

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 2	AÑO 1972

04.72.11

4

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

CARACTERIZACION DE METALES PARA RESISTIR FATIGA
DE BAJO NUMERO DE CICLOS

J. C. Di Primio y J. C. Crespi

Gerencia de Tecnología
Buenos Aires-Argentina

1972

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

CARACTERIZACION DE METALES PARA RESISTIR FATIGA
DE BAJO NUMERO DE CICLOS

J.C. Di Primio y J.C. Crespi

Gerencia de Tecnología
Buenos Aires-Argentina

1972

CARACTERIZACION DE METALES PARA RESISTIR FATIGA DE BAJO NUMERO DE CICLOS

por

J. C. Di Primio y J. C. Crespi

Comisión Nacional de Energía Atómica
Gerencia de Tecnología
Buenos Aires
República Argentina

RESUMEN

Feltner y Landgraf ⁽⁴⁾ han propuesto un método fenomenológico para seleccionar materiales desde el punto de vista de la resistencia a la fatiga de bajo ciclo. El mismo ha sido aplicado en nuestro laboratorio para estudiar el comportamiento de aceros al carbono.

Se describe brevemente el procedimiento experimental, que permite seleccionar materiales metálicos para una dada aplicación, desde el punto de vista de su respuesta a las deformaciones cíclicas. También permite caracterizar el comportamiento por fatiga y el efecto de tratamientos mecánicos y térmicos sobre el mismo.

Los resultados que se presentan muestran cómo puede realizarse esa caracterización, usando un número limitado de probetas, cuando se emplea una máquina de ensayos tipo "closed loop" y un programa adecuado. Ellos destacan, asimismo, la potencialidad del método para aplicarlo en la industria cuando se desea evaluar propiedades de fatiga bajo deformaciones cíclicas.

I. INTRODUCCION

Una amplia información sobre fatiga de metales se ha acumulado durante largo tiempo usando ensayos de carga oscilante, cuyos resultados han sido expresados mediante las denominadas curvas S-N. Estas reflejan el comportamiento a la fractura por fatiga de cada material estudiado. Durante muchos años, las curvas S-N han sido empleadas con fines de diseño. También, en menor grado, para tratar de entender aspectos básicos del fenómeno de fatiga. Mediante su estudio se ha obtenido información acerca de la influencia de la temperatura, frecuencia de la sollicitación, cargas estáticas, ciertos parámetros estructurales -tamaño de grano, elementos de aleación, inclusiones-, etc., sobre la respuesta de los metales frente a cargas cíclicas.

Más recientemente se ha prestado considerable atención a ensayos realizados mediante deformaciones cíclicas, que corresponden a cargas elevadas y, en consecuencia, a vidas cortas. Cuando la vida es inferior a 10^4 - 10^5 ciclos, la fatiga es producida por deformaciones elevadas, que pueden ser medidas y/o controladas.

El interés en este campo de la fatiga de metales surgió como consecuencia de los trabajos de Manson, Coffin y respectivos colaboradores, y se ha extendido cuando se hizo claro que la deformación plástica cíclica juega un rol importante para entender el mecanismo de la fatiga.

La aparición de nuevo equipo de ensayos ha permitido programar experimentos en los cuales es factible controlar la deformación por ciclo, en lugar de la carga. Ello ha hecho posible estudiar fenómenos de endurecimiento y/o ablandamiento por fatiga. Los metalurgistas han usado estos métodos para tratar de analizar mecanismos básicos, aplicando las técnicas y teorías utilizadas con anterioridad para estudiar la deformación unidireccional. De este modo se han obtenido teorías relativas a la formación de microfisuras y a su propagación, y se ha estudiado la influencia del modo de deformación, la energía de falla de apilamiento, la acción de solutos, precipitados, inclusiones, etc., sobre los procesos de iniciación y propagación de fisuras.

La cantidad de información acumulada sobre la respuesta de metales frente a deformaciones cíclicas ha permitido sistematizar los datos mediante una descripción fenomenológica del proceso de fatiga. Ello ha sido hecho, en particular, por grupos en la Universidad de Illinois ^(1,2) y en el Laboratorio Científico de la Ford Motor Co. ^(3,4), en Estados Unidos.

En lo que sigue, describiremos los fundamentos y alcances de esa

sistemática, para destacar su importancia con fines de caracterización y selección de materiales para resistir fatiga de bajo número de ciclos. Ejemplificaremos su uso mediante los resultados obtenidos en nuestro laboratorio para el caso de aceros IRAM 600, tipos 1010 deformado en frío, y 1050 laminado en caliente.

II. EXPERIMENTAL

Con el objeto de analizar la aplicabilidad del método propuesto por Feltner y Landgraf (4), hemos realizado una serie de ensayos en nuestro laboratorio usando aceros de origen nacional. Los aceros en cuestión son : IRAM 600, tipo 1010, trabajado en frío (acero No.1 en el texto siguiente y figuras), e IRAM 600, tipo 1050, laminado en caliente (acero No.2).

En la referencia 5 se han descrito en detalle los métodos experimentales. Aquí sólo deseamos mencionar que se realizaron ensayos de fatiga de corto número de ciclos, bajo condiciones de deformación total constante por ciclo. En un sólo caso se mantuvo constante la deformación plástica por ciclo.

El trabajo fue realizado con una máquina de ensayos MTS 810. Este equipo permite programar ensayos de fatiga dentro de un amplio rango de frecuencias, controlando a voluntad cualquiera de las siguientes variables : carga, deformación total o deformación plástica por ciclo. La Figura 1 muestra una vista general de la máquina MTS y equipo auxiliar. En la Figura 2 se presenta una fotografía del sistema de mordaza inferior utilizado, que es autoalineante y de fácil construcción. La Figura 3 muestra el tipo de probeta usado en nuestros ensayos, y la forma en que el extensómetro se fija a la misma.

III. RESPUESTA DE LOS METALES A DEFORMACIONES PLASTICAS REPETIDAS

Cuando se fatiga un metal controlando la deformación -total o plástica- por ciclo, en ensayos de tracción-compresión con deformación media nula, se observa que la forma y tamaño de los lazos de histéresis obtenidos representando tensión vs. deformación, cambian a medida que el experimento progresa. La variación depende de las condiciones iniciales del metal-su historia mecánica y térmica-, la temperatura y la magnitud de la deformación aplicada.

A temperatura constante, en metales bien recocidos el efecto se revela

generalmente como un incremento de la carga (Figura 4). Este endurecimiento por fatiga ocurre durante la etapa inicial del proceso -10 a 20% de la vida-. Gradualmente, el lazo de histéresis se estabiliza, alcanzándose así un valor constante de la tensión (carga) a deformación constante: se dice entonces que se ha alcanzado una etapa de saturación, o estado estacionario (Figura 5).

El fenómeno de ablandamiento por fatiga (Figura 6) aparece, por lo general, cuando el metal ensayado se encuentra en condiciones de trabajado en frío, o de predeformación, y es sometido a deformaciones cíclicas de magnitud menor que las sufridas durante el trabajado. A medida que progresa la fatiga, también en este caso la forma y tamaño del lazo de histéresis alcanzan valores estables (Figura 7), que permanecen durante la mayor parte de la vida.

La tensión de saturación es función de la amplitud de la deformación cíclica. Para un dado valor de esta última, metales que poseen un modo de deformación ondulado -líneas de deformación que indican facilidad de deslizamiento cruzado- poseen una única tensión de saturación, la que se alcanza ya sea por ensayos de endurecimiento o ablandamiento.

Cuando los metales tienen un modo de deformación plano -es decir, el deslizamiento cruzado es difícil- la tensión de saturación depende del estado inicial. En este caso, es preciso tener en cuenta si el estado estacionario se ha alcanzado a partir de endurecimiento o ablandamiento por fatiga.

Si se unen los máximos de los lazos de histéresis estacionarios, obtenidos para una gama de deformaciones constantes por ciclo, se obtiene la llamada curva cíclica de tensión-deformación. Esta curva puede ser ventajosamente comparada con la de tensión-deformación obtenida mediante ensayos monotónicos, que representa la respuesta del metal a esfuerzos unidireccionales.

La curva cíclica de tensión-deformación puede ser determinada por varios métodos, los que han sido descriptos en detalle previamente ⁽⁶⁾. La unión de los máximos de lazos de histéresis estables, obtenidos con varias probetas del mismo material, permitió definir la curva cíclica. Dado que materiales con modo de deformación ondulado se ajustan rápidamente a cambios de magnitud de la deformación cíclica, toda vez que un estado estacionario ha sido alcanzado previamente bajo otra condición de ensayo ($\Delta\epsilon_t$ distinta), ha sido posible obtener la citada curva usando una única probeta.

Se han propuesto dos métodos: el ensayo de paso múltiple, por el que la probeta se somete sucesivamente a diferentes niveles de amplitud de deformación,

y el ensayo de paso incremental, en el cual la experiencia se conduce mediante un programa de bloques con amplitudes de deformación gradualmente crecientes y decrecientes. Los datos obtenidos con los tres métodos se correlacionan bien para metales con modo ondulado de deformación, siendo aconsejable usar el método de probetas múltiples cuando las deformaciones tienen valores bajos, próximos a la correspondiente al punto de fluencia. La Figura 8 muestra la curva cíclica de tensión-deformación para el acero No.1, obtenida con el método de paso incremental. La Figura 9 presenta la correspondiente curva cíclica para el acero No.2.

La curva unidireccional de tensión-deformación de un material puede ser representada a menudo por una ley de potencia del tipo

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

donde $\bar{\sigma}$ y $\bar{\epsilon}$ representan valores verdaderos de tensión y deformación, y K y n son constantes. Morrow (1) ha mostrado que la curva cíclica de tensión-deformación puede expresarse mediante una ecuación del mismo tipo:

$$\sigma_a = \frac{\sigma'_f}{\epsilon'_f n'} \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{2} \right)^{n'} \quad (2)$$

donde:

σ_a = amplitud de la tensión

$\frac{\Delta \epsilon_p}{2}$ = amplitud de la deformación plástica

σ'_f = coeficiente cíclico de resistencia

ϵ'_f = coeficiente cíclico de ductilidad

n' = exponente de endurecimiento por deformación cíclica.

Los exponentes de endurecimiento por fatiga, n' , tienen valores que varían entre 0.1 y 0.2 para la mayoría de los metales estudiados. De la evidencia experimental acumulada, se deduce que aquellos materiales metálicos con exponentes de endurecimiento unidireccionales, n, inferiores a 0.1 tienden a ablandar cuando son sometidos a deformaciones cíclicas, mientras que los que poseen $n \geq 0.1$ endurecen por fatiga, o son relativamente estables. Esta tendencia está de acuerdo con otra regla empírica, propuesta por Smith, Hirschberg y Manson (7), que permite predecir endurecimiento o ablandamiento por fatiga,

definiendo un parámetro unidireccional: la relación entre la máxima resistencia del metal, σ_u , en un ensayo de tracción, y el punto de fluencia, σ_y : σ_u/σ_y . Cuando esta relación posee un valor superior a 1.4 (el exponente n es alto), el metal endurecerá durante la fatiga de bajo número de ciclos; si esa relación es menor que 1.2 (n es bajo), se producirá ablandamiento. Para valores comprendidos entre 1.2 y 1.4 se obtiene un comportamiento que representa estabilidad relativa. En la Figura 14 se presentan los valores de n , σ_u/σ_y y n' correspondientes a los aceros ensayados.

De lo expresado anteriormente surge la importancia de determinar las propiedades mecánicas unidireccionales, mediante ensayos de tracción y compresión. El exponente n de endurecimiento monótonico, que da una medida de la capacidad de endurecimiento por trabajado unidireccional, permite predecir la dirección -endurecimiento, ablandamiento, estabilidad cíclica- en que el material será afectado por la fatiga de bajo número de ciclos.

La magnitud de los efectos inducidos por deformaciones cíclicas surge de la comparación de las curvas de tensión-deformación, unidireccional y cíclica. Los metales que endurecen por fatiga poseen una curva cíclica tensión-deformación que se encuentra por encima de la curva monótonica correspondiente. La inversa es válida para aquellos materiales metálicos que ablandan por el efecto de deformaciones oscilantes (Figuras 10 y 11).

El endurecimiento por trabajado mecánico, ya sea unidireccional o cíclico, es un fenómeno conocido por los metalurgistas. En cambio, el ablandamiento debido al efecto de deformaciones cíclicas es poco familiar, y más peligroso potencialmente, puesto que disminuye la resistencia del metal.

IV. RESISTENCIA A LA FRACTURA POR FATIGA

Por lo general, materiales metálicos responden de modo distinto a deformaciones cíclicas controladas y a tensiones (cargas) repetidas. Un acero "maring" con 18% de Ni⁽⁸⁾ -que tiene una tensión de fluencia menor en tracción que en compresión-, ablanda cuando se lo somete a ciclos de deformación controlada. Durante ese proceso, los límites de carga se ajustan a una condición reversible. Si se lo cicla entre límites de tensión, la velocidad de ablandamiento se hace mayor en tracción, y el metal falla prematuramente en forma dúctil.

Es de esperar que también la resistencia a la fractura dependa del tipo de sollicitación -carga o deformación-. Por ello, analizaremos por separado el

comportamiento a la fractura frente a deformaciones y a tensiones (cargas) cíclicas.

Para caracterizar las propiedades de fractura por fatiga se han propuesto varias expresiones, las que esencialmente provienen del análisis empírico de un gran número de datos. Todas ellas involucran relaciones lineales log-log entre la tensión (deformación elástica) y la vida, y la deformación plástica y la vida. En nuestra descripción utilizaremos la notación propuesta por Morrow⁽¹⁾.

IV. 1. RESISTENCIA A UNA TENSION (CARGA) OSCILANTE

La relación obtenida entre la amplitud de la tensión verdadera, σ_a , y el número de medios ciclos -reversiones- a fractura, $2 N_f$, está dada por:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2 N_f)^b \quad (3)$$

donde:

N_f	número de ciclos a fractura
σ'_f	coeficiente cíclico de resistencia
b	exponente cíclico de resistencia

Una expresión equivalente fue propuesta por Basquin⁽⁹⁾ en 1910.

El coeficiente cíclico de resistencia, σ'_f , está relacionado con la resistencia del material a la fractura monotónica, σ_f . Una buena aproximación para los cálculos y predicciones es poner $\sigma'_f = \sigma_f$.

Variaciones del exponente b pueden causar cambios apreciables en la vida de alto número de ciclos (superior a 10^5 ciclos). Los valores comunes de b oscilan entre -0.05 para ciertas aleaciones de alta resistencia y -0.15 para metales puros bien recocidos.

Mediante un argumento energético, Morrow⁽¹⁾ ha mostrado que el valor del exponente b puede aproximarse si se conoce la curva cíclica de tensión-deformación, por medio de la siguiente expresión:

$$b = \frac{-n'}{1 + 5 n'} \quad (4)$$

La relación (3) da cuenta del comportamiento de fractura por fatiga aún para muy largas vidas. Sin embargo, algunos metales -particularmente hierro y aceros- presentan un límite de fatiga, S_f , cuya existencia no está incorporada a esa ecuación. Del mismo modo, el efecto de la superposición de una carga estática modifica la ecuación antedicha del modo siguiente:

$$\sigma_a = (\sigma'_f - \sigma_o) (2 N_f)^b \quad (5)$$

donde σ_o es la tensión media actuante. Se observa que una tensión media de tracción reduce el valor del coeficiente cíclico de resistencia σ'_f , y en consecuencia, reduce la vida. Lo contrario ocurre con una tensión media compresiva. La corrección impuesta por σ_o puede asimismo dar cuenta del efecto de tensiones residuales, si ellas no son relajadas durante el proceso.

IV. 2. RESISTENCIA A UNA DEFORMACION OSCILANTE

Numerosos ensayos realizados en un metal para diferentes valores de la deformación por ciclo han mostrado que cuando la vida (número de medios ciclos a fractura, $2 N_f$) se grafica en función de la amplitud de deformación plástica estable, $\frac{\Delta \epsilon_p}{2}$, se obtiene una relación lineal. Esa relación puede expresarse:

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2 N_f)^c \quad (6)$$

donde:

ϵ'_f = coeficiente cíclico de ductilidad
 c = exponente cíclico de ductilidad

La ecuación (6) representa la denominada ley de Manson-Coffin. La intersección de las rectas obtenidas para diferentes materiales con el eje de la deformación plástica para $2 N_f = 1$ (medio ciclo) provee el valor de ϵ'_f . Esta es una propiedad cíclica, relacionada con la ductilidad a fractura ϵ_f , obtenida en un ensayo monótonico. Para cálculos y predicciones, poner $\epsilon'_f = \epsilon_f$ es una aproximación razonablemente buena. Un procedimiento que da mejores resultados es determinar ϵ'_f a partir de la curva cíclica de tensión-deformación (3), pues de la ecuación (2) surge que:

$$\epsilon'_f = \frac{\Delta \epsilon_p}{2} \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma_o} \right)^{1/n'} \quad (7)$$

Introduciendo una deformación plástica cíclica del 0.2% se obtiene un valor de $\sigma_a = \sigma'_y$ que corresponde a un $\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = 0.002$, es decir una tensión cíclica de fluencia. Entonces resulta:

$$\epsilon'_f = 0.002 \left(\frac{\sigma_f}{\sigma'_y} \right)^{1/n'} \quad (8)$$

La ecuación (8) conduce a valores de ϵ'_f en buen acuerdo con la experiencia, y que no superan en ningún caso al valor obtenido en la extrapolación gráfica. Así, provee valores adecuados y conservadores, pues mediante su uso no se sobreestima la vida del material ensayado.

En las aproximaciones de Manson y de Coffin, se atribuye al exponente c un valor constante. La experiencia ha demostrado que existe un rango de valores para el exponente cíclico de ductilidad, el que ha sido expresado por Morrow⁽¹⁾ en función del exponente de endurecimiento por deformación cíclica, n' :

$$c = \frac{-1}{1 + 5n'} \quad (9)$$

En general, c disminuye en valor absoluto a medida que aumenta la ductilidad. Dado que ambos efectos contribuyen a aumentar la resistencia a deformaciones oscilantes, la ductilidad a fractura es el parámetro más importante cuando se desea evaluar la resistencia a fatiga de bajo número de ciclos.

IV.3. RESISTENCIA A LA DEFORMACION CICLICA TOTAL

Desde un punto de vista experimental, cuando se realizan ensayos de fatiga a deformación controlada, es conveniente mantener constante la deformación total por ciclo, puesto que el uso de tensiones alternadas puede conducir a inestabilidades, y para mantener constante la deformación plástica se requiere equipo sofisticado.

Manson⁽¹⁰⁾ ha mostrado que la resistencia de un metal a la deformación cíclica total puede ser considerada como la suma de sus resistencias a la deformación elástica y plástica. Es decir:

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (10)$$

Las Figuras 12 y 13 muestran la representación de la ecuación (10) para los aceros 1 y 2, respectivamente. Puede observarse que para vidas cortas predomina el efecto de la componente de deformación plástica, mientras que para largas vidas la componente elástica domina el comportamiento. Estas componentes están respectivamente relacionadas con ductilidad y resistencia. Para visualizar esta correlación puede usarse el concepto de "vida de transición" que se refiere a la vida para la cual la amplitud de deformación total está formada por iguales valores de las componentes elástica y plástica.

V. PREDICCIÓN DE FRACTURA POR FATIGA

En las secciones anteriores se ha demostrado la manera en que materiales metálicos responden a las deformaciones cíclicas, y se ha presentado una descripción fenomenológica de los cambios producidos y su relación con la fractura por fatiga, bajo condiciones de deformación controlada.

Se ha mostrado también que el comportamiento puede representarse mediante ecuaciones que usan simples leyes de potencia, en una aproximación que da buena concordancia con numerosos datos experimentales.

Usando las constantes cíclicas que aparecen en esas ecuaciones: n' , σ_f' , ϵ_f' ; b y c, Feltner y Landgraf (4) han elaborado un método cuantitativo para predecir el comportamiento cíclico de metales, mediante el ensayo de sólo dos probetas: una para determinar propiedades mecánicas unidireccionales y la otra para obtener la curva cíclica de tensión-deformación.

Los datos que han ilustrado esta presentación fueron obtenidos usando el método propuesto por los autores citados. En las Figuras 12 y 13 se han visto los resultados experimentales, que reflejan la resistencia a la fatiga de bajo número de ciclos de los aceros 1 y 2, respectivamente. La Figura 14 resume los valores monotónicos y cíclicos de esos aceros, relevantes para aplicar el método propuesto.

De la comparación de los resultados obtenidos, puede deducirse que el acero 1 posee propiedades de ductilidad más elevadas que el acero 2, lo cual lo hace mejor para resistir deformaciones cíclicas. Si, por otra parte, se comparan los parámetros que dan cuenta de la resistencia a las cargas oscilantes, el acero 2 presenta una leve ventaja.

REFERENCIAS

- 1.- J. D. MORROW, Amer. Soc. Test. & Materials, Special Technical Publ. No. 378, 1965, p. 45.
- 2.- R. W. LANDGRAF, J. D. MORROW y T. ENDO. Amer. Soc. Test & Materials, J. Materials 1969, 4, p. 176
- 3.- R. W. LANDGRAF, Amer. Soc. Test. & Materials, Special Technical Publ. No. 467, 1970, p. 3.
- 4.- C. E. FELTNER y R. W. LANDGRAF. Amer. Soc. Mech. Eng. Publ. 69-DE-59 1969.
- 5.- J. C. CRESPI y J. C. DI PRIMIO. III Simposio sobre Fractura y Fatiga. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, Julio 10-13, 1972.
- 6.- J. C. CRESPI y J. C. DI PRIMIO. Seminario sobre Control de Calidad. U.S Trade Center en Argentina, Mayo 1972.
- 7.- R. SMITH, M. H. HIRSCHBERG y S. S. MANSON, NASA TN D-1574, National Aeronautics and Space Adm., 1963.
- 8.- R. W. LANDGRAF. University of Illinois T. & A. M. Report No. 320, 1968.
- 9.- O. H. BASQUIN. Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 1910, 10, (II), p. 625.
- 10.- S. S. MANSON y M. H. HIRSCHBERG. En el libro "Fatigue : An interdisciplinary Approach". Syracuse Univ. Press, Syracuse, N.Y., 1964, p. 133.

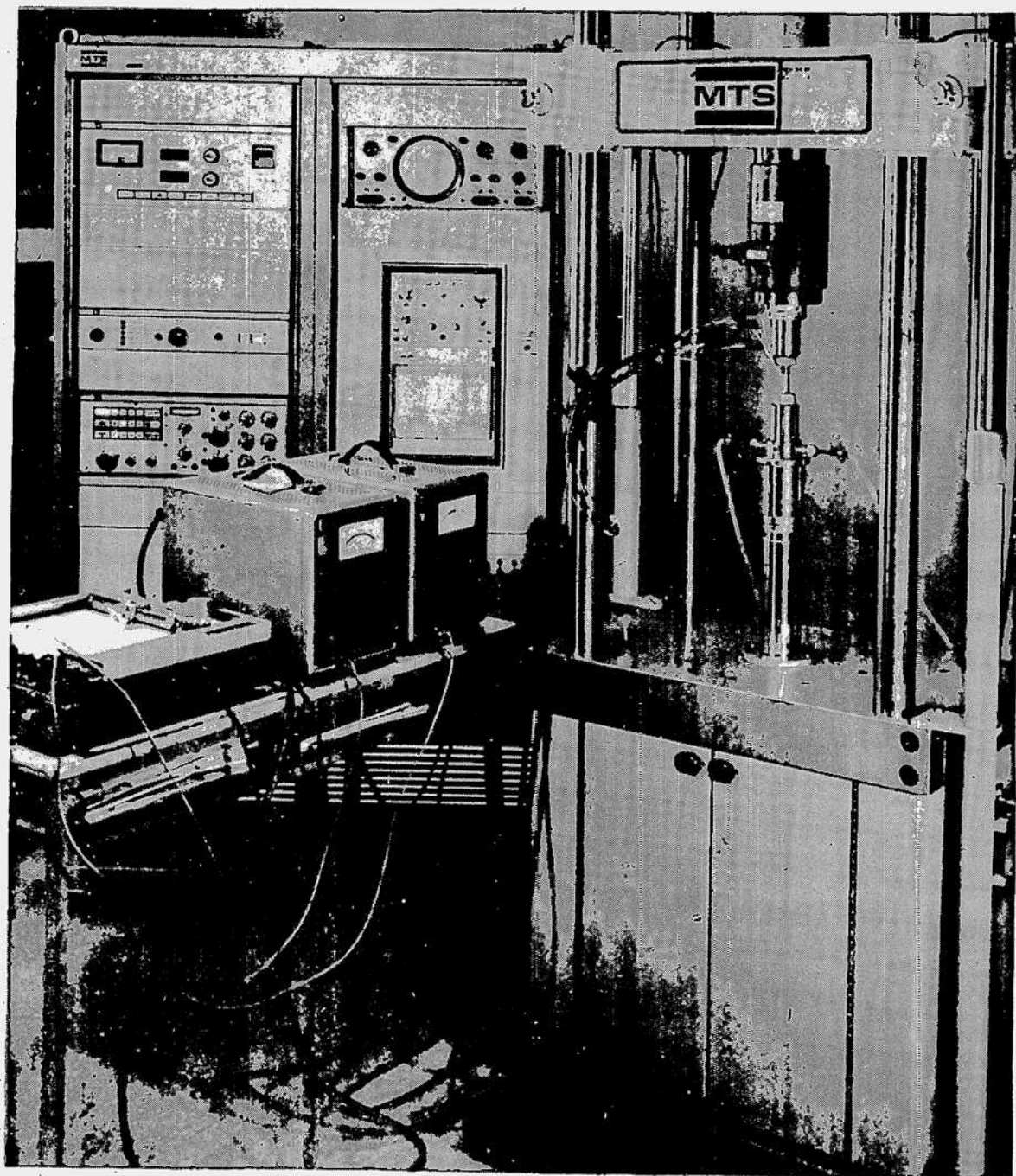


FIGURA 1

Vista general del equipo MTS y accesorios

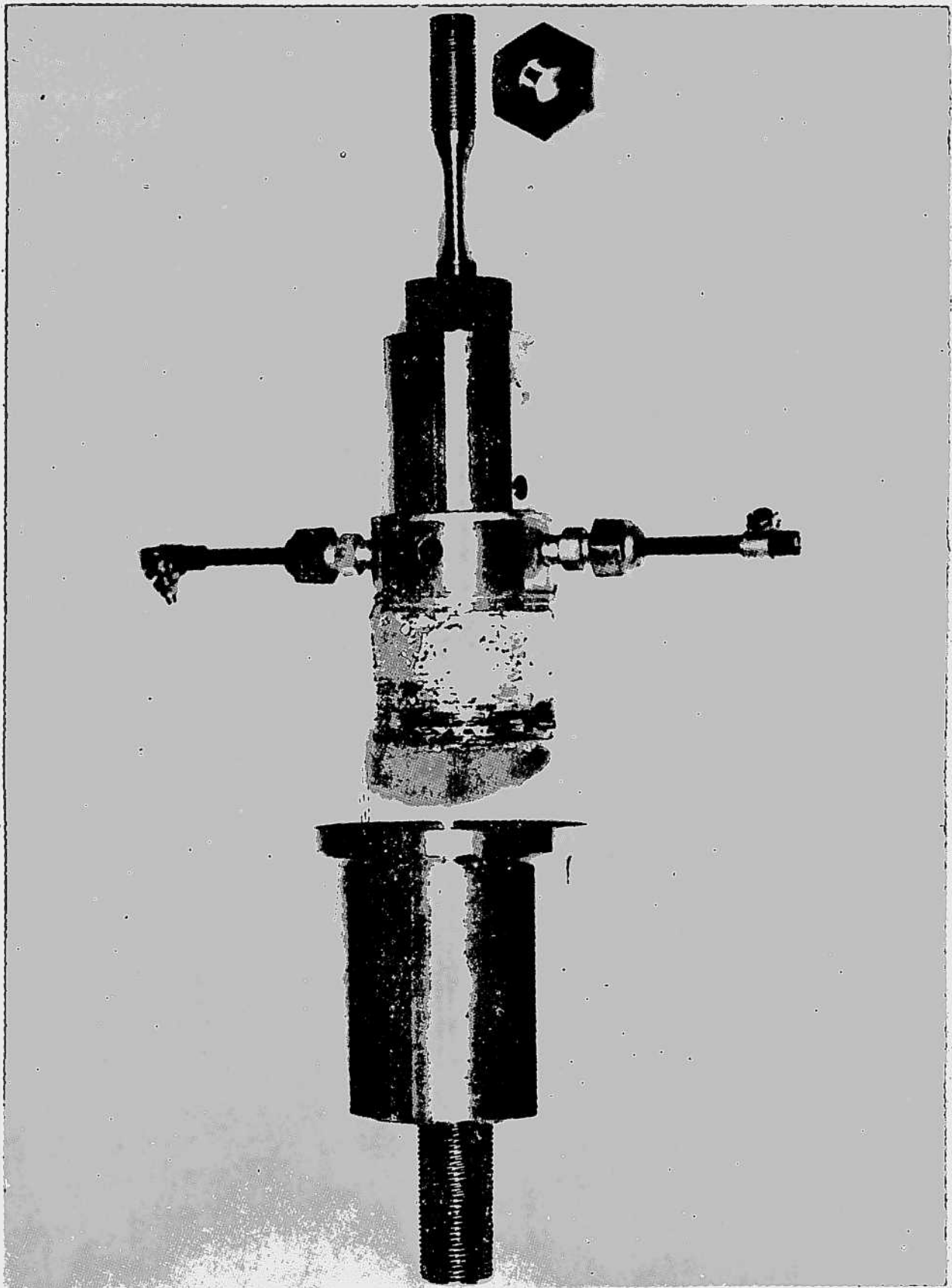


FIGURA 2

Sistema de mordaza inferior

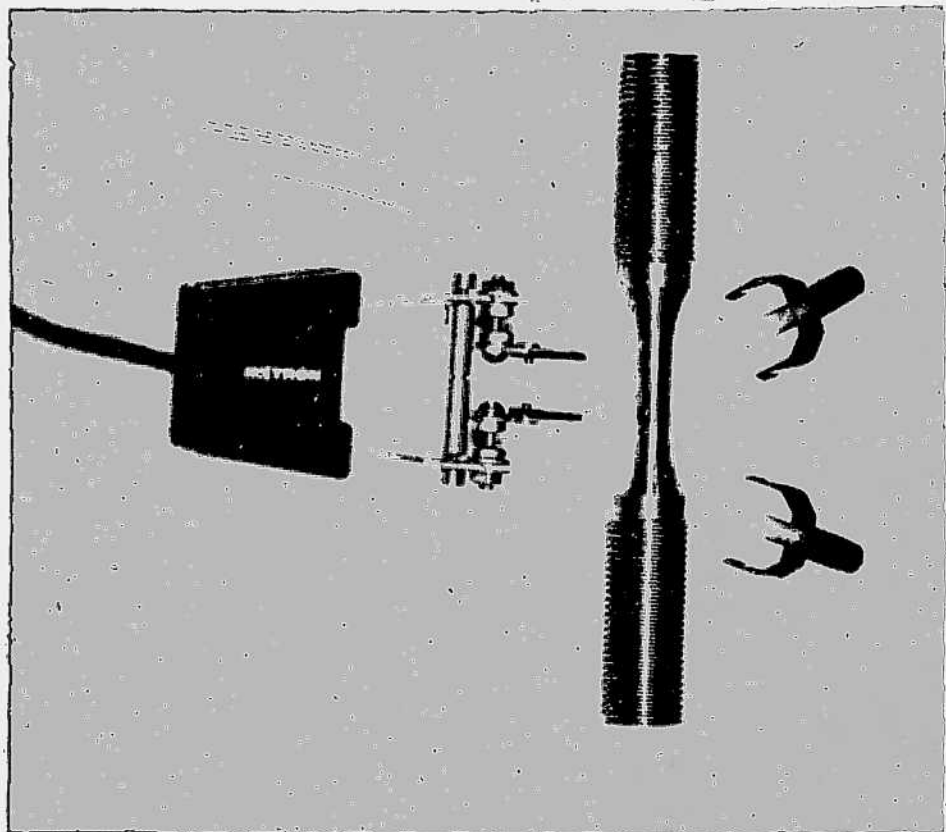


FIGURA 3

Probeta y extensómetro

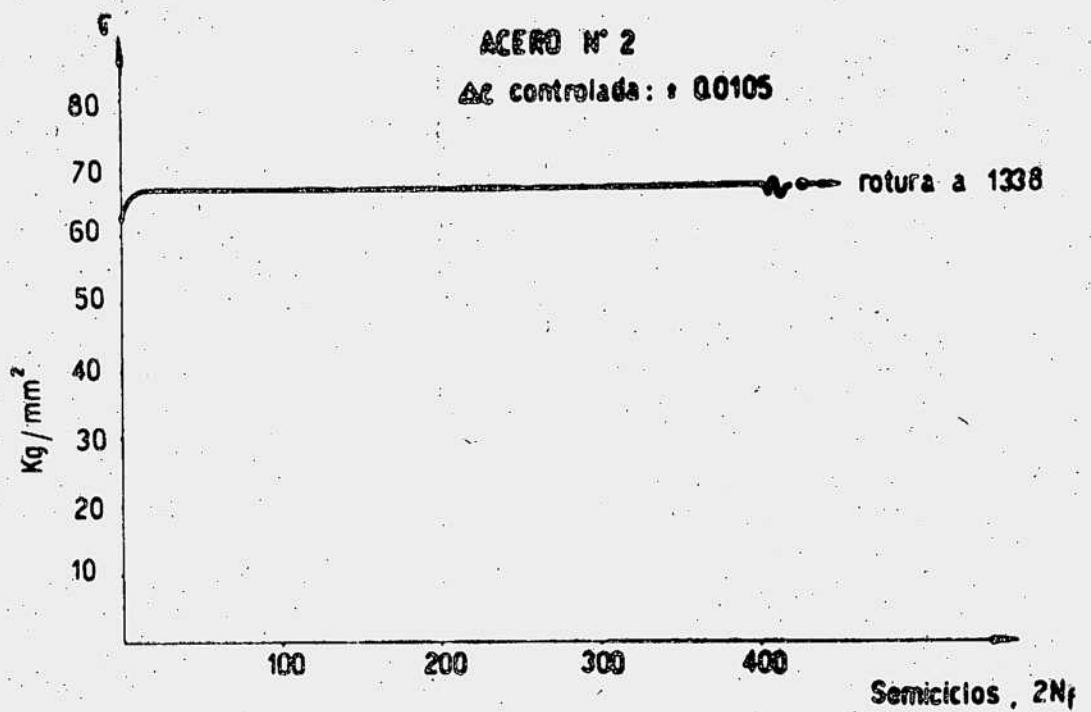


FIGURA 4 - Endurecimiento por fatiga (Acero 2)

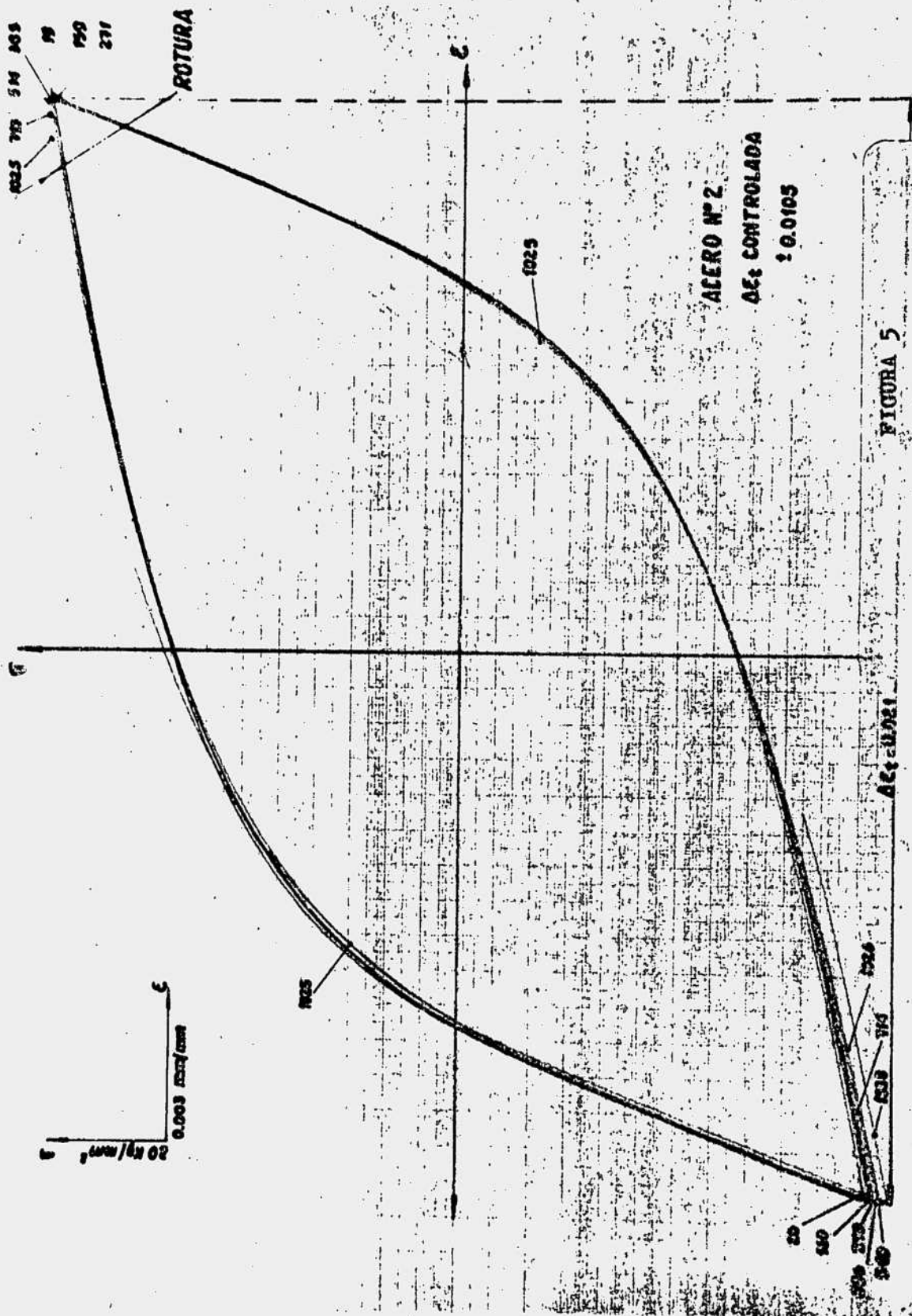


FIGURA 5

Lazos de histéresis del acero 2

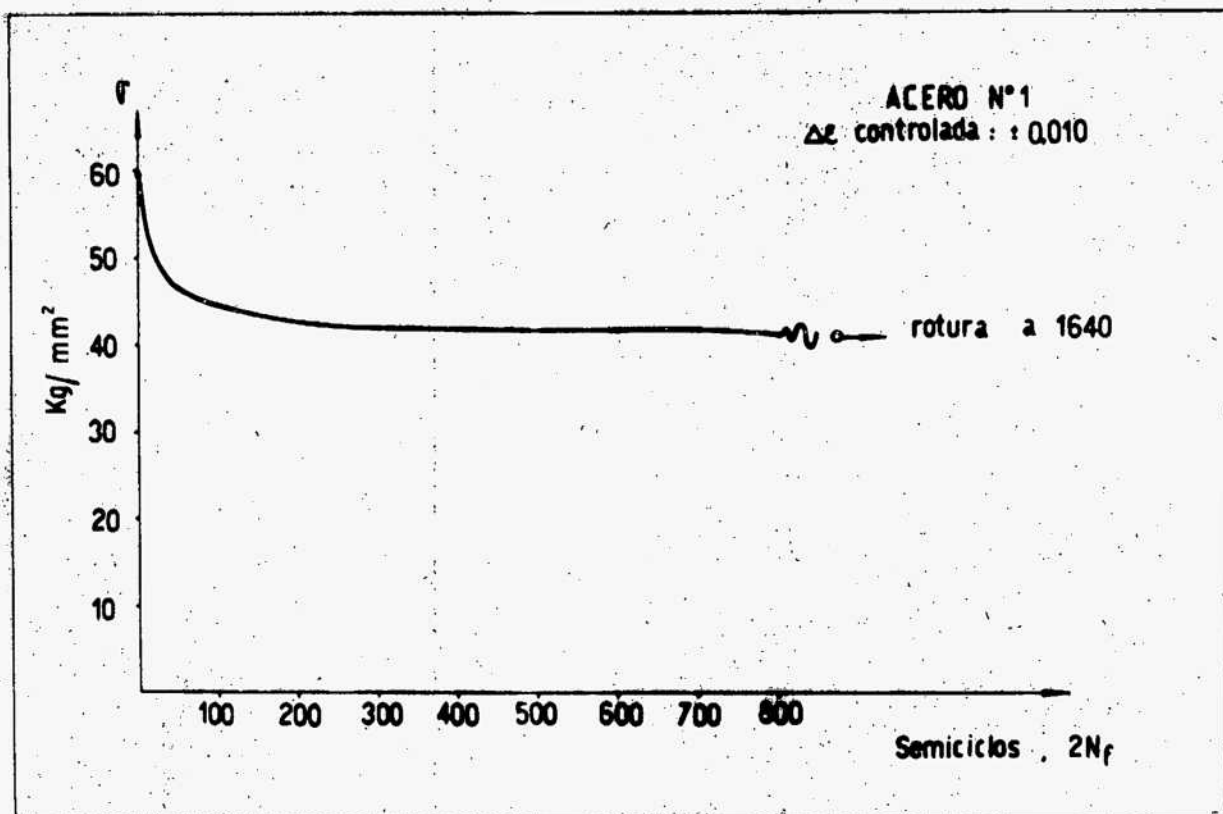
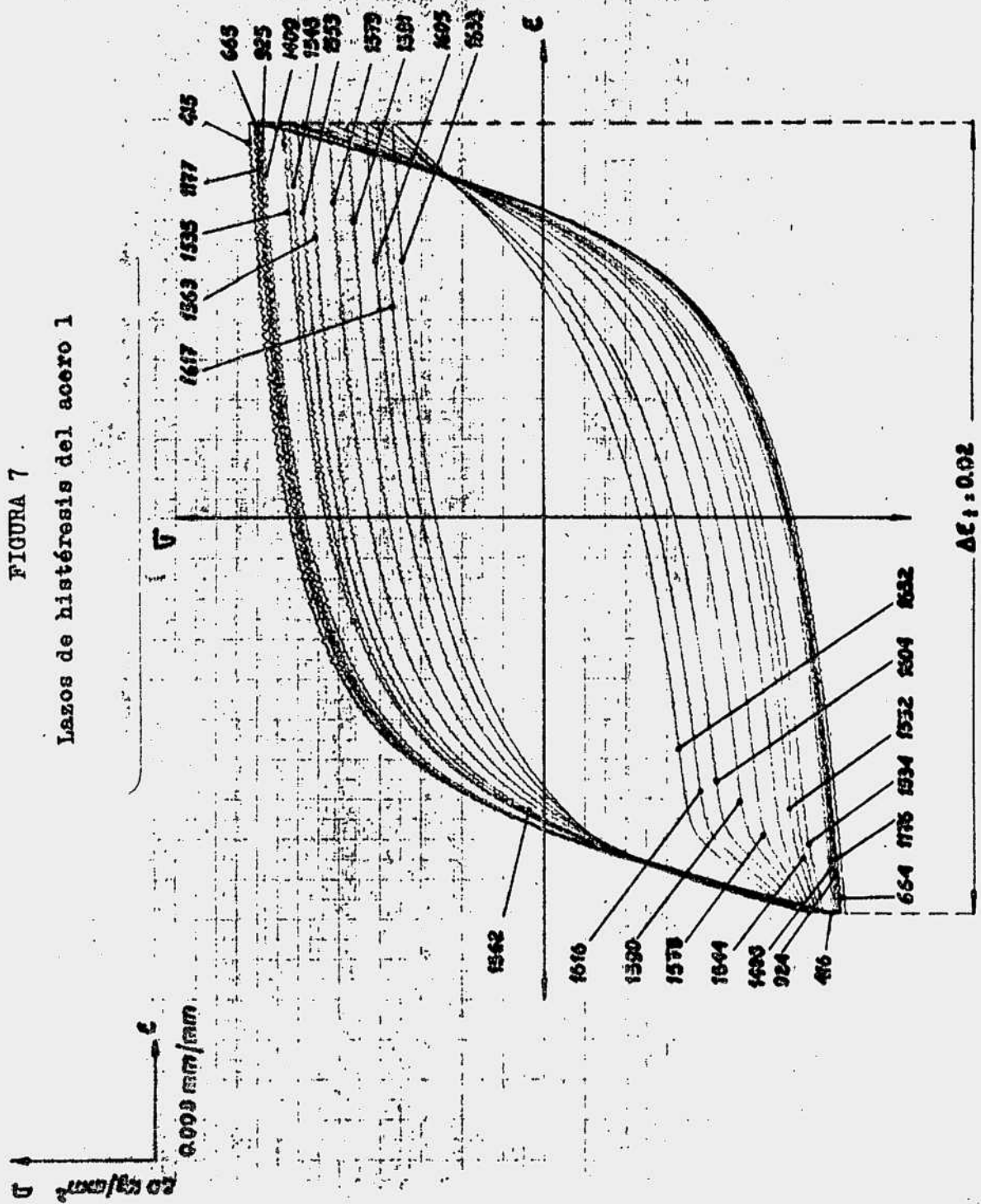


FIGURA 6 - Ablandamiento por fatiga

(Acero 1)

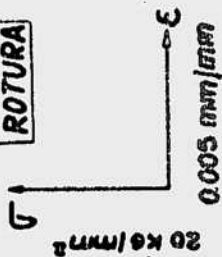
Lazos de histéresis del acero 1

ACERO N°1
Δε_t CONTROLADA
± 0.01



PASO INCREMENTAL

ROTURA



13° SEMIBLOQUE
RECRECIENTE
ACERO N° 1

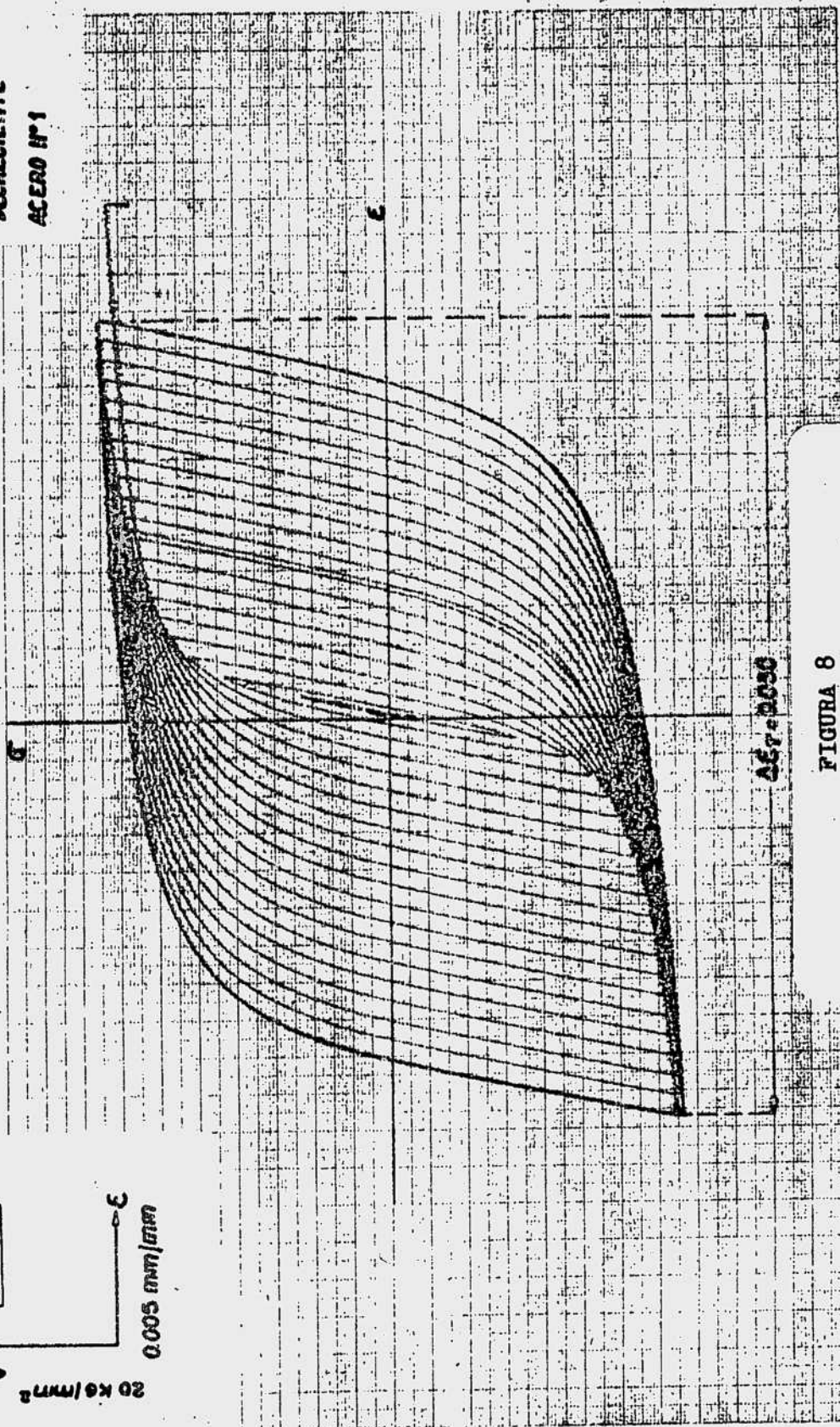


FIGURA 8

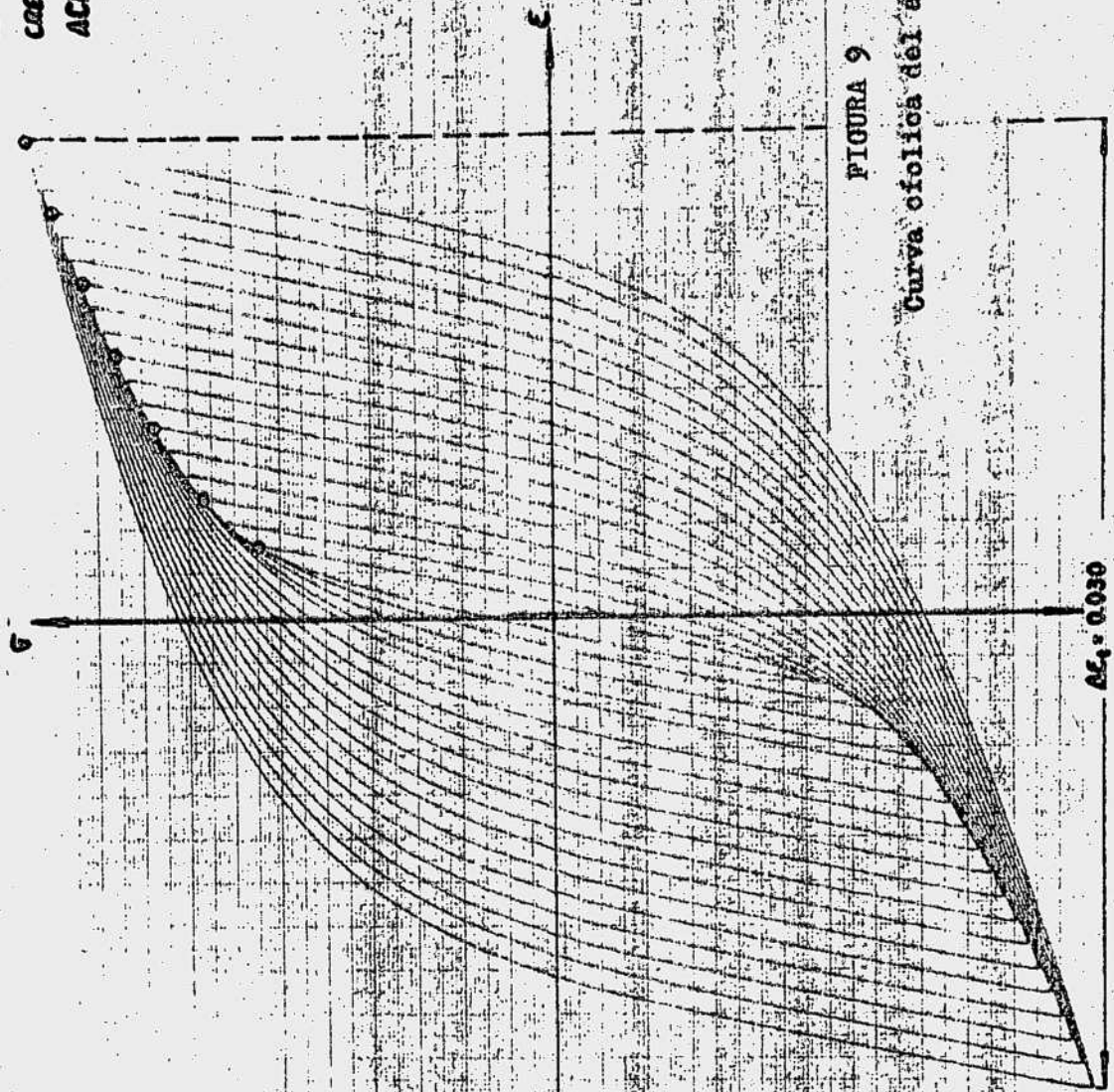
Curva cíclica del acero 1

PASO INCREMENTAL

σ 20 kg/mm²

$\frac{\epsilon}{0.003}$ mm/mm

12° SINALCONE
CORRUENTE
ACERO Nº 2



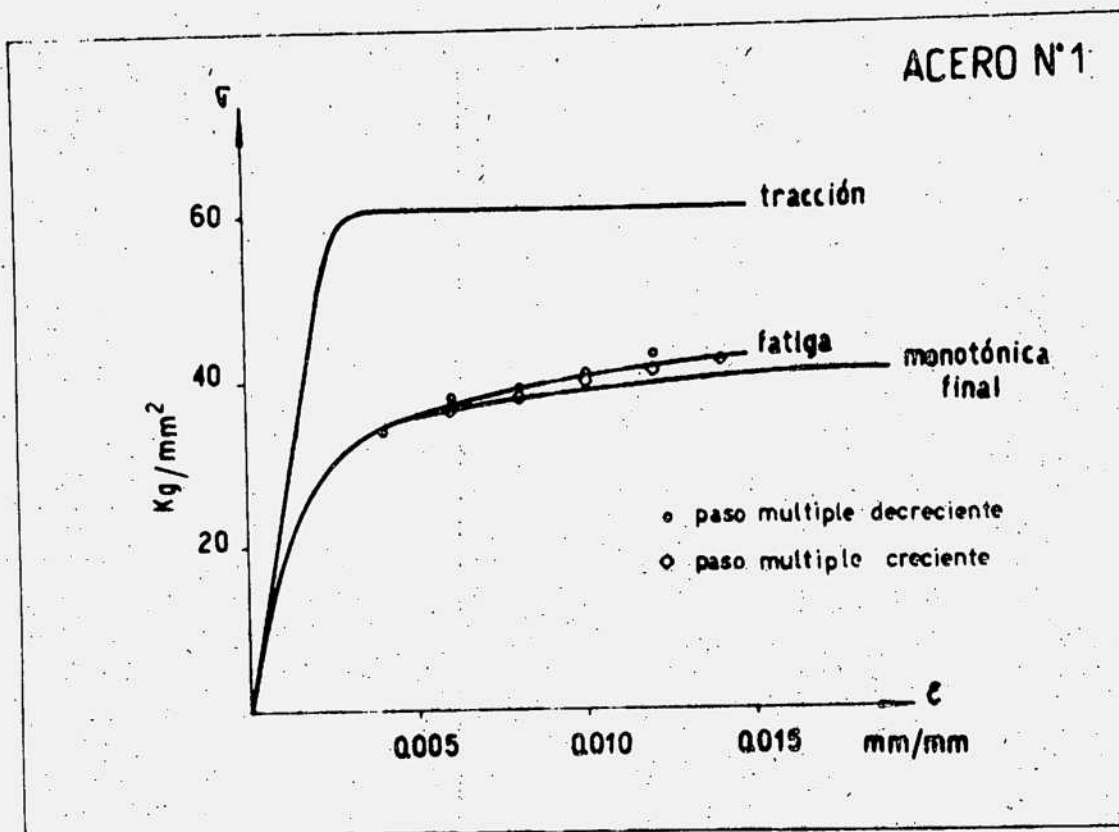


FIGURA 10 - Comparación de curvas monotónica y cíclica (Acero 1)

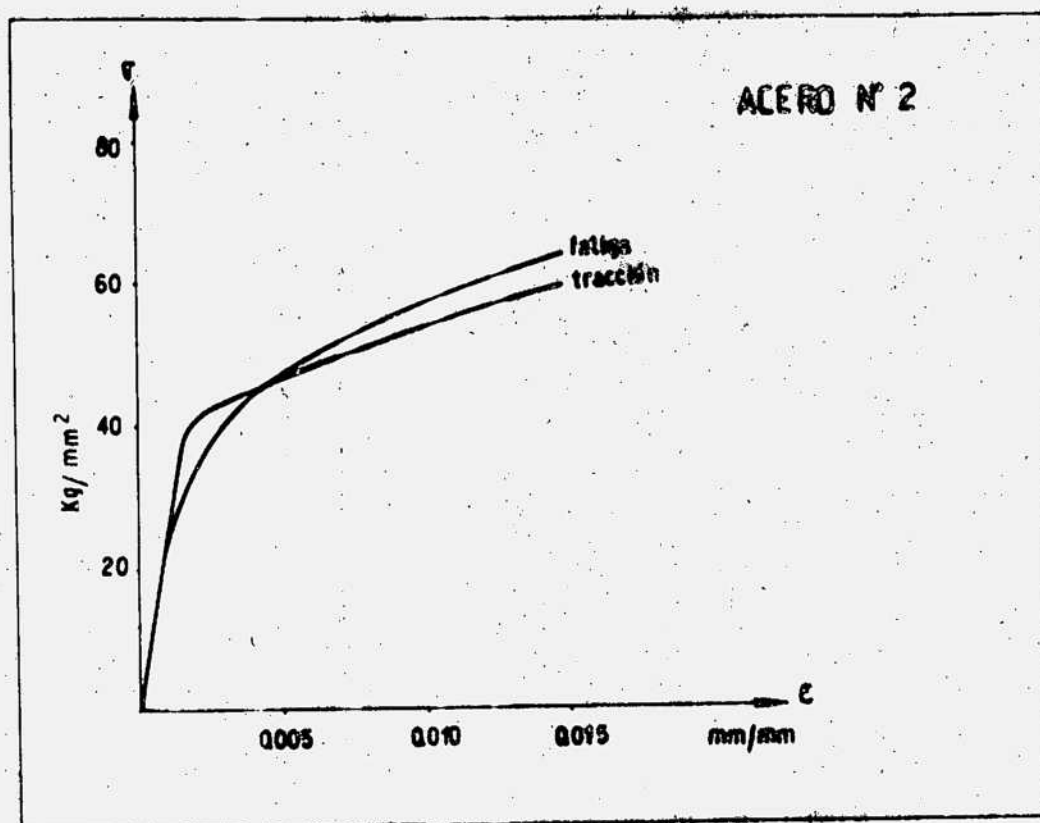


FIGURA 11 - Comparación de curvas monotónicas y cíclicas (Acero 2)

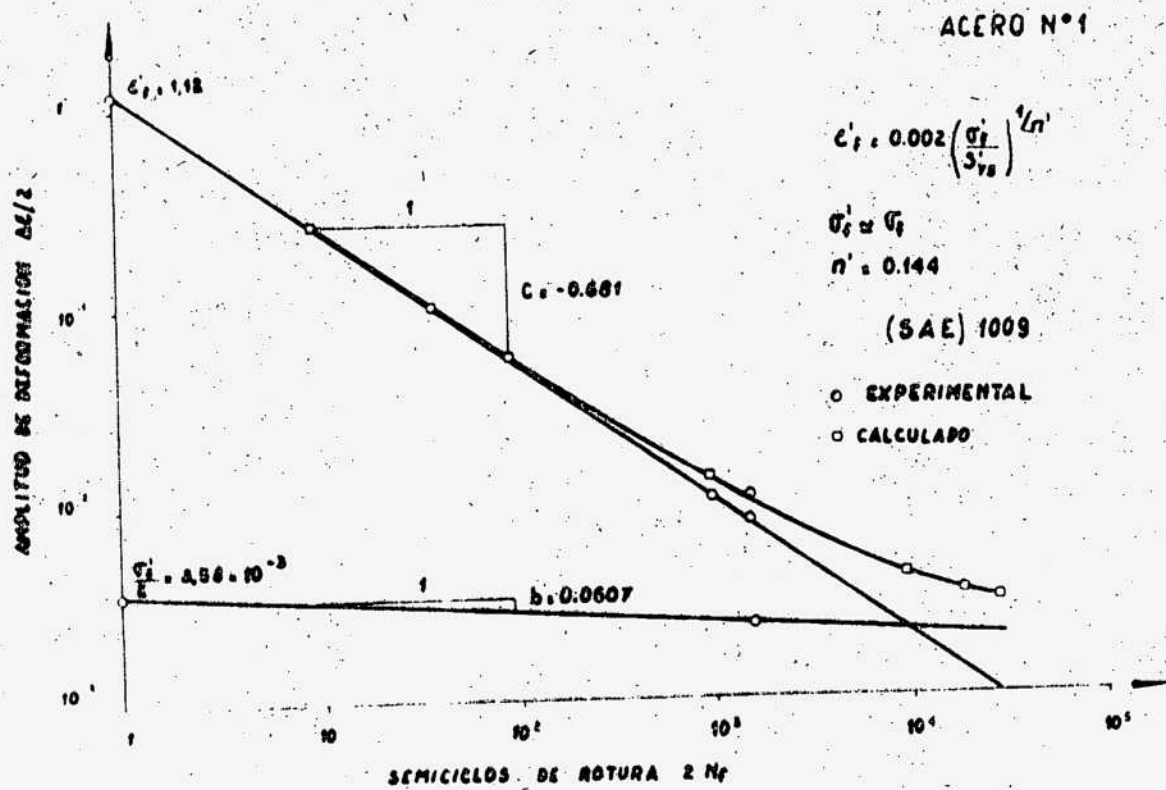


FIGURA 12 - Predicción de la resistencia a la fatiga, acero 1.

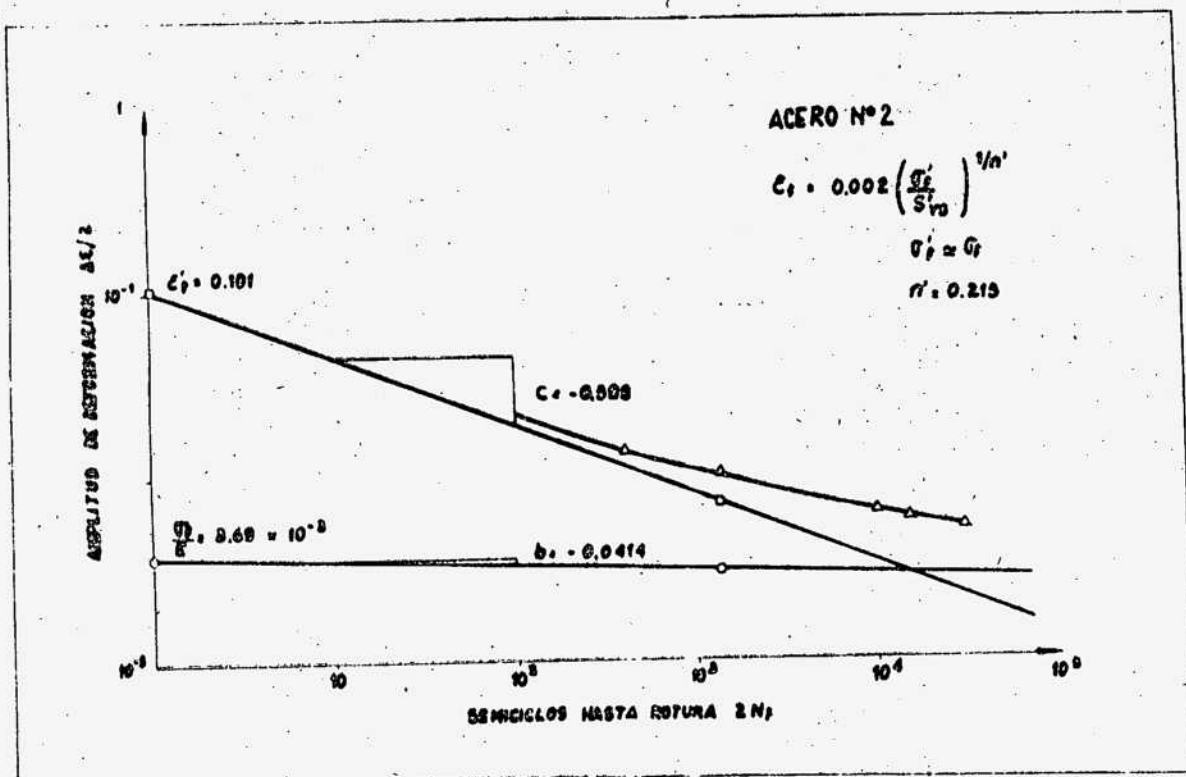


FIGURA 13 - Predicción de la resistencia a la fatiga, acero 2.

PROPIEDADES UNIDIRECCIONALES

	σ_y^2 (kg/mm ²)	σ_u^2 (kg/mm ²)	σ_u/σ_y	n	σ_f (kg/mm ²)	ϵ_f
ACERO N° 1	59.8	60.8	1.01	--	85.9	0.73
ACERO N° 2	49.0	94.1	1.91	0.13	93.0	0.27

PROPIEDADES CICLICAS

	σ_y' (kg/mm ²)	n'	ϵ_f'	b	c
ACERO N° 1	34.5	0.144	1.12	-0.06	-0.68
ACERO N° 2	42.5	0.213	0.10	-0.04	-0.40

FIGURA 14 - Valores monotónicos y cíclicos.