

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 3	AÑO 1975

04.75.03

CNEA-NT-11/75

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION
AREA INVESTIGACION, DESARROLLO Y SERVICIOS

FRACTURA DE PERLITA EN CONDICIONES
DE FATIGA DE ALTA DEFORMACION

I - Fatiga de Bajo Número de Ciclos

* JUAN CARLOS CRESPI
* MIGUEL SCHWARTZ

* Area Investigación, Desarrollo y Servicios
Departamento Metalurgia, División Fatiga

Buenos Aires, Argentina

1975

FRACTURE OF PEARLITE UNDER CONDITIONS OF HIGH DEFORMATION FATIGUE.

ABSTRACT

The object of the present work is studying the relationship between tension and deformation under cyclic conditions, the hardening and softening caused by fatigue and the life resistance properties of type SAE 1038 steel under full anneal heat treatment. It is concluded that the method of analysis through lineal multiple regression proposed by Bucher et al. (6) predicts satisfactorily the monotonic properties of the material. When amplitudes of - ciclical deformation are greater than 0,0035, instantaneous work hardening and cyclic progressive hardening is observed during cycling. For smaller amplitudes of cyclic deformation softening is observed.

The prediction method or cyclic properties as proposed by J.D. Morrow (15) give satisfactory results, where $\sigma_f' = 1,15 \sigma_f$.

The theory of Kettunen and Kocks (7) allow us to obtain a description of the relationship between the amplitude of tension of saturation, amplitude of plastic deformation and the number of cycles to fracture that fit the experimental data for type SAE 1038 steel in at least comparable concordance with the one - obtained through the Coffin-Manson' law.

FRACTURA DE PERLITA EN CONDICIONES DE FATIGA DE ALTA DEFORMACION

* *
Juan Carlos CRESPI y Miguel SCHWARTZ

Resumen

El objetivo de la presente investigación es estudiar la relación entre la tensión y deformación cíclica, el endurecimiento y el ablandamiento por fatiga y las propiedades de resistencia a vida del acero tipo SAE 1038 en condiciones de recocido total. Se concluye que el método de análisis por regresión múltiple lineal propuesto por Bucher et al (6), predice satisfactoriamente las propiedades monotónicas del material. Para amplitudes de deformación cíclica mayores que 0,0035 se observa endurecimiento por trabajado instantáneo y endurecimiento cíclico progresivo durante el ciclado. Para amplitudes de deformación menores se observa ablandamiento cíclico.

Presenta resultados satisfactorios el método de predicción de las propiedades cíclicas propuesto por J.D.Morrow (15), donde $\sigma_f' = 1,15 \sigma_f$

La teoría de Kettunen y Kocks (7) permite obtener una descripción de la relación entre la amplitud de tensión de saturación, amplitud de la deformación plástica cíclica y el número de ciclos a fractura que ajusta adecuadamente los datos experimentales para el acero tipo SAE 1038 con concordancia por lo menos comparable con aquella obtenida a través de la ley de Coffin-Manson.

* Area Investigación, Desarrollo y Servicios
Departamento Metalurgia, División Fatiga
Comisión Nacional de Energía Atómica

FRACTURA DE PERLITA BAJO CONDICIONES DE FATIGA DE ALTA DEFORMACION

La investigación de las propiedades mecánicas monotónicas de estructuras ferrítica-perlíticas ha mostrado que con el incremento del volumen de perlita, la resistencia a la tracción aumenta más que la resistencia a la fluencia debido a una mayor velocidad de endurecimiento por deformación de la perlita (1).

En ensayos mecánicos monotónicos se ha observado que la fractura de perlita se origina a partir de pequeñas deformaciones (2) y que las fisuras en perlita comienzan en colonias donde las láminas están o tienden a estar paralelas a la dirección de aplicación de la tensión y avanzan en una dirección de aproximadamente 45° con respecto al eje axial de tensiones (3).

Por otra parte se ha demostrado que la fatiga del hierro de alta pureza puede producir su ablandamiento o endurecimiento, dependiendo éstos de la condición metalúrgica inicial del metal, endurecido por trabajado o recocido respectivamente, y de la amplitud de la deformación, a temperatura y velocidad de deformación cíclica constante (4).

Asimismo, en hierro de alta pureza recocido se ha observado:

- a) un rápido endurecimiento inicial y posterior saturación en la que la deformación plástica continúa acumulándose sin observarse posterior incremento de la tensión (5); b) partiendo de diferentes condiciones metalúrgicas iniciales y sometidas a la misma amplitud de deformación cíclica, presentan en forma unívoca el mismo nivel de tensión de saturación, dicha tensión de saturación es una función de la amplitud de la deformación plástica (5); c) las velocidades de endurecimiento aumentan con el incremento de la amplitud de la deformación plástica, mientras

que las velocidades de ablandamiento disminuyen con dicho incremento (4); d) estudios con técnicas de microscopía electrónica de transmisión en hierro de alta pureza, sometido a amplitudes de deformación plástica desde 0,003 hasta 0,048 han establecido una relación inversamente proporcional entre el nivel de tensión de saturación y el tamaño de celdas de dislocaciones desarrolladas durante el ciclado (4).

Si bien J.D.Grozier y J.H.Bucher (6) han avanzado en el estudio de la relación entre el límite de fatiga y la microestructura y composición de aceros ferríticos perlíticos, el número de investigaciones realizadas hasta el presente respecto al comportamiento cíclico de estos aceros bajo condiciones de deformación controlada no es suficiente para describir satisfactoriamente la relación entre las propiedades cíclicas y la microestructura bajo tales condiciones.

P.O. Kettunen y U.F. Kocks (7) (8) (9) (10) a través de un estudio teórico han explicado algunas características del fenómeno de fatiga sobre la base del endurecimiento por trabajado, tales como el endurecimiento cíclico, el endurecimiento por trabajado instantáneo, el límite de fatiga, las curvas amplitud de tensión-número de ciclos a fractura. Sobre la base del daño acumulativo, proponen una ecuación para la vida a fatiga (8) la que ajusta adecuadamente sus resultados experimentales.

El objetivo de la presente investigación es estudiar la relación entre la tensión y la deformación cíclica, el endurecimiento y el ablandamiento por fatiga y las propiedades de resistencia a vida del acero tipo SAE 1038 en condiciones de recocido total.

MATERIAL

El material ensayado es un acero tipo SAE 1038 en condición de recocido total.

El acero fué fabricado en un horno eléctrico básico de arco, colado en lingotes con cabeza caliente por el sistema en fuente. Luego fueron laminados en un tren de palanquilla a $\varnothing$ 102 mm y posteriormente relaminados en barras de $\varnothing$ 25,4 mm.

Para realizar el recocido total se utilizó un horno eléctrico con atmósfera controlada en el que se colocaron barras de 150 mm de longitud, manteniéndoselas durante 1 hora a la temperatura de austenitización de 870°C, enfriándose luego en 25°C cada 30^m hasta los 670 °C continuándose luego en 50 °C cada 60^m hasta los 200 °C a partir de lo cual se enfriaron al aire.

La atmósfera controlada consiste en los productos de combustión provistos por un generador de atmósfera endotérmico en el que reacciona una mezcla aire/gas natural en relación 4/1, en presencia de un catalizador. De esta forma el acero conserva su composición química durante el tratamiento térmico.

La composición química del material es la siguiente : C:0,39%; Si: 0,35%; Mn: 0,75%; Al: 0,11%; P: 0,019%; S: 0,009%; Cr: 0,19%; Ni: 0,13%; Cu: 0,21%; Sn: 0,03%; Pb: 0,02%.

Mediante el microscopio cuantitativo Quantimet se determinó que el espesor promedio de las láminas de cementita es 0,27 micrones, el espaciado promedio entre las mismas es 0,41 micrones y el tamaño de grano promedio es 7. Estas medidas se realizaron sobre micrografías obtenidas en el microscopio electrónico de barrido JEOL J-3.

La fracción en volúmen de perlita es de 0,43 cuya micrografía se observa en la figura N° 1.

Mediciones realizadas sobre micrografías en el microscopio

cuantitativo indican que las inclusiones ocupan el 1,9% del área total observada. Analizada su composición con microsonda resultan ser en su mayor parte de sulfuro de manganeso y de silico aluminato de calcio.

La dureza es en la escala Rockwell A (60 kg) de 48,5.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la realización de los ensayos monotónicos y cíclicos se utilizó un sistema de ensayos universal MTS 810 de 10 toneladas de capacidad que permite controlar la deformación total y la deformación plástica. El sistema esta equipado con un generador digital de función lineal.

El diseño de las probetas para el ensayo de tracción y fatiga se ve en las figuras N° 2 y N° 3 respectivamente. Responden a la normalización propuesta por ASTM (11) e IRAM (12).

Para la correcta alineación de las probetas en los ensayos se utiliza un sistema autoalineante, consistente en una mordaza con metal WOOD de bajo punto de fusión.

Las probetas fueron maquinadas a una temperatura inferior a 100 °C. El pulido mecánico se hizo con papeles 220, 320, 400 y 600 y alúmina de 1 micrón. La rugosidad media aritmética, Ra, análoga a la rugosidad media geométrica, RMS, medida a 10 probetas en un rugosímetro (13) fué siempre inferior a las 0,2 micrones. No se detectó rugosidad total, RT superior a 2,0 micrones.

Para los ensayos de fatiga se utilizó un extensómetro axial MTS modelo 632.13M con una longitud inicial de 10 mm y un rango máximo de deformación de $\pm 1,5$ mm. En los ensayos de tracción se empleó un extensómetro axial INSTRON G-51-11-M con una longitud inicial de 25 mm y un rango máximo de deformación de $\pm 2,5$ mm.

ENSAYO DE TRACCION

Los ensayos fueron realizados con una velocidad de deformación : $8 \cdot 10^{-2}$ seg.⁻¹. Inicialmente se mide la deformación con el extensómetro y luego de la estricción se mide con dos comparadores el diámetro instantáneo hasta la rotura.

ENSAYO DE PASO MULTIPLE (11) (12)

El ensayo consiste en ciclar una probeta a diferentes niveles de amplitud de deformación cíclica controlada. Cada paso de amplitud de deformación, junto con su correspondiente valor estacionario de amplitud de tensión suministran un punto de la curva tensión-deformación cíclica. Como el efecto de la secuencia de deformación tiene influencia en el resultado final, se prefiere una secuencia inicial de alta a baja deformación. Los niveles de deformación son $\pm 0,012$, $\pm 0,010$, $\pm 0,008$, $\pm 0,006$, $\pm 0,004$ en forma descendente y luego en forma ascendente hasta $\pm 0,014$.

Un ejemplo de la curva tensión-deformación cíclica obtenida en este ensayo se ve en la figura N° 4.

ENSAYO DE PASO INCREMENTAL (11) (12)

Otro método para obtener la curva tensión-deformación cíclica con una sola probeta, consiste en someterla a bloques de amplitud de deformación gradualmente crecientes y decrecientes como se ve en la figura N° 5.

Una amplitud de deformación máxima de $\pm 0,015$ es suficiente para estabilizar rápidamente el material sin peligro que la probeta pandeé, experimente estricción o rompa antes que se alcance el estado estacionario. La curva tensión-deformación cíclica se obtiene uniendo los extremos de lazos de histéresis superpuestos.

La curva tensión-deformación cíclica se genera luego de tres o cuatro bloques. Un ejemplo de este tipo de curva se ve en la figura N° 6.

TRACCION LUEGO DE DEFORMACION CICLICA (11) (12)

Consiste en traccionar la probeta hasta $\pm 0,015$ de deformación luego que la misma se haya estabilizado por el ensayo de Paso Múltiple o Paso Incremental. La curva así obtenida coincide practicamente con la curva tensión-deformación cíclica. La tracción final luego del ensayo de Paso Incremental puede observarse en la figura Nº 6.

ENSAYO DE RESISTENCIA A VIDA BAJO DEFORMACION CICLICA CONTROLADA

Este ensayo consiste en ciclar una probeta a un valor definido de deformación total controlada, hasta la fractura final. Se considera que se ha alcanzado este punto cuando el valor de la tensión cíclica disminuye un 20%.

CURVA DEFORMACION-VIDA. PROCEDIMIENTO

La curva Deformación-Vida del acero tipo SAE 1038 ha sido construida de los resultados provistos por tres probetas para cada uno de las siguientes amplitudes de deformación controlada : 0,002; 0,004; 0,008; 0,010; 0,012; 0,014; 0,018 y 0,020.

S.Manson (14) ha mostrado que la resistencia de un metal a la deformación cíclica total puede ser considerada como la suma de su resistencia a la deformación elástica y plástica. La ecuación Nº 1 expresa dicha relación.

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2 N_f)^b + \epsilon_f' (2 N_f)^c \quad \text{Ecuación Nº 1}$$

Donde:

$\frac{\Delta \epsilon_t}{2}$: Amplitud de la deformación cíclica total.

$\frac{\Delta \epsilon_e}{2}$: Amplitud de la deformación elástica cíclica.

$\frac{\Delta \epsilon_p}{2}$: Amplitud de la deformación plástica cíclica.

σ_f' : Coeficiente de la resistencia a la fatiga.

E : Módulo de elasticidad.

$2 N_f$: Semiciclos a fractura.

b : Exponente de resistencia a la fatiga.

ϵ'_f : Coeficiente de ductilidad a la fatiga.

c : Exponente de ductilidad a la fatiga.

J.D.Morrow (15) ha determinado experimentalmente que está directamente relacionada a la resistencia a la rotura real, σ_r , la que se obtiene del ensayo de tracción.

$$\sigma'_f \approx \sigma_r$$

Ecuación N° 2

R.W.Landgraf y C.E.Feltner (16) han encontrado una relación para ϵ'_f . Esta relación está expresada en la ecuación N° 3.

$$\epsilon'_f = 0,002 \left(\frac{\sigma'_f}{s'_{ys}} \right)^{1/n'}$$

Ecuación N° 3

Donde:

s'_{ys} : Resistencia a la fluencia cíclica, correspondiente al 0,002 de deformación plástica cíclica.

n' : Exponente de endurecimiento cíclico.

s'_{ys} y n' se determinan a partir de la curva Tensión-Deformación cíclica.

La curva Deformación-Vida puede aproximarse de la siguiente manera: en un diagrama $\log \sigma_f/E$ vs. $\log 2N_f$ la ordenada al origen de la componente elástica, se obtiene a partir de los resultados del ensayo de tracción (ecuación N° 2); la ordenada al origen de la componente plástica, ϵ'_f , se obtiene del ensayo de tracción y de la curva Tensión-Deformación Cíclica (ecuación N° 3); a partir de estos valores se grafican las rectas con las pendientes que respondan a las contribuciones elástica y plástica, b y c .

Por consideraciones energéticas, J.D. Morrow (17) ha mostrado que la relación entre b, c y n' está dada por las siguientes ecuaciones:

$$c = \frac{-1}{1 + 5n'}$$

Ecuación N° 4

$$b = c.n'$$

Ecuación N° 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Propiedades monotónicas

La tabla N° 1 presenta el promedio de los resultados de tres ensayos de tracción.

Resistencia a la fluencia.....	35,4 kg/mm ²	347,3 MPa
Resistencia máxima.....	62,2 kg/mm ²	610,2
Deformación a rotura real.....	0,59	
Módulo de elasticidad.....	21.080 kg/mm ²	206.795
Porcentaje de reducción en área.....	55,5 %	
Resistencia a la rotura real.....	97,3 kg/mm ²	954,5
Exponente de endurecimiento.....	0,23	
Coefficiente de resistencia.....	101,3 kg/mm ²	993,8
Tenacidad real.....	46,2 kg/mm ³	453,2

Tabla N° 1

La figura N° 7 muestra los resultados del ensayo de tracción que dan lugar a la determinación del exponente de endurecimiento.

Propiedades cíclicas

La tabla N° 2 presenta el promedio de los resultados de tres ensayos de Paso Incremental.

Resistencia a la fluencia cíclica.....	36,05 kg/mm ²	353,7 Mpa
Exponente de endurecimiento cíclico....	0,19	
Coeficiente de resistencia cíclica.....	101,7 kg/mm ²	997,7 Mpa
Coeficiente de resistencia a fatiga....	111,5 kg/mm ²	1093,8 Mpa
Coeficiente de ductilidad a fatiga.....	0,4496	
Exponente de resistencia a fatiga.....	-0,14	
Exponente de ductilidad a fatiga.....	-0,53	
Punto de transición.....	46.200	semiciclos

Tabla N° 2

La figura N° 8 muestra los resultados del ensayo de Paso Incremental que dan lugar a la determinación del exponente de endurecimiento cíclico.

Curva Tensión-Deformación cíclica

Los valores de las amplitudes de tensión y deformación plástica cíclica σ_a y $\frac{\Delta \epsilon_p}{2}$ se ajustan mediante la ecuación N° 6.

$$\sigma_a = K' \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{2} \right)^{n'}$$

Ecuación N° 6

Donde:

K' : Coeficiente de resistencia cíclica.

n' : Exponente de endurecimiento cíclico.

Para el acero tipo SAE 1038 el resultado es el siguiente:

$$\sigma_a = 101,7 \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{2} \right)^{0,19}$$

La figura N° 9 muestra comparativamente los resultados de las curvas monótonica y cíclica obtenidas por diversos tipos de ensayos.

Endurecimiento y Ablandamiento Cíclico

Las figuras N° 10 y 11 muestran respectivamente las respuestas en tracción y compresión en función del número de semiciclos del acero tipo SAE 1038 en condiciones de recocido total. Para la construcción sólo se consideran los picos de tracción y compresión de los lazos de histéresis. Se ensayaron tres probetas para cada nivel de deformación, presentando análogos resultados para el mismo nivel de deformación.

Puede observarse en las figuras N° 9, 10 y 11 que se ha operado con dos velocidades de deformación $\dot{\phi}' = 4 \cdot 10^{-3}$ y $\dot{\phi}' = 2 \cdot 10^{-3}$. La incidencia sobre los resultados ha probado no ser significativa en este orden de variación (18).

Curvas de Resistencia a Vida

La curva Deformación-Vida obtenida de acuerdo a la metodología propuesta para su predicción por J.D. Morrow (11) del acero tipo SAE 1038 en condiciones de recocido total, puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = 0,0046(2N_f)^{-0,097} + 0,4135(2N_f)^{-0,52}$$

El resultado experimental de esta expresión es el siguiente:

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = 0,0071(2N_f)^{-0,14} + 0,4496(2N_f)^{-0,53}$$

Ambas curvas, la de predicción y la experimental se observan en la figura N° 12.

Los valores experimentales σ'_f/E y ϵ'_f han sido determinados por ajuste de cuadrados mínimos de las contribuciones elástica y plástica de los ensayos individuales.

DISCUSION

Propiedades Monotónicas y Cíclicas

Bucher et al (6) (19) mediante un análisis de regresión lineal múltiple hallaron las siguientes relaciones entre propiedades mecánicas, monotónicas y cíclicas con la microestructura y la composición química de los aceros ferríticos-perlíticos:

$$S_{ys} \text{ (1000 psi)} = 13,29 + 5,90 (\%Mn) + 10,21 (\%Si) + \\ + 0,220 (\%perlita) + 0,476 (d^{-1/2})$$

Ecuación N° 7

Donde:

S_{ys} : Resistencia a la fluencia, para el 0,002 de deformación plástica.

d : Intersección media lineal de ferrita, pulgadas.

%Mn, %Si : Porcentaje en peso de Mn y Si respectivamente.

% perlita: Porcentaje en volúmen de perlita.

$$S_u \text{ (1000 psi)} = 32,36 + 8,23 (\%Mn) + 14,79 (\%Si) + \\ + 0,627 (\%perlita) + 0,34 (d^{-1/2})$$

Ecuación N° 8

Donde:

S_u : Resistencia máxima.

$$n = 0,32 - 0,034 (\%Mn) - 0,025 (\%Si) - 0,0016 (d^{-1/2})$$

Ecuación N° 9

Donde:

n : Exponente de endurecimiento.

$$K (1000 \text{ psi}) = 85,77 + 9,93 (\%Mn) + 17,65 (\%Si) + \\ + 1,29 (\%perlita)$$

Donde:

K : Coeficiente de resistencia.

$$S_f = 23,62 + 8,22 (\%Mn) + 14,38 (\%Si) + 0,119 (\%perlita) + \\ + 0,067 (d^{-1/2}) + 0,798 (S_{ys})$$

Ecuación N° 11

Donde:

S_f : Límite de fatiga en flexión rotativa.

$$S_{ys} = 0,2\%S_{ys(\text{calculado})} - 0,2\%S_{ys(\text{experimental})}$$

Ecuación N° 12

Aplicando las ecuaciones anteriores al acero tipo SAE 1038 en condiciones de recocido total, se obtiene los siguientes resultados, los que se comparan con los resultados experimentales.

Propiedad	Valores calculados	Valores experimentales	Límites para el 95% de confiabilidad
n	0,23	0,23	---
S_{ys}	33,1 kg/mm ²	35,4 kg/mm ²	$\pm 2,6 \text{ kg/mm}^2$
Su	57,8 "	62,2 "	$\pm 5,3 \text{ "}$
K	107,5 "	101,3 "	$\pm 12,7 \text{ "}$
S_f	31,0 "	---	$\pm 2,8 \text{ "}$

Tabla N° 3

Se observa en la tabla N° 3, que el método de análisis de regresión lineal múltiple, provee resultados satisfactorios para el cálculo de las propiedades mencionadas.

Curva Tensión-Deformación Cíclica

Observando la curva Tensión-Deformación cíclica de la figura N° 10, obtenida por diferentes métodos, podemos comprobar que su determinación mediante los ensayos de Paso Incremental, Paso Múltiple Creciente, Paso Múltiple Decreciente se ajustan satisfactoriamente a la curva obtenida por los ensayos individuales. Todas estas curvas indican que el acero tipo SAE 1038 recocido, endurece ciclicamente a partir de una amplitud de deformación superior a 0,0025-0,004 y por debajo de estos valores se observa ablandamiento cíclico.

Endurecimiento y Ablandamiento Cíclico

De la observación de las figuras N° 10 y N° 11 podemos afirmar que:

Para el nivel de deformación del 0,002 se obtiene un rápido ablandamiento durante los primeros 100 semiciclos y posteriormente hasta los 1000 semiciclos un ablandamiento poco marcado, luego hay un leve endurecimiento hasta la rotura final.

Para el nivel de deformación de 0,004 se observa que la velocidad de endurecimiento es mayor cuando mayor es la amplitud de la deformación. Además no se aprecian niveles de tensión de saturación estacionarios como aquel correspondiente a la amplitud de deformación-total de 0,002.

Para la obtención de la curva Tensión-Deformación cíclica, figura N° 13, a partir de ensayos individuales, se ha tomado el valor de la tensión correspondiente aproximadamente al 50% de la vida a fatiga. Para el 50% de vida a fatiga tal como se observó anteriormente no existe un estado estacionario para niveles de ampli

tud de deformación total superior al 0,002. Se ha elegido arbitrariamente el 50% de la vida a fatiga pues representa un valor promedio de los niveles de tensión a partir de aproximadamente del 20% del número de semiciclos a rotura.

En la figura N° 12 se representan los picos de compresión de los lazos de histéresis. Se observa un comportamiento similar a aquel en el que se ha considerado la parte de tracción de los ciclos de histéresis y que está representado en la figura N° 10. Pero debemos destacar que los niveles de tensión son ligeramente inferiores a los de compresión debido al efecto Bauschinger.

Ketunen y Kocks (7) a través de un estudio teórico, han explicado algunas características del fenómeno de fatiga sobre la base del endurecimiento por trabajado. Como el endurecimiento por trabajado es consecuencia de la resistencia que una estructura de obstáculos opone al movimiento de dislocaciones móviles, la medida de dicho endurecimiento da una información directa de los cambios ocurientes en la estructura de obstáculos. Dicha estructura de obstáculos pueden ser otras dislocaciones, reacciones entre dislocaciones, átomos de soluto, precipitado o inclusiones.

Esta teoría da una interpretación del endurecimiento cíclico ocurientes en metales recocidos, del límite de fatiga y de la curva S-N, cuando los ensayos se realizan controlando la tensión o la deformación.

En ensayos sobre monocristales de cobre en los que la amplitud de la deformación plástica total es controlada (7), la tensión aplicada aumenta en cada semiciclo hasta alcanzar la tensión de fluencia (σ_{ys}), a partir de la que se inicia la deformación macroscópica. Luego σ_{ys} y σ_{max} incrementan hasta un valor correspondiente al nivel de la deformación controlada. La amplitud de la tensión aplicada aumenta en cada semiciclo hasta alcanzar el valor de saturación. Este endurecimiento llamado "endurecimiento por fatiga" no

significa endurecimiento cíclico en el sentido de que hay endurecimiento durante el curso total del ensayo, sino que es comparable a un endurecimiento por trabajado instantáneo ocurrente en cada semiciclo. El valor de la tensión aplicada en la saturación () es igual al valor de la tensión de fluencia. Para determinar la relación entre la tensión aplicada en la saturación y la tensión de fluencia en el acero tipo SAE 1038 recocido, el valor de la resistencia a la fluencia ha sido obtenido de un ensayo de tracción realizado a una probeta en la que se efectuó previamente un ensayo de Paso Incremental como se observa en la figura N° 6.

Relacionando las tensiones aplicadas en la saturación con la tensión de fluencia, cuyo valor es 38,0 kg/mm², se obtiene:

Amplitud de la Deformación Total $\Delta \epsilon_t$	Amplitud de la Deformación Plástica a Saturación $\Delta \epsilon_{ps}$	Amplitud de la Tensión en la Saturación kg/mm ²	$\frac{\sigma_s}{\sigma_{ys}}$
0,0037	0,002	38,4	1,01
0,0062	0,004	42,6	1,12
0,0104	0,008	47,9	1,26
0,0125	0,010	49,6	1,31
0,0147	0,012	51,3	1,35

Tabla N° 4

Estos resultados experimentales de acuerdo a lo propuesto por Kettunen y Kocks indicarían que a partir de una amplitud de deformación total controlada de 0,0035 el material presentaría un "endurecimiento por trabajado instantáneo" en cada semiciclo para los niveles de deformación considerados.

Por debajo de una amplitud de deformación total controlada de 0,0035 el material presentaría un "endurecimiento cíclico" en el curso total del ensayo.

En el acero tipo SAE 1038 en condiciones de recocido total, se encuentra presente una segunda fase, la perlita. Pickering et al (1) estudiando el comportamiento monotónico de aceros con diferentes fracciones en volúmen de perlita, han sugerido que la resistencia a la tracción aumenta más que la resistencia a la fluencia debido a una mayor velocidad de endurecimiento por deformación de la perlita.

De acuerdo a Kettunen et al (7) se observaría un "endurecimiento por trabajado instantáneo" cuando el material presenta una relación $\sigma_3 / s_{ys} \geq 1$. Por otra parte según Pickering et al (1) en los aceros ferríticos-perlíticos con diferente fracción en volúmen de perlita, la velocidad de endurecimiento por trabajado monotónico es mayor para la perlita que para la ferrita. Podríamos inducir de acuerdo a nuestros resultados experimentales, que la presencia de ambos fenómenos puede ser considerada. El endurecimiento por trabajado instantáneo y el endurecimiento cíclico progresivo debido a una mayor velocidad de endurecimiento de la perlita imposibilita la obtención de un estado estacionario tal como se observa en las figuras N° 10 y N° 11.

De acuerdo a Kettunen et al (7) en monocristales de cobre a pequeñas amplitudes de deformación, cuando la relación $\sigma_3 / s_{ys} < 1$ existe "endurecimiento cíclico" y además si el valor de las tensiones aplicadas es muy diferente al valor de la tensión de fluencia, la estructura no endurecerá.

El comportamiento experimentado por el acero 1038 recocido en el ensayo realizado con la amplitud de deformación total controlada, a la que le corresponde una amplitud de deformación plástica en estado estacionario de $\pm 0,0006$, puede sugerir de acuerdo a la

relación $\sigma_s/s_{ys} = 0,4$ que ni el "endurecimiento por trabajado instantáneo" ni el "endurecimiento cíclico" tendrán lugar en el material.

Sin embargo el ablandamiento cíclico observado en las figuras N° 10 y N° 11, es característico de los aceros ferríticos-perlíticos en condiciones de recocido. E.Koshavan (20) ha sugerido una explicación para este comportamiento particular. Las amplitudes de deformación para las que se produce ablandamiento cíclico se encuentran dentro de la zona de deformación de Luders de la curva del ensayo monotónico. A estos niveles de amplitud de deformación, durante el primer semiciclo el material pasa el punto de fluencia superior, entrando en la región de Luders, así las dislocaciones en el material se habrán liberado de sus atmósferas de anclaje de Cottrell. Al no producirse interacción entre las dislocaciones liberadas durante el ciclado, se produce el ablandamiento del material. A medida que aumenta el número de ciclos, la estructura de defectos (interacción entre dislocaciones, apilamiento de dislocaciones y defectos puntuales) generadas durante la deformación cíclica, produce el endurecimiento que incrementa hacia el final de la vida.

Curva de Resistencia a Vida

Las curvas de predicción y experimental de la figura N° 12 permiten afirmar que el método propuesto por J.D. Morrow puede ser empleado para predecir la curva de resistencia a vida para el acero 1038 en condiciones de recocido total. J.D. Morrow afirma que el coeficiente de resistencia a fatiga, σ_f' , es igual a la resistencia a la rotura real, σ_f . De acuerdo a la figura N° 13 podemos decir que $\sigma_f' = 1,15 \sigma_f$ coincidiendo prácticamente con los resultados de S.S. Manson.

Kettunen et al (7) proponen una descripción de la relación entre amplitud de la tensión controlada y la vida a fatiga, postulando que la fractura ocurre después que ha sido acumulada una cantidad

crítica de cambio estructural y que dicha cantidad depende de la amplitud de la tensión aplicada. El cambio estructural total es directamente proporcional al número total de intersecciones de obstáculos por las dislocaciones móviles. El número total de intersecciones de obstáculos es proporcional al número total de intersecciones de obstáculos por las dislocaciones móviles. El número total de intersecciones de obstáculos es proporcional al número de ciclos, N , y al cociente entre el área de deslizamiento libre media a saturación, a_s , y el área media por obstáculo, a_0 . Luego

$$N_f \cdot \frac{a_s}{a_0} = C(\sigma) \quad \text{Ecuación N° 13}$$

Donde:

N_f : Número de ciclos a fractura.

$C(\sigma)$: Cociente entre la cantidad crítica de cambio estructural y la probabilidad de generar cambio estructural por la intersección dislocación móvil-obstáculo.

La relación a_s/a_0 es una función de la relación σ_a/s_{ys} dada por la teoría estadística de la tensión de fluencia (8). La cantidad de daño acumulativo, C , que conduce a la fractura, depende de la tensión aplicada, y si esta dependencia es conocida, la ecuación N° 13 es la ecuación de la curva S-N.

Cuando la relación a_s/a_0 no es conocida se puede estimar de la siguiente manera: la amplitud de la tensión plástica a saturación depende de a_s a través de la relación:

$$\Delta E_{ps} = \frac{a_s}{n(\sigma) \cdot |\bar{b}|} \quad \text{Ecuación N° 14}$$

Donde:

$|\bar{b}|$: Módulo del vector de Burgeers.

$n(\sigma)$: Número de dislocaciones móviles.

A su vez a_0 es inversamente proporcional al cuadrado de la resistencia a la fluencia (8). Así se puede reescribir la ecuación N° 13 de la siguiente forma:

$$\Delta \epsilon_{PS} \cdot S_{YS}^2 \cdot N_f = C(\sigma) \quad \text{Ecuación N° 15}$$

Cuando la diferencia entre σ_a y S_{YS} es pequeña como en los ensayos con amplitud de deformación controlada que conducen a fractura, S_{YS} puede ser reemplazado por σ_S entonces:

$$\Delta \epsilon_{PS} \cdot \sigma_S^2 \cdot N_f = C(\sigma) \quad \text{Ecuación N° 16}$$

La ecuación N° 16 puede ser verificada por los resultados experimentales obtenidos para el acero tipo SAE 1038 en condiciones de recocido total. La tabla N° 5 provee los datos necesarios para la construcción de la curva de la figura N° 14 de la que se obtiene la ecuación N° 17.

$$\Delta \epsilon_{PS} \cdot \sigma_S^2 \cdot N_f = C(\sigma^2) \quad \text{Ecuación N° 17}$$

La diferencia entre la ecuación N° 17 y la ecuación N° 16, se debe a que la pendiente de la curva es igual a 4, esto indica que la cantidad crítica de daño acumulativo es inversamente proporcional a σ^2 y no a σ como ha sido supuesto originalmente por la teoría de Kettunen et al (7).

Deformación Total	$\bar{\sigma}_s$ kg/mm ²	$\Delta \epsilon_{ps}$	N_f
$\pm 0,02$	54,8	0,0338	220
$\pm 0,018$	53,15	0,0298	340
$\pm 0,014$	50,12	0,0226	460
$\pm 0,012$	46,17	0,0193	675
$\pm 0,010$	44,72	0,0155	981
$\pm 0,00855$	42,25	0,0126	2096
$\pm 0,006$	38,14	0,008	3676
$\pm 0,004$	34,0	0,0042	13869
$\pm 0,002$	28,24	0,0013	68539

Tabla N° 5

Mediante un ajuste por cuadrados mínimos con regresión lineal, se determinó que el ajuste de la curva correspondiente da un coeficiente de regresión de -0,9809, una pendiente igual a -4,0869 y una ordenada al origen igual a 7,9845.

Sugerimos que la diferencia entre ambas relaciones, se debe a la presencia de la segunda fase, perlita, en el material considerado. Esto deberá ser confirmado estudiando materiales con distintas fracciones en volumen de perlita.

Por otra parte, el ajuste de la curva de la figura N° 14 construida con los resultados experimentales mediante la ecuación N° 17, es lo suficientemente bueno como para afirmar que la descripción de la relación entre la amplitud de la deformación controlada y la vida a fatiga presenta concordancia por lo menos comparable con aque-

lla generalmente obtenida a traves de la ley de Coffin-Manson. Esta conclusión deberá ser corroborada con una mayor cantidad de datos experimentales obtenidos en diferentes materiales, especialmente en aquellos que se encuentra presente una segunda fase, tal como los aceros.

La determinación de la estructura de obstáculos que se desarrollan durante la fatiga en acero tipo SAE 1038 en condiciones de recocido total, así como el examen de la superficie de fractura, está siendo estudiada y constituye el tema de un próximo trabajo a publicar.

CONCLUSIONES

- 1) El método de análisis por regresión múltiple lineal propuesto por Bucher et al (6) para predecir las propiedades monotónicas y el límite de fatiga en aceros ferríticos-perlíticos en función de la microestructura y la composición química aplicada al acero tipo SAE 1038 en condiciones de recocido total, presenta resultados satisfactorios.
- 2) En el acero tipo SAE 1038 en condiciones de recocido total, para las amplitudes de deformaciones totales mayores de 0,0035 se observa endurecimiento por trabajado instantáneo y endurecimiento cíclico progresivo durante el ciclado. Para amplitudes de deformaciones menores, como las comprendidas dentro de la zona de deformación de Luders, se observa ablandamiento cíclico.
- 3) El método propuesto por J.D. Morrow (15) puede ser empleado para predecir la curva de resistencia a vida para este tipo de acero. El coeficiente de resistencia a fatiga, $\sigma_f' = 1,15 \sigma_f$, coincide con aquel propuesto por S.S. Manson (14).
- 4) La teoría de Kettunen y Kocks que relaciona el fenómeno de fatiga al fenómeno de endurecimiento por trabajado, a través de la Teoría Estadística de Deslizamiento (7) permite obtener una descripción de la relación entre la amplitud de la tensión de saturación, amplitud de la deformación plástica y el número de ciclos a fractura que ajusta adecuadamente los datos experimentales para el acero tipo SAE 1038 en condiciones de recocido total y con una concordancia por lo menos comparable con aquella obtenida a través de la ley de Coffin-Manson.

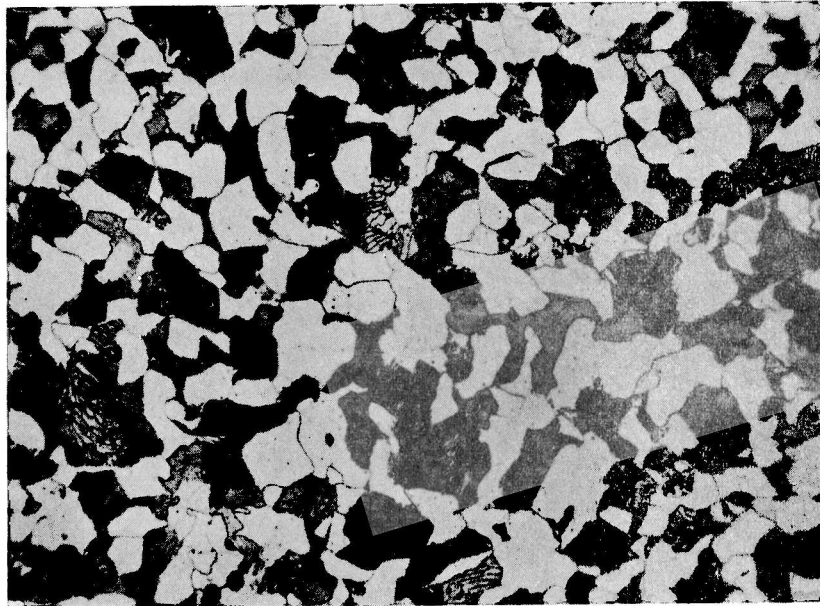


Figura N° I X 600

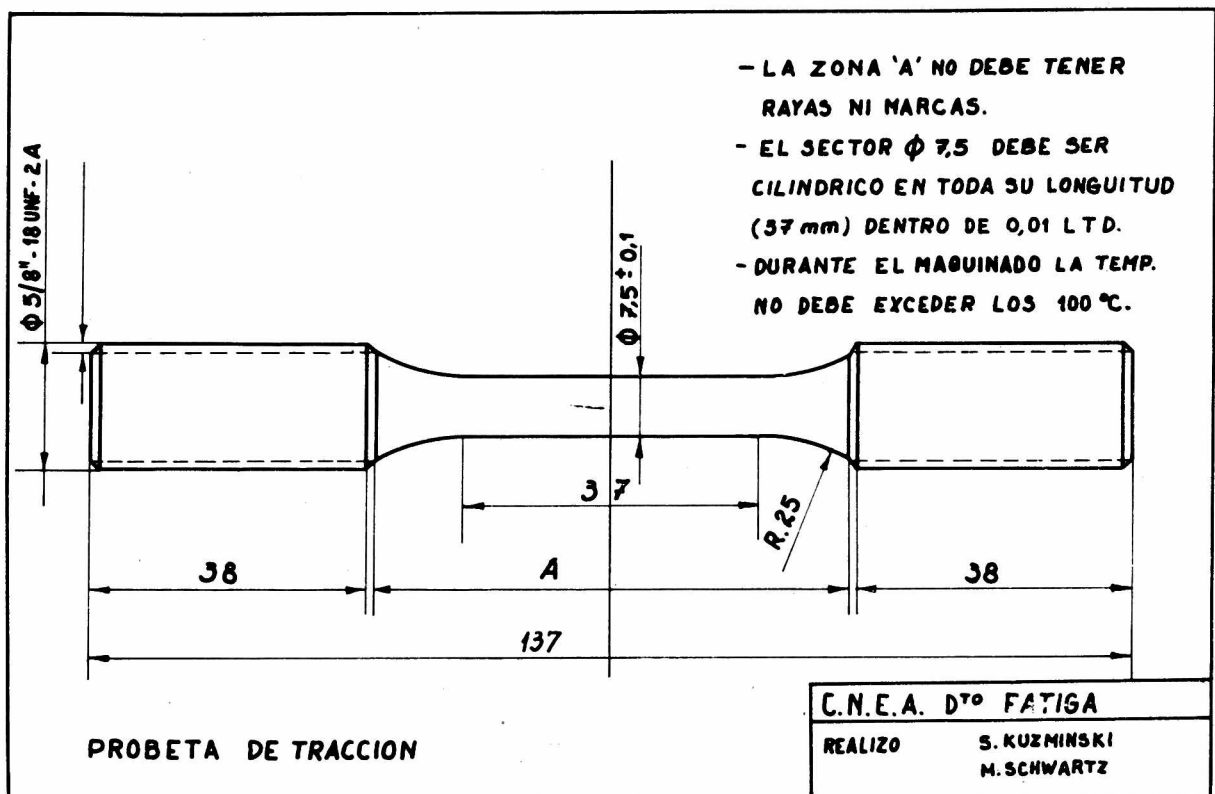


Figura N° 2

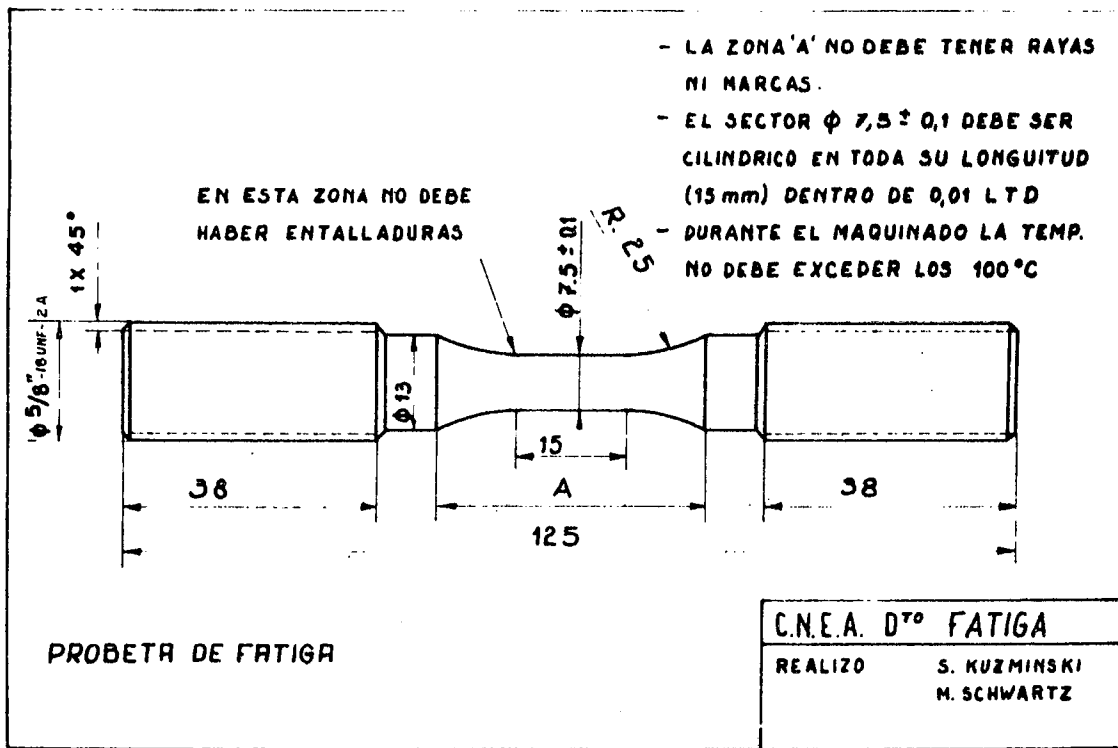


Figura N° 3

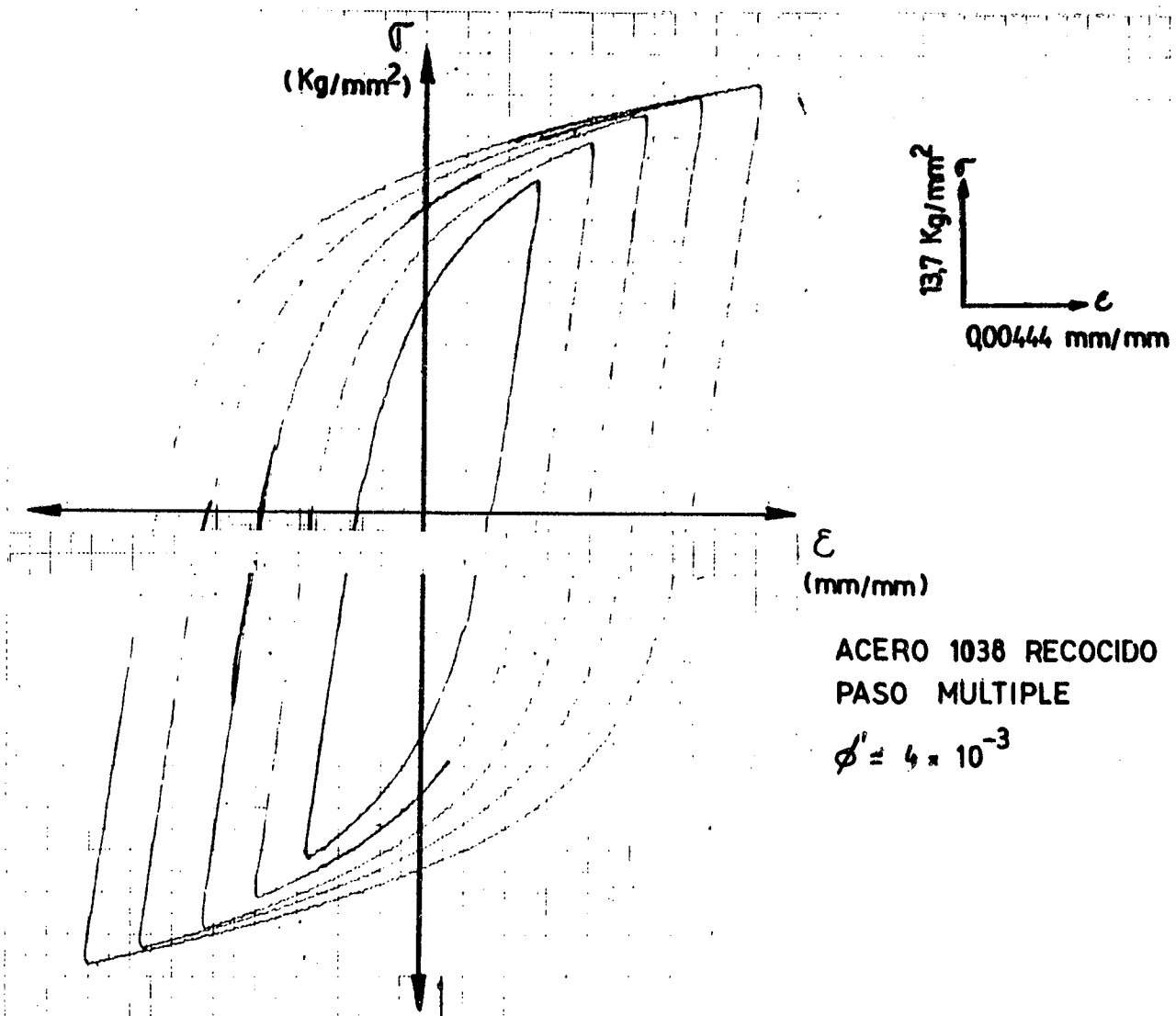


Figura N° 4

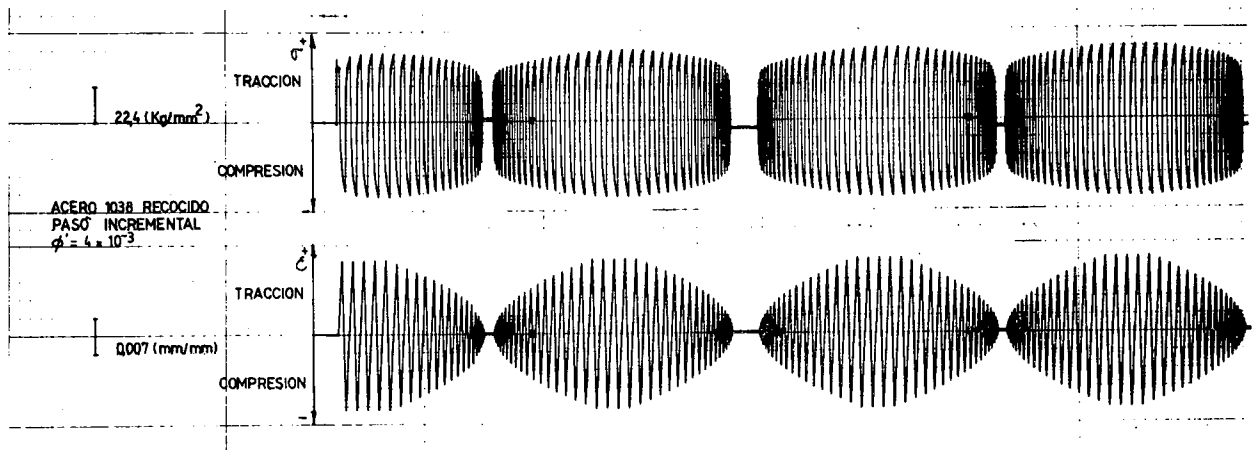


Figura N° 5

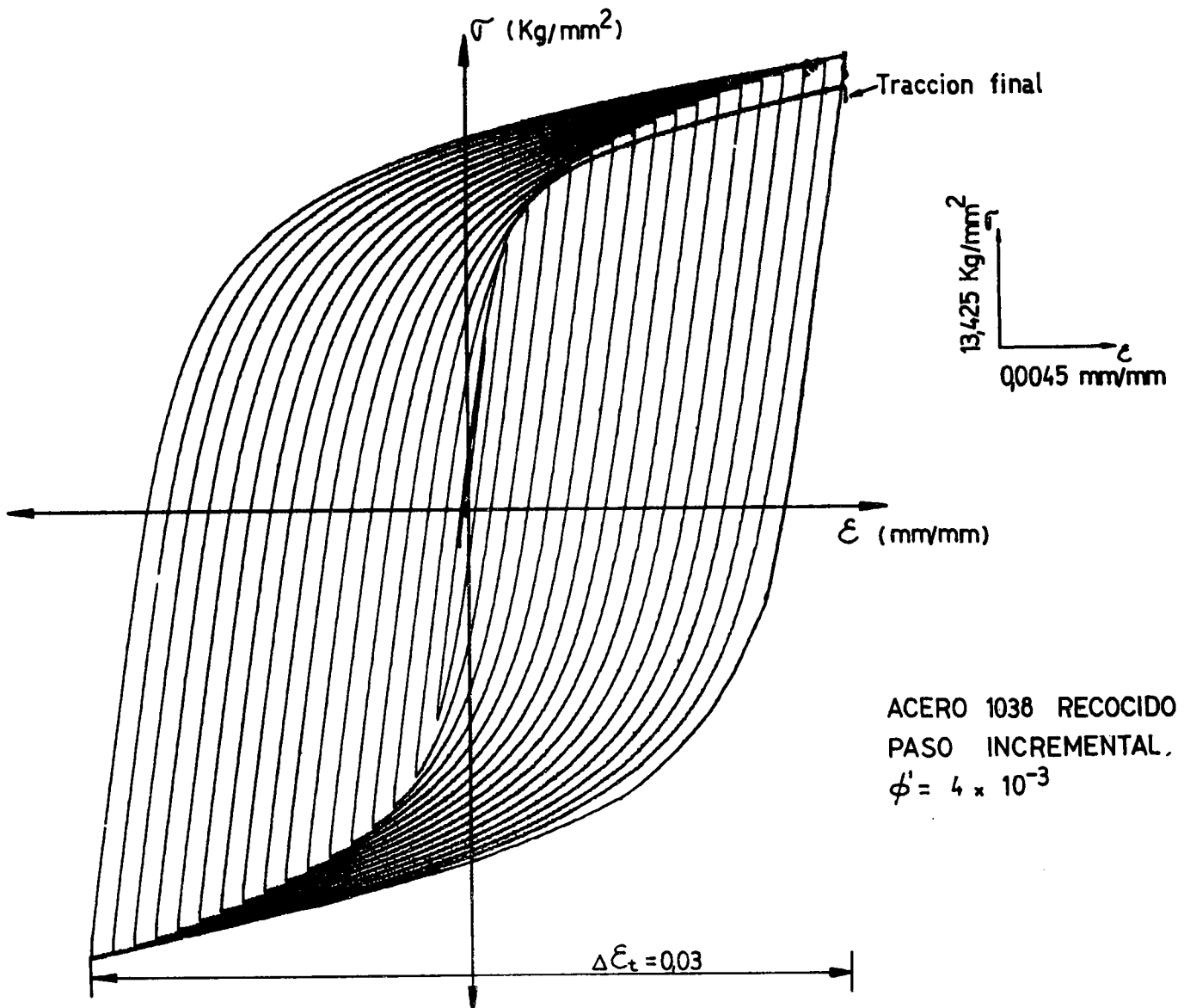


Figura N° 6

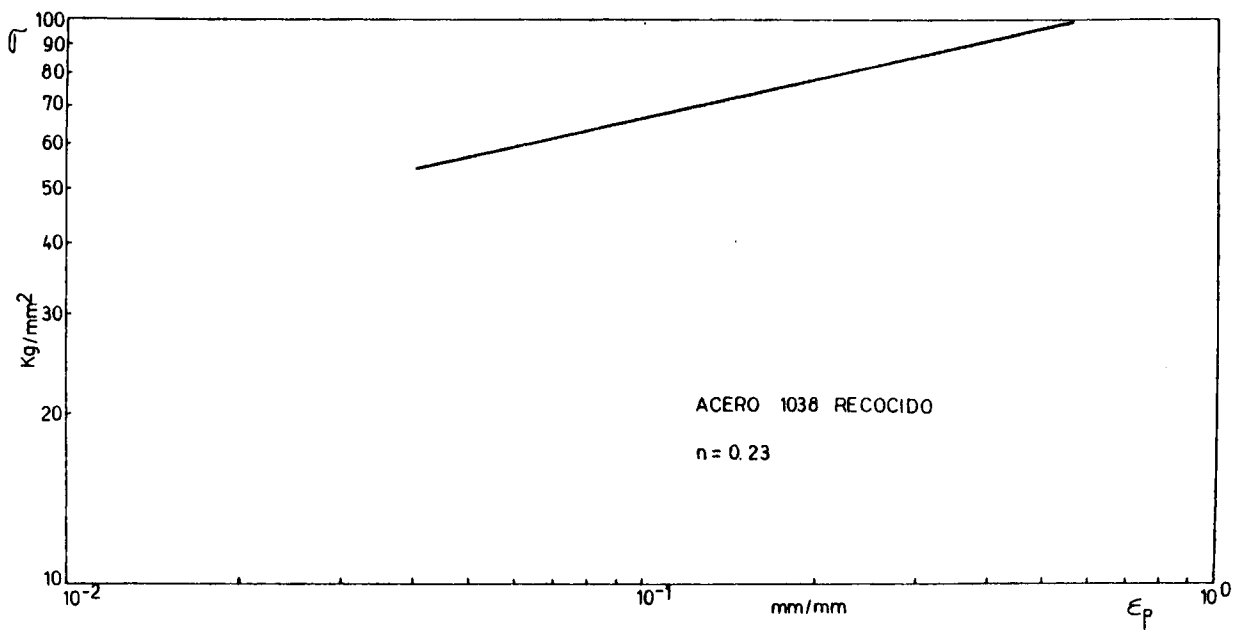


Figura N° 7

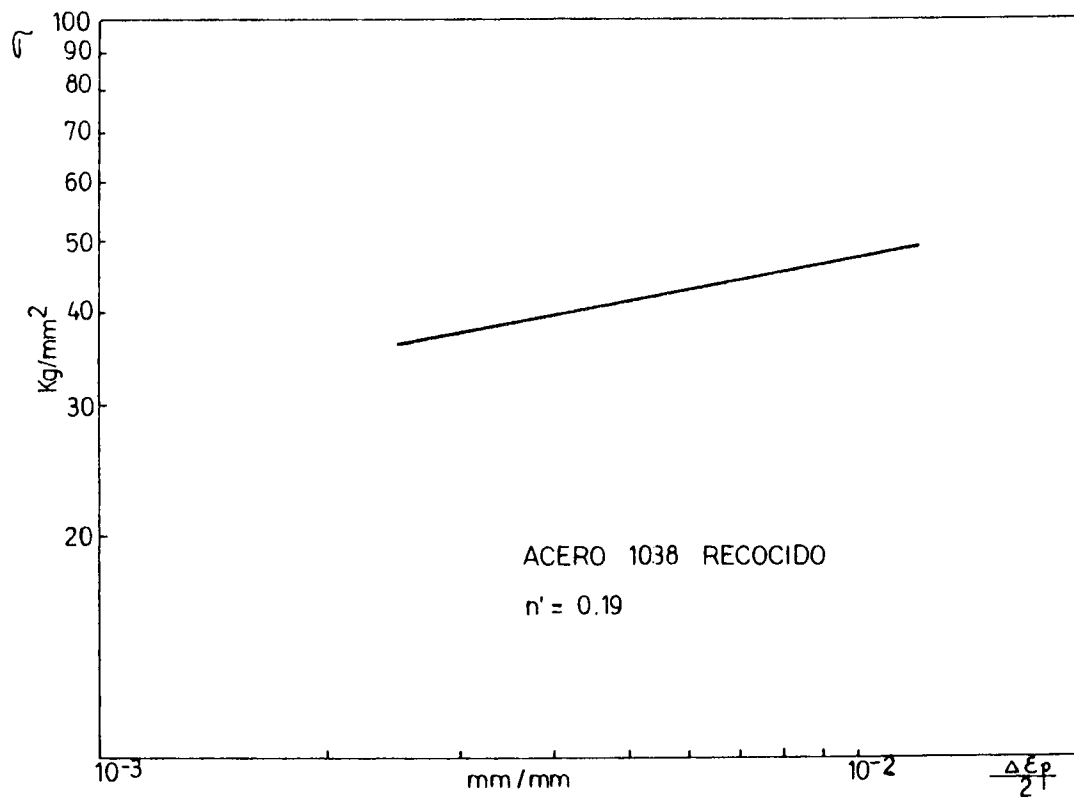


Figura N° 8

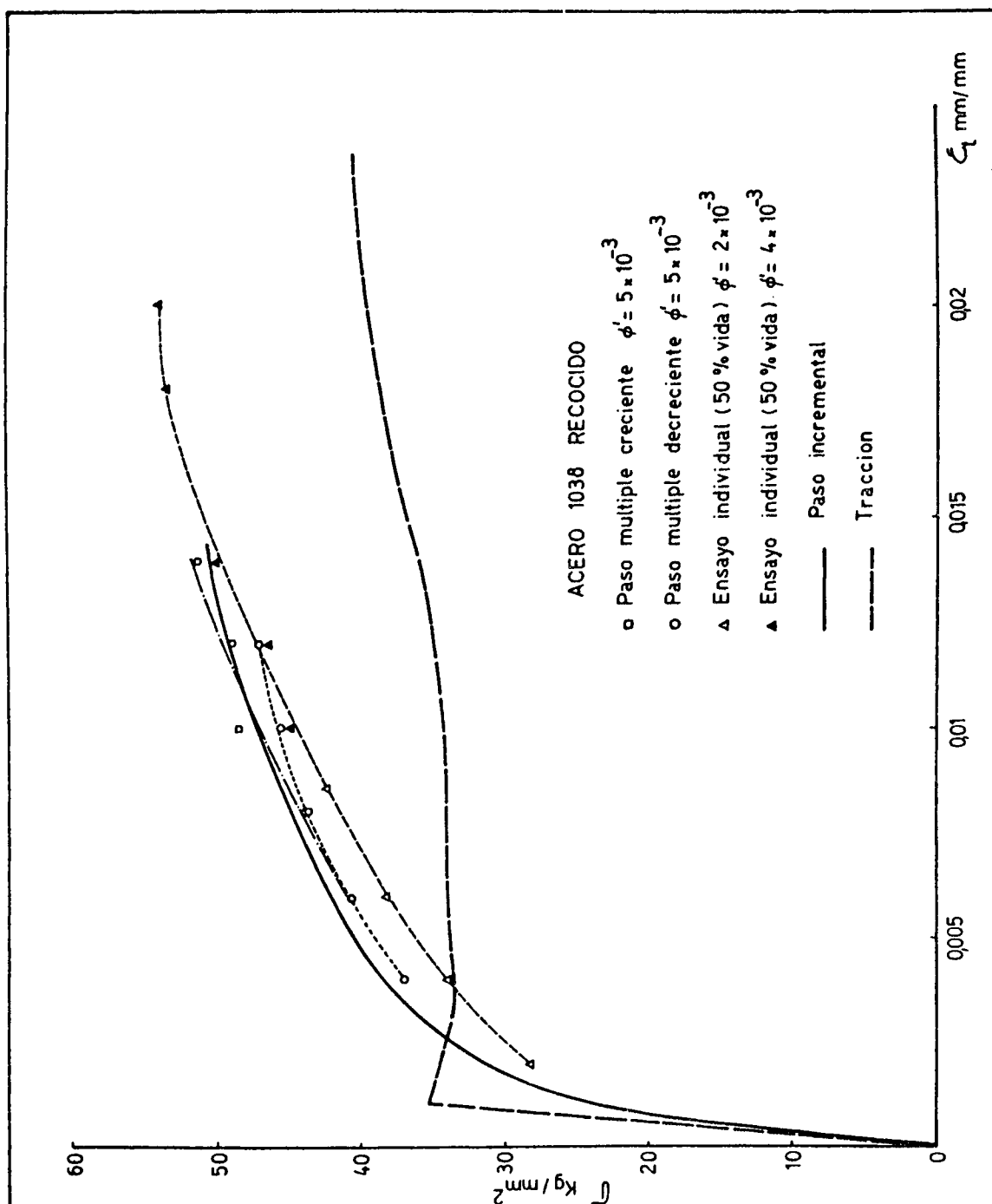


Figura N° 9

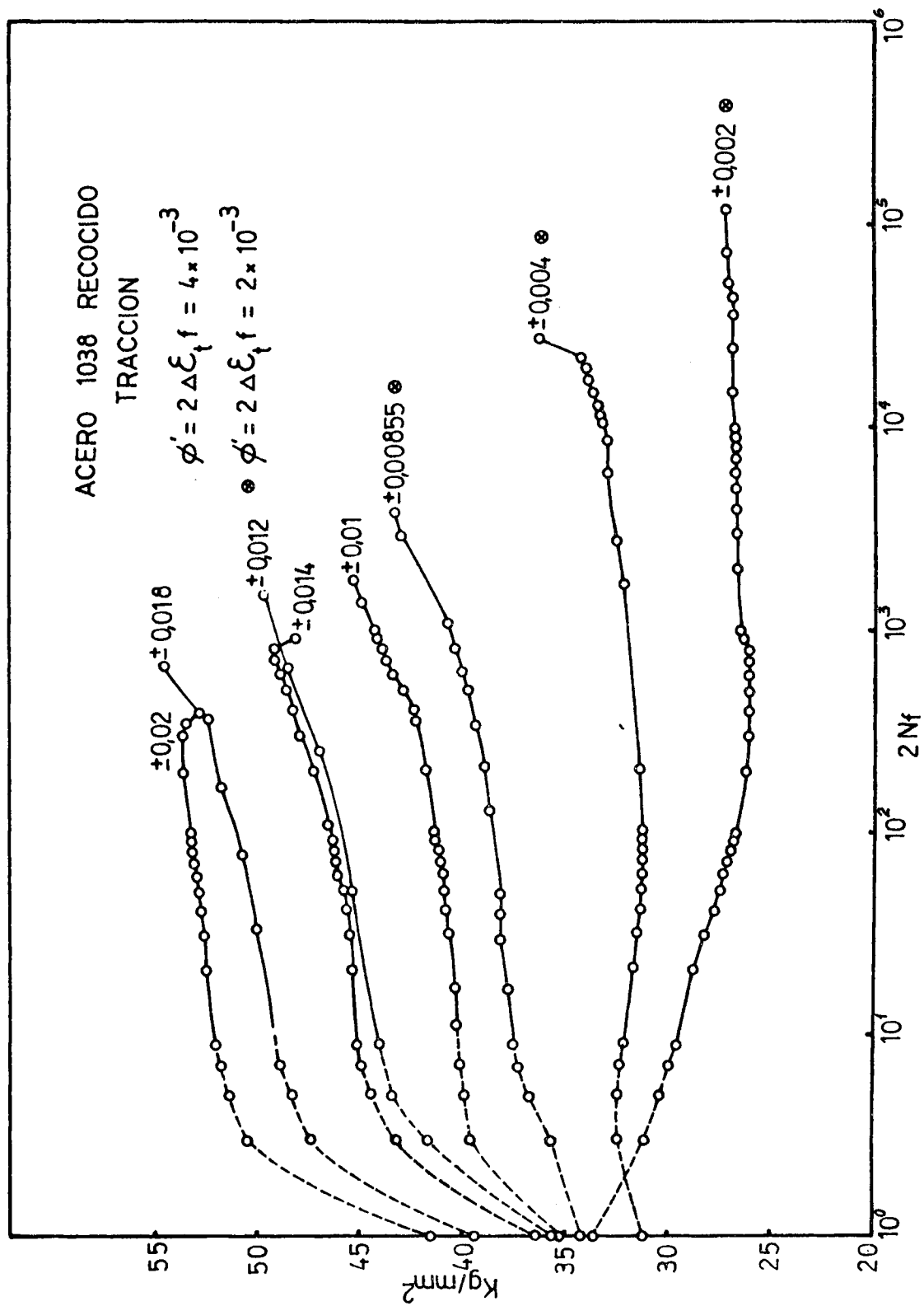


Figura N° 10

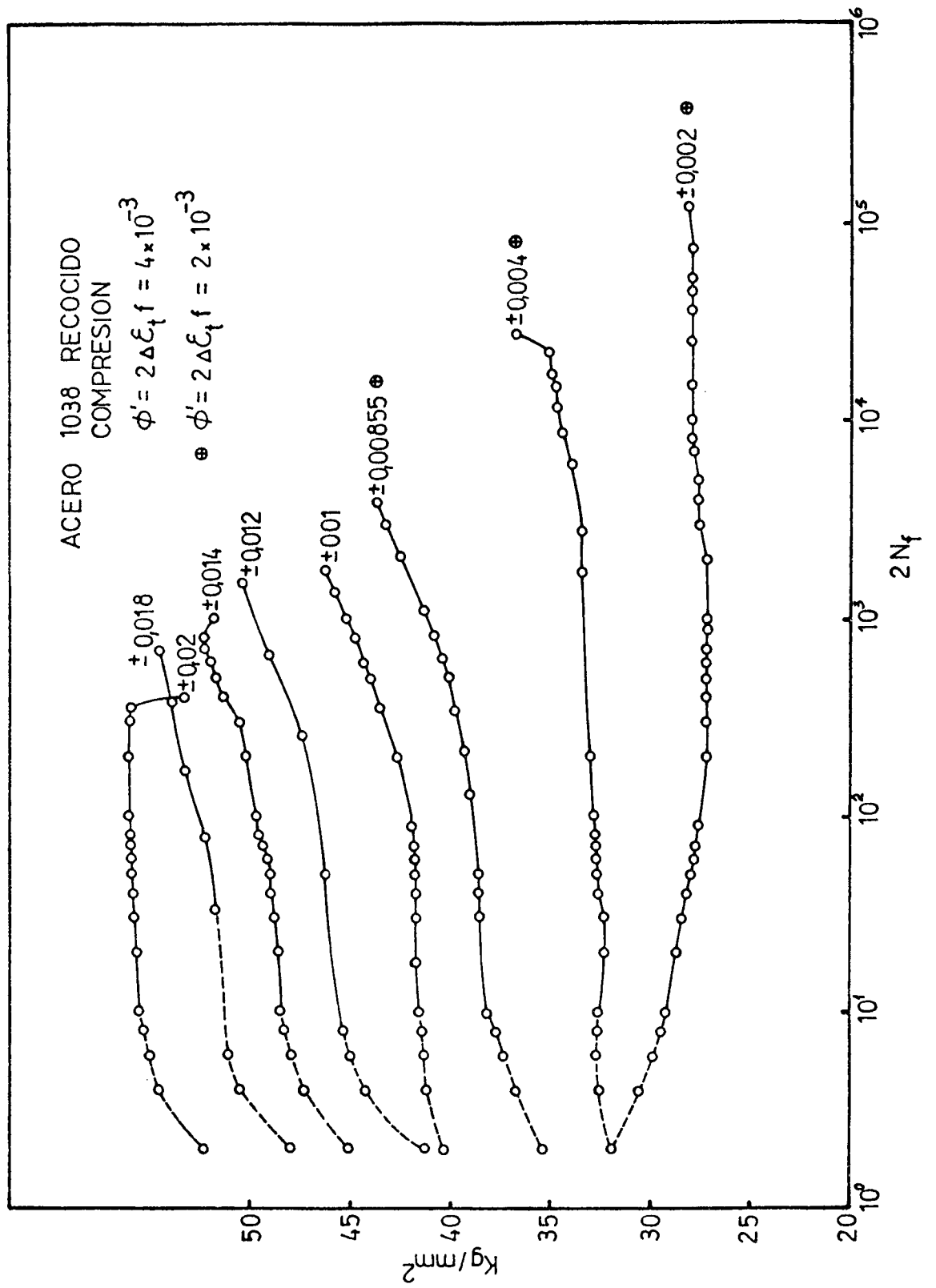


Figura N° II

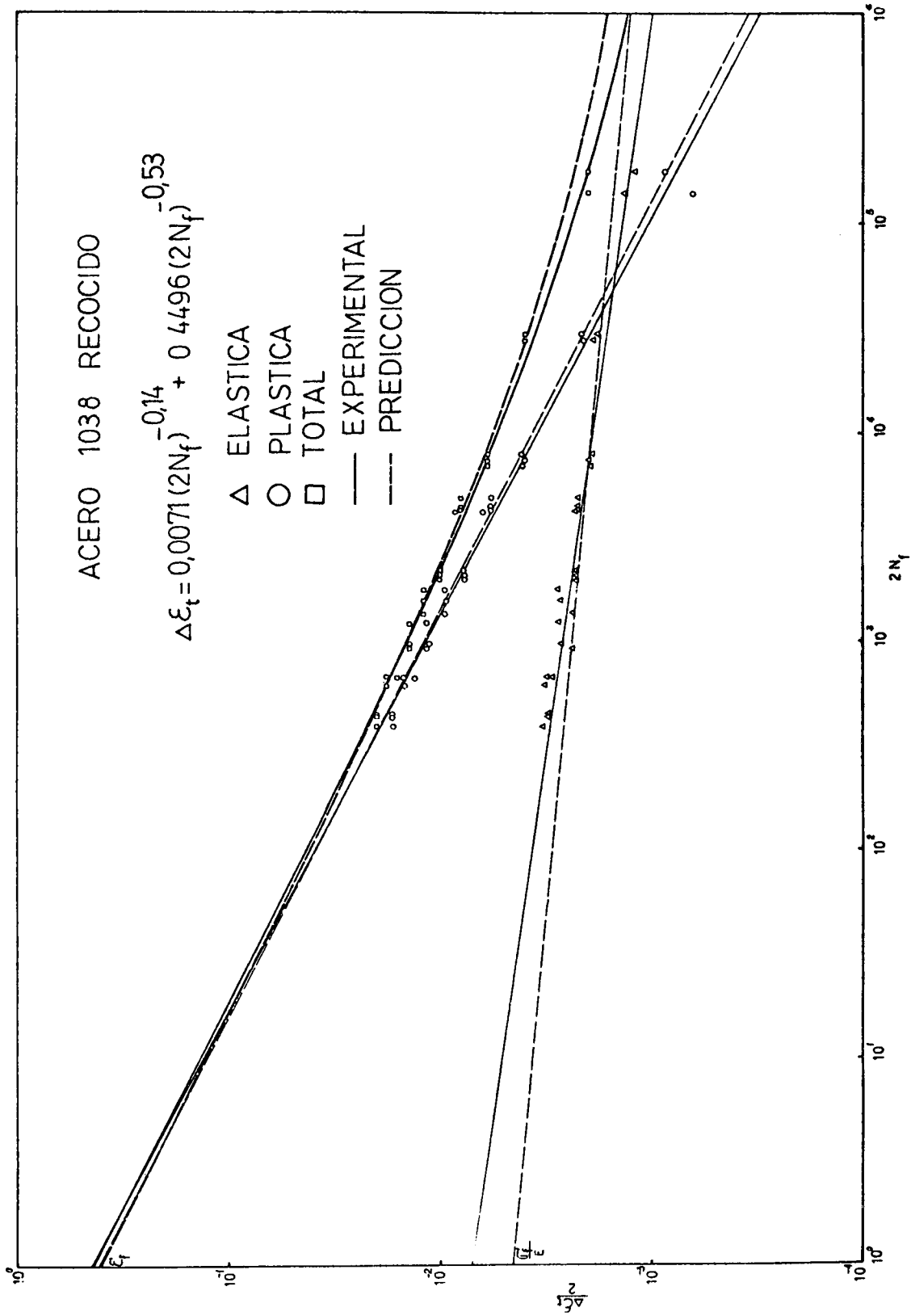


Figura N° 12

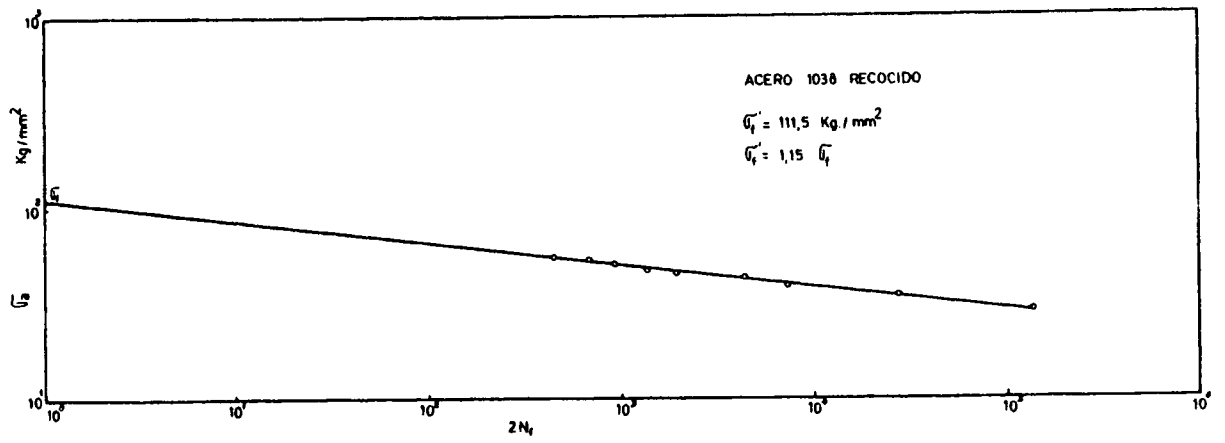


Figura N° 13

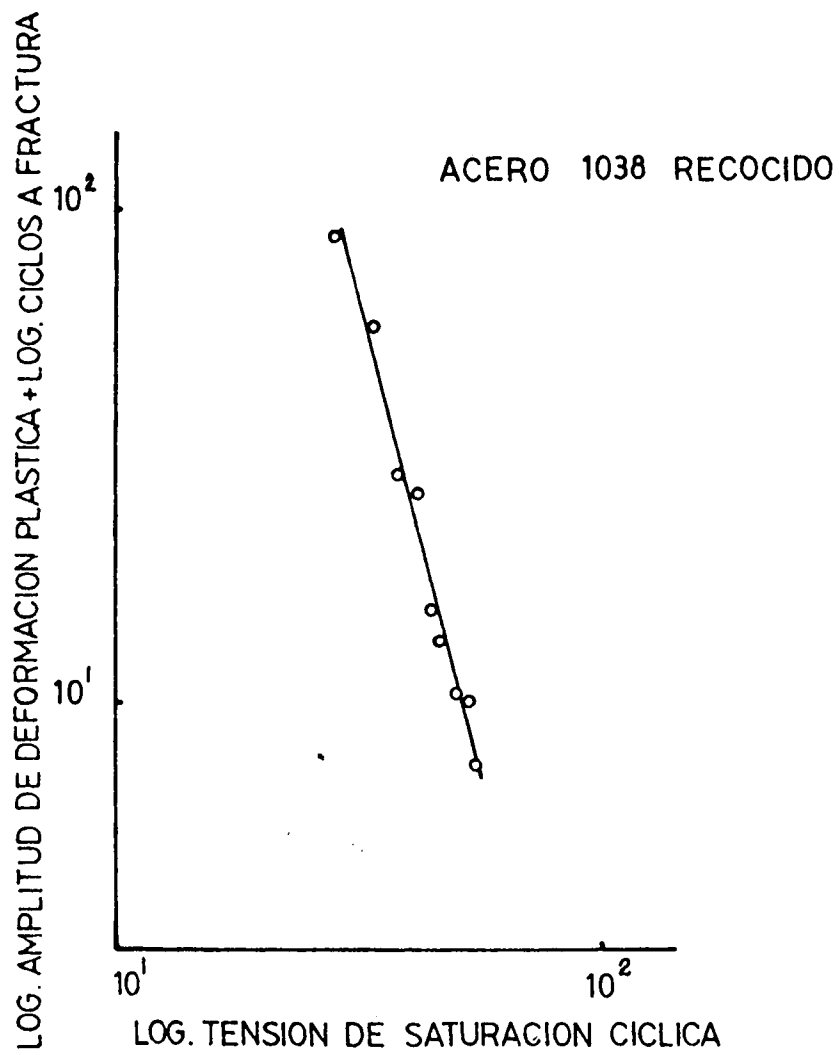


Figura N° 14

SIMBOLOS EMPLEADOS

- $\Delta \epsilon_t$: Amplitud de la deformación cíclica total.
- $\Delta \epsilon_e$: Amplitud de la deformación elástica cíclica.
- $\Delta \epsilon_p$: Amplitud de la deformación plástica cíclica.
- $\Delta \epsilon_{ps}$: Amplitud de deformación plástica a saturación.
- σ_a : Amplitud de la tensión cíclica.
- σ_s : Amplitud de la tensión en la saturación.
- a_s : Area de deslizamiento libre media a saturación.
- a_o : Area media por obstáculo.
- $C(\sigma)$: Cociente entre la cantidad crítica de cambio estructural y la probabilidad de generar cambio estructural por la intersección dislocación móvil-obstáculo.
- ϵ_f' : Coeficiente de ductilidad a fatiga.
- κ' : Coeficiente de resistencia cíclica.
- κ : Coeficiente de resistencia .
- σ_f' : Coeficiente de resistencia a fatiga.
- ϵ_f : Deformación a rotura real.
- n' : Exponente de endurecimiento cíclico.
- n : Exponente de endurecimiento.
- b : Exponente de resistencia a fatiga.
- d : Intersección media lineal de ferrita.
- S_f : Límite de fatiga en flexión rotativa.
- E : Módulo de elasticidad.
- $|\vec{b}|$: Módulo del vector de Burgeers.
- N_f : Número de ciclos a fractura.
- $n(\sigma)$: Número de dislocaciones móviles.
- $\%R_a$: Porcentaje de reducción del área.
- $2N_t$: Punto de transición en el que $\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2}$
- S'_{ys} : Resistencia a la fluencia cíclica para el 0,002 de deformación plástica cíclica.

- S_{YS} : Resistencia a la fluencia para el 0,002 de deformación plástica.
- σ_f : Resistencia a la rotura real.
- S_u : Resistencia máxima.
- $2N_f$: Semiciclos a fractura.
- U_p : Tenacidad real.
- ϕ' : Velocidad de deformación.
- C : Exponente de ductilidad a fatiga.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración prestada por los Servicios de Tratamientos Térmicos, Metalografía Microscópica, Metalografía Cuantitativa, Análisis por Microsonda, Ensayos no Destructivos, Talleres Especializados y Fotografía pertenecientes a la Comisión Nacional de Energía Atómica. Asimismo al Servicio de Microscopía Electrónica de Barrido dependiente del Instituto de Neurobiología. De igual manera a Establecimientos Metalúrgicos Santa Rosa S.A. por la provisión del material ensayado. También y muy especialmente al Señor Guillermo M. Schwedler y al Ingeniero Domingo A. Di Bella por la colaboración prestada en la realización y discusión de los ensayos, y las valiosas sugerencias aportadas por el Prof. F.B. Pickering, Reader in Metallurgy, Sheffield Polytechnic, Inglaterra, en la discusión de los resultados experimentales y programa de investigación.

BIBLIOGRAFIA

- 1) K.W. Burns y F.B. Pickering "Deformation and Fracture of Ferrite-Pearlite Structures". J.I.S.I. 202, 899 (1964).
- 2) J.T. Barnsby y M.R. Johnson "Fracture in Pearlitic Steels". Met. Sci. J., 3, 155 (1969).
- 3) W.H. Bruckner. Weld. J. Res. Supp., 29, 467-s (1950).
- 4) H. Abdel-Raouf, P.P. Benham y A. Plumtree "Mechanical Behaviour and Substructures of Strain Cycled Iron" Canadian Met., Quarterly 1971 vol. 10, p.87.
- 5) C.E. Feltner y C. Laird "The Role of Slip Character in Steady Cyclic Stress Strain Behaviour" Trans. AIME 245, 1372 (1969).
- 6) J.D. Grozier y J.H. Bucher "Correlation of Fatigue Limit with Microstructure and Composition of Ferrite-Pearlite Steels" ASTM, Junio 1967, p.393.
- 7) P.O. Kettunen y U.F. Kocks "Fatigue Studied as a Statistical Work-Hardening Phenomenon" Acta Polytechnica Scandinavica, Ch 104, 1971, p.1.
- 8) U.F. Kocks "A Statistical Theory of Flow Stress and Work-Hardening" Phil. Mag. 13, (1966), p. 541.
- 9) P.O. Kettunen "Work Hardening During Cyclic Deformation" Proc. Asilomar Conf. on the Strength of Metals and Alloys, 1970, Vol. 1, p. 214.
- 10) P.O. Kettunen y U.F. Kocks "On Possible Relation Between Work-Hardening and Fatigue Failure" Srr. Met. 1 (1967), p. 13.
- 11) D.T. Raske y J. Dean Morrow "Mechanics of Materials in Low Cycle Fatigue Testing Manual on Low Cycle Fatigue Testing" ASTM Special Technical Publication 465 (1969) p.1.

- 12) J.C. Di Primio y J.C. Crespi "IRAM Tecnología y Gestión" Vol. 36, N° 4, p. 183.
- 13) I. Lotersztain "Rugosimetría de las Superficies Mecanizadas" Técnica e Industria, Noviembre (1964), 53.
- 14) S. Manson y M.N. Hirschberg "Fatiga: An Interdisciplinary Approach" Syracuse Univ. Press., Syracuse N.Y. (1964) 133.
- 15) J. Dean Morrow "Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals" ASTM Special Technical Publication N° 378 (1965).
- 16) C.E. Feltner y R.W. Landgraf "Selecting Materials to Resist Low Cycle Fatigue" ASME 69-DE-59, Feb. (1969).
- 17) J. Dean Morrow "Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals" ASTM STP N° 378, 1965, p. 45.
- 18) H. Abdel-Raouf, A. Plumtree y T.H. Topper "Effects of Temperature and Deformation Rate on Cyclic Strength and Fracture of Low-Carbon Steel" Technical Note N° 14, Nov. 1971, Ontario, Canadá.
- 19) J.H. Bucher, J.D. Grozier y J.F. Enrietto. Chapter 5 "Strength and Toughness of Hot-Rolled Ferrite-Pearlite Steels", Fracture, Ed. por H. Liebowitz, Vol. 6, 1969, p. 247.
- 20) S. Keshavan "Some Studies on the Deformation and Fracture of Normalised Mild Steel Under Cyclic Conditions", University of Waterloo, Ontario, Canadá, December 1967.