitudinal, b) Transversal	129

	Contenido	Página
A1	Curva de envejecido para la muestra A a 130°C	142
A2	Curva de envejecido para la muestra B a 130°C	142
A3	Curva de envejecido para la muestra C a 130°C	143
A4	Curva de envejecido para la muestra D a 130°C	143
A5	Curva de envejecido para la muestra E a 130°C	144
A6	Curva de envejecido para la muestra F a 130°C	144
A7	Curva de envejecido para la muestra G a 130°C	145
A8	Curva de envejecido para la muestra H a 130°C	145
A9	Curva de envejecido para la muestra A a 180°C	146
A10	Curva de envejecido para la muestra B a 180°C	146
A11	Curva de envejecido para la muestra C a 180°C	147
A12	Curva de envejecido para la muestra D a 180°C	147
A13	Curva de envejecido para la muestra E a 180°C	148
A14	Curva de envejecido para la muestra F a 180°C	148
A15	Curva de envejecido para la muestra G a 180°C	149
A16	Curva de envejecido para la muestra H a 180°C	149
A17	Curva de envejecido para la muestra A a 230°C	150
A18	Curva de envejecido para la muestra B a 230°C	150
A19	Curva de envejecido para la muestra C a 230°C	151
A20	Curva de envejecido para la muestra D a 230°C	151
A21	Curva de envejecido para la muestra E a 230°C	152
A22	Curva de envejecido para la muestra F a 230°C	152
A23	Curva de envejecido para la muestra G a 230°C	153
A24	Curva de envejecido para la muestra H a 230°C	153
C1	Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras extruidas ensayadas en dirección longitudinal a diferentes velocidades de deformación. A) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ C) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	167
C2	Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras extruidas ensayadas en dirección perpendicular a diferentes velocidades de deformación. A) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ C) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	168
C3	Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras ensayadas de máxima dureza en dirección longitudinal a diferentes velocidades de deformación. A) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ C) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	169
C4	Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras ensayadas de máxima dureza en dirección perpendicular a diferentes velocidades de deformación. A) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ C) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	170
C5	Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras ensayadas sobreenejecidas en dirección longitudinal a diferentes velocidades de deformación. A) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ C) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	171
C6	Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras sobreenejecidas en dirección perpendicular a diferentes velocidades de deformación. A) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ C) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	172
C7	Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras ensayadas sobresaturadas en dirección longitudinal a diferentes velocidades de deformación. A) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ C) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	173
C8	Gráficas de esfuerzo contra deformación de muestras sobresaturadas en dirección perpendicular a diferentes velocidades de deformación. A) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , B) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ C) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	174
C9	Comparación de muestras ensayadas en dirección transversal y longitudinal para muestras extruidas a velocidad a) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , b) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ c) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	175



C10	Comparación de muestras ensayadas en dirección transversal y longitudinal para muestras a máxima dureza a velocidad a) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , b) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ c) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	176
C11	Comparación de muestras ensayadas en dirección transversal y longitudinal para muestras sobresaturadas a velocidad a) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , b) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ c) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	177
C12	Comparación de muestras ensayadas en dirección transversal y longitudinal para muestras sobreenviejecidas a velocidad a) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , b) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ c) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ .	178
C13	Gráficas de compresión mostrando la diferencia entre los cuatro estados de tratamiento térmico, a una velocidad de a) $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ A)longitudinal B)transversal	179
C14	Gráficas de compresión mostrando la diferencia entre los cuatro estados de tratamiento térmico, a una velocidad de a) $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ A)longitudinal B)transversal	180
C15	Gráficas de compresión mostrando la diferencia entre los cuatro estados de tratamiento térmico, a una velocidad de a) $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ A)longitudinal B)transversal	181
C16	Comparación de gráficas de compresión sometidas a tres velocidades $10^{-3}$ , $10^{-2}$ , $10^{-1}$ en dirección longitudinal A)extruida B) máxima dureza	182
C17	Comparación de gráficas de compresión sometidas a tres velocidades $10^{-3}$ , $10^{-2}$ , $10^{-1}$ en dirección longitudinal A)sobresaturada B) sobreenviejecida	183
C18	Comparación de gráficas de compresión sometidas a tres velocidades $10^{-3}$ , $10^{-2}$ , $10^{-1}$ para muestras en dirección transversal A)extruida B) máxima dureza	184
C19	Comparación de gráficas de compresión sometidas a tres velocidades $10^{-3}$ , $10^{-2}$ , $10^{-1}$ para muestras en dirección transversal A)sobresaturada B) sobreenviejecida.	185

# LISTA DE TABLAS

Tabla	Contenido	Página
3.1	Tiempo para el tratamiento de solubilidad de aleaciones de aluminio trabajadas	130
3.2	Temperaturas típicas para el tratamiento de la solubilización de diferentes aleaciones	130
3.3	Valores de las constantes de difusión ( $D_0$ ) y de la energía de activación ( $Q$ ) para difusión en varias soluciones sólidas tanto sustitucional como intersticialmente.	131
3.4	Propiedades mecánicas de una aleación 6063 en función del tratamiento térmico	132
3.5	Propiedades térmicas y eléctricas de una aleación 6063	132
5.1	Durezas durante el tratamiento de envejecido a $130^{\circ}\text{C}$ en las muestras enfriadas a diferentes velocidades	133
5.2	Dureza promedio y desviación estándar de los valores mostrados	134
5.3	Dureza durante el tratamiento de envejecido a $180^{\circ}\text{C}$ en las muestras enfriadas a diferentes velocidades	135
5.4	Dureza promedio y desviación estándar de los valores mostrados	136
5.5	Durezas durante el tratamiento de envejecimiento a $230^{\circ}\text{C}$ en las muestras enfriadas a diferentes velocidades	137
5.6	Dureza promedio y desviación estándar de los valores mostrados	138
5.7	Posición angular ( $2\theta$ ) para los planos $\{311\}$	139

