

# RELAJACION DE TENSIONES EN ZIRCALOY-4

A. M. Cuniberti\*, A. C. Picasso

Instituto de Física de Materiales Tandil, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Pinto 399 (7000) Tandil.

Se realizaron ensayos de tracción y relajación de tensiones en Zry-4 policristalino a temperatura ambiente. Se discute el efecto de la velocidad de carga sobre el comportamiento plástico del material, analizando los diagramas  $\log \sigma$  vs.  $\log \dot{\epsilon}$  a diferentes niveles de deformación. En la evaluación de los datos se tomó en cuenta la contribución que introduce la máquina de ensayo.

## INTRODUCCION

El ensayo de relajación de carga permite obtener información acerca de las propiedades plásticas del material y de las propiedades tanto elásticas como anelásticas de la máquina de ensayo y del material [1].

Diversos autores han estudiado mediante esta técnica el comportamiento del Zr y sus aleaciones, principalmente a alta temperatura [2, 3]. En este trabajo se analizó la influencia que la velocidad de carga tiene en el comportamiento plástico del Zry-4 mediante ensayos de tracción y relajación de tensiones a 293 K. El mecanismo de deformación operativo a temperatura ambiente es el de maclado [4]. Se encontró una expresión para la velocidad de deformación plástica verdadera ( $\dot{\epsilon}_p$ ) del material en función de la tensión aplicada  $\sigma$  y se realizó el análisis según la teoría fenomenológica de Hart [5].

## ARREGLO EXPERIMENTAL

Las experiencias se realizaron utilizando Zircaloy-4 policristalino obtenido según normas ASTM B-351-73. La composición y preparación de las muestras está descrita en [6].

Las probetas fueron del tipo planas con una longitud útil de deformación ( $l_0$ ) de 25.4 mm y una sección de 4 mm de ancho por 0.8 mm de espesor.

Previo a los ensayos de relajación, las muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico para relevar tensiones internas originadas durante su preparación por laminación en frío de 64 %. Para ello, fueron encapsuladas en tubos de pirex con atmósfera de xenón ( $4 \times 10^{-2}$  mb) y mantenidas luego durante dos horas a 780 K.

La máquina de ensayo utilizada fué una Shimadzu Autograph DSS 10T-S con una celda de carga de

5000 N. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente ( $T=293$  K) y consistieron en traccionar las probetas con una velocidad determinada del cabezal  $\dot{\epsilon}_c$  por encima del límite elástico. Alcanzado un dado nivel de deformación, el cabezal fue detenido permitiendo la relajación de la carga a deformación constante [1]. Luego de treinta minutos de relajación, se recargó la muestra hasta alcanzar un grado de deformación mayor, repitiéndose el proceso para cinco niveles de deformación con  $\dot{\epsilon}_{max} \leq 4\%$  (Fig. 1). Las velocidades del cabezal fueron  $6.56 \times 10^{-4}$ ,  $6.56 \times 10^{-5}$  y  $6.56 \times 10^{-6}$   $\text{seg}^{-1}$  para los distintos ensayos.

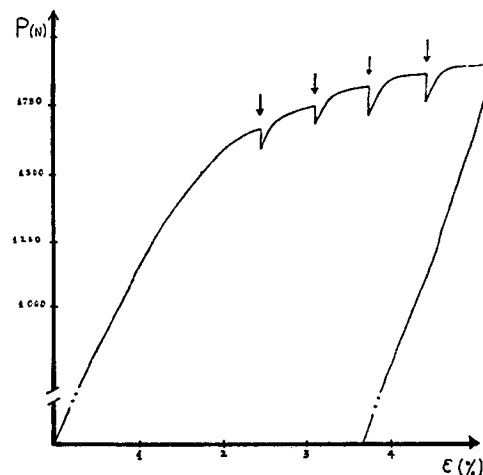


Figura 1: Diagrama típico de tracción P vs  $\Delta l$ . Las flechas indican los puntos en que se produjo la relajación de tensiones.

Durante los ensayos se registraron los diagramas de carga aplicada vs. desplazamiento del cabezal (P vs.  $\Delta l$ ) y carga vs. tiempo (P vs. t) mediante sendos graficadores. Se utilizó el supresor de cero de la máquina de ensayo con lo que la resolución en la

\* Becaria CIC.

lectura de la carga fue de  $\pm 1$  N.

Se estudió la influencia de la máquina mediante ensayos similares a los realizados con la probetas, dejandó relajar a los mismos niveles de carga y durante el mismo tiempo. Se utilizó para ello un bloque de prueba de acero inoxidable.

## RESULTADOS Y DISCUSION

De las curvas  $\log \sigma$  vs.  $\log t$  obtenidas durante la relajación se encontró para todos los casos una relajación del tipo

$$\sigma = \sigma^* t^{-n} \quad \text{para } t > 0 \quad (1)$$

donde  $\sigma$  es la tensión obtenida, con su correspondiente corrección para el área, según el grado de deformación,  $t$  es el tiempo de relajación,  $\sigma^*$  una constante.

Se observó, al comienzo de la relajación, que la curva de ajuste se aparta levemente de los puntos experimentales y que tal apartamiento decae rápidamente, pudiendo atribuirse a la componente anelástica de la muestra. Debido a que esta contribución desaparece para tiempos menores que 10 s, fue despreciada.

En la tabla 1 se presentan los valores de  $n$  obtenidos. Se puede apreciar que  $n$  no varía para los distintos grados de deformación alcanzados y una misma velocidad del cabezal.

**Tabla 1: Valores que toma  $n$  en (1) para distintas velocidades de carga y grados de deformación.**

$\dot{\epsilon}_c$ (s <sup>-1</sup> )	$6.56 \times 10^{-4}$	$6.56 \times 10^{-5}$	$6.56 \times 10^{-6}$
$n$	$1.5 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$8.6 \times 10^{-3}$

Los ensayos de relajación obtenidos para la máquina utilizando el bloque de prueba, mostraron que ésta contribuye en forma apreciable sobre la relajación total de la máquina más probeta. Las curvas de relajación  $P$  vs.  $t$  para la máquina fueron analizadas utilizando el modelo de Maxwell [7], considerando a la máquina como una combinación en serie de una componente elástica y una viscosa. Esta última permite describir la fricción existente entre los distintos componentes de la línea de tracción. La relajación  $P$  vs.  $t$  según el modelo es del tipo:

$$P = P_0 \exp(-t/\tau) \quad (2)$$

donde  $P$  es la carga,  $P_0$  la carga inicial,  $t$  el tiempo de relajación y  $\tau$  un tiempo característico. Esta ecuación ajusta satisfactoriamente las curvas experimentales de relajación para la máquina. De acuerdo con el modelo anterior, el tiempo característico  $\tau$  está relacionado con la constante elástica del resorte  $K$  y con el coeficiente de fricción  $\eta$  por  $\tau = \eta/K$ . La constante elástica de la máquina se obtuvo a partir de los diagramas  $P$  vs.  $\Delta l$  correspondientes a la máquina y resultó  $K = (6.4 \pm 0.3) \times 10^6$  N. s/m.

## EVALUACION DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACION PLASTICA $\dot{\epsilon}_p$ DURANTE LA RELAJACION

La extensión total de  $\Delta l$  para el sistema máquina más probeta en todo instante se puede considerar como una suma de distintos componentes:

$$\Delta l_t = \Delta l_p + \Delta l_e + \Delta l'_e + \Delta l'_a$$

siendo  $\Delta l_p$  la extensión plástica de la muestra,  $\Delta l_e$  la extensión elástica de la muestra,  $\Delta l'_e$  y  $\Delta l'_a$  la extensión elástica y anelástica de la línea de tracción, respectivamente.

La deformación total queda expresada como:

$$\epsilon_t = \epsilon_p + \epsilon_e + \frac{\Delta l'_e}{l} + \frac{\Delta l'_a}{l}$$

donde  $l$  es la longitud instantánea de la muestra.

Durante la relajación se cumple que  $\dot{\epsilon}_t = 0$ , de donde:

$$\dot{\epsilon}_p = -\frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma A}{Kl} - \frac{P}{\eta l}$$

siendo  $E$  el módulo de Young para la muestra,  $K$  la constante elástica de la máquina,  $\eta$  el coeficiente de fricción,  $A$  y  $l$  la sección y longitud instantánea de la probeta.

Utilizando (1) se obtuvo  $\dot{\epsilon}_p = \dot{\epsilon}_p(\sigma)$  como:

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{n}{K^* \sigma^{1/n}} \sigma^{(n+1)/n} - \frac{A}{\eta l} \sigma \quad (3)$$

con  $1/K^* = 1/E + A/Kl$ , siendo  $K^*$  la elasticidad combinada de la probeta más la máquina y  $E = 4.9 \times 10^5$  MPa para el Zry-4 a temperatura ambiente. Se consideró  $K^*$  constante puesto que el error cometido al no considerar los valores instantáneos de  $l$  y  $A$ , resulta menor que el 3%. Así pues, con  $l_0$  y  $A_0$ , resulta

$$1/K^* = 2.2 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}.$$

En la Tabla 2 se muestran los valores calculados de los coeficientes de la ecuación (3) para cada velocidad del cabezal y nivel de deformación alcanzado. La Fig. 2 muestra las curvas obtenidas de acuerdo con estas expresiones para cada una de las velocidades del cabezal. Se observa que a  $\dot{\epsilon}_c = \text{constante}$ , las curvas mantienen su forma para los distintos niveles de deformación. Se encontró que las curvas pueden ser trasladadas según una recta de pendiente  $\mu = \Delta \log \sigma / \Delta \log \dot{\epsilon}_p$  para superponerse unas con otras; el valor de  $\mu$  calculado para cada familia de curvas es -0.139 para la (a), -0.032 para la (b) y -0.084 para la (c). Tal recta de traslación fue obtenida también para Zry-4 a  $T \geq 473 \text{ K}$  [3]. A partir de estos resultados puede discutirse la existencia de una ecuación de estado plástico del material a 293 K, de acuerdo con la teoría fenomenológica dada por Hart [5].

La influencia de la velocidad del cabezal sobre el comportamiento del material durante la relajación puede verse también en la Fig. 3. Se encuentra que  $\dot{\epsilon}_p$  decrece hasta alcanzar un "plateau" en  $\dot{\epsilon}_p = 0$ . Considerando que cuando  $\dot{\epsilon}_p = 0$ , la tensión efectiva  $\sigma_{ef} = \sigma - \sigma_i$  ( $\sigma_i$ : tensión interna) es nula, se obtuvieron valores de  $\sigma_i$  a partir de (3). La Tabla 3 muestra los valores calculados. Si bien en la Fig. 3 se observa que para  $\dot{\epsilon}_c = 6.56 \times 10^{-6} \text{ seg}^{-1}$ , el "plateau" se alcanza para un valor de  $\sigma/\sigma^*$  más alto que para las otras dos velocidades, no se observa una variación apreciable en  $\sigma_i$  con  $\dot{\epsilon}_c$ . Esto es indicativo de que el material

alcanza un mismo "estado de dureza" a través de historias previas diferentes.

## CONCLUSIONES

Mediante ensayos de tracción y relajación de tensiones realizados con Zry-4 policristalino a 293K se obtuvieron los siguientes resultados:

- 1- El aporte de la línea de tracción de la máquina de ensayos utilizada a la relajación total es importante y puede ser evaluado en términos del modelo de Maxwell, considerando la línea de tracción como la combinación en serie de una componente elástica y otra de fricción. Esta última en general no es considerada.
- 2- Se obtuvo una expresión para la velocidad de deformación plástica verdadera del material del tipo  $a\sigma^M + b\sigma$ , donde a es función de la elasticidad combinada máquina más probeta, b del coeficiente de fricción propio de la máquina de ensayos y M un exponente independiente del grado de deformación previo de la muestra ( $\epsilon \leq 4\%$ ) pero que varía con la velocidad de carga  $\dot{\epsilon}_c$ .
- 3- Los diagramas  $\text{Log } \sigma$  vs.  $\text{Log } \dot{\epsilon}_p$  a distintos grados de deformación se presentan como una familia de curvas de igual forma para cada velocidad de carga. Es posible lograr la superposición de unas con otras mediante una traslación; los cálculos realizados indican que la pendiente de tal recta de traslación varía con la velocidad de carga.

Tabla 2: Valores de los coeficientes de la ecuación (3)  $\dot{\epsilon}_p$  ( $\sigma$ ) obtenidos experimentalmente.

$$a = n/K^* \sigma^{*1/n}, \quad b = A/\eta l, \quad M = (n+1)/n$$

$\epsilon_p$ (%)	$\dot{\epsilon}_c = 5.65 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$			$\dot{\epsilon}_c = 5.65 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$			$\dot{\epsilon}_c = 5.65 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$		
	$a \times 10^{-5}$	$b \times 10^{-8}$	M	$a \times 10^{-5}$	$b \times 10^{-8}$	M	$a \times 10^{-5}$	$b \times 10^{-8}$	M
0.85	5.97	8.14	66.36	5.90	4.42	71.92	3.12	6.12	116.74
1.57	6.35	6.13	"	5.94	3.11	"	3.33	4.28	"
2.35	6.58	4.54	"	6.13	1.69	"	3.49	2.69	"
3.10	6.74	3.81	"	6.29	0.76	"	3.60	1.77	"
3.87	6.88	3.17	"				3.64	1.17	"

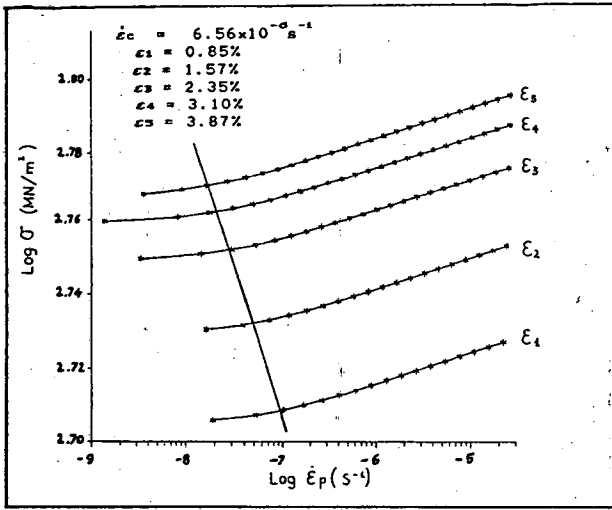


Figura 2 (a)

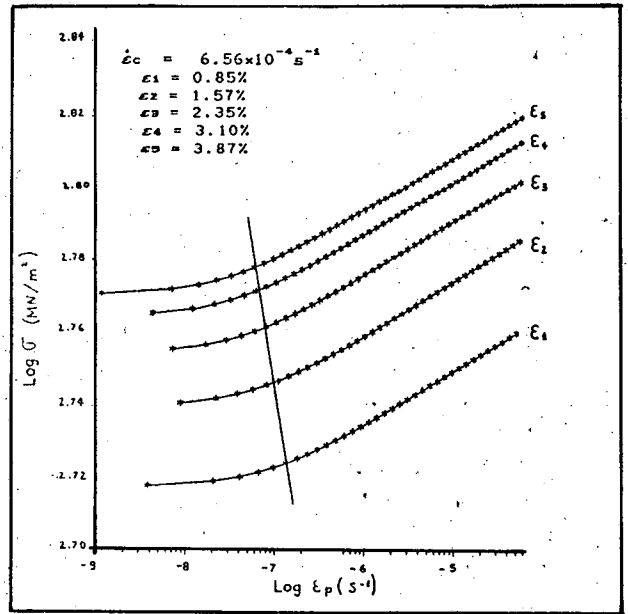


Figura 2 (c)

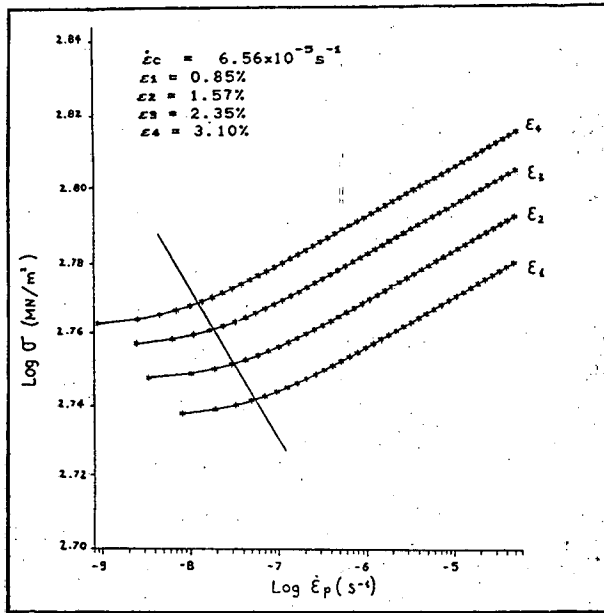


Figura 2 (b)

Figura 2: Log  $\sigma$  vs Log  $\dot{\epsilon}_p$  obtenido a partir de la expresión (3) utilizando los coeficientes de la Tabla 2 y para tres velocidades de carga.

Tabla 3: Valores de tensión interna calculados por (3) para  $\dot{\epsilon}_p = 0$

$\epsilon$ (%)	$\dot{\epsilon}_c = 5.65 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$		$\dot{\epsilon}_c = 5.65 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$		$\dot{\epsilon}_c = 5.65 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$	
	$\sigma_i/\sigma_0$	$\sigma_i$ (MN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_i/\sigma_0$	$\sigma_i$ (MN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_i/\sigma_0$	$\sigma_i$ (MN/m <sup>2</sup> )
0.85	0.904	520	0.903	544	0.947	506
1.57	0.899	548	0.899	557	0.944	535
2.35	0.895	566	0.891	569	0.940	560
3.10	0.891	579	0.880	576	0.936	573
3.87	0.889	587			0.933	582

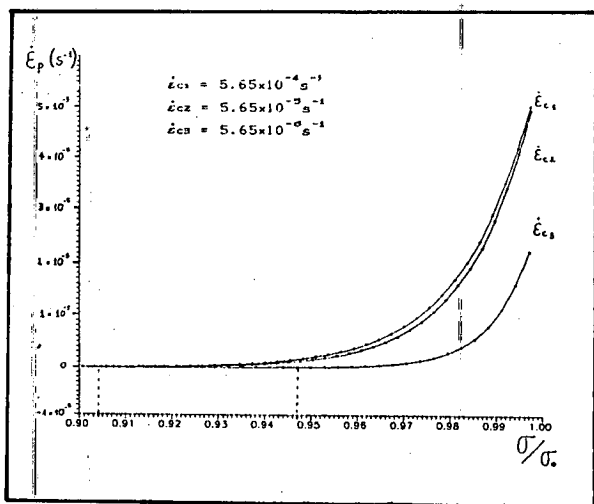


Figura 3: Variación de la velocidad de deformación plástica en función de la carga para tres velocidades de carga y el nivel mas bajo de deformación ( $\epsilon = 0.85\%$ ).

## REFERENCIAS

- [1] D. Lee and E. W. Hart. *Met. Trans.* 2 (1971), 1245.
- [2] F. H. Huang, G. P. Sabol, S. G. Mc Donald and Che-yu Li, *J. Nucl. Mater.* 79 (1979), 214.
- [3] R. L. Kusseyan et al. . *J. Nucl. Mater.* 98 (1981), 86.
- [4] A. M. Garde and R. E. Reed-Hill. *Zirconium in Nuclear applications (ASTM, STP 551, 1974)* 75.
- [5] E. W. Hart, Che-Yu Li, H. Yamada and G. L. Wire. "Constitutive Equations in Plasticity". ed. A. Argon (MIT Press, 1985), pag. 149.
- [6] F. Póvolo y A. J. Marzocca. *J. Nucl. Mater.* 97 (1981), 323.
- [7] A.S. Nowick and B. S. Berry. "Anelastic Relaxation in Crystalline Solids". 1972, New York, Academic Press.

CEILAP  
 CITEFA - CONICET  
 ZUFRIATEGUI Y VARELA  
 1603 - VILLA MARTELLI  
 REPUBLICA ARGENTINA