

CINETICA DE ENVEJECIMIENTO
EN ACEROS DE BAJO CARBONO

Tesis presentada a la coordinación
de los cursos de postgrado de la
Facultad de Ingeniería de la
Universidad Nacional de La Plata

por

César Alberto Castro Quintero

Como requisito parcial
para optar el grado de
magister

Marzo de 1.974



AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración para realizar el presente trabajo a la empresa Propulsora Siderúrgica S.^a. por suministrar la chapa de acero; igualmente se agradece a las siguientes personas:

Ingeniero Gregorio Cusminsky, quien fue el director y consejero, como también por sus ideas aportadas para solucionar problemas durante el desarrollo experimental.

Ingeniero Rodolfo Enrique Campos, quien colaboró de una manera muy eficaz, en la puesta en marcha del termostato.

Señor José Luis Sarutti, por su colaboración en la preparación de probetas.

Señor Abel Deluchi, quien colaboró en la parte de dibujos.

Señor Eero Tápani Niëmela, quien colaboró en la puesta en marcha del horno de Recocido.

INTRODUCCION

Los tipos de envejecimiento del acero son dos: por temple o por deformación. De estos procesos el que más importancia tiene para la chapa de acero efervescente de bajo carbono, utilizada para el estampado, es el de envejecimiento por deformación. Esto está motivado por los procesos industriales que sufre la chapa efervescente para estampado con el fin de eliminar en la misma la deformación de Lüders o "strecher strains" que se producen en la chapa recocida al ser traccionada.

La laminación superficial o "temper rolling" es el proceso normalmente aplicado a la chapa con este fin. La chapa es deformada por laminación entre 0.5 % y 1.5 % como último proceso, produciendo de esta manera la deformación necesaria para el envejecimiento. Existe la alternativa de eliminar las bandas de Lüders mediante la utilización de la enderezadora o el traccionado, pero ambos procesos son menos eficaces que el laminado superficial, por que las bandas, retornan en estos procesos mucho más rápido e igualmente deforman al material con lo que dan lugar al envejecimiento.

Las manifestaciones más notables del envejecimiento son: el aumento de la tensión de fluencia, el retorno de las bandas de Lüders, reducción de la ductilidad, fenómenos perjudiciales para los procesos de estampado. En cambio el aumento de las propiedades mecánicas es beneficioso para las etapas posteriores al estampado.

El proceso de envejecimiento por deformación en aceros de bajo carbono se produce por la difusión de átomos intersticiales en solución hacia las dislocaciones libres, generadas durante la deformación plástica. En esta forma, las dislocaciones son reancladas produciéndose el retorno de la fluencia aguda.

Cottrell y Bilby (1) demostraron que la disposición de átomos solutos, en solución sustitucional alrededor de una dislocación de borde, reduce la energía de deformación del sistema y estimaron la velocidad a la cual los átomos de soluto migran hacia la dislocación como

$$N_t = 2 n_0 L \left(\frac{1}{2} \pi \right)^{1/3} \left(\frac{\dot{A} D t}{K T} \right)^{2/3}$$

donde

- N_t es el número de átomos precipitados por unidad de volumen en el tiempo t .
- n_0 es el número de átomos solutos por unidad de volumen.
- L es la longitud total por unidad de volumen de las dislocaciones de borde.
- D es el coeficiente de difusión a la temperatura absoluta T .
- K constante de Boltzmann.

Esta ley es aplicable en las primeras etapas del envejecimiento ya que la velocidad de precipitación de los solutos disminuirá más que lo previsto en la ecuación por la interferencia de los precipitados que crecen a tiempos mayores haciendo disminuir el valor de n_0 continuamente.

S. Harper (2) deduce la siguiente ecuación que gobierna el fenómeno en su totalidad:

$$\frac{N_t}{n_0} = 1 - \exp \left[-2 L \left(\frac{1}{2} \pi \right)^{1/3} \left(\frac{A D t}{K T} \right)^{2/3} \right].$$

La cinética del envejecimiento ha sido estudiada por Hundy (3), quien asignando a la energía de activación para la difusión del carbono en hierro α un valor de 20.100 cal/mol y de nitrógeno en hierro α de 18.200 cal/mol desarrolla las siguientes expresiones:

$$\log \frac{t_r}{t} = 4400 \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) - \log \frac{T}{T_r} \quad \text{para el carbono}$$

$$\log \frac{t_r}{t} = 4000 \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) - \log \frac{T}{T_r} \quad \text{para el nitrógeno}$$

para los tiempos t_r y t equivalentes a un mismo envejecimiento para las temperaturas T_r y T respectivamente.

Estas expresiones permiten predecir los tiempos de envejecimiento a temperatura ambiente mediante el envejecimiento acelerado a altas temperaturas. Sin embargo este envejecimiento debe efectuarse por debajo de los 100°C para evitar que los carburos finos (carburos ϵ) (4) puedan redisolverse, aumentando el envejecimiento, y falseando la extrapolación para temperatura ambiente.

Este trabajo se refiere a las primeras etapas de envejecimiento por deformación que son las de real importancia para los procesos industriales por la reaparición de la deformación de Lüders y el aumento de la tensión de fluencia. El proceso se ha seguido en chapas laminadas superficialmente por ensayos de tracción, registrando las variaciones e incrementos de la tensión de fluencia y deformación de Lüders.

Diversos investigadores han seguido la cinética de este proceso por distintos métodos experimentales; Harper (2) estudiando la fricción interna; Wilson y Russell (5) comparando tensión de fluencia con resistividad eléctrica; Tardif y Ball (6) analizando variaciones de Dureza, tensión de fluencia y elongación de Lüders. Leslie y Keh (7) han efectuado observaciones con microscopía electrónica de las diferentes etapas del proceso, no encontrando evidencia directa de precipitación en las primeras etapas de envejecimiento, este hecho los lleva a suponer que los átomos intersticiales migran no sólo a las dislocaciones, sino también a superficies internas tales como límites de grano o interfases entre precipitados y la matriz, los cuales sirven como fuentes de dislocaciones, por lo tanto aumentará la tensión requerida para reactivar estas fuentes luego del envejecimiento, retomando el punto de fluencia.

MATERIAL UTILIZADO:

Se utilizó chapa de acero efervescente de bajo carbono, suministrado por Propulsora Siderúrgica S.A.

La composición química del acero es la siguiente:

C	_____	0,10%
Mn	_____	0,50%
S	_____	0,013%
P	_____	0,004%
Al	_____	0,006%
Si	_____	0,011%

De acuerdo a las exigencias del trabajo, la chapa fue extraída de la bobina de la parte central, con el fin de no hacer intervenir en los resultados de las experiencias el comportamiento diferente de punta y cola de bobina.

La chapa se recibió en crudo y en trozos de las siguientes dimensiones: 1.000 x 500 x 1,60 mm, siendo 500 mm la dirección de laminación. El tamaño de grano se puede apreciar en la figura N° 1, esta micrografía se tomó en la dirección de laminación y en el plano normal a la misma, como se ve claramente los granos del borde son de mayor tamaño que los centrales, debiéndose esto a la decarburación superficial, hecho característico de los aceros efervescentes.

EQUIPOS UTILIZADOS:

Guillotina:

Para el corte de la chapa a las dimensiones re

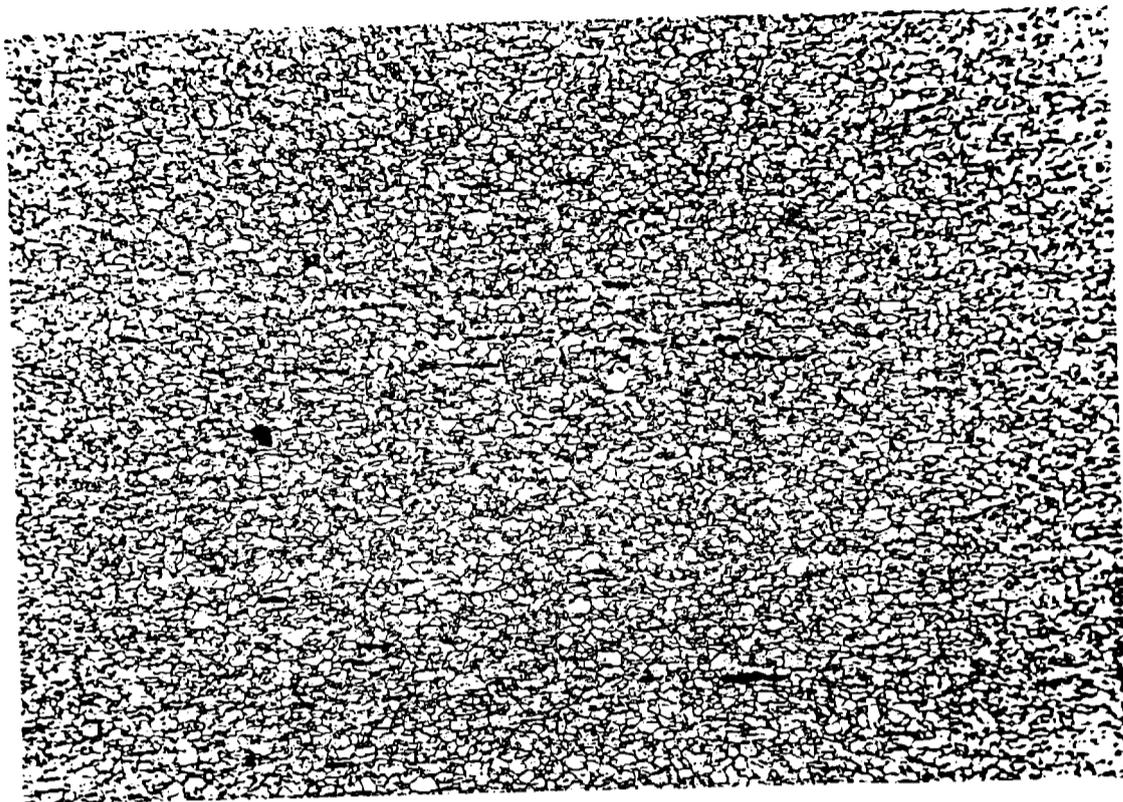


Fig. 1: Tamaño de grano 20 micrones. Ataque nital. x 100
queridas se utilizó una guillotina marca BAHER de 1,50 m de luz, con motor de accionamiento directo de 4 HP.

Horno de Recocido:

Para el recocido de las probetas se ha utilizado una mufia de 5 KW de potencia con un espacio interior de 500 x 210 x 210 mm. La regulación de temperatura se efectuó con un programador marca RUHSTRAT modelo PDEA, comandado por una termocupla Pt - Pt - 13 % Rd.

Para evitar la oxidación de las probetas durante el recocido se utilizó una caja hermética de acero inoxidable de 140 x 20 x 10 mm con circulación de corriente de Argón.

Laminadora:

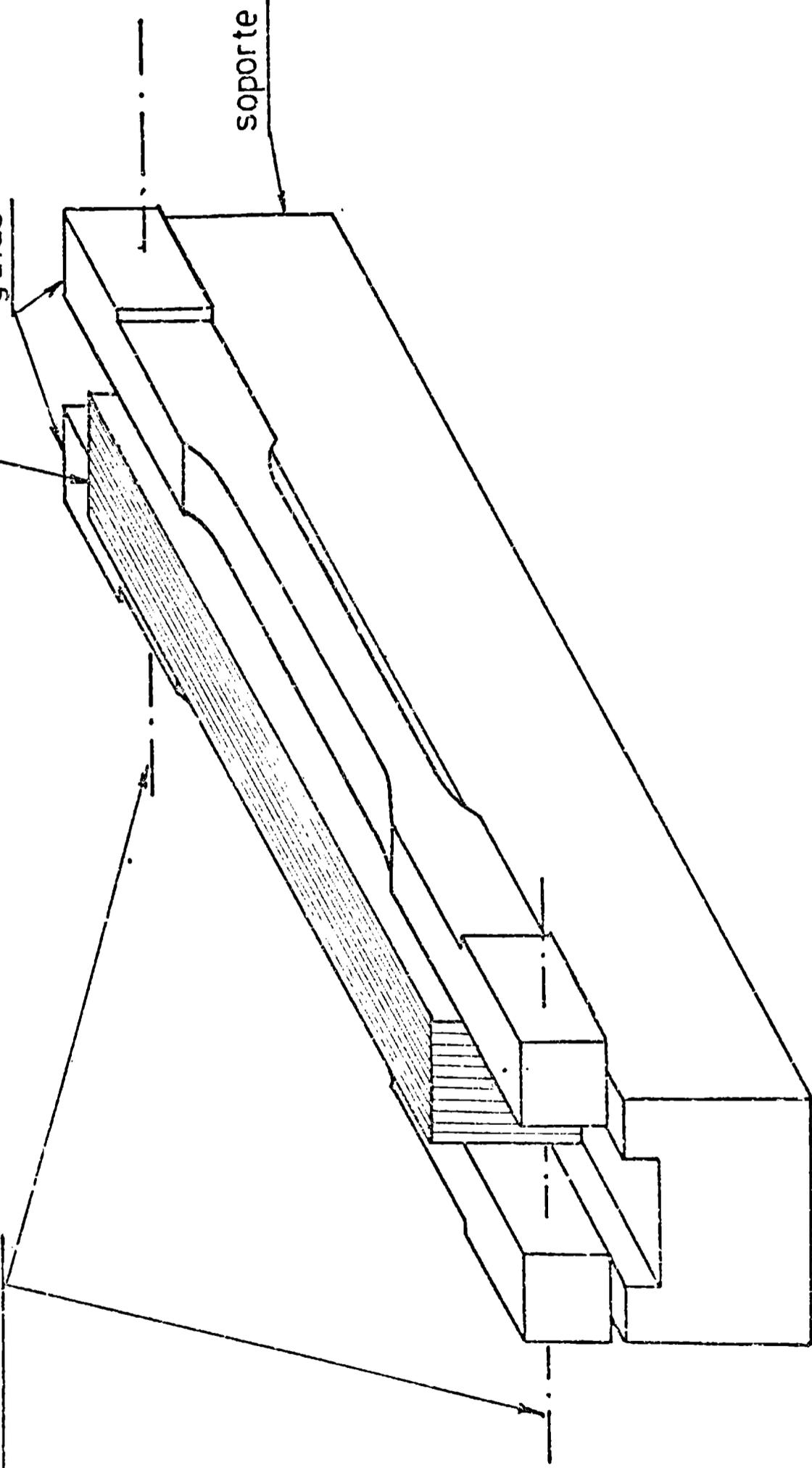
Para el laminado superficial de las chapas se utilizó una laminadora de precisión marca STANAT modelo

paquete de chapas a fresar

guias

sopORTE

pernos de sujeción



Univ. Nal. de La Plata

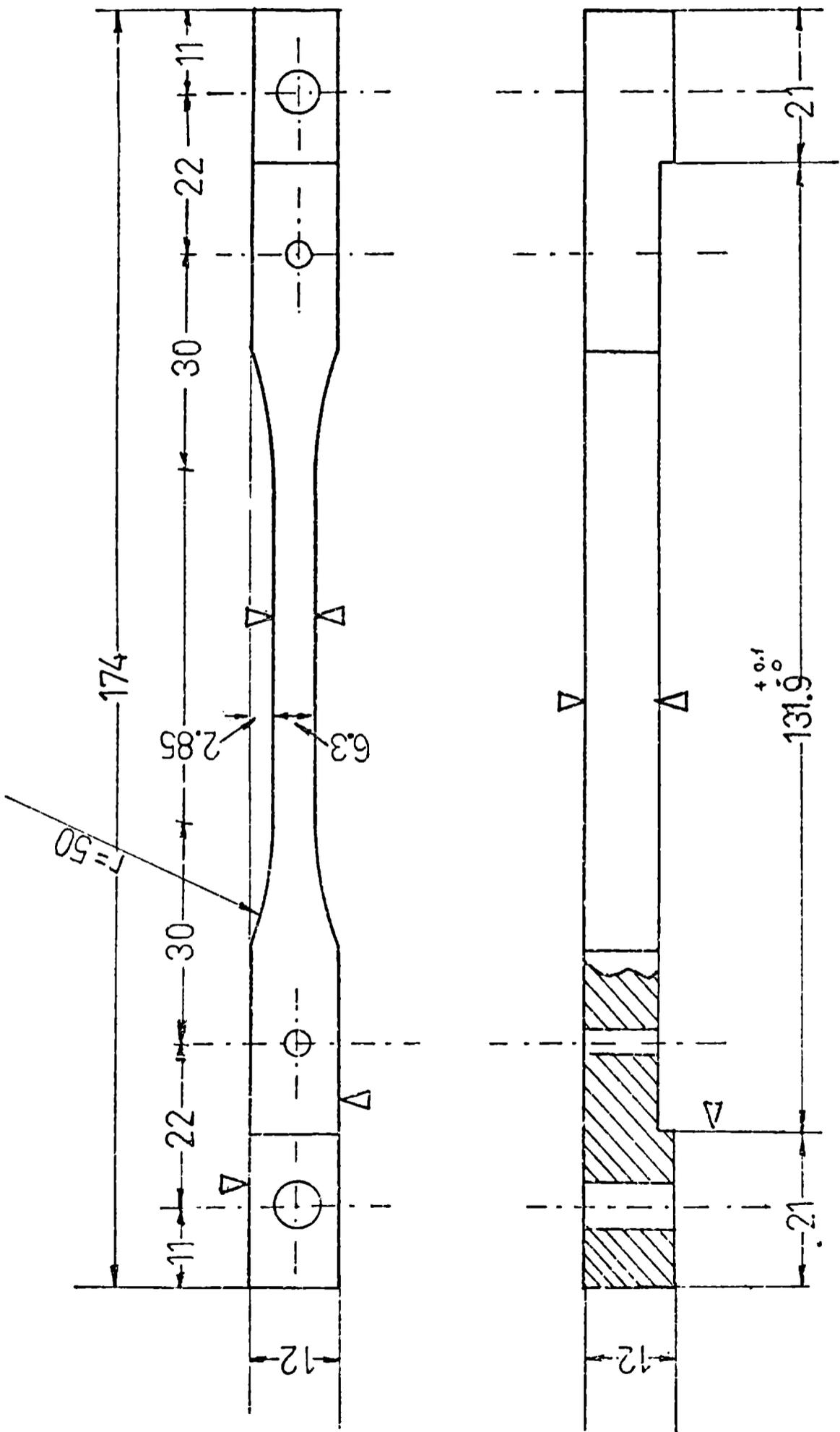
Lab. de Inv. de Metalúrgia Física

MONTAJE PARA

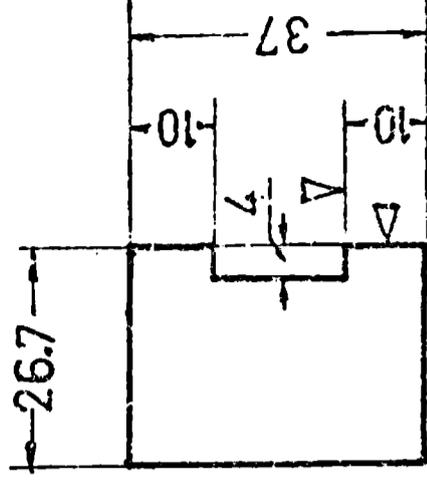
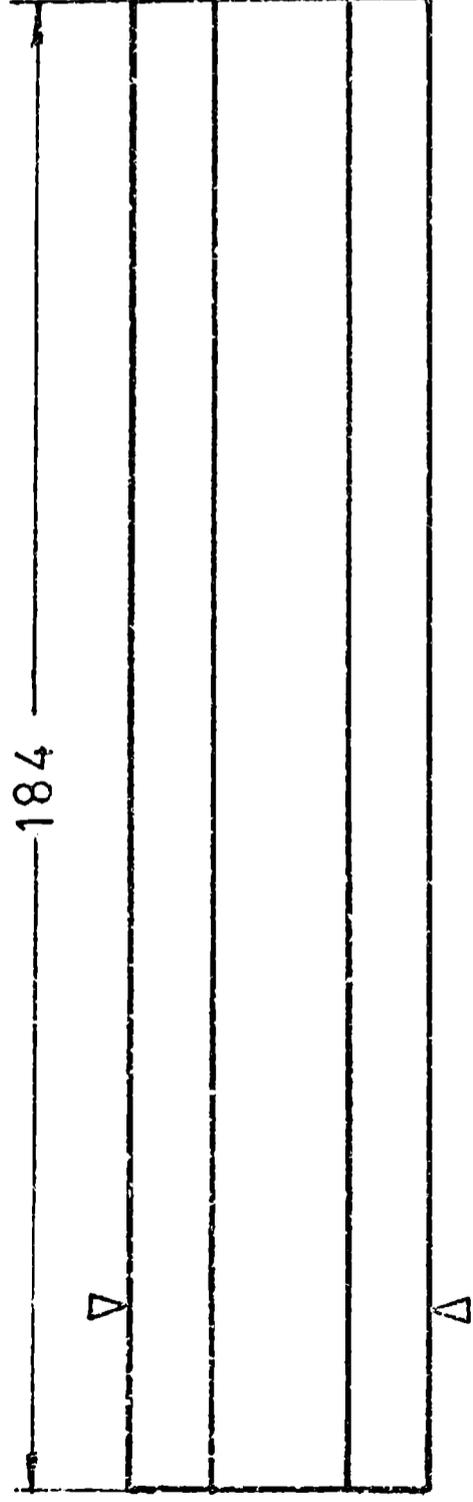
Figura

FRESADO

Nº 2



Univ. Nal. de La Plata	
Lab. de Inv. de Metalúrgia Física	
GUIAS PARA FRESADO	Figura Nº 3



Univ. Nal. de La Plata

Lab. de Inv. de Metalúrgia Física

SOPORTE PARA
FRESADO

Figura
Nº 4

TA - 125 con rodillos de 101.6 mm (4") de diámetro y 152.4 mm (6") de ancho de tabla. Permite 4 velocidades de laminación a saber: 30.24, 22.65, 15.12 y 7.5 ^m/mint. Está accionada por un motor trifásico LIMA de 7.5 HP y 1800 r.p.m.

Fresadora:

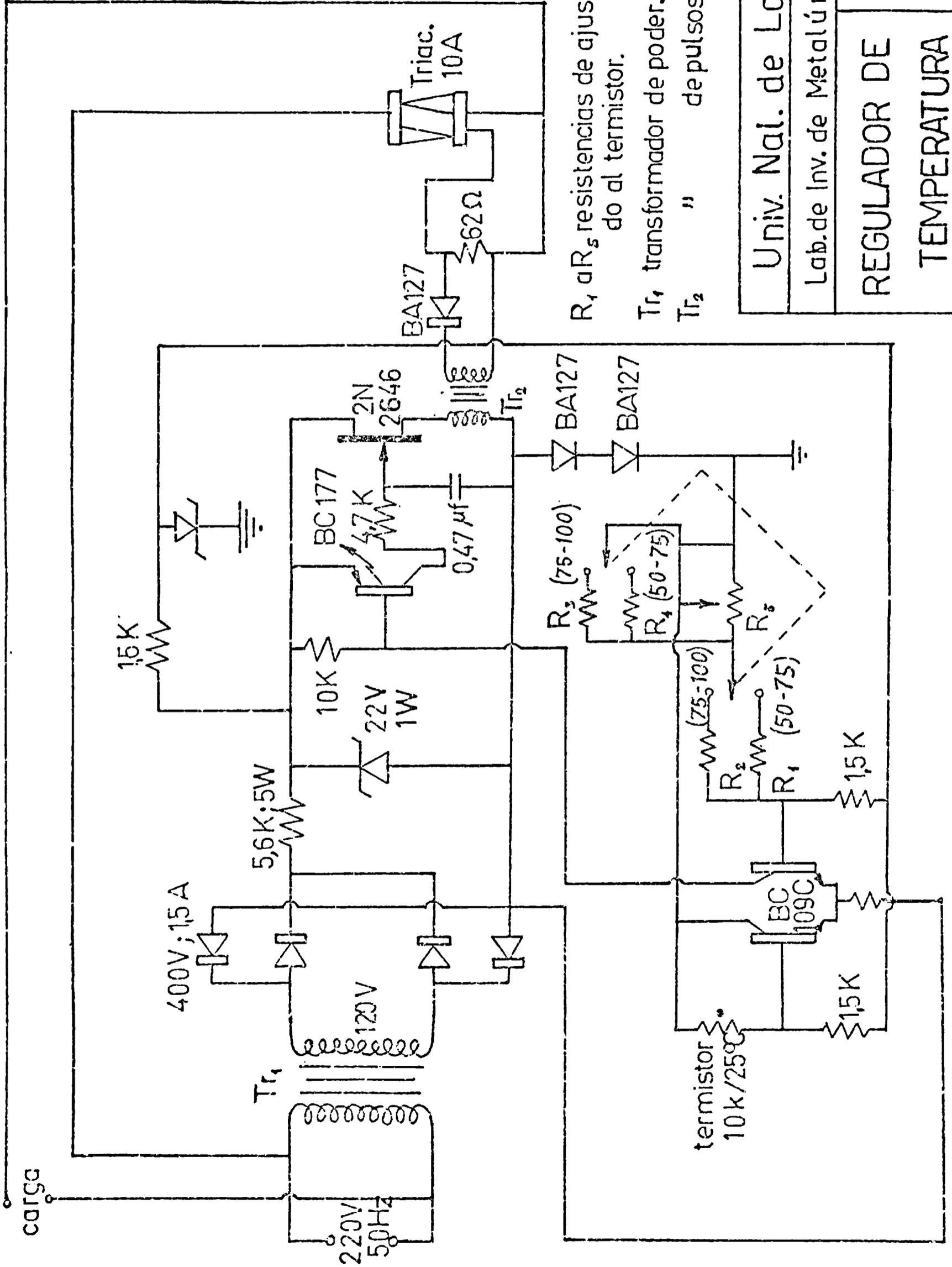
Las probetas se prepararon en una fresadora WE-CHECO FU2, utilizando una fresa de 100 x 80 mm y 165, 245 y 350 r.p.m. en el husillo y mínimo avance en la mesa. Para el fresado se diseñó un montaje, el cual se muestra en la figura N°2 en su conjunto, y en las figuras N°3 y N°4 se aprecian sus diferentes partes.

Baño termostático:

Para realizar el envejecimiento a temperatura constante, se diseñó un termostato con baño de aceite; el cálculo se muestra en el apéndice N°1.

La regulación de temperatura se logra con un regulador de potencia tipo proporcional, diseñado para este trabajo con una variación máxima de ± 0.3 °C, cuyo circuito se muestra en la figura N°5, por el principio de funcionamiento entrega al baño, una vez en régimen, solo la potencia perdida por disipación.

Para medir y registrar la temperatura del baño se utilizó un registrador potenciométrico Philips modelo PR 3210 con doce canales de medición, al que hubo que hacerle modificaciones para poder utilizarlo entre 0 °C y 100 °C, ya que originalmente viene provisto para el rango entre 0 °C y 1200 °C. Cuatro termo cuplas van colocadas en diferentes puntos del baño, con el objeto de conocer la uniformidad o posibles variaciones de temperatura entre



R_1 a R_5 resistencias de ajuste de acuerdo al termistor.

Tr_1 transformador de poder.

Tr_2 " " de pulsos.

Univ. Nal. de La Plata

Lab. de Inv. de Metalúrgia Física

REGULADOR DE TEMPERATURA

Figura No 5

zonas. Los ocho canales restantes se conectan a una quinta termocupla a temperatura ambiente a fin de hacer las correspondientes correcciones por unión fría.

El baño también está provisto de un termostato que actúa de seguro térmico. Este dispositivo se adoptó en previsión de cualquier desperfecto que pudiera ocasionar una immoderada elevación de temperatura, llevando el aceite a su punto de inflamación, con el consiguiente peligro.

Máquina de ensayos:

Las probetas se ensayaron en tracción en una máquina de ensayos universal marca INSTRON modelo T.T.C.M. con rangos de carga desde 100gr a fondo de escala, hasta 5.000 kg a fondo de escala. Las velocidades de deformación son de: 50; 30; 20; 10; 5; 3; 2; 1; 0.5; 0.3; 0.2; 0.1; y 0.05 ^{cm}/mint, y velocidades de carta de: 50; 30; 20; 10; 5; 3; 2; 1; 0.5 y 0.2 ^{cm}/mint, y amplificaciones aproximadas de 1, 2, 5, 10 y 20 para los extensómetros eléctricos.

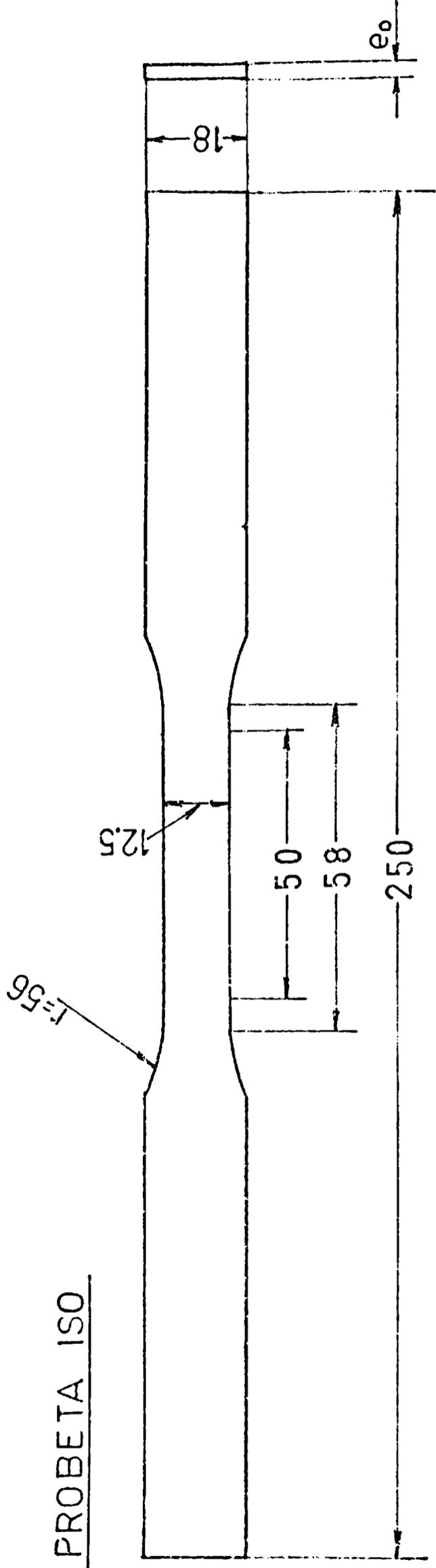
Extensómetro:

Se utilizó para el ensayo en tracción un extensómetro marca INSTRON, modelo G - 51 - 17M, con una distancia máxima entre cuchillas de 10 mm y una deformación máxima del 50 %.

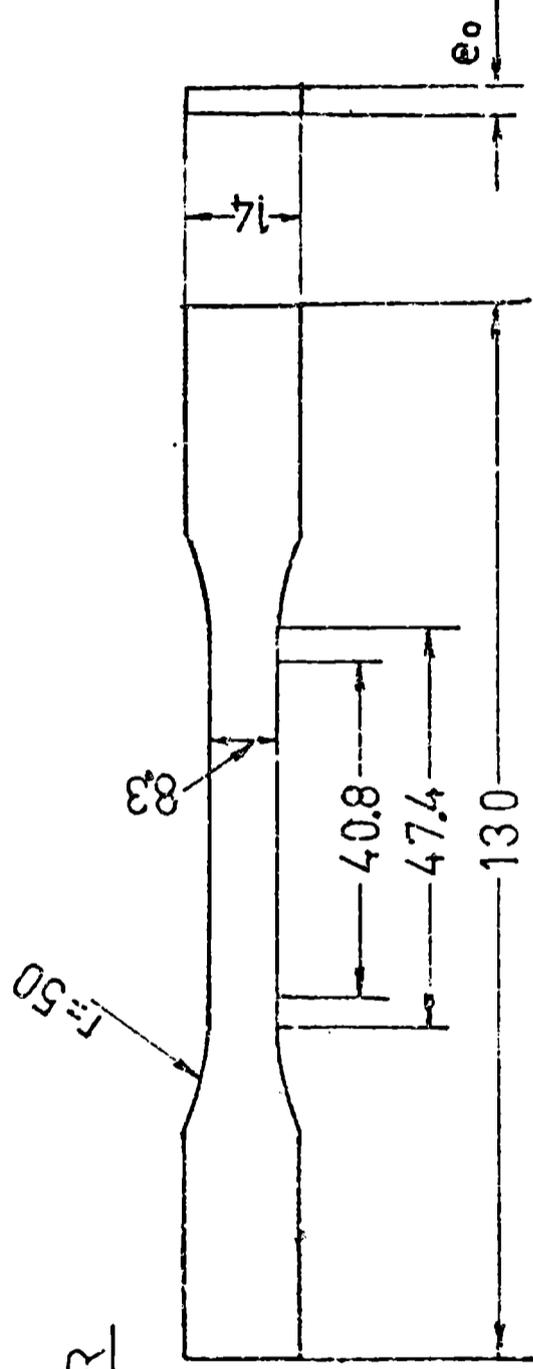
PRACTICA EXPERIMENTAL

A la chapa de acero en las condiciones recibidas se le quitaron por corte 110 mm a cada lado, esto con el fin de tener una chapa de espesor más uniforme, ya que los bordes eran de menor espesor. La parte restante se cortó

PROBETA ISO



PROBETA SIMILAR



Univ. Nal. de La Plata

Lab. de Inv. de Metalúrgia Física

PROBETA DE
ENSAYO

Figura
Nº 6

en fajas de 130 x 200 mm, obteniéndose ocho probetas en el sentido de laminación y 4 en el sentido transversal; otro corte se hizo de 130 x 100, obteniéndose 4 probetas transversales; de cada chapa en las condiciones iniciales se obtuvieron un total de 180 probetas. La medida de 130 mm corresponde a la longitud de la probeta, adoptándose esta medida en base al ancho de tabla de la laminadora.

Con respecto a la limitación anterior hubo necesidad de diseñar una probeta de tracción, la cual se fabricó - haciéndola geoméricamente semejante a la probeta NORMIA I50, el cálculo correspondiente se muestra en el apéndice N°2 y el diseño en la figura N°6.

El objeto principal de la experiencia es calcular la energía de activación en la cinética de envejecimiento, partiendo de laminado superficial constante y envejeciendo a tiempos crecientes y a dos temperaturas constantes.

Para conseguir el objetivo fue necesario seguir varios pasos, a saber:

1) Recocido de la chapa:

Las chapas de 130 x 200 mm y 130 x 100 mm se introdujeron en la caja de acero inoxidable, la cual se mantuvo en el horno de recocido hasta llevar la temperatura a 700 °C con un gradiente de 30 °C por hora y permaneciendo a dicha temperatura durante 3 horas, con el fin de conseguir una buena recristalización de los granos; posteriormente se enfrió con el mismo gradiente hasta la temperatura de 200 °C. Una vez la chapa en estado de recocida se le hizo análisis metalográfico para ver el tamaño de grano, obteniéndose un tamaño de grano

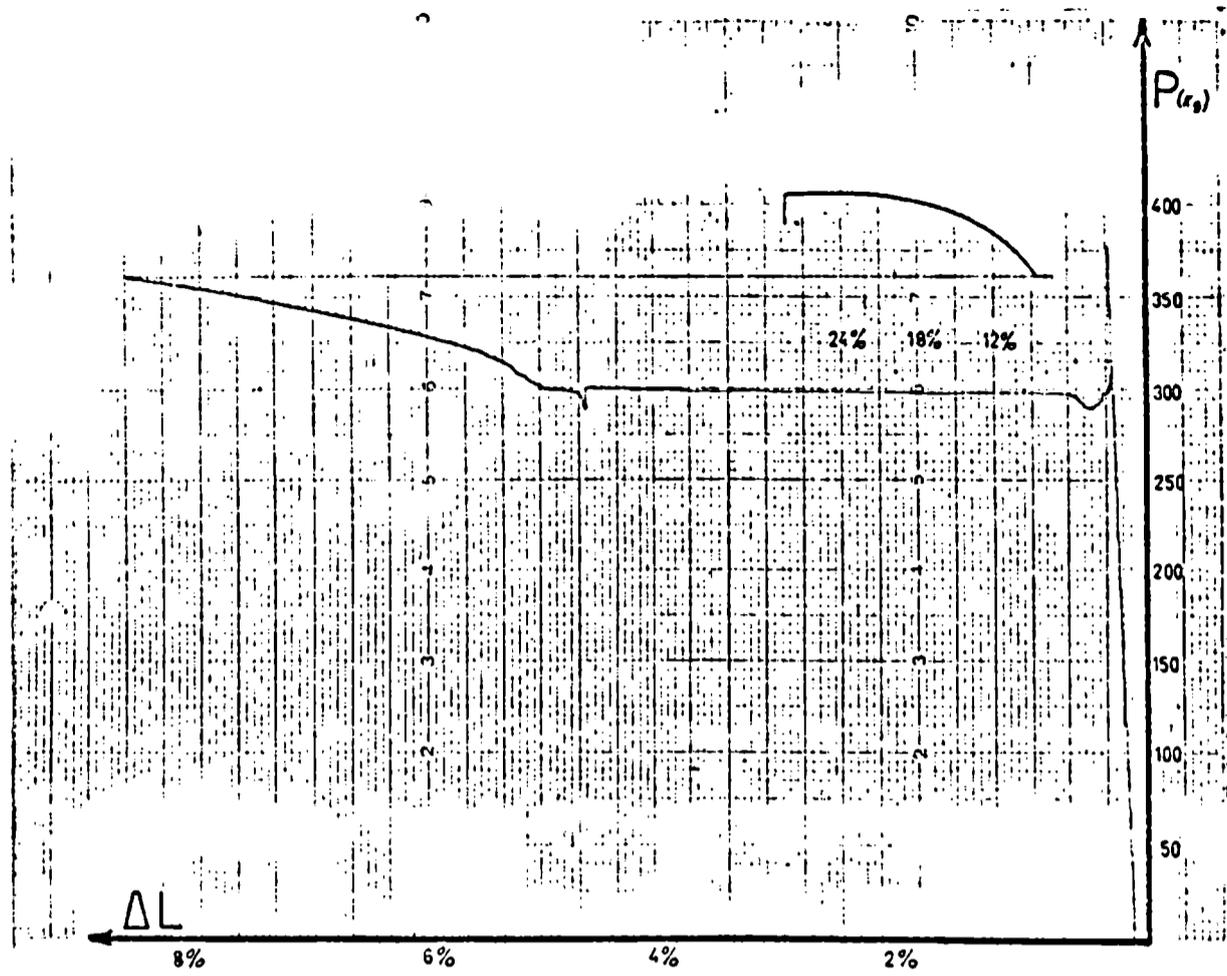


Fig. N°6(a): Curva P- ΔL de una probeta recocida.

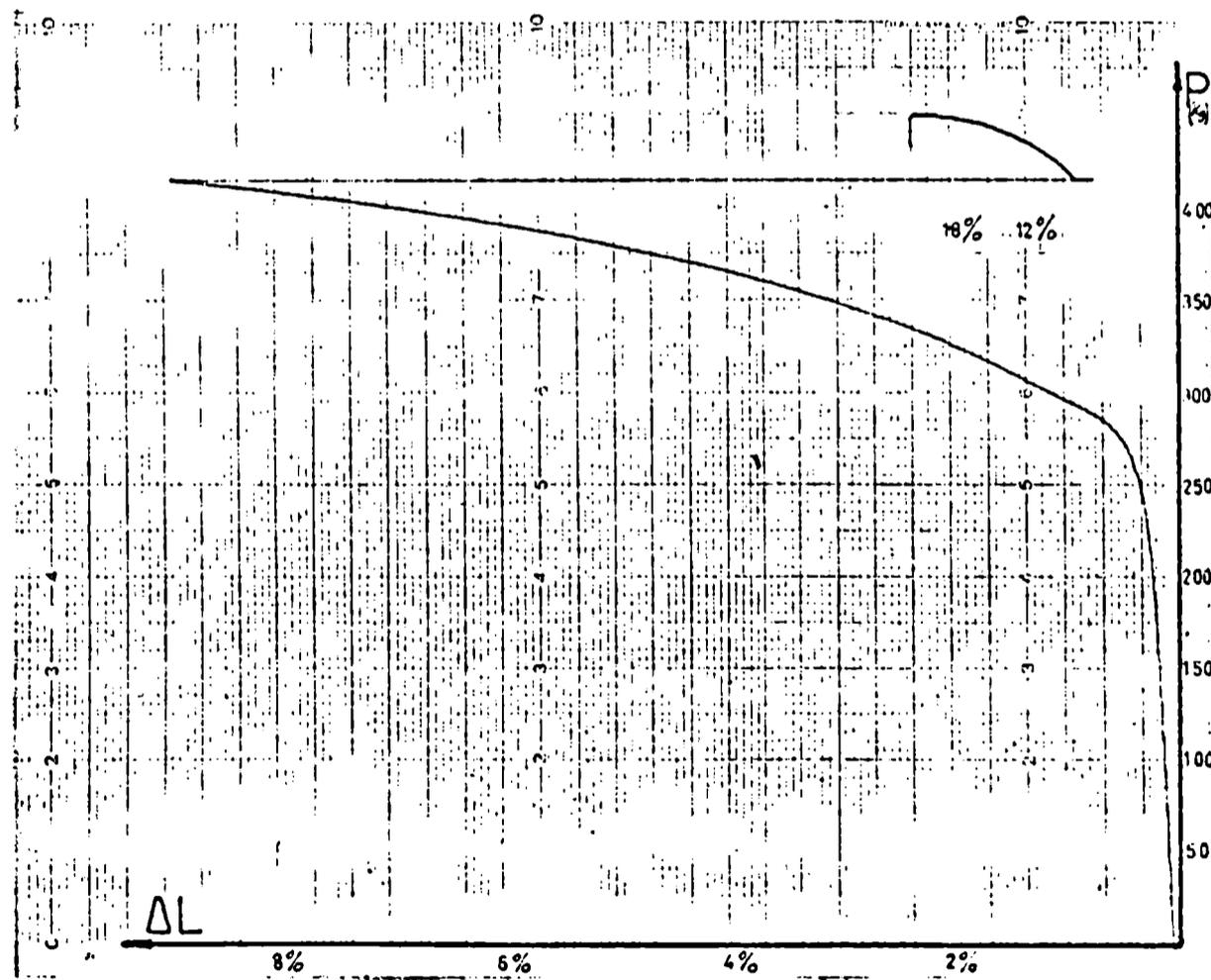


Fig. N°6(b): Curva P- ΔL de una probeta temperada.
2%. Sin envejecer.

de 20 micrones.

2) Preparación de Probetas:

Las probetas fueron preparadas por fresado; una vez realizada esta etapa, se les sometió a un pulido de los bordes con el objeto de eliminar la concentraciones dejada por el trabajado de la fresa, lo cual originaría varios centros de nucleación de bandas de Lüders; el pulido se realizó con tela esmeril de diferente granulometría.

Posteriormente se ensayaron en tracción y en la figura Nº6 se muestra el gráfico P-AL de una probeta recocida; el hecho de aparecer la curva en dos partes se debió a que se utilizaron dos amplificaciones en el extensómetro eléctrico, la primera parte en amplificación 2, de mayor sensibilidad, y la segunda parte en amplificación 20 de mínima sensibilidad. En todos los ensayos se utilizó una velocidad de deformación de $0.1 \text{ cm}^2/\text{min}$.

3) Laminado superficial:

La chapa de 130 x 200 mm se laminó superficialmente con una reducción de aproximadamente 2 % en una sola pasada; antes de cada laminado se limpiaron tanto la chapa como los rodillos con tricloroetileno e inmediatamente se introdujeron las chapas en una heladera con hielo seco, con el fin de evitar envejecimiento a temperatura ambiente; posteriormente se cortaron y en el maquinado se les suministró suficiente refrigerante para evitar envejecimiento por el calentamiento; igualmente en el pulido se refrigeraban continuamente con agua helada.

De cada chapa se sacó una probeta testigo para obser-

var la deformación inhomogénea, esta probeta (en sentido de laminación) se envejeció a 100 °C durante 60 minutos, luego se deformó un 3 % en tracción y se observó claramente la deformación en bloques; así, para el 2 % de laminado superficial correspondían aproximadamente dos bloques de material deformado por milímetro, lo cual está en concordancia con el laminado superficial del 1 % realizado a nivel industrial.

Como en el caso anterior se hicieron intentos para observar la deformación inhomogénea en las probetas transversales a la dirección de laminación pero no fue posible ver una clara deformación; una vez normalizado el temper rolling y efectuadas las probetas se procedió al envejecimiento de las mismas.

4) Envejecimiento:

Para realizar el envejecimiento acelerado de las probetas se eligieron dos temperaturas, una temperatura de 60 °C \pm 0.3 °C y otra de 95 °C \pm 0.3 °C. Para la primera temperatura se tomaron los siguientes tiempos: 40 minutos, 90 minutos, 510 minutos, 2.880 minutos, 10000 minutos y 30.000 minutos.

Los tiempos a la temperatura de 95° C fueron: 3 minutos, 6 minutos, 10 minutos, 40 minutos, 210 minutos y 1.800 minutos. Para cada tiempo y para cada temperatura se hicieron probetas longitudinales al sentido de la laminación, esto con el objeto de analizar el efecto del envejecimiento durante el proceso.

Para realizar el cálculo lo más exacto posible se tomaron como base las probetas laminadas superficialmente

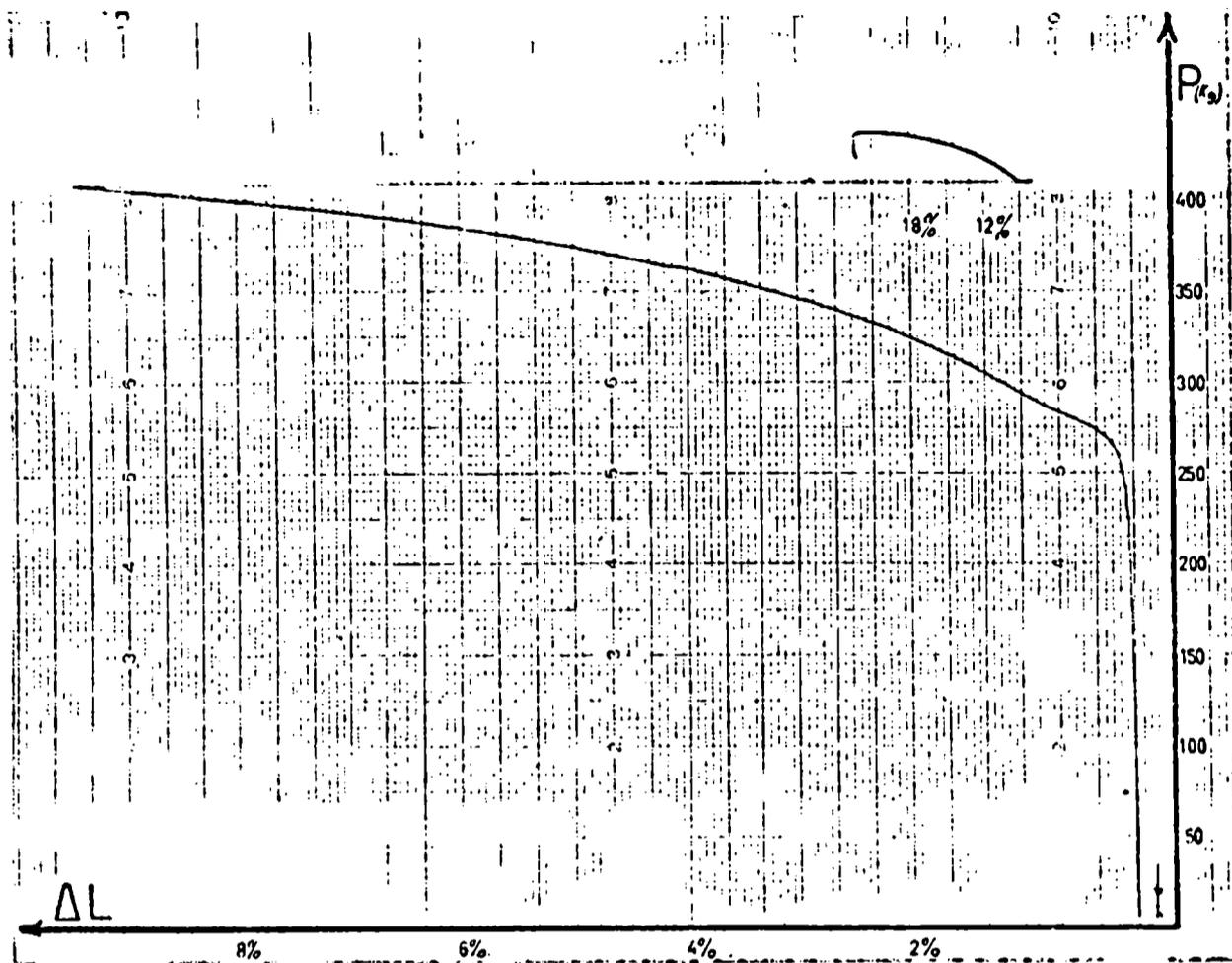


Fig. N°7(a): Curva de una probeta envejecida - 90 minutos a 60°C/

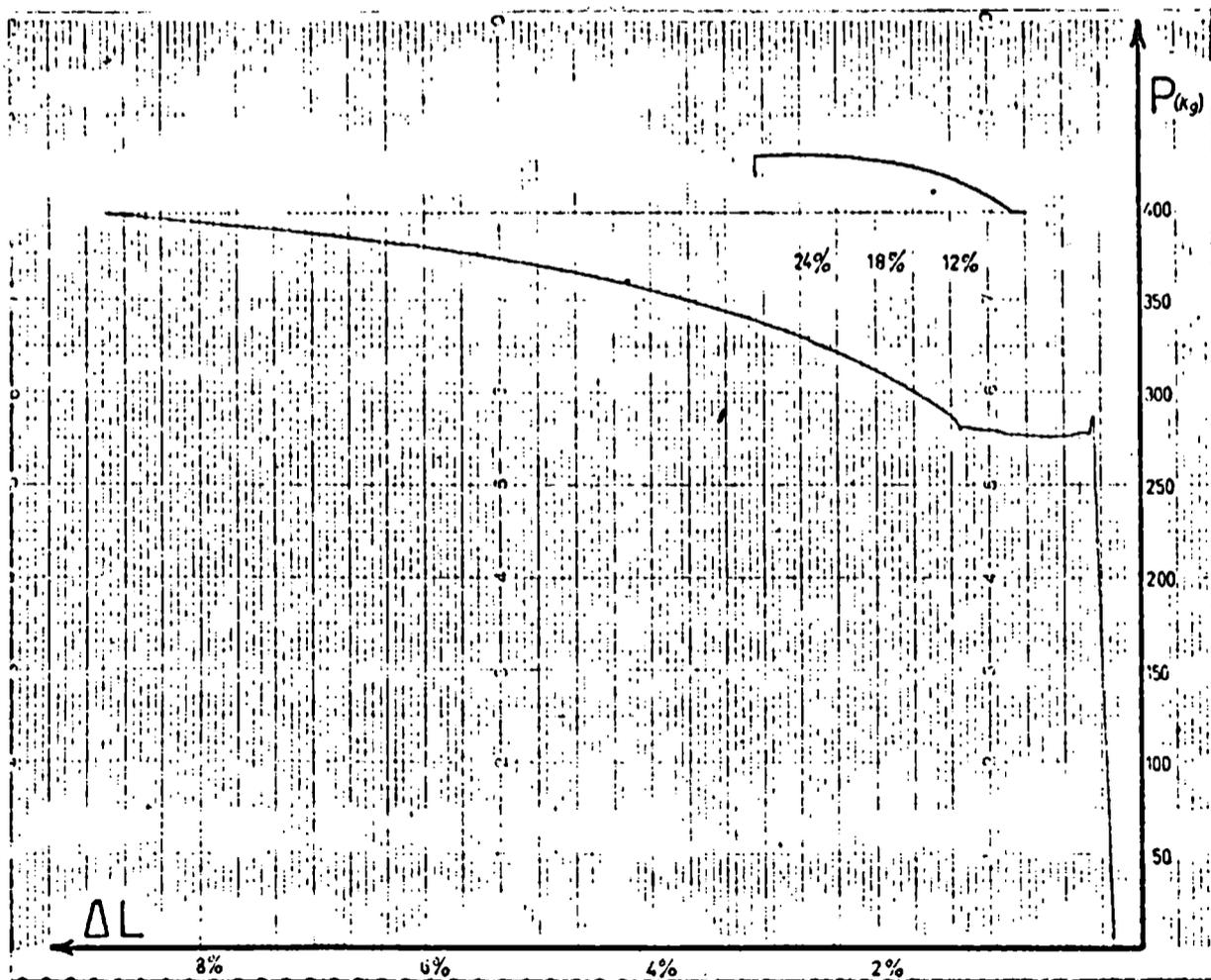


Fig. N°7(b): Curva P- ΔL de una probeta envejecida - 510 minutos a 60°C.

sin ningún envejecimiento, salvo el caso de unos pocos minutos a temperatura ambiente, un ejemplo de una probeta en tales condiciones y luego del correspondiente ensayo en tracción se muestra en la figura N° 6 (b), en este caso la tensión de fluencia se calculó por medio de la tensión correspondiente a un 0,2 % de deformación (tensión ingenieril). Como era de esperar la tensión de fluencia disminuyó (en este caso 2 Kg/mm^2), también la curva presenta continuidad de la región elástica a la plástica, hecho característico de una chapa temperada de acero efervescente para estampado. Para las temperaturas de 60°C y 95°C se analizó el incremento progresivo de la tensión de fluencia y de la elongación de Lüders en probetas longitudinales durante los diferentes tiempos de envejecimiento, en las figuras N° 7 (a), N° 7 (b), N° 8 (a), N° 8 (b) y N° 9 (a), se muestran curvas (P - ΔL) correspondientes a 60°C y diferentes tiempos de envejecimiento, en tanto que en la figura N° 9 (b) se muestra un ejemplo de una curva P - ΔL (carga - alargamiento específico) para la temperatura de 95°C .

5) Ensayos de tracción:

Las probetas permanecieron dentro del hielo seco hasta unos 5 minutos antes del ensayo en tracción; el tiempo durante el ensayo fue de unos 18 minutos por probeta a la velocidad de $0,1 \text{ cm/mint.}$, para llegar hasta la carga máxima.

RESULTADOS:

Evaluación del laminado superficial:

Hundy (8) ha encontrado

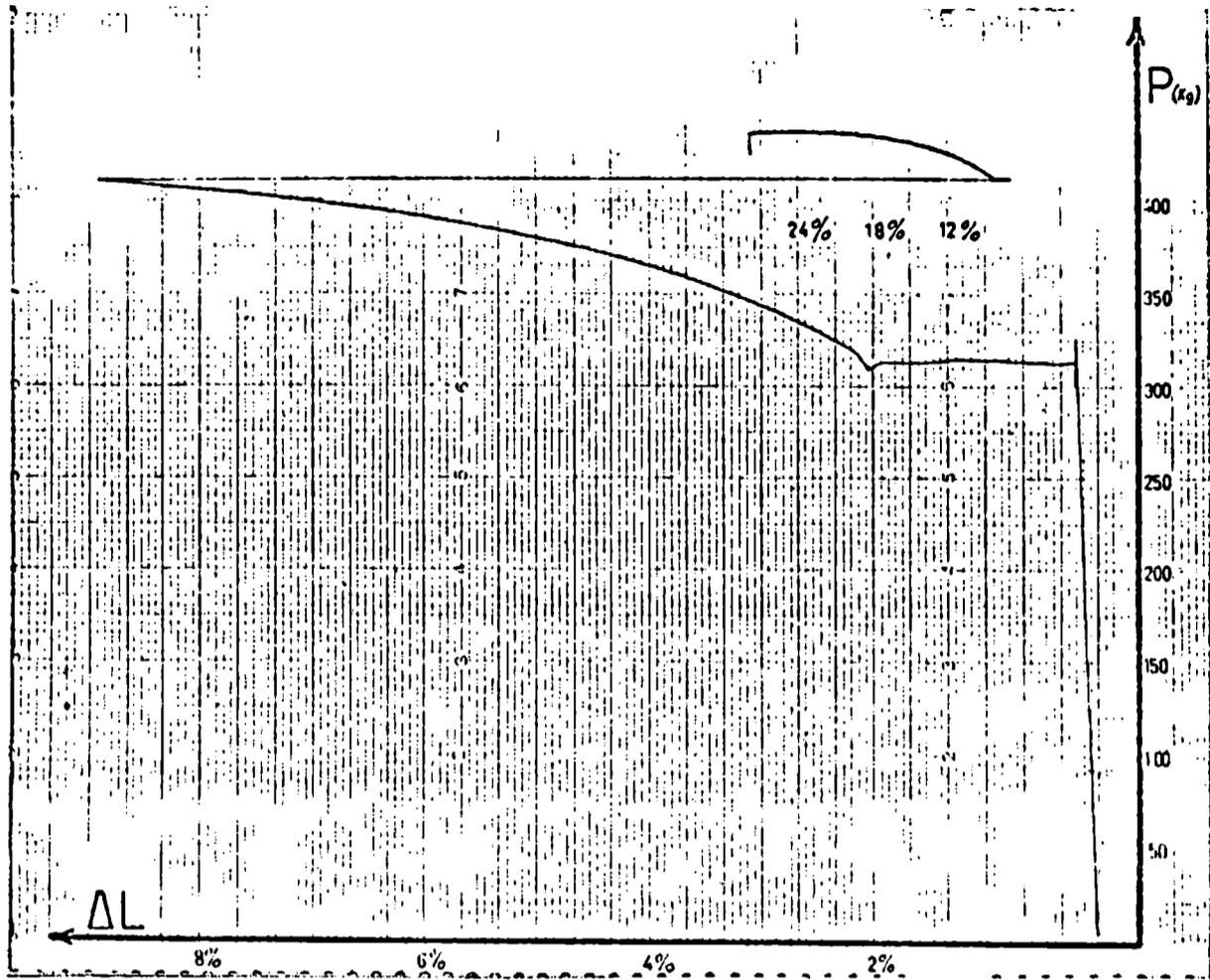


Fig. N°8(a): Curva P- ΔL de una probeta envejecida.
2880 minutos a 60°C.

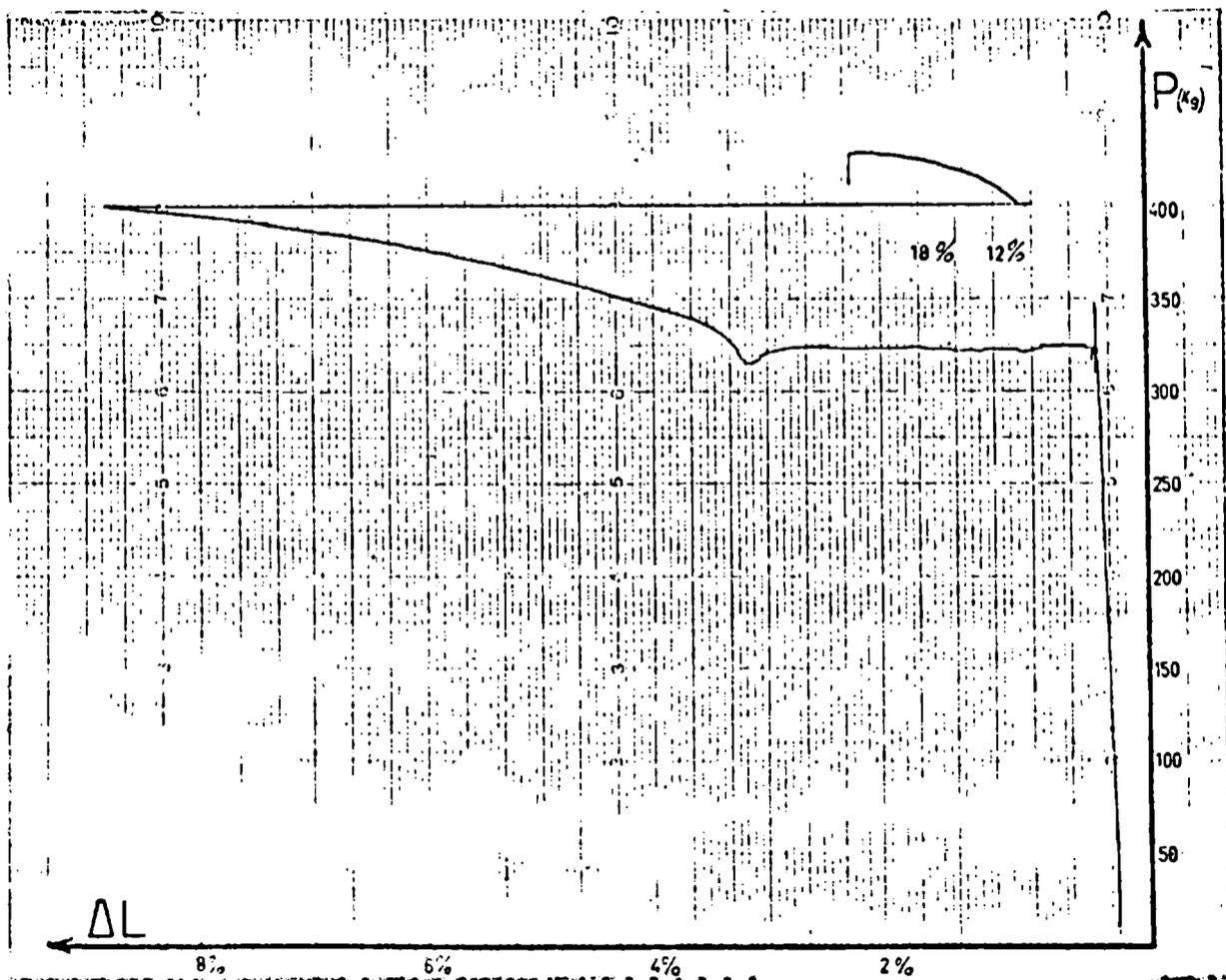


Fig. N°8(b): Curva P- ΔL de una probeta envejecida.
10.000 minutos a 60°C

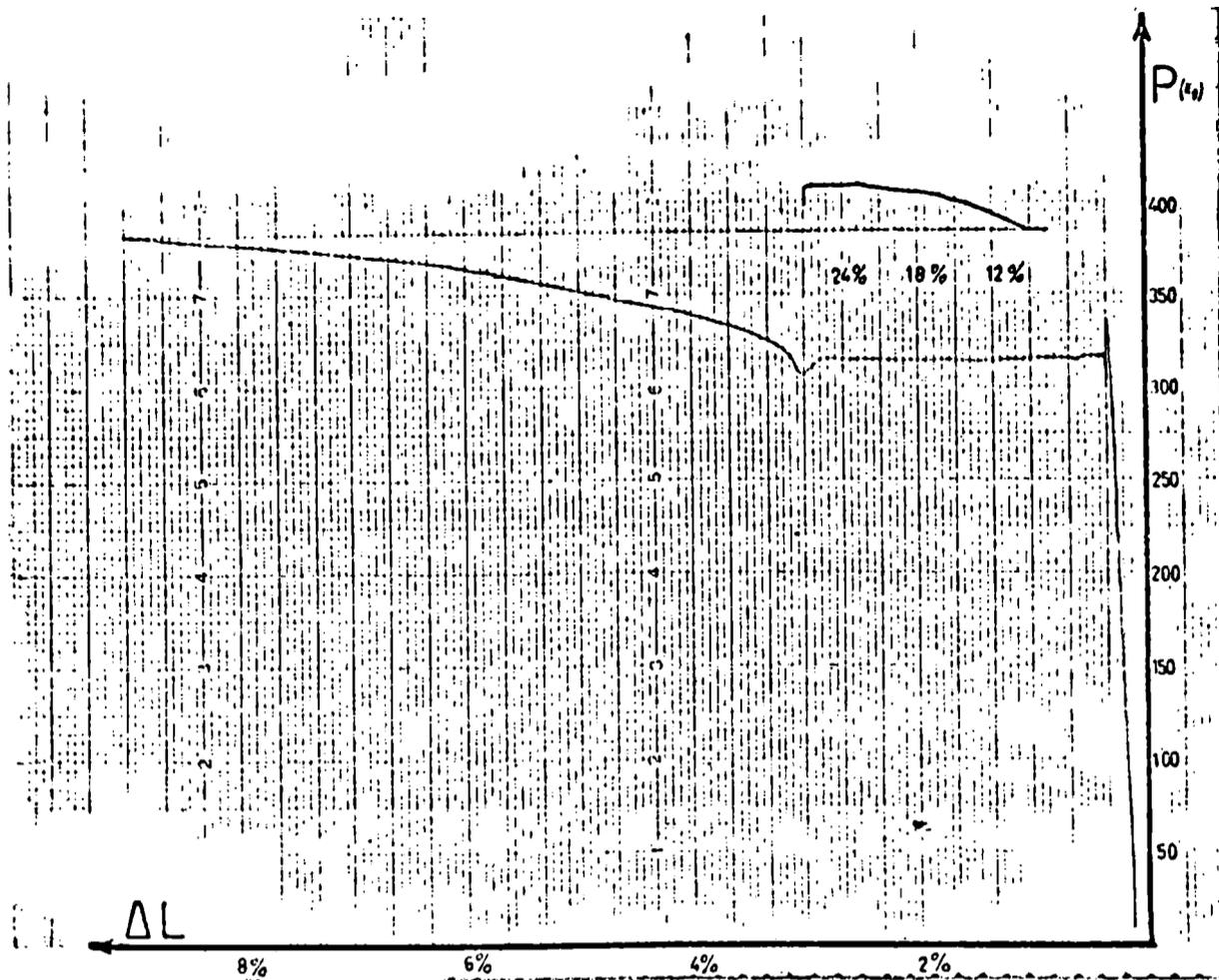


Fig. N°9(a): Curva P- ΔL de una probeta envejecida.
30.000 minutos a 60°C .

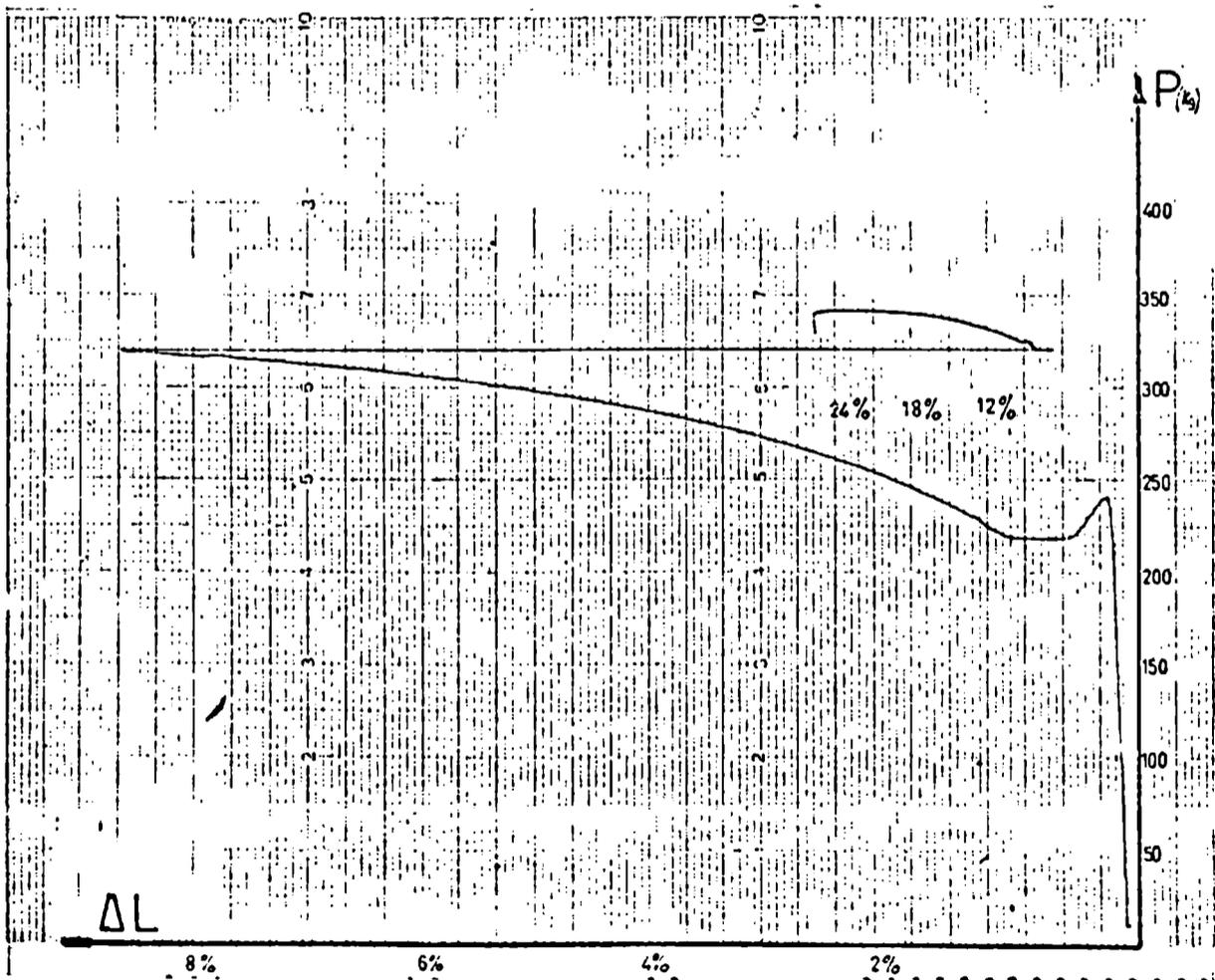


Fig. N°9(b): Curva P- ΔL de una probeta envejecida.
10 minutos a 95°C .

do para la superficie de la chapa laminada superficialmente una estructura que denominó "S" y la cual es representativa del estado de deformación de la probeta. La inhomogeneidad de dicha deformación está dada por una serie de bloques severamente deformados, alternados con sectores sin deformar.

El grado de deformación al cual ha sido sometido el material, está dado por la cantidad de bloques por unidad de longitud que se han formado. En las figuras N° 10 y 11 se muestran las superficies de dos probetas temperadas aproximadamente 2 %, en las cuales para poner en evidencia la estructura de deformación inhomogenea, se envejecieron a 100°C durante una hora y luego se deformaron en tracción un 3 %. La estructura inhomogenea presenta aproximadamente dos bloques de deformación por mm, esto equivale a un espesor de 0,25 mm. Observaciones hechas en probetas industriales deformadas 1 % presentan el mismo número de bloques por mm, la diferencia de bloques con la deformación estaría motivada por el diámetro de los rodillos (4") de la laminadora utilizada en el laboratorio, con respecto al diámetro de los rodillos () de la laminadora industrial, como también de las tensiones delantera y trasera aplicada a la bobina, al bobinar y debobinar, hecho que no se produce en la práctica de laboratorio, por esta razón es que se ha utilizado la deformación de aproximadamente 2% en este trabajo, por tener las probetas igual volumen deformado que la chapa comercial. Los ensayos -

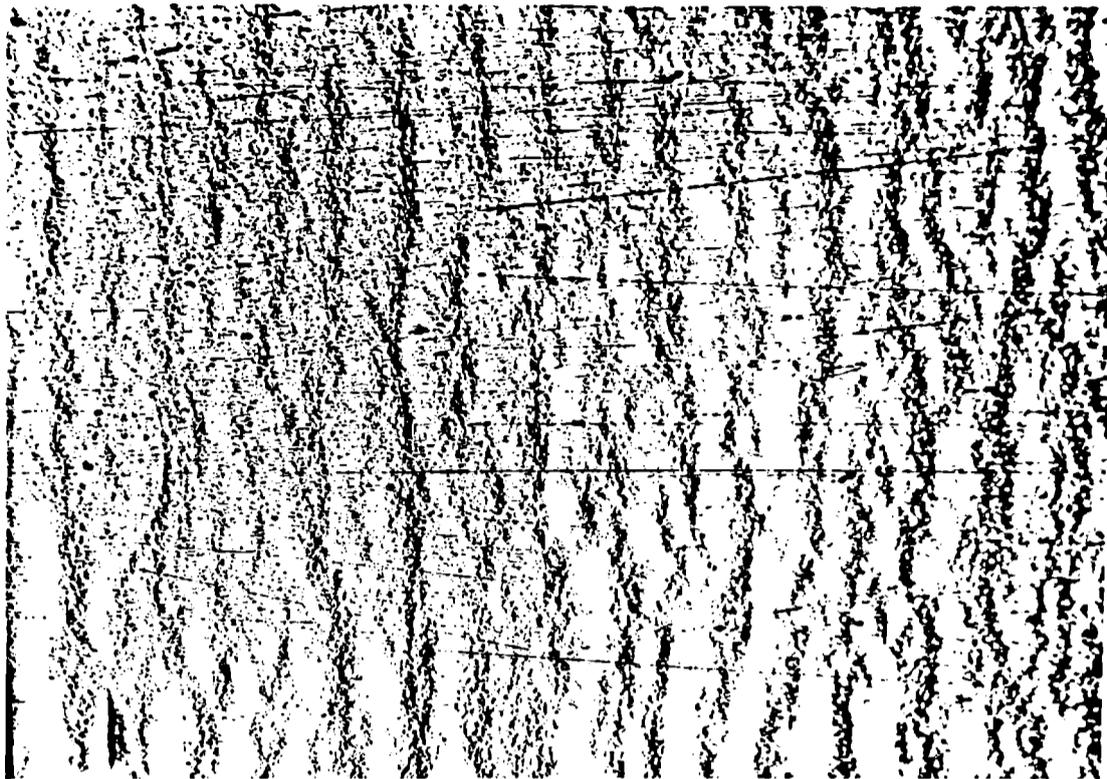


Fig.Nº10: 2% de reducción. Envejecida 1 hora a 100°C. 2 bloques / mm. 11,2 x

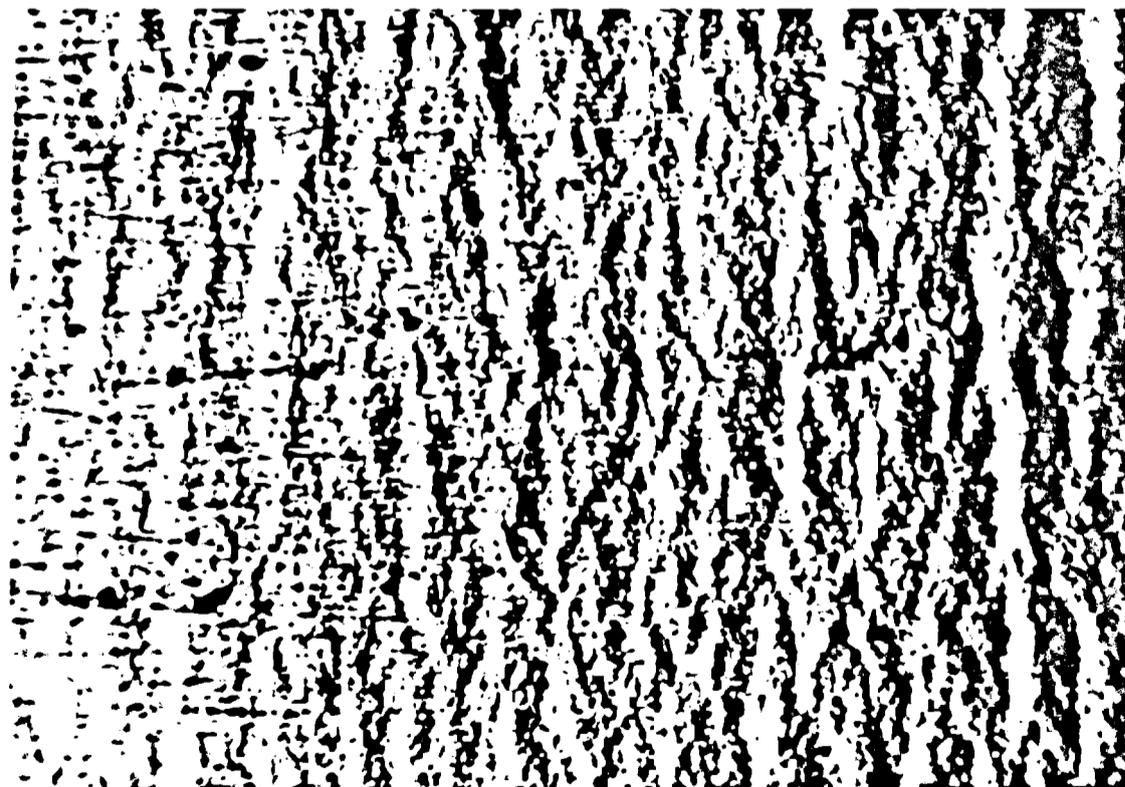


Fig.Nº11: 2% de reducción. Envejecida 1 hora a 100°C. 2 bloques / mm. 11,2 x

fueron realizados en el sentido de laminación.

Ensayos de tracción:

Los ensayos de tracción muestran en la figura N° 6 (a) el ensayo efectuado en una probeta recocida, en la cual por el perfecto pulido de los bordes de la misma, se ha obtenido un sólo frente de Lüders. En este ensayo específico el valor de dicha deformación fue de casi un 5 %, mientras que, el valor promedio obtenido de todos los ensayos de probetas recocidas fue de un 4 %; la tensión de fluencia en este caso fue de 23.075 Kg/mm² y el valor de tensión máxima de 31,20 Kg/mm².

En la figura N° 6 (b) está representada una curva de tracción de una probeta temperada, en este caso la tensión de fluencia tiene un valor de 20 Kg/mm² y se ha determinado como la fluencia ingenieril, o sea, la fluencia que corresponde a un 0,2 % de deformación. Las curvas para diferentes tiempos de envejecimiento mostradas anteriormente, presentan un continuo aumento en la tensión de fluencia, pero se ve bien marcada en los 510 minutos a 60°C, un aumento similar se observa en la deformación de Lüders.

Resultados similares se obtienen con el envejecimiento a 95°C. Contrariamente a lo expresado por Yendell y Hudd (9) para largos tiempos de envejecimiento, 30.000 minutos a 60°C no se han detectado irregularidades en la tensión de fluencia, figura N° 9 (a).

En las curvas de tracción se han calculado valores promedio con los cuales se han efectuado las representaciones de $\Delta\sigma_{vst}^{2/3}$, figura N°12, obteniéndose linealidad hasta los 10 minutos para el envejecimiento a 95°C y

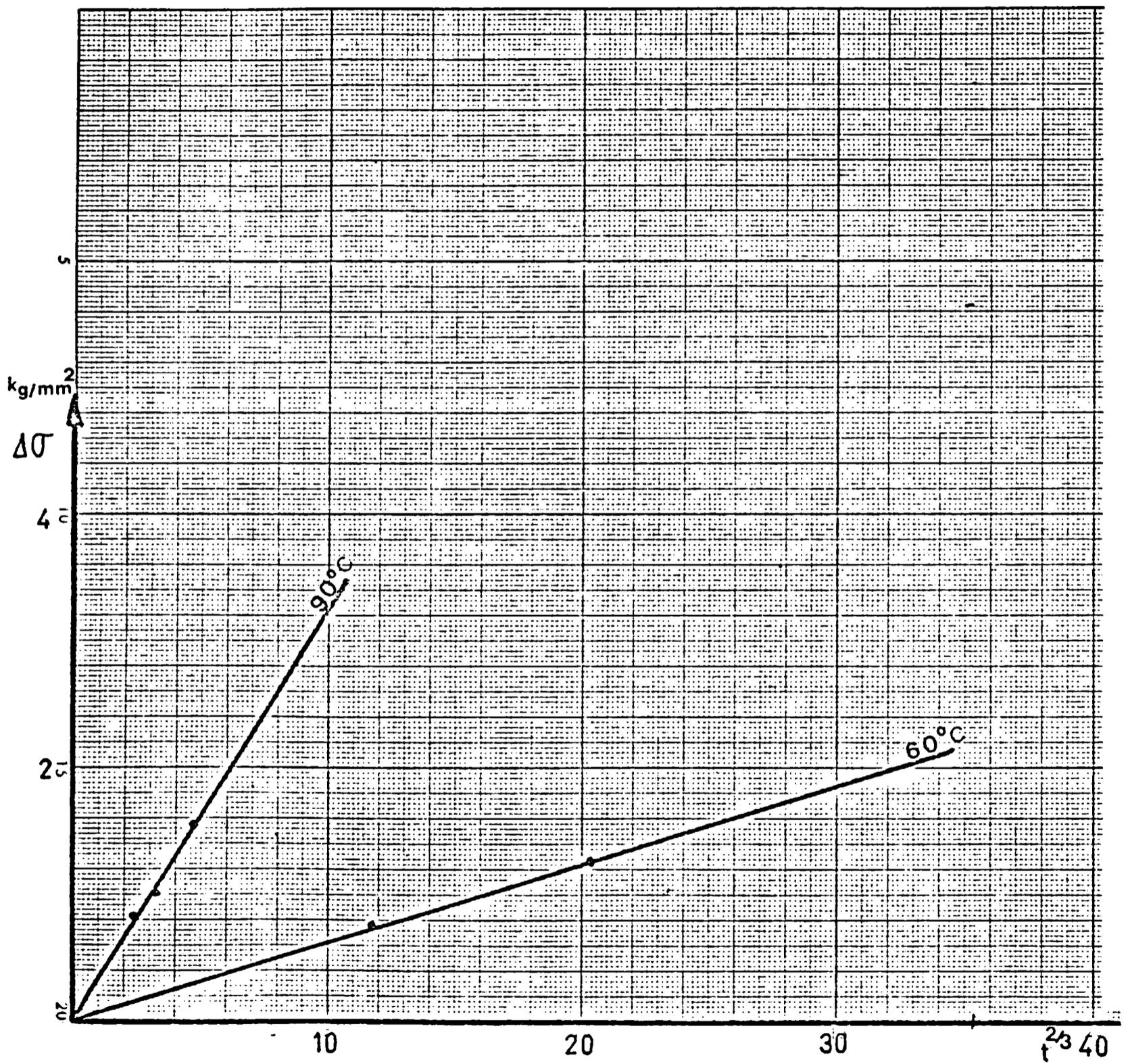


Fig. N°12: Curvas $\Delta\sigma$ vs $t^{2/3}$, para 60°C y 90°C . Primeras etapas de envejecimiento.

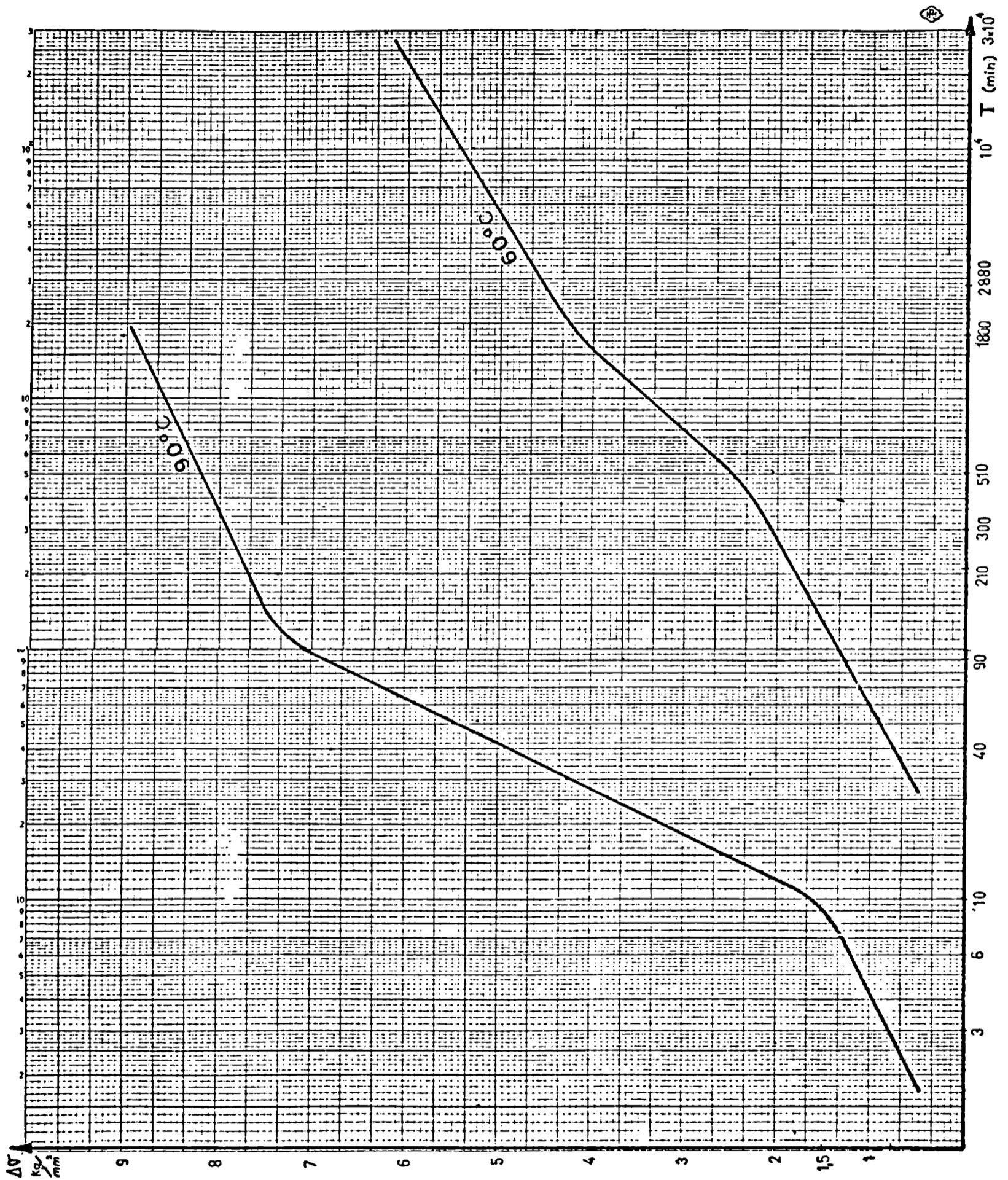


Fig. N°13: Curvas de la variación de $\Delta\sigma$ con el tiempo para las temperaturas de 60°C y 95°C.

hasta los 90 minutos para el envejecimiento a 60°C. Igualmente se graficó $\Delta\sigma_{vst}$ en escala semilogarítmica, figura N° 13. σ_{vst} en escala similar a la anterior figura N°14, y por último para obtener el valor de la energía de activación se ha presentado $\log t_{vs} \frac{1}{t}$, con $\Delta\sigma$ como parámetro, figura N° 15. El valor de la energía de activación obtenida fue de 19.400 cal/mol.

DISCUSION DE LOS RESULTADOS:

Los resultados de las curvas de tracción coinciden con los obtenidos por otros investigadores, en cuanto al aumento de la tensión de fluencia con el envejecimiento y a la deformación de Lüders. Cumpliendo la ley de Cottrell y Bilby (1) el aumento de la tensión de fluencia sigue una ley lineal con $t^{2/3}$: Wilson y Russell (5) afirman que esta ley se cumple no solamente en la primera etapa de envejecimiento, sino también para la segunda etapa, para envejecimientos hasta la temperatura de 60°C. Está corroborado en este trabajo, pues mientras en el envejecimiento a la temperatura de 95°C la linealidad de $\Delta\sigma_{vst}^{2/3}$ alcanza a 10 minutos, en el envejecimiento a 60°C, la misma es superior a 100 minutos (figura N°12).

Los valores de energía de activación obtenidos para tiempos de envejecimiento que siguen la ley de $t^{2/3}$, concuerdan con los valores obtenidos por Cottrell y Leak (10), Hundy (11), Tardif y Ball (6), Thomas y Leak (12), el valor calculado de 19.400 Cal/mol está comprendido entre los coeficientes de difusión de carbono en hierro y nitrógeno en hierro.

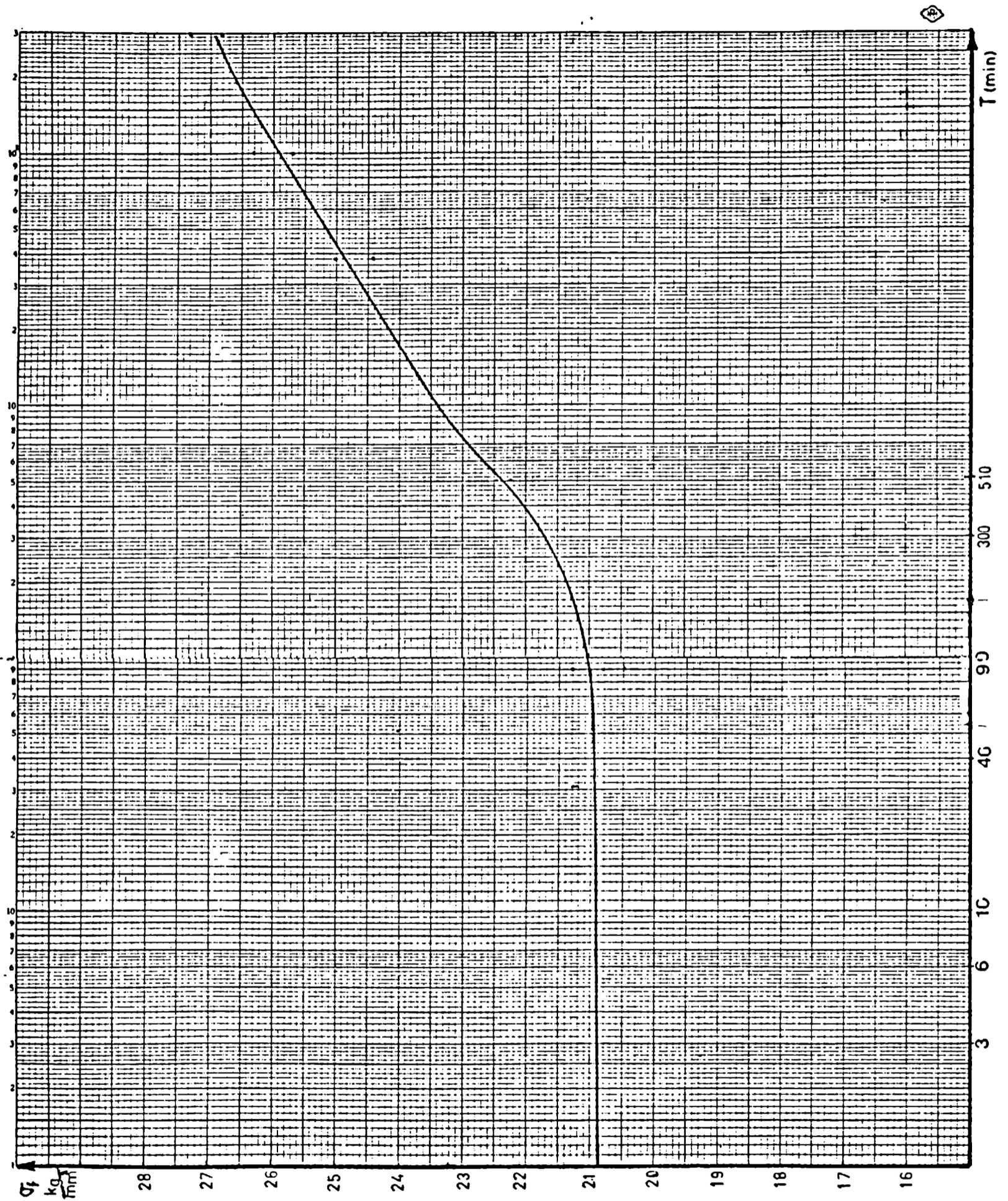


Fig.Nº14: Curva de variación de la tensión de fluencia con el tiempo de envejecimiento.

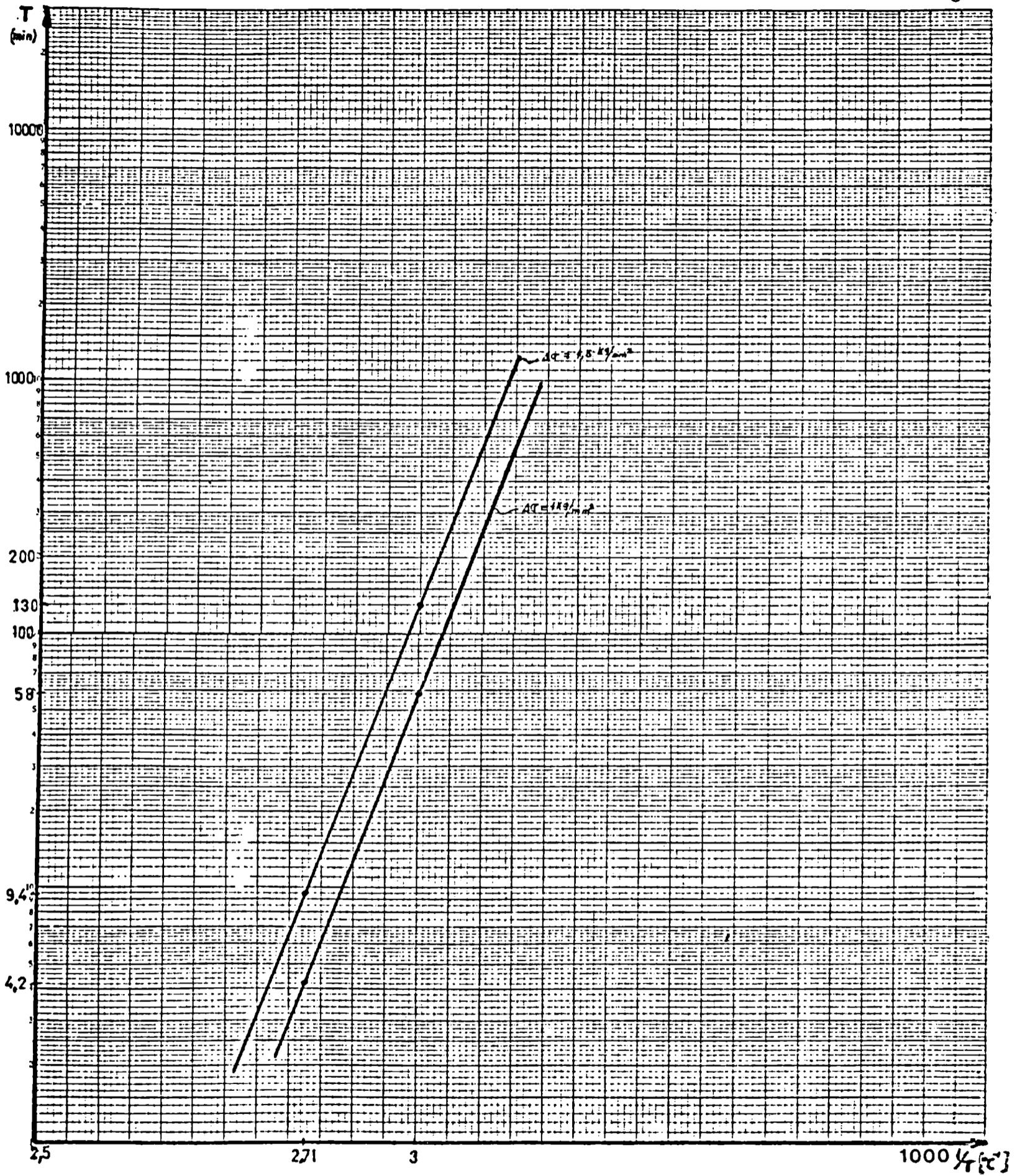


Fig. N°15: Curvas de energía de activación t vs $\frac{1}{T}$ T: temperatura absoluta.

CONCLUSIONES:

La etapa más importante del proceso de envejecimiento por deformación de la chapa de acero efervescente de bajo carbono a los fines industriales, es aquella en que reaparece la deformación de Lüders y comienza a aumentar la tensión de fluencia, ambos factores tienen un gran efecto en el proceso de estampado de la chapa. La evaluación del proceso de laminación superficial está bien determinado por la observación de los bloques de material deformado y sin deformar, siendo óptima la condición de 50 % de material deformado.

En las condiciones de trabajo de laboratorio, este valor se consiguió con una deformación del 2 %. La presencia de estos bloques explica, según Wilson y Butler (13), la desaparición de las bandas de Lüders en tracción, por la deformación de un gran número de microbandas, no detectables en la máquina de ensayos. El descenso de la tensión de fluencia estaría explicado por el efecto de la velocidad de deformación, en la cual a mayor número de bloques, se tiene una menor velocidad de deformación y por consiguiente una menor valor de la tensión de fluencia. Se verifica la ecuación de Cottrell y Bilby por la linealidad de la representación de $\Delta\sigma vst^{2/3}$, para tiempos mayores a los cuales esta linealidad desaparece, no subsiste la constancia de la energía de activación calculada. La extrapolación a temperatura ambiente de envejecimiento realizados a altas temperaturas debe efectuarse con la debida precaución.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Cottrell, A. H. and Bilby B. A. Proc. Phys. Soc. 1949
vol. A 62 pag. 49
- 2) Harper, S. Physical Review, 1951 vol 83 pag 709
- 3) Hundy, B. B. Journal of the Iron and steel Institute
1955 vol 181 pag 313
- 4) Wilson D. V. Acta Met. 1957, vol 5, pag 293
- 5) Wilson D. V. and Russell, B. Acta Metalúrgica, July
1960, vol 8 , pag 468
- 6) Tardif, H. P. and Ball, C. S. Journal of the Iron and
steel Institute, 1956, vol 182, pag 9
- 7) Leslie, W. C. and Keh A. S. Journal of the Iron and
steel Institute, 1962, vol 200, pag 722
- 8) Hundy, B. B. Journal of the Iron and steel Institute
1954, vol 178, pag 34
- 9) Yendell, B. M. and Hudd, R. C. Journal of the Iron and
steel Institute, 1970, vol 208, pag 1006
- 10) Cottrell, A. H. and Leak, G. M. Journal of the Iron
and steel Institute, 1952, vol 172, pag 301
- 11) Hundy, B. B. Journal of the Iron and steel Institute
1954, vol 178, pag 127
- 12) Thomas, W. R. and Leak, G. M. Journal of the Iron
and steel Institute, 1955, vol 180, pag 155
- 13) Butler, R. D. and Wilson, D. V. Journal of the Iron
and steel Institute, 1963, vol 201, pag 16

APENDICE N° 1

Cálculo del baño termostático

I. Elementos a utilizar:

- a) Recipiente cilíndrico de chapa con tapa, de las siguientes dimensiones:

$$\text{Diámetro} \quad \phi = 28,5 \text{ cm}$$

$$\text{Altura} \quad h = 36 \text{ cm}$$

$$\text{Volumen interior } v_i = 22,9 \text{ litros}$$

- b) Aceite de temple Roughth Quench 4C

Datos del fabricante:

$$C_a = 0,45 \text{ Cal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$\tau = 110 \text{ seg}$$

$$\rho_a = 0,837 \text{ gr/cm}^3$$

- c) Material aislante térmico:

Lana de vidrio en planchas, Espesor a verificar.

Hilo Kanthal A, dimensiones a determinar.

II. Cálculo de la masa de aceite a utilizar:

Se adopta un volumen útil $v_u = 18$ litros, con lo cual quedan 6 cm entre la superficie del aceite y el borde del recipiente para prevenir rebalses. La masa de aceite será:

$$m_a = \rho_a \cdot v_u = 15,06 \text{ Kg}; \text{ se adopta } m_a = 15 \text{ Kg}$$

III. Régimen térmico:

- a) Cantidad de calor necesaria para calentar el aceite desde temperatura ambiente, hasta 60°C .

Se supone el sistema sin pérdidas:

$$Q_a = m_a \cdot C_a \cdot \Delta t = 290 \text{ Cal.}$$

Para tener en cuenta el calentamiento del recipiente de chapa que contiene el aceite, así como los elementos de soporte, sujeción y aislación del calefactor, se multiplica por un factor de corrección:

$$Q_t = Q_a + Q_r + Q_s = 1,2 Q_a = 348 \text{ Cal ; se adopta } Q_t = 350 \text{ Cal}$$

b) Cantidad de calor necesaria para mantener el sistema en régimen a 60°C.

El recipiente será cubierto exteriormente con lana de vidrio, esta será a su vez cubierta con otro material formando el conjunto una pared compuesta. El cálculo se hará suponiendo que trabaja sólo la lana de vidrio, es decir pared simple.

La lana de vidrio viene en espesores comerciales de 1" y 2". Se calculará el calor disipado con e= 1" y según el resultado se decidirá sobre su utilización o cambio por un espesor mayor.

Siendo r_2/r_1 2, se puede utilizar la ecuación de transmisión para paredes planas.

$$\text{En } Q_z = \frac{\lambda \cdot F \cdot (t_i - t_e)}{\delta} \left[\frac{\text{Cal}}{\text{m.h.}^\circ\text{C}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}} \cdot ^\circ\text{C} \right]$$

En la que:

λ : coeficiente de transmisibilidad.

F: superficie total de transmisión.

t_i : temperatura interior.

t_e : temperatura exterior.

δ : espesor de la pared aislante.

La lana de vidrio trabajará a 60°C interior y a 17°C exterior (temperatura ambiente).

$$\text{se calcula: } t_m = (t_e + t_i)/2 = 39^\circ\text{C} ;$$

$$\text{se adopta } t_m = 40^\circ\text{C.}$$

Para esta temperatura resulta por interpolación de los valores dados a 0°C y 100°C en manuales; el valor = 0,036 Cal/m.h.°C.

La superficie total de transmisión resulta:

$$F = \pi \cdot D_m \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot D_m^2/4$$

en la que:

$$D_m = [D_i + (D_i + e)] / 2$$

$l = h + 1,5 \cdot e$ el valor 1,5 es para tener en cuenta el aplastamiento del aislante en la base del termostato.

Resulta así:

$$F = 0,53 \text{ m}^2$$

La pérdida de calor será:

$$Q_z = \frac{0,036 \cdot 0,53 \cdot (60 - 17)}{0,0254} = 32,8 \frac{\text{Cal}}{\text{hora}}$$

Para tener en cuenta la pérdida por la junta (tapa y recipiente), se aplica un factor de corrección:

$$Q_p = 1,2 Q_z = 39,36 \text{ Cal/h} ;$$

$$\text{se adopta } Q_p = 40 \text{ Cal/h}$$

Este es el calor que habrá que entregar al baño para mantenerlo en régimen a 60°C, siendo un valor perfectamente admisible se adopta $e = 1^\circ$ para el aislante.

IV. Cálculo de la potencia eléctrica necesaria:

a) Régimen permanente:

$$P_r = Q_p \cdot \frac{4.186}{3.600} \text{ (watt)} \approx 53 \text{ watt}$$

b) Régimen transitorio:

Se fija el tiempo del transitorio térmico en 3 horas. Según el cálculo para poner a régimen, no considerando las pérdidas, era necesario entregar $Q_p = 350$ Cal, luego la potencia necesaria en el transitorio sería:

$$W_t = \frac{Q_t}{3 \text{ horas}} \approx 117 \text{ Cal/h}$$

No siendo de interés en este trabajo el cálculo estricto del transitorio térmico, sino sólo la evaluación de la potencia necesaria para poder así dimensionar el calefactor, se hace la siguiente suposición:

Al cabo de la tercera hora el baño entrará en régimen, siendo entonces la pérdida de calor según lo calculado $Q_p = 40$ Cal, supuesto el caso más desfavorable, en la tercera hora habría esa misma pérdida, no así en la primera y segunda hora en los que lógicamente será menor. Escalonando aritméticamente las pérdidas:

caso más desfavorable	3 ^{ra} hora	40 Cal.
	2 ^{da} hora	20 Cal.
	1 ^{ra} hora	10 Cal.

En este supuesto, el total de pérdidas para el transitorio será:

$Q_{\text{perd. total transit.}} = Q_{\text{pt}} = 70$ Cal ; de donde promediando para el tiempo establecido resulta:

$$W_{pt} = Q_{pt}/3 \text{ horas} = 23 \text{ Cal/h.}$$

La potencia necesaria inicial será:

$$W_{ni} = W_t + W_{pt} = 117 + 23 = 140 \text{ Cal/h.}$$

$$P_{ni} = 140 \cdot \frac{4.186}{3.600} = 163 \text{ Watt}; \text{ se adopta } P_{ni} = 165 \text{ W}$$

V) Cálculo de la resistencia de calefacción:

Se cuenta con hilo Kanthal A de varios diámetros. El catálogo de utilización aconseja como valores adecuados de disipación de potencia por unidad de superficie lateral, el valor 5 a 6 Watt/cm² para elementos sumergidos.

Siendo de gran importancia disminuir la inercia térmica del baño, se sobredimensionará la resistencia calculándola al 10 % del valor aconsejado.

$$\text{Sup. de disip.} = \frac{165}{0,6} \frac{\text{Watt}}{\text{Watt/cm}^2} = 275 \text{ cm}^2.$$

Se elige alambre de $\phi = 1,2 \text{ mm}$; para este diámetro el catálogo da los siguientes datos:

$$S = 37,70 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\sigma = 1,229 \text{ } \Omega/\text{m}$$

$$f = 1,39 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$l = \frac{\text{Sup. de disipación}}{S} = 275/37,70 \simeq 7,2 \text{ m}$$

$$R = \sigma \cdot l = 7,2 \cdot 1,23 = 8,85 \text{ } \Omega; \text{ se adopta } R = 8,8$$

Se elige $\phi_e = 1,2 \text{ cm}$ para la espiral con lo que resultan necesariamente $n = 190$ espiras para tener la R. requerida.

Tensión e intensidad en el transitorio:

$$P_{ni} = U_t^2 / R \implies U_t = \sqrt{P_{ni} \cdot R} = 38,1 \text{ Volts.}$$

$$I_t = U_t / R = 4,2 \text{ Amps.}$$

Tensión e intensidad en el permanente:

$$U_p = \sqrt{P_p \cdot R} = 53 \cdot 8,8 = 22 \text{ Volts}$$

$$I_p = U_p / R = 2,5 \text{ Amps.}$$

Verificación del ϕ elegido para el alambre:

Utilizando fórmula dada por el catálogo:

$$\phi = \frac{1}{2,91} \sqrt[3]{(P/E)^2 \cdot \rho/p} ; \text{ en la que:}$$

ϕ = diámetro del alambre en mm.

P = potencia sobre el elemento, (se toma P_{ni})

ρ = resistencia específica en $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$.

E = tensión aplicada

p = carga superficial en Watts/cm^2 .

$$\phi = \frac{1}{2,91} \sqrt[3]{(165/38,1)^2 \cdot 1,39/0,6} = 1,20 \text{ mm} , \text{ con lo}$$

que queda verificado el diámetro de la resistencia.-

APENDICE N° 2

Cálculo de las dimensiones de la probeta de ensayo:

En la Fig. se ven las dimensiones de la probeta original Norma ISO; el propósito es lograr una probeta de ensayo geoméricamente semejante a esta, con una longitud total de 130 mm.

En adelante se indicará:

Dimensiones de la probeta original: Sin superíndice

Dimensiones de la prob. semejante: Con superíndice(')

Probeta original:

$$\begin{aligned} \text{Relac. de semejanza } K_1 &= \frac{l_0}{\sqrt{S_0}} \equiv \frac{l_0}{\sqrt{b_0 \cdot e_0}} = \frac{50}{12,5} \frac{1}{e_0} \equiv \\ &= 14,16 \frac{1}{e_0} \end{aligned}$$

Probeta semejante:

a) Zona de deformaciones

$$\text{Se adopta } \frac{b_0'}{b_0} \equiv 1,5$$

Debiendo ambas probetas ser semejantes se cumplirá:

$$E_1 = \frac{l_0}{\sqrt{S_0}} = \frac{l_0'}{\sqrt{S_0'}} \quad ; \quad \text{de donde la relac. de semejanza longitudinal resulta:}$$

$$E_2 = \frac{l_0}{l_0'} = \frac{\sqrt{S_0}}{\sqrt{S_0'}} = \frac{\sqrt{b_0 \cdot e_0}}{\sqrt{b_0' \cdot e_0'}} = \sqrt{\frac{b_0}{b_0'}} = \sqrt{1,5} = 1,225$$

$$\frac{l_0}{l_0'} = 1,225 \quad \Rightarrow \quad l_0' = \frac{l_0}{1,225} \equiv 40,816$$

$$\frac{b_0}{b_0'} = 1,5 \quad \Rightarrow \quad b_0' = \frac{b_0}{1,5} = 8,333$$

Para calcular l'_0 , se utiliza nuevamente la relación de semejanza longitudinal:

$$\frac{l_c}{l'_0} = 1,225 \qquad l'_0 = \frac{l_c \cdot 6}{1,225} = 47,347$$

De este modo queda dimensionada la zona teórica de deformaciones cuya verificación se hace a continuación:

$$E'_1 = \frac{l'_0}{\sqrt{S'_0}} \cdot \frac{1'_0}{\sqrt{b'_0 e_0}} = \frac{40,8}{\sqrt{8,3 \cdot \sqrt{e_0}}} = \frac{40,8}{2,88} \cdot \frac{1}{\sqrt{e_0}} =$$
$$= 14,16 \cdot \frac{1}{\sqrt{e_0}}$$

Idéntico al valor calculado para la probeta original.

La Fig. 6 muestra la probeta semejante con sus correspondientes cotas.