

04.81.10

C. E. A. Biblioteca

ARCHIVO PUBLICACIONES

Nº

1

AÑO

1981

**ASOCIACION ARGENTINA
DE TECNOLOGIA NUCLEAR**



ACTAS de la

VIII Reunión Científica

II^{do.} Encuentro Latinoamericano

**I^{ra.} Muestra de la Ingeniería e
Industria Nuclear Argentina**

5 - 10 NOVIEMBRE 1979

**CENTRO CULTURAL SAN MARTIN
BUENOS AIRES - REPUBLICA ARGENTINA**

COMPORTAMIENTO EN TRACCION DE VAINAS DE ZIRCALLOY-4
DEL TIPO MZFR.

R. BORDONI - J.A. CASARIO - C. COROLI - F. POVOLO

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 solo 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 tubos 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 conocen los detalles de fabricación, excepto que fueron llevados a dimensiones finales por trabajado 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:

$$E(\text{Kg.1mm}^2)=10260.4 - 8.366 T \quad (1)$$

Donde T se mide en grados centígrados. El coeficiente de regresión (C) 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:

$$\sigma = K \epsilon_p^n \quad (2)$$

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:

$$\log \sigma = \log K + n \cdot \log \epsilon_p \quad (3)$$

En las figuras 2 y 3 fueron graficados los valores de $\log \sigma$ vs. $\log \epsilon_p$. Dichos valores ajustan mejor a dos rectas que sólo a una. Por lo tanto se dividió 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 deformación 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:

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

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

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

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

$$E_{p_{\text{trans.}}} = 2.11 e^{-\frac{0.9 \times 10^{-2} T}{^\circ \text{K}}} \quad (8)$$

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.

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 del zry.

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

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 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 verá más adelante, ajustar muy bien a los datos experimentales, figuras 22 y 23.

Graficando los valores de σ y E_p en escala logarítmica se debería obtener una recta, ecuación (3). Estos graficos 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.

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 en 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 $\sigma = K E_p^n$ 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 .

Jaoul (8) indica que para materiales recocidos el valor de E_p 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 indica 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 un 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 ensayos 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 está 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.

BIBLIOGRAFIA.

- (1) C.C. Busby, USAEC Report WAPD - TM - 585 (diciembre de 1966)
- (2) R.L. Mehan, USAEC report KAPL - M - RIM - 16 (Julio 1958)
- (3) R.L. Mehan and F. Wiesinger, USAEC Report KAPL - 2110 (Febrero 1961)
- (4) H.C. Brassfield, J.F. White, L. Sjodhl, 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 abril 1973.

COMPOSICION QUIMICA DEL LINGOTE

217

ALEACION (%)

| | |
|----------------|------|
| <i>Sn</i> | 1.38 |
| <i>Fe</i> | 0.20 |
| <i>Cr</i> | 0.09 |
| <i>Fe + Cr</i> | 0.29 |

IMPUREZAS [ppm]

| | | | |
|-----------|-------|-----------|-------|
| <i>Al</i> | <35 | <i>Mn</i> | 25 |
| <i>B</i> | 0.2 | <i>N</i> | 29 |
| <i>C</i> | 156 | <i>Si</i> | 62 |
| <i>Cd</i> | <0.2 | <i>Ti</i> | <20 |
| <i>Cc</i> | <5 | <i>U</i> | 0.86 |
| <i>Co</i> | <10 | <i>W</i> | <25 |
| <i>Cu</i> | 14.68 | <i>Ni</i> | <35 |
| <i>H</i> | 206 | <i>O</i> | 0.13% |
| <i>Hf</i> | 49 | | |

GASES EN LOS TUBOS [ppm]

| | |
|----------|------|
| <i>O</i> | 1285 |
| <i>H</i> | 8 |
| <i>N</i> | 40 |

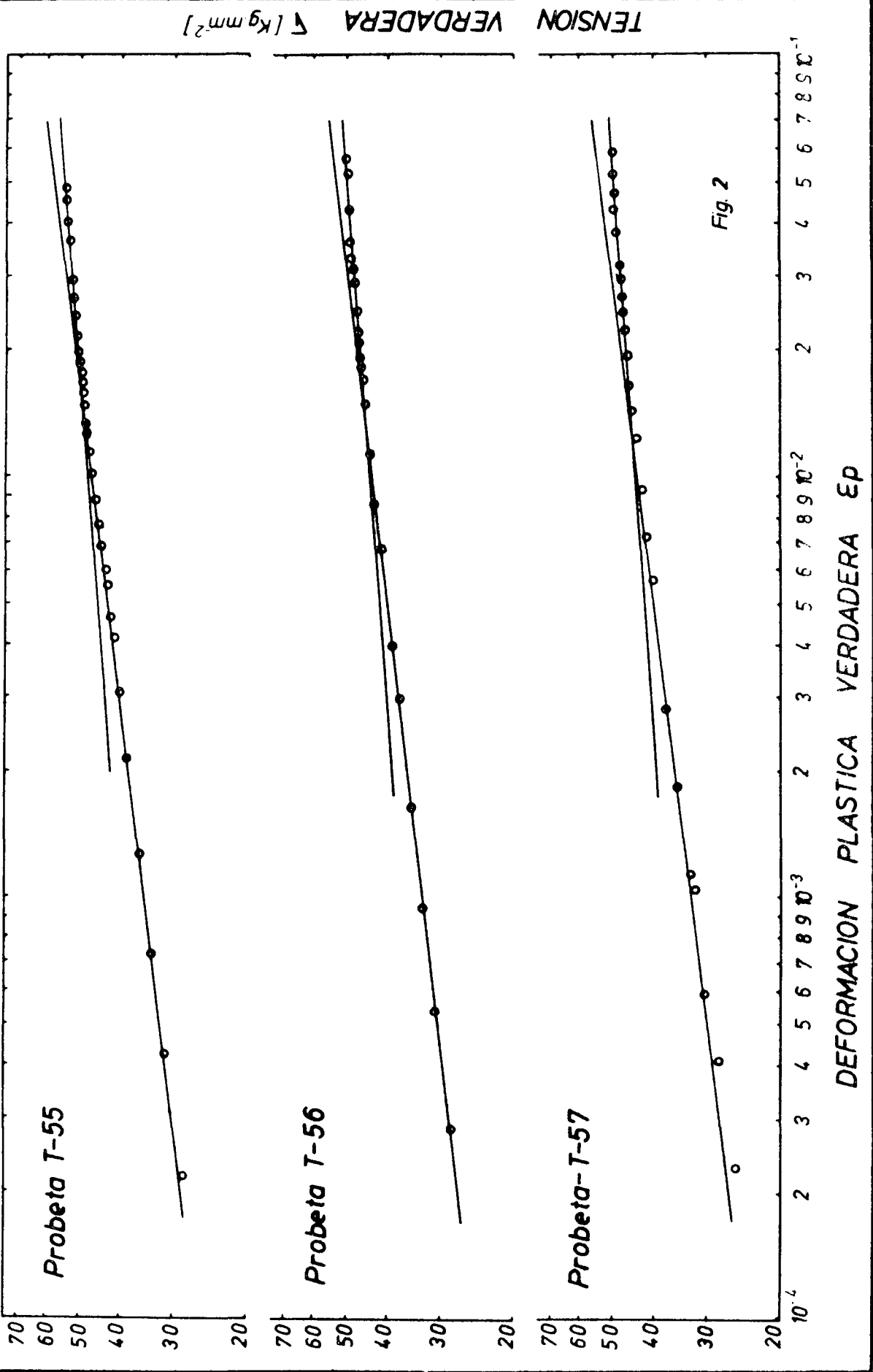
TABLA I

COEFICIENTES DE REGRESION

| <i>Temp.</i> | <i>Probeta</i> | CR_n | CR_{n_1} | CR_{n_2} |
|--------------|----------------|--------|------------|------------|
| 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 | 0.9814 |

TABLA II

TEMPERATURA DE ENSAYO = 250°C



TENSION VERDADERA Δ [kg mm²]

Fig. 2

DEFORMACION PLASTICA VERDADERA εp

TEMPERATURA DE ENSAYO = 450°C

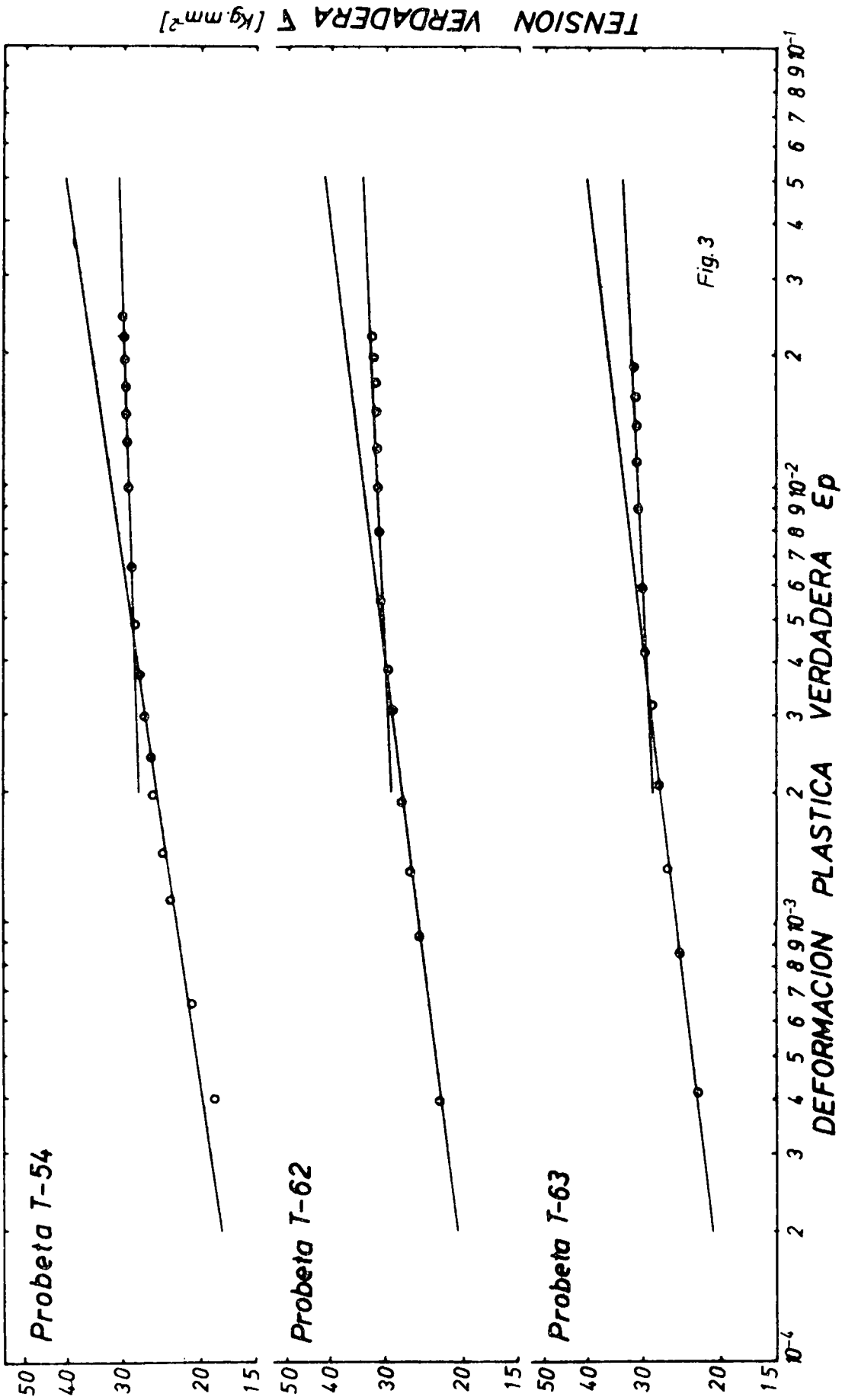


Fig. 3

COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO
EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

221

EXPONENTE DE ENDURECIMIENTO

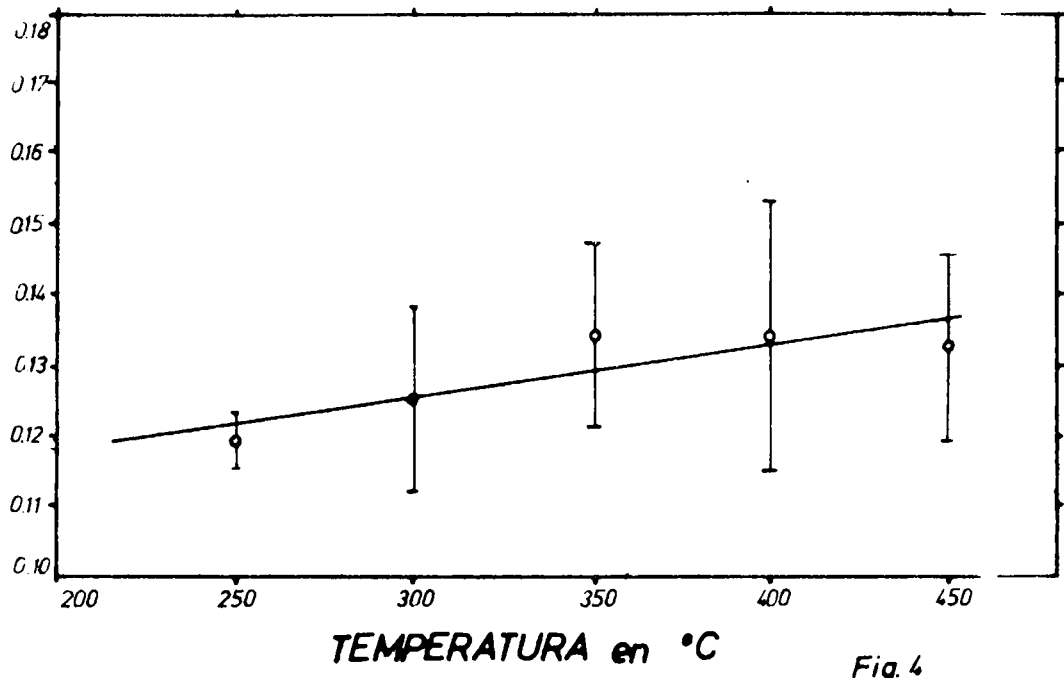


Fig. 4

MODULO DE YOUNG EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

MODULO DE YOUNG en Kg/mm²

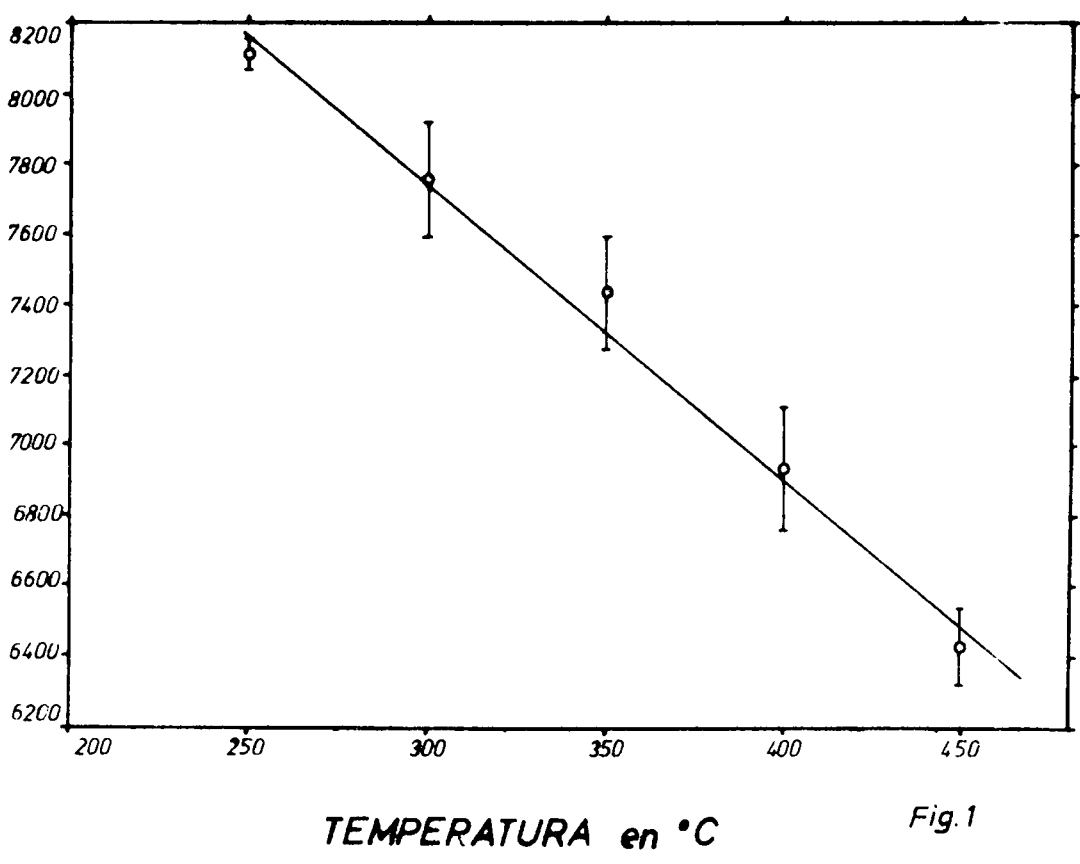


Fig. 1

COEFICIENTE DE RESISTENCIA
EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

222

ZONA 1

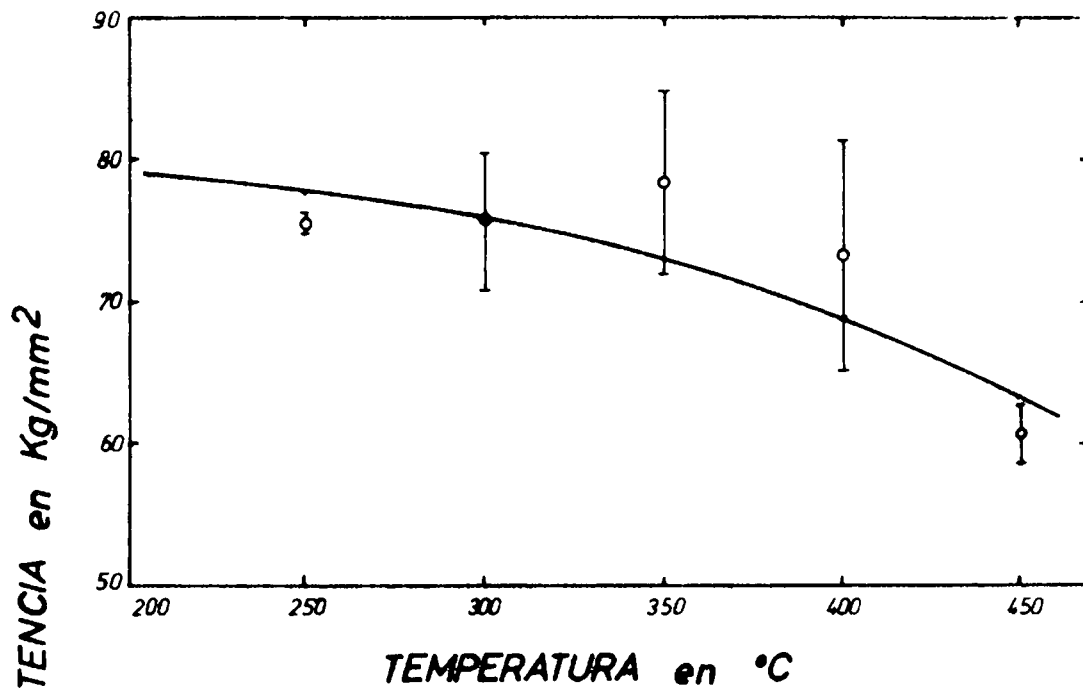


Fig. 6

ZONA 2

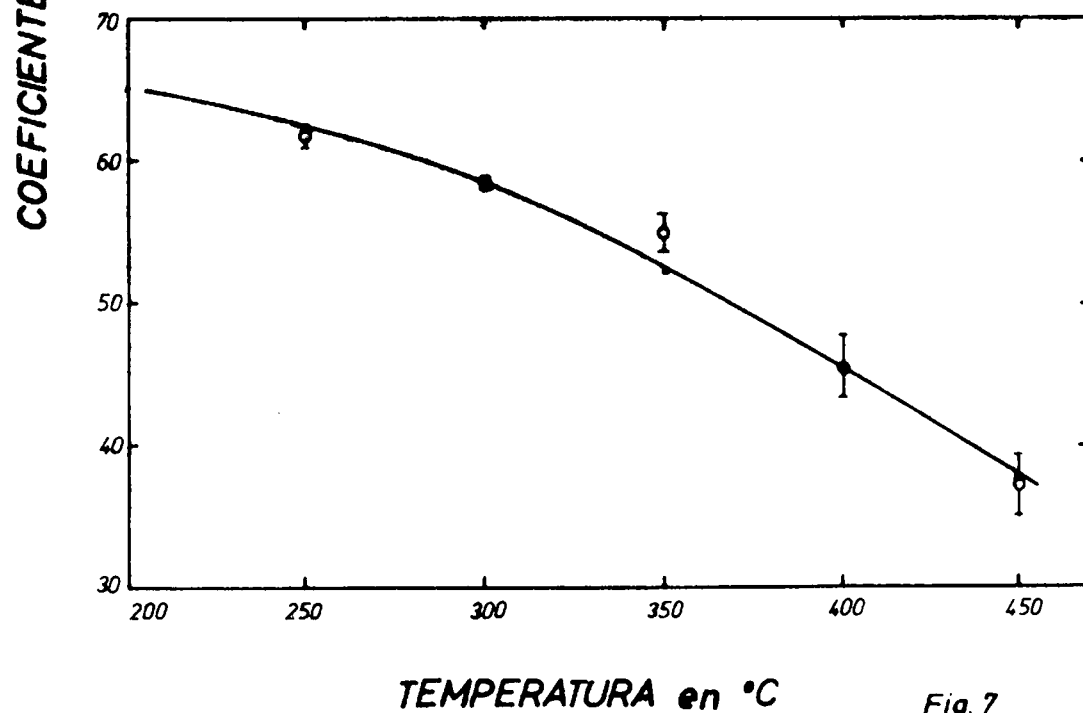


Fig. 7

COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

223

zona 2

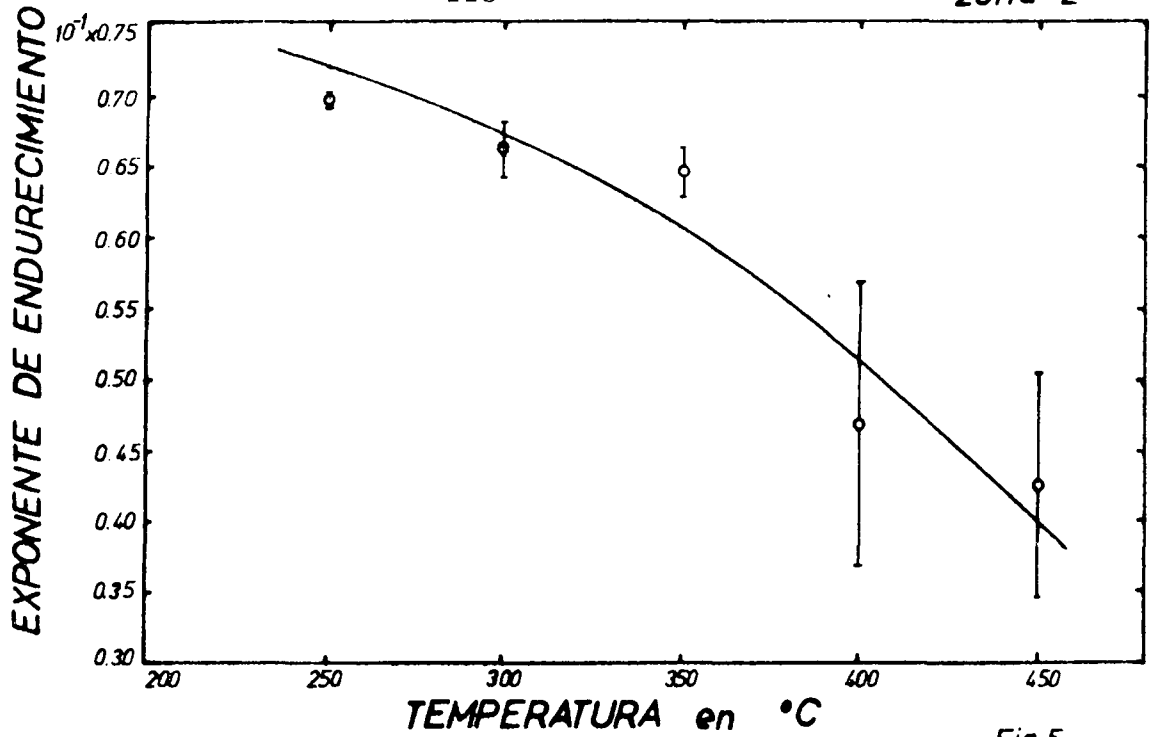


Fig.5

$\sqrt{0.2}$ EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

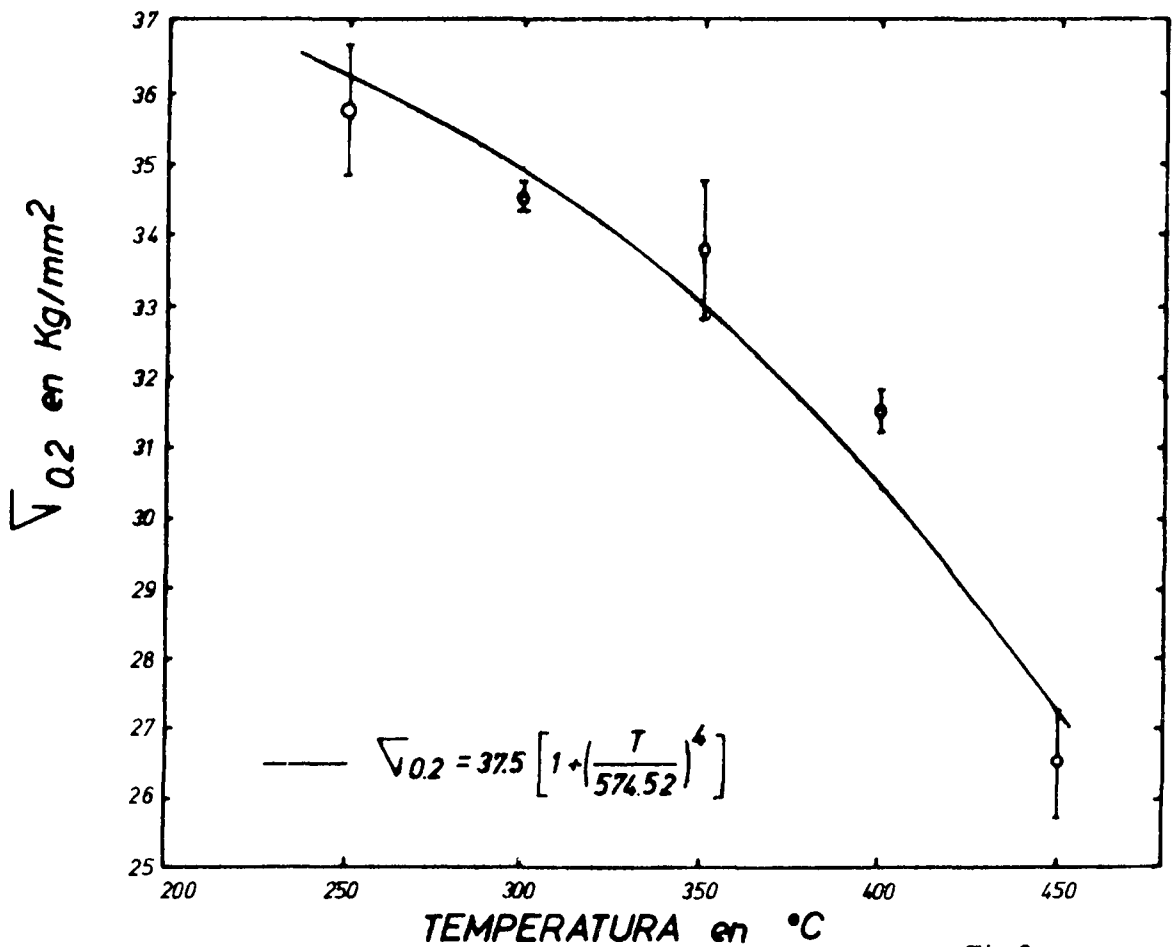
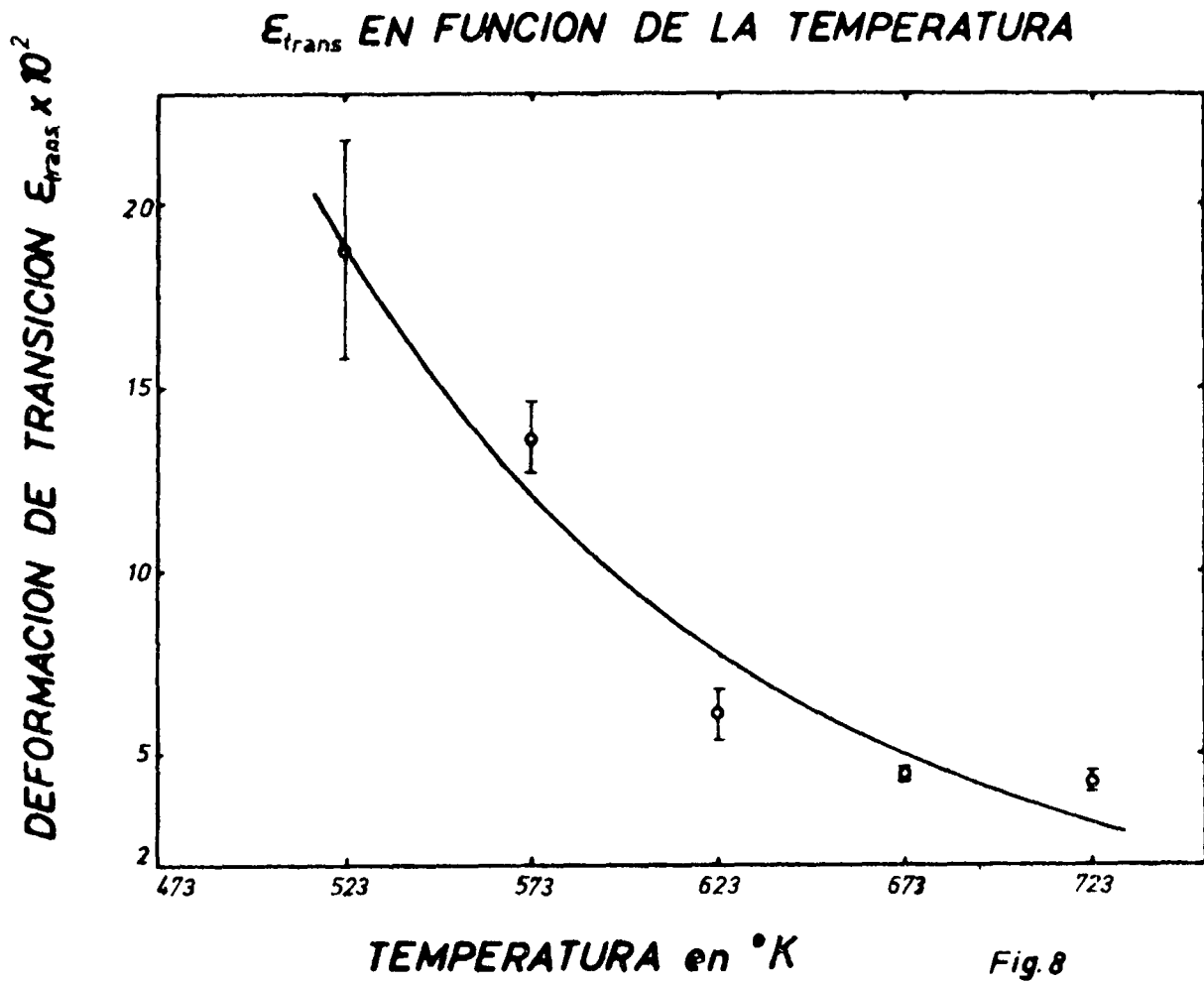


Fig.9



U.T.S. EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

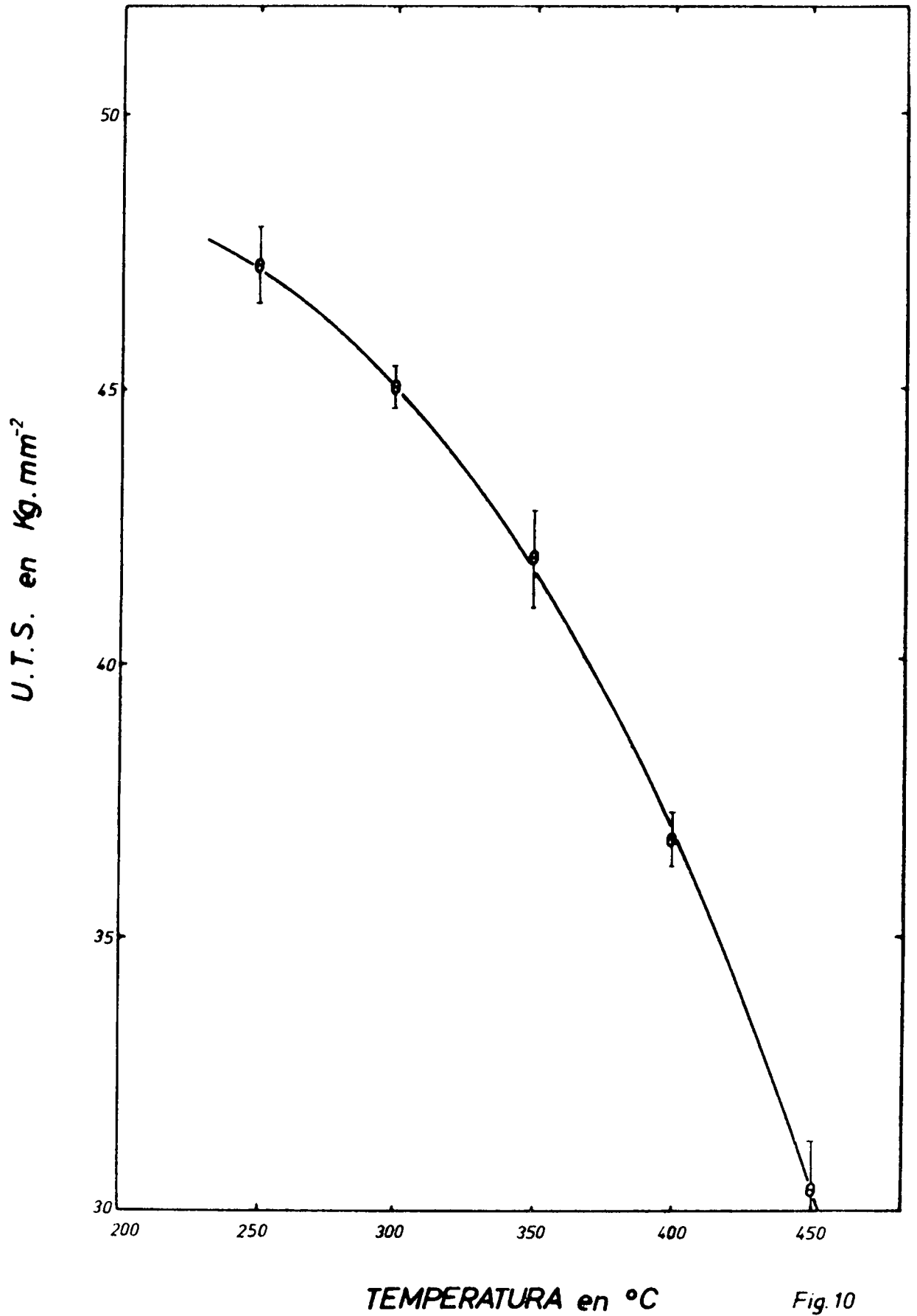
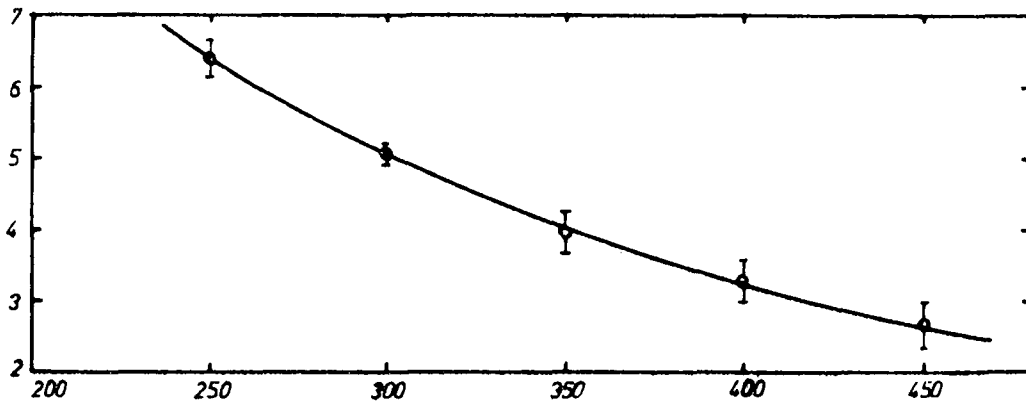


Fig. 10

DEFORMACION UNIFORME EN FUNCION DE LA
TEMPERATURA

DEFORMACION UNIFORME



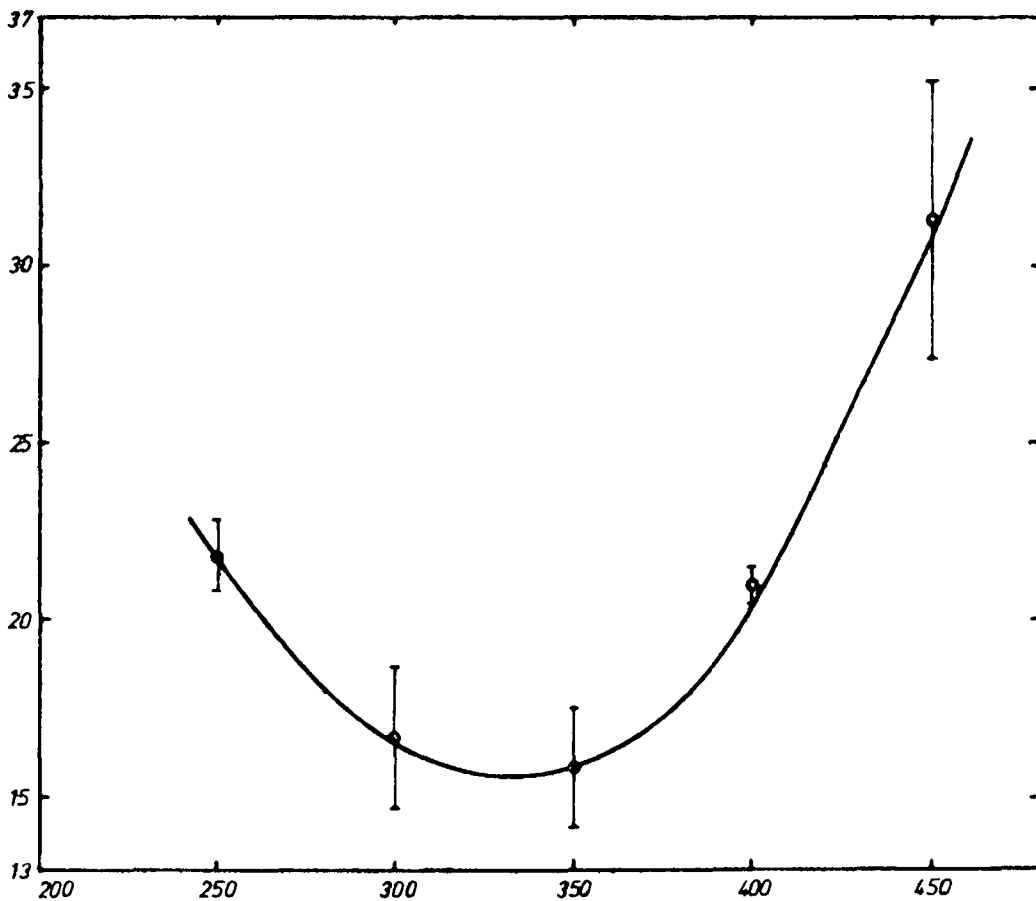
TEMPERATURA en °C

Fig. 11

DEFORMACION TOTAL PARA $l_0 = 50$ mm.

EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

DEFORMACION TOTAL PARA $l_0 = 50$ mm



TEMPERATURA en °C

Fig. 12

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_7 -Ref.1-TRABAJADO EN FRIO 78% + 648 °C
- x n_1 -MATERIAL MZFR
- n_2 -MATERIAL MZFR
- ◻ n -MATERIAL MZFR

Fig. 13

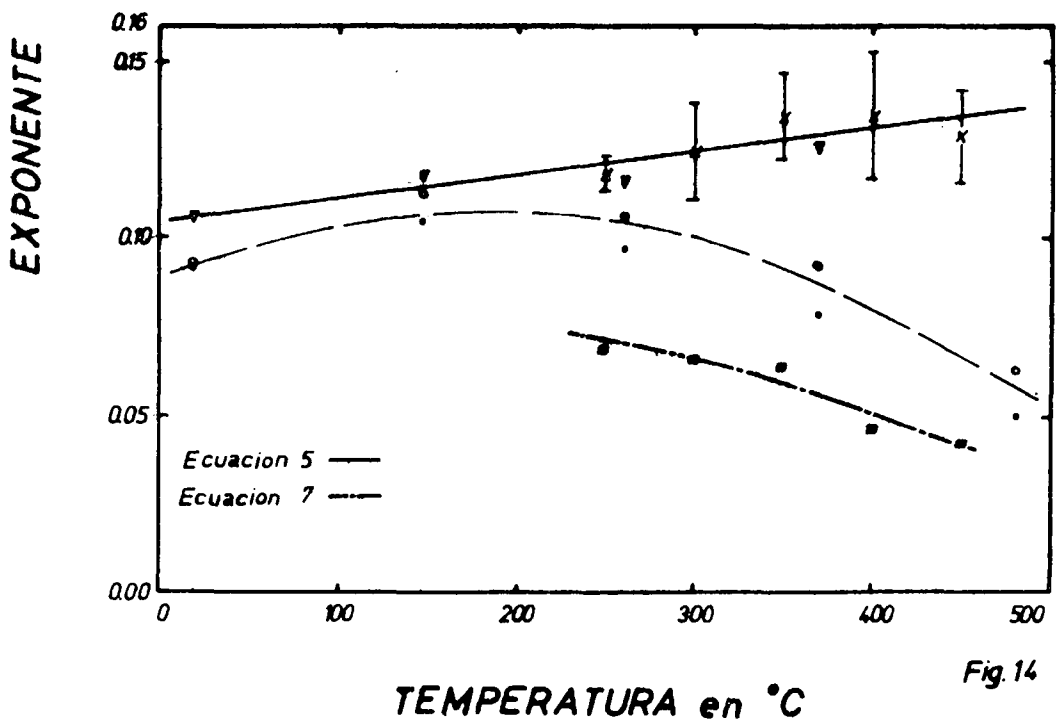
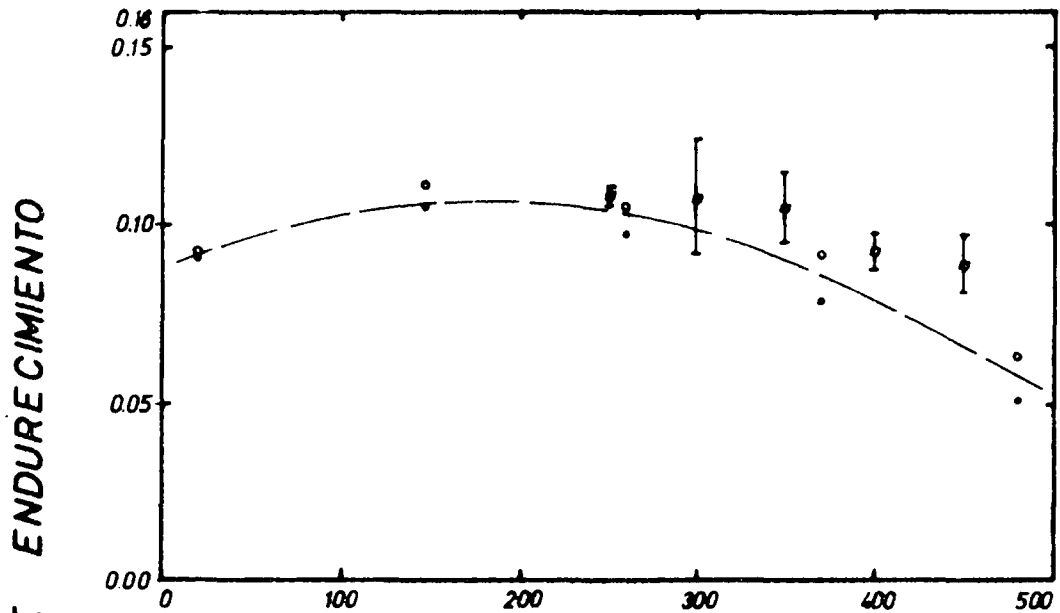


Fig. 14

COMPARACION DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA

- A_2 - Ref. 1 - TRABAJADO EN FRIO 78% + 510 °C
- A_6 - Ref. 1 " " " 74% + 510 °C
- ▲ K_1 - MATERIAL MZFR
- K_2 - " "
- △ K - " "

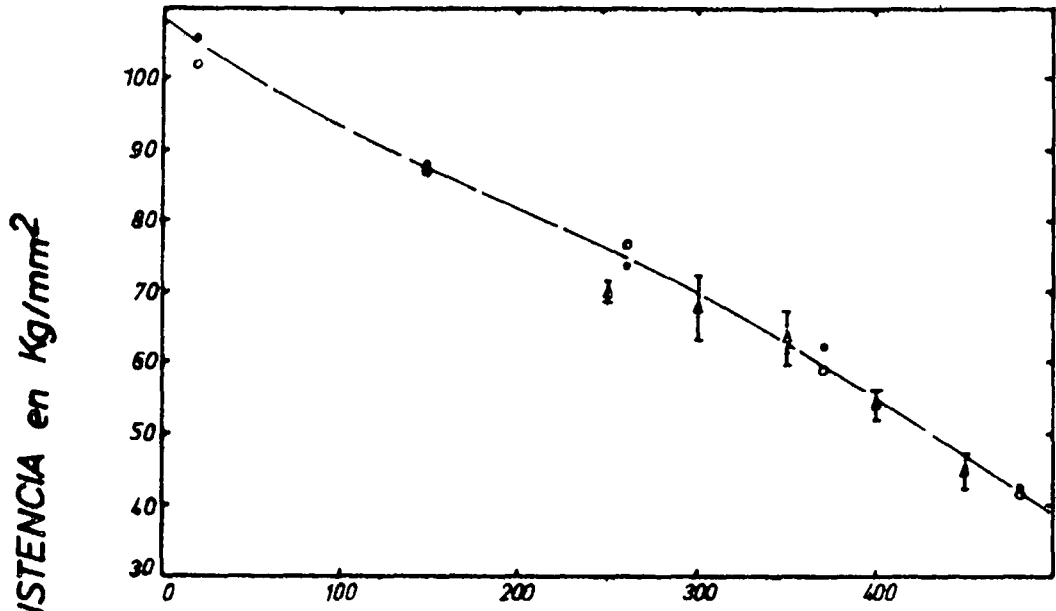


Fig.15

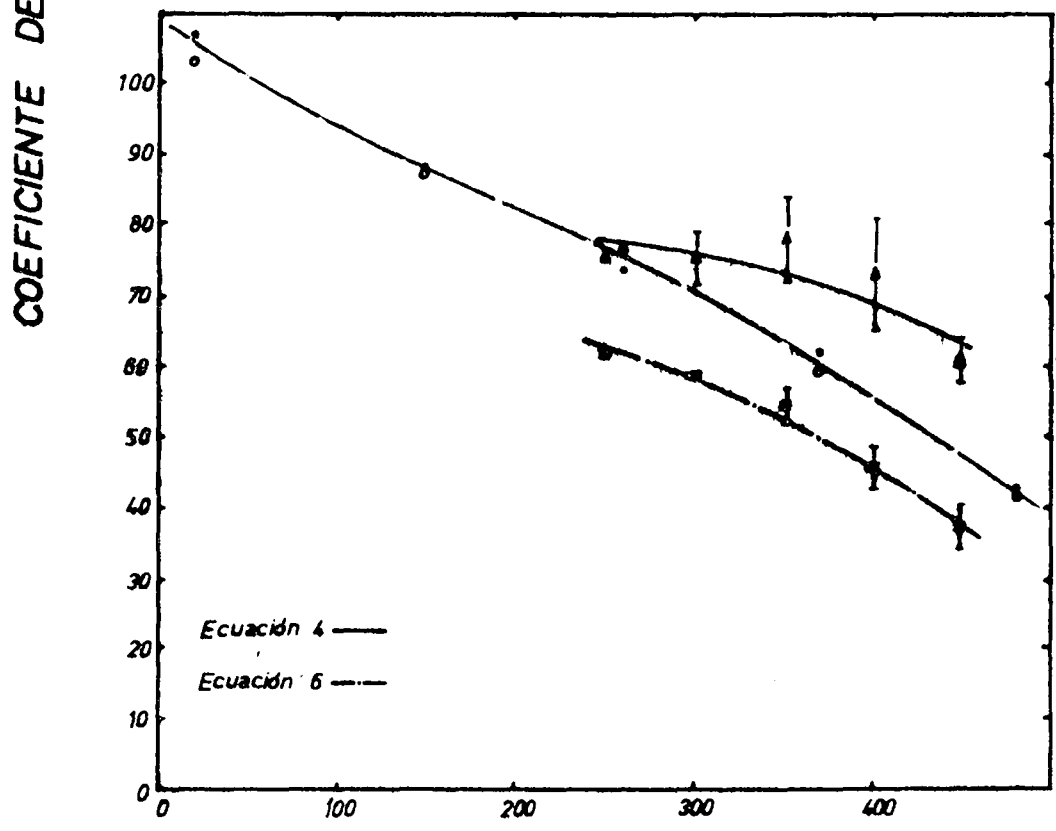


Fig.16

TEMPERATURA en °C

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

COMPARACION DE REDUCCION DE AREA

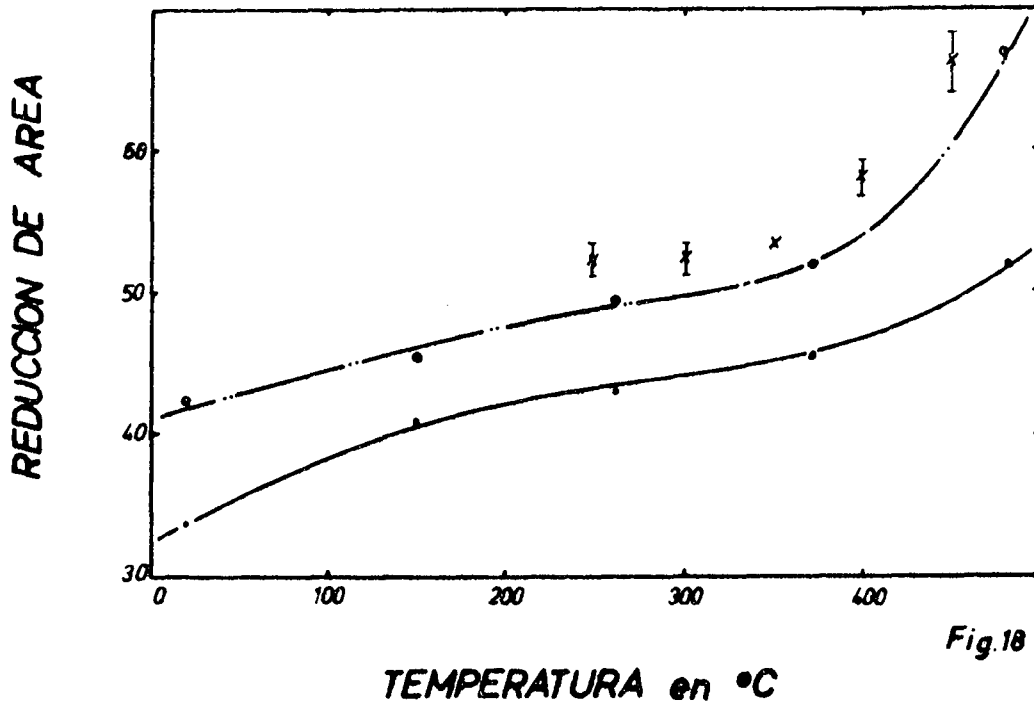


Fig. 18

COMPARACION DE REDUCCION DE ESPESOR DE PARED

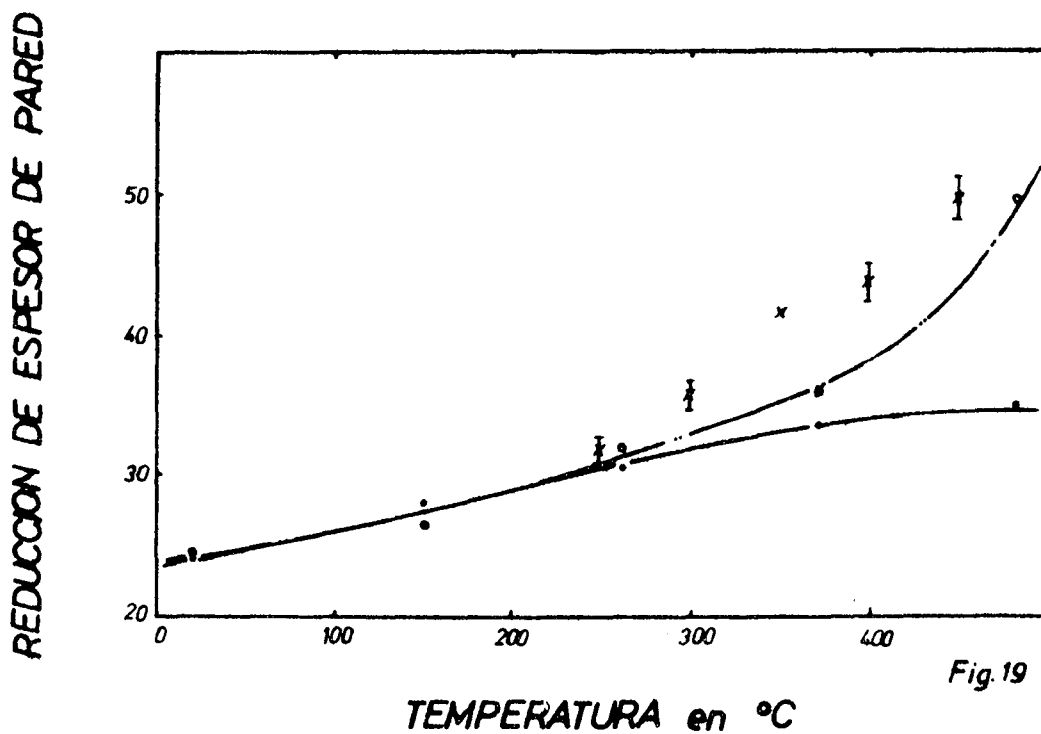


Fig. 19

COMPARACION DE LA REDUCCION DE DIAMETRO

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

REDUCCION DE DIAMETRO

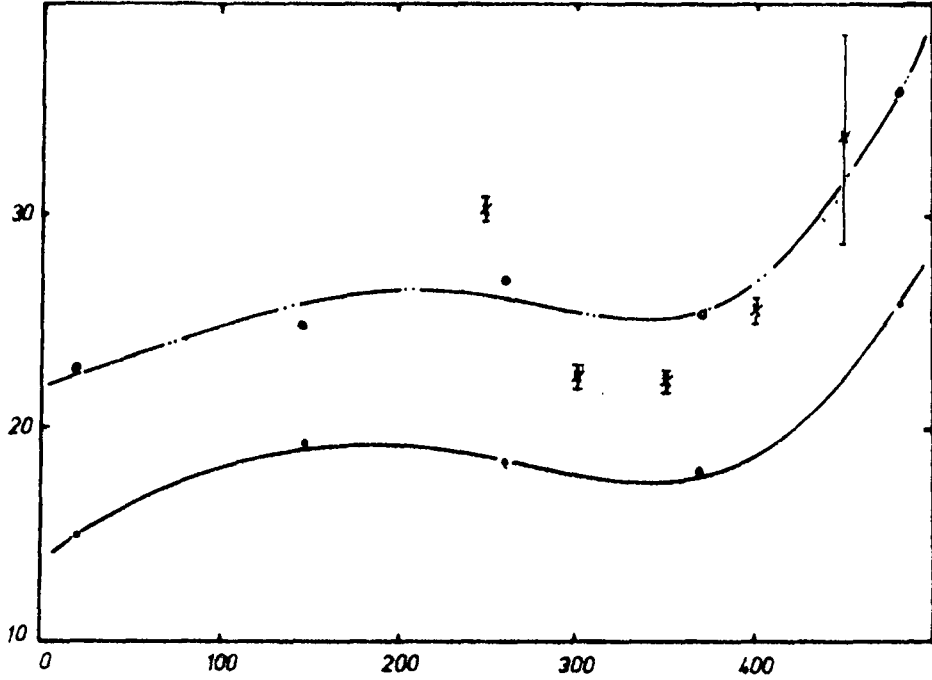


Fig. 20

COMPARACION DE LA DEFORMACION TOTAL

DEFORMACION TOTAL (long. de referencia 50 mm)

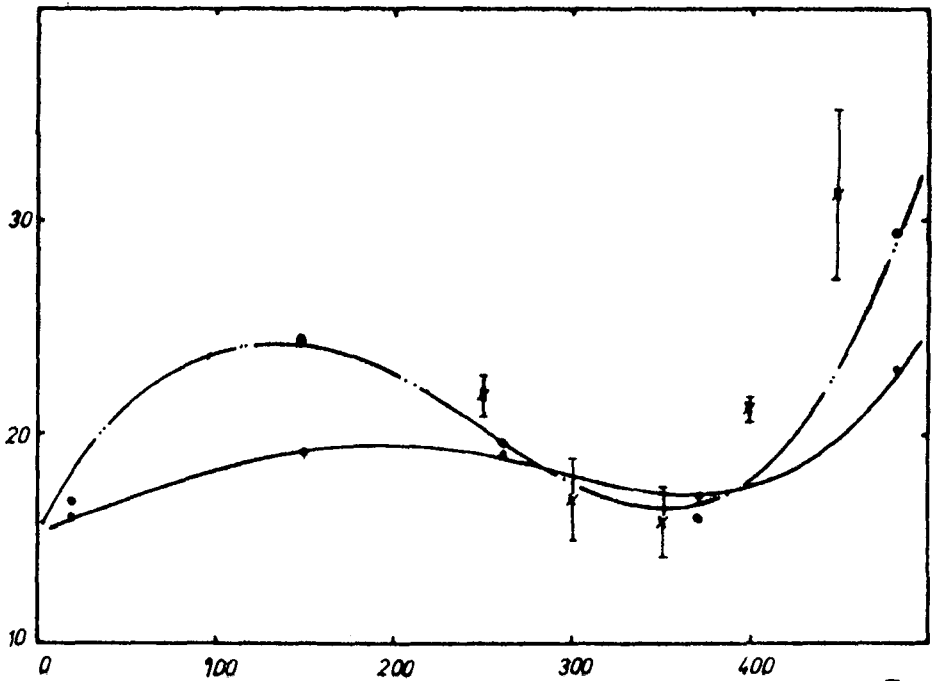


Fig. 21

TEMPERATURA en °C

