

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1981

Comportamiento en tracción de vainas de zircaloy - 4 del tipo MZFR

R. Bordoni* J. A. Casario* C. Coroli* F. Povoletto**

El conocimiento del comportamiento mecánico de las vainas de Zry-4 utilizadas en los elementos combustibles (E.C.) y su variación con las diferentes sollicitaciones termomecánicas, es de fundamental importancia, tanto para el diseño como para los códigos de simulación del E.C. en condiciones reales de servicio.

Si bien el comportamiento mecánico del material sólo se puede establecer efectivamente mediante la realización de experiencias que establezcan diferentes tipos de sollicitaciones mecánicas (creep, explosión, etc.), los ensayos de tracción en condiciones uniaxiales y sus resultados estadísticos, han sido utilizados y se utilizan en las especificaciones para la fabricación del E.C.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se efectuaron ensayos de tracción, a diferentes temperaturas, en vainas de Zry-4 del tipo MZFR. El procedimiento experimental y los resultados obtenidos se describen a continuación.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las probetas de 120 mm de longitud, fueron cortadas de tubo de Zry-4 que se utilizan en la fabricación de E.C. prototipos MZFR. Estos tubos fueron fabricados, de acuerdo a las especificaciones MZFR, por Mannesmannrohren-Werke y no se cono-

* Departamento de Combustibles Nucleares - Gerencia de Desarrollo - C.N.E.A.

** Departamento de Materiales - Gerencia de Desarrollo - C.N.E.A.

a) **Reticulación ("crosslinking") del aislante de conductores eléctricos:** fue instrumentado, en estos días, un contraste de investigación entre el IPEN y la Pirelli del Brasil, para desarrollar la tecnología de irradiación electrónica de cables a fin de mejorar las propiedades del aislante (fundamentalmente la resistencia a la temperatura y al envejecimiento).

b) **Pre-tratamiento, por irradiación electrónica, de la pulpa de celulosa:** de acuerdo con investigaciones recientes realizadas por el Departamento de Ciencias Aplicadas de la Universidad de New York (3), la irradiación previa de la pulpa de celulosa (preparada a partir de residuos de ese material) con un haz de electrones, aumenta en cerca de 15 % el rendimiento de glucosa del proceso de hidrólisis ácida, tornándolo factible tanto en sus aspectos técnicos como económicos. La glucosa así obtenida puede emplearse como materia prima en la industria de alimentos y derivados petroquímicos (incluyendo la producción de etanol como combustible). Actualmente, en los laboratorios del CARREI, están siendo implementadas técnicas para dosaje de glucosa y para producir la hidrólisis ácida de pulpas celulósicas.

c) **Curado instantáneo de pinturas:** es sabido que la irradiación con haz de electrones constituye una técnica ideal para el curado instantáneo de pinturas aplicadas sobre todo tipo de paneles, pues se eliminan los problemas de espacio y contaminación del aire asociados a las instalaciones clásicas de secado en hornos. El CARREI investigará en breve la posibilidad de aplicar esa tecnología para mejorar las propiedades mecánicas y la terminación de superficies de fibrocemento, especialmente para el caso de chapas lisas.

Para ello serán ensayadas diversas clases de pinturas, métodos de aplicación para impregnación de las superficies y técnicas de irradiación. Participarán de este proyecto, potenciales interesados de las industrias de pinturas y del fibrocemento.

REFERENCIAS

1.- Castagnet, A. C., et al. "Projeto de câmara de irradiação para um acelerador industrial de elétrons de 1,5 MeV e 25 mA. Informação IEA N° 28, São Paulo, Marco 1974.

2. - M. I. T. Report to U.S. Natinal Science Foundation. Dec. 1977 on "High Energy Electron Radiation of Wastewater Liquid Residuals". Grant ENV 74 13016.

3. - Brenner, W., et al. "Radiation Pretreatments for Optimizing the Sugar Yield in the Acid Hydrolysis of Waste Celulose". Department of Applied Science New York University, New York, 1979. ●



asinel

SOCIEDAD ANONIMA

**PROVEEDOR DE
COMPONENTES NUCLEARES**



**Tecnología de alto nivel en
Instrumentación y Control
Suministros Electromecánicos**

ASINEL S.A. cumplió exitosamente con el compromiso contraído con CNEA en la provisión parcial del sistema de instrumentación dentro y fuera del núcleo del Reactor CANDU a ser instalado en Embalse, Córdoba.

La confianza dispensada por la CNEA en habernos calificado para el desarrollo, fabricación y montaje de los diferentes componentes: amplificadores, fuentes, módulos NIM, chasis BIN, paneles, racks, monitores de contaminación, etc. podrá ser reforzada aún más en los próximos proyectos, ofreciendo así:

- Evaluación de proyecto y estudios de
 - Tecnología.
 - Ingeniería básica.
 - Ingeniería de detalle.
 - Adquisiciones y contrataciones.
 - Desarrollo, fabricación y montaje.
- Supervisión de calibración, pruebas y puesta en marcha.
- Dirección, coordinación y control de proyecto.
- Mantenimiento y asistencia técnica.

ASINEL S.A. ALTO NIVEL EN TECNOLOGIA DE INSTRUMENTACION Y CONTROL

PIANTA INDUSTRIAL Camino Gral. Belgrano, Km. 27,5

(1884) Berazategui - Buenos Aires

OFICINA COMERCIAL Belgrano 615 - 5° Piso - Of. «K»

(1092) Capital Federal

Tel. 33-7279.

COMPOSICION QUIMICA DEL LINGOTE

ALEACION [%]

Sn	1.38
Fe	0.20
Cr	0.09
Fe + Cr	0.29

IMPUREZAS [ppm]

Al	< 35	Mn	25
B	0.2	N	29
C	156	Si	62
Cd	< 0.2	Ti	< 20
Cc	< 5	U	0.86
Co	< 10	W	< 25
Cu	14.66	Ni	< 35
H	9.66	O	0.13%
Hf	49		

GASES EN LOS TUBOS [ppm]

O	1285
H	8
N	40

COEFICIENTE DE REGRESION

Temp.	Probeta	CR _n	CR _{n1}	CR _{n2}
250°C	T-55	0.9954	0.9994	0.9983
	T-56	0.9941	0.9996	0.9984
	T-57	0.9931	0.9968	0.9957

300°C	T-45	0.9865	0.9959	0.9875
	T-46	0.9873	0.9987	0.9975
	T-47	0.9917	0.9970	0.9909

350°C	T-48	0.9824	0.9963	0.9918
	T-49	0.9874	0.9995	0.9857
	T-50	0.9882	0.9963	0.9703

400°C	T-51	0.9622	0.9947	0.9758
	T-52	0.9793	0.9983	0.9869
	T-53	0.9794	0.9986	0.9780

450°C	T-54	0.9479	0.9629	0.9872
	T-62	0.9707	0.9948	0.9832
	T-63	0.9648	0.9929	0.9815

Tabla I

Tabla II

MODULO DE YOUNG EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

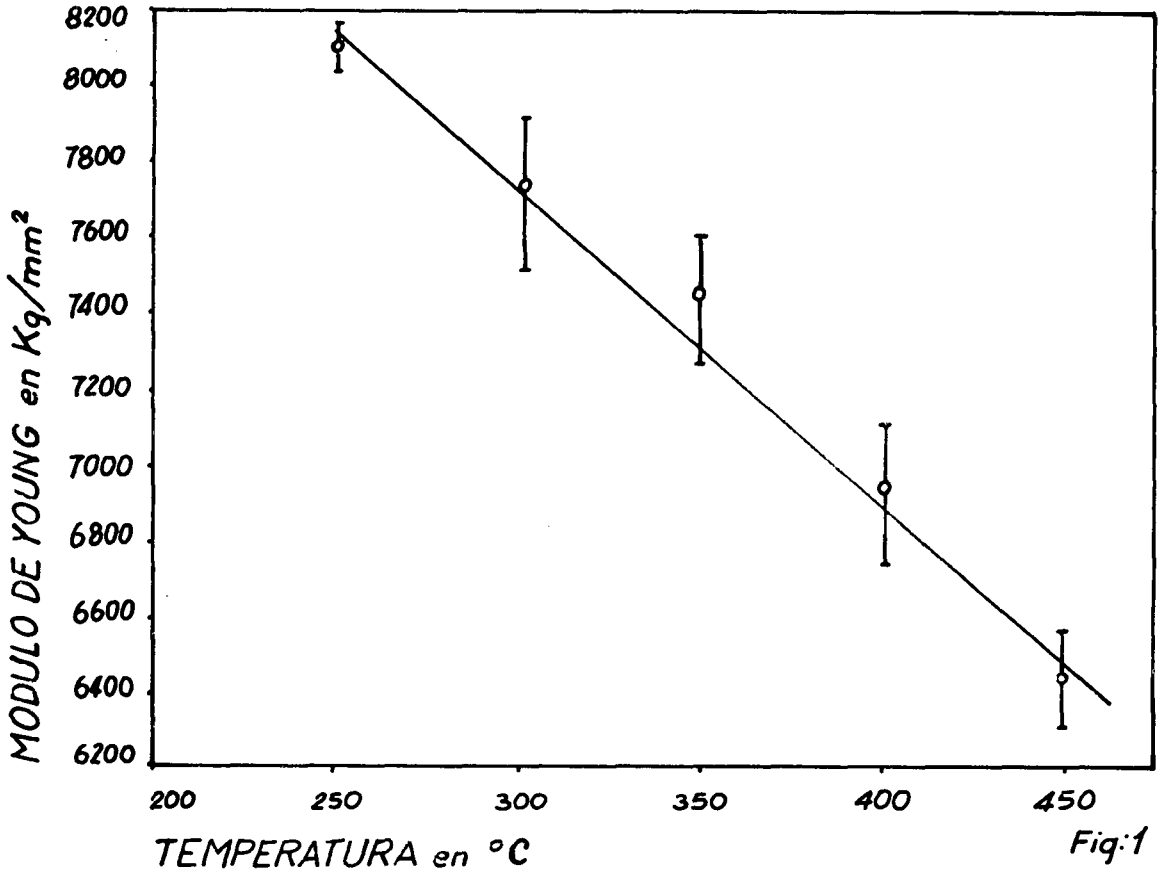


Figura 1

Representación gráfica de los valores medios del módulo de YOUNG, con su desviación standard en la función de la temperatura. La recta graficada fue obtenida por regresión por cuadrados mínimos a partir de dichos puntos.

cen los detalles de fabricación, excepto que fueron llevados a dimensiones finales por trabajo en frío y luego relevados de tensiones, la composición química del lingote de partida y la concentración de gases en los tubos terminados están dadas en la tabla I.

Los ensayos se realizaron en una máquina Olsen, con una velocidad de deformación de 0,5 %/min. La variación durante el ensayo de la temperatura no fue superior de +3°C. Las deformaciones fueron medidas con extensómetros mecánicos sobre una longitud de referencia de 100 mm.

RESULTADOS

Suponiendo válida la ley de Hooke en el rango elástico, y aplicando regresión lineal por cuadrados mínimos se determinó el módulo de Young E, para cada probeta. Por este mismo método estadístico, se ajustaron los valores de E en función de la temperatura, y se obtuvo la siguiente expresión:

$$E \text{ (Kg/mm}^2\text{)} = 10260 \cdot 4 - 8.366 T \quad (1)$$

Donde T se mide en grados centígrados. El coeficiente de regresión (CI es de 0,9946. en la figura 1, se pueden observar los puntos experimentales y la expresión 1.)

En el rango plástico se ha supuesto que la ley que relaciona la tensión verdadera con la deformación plástica verdadera está dada por

$$\bar{\nu} = K \epsilon_p^n \quad (2)$$

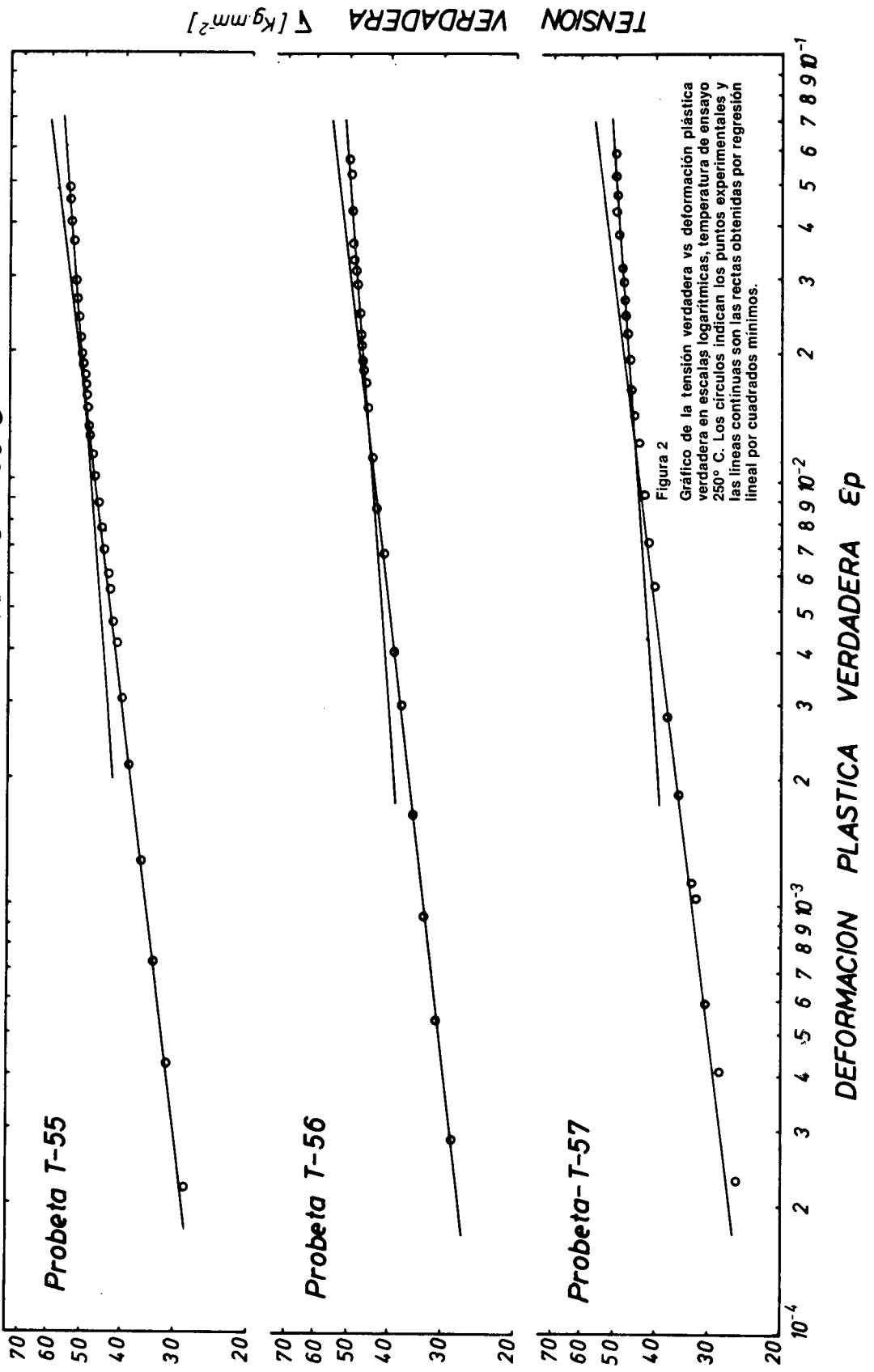
donde K se lo denomina coeficiente de resistencia y a n se lo denomina exponente de endurecimiento o velocidad de endurecimiento por deformación.

Si se aplica el logaritmo a ambos miembros de la igualdad (2) se obtiene:

$$\log \bar{\nu} = \log K + n \cdot \log \epsilon_p \quad (3)$$

En las figuras 2 y 3 fueron graficados los valores de $\log \bar{\nu}$ vs. $\log \epsilon_p$. Dichos valores ajustan mejor a dos rectas que sólo a una. Por lo tanto se ha dividido la curva en dos zonas: la de la izquierda que denominamos zona I y la de la derecha que denominamos zona II. Los valores de tensión y deforma-

TEMPERATURA DE ENSAYO = 250°C



TEMPERATURA DE ENSAYO = 450°C

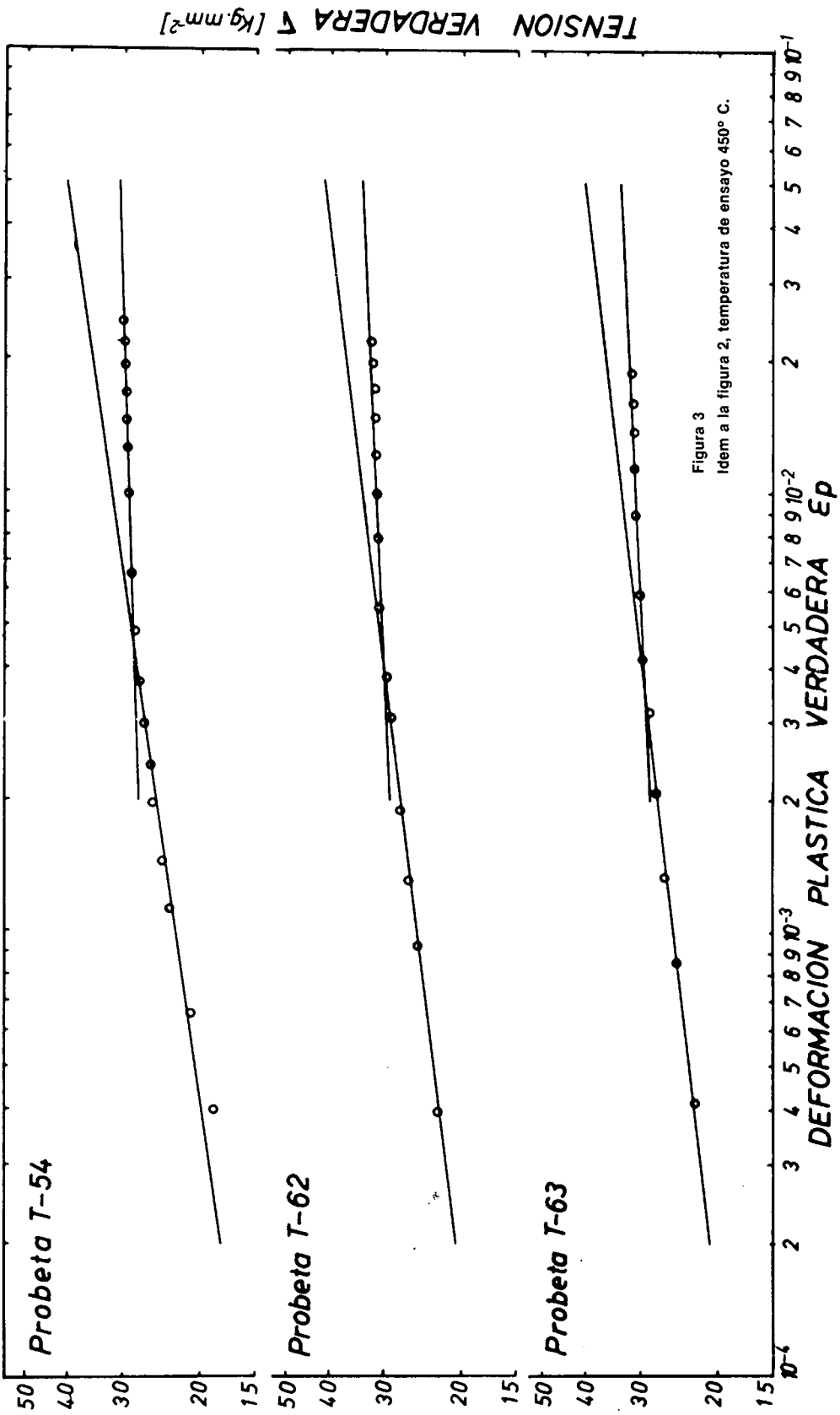


Figura 3
Idem a la figura 2, temperatura de ensayo 450° C.

COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

zona 1

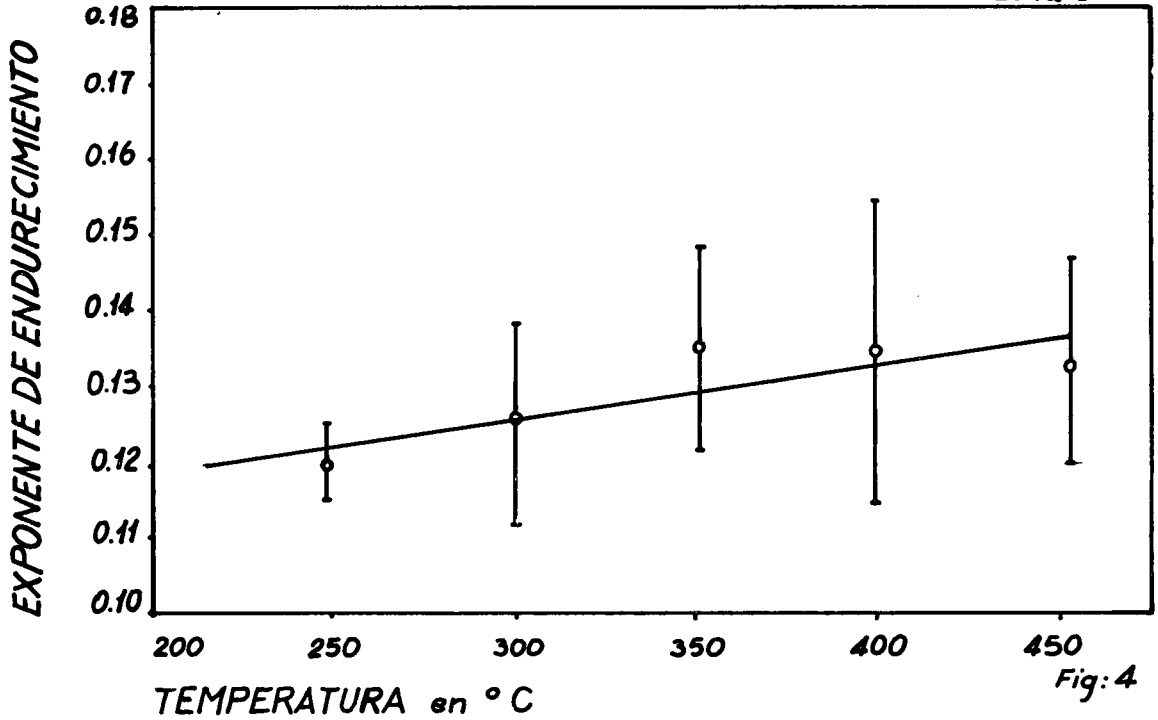


Fig: 4

Figura 4

Exponente de endurecimiento (n_1) en función de la temperatura, para la zona I. La recta se obtuvo por regresión por cuadrados mínimos a partir de dichos puntos.

Figura 5

Exponente de endurecimiento (n_2) su función de la temperatura para la zona II, la curva es obtenida por la expresión (7)

COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

zona 2

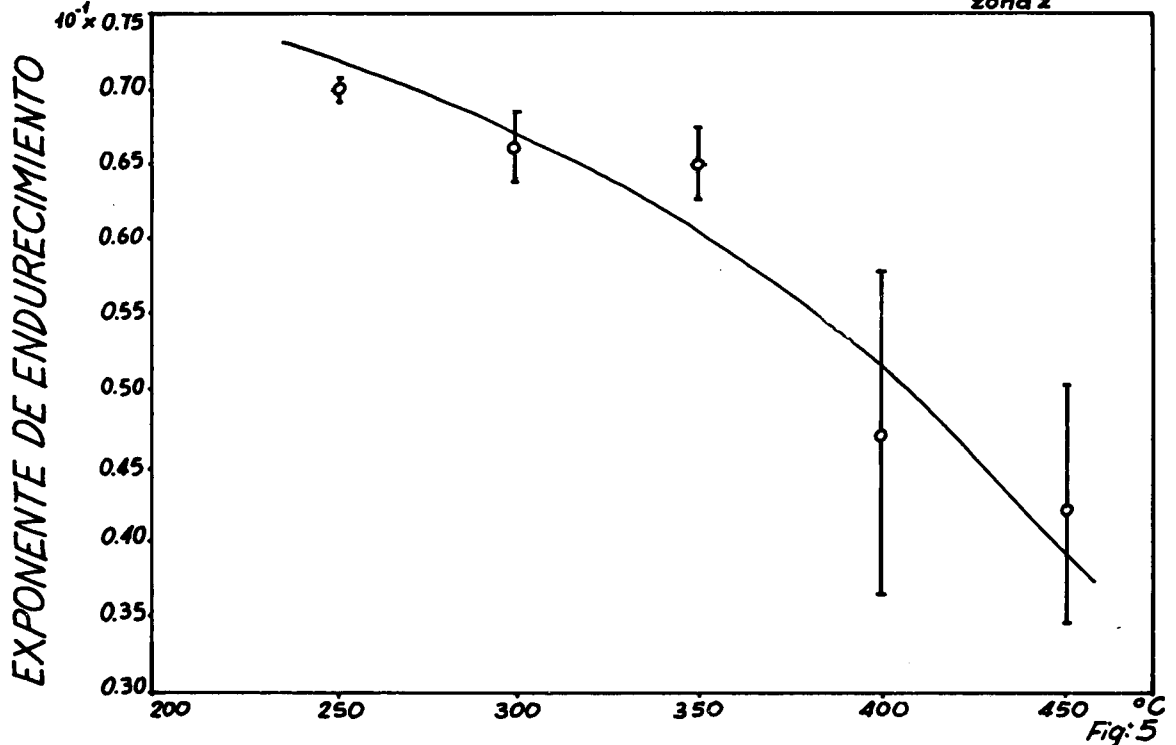


Fig: 5

COEFICIENTE DE RESISTENCIA EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

Zona 1

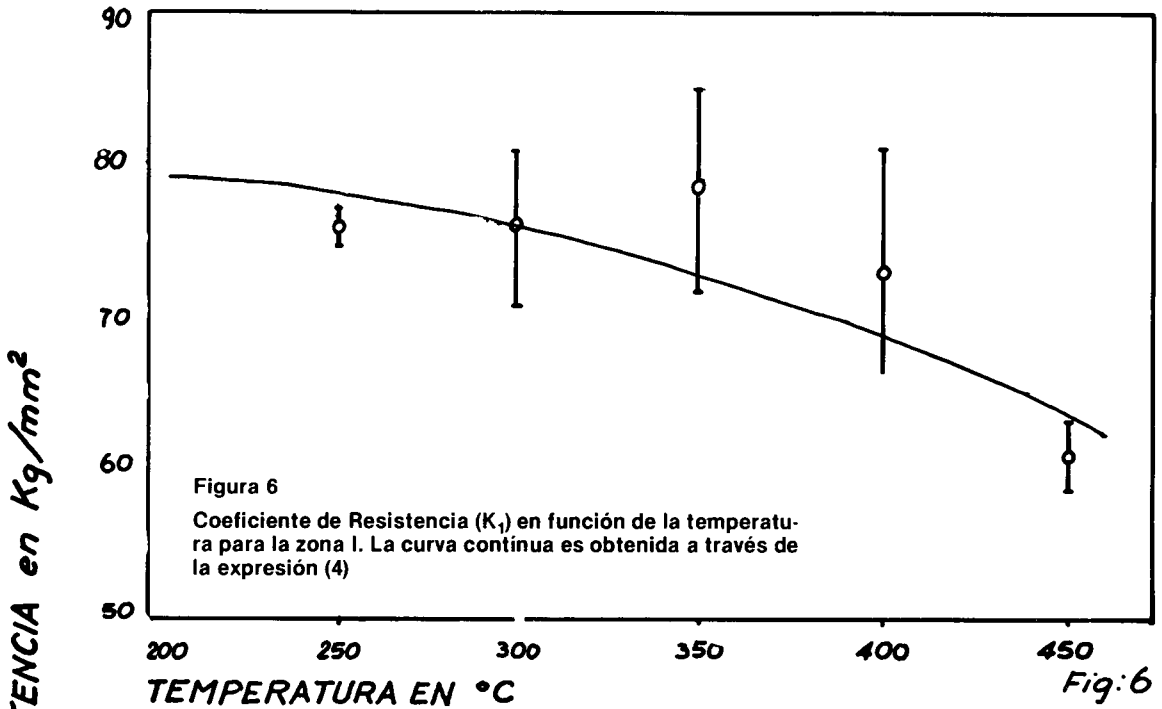


Fig:6

Zona 2

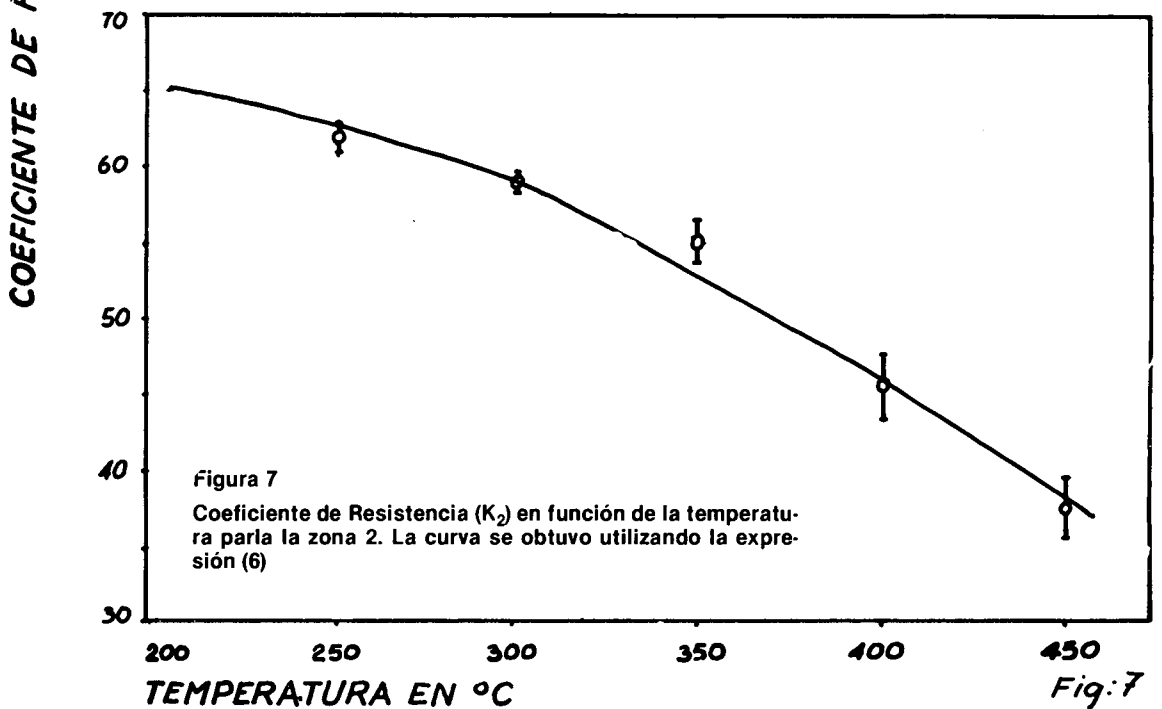


Fig:7

ϵ_{trans} EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

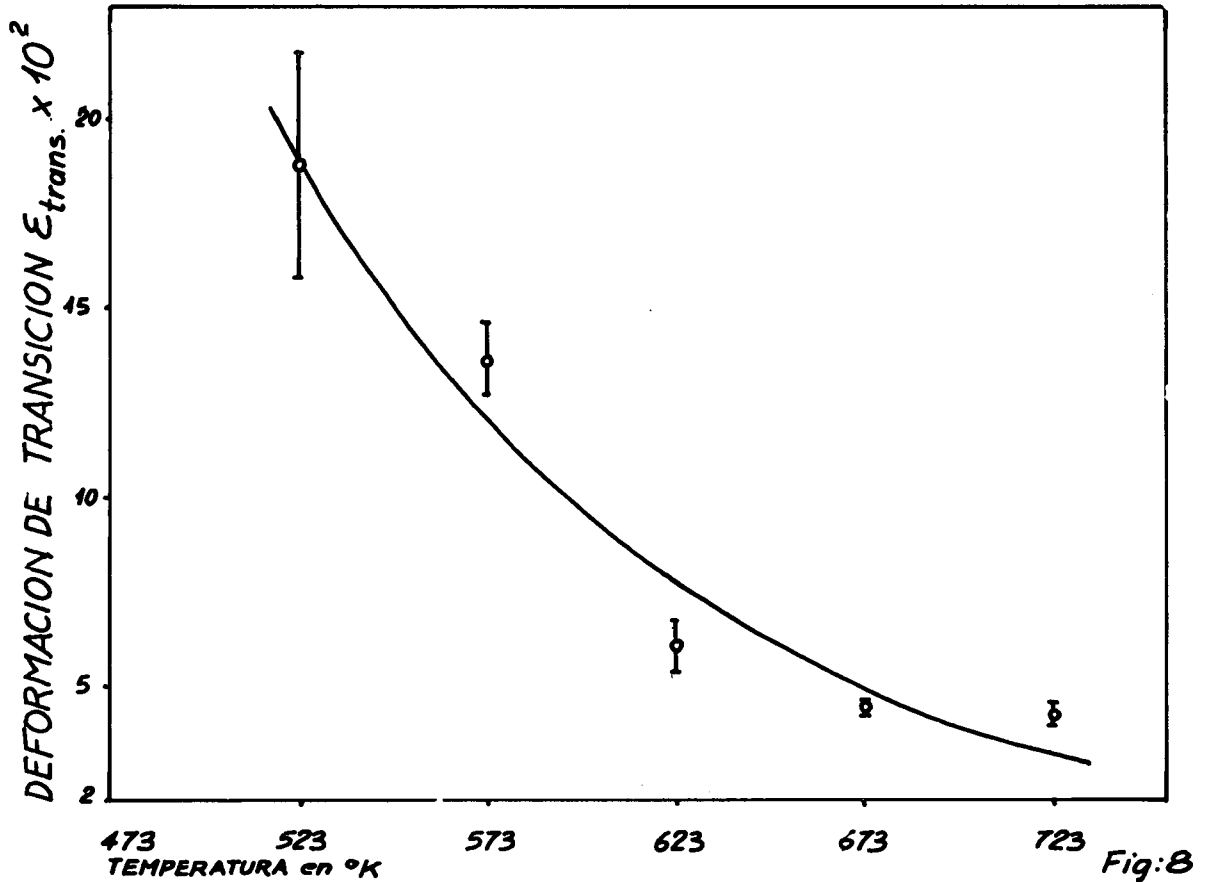


Fig:8

Figura 8

Se grafican los valores de la deformación plástica verdadera de transición en función de la temperatura. La curva se obtuvo a través de la expresión (8)

ción para los cuales las rectas se cortan, los denominamos: tensión de transición ($\sigma_{trans.}$) y deformación de transición ($\epsilon_{p trans}$) respectivamente.

Se determinaron los parámetros K_1 y n_1 de la recta que ajusta los valores experimentales en la zona I y los K_2 y n_2 de la zona II. Estos valores junto con la deformación plástica verdadera de transición se pueden observar en las figuras 4, 5, 6, 7 y 8. También están graficadas las funciones que ajustan estos valores. Las expresiones de dichas funciones son las siguientes:

$$K_1 (\text{Kg} \cdot \text{mm}^{-2}) = 135 [1 + (\frac{T}{741})^4]^{-1} - 55.5 \quad (4)$$

$$n_1 = 0.01043 + 0.00007T \quad (5)$$

$$K_2 (\text{Kg} \cdot \text{mm}^{-2}) = 67 [1 + (\frac{T}{481})^4]^{-1} \quad (6)$$

$$n_2 = 0.189 [1 + (\frac{T}{470})^4]^{-1} - 0.113 \quad (7)$$

$$\epsilon_{p trans} = 2.11 e^{-\frac{09 \times 10^{-2} T}{^\circ K}} \quad (8)$$

Todas las temperaturas son en grados centígrados salvo en la ecuación 8 donde se utiliza °K.

También se ha determinado la tensión para una deformación de 0,2%, la máxima resistencia a la tracción U.T.S., la deformación uniforme hasta la inestabilidad, la deformación total porcentual sobre una longitud de referencia de 50 mm, la reducción de área, de diámetro, y de espesor de pared en la zona de la fractura, los valores correspondientes a estos parámetros están graficados en las figuras 9, 10, 11, 12, 18, 19, 20 y 21.

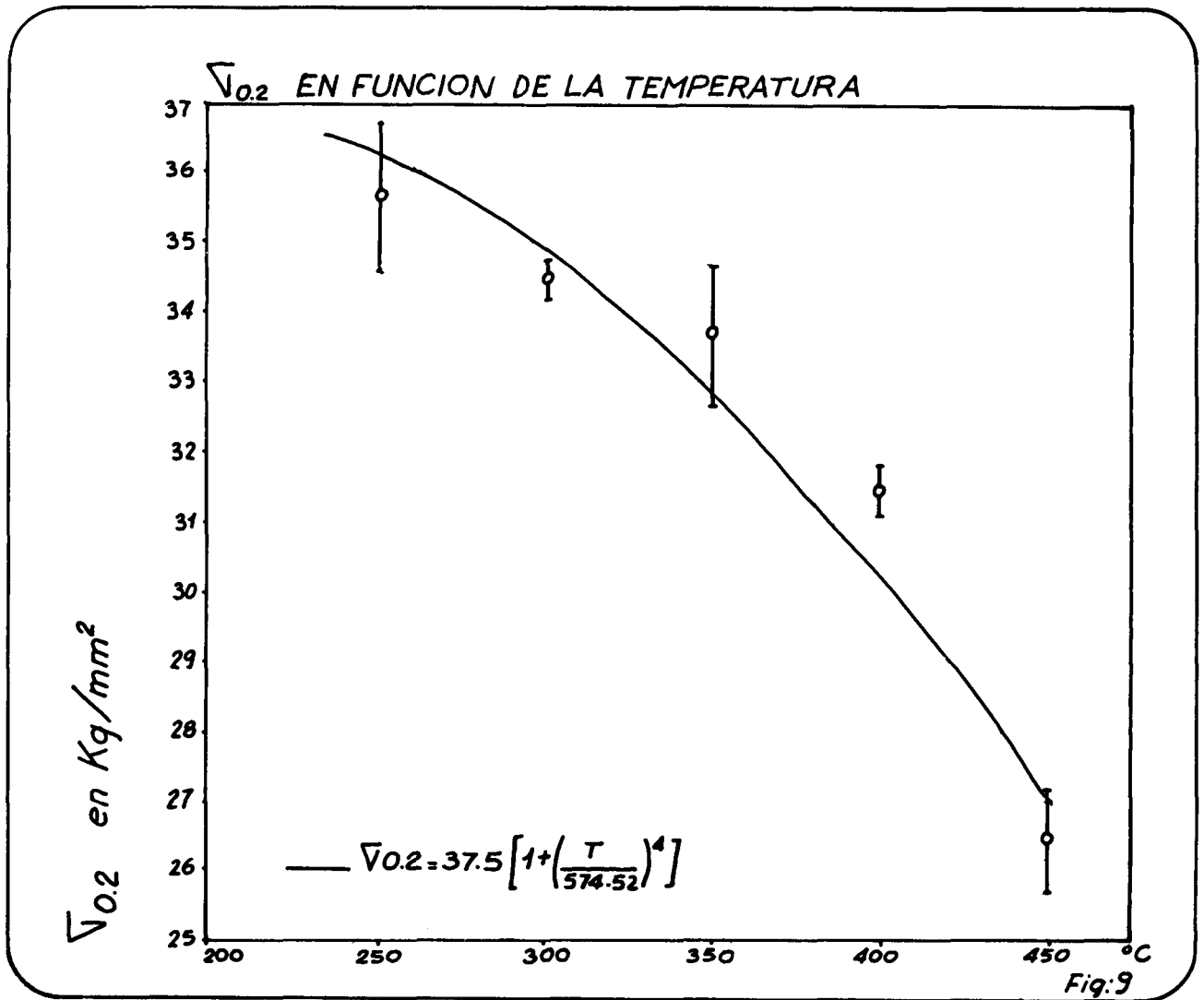


Figura 9

Tensión necesaria para producir una deformación del 0,2 por ciento en función de la temperatura. La curva continua es obtenida por la expresión

$$\sigma_{0.2} = 37.5 \left[1 + \left(\frac{T}{574.52} \right)^4 \right]$$

DISCUSION

R. L. Miller⁽⁶⁾ utilizando los valores experimentales de las referencias (1-5), propone la siguiente ley para el módulo de Young valida en el rango de temperaturas de la fase alfa de zry.

$$E (\text{Kg} \cdot \text{mm}^{-2}) = 10038.8 - 6.1079T \quad (9)$$

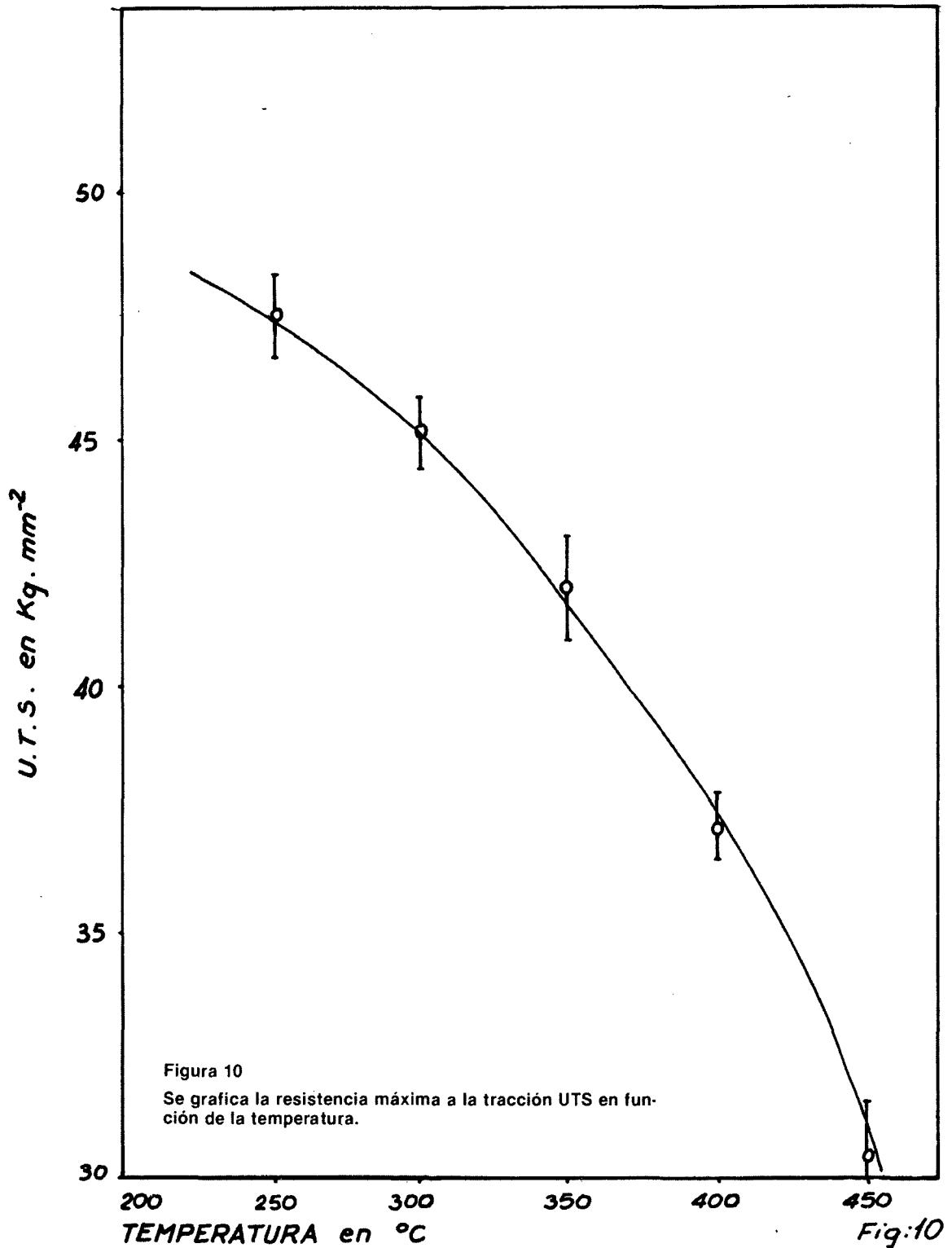
donde T esta expresada en grados centígrados.

En el presente trabajo la expresión que ajusta los valores experimentales obtenidos, en el rango de temperaturas de 250°C a 450°C, es la ecuación (1). La ordenada al origen de esta expresión es coincidente con la de la ecuación (9) dentro de la dispersión de los datos encontrados en este tipo de trabajos. En cuanto a la pendiente, se observa una diferencia de aproximadamente un 35% mayor, posiblemente debido a la textura del material.

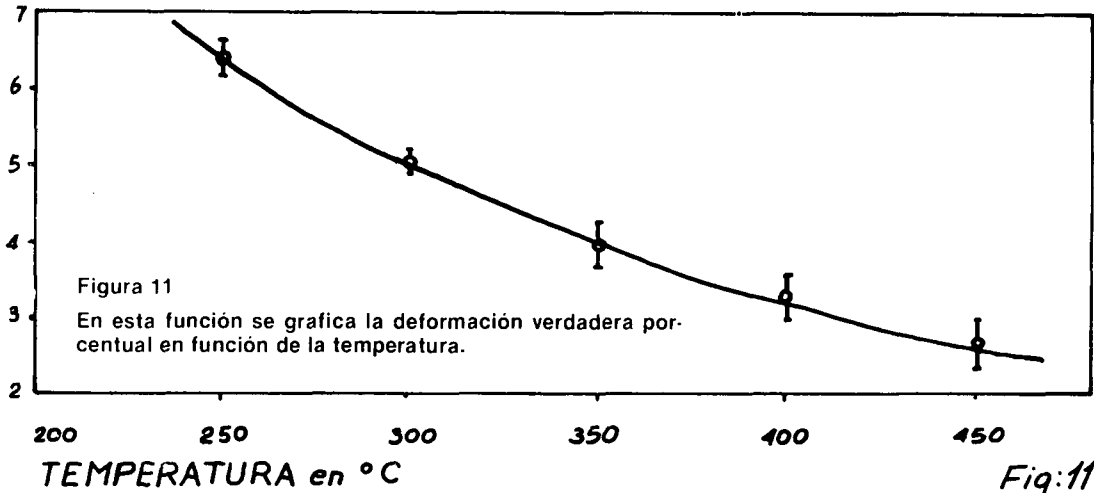
En el rango plástico hemos supuesto que el material obedece a una ley del tipo de la ecuación (2). Se utilizó esta representación por las siguientes razones: por ser la expresión empírica generalmente utilizada en la literatura, ser de un tratamiento sencillo, y como se vera más adelante, ajustar muy bien a los datos experimentales, figuras 22 y 23.

Graticando los valores $\bar{\nu}$ y ϵ_p en escala logarítmica se debería obtener una recta, ecuación (3). Estos gráficos son los correspondientes a las figuras 2 y 3, en ellas se observa que los datos experimentales ajustan mejor a dos rectas. Esto indicaría un doble comportamiento del material al deformarse plásticamente, este tipo de comportamiento fue encontrado en distintos materiales (7, 8, 9). A. M. Garde y R. E. Reed Hill encuentran doble y triple comportamiento en la deformación plástica, dependiendo de la temperatura de ensayo y de la orientación de corte respecto de la laminación en probetas planas de zirconio.

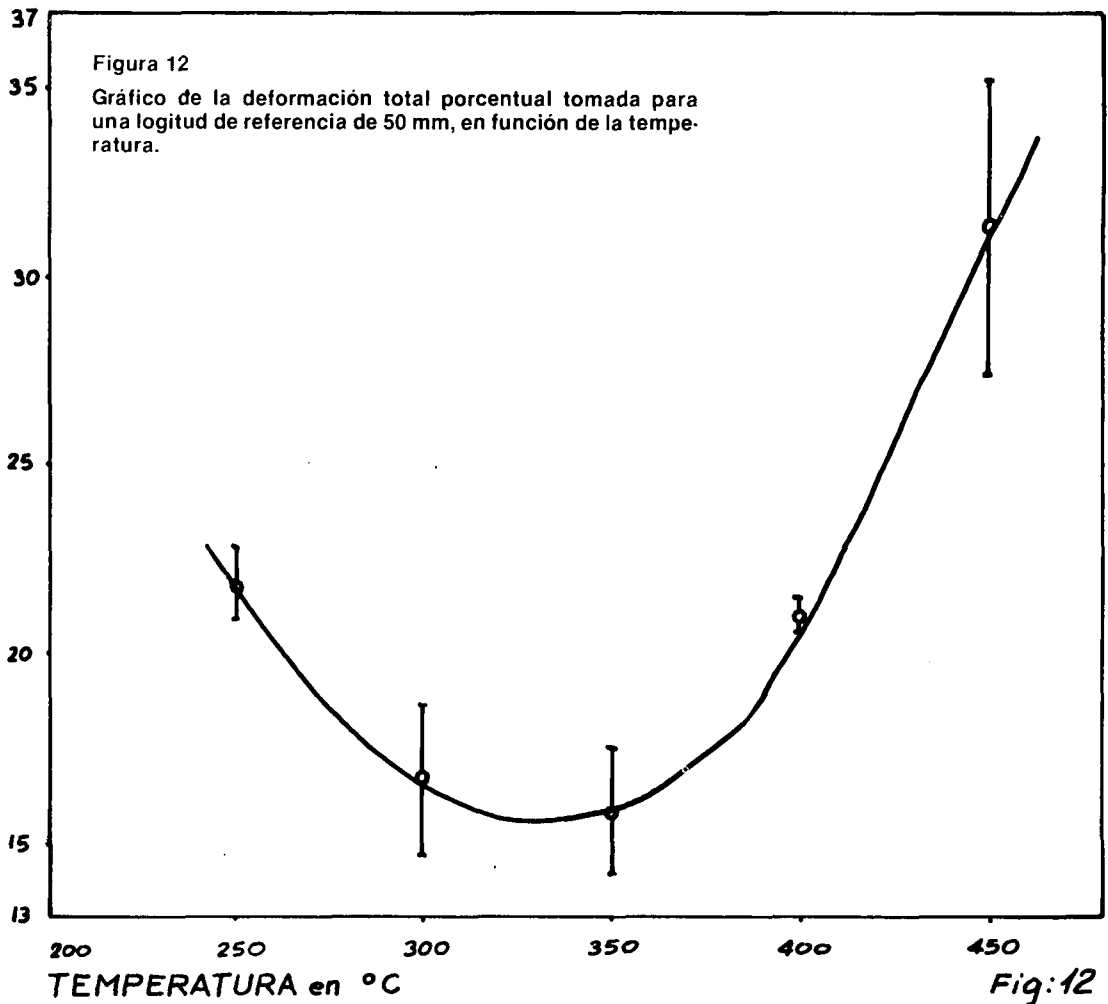
U.T.S. EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA



DEFORMACION UNIFORME EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

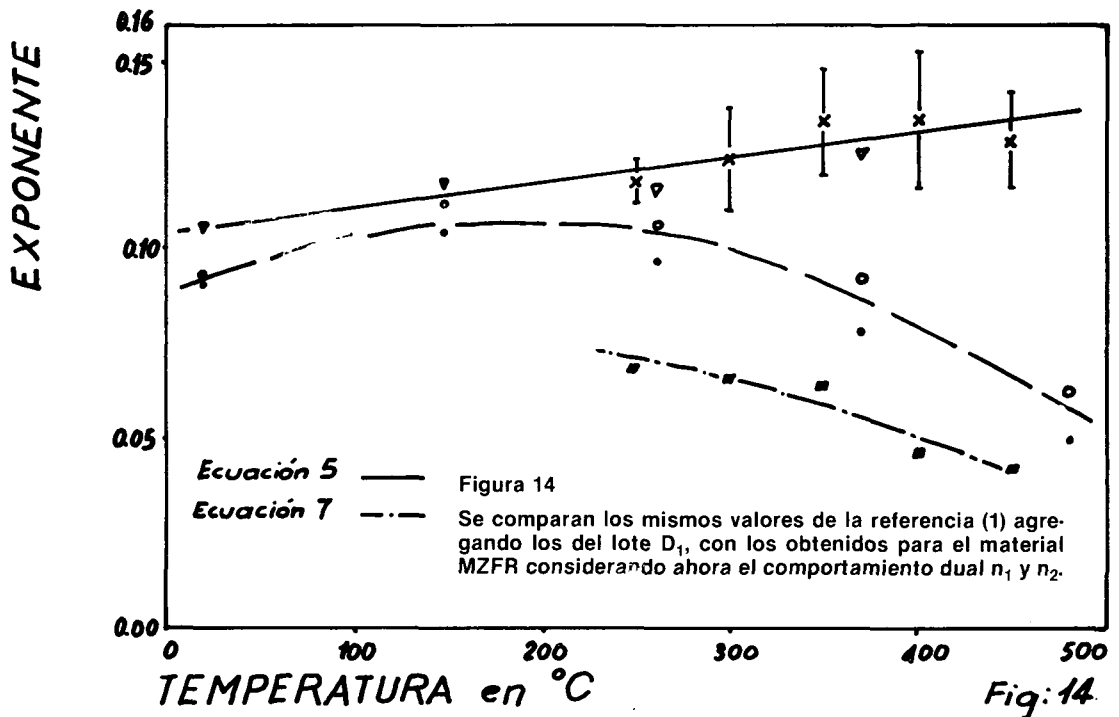
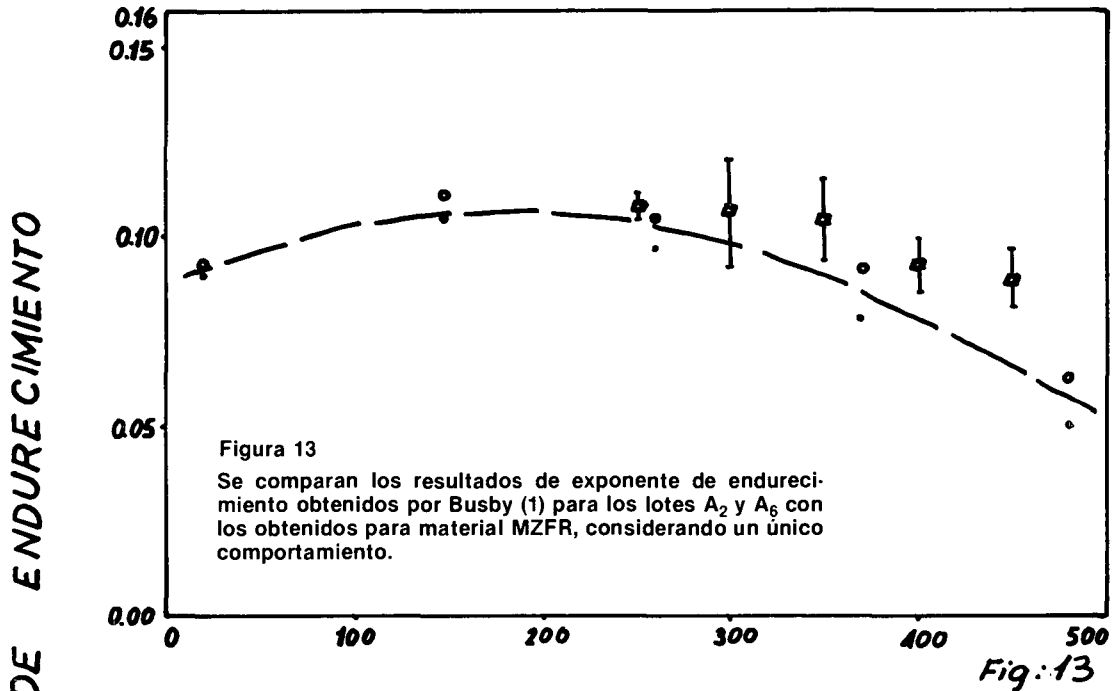


DEFORMACION TOTAL PARA $l_0 = 50$ mm. EN FUNCION DE LA TEMP.



COMPARACION DE EXPONENTES DE ENDURECIMIENTO

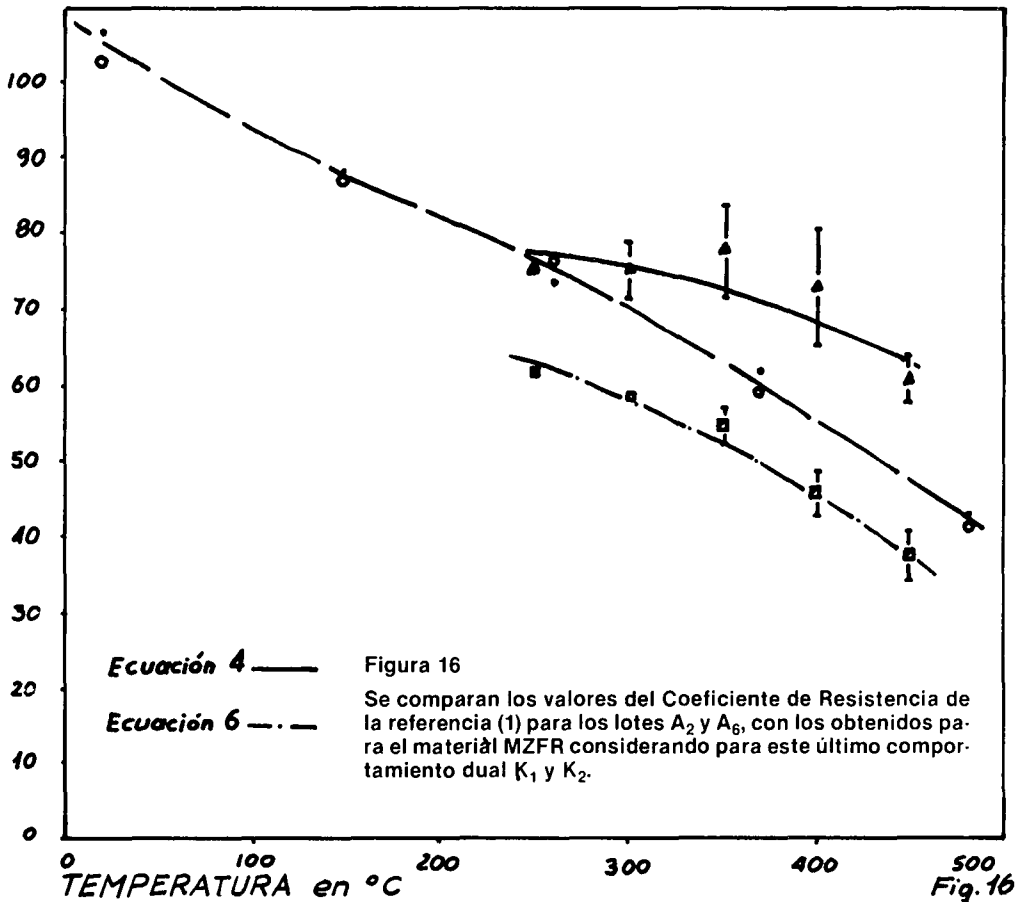
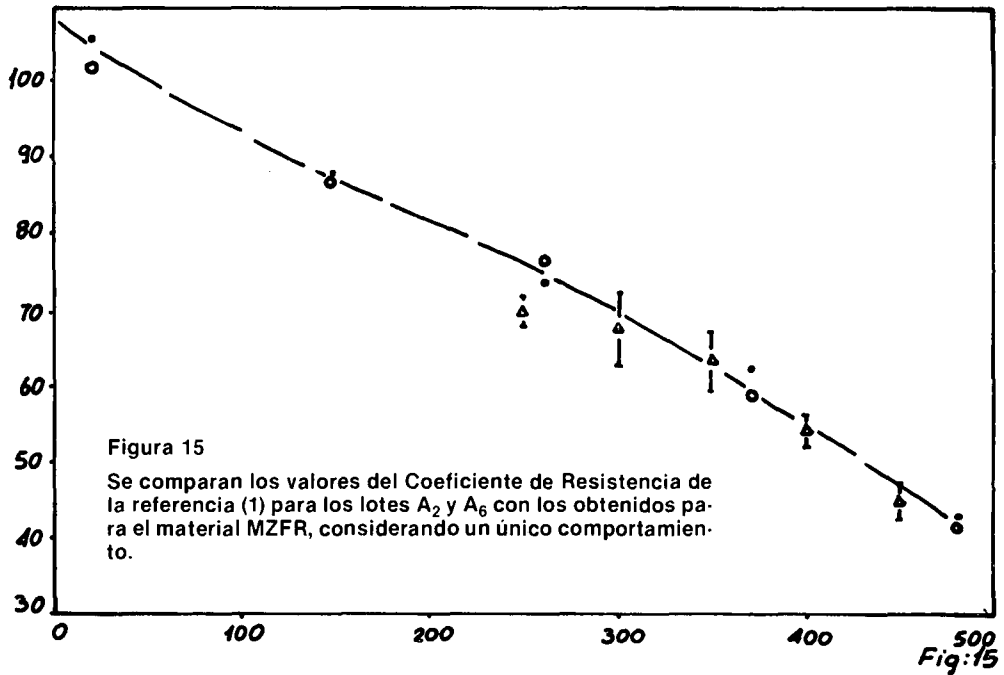
- A_2 - Ref. 1 - TRABAJADO EN FRIO 78% + 510 °C
- A_6 - Ref. 1 - TRABAJADO EN FRIO 74% + 510 °C
- ▽ D_1 - Ref. 1 - TRABAJADO EN FRIO 78% + 648 °C
- x n_1 - MATERIAL MZFR
- n_2 - MATERIAL MZFR
- n - MATERIAL MZFR



COMPARACION DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA

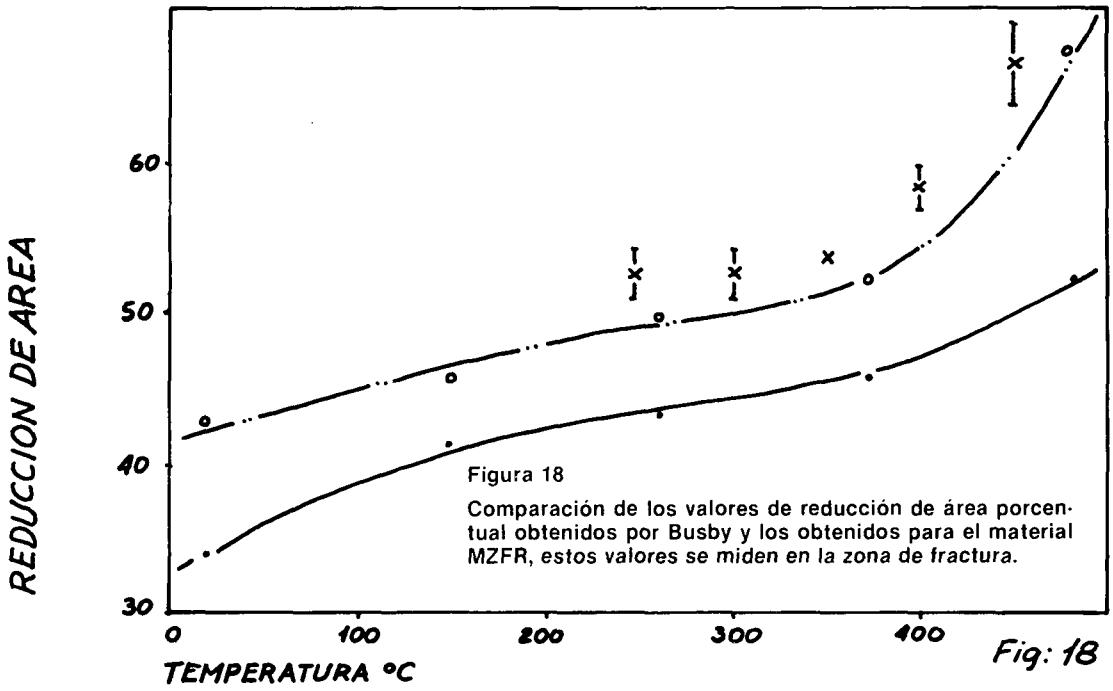
- A₂ - REF. 1 - TRABAJANDO EN FRIO 78%+510°C
- ◻ K₂ - MATERIAL MZFR
- A₆ - REF. 1 - TRABAJANDO EN FRIO 74%+510°C
- △ K - MATERIAL MZFR
- ▲ K₁ - MATERIAL MZFR

COEFICIENTE DE RESISTENCIA en Kg/mm²

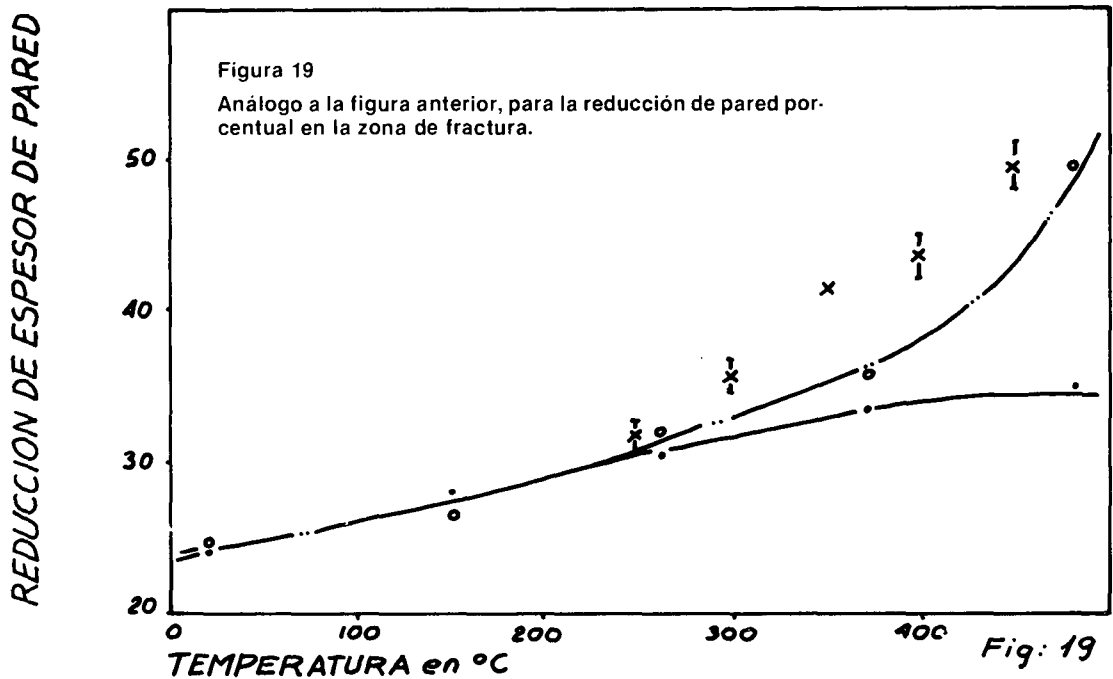


- A₂ - TRABAJADO EN FRIO 78% + 510 °C
- A₆ - TRABAJADO EN FRIO 74% + 510 °C
- x MATERIAL M Z F R

COMPARACION DE REDUCCION DE AREA

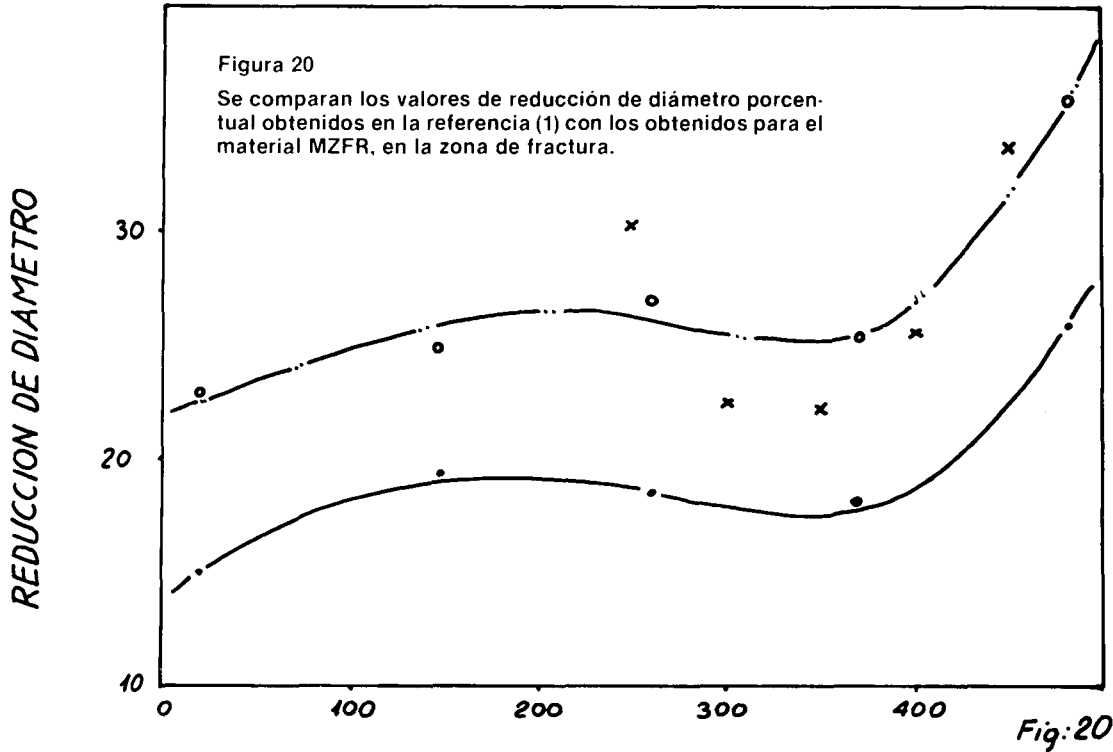


COMPARACION DE REDUCCION DE ESPESOR DE PARED



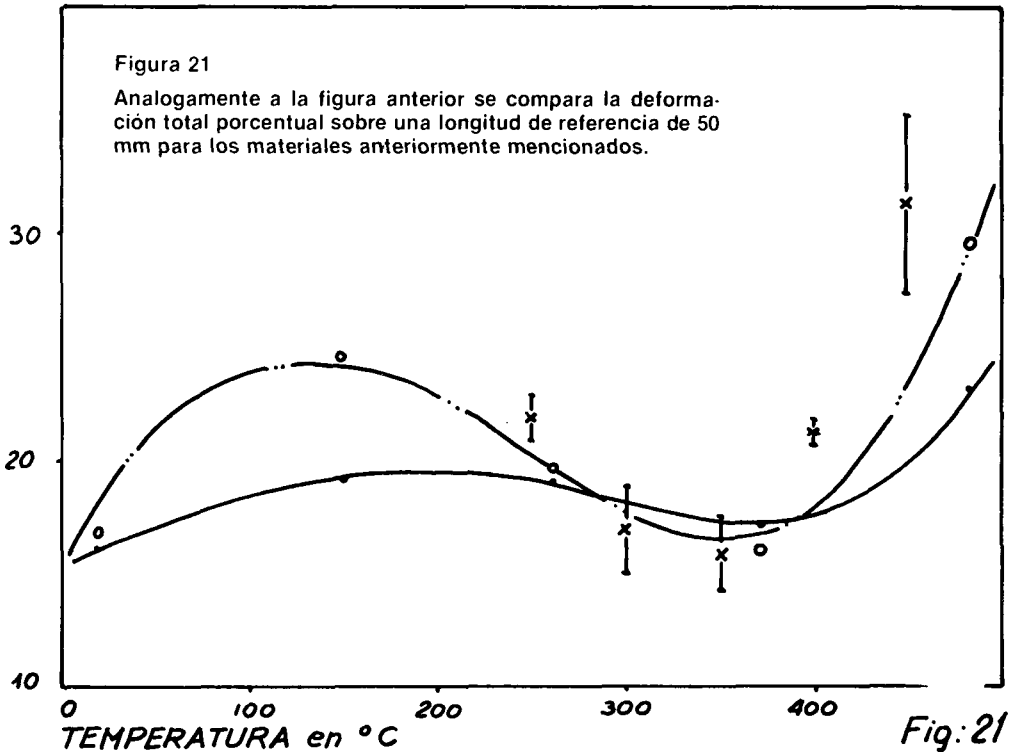
COMPARACION DE LA REDUCCION DE DIAMETRO

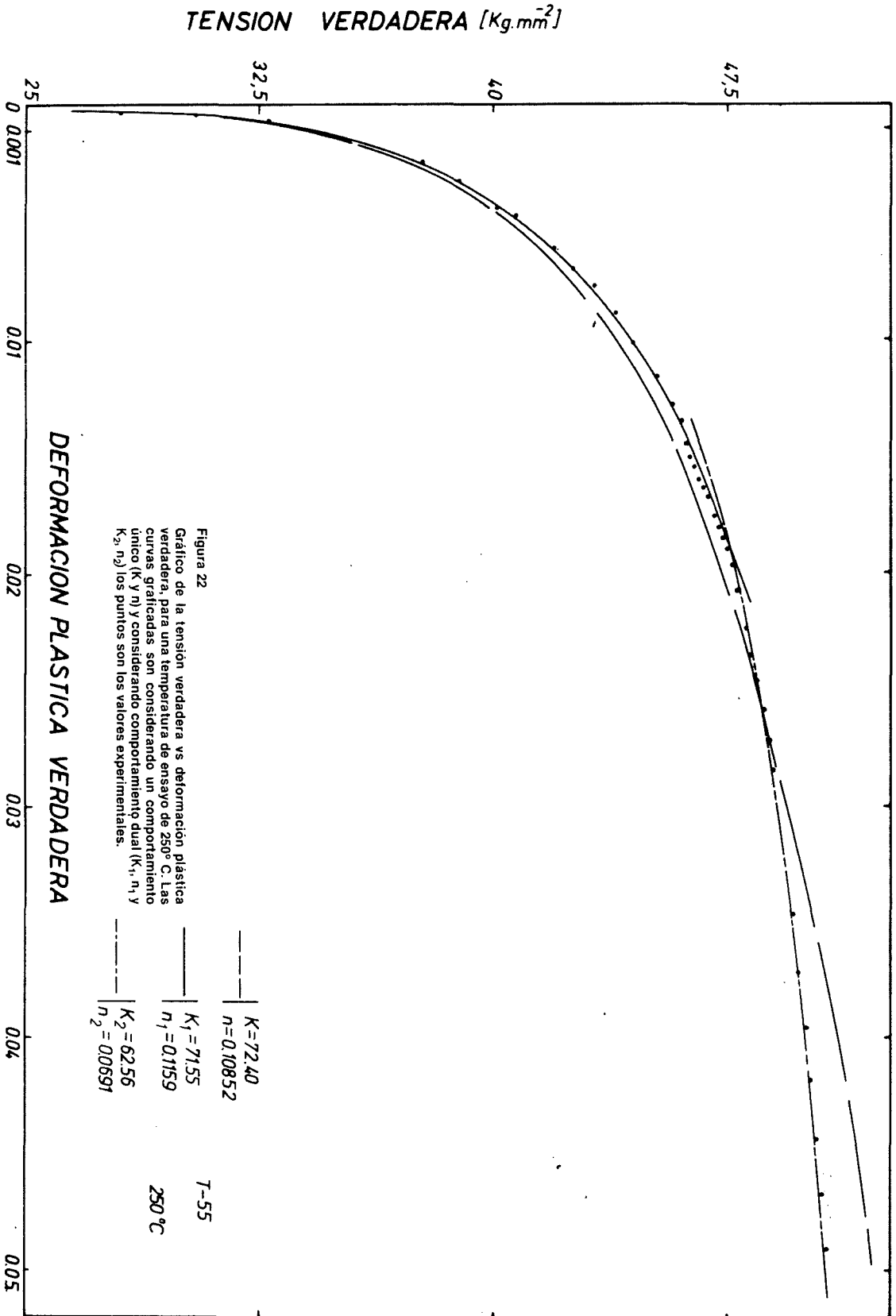
- A₂ - TRABAJADO EN FRIO 78% + 510 °C
- A₆ - TRABAJADO EN FRIO 74% + 510 °C
- x MATERIAL MZFR



COMPARACION DE LA DEFORMACION TOTAL

DEFORMACION TOTAL (Long. de referencia 50 mm.)





En las figuras 4, 5, 6 y 7 se han graficado los valores de n_1 , n_2 , K_1 , y K_2 en función de la temperatura y la función que ajusta estos valores, de estos resultados se deduce que el material es menos sensible a la temperatura de la zona I que en la zona II. Este doble comportamiento podría ser producido por un cambio de mecanismo de deformación al pasar de una zona a la otra.

C. C. Busby⁽¹⁾ utilizando la representación $\bar{\nu} = K\epsilon_p^n$ obtiene valores de K y n (supone comportamiento único) en tubos de Zry-4 con distintas historias de fabricación. En las figuras 13 y 14 se han graficado los valores de n en función de la temperatura obtenidos por Busby, los valores de n_1 y n_2 y también los valores de n que se han obtenido en el presente trabajo (si se considera un único comportamiento del material). En esta figura se observa que los valores de n coinciden, dentro de la dispersión de los datos con los valores obtenidos por Busby para los lotes A_2 y A_6 .

Jaou⁽⁸⁾ indica que para materiales reconocidos y el valor de $\epsilon_{p \text{ trans.}}$ es mayor que en materiales predeformados, o sea que la zona I es más grande en materiales recocidos. En la figura 14 se puede observar que los valores de n_1 tienen valores y comportamiento coincidente a los valores de n obtenidos por Busby para un material recocido (D_1). Este resultado indicaría que el material se comporta, en la zona I, de la misma manera, independientemente de los pasos finales de fabricación.

En la figura 15 y 16 se comparan los valores del coeficiente de resistencia K , K_1 y K_2 con los valores de K obtenidos por Busby. Los valores de K coinciden dentro de la dispersión con los valores obtenidos en la referencia (1), salvo para la temperatura de 250°C.

En la tabla II figuran los valores de los coeficientes de regresión, para los casos de comportamiento único y doble comportamiento. Estos valores para comportamiento único son en todos los casos menores que los obtenidos para doble comportamiento, esto indica una mejor ajuste de los datos experimentales por el análisis de doble comportamiento. Esto se hace evidente en las figuras 22 y 23.

La deformación porcentual total esta graficada en la figura 12. Esta deformación presenta un mínimo entre los 300°C y 350°C, lo cual indicaría que el material pierde capacidad de deformación a estas temperaturas. En la figura 21 se comparan los valores de la deformación total para una longitud de referencia de 50 mm con los obtenidos por Busby. Estos valores se comportan de la misma manera que los del lote A_6 , coincidiendo con estos.

En las figuras 18, 19 y 20 se grafican los valores de reducción porcentual de pared, de diámetro y de área en la zona de la fractura. La reducción de pared aumenta con la temperatura, mientras que la reducción de diámetro tiene un mínimo entre 300°C y 350°C. La reducción de área que es una

consecuencia de las anteriores presenta un mínimo para 300°C aproximadamente. Esta dificultad en reducir el área, consecuencia de la dificultad en deformar reduciendo el diámetro es la causante del mínimo en la deformación total. Es importante hacer notar que el mínimo en la deformación total se encuentra en el rango de valores de temperatura a los cuales trabaja la vaina dentro del reactor. Estos valores se comparan con los obtenidos por Busby en las mismas figuras y se observa que los valores de los materiales A_2 y A_6 difieren, la causa de estas diferencias son las texturas diferentes. El material utilizado en el presente trabajo se asemeja al lote A_6 (o sea tienen texturas semejantes). De la comparación de los parámetros de los lotes A_2 y A_6 en ensayo de tracción en tubos, la textura influye fundamentalmente en la deformación total (deformación que ocurre fundamentalmente cuando el ensayo de tracción deja de ser un ensayo uniaxial) y muy poco en el resto de los parámetros.

CONCLUSIONES

Los datos obtenidos demuestran que las curvas de tracción pueden ser descritas por un doble comportamiento, ya que los parámetros obtenidos varían en forma continua con la temperatura y pueden ser utilizados para el diseño y los códigos de comportamiento. El significado físico de estos parámetros no esta claro y es evidente que será necesario realizar ensayos en tubos con diferentes tratamientos termomecánicos y diferentes velocidades de deformación, a los efectos de obtener una imagen más clara del comportamiento mecánico de estos materiales.

REFERENCIAS.

- (1) C. C. Busby, USAEC Report WAPD - TM - 585 (diciembre de 1966).
- (2) R. L. Mehan, USAEC Report KAPL - M - RLM - 16 (julio 1958).
- (3) R. L. Mehan and F. Wiesinger. USAEC Report KAPL - 2110 (febrero 1961).
- (4) H. C. Brassfield J. F. White. L. Sjudhi, J. T. Biffel, USAEC Report Gemp - 482 (abril 1968).
- (5) Z. Spasic, M. Parlovic, G. Simis. Check cataloged as a USAEC Report CONF - 681086 (1968).
- (6) R.E. Miller, MATPRO - versión 09 - TREE - NUREG - 1005 for NRC (diciembre de 1976).
- (7) C. Crussar and Jaoul, Rev. Met Vol 47 1950 pp 589 - 600.
- (8) Jaoul B. Journal of mechanics and physics of solids vol 5 1957.
- (9) S. Monteiro and R. Reed-Hill, Met. Trans. vol. 4 de abril 1973. ●