



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
" ARAGÓN "

97

Correlación entre las Propiedades Mecánicas que se obtienen de una Prueba de Tensión y los resultados de una Prueba de Dureza.

Sist. 29245

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Ingeniero Mecánico Electricista
P R E S E N T A
Matías Osorio García

San Juan de Aragón, Edo. de Méx.

1985



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico este trabajo con mucho cariño a mis padres, que se esforzaron a lo --- máximo para que lograra la terminación de mi carrera.

A la ayuda que me proporcionaron mis hermanos y sus respectivas - familias:

- Serafín
- Carmela
- Pedro
- Sixto
- Paulina E.P.D.
- Leodegaria E.P.D.

A mis profesores
Compañeros
Familiares
y amigos.

130
Mi sincero agradecimiento y respeto
para el :

Ing. Daniel Aldama Avalos

Quien dirigió este trabajo.

Agradezco la valiosa colaboración --
que tuvieron para con este trabajo --
a:

Ing. José Luis Sánchez
Ing. Fernando Monrroy Miranda
Don Miguel Barragan Martínez
" José Luis Barragan
" Juan Portillo Avila

Agradezco también:

A la Universidad Nacional Autónoma
de México.

A quien debo mi formación profesio-
nal.

Y a todas las personas que de una --
u otra forma contribuyeron en la ---
realización de este trabajo.

INTRODUCCION

El presente trabajo se efectuó con la finalidad de ahorrar divisas al país, ya que con una prueba de dureza y el coeficiente de endurecimiento por deformación del metal, se pueden encontrar propiedades que se obtienen de una prueba de tensión como lo es el esfuerzo de cedencia muy usado por los ingenieros civiles y los de diseño mecánico, y, el esfuerzo último ó a carga máxima usado por los técnicos en deformación plástica.

Este método ahorraría mucho tiempo en el proceso de fabricación de las probetas y el empleado en los cálculos de los esfuerzos. También sería aplicado en donde la producción es continua y no se requieren valores exactos de los esfuerzos.

Efectuando una entrevista a dos de los proveedores más importantes en el área metropolitana de la ciudad de México, se encontró que por cada diez máquinas de dureza se venden tres de tensión. Esto quiere decir que la mayoría de muestras industrias cuentan con un probador de dureza y pocas con una máquina de tensión.

Precisamente el análisis anterior justifica el inicio de este trabajo.

Nuestra investigación consistió en cuatro etapas, las cuales se señalan en los capítulos de esta publicación.

En el capítulo I se hablará de los fundamentos teóricos usados en la prueba de tensión, durezas y las principales correlaciones existentes.

El capítulo II describe la fase experimental del trabajo ó sea el -- proceso de fabricación de las probetas, sus respectivas pruebas, los problemas y soluciones presentados así como el respectivo equipo --- usado.

El III nos muestra el procesamiento realizado a los resultados, analizándolos con algún punto de referencia.

En el capítulo IV se expresan las conclusiones, basadas en las experiencias obtenidas en este estudio y las recomendaciones necesarias para la persona que desee continuar este trabajo pero con diferentes materiales.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEORICOS

I.1.- Prueba de tensión.

I.1.1.-Principales conceptos usados en la prueba de tensión.

I.1.2.-Fórmulas empleadas en la prueba de tensión.

I.1.3.-Dimensiones de la probeta de tensión plana

I.2. Pruebas de durezas.

I.3.- Cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación.

I.4.- Análisis de la correlación tensión-dureza, realizada por los investigadores especialistas en este ramo.

I.5.- Recocidos.

I.6.- Fases del sistema hierro-carbono.

En este capítulo se hablará de las pruebas mecánicas más importantes por su utilización; como lo son las de tensión y las de dureza, haciendo énfasis en los principales conceptos utilizados.

Fué bastante difícil conseguir información sobre la correlación entre la prueba de tensión y las de dureza, las encontradas en los abstracts* fué muy poca y de éstas se mencionarán las más importantes en las investigaciones que se realizaron.

I.1.- Prueba de tensión.

El ensayo ó prueba de tensión, es el más importante para el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales metálicos.

Esta se realiza colocando a la probeta en las mordazas de una máquina de tensión, para someterla a un estiramiento mediante la aplicación de una carga axial, la fuerza se indica en un reloj calibrado. Conociendo el área transversal de la muestra puede calcularse el esfuerzo a cualquier carga. La deformación ó alargamiento se mide en una longitud establecida (zona calibrada ó reducida) auxiliándonos de un extensómetro.

I.1.1.- Principales conceptos usados en la prueba de tensión.

Se hablará de los principales conceptos de la prueba de tensión, pero a la vez se dará mayor importancia a las que finalmente con éste trabajo relacionan con la prueba de dureza.

Límite de proporcionalidad.- En la primera fase del diagrama se obtiene una línea recta como se muestra en la fig.(I.1). En la cual el esfuerzo y la deformación son proporcionales entre sí. La tensión correspondiente al punto (P), a partir de la cual ya no presenta ésta proporcionalidad se le conoce como límite de proporcionalidad.

Punto de fluencia.- Es la tensión superior al límite elástico, a partir de la cual el alargamiento crece sin que haya un aumento de la carga. El punto (Y) de la fig.(I.1) corresponde a este concepto. Este fenómeno no se presenta en todos los materiales, sino solamente en algunos dúctiles. En realidad la tensión puede dar lugar a un punto de fluencia superior y a otro inferior.

Límite de fluencia.- Es la tensión para la cual las deformaciones permanentes son superiores a una cierta medida de la probeta. Este método se determina normalmente trazando una línea paralela de la pendiente de proporcionalidad en donde (XW) de la fig.(I.1) corresponde al límite de fluencia. El valor que generalmente se fija a la deformación permanente es el 0.2%, en materiales frágiles y en los dúctiles es más definido este límite. También al límite de fluencia se le conoce como esfuerzo de cedencia según Dieter(3).

* Abstracts.- Es un resumen de diversos artículos ó publicaciones aglomerado junto con otro de su misma especie, en una revista que nos presenta simulando un directorio de temas.

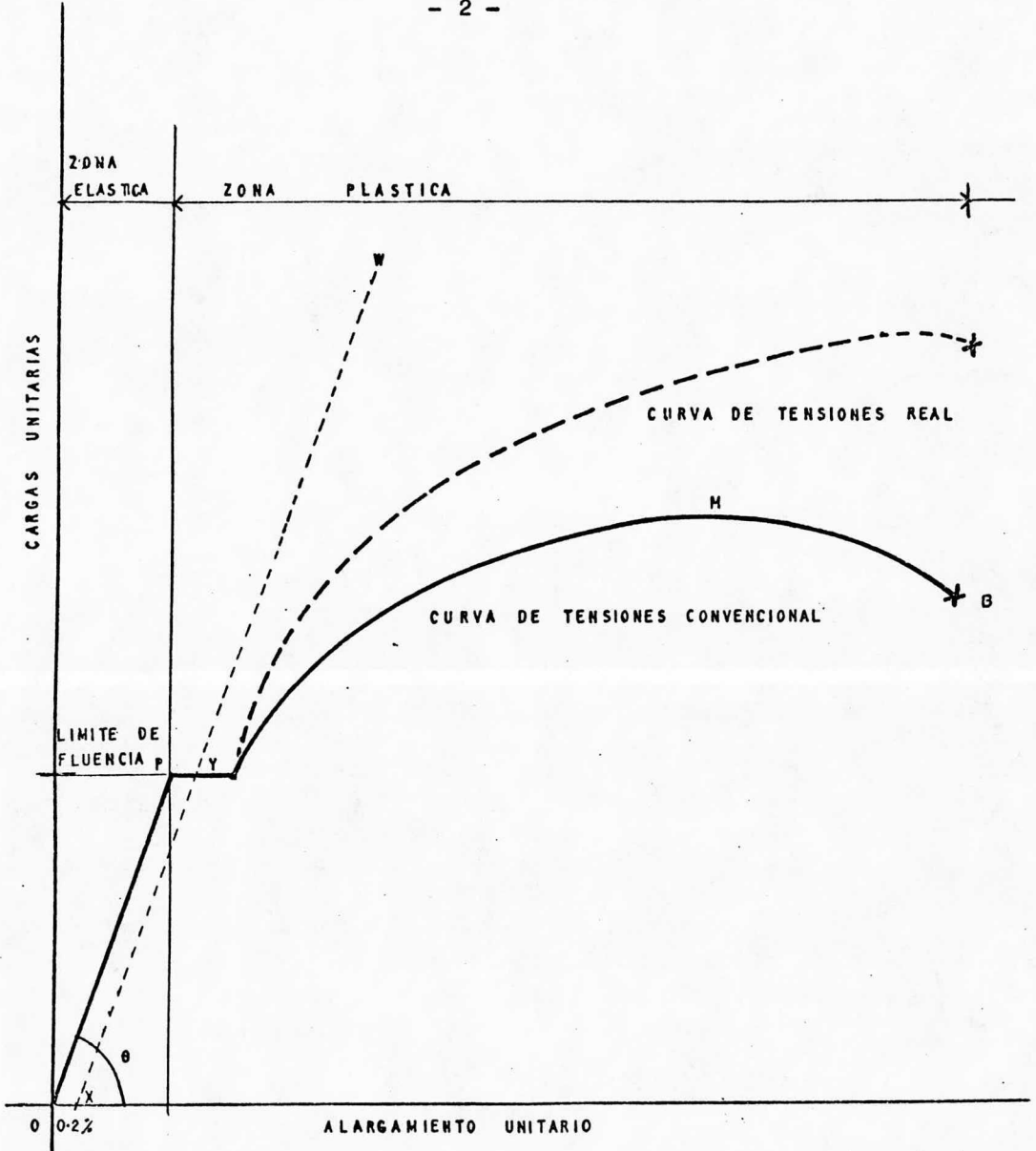


FIG 1-1 DIAGRAMA DE CARGAS ALARGAMIENTOS UNITARIOS DONDE SE SEÑALAN LOS PRINCIPALES PUNTOS DE LA CURVA.

Esfuerzo último ó a carga máxima.- Es el cociente obtenido al dividir la carga máxima entre el área de la sección transversal original de la probeta.

Esfuerzo de rotura.- Se obtiene ingenierilmente hablando dividiendo la carga que en dicho momento actúa sobre el material por el área de la sección recta original, y tiene siempre un valor inferior al de la carga máxima. En los materiales frágiles los valores de carga máxima y de rotura coinciden.

I.1.2.- Fórmulas empleadas en la prueba de tensión.

En esta etapa se proporcionarán las principales ecuaciones empleadas en tensión, las cuales servirán finalmente para determinar el coeficiente de endurecimiento por deformación.

Alargamiento $A_l = L_f - L_o \dots\dots\dots (1)$

Donde: $L_o =$ Longitud inicial en mm.
 $L_f =$ " final " "

Deformación ingenieril ó convencional

$$e = \frac{L_f - L_o}{L_o} \dots\dots\dots (2)$$

Esfuerzo ingenieril ó convencional

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \dots\dots\dots (3)$$

Donde: $A_o =$ Area de la sección transversal original en mm^2
 $P =$ Es la carga aplicada en Kgf.

Estricción

$$q = \frac{A_o - A_f}{A_o} \dots\dots\dots (4)$$

Donde: $A_f =$ Area de la sección transversal final en mm^2

Deformación real $\epsilon = \ln \frac{L_f}{L_o} = \ln \frac{A_o}{A_f} \dots\dots\dots (5)$

Considerando el volumen constante en la región plástica y tomando en cuenta la ecuación 2, la deformación real también se puede expresar de la siguiente manera:

$$\epsilon = \ln (1 + e) \dots\dots\dots (6)$$

La ecuación 6, es aplicable únicamente para el principio de estricción.

Deformación uniforme $\xi_u = \ln \frac{A_0}{A_u}$ (7)

Es la deformación real basada solamente hasta la carga máxima -----

Donde: A_u = Es el área de la sección transversal a carga máxima.

Deformación real de estricción localizada

$$\xi_n = \ln \frac{A_u}{A_f} \text{ (8)}$$

Es la deformación requerida para deformar la probeta desde la carga máxima hasta la rotura.

Donde: A_f = Es el área transversal después de la rotura.

Deformación de rotura $\xi_f = \ln \frac{A_0}{A_f}$ (9)

Esfuerzo real $\sigma_R = \frac{P}{A_i}$ (10)

Donde: A_i = Es _{mm}² el área de la sección transversal instantánea en

Considerando el volumen constante en la región plástica y tomando en cuenta la ecuación 2, el esfuerzo real se puede expresar como:

$$\sigma_R = \sigma (1 + e) \text{ (11)}$$

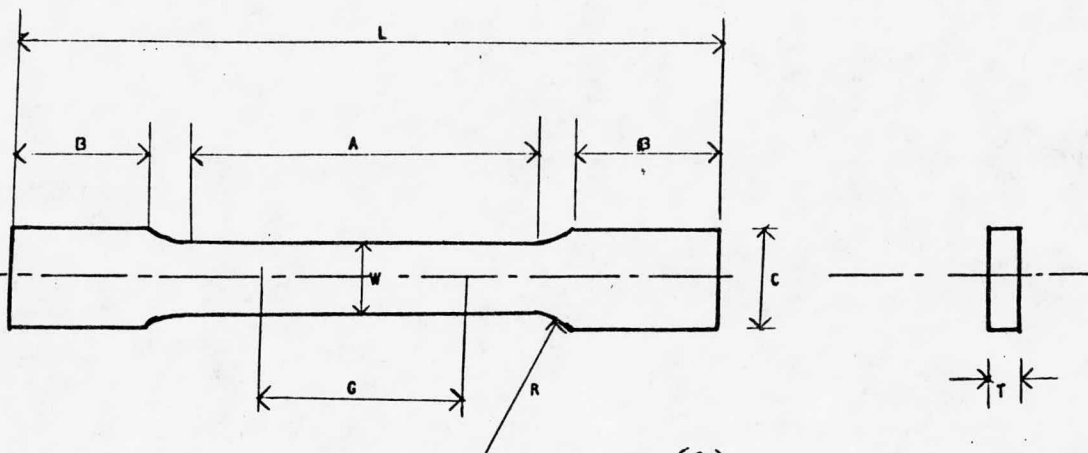
I.1.3.- Dimensiones de la probeta de tensión plana.

Existen normas nacionales editadas por la Dirección General de Normas ó en su caso las internacionales como las de la ASTM, en las cuales se especifican las marcas y tolerancias para fabricar una probeta de tensión. En ellas también se mencionan los tipos de materiales en que es aplicable la norma.

Para nuestro caso solamente proporcionaremos las marcas y tolerancias según la norma mexicana para fabricar una probeta de tensión plana, que es la que usamos en nuestra investigación con una zona calibrada de 50 ± 0.10 , ó de la ASTM de 2 pulgadas, tal como se ilustra en la tabla(I.1).

I.2.- Pruebas de durezas.

En las principales relaciones de tensión-dureza, se usan más la Vickers, Meyers y Brinell según la literatura; pero en el trabajo experimental se usó una máquina Rockwell, por esto le daremos mayor importancia y hablaremos en forma breve de las que sí correlacionan.



(9)
 TABLA I-1 PROBETA DE TENSION DE SECCION RECTANGULAR
 DIMENSIONES EN mm

	PROBETA NORMAL		PROBETA PEQUEÑA
	TIPO PLANCHA 40 DE ANCHO	TIPO LAMINA 13 DE ANCHO	
G LONGITUD CALIBRADA	200 ± 0.25	50 ± 0.10	25 ± 0.05
W ANCHO	40 ± 0.36	13 ± 0.25	6 ± 0.05
T ESPESOR	ESPESOR DEL MATERIAL		
R RADIO DE LA ZONA DE TRANSICION	13.0	13.0	6.0
L LONGITUD TOTAL MINIMA	460	200	100
A LONGITUD DE LA SECCION REDUCIDA	225	60	32
B LONGITUD DE LA ZONA DE SUJECION	75	50	32
C ANCHO DE LA ZONA DE SUJECION	50	20	10

FUENTE: DGM

a).- Prueba de dureza Rockwell(6).

Es una prueba de dureza por penetración en la cual se usa una máquina calibrada para presionar un penetrador de diamante esférico ó uno esférico de acero duro en la superficie del material, consistiendo en dos operaciones de la carga menor y la mayor, midiendo la diferencia en profundidad.

Número de dureza Rockwell.- Es un número derivado del incremento neto en la profundidad de la huella, debida a la aplicación de una carga sobre un penetrador, dicha carga se incrementa a partir de la precarga hasta una carga mayor, posteriormente se regresa quitando la carga menor.

Penetradores.- Existen los esféricos con diámetros de: 1.588mm; 3.175 mm; 6.350mm; 12.70mm. Y los esféricos, tienen un cono que forma un ángulo de 120 grados con un vértice esférico de 0.200mm de radio. Los penetradores se describen de una manera más amplia en las fig. (I.2 y I.3).

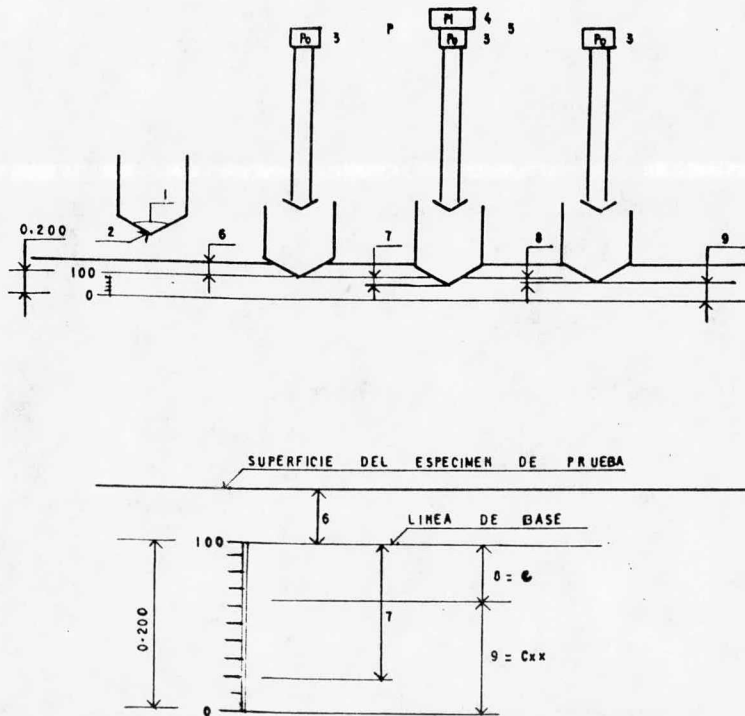


FIG I-2 PRUEBA DE DUREZA ROCKWELL CON PENETRADOR DE DIAMANTE

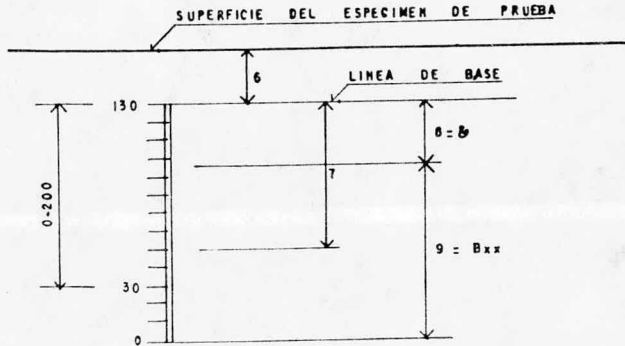
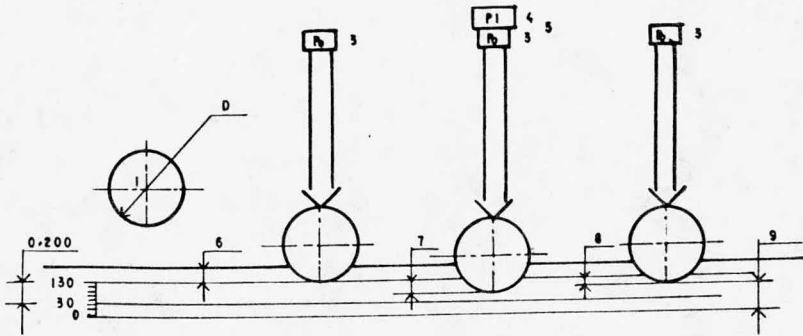


FIG I-3 PRUEBA DE DUREZA ROCKWELL CON PENETRADOR DE BALIK

Tabla I.2.- Símbolos y designaciones de la fig.(I.2).

No.	Símbolo	Designación.
1	-----	Angulo en el vértice del penetrador de diamante (120 grados).
2	-----	Radio de curvatura en el vértice del cono (0.200 mm).
3	Po	Carga menor = 10 Kgf
4	P ₁	Carga adicional = 90 ó 140 Kgf
5	P ¹	Carga mayor = Po + P ₁ = 100 ó 150 Kgf
6	-----	Profundidad de la huella bajo la carga menor antes de la aplicación de la carga adicional.
7	-----	Aumento en la profundidad de la huella bajo la carga adicional.
8	&	Aumento permanente en la profundidad de la huella bajo la carga menor después de cesar

Tabla I.2.- Continuación.

No.	Símbolo	Designación.
		la carga adicional, este aumento se expresa en unidades de 0.002 mm.
9	DRA XX	Dureza Rockwell A = 100 - &
10	DRC XX	Dureza Rockwell C = 100 - &

Tabla I.3.- Símbolos y designaciones de la fig.(I.3).

No.	Símbolo	Designación.
1	D	Diámetro del penetrador esférico = 1.588mm.
3	P ₀	Carga menor = 10 Kgf
4	P ₁	Carga adicional = 90 Kgf
5	P ¹	Carga mayor = P ₀ + P ₁ = 10+50, 90 ó 140 = 60, 100 ó 150 Kgf
6	-----	Profundidad de la huella bajo la carga menor, antes de la aplicación de la carga adicional.
7	-----	Aumento en la profundidad de la huella bajo la carga adicional.
8	&	Aumento permanente en la profundidad de la huella, bajo la carga menor, después de cesar la carga adicional, este aumento se expresa en unidades de 0.002 mm.
9	DRF XX	Dureza Rockwell F = 130 - &
10	DRB XX	Dureza Rockwell B = 130 - &
11	DRG nX	Dureza Rockwell G = 130 - &

Escalas de durezas Rockwell.- Estas se proporcionan con la finalidad de que sirva como una guía para seleccionar la escala, penetrador y carga para efectuar una prueba, dependiendo de las características del material.

Tabla I.4.- Escalas de durezas Rockwell.

Símbolo de Escala	Penetrador	Carga en Kgf	Color de los números * carátula	Aplicaciones típicas de las escalas.
B	Esférico de 1.588 mm	100	Rojo	Aleaciones de cobre, aceros -- suaves, aleaciones de aluminio, hierro maleable, etc.
C	Diamante	150	Negro	Aceros, hierros colados duros, hierro maleable perlítico, titanio.

Tabla I.4.- Continuación.

Símbolo de Escala	Penetrador	Carga mayor en Kgf * x	Color de los números de la carátula.	Aplicaciones típicas de las escalas.
A	Diamante	60	Negro	Carburos cementados, acero de superficie endurecida no profunda.
D	Diamante	100	Negro	Acero delgado y acero de superficie endurecida media, hierro perlítico maleable.
E	Esférico de 3.175 mm	100	Rojo	Fundiciones, aleaciones de aluminio y magnesio, metales para chumaceras.
F	Esférico de 1.588 mm	60	Rojo	Aleaciones de cobre recocidas, metales delgados y suaves.
G	Esférico de 1.588 mm	150	Rojo	Hierro maleable, aleaciones de cobre-niquel y de cobre-niquel-zinc. Límite superior G92 para evitar posible aplastamiento - del penetrador esférico.
H	Esférico de 3.175 mm	60	Rojo	Aluminio, zinc, plomo.
K	Esférico de 3.175 mm.	150	Rojo	Metales para chumaceras, otros materiales muy suaves ó delgados. Usese el penetrador más - pequeño y la carga más grande que no deje huella en la superficie opuesta de la prueba.
L	Esférico de 6.350 mm.	60	Rojo	
M	Esférico de 6.350 mm.	100	Rojo	
P	Esférico de 6.350 mm.	150	Rojo	
R	Esférico de 12.70 mm.	60	Rojo	
S	Esférico de 12.70 mm.	100	Rojo	
V	Esférico de 12.70 mm.	150	Rojo	

* En la carga mayor se encuentra ya incluida la precarga de 10 Kgf.

Cuidados que hay que tener presente:

- El penetrador y el soporte no deben entrar en contacto sin un espécimen de prueba en medio de los dos.
- La separación de las huellas deben localizarse a 2.5 diámetros de su centro.
- Debe verificarse que la máquina a usar esté calibrada.

b).- Prueba de dureza Vickers(7).

Es una prueba de dureza por penetración, en la cual se usa una máquina calibrada para presionar un penetrador de diamante de base cuadrada que tiene especificados los ángulos entre sus caras, bajo una carga predeterminada, sobre la superficie del material; se miden las diagonales de la huella resultante después de retirar la carga.

Número de dureza Vickers.- Es un número que se refiere a la carga aplicada y al área de la huella permanente efectuado por un penetrador de diamante piramidal de base cuadrada, que tiene ángulos incluidos entre caras de 136° , y se calcula de la siguiente manera:

$$DV = \frac{2P \operatorname{Sen} \alpha/2}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2} \dots\dots\dots(12)$$

Donde: P = Es la carga aplicada en Kgf.
d = Longitud promedio de las diagonales en mm.
 α = Angulo entre caras opuestas = 136° .

c).- Prueba de dureza Meyer(3).

En 1908, el técnico alemán E. Zeit Meyer definió dureza como la carga unitaria referida a la superficie del círculo que limita la huella permanente, lo cual se expresa en la ecuación:

$$DM = \frac{4P}{\pi d^2} \dots\dots\dots(13)$$

Donde: d = Diámetro de la huella permanente que deja la bola-penetrador sobre la superficie en ensaye, y que se mide con un microscopio provisto de un retículo graduado.

d).- Prueba de dureza Brinell(8).

Es una prueba de dureza por penetración, en la cual bajo condiciones específicas y mediante una máquina calibrada, se presiona un balín endurecido sobre la superficie del material, midiéndose después el diámetro de la huella resultante, al suprimir la acción de la carga. Y se calcula de la siguiente manera:

$$DB = \frac{P}{\pi D/2 (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots\dots\dots(14)$$

Donde: P = Es la carga aplicada en Kgf.
D = Diámetro del balón en mm.
d = Es el diámetro de la huella en mm.

I.3.- Cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación(10). Como en los artículos manejados por los investigadores para correlacionar la prueba de tensión con los de dureza, se menciona constantemente el coeficiente de endurecimiento por deformación; con esta justificación se procederá a describir su obtención.

Empíricamente es deseable expresar la curva real de tensiones-deformaciones por medio de una relación matemática, como se indica a continuación:

$$\sigma_R = K \xi^n \dots\dots\dots (15)$$

Donde: σ_R = Es el esfuerzo real
 ξ = Deformación real
n = Coeficiente de endurecimiento por deformación.
K = Coeficiente de resistencia del material.

La ecuación 15, solamente es válida en la zona de deformación plástica.

Dieter(3) menciona que el coeficiente de endurecimiento por deformación, es la pendiente obtenida de la gráfica:

$$\text{LOG } \sigma_R - V_s - \text{LOG } \xi \dots\dots\dots (16)$$

También n puede obtenerse de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \dots\dots\dots (17)$$

Donde: y = LOG σ_R
x = LOG ξ
N = Número de datos.

I.4.- Análisis de la correlación tensión-dureza, realizada por los investigadores especialistas en este ramo.

Ya se indicó que para encontrar información a este respecto fué necesario realizar una investigación minuciosa con resultados muy pobres, esto se debe tal vez al escaso interés que las naciones desarrolladas han mostrado para financiar proyectos que tiendan a desplazar a la máquina universal y resalten los de dureza, lo cual es lógico, ya que estos países son los fabricantes y vendedores de las máquinas de tensión repercutiendo mayores ganancias con respecto a los equipos de dureza.

Tabor(11) menciona que el esfuerzo último ó a carga máxima puede ser expresado como:

$$\sigma_u = \frac{Hv}{2.9} [1 - (m-2)] \left[\frac{12.5(m-2)}{1 - (m-2)} \right]^{(m-2)} \dots\dots\dots(18)$$

Donde: σ_u = Es el esfuerzo último ó a carga máxima en Kgf/mm²
 Hv = Número de dureza Vickers en Kgf/mm²
 m = Coeficiente de Meyer
 n = $m-2$

Marcinkowki(11) sugiere que el esfuerzo de cedencia se encuentra — mediante la siguiente relación:

$$\sigma_y = \frac{Hv}{5} \dots\dots\dots(19)$$

Donde: σ_y = Es el esfuerzo de cedencia.

Speich y Warlimont(11) proponen para el esfuerzo de cedencia la siguiente ecuación:

$$\sigma_y = \frac{Hv}{4} \dots\dots\dots(20)$$

Las ecuaciones 19 y 20 solamente se sugieren como posibilidades para encontrar el esfuerzo de cedencia, ya que no se cuentan con bases — bien fundamentadas.

Cahoon(11) aportó la siguiente ecuación, para encontrar el esfuerzo de cedencia en 0.2% de deformación de la siguiente manera:

$$\sigma_y = \frac{Hv}{3} \left[\frac{\epsilon_y}{0.08} \right]^{(m-2)} \dots\dots\dots(21)$$

Donde: ϵ_y = Es la deformación real en el punto de cedencia.

La ecuación 21 también puede expresarse como:

$$\sigma_y = \frac{Hv}{3} [B]^{(m-2)} \dots\dots\dots(22)$$

Según Cahoon(11) para especímenes de aluminio y acero $B = 0.1$, por tanto la fórmula 22 quedará de la siguiente manera:

$$\sigma_y = \frac{Hv}{3} [0.1]^{(m-2)} \dots\dots\dots(23)$$

Cahoon para encontrar el esfuerzo último ó a carga máxima, usa la — ecuación 18 de tabor, solamente cambiando el valor de la constante de $C = 2.9$ a $C = 3.0$, y para obtener el coeficiente de endurecimiento por deformación lo hace mediante los métodos siguientes:

1).- $n = m - 2$

Donde el coeficiente de Meyer m es encontrado por medio de la pendiente de la gráfica:

$$\text{LOG } P - V_s - \text{LOG } d \dots\dots\dots (24)$$

Donde: P = Es la carga aplicada en Kgf.
d = Diámetro de la impresión en mm.

2).- Por medio de la pendiente de la gráfica de la ecuación 16.

Tabor(12) propuso la aproximación:

$$\sigma_R = \frac{K \xi^n}{(1+\xi)} \dots\dots\dots (25)$$

Por diferenciación de la fórmula 25, obtuvo la deformación real en el esfuerzo último como se expresa a continuación:

$$\xi u = \frac{n}{1-n} \dots\dots\dots (26)$$

Hollomon y Low(5) han demostrado que el coeficiente de endurecimiento por deformación n es numéricamente igual al valor de la deformación en el punto inicial de estricción ó sea el correspondiente a -- carga máxima.

Si P_{máx} = Carga máxima
 $\sigma_{máx}$ = Esfuerzo a carga máxima
 Amáx = Sección deformada sobre la que actúa.

$$\sigma_{máx} = \frac{P_{máx}}{A_{máx}} \dots\dots\dots (27)$$

$$P_{máx} = \sigma_{máx} A_{máx} \dots\dots\dots (28)$$

Pero en el punto de carga máxima la derivada es:

$$d P_{máx} = 0 \dots\dots\dots (29)$$

Efectuando la derivada anterior

$$d P_{máx} = \sigma_{máx} d A_{máx} + A_{máx} d \sigma_{máx} = 0 \dots\dots\dots (30)$$

$$\text{Por tanto } \frac{d \sigma_{máx}}{\sigma_{máx}} = - \frac{d A_{máx}}{A_{máx}} \dots\dots\dots (31)$$

Pero como

$$\frac{d \sigma_R}{d \xi} = n \frac{\sigma_R}{\xi} \dots\dots\dots (32)$$

Rearreglando la ecuación 32, quedará de la siguiente forma:

$$\frac{d \sigma_R}{\sigma_R} = n \frac{d \xi}{\xi} \dots\dots\dots (33)$$

$$\text{Por definición } d \xi = \frac{dl}{l} \dots\dots\dots (34)$$

y considerando el volumen constante , Al = Constante

$$d Al = 0 \dots\dots\dots (35)$$

$$A dl + l dA = 0 \dots\dots\dots (36)$$

$$\text{Por tanto} \quad \frac{dl}{l} = - \frac{dA}{A} \dots\dots\dots (37)$$

Efectuando una analogía de las ecuaciones 31 y 37

$$\frac{d \Psi_{\text{máx}}}{\Psi_{\text{máx}}} = \frac{dl}{l} \quad \text{y} \quad - \frac{d A_{\text{máx}}}{A_{\text{máx}}} = - \frac{d A}{A} \dots\dots\dots (38)$$

Aplicando 38 en 33

$$\frac{d \Psi_{\text{máx}}}{\Psi_{\text{máx}}} = n \frac{d \xi_{\text{máx}}}{\xi_{\text{máx}}} \dots\dots\dots (39)$$

$$\frac{dl}{l} = n \frac{d \xi_{\text{máx}}}{\xi_{\text{máx}}} \dots\dots\dots (40)$$

Considerando 34 en 40

$$\frac{dl}{l} = n \frac{dl/l}{\xi_{\text{máx}}} \dots\dots\dots (41)$$

$$\text{Por tanto} \quad \xi_{\text{máx}} = n \dots\dots\dots (42)$$

Cahoon(12) propone que el esfuerzo último ó a carga máxima es dado por:

$$\Psi_u = k \left(\frac{n}{\text{exp.}} \right)^n \dots\dots\dots (43)$$

De la ecuación 43 en función de la dureza, quedará de la siguiente manera:

$$\Psi_u = \frac{H_v}{2.9} \left(\frac{n}{0.217} \right)^n \dots\dots\dots (44)$$

Donde la constante C tomará valores de 2.9 a 3.0 .

Notas:

- 1).- Para el caso de la fórmula 23, los resultados presentan una variación mínima con respecto a los obtenidos en la prueba de tensión.
- 2).- Tabor(11) notó que los resultados obtenidos de su ecuación 18 concuerdan bien con los de la prueba de tensión, para valores más bajos del coeficiente de endurecimiento por deformación, pero desviado considerablemente cuando n es grande.

Moteff y Sieber(13), para encontrar el esfuerzo último ó a carga máxima, usaron la ecuación 44 de Cahoon(12), solamente variando el valor de la constante de $C = 3.1 \pm 0.2$. Y para obtener el esfuerzo de cedencia, usan la ecuación 23 de Cahoon(11).

Moteff, Bhargava y Mc Cullough(14) usan la ecuación 44 de Cahoon(12) para encontrar el esfuerzo último ó a carga máxima, solamente variando el valor de la constante de $C = 3.0$.

Estos señores efectúan la siguiente aportación, introduciendo un nuevo método para obtener el coeficiente de endurecimiento por deformación, mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{k}{\lambda} \dots\dots\dots (45)$$

Donde: $k = 0.2$ micras = constante.
 $\lambda = E_s$ es el tamaño del grano sustituto del metal deformado en micras.

Abson y Gurney(15) aplican las ecuaciones 23 y 44 de Cahoon para encontrar el esfuerzo de cedencia y el último ó a carga máxima. Y para obtener el coeficiente de endurecimiento por deformación usan el método de $n = m - 2$.

Donde: m se encuentra como la pendiente de la gráfica de la ecuación 24.

También aplican la ecuación empírica de Tabor(3), donde los puntos a lo largo de una curva esfuerzo-deformación pueden ser estimados por evaluaciones hechas en diferentes cargas con un penetrador esférico. Las ecuaciones son las siguientes:

$$\tau = \frac{DM}{2.8} = \frac{4P/\pi d^2}{2.8} \dots\dots\dots (46)$$

$$\epsilon = 0.2 \frac{d}{D} \dots\dots\dots (47)$$

Donde: $DM =$ Es el número de dureza Meyer
 $P =$ La carga aplicada
 $D =$ Diámetro del penetrador
 $d =$ Diámetro de la huella permanente que deja la bola penetrador sobre la superficie de ensaye.

George, Dinda y Kasper(16) aportan un nuevo método para obtener el esfuerzo de cedencia.

La relación entre la carga p y el diámetro de penetración d en la prueba de penetración de bola es:

$$P = a d^m \dots\dots\dots (48)$$

Donde: $P =$ La carga aplicada
 $d =$ Diámetro de penetración
 $a =$ Constante con un valor dependiente sobre el material usado.

La relación arbitraria del diámetro de la bola es:

$$\frac{P}{d^2} = A \left(\frac{d}{D} \right)^{m-2} \dots\dots\dots (49)$$

También $A = \frac{P}{d^2}$ en $\frac{d}{D} = 1 \dots\dots\dots (50)$

La constante " A " del material dá la resistencia de un metal para penetración inicial. Y puede ser obtenida, como la pendiente de la gráfica $\text{LOG } P/d^2 - \text{Vs} - \text{LOG } d/D \dots\dots\dots (51)$

teniendo como límite $d/D = 1$, como se ilustra en la fig.(I.4).

Siempre y cuando ya se haya obtenido la constante " A ", por el método de la fig.(I.4), ó usando una prueba de dureza Rockwell (R15T, R30T, R45T, Rf, Rb, Rg) y la fig.(I.5), se puede obtener el esfuerzo de cedencia mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_y = 325 A \dots\dots\dots (52)$$

ó en su caso, usar la fig.(I.6), que también satisface la ecuación 52. La otra forma de encontrar el esfuerzo de cedencia, es usar la fig.(I.7) y una prueba de dureza Rockwell (R15T, R30T, R45T, Rf, - Rb, Rg).

Cabe aclarar que el cálculo del diámetro d, puede partir del conocimiento de la profundidad de la impresión h y el diámetro D del penetrador, conforme la siguiente ecuación:

$$d = 2\sqrt{h(D - h)} \dots\dots\dots (53)$$

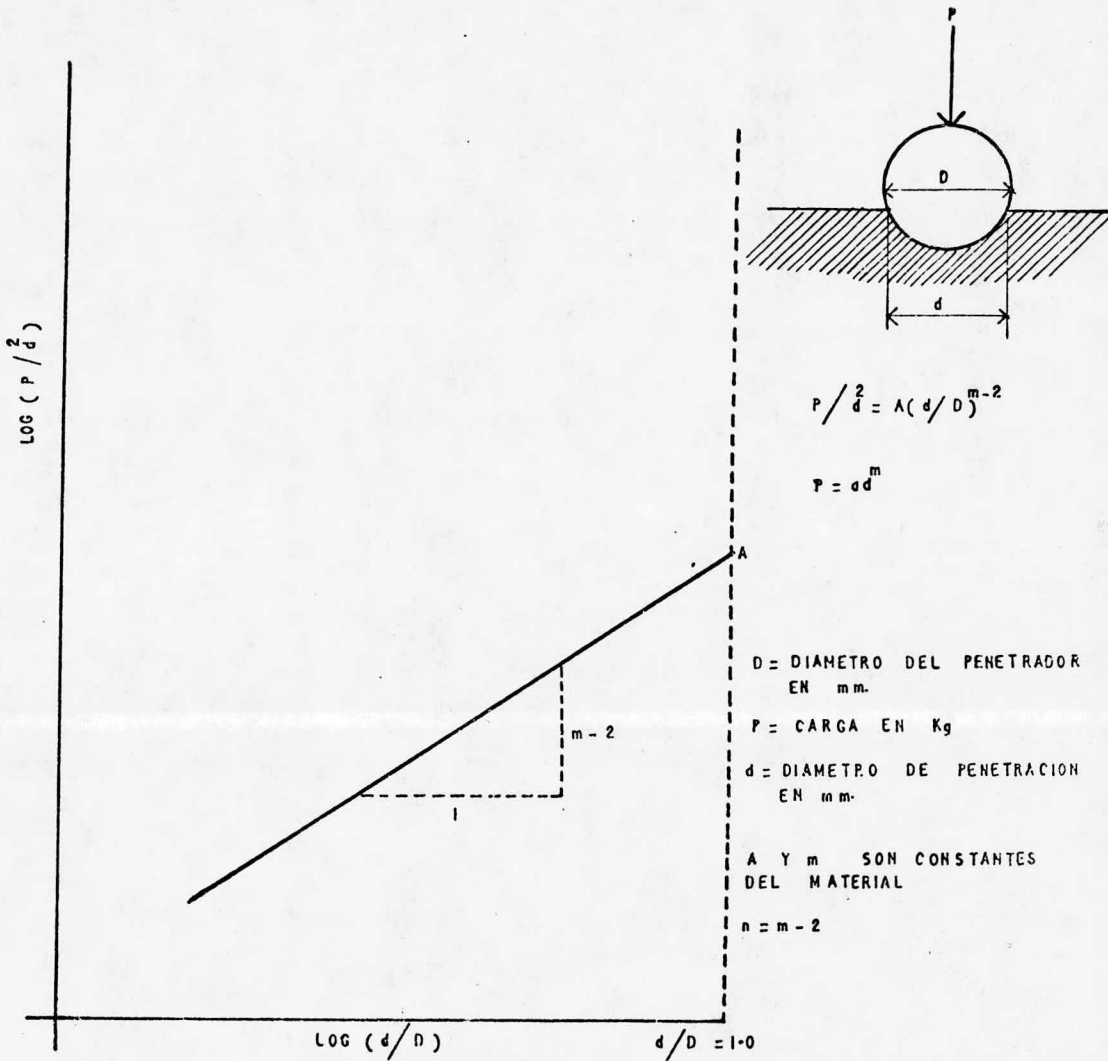


FIG 1.4 MEYER DESCUBRIO LA RELACION EN 1900. EL AUTOR RELACIONA DIRECTAMENTE LA CONSTANTE "A" CON EL ESFUERZO DE CEDENCIA AL 0.2% DE DEFORMACION.

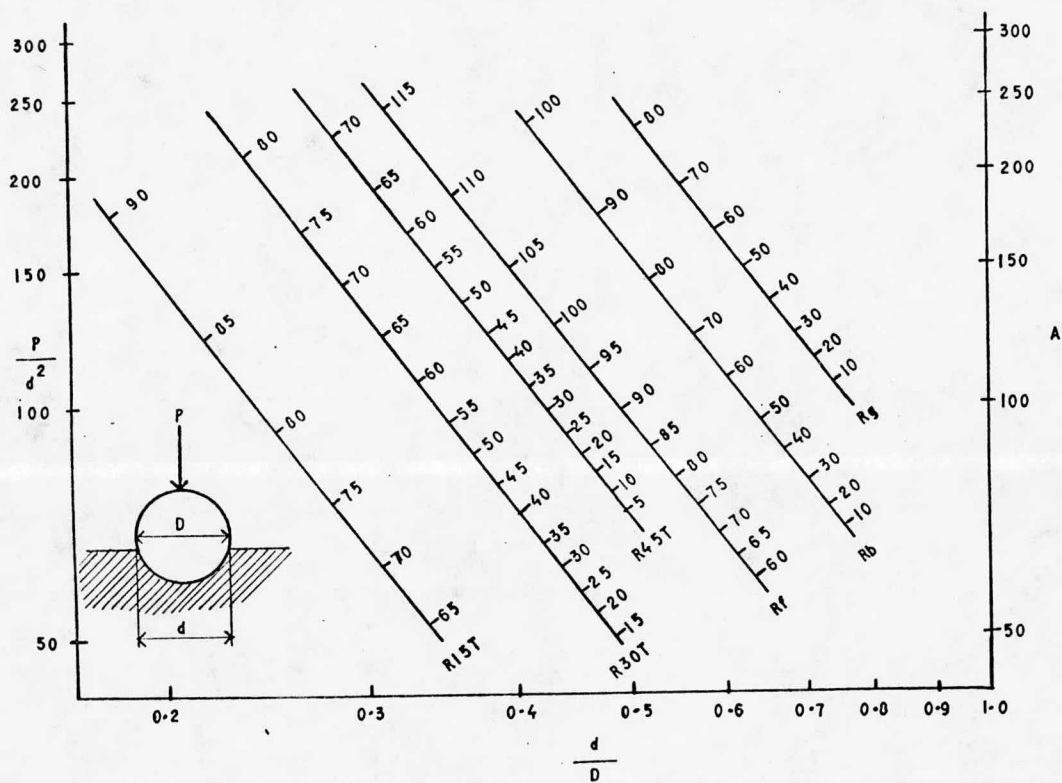


FIG 1-5 DE ESTOS PUNTOS DEL NOMOGRAMA ES SIMPLE REMOVER LOS EJES P/d^2 Y d/D DEL MATERIAL Y ARMANDO ARRIBA UN EJE DEL ESFUERZO DE CEDENCIA Y USANDO LA ECUACION DESARROLLADA POR LA CURVA DE LA FIG 1-6 .

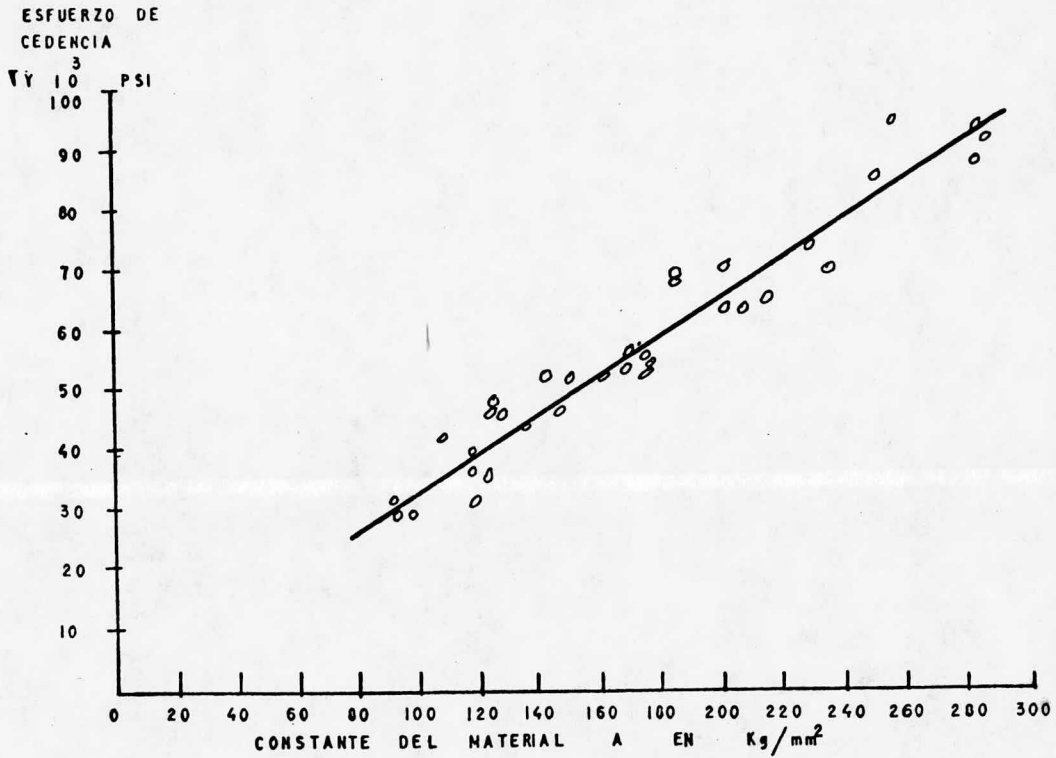


FIG 1.6 CON ESTA CURVA SE SATISFACE LA ECUACION $\sigma_Y = 325 A$

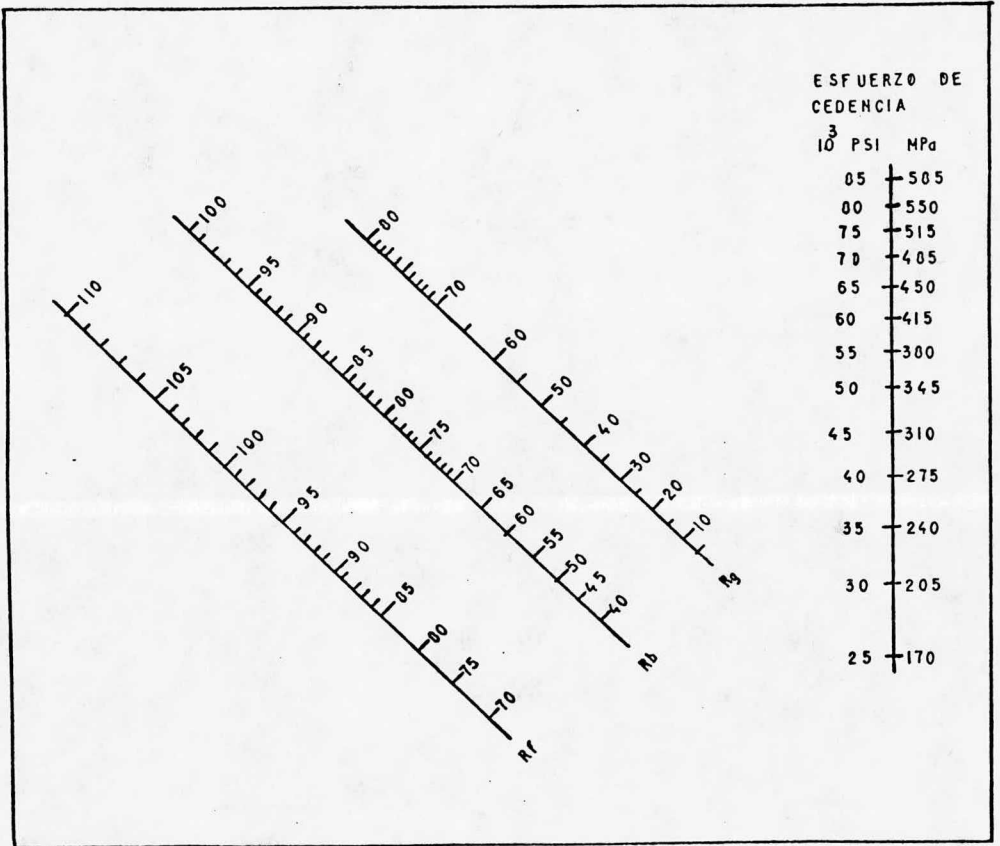


FIG 1-7 CON UNA PRUEBA DE DUREZA Y USANDO ESTE NOMOGRAMA SE PUEDE OBTENER EL ESFUERZO DE CEDENCIA PARA LAMINAS DE ACERO.

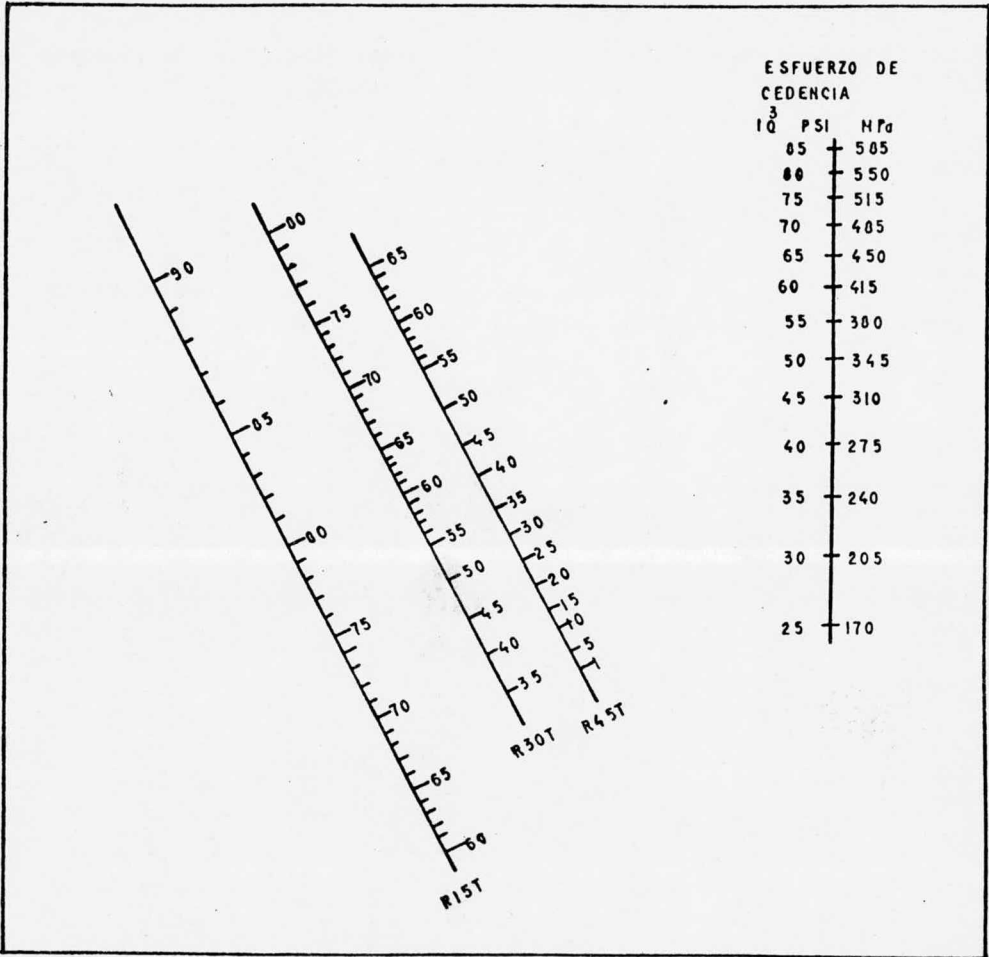


FIG 1-7 CONTINUACION

Kehl(4) sugiere la relación entre la dureza Brinell y el esfuerzo último σ a carga máxima, mediante la tabla I.5 y la siguiente fórmula:

$$T_u = DB \times C \dots\dots\dots (54)$$

Tabla I.5.- De constantes.

Cifra de dureza	Constante	Dirección de la superficie ensayada.
Menor de 175 Brinell	0.362	Transversal a la dirección de laminación.
	0.354	Paralela a la dirección de laminación.
Mayor de 175 Brinell	0.344	Transversal a la dirección de laminación.
	0.324	Paralela a la dirección de laminación.

Ejemplo para usar la tabla I.5.

Sí se trata de un acero cuya dureza Brinell es de 310 unidades en dirección transversal a la laminación, el esfuerzo será:

$$T_u = 310 \times 0.344 = 106 \text{ Kgf/mm}^2$$

Para algunos aceros aleados, tratados térmicamente en la forma adecuada para que presenten sus mejores propiedades físicas, son válidas las siguientes relaciones:

1).- Para aceros al níquel con distintos contenidos de carbono.

$$T_u = 0.499DB - 22.5 \dots\dots\dots (55)$$

2).- Para aceros con 3.5% aproximadamente de níquel y el 1% de cromo y diferentes contenidos de carbono es válida la expresión:

$$T_u = 0.499DB - 23.2 \dots\dots\dots (56)$$

3).- Cuando el contenido de níquel es 1.5% y el cromo 0.5%, la expresión será:

$$T_u = 0.478DB - 15.5 \dots\dots\dots (57)$$

4).- En los aceros al cromo-vanadio con distintos contenidos de carbono es:

$$T_u = 0.499DB - 17.7 \dots\dots\dots (58)$$

Ejemplo para usar las relaciones anteriores.

Cual será el esfuerzo último σ a carga máxima de un acero al níquel cuya dureza Brinell es de 300.

$$T_u = 0.499 \times 300 - 22.5 = 127 \text{ Kgf/mm}^2$$

I.5.- Recocidos(1).

Los recocidos tienen por objeto modificar el comportamiento plástico, analizándolo desde el punto de vista mecánico. También varían las condiciones estructurales del mismo, en el sentido de que el tamaño de grano y las tensiones internas van a ser modificadas. Al mismo tiempo la resistencia a la tensión y la dureza se reducen. El recocido se efectúa en tres etapas como sigue:

- 1).- Alivio de esfuerzos.- Este se presenta a temperaturas relativamente bajas, a las cuales los átomos pueden moverse en una posición de equilibrio en la estructura cristalina. Estos pequeños movimientos pueden reducir el esfuerzo mecánico interno sin producir alteración visible. Además, la dureza y la resistencia a la tensión permanecen en un valor elevado producido por el trabajado en frío.
- 2).- Recristalización.- Si se aumenta la temperatura del recocido, se llega a un punto en el que comienzan a formarse nuevos cristales de núcleos producidos. La temperatura de recristalización depende en gran parte del grado de trabajado en frío que haya sufrido previamente el material. Por tanto a menor trabajado en frío de los materiales se requiere de una mayor temperatura de recristalización y por el contrario a mayor trabajado de los metales se requiere de una temperatura menor.
- 3).- Crecimiento de grano.- Si la temperatura de recocido se encuentra arriba de la de recristalización del metal, los nuevos cristales formados continúan creciendo absorbiéndose entre sí, hasta que la estructura del grano sea grande. El crecimiento del grano depende de los siguientes factores:
 - a).- La temperatura de recocido al aumentar ésta, el tamaño del grano crece.
 - b).- Al grado de trabajado en frío. Cuando es menor produce granos grandes y pocos núcleos y si es mayor se obtienen granos finos y muchos núcleos.

Normalización.- Utiliza temperaturas más altas que el recocido total ó de ablandamiento, a fin de acelerar el movimiento de átomos de un material y producir una estructura homogénea.

Tamaño de grano(2).- La American Society for Testing and Materials (ASTM) ha establecido las mallas de referencia con varios números de tamaños de granos para compararse con las observaciones a través de un microscópio a 100x (Esto es, cuando la dimensión lineal es amplificada 100 veces).

El número de granos " \bar{N} " por pulgada cuadrada a 100x es:

$$\bar{N} = 2^{n'-1} \dots\dots\dots (59)$$

Donde: n' = Es el número del tamaño del grano según la ASTM

Comentario.- A menudo se habla del tamaño del grano en términos de un " diámetro " típico (tomando en cuenta la amplificación). Nótese que: a).- Los granos no son esféricos; b).- No todos los granos tienen el mismo tamaño. En general, el diámetro de grano no ofrece una medida plenamente satisfactoria del tamaño promedio, sin embargo se usa.

I.6.- Fases del sistema hierro-carbono(2).

Se introduce este tema con la finalidad de seleccionar la temperatura del recocido y a la vez poder analizar la relación tensión-dureza.

Ferrita ó hierro α .- La modificación estructural que sufre el hierro puro a temperatura ambiente se llama hierro ó ferrita. La ferrita es bastante blanda y dúctil, como se muestra en la fig.(I.8).

Austenita ó hierro γ .- Es la forma estable del hierro puro a temperaturas entre 912°C y 1394°C . Sin embargo a su temperatura de estabilidad, la austenita es blanda y dúctil, se ilustra mejor en la fig.(I.8).

Carburo de hierro Fe_3C .- En aleaciones hierro-carbono, el exceso de carbono con respecto a su límite de solubilidad deberá formar una segunda fase, la cual es más comúnmente llamada carburo de hierro - (cementita), esta resiste más a la tensión y es más dura, como se ilustra en la fig.(I.8).

Perlita.- Es una mezcla específica de dos fases formadas por transformación de la austenita en ferrita y carburo. La presencia de carburo de hierro con ferrita en aceros incrementa la resistencia de estos. Sin embargo, debido a que el carburo de hierro no es dúctil, no resistirá concentraciones de esfuerzos, así que es relativamente débil .

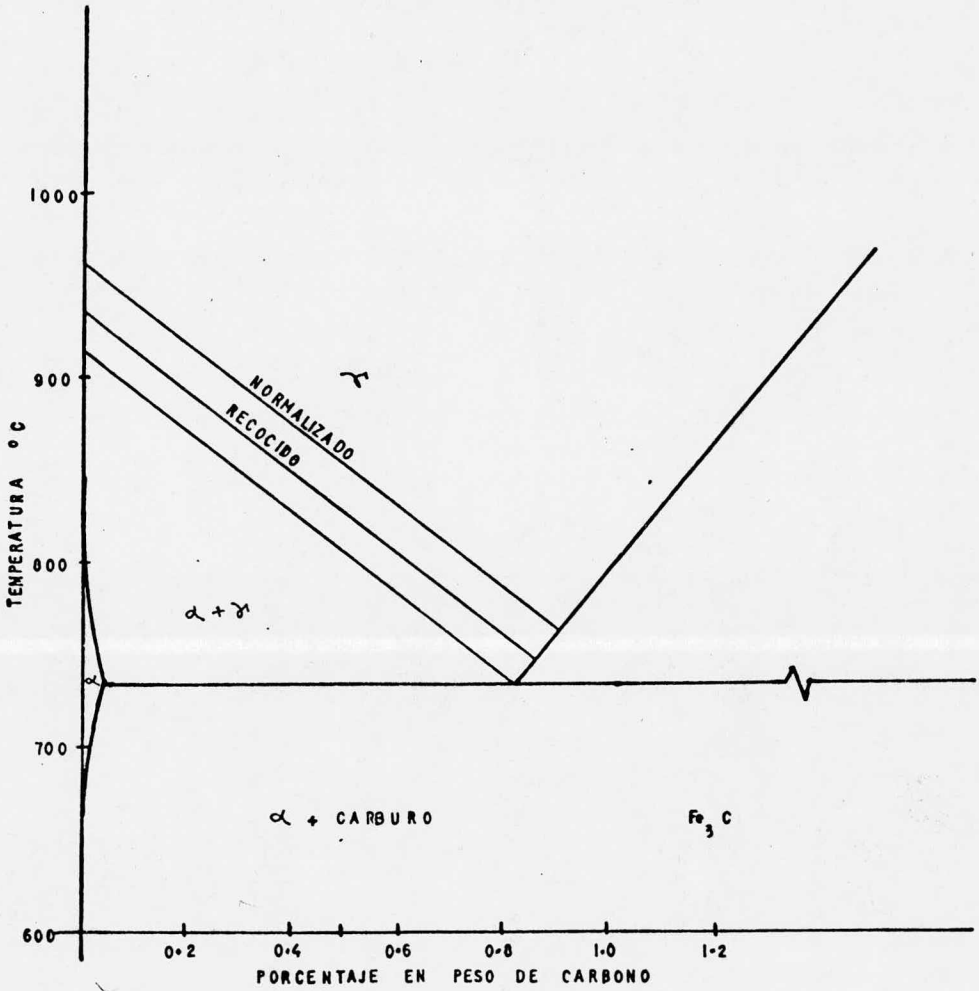


FIG 1-0 DIAGRAMA DE FASES PARA RECOCIDOS Y NORMALIZADOS DE ACERO AL CARBONO(2)

CAPITULO II

TRABAJO EXPERIMENTAL

- II.1.- Procedimientos que intervienen en la fabricación de la probeta de tensión plana.
- II.2.- Procedimientos para efectuar los recocidos de las probetas.
- II.3.- Proceso para efectuar la prueba de tensión.
- II.4.- Prueba de dureza Rockwell (B).
- II.5.- Proceso para fabricar las probetas metalográficas, obtención de micrografías y cálculo del tamaño del grano.
- II.6.- Cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación (n) del metal base.
- II.7.- Problemas y soluciones presentados en la elaboración de probetas y pruebas.

El presente capítulo se hablará del procedimiento para fabricar --- probetas de tensión, dureza y metalografía: también de como se llevan a cabo las respectivas pruebas y equipos utilizados, calculando a la vez el coeficiente de endurecimiento por deformación. Explicando los problemas presentados y la forma en que se solucionaron.

II.1.- Procedimientos que intervienen en la fabricación de la probeta de tensión plana.

Esto tiene por objeto señalar la secuencia para fabricar una probeta de tensión plana.

Al obtener un material, se debe tener cuidado en que sea del tipo adecuado, clase y dimensiones a utilizar. En nuestro caso, se emplea lámina del calibre No. 11 de acero bajo carbono 1018, comprada en Ferretería Coto, fabricado por AHMSA.

a).- Forma general para fabricar una probeta de tensión plana.

La lámina puede ser cortada por oxiacetileno, sierra alternativa ó sierra cinta. El empleo de cualquiera de éstos equipos dependerá --- del tipo de material, de las dimensiones de la lámina utilizada y de la velocidad con la cual se requiera efectuar el corte, en éste caso entra el criterio de la persona que ejecuta la operación. Si --- se llegara a utilizar algunas de las sierras, es necesario usar --- aceite de corte.

Al marcar las probetas para cortarse, se debe dejar una pequeña tolerancia de 2mm con la finalidad de dar el dimensionamiento y acabado final, de las que marcan las normas utilizadas. Debe procurarse que la tolerancia dejada sea la mínima posible, para evitar --- incrementar el tiempo de maquinado. También se debe tener cuidado al dimensionarlas, ya que en éstas, la sección transversal no se mantiene constante a lo largo de toda la probeta.

El trabajo en la zona calibrada de la probeta, se recomienda efectuarlo en la fresadora, utilizando para ello el cortador con el --- diámetro correspondiente, siempre y cuando exista éste. El acabado dependerá de la velocidad de trabajo, de la profundidad en el corte y además checar el filo de la herramienta.

b).- Etapas para elaborar una probeta de tensión plana.

Para señalar la longitud, el ancho y el espesor de la lámina se denominará en el siguiente orden: L x A x e.

1).- Teniendo la lámina de 2400 x 910 x 3.lmm, se cortaron tiras de 240 x 24 x 3.lmm, con la finalidad de evitar los desperdicios del --- material, así como la zona afectada por el calentamiento, como se muestra en la fig.(II.1)a.

2).- Posteriormente se efectúan los cortes longitudinales en la sierra cinta, marca FU - HO, F-300, con soldador de 1.2kVA, motor de --- 1/2 HP, finalmente quedando unos rectángulos de 240 x 24 x 3.lmm, --- como se ilustra en la fig.(II.1)b.

- 3).- Después se pasa a una sierra alternativa, marca APEKA S-16, --- con una corriente de 25 amperes, 380 volts, utilizándose una - velocidad de 60 carreras/min., para dejarlas a las medidas de 200 x 24 x 3.1 mm.
- 4).- Por último se mecanizan en el cepillo, marca Sánchez Blanes --- S.A. 220/440 volts, 3 fases, usando una velocidad media de --- 2.77 m/min. y un buril de tungsteno para dejarlas a las medi-- das de 200 x 20 x 3.1 mm.
- 5).- Para conocer la cantidad de material afectado por el calenta-- miento en el corte de la lámina, es necesario aplicar con un - algodón impregnado de solución de ácido nítrico al 5% en alco- hol. Esta operación se repetirá hasta que sean perfectamente - visibles los detalles sin recurrir al microscópio.
- 6).- Teniendo las plaquitas a las medidas anteriores se procede a - mecanizar la zona calibrada de las probetas en la fresadora, - marca Bridgeport, con motor de 220/440 volts, un fresador de -- una pulgada, velocidad de corte de 325 r.p.m.(25.93 m/min.), y usando una plantilla para verificar que los radios sean los correctos, el corte del material es como se ilustra en la fig. (II.1)d.
- 7).- La limpieza de la pieza en cuanto a bordes y viruta, se puede hacer con una lima musa.
- 8).- La probeta de tensión terminada con las dimensiones que marca la norma se ilustra en la fig.(II.2).

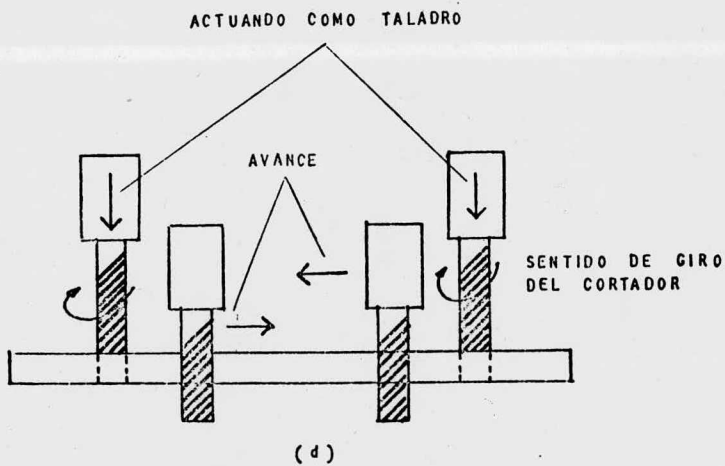
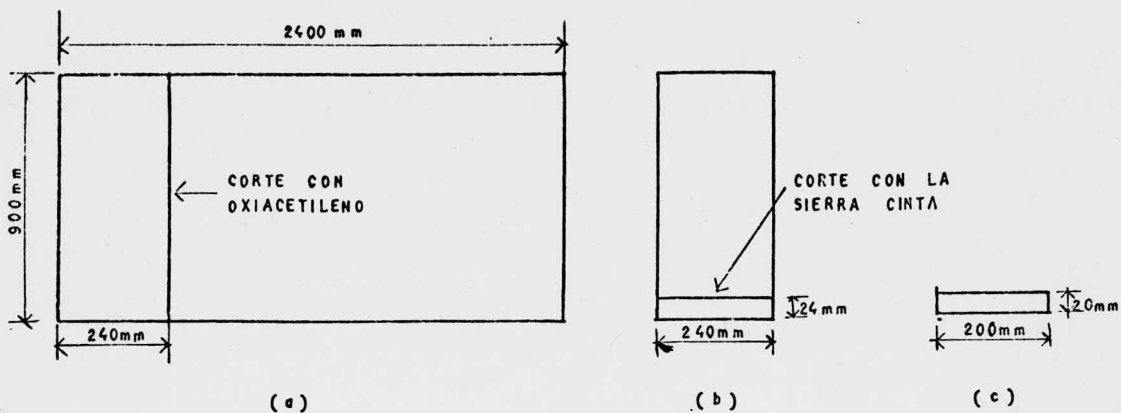
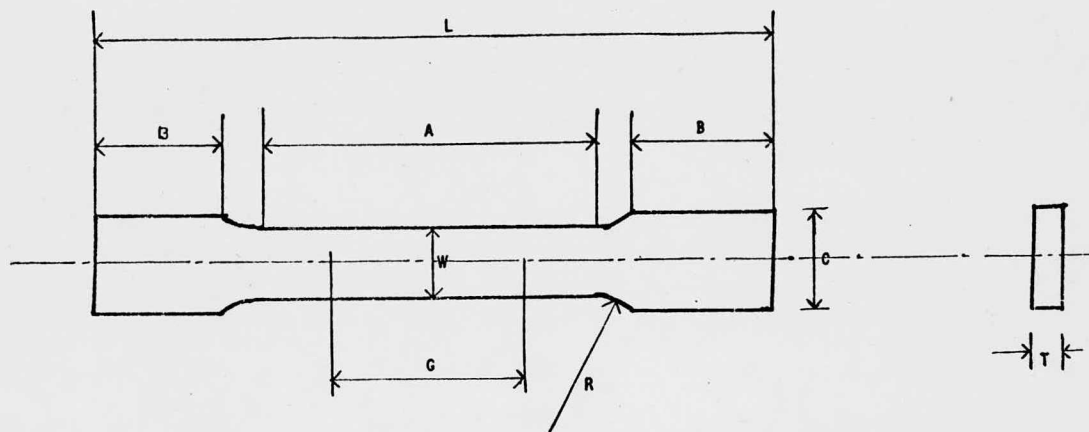


FIG II-1 PROCESO PARA FABRICAR UNA PROBETA DE TENSION PLANA



DIMENSIONES EN mm

G	LONGITUD CALIBRADA	50 ± 0.10
W	ANCHO	13 ± 0.25
T	ESPESOR	3.1
R	RADIO DE LA ZONA DE TRANSICION	13
L	LONGITUD TOTAL MINIMA	200
A	LONGITUD TOTAL DE LA SECCION REDUCIDA	60
B	LONGITUD DE LA ZONA DE SUJECION	50
C	ANCHO DE LA ZONA DE SUJECION	20

FIG II-2 DIMENSIONES DE LA PROBETA DE TENSION PLANA

II.2.- Procedimientos para efectuar los recocidos de las probetas. La finalidad de estos recocidos fué variar las características mecánicas, para obtener probetas diferentes y así una mayor posibilidad de análisis.

Se tuvo la necesidad de seleccionar una temperatura de 930°C , que es la que más ó menos corresponde a un acero al bajo carbono 1018, según el diagrama hierro-carburo de hierro(ver el capítulo I.6), manteniendo constante la temperatura y variando únicamente el tiempo, los cuales fueron de 2,3,4,5 horas. A esto hay que añadirle el tiempo de precalentamiento del horno (esto es el tiempo que tarda en alcanzar la temperatura de 930°C) los cuales son: 2 horas 22 minutos; 2 horas 45 minutos; 2 horas 29 minutos; y 2 horas. El calentamiento se hizo dejando las probetas dentro del horno y el enfriamiento se desarrolló lentamente en el mismo para todos los casos.

El recocido se efectuó en un horno de la marca Honeywell Mexicana - S.A., modelo HT - 1, con calefacción de 5.6 KW, 220 volts, 3 fases, 60 ciclos, temperatura máxima alcanzada de 1200°C .

II.3.- Proceso para efectuar la prueba de tensión.

Esto tiene por objeto señalar la secuencia adecuada para llevar a cabo la prueba de tensión.

La máquina universal utilizada es de la marca Baldwin con capacidad de 200 toneladas y el proceso es el siguiente:

- 1).- Se verifica que las válvulas de carga y descarga esten cerradas.
- 2).- Se presiona el botón de arranque del compresor.
- 3).- Montar las mordazas para probetas pequeñas en los cabezales.
- 4).- Incertar la probeta entre las mordazas, cuidando que queden en forma vertical y gire la palanca para asegurar al espécimen.
- 5).- Como se querían gráficas que nos registraran hasta el punto de rotura, se colocó un extensómetro de cono (modelo PD-LM tipo microformador de la marca Baldwin-Lima-Hamilton) en la parte baja del cabezal inferior, de tal manera que tuviera la carrera suficiente para graficar lo pretendido.
- 6).- En el graficador se coloca papel milimétrico y se escoge un punto definido para graficar lo pretendido.
- 7).- Se fija a cero todos los rangos de cargas que vayan a utilizarse durante la prueba.
- 8).- Seleccionamos un rango de carga que sea aplicado al tamaño de la probeta y al tipo de material que esté siendo probado(en nuestro caso fué un rango de 0 - 10,000 Kg).
- 9).- También se debe seleccionar una velocidad de carga, ésta dependerá de las características del material (en nuestro material fué de 1150 kg/min.)
- 10).-Aplicamos la carga actuando su respectiva válvula.

- 11).- Se registró la última carga después de fallar el espécimen, y al final hubo necesidad de cerrar la válvula de carga y quitar la probeta de las mordazas.
- 12).- También se desconectó el motor del compresor y se abrió la válvula de descarga.

II.4.- Prueba de dureza Rockwell B.

Se utilizó esta prueba para conocer en forma preliminar la variación de las características mecánicas con los tratamientos térmicos establecidos.

La máquina de dureza Rockwell usada es de la marca Vergleichstabelle für stahl, tipo hartprüfrr, gnehn 100.

Los pasos a seguir para realizar la prueba fueron los siguientes:

- 1).- Colocar la mesa en la máquina, dependiendo de la forma de la probeta (plana ó cilíndrica) y colocar la protección al penetrador.
- 2).- Colocar la carga y el penetrador, según el sistema Rockwell a utilizar (en nuestro caso se usó la escala B, con una carga de 100 Kgf, incluida ya la precarga de 10 Kgf y un penetrador de $\frac{1}{16}$ de pulgada (1.588mm) de diámetro).
- 3).- El espécimen se coloca de tal forma que la cara quede perpendicular al probador utilizado.
- 4).- Se acerca la probeta al probador girando la manivela que desplaza en sentido vertical la mesa.
- 5).- Se aplica la precarga, haciendo girar la manivela hasta que la aguja de la carátula pequeña se sitúe en el punto rojo (esto indicará que la aguja gire tres vueltas).
- 6).- Aplicar la carga subiendo la palanca que actúa el mecanismo de carga y se mantiene ésta durante un minuto ó cuando se observe que la aguja de la carátula grande se haya estabilizado.
- 7).- Se retira la carga y se toman las lecturas, donde se estabilice la aguja.
- 8).- Se retiran los aditamentos de la máquina que fueron colocados al inicio de la prueba.

Precauciones:

- 1).- El penetrador y el soporte no deben entrar en contacto sin ninguna probeta de prueba en medio de los dos, ya que de otro modo el soporte y el penetrador resultarán dañados.
- 2).- Pueden obtenerse resultados erróneos, si las huellas se localizan a distancias de 2.5 diámetros de su centro ó si se realizan muy cerca de la orilla del material.
- 3).- Dejar siempre descargada la máquina.
- 4).- Verificar con el patrón de durezas que se está trabajando dentro de las tolerancias especificadas por las normas.

Observaciones:

- 1).- El acabado del espécimen debe ser con esmeril (no se requiere un acabado a espejo).
- 2).- Las caras de los especímenes deben ser paralelas entre sí (para asegurar la perpendicularidad entre la probeta y el probador).

Las zonas de la probeta ensayada se ilustra en la fig.(II.3).

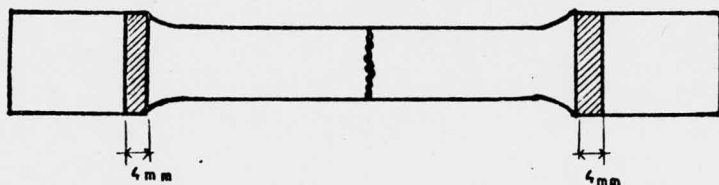


FIG II,3 ZONAS A EFECTUAR LAS PRUEBAS DE DUREZA

II.5.- Proceso para fabricar las probetas metalográficas, obtención de micrografías y cálculo del tamaño de grano.

Se requirió analizar la estructura presente en las diversas probetas con influencia de la correlación tensión-dureza. Para ello se realizaron las siguientes etapas:

- 1).- Limpiar el vidrio donde se colocará el molde para la probeta.
- 2).- Lijar los moldes, colocándolos en el vidrio impregnados ambos de cera caliente.
- 3).- Para fabricar una probeta, es necesario añadir 20ml de resina poliéster y 6 gotas de catalizador correspondiente (los cuales se les conocen por marca ó composición química) en un vaso de precipitados y se procede a removerlo.
- 4).- Introducir la mezcla de resina y catalizador ya removido al molde que contiene el espécimen de metal y esperar a que se efectúe la reacción y solidifique.
- 5).- Teniendo ya la probeta; hay que lijarla con papeles abrasivos de los números 240, 320 y 500 de agua para metales en forma sucesiva.
- 6).- Después del lijado, se pasa a la pulidora giratoria, marca Buehler, ITD, 115 volts, 12.8 amperes, 60 Hz. y 1 HP, en la cual se tiene que agregar una cantidad de alumina, primero de 1μ para el pulido en paño de mesa de billar y posteriormente de 0.3μ en el paño microcloth respectivamente.

- 7).- Ya que se tiene el acabado a espejo, hay que proporcionarle un ataque de ± 30 segundos con nital (3% de ácido nítrico y 97% - de alcohol etílico de 96 G.L.), después enjuagarlo con agua. - Limpiarlo con alcohol y esperar a que seque totalmente.
- 8).- Colocar la probeta al microscopio metalográfico, marca Versamet, Unión 6201, Tokio; para poder hacer las observaciones del tamaño de grano correspondiente.
- 9).- Se usó una malla patrón elaborado según la norma ASTM, la cual se adapta al microscopio antes señalado a 100x, para encontrar el tamaño de grano.
- 10).- El otro método para encontrar el tamaño del grano, es midiendo el diámetro promedio, usando para ello el ocular milimétrico a 100x, en donde cada división es igual a 0.01 mm y esto a su vez igual a 10 .
- 11).- Las fotografías tomadas al tamaño de grano de las probetas, se hicieron en una cámara Pentax incluida en el microscopio, con - rollo TX - 135 - 20 blanco y negro de 20 exposiciones, auxiliados por un exposímetro marca Versamet, integrado en este equipo.

II.6.- Cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación " n " del metal base.

El coeficiente de endurecimiento por deformación, es un factor importante para este trabajo, el cual se calcula de una manera que resulta complicada en caso de que se requiera realizar empíricamente; por ello se requiere desglosar paso a paso para encontrar esta constante.

Los datos que se proporcionan a continuación se obtuvieron de la --- fig.(II.4) y de la tabla II.1.

$$\begin{aligned} \sum y &= 12.635977 & ; & & N &= 8 \\ \sum x &= -8.66937925 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum x^2 &= 9.49837409 \\ \sum xy &= -13.66839665 \end{aligned}$$

y de la ecuación 17 del capítulo I.3.

Etapa No. 1

$$\frac{\sum x \sum y}{N} = \frac{(-8.66937925)(12.635977)}{8} = -13.6932596$$

Etapa No. 2

$$\begin{aligned} S_{xy} &= \sum xy - \text{Etapa No. 1} \\ &= -13.66839665 - (-13.6932596) = 0.02486295 \end{aligned}$$

Etapa No. 3

$$\frac{(\sum x)^2}{N} = \frac{(-8.66937925)^2}{8} = 9.39476725$$

Etapa No. 4

$$S_{xx} = \sum x^2 - \text{Etapa 3} \\ = 9.49837409 - 9.39476725 = 0.103606965$$

Etapa No. 5

$$n = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} = \frac{\text{Etapa No. 2}}{\text{Etapa No. 4}} = \frac{0.02486295}{0.103606965} = 0.239973731$$

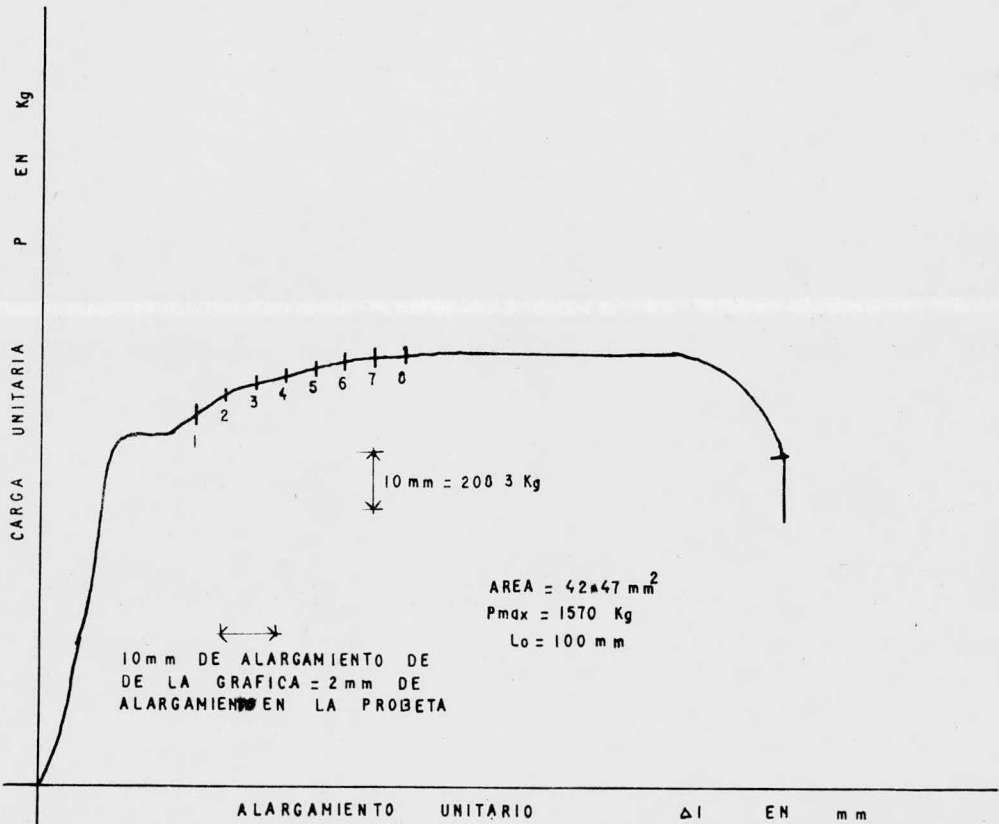


FIG 11-4 EJEMPLO DE COMO OBTENER LOS DATOS DE LA GRAFICA CARGA UNITARIA - ALARGAMIENTO UNITARIO, PARA ENCONTRAR EL COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION DE LAMINA DEL NUMERO 11 DE BAJO CARBONO 1010 FABRICADO POR AHMSA.

TABLA IV EJEMPLO DEL CALCULO DEL COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION (n)
 DE LAMINA DEL No 11 DE BAJO CARBONO 1010 FABRICADO POR AHMSA.

N	P Kg	Δl mm	σ Kg/mm ²	$\sigma_R = \sigma(1 + e)$ Kg/mm ²	$y = \text{LOG} \frac{\sigma}{10 R}$	y^2	$e = \frac{\Delta l}{l}$	$\epsilon = \text{Ln}(1 + e)$	$x = \text{LOG} \frac{\epsilon}{10}$	x^2	xy		
1	1360.6	5.4	32.03673101	33.76671532	1.5204000	2.336270	0.054	0.05259245	-1.2790766	1.636037	-1.955054257		
2	1413.0	6.4	33.27054391	35.39905072	1.5490015	2.3994057	0.064	0.062035391	-1.2073605	1.4577194	-1.870203225		
3	1465.3	7.4	34.50200141	37.05514951	1.5600406	2.4612059	0.074	0.07130996	-1.1463626	1.3141472	-1.79046936		
4	1406.26	8.4	34.99552626	37.93515045	1.5790410	2.493373	0.084	0.080657903	-1.0933531	1.195421	-1.726450247		
5	1517.6	9.4	35.73345091	39.092404	1.5920924	2.5347502	0.094	0.089040704	-1.0465269	1.0952106	-1.666167523		
6	1520.13	10.4	35.90139063	39.72346400	1.5990471	2.5569517	0.104	0.090939940	-1.0046203	1.009270	-1.606447969		
7	1530.6	11.5	36.22792559	40.39413703	1.6063103	2.5002505	0.115	0.1000544	-0.96315401	0.92766565	-1.547131911		
8	1549.06	12.5	36.47421709	41.03349422	1.6131305	2.6022150	0.125	0.11770304	-0.92091724	0.86200724	-1.490472163		
					$\Sigma y = 12.635977$						$\Sigma x = -0.66937925$	$\Sigma xy = -13.66039665$	
						$\Sigma y^2 = 19.9645260$							$\Sigma x^2 = 9.49037409$

$P_{máx} = 1570 \text{ Kg}$
 $\text{AREA} = 42.47 \text{ mm}^2$
 $l_0 = 100 \text{ mm}$

II.7.- Problemas y soluciones presentados en la elaboración de probetas y pruebas.

Esto tiene como finalidad comentar los principales problemas presentados y como se solucionaron en la fase experimental.

Problema.- Para efectuar el corte transversal de la lámina, no se pudo realizar en la cizalla; porque éste calibre era demasiado grande y se podría deteriorar el equipo.

Solución.- Este corte se llevó a cabo por el método de soplete (oxiacetileno).

Problema.- Se requerían efectuar cortes longitudinales de la lámina, antes hecha por soplete, en la sierra cinta: pero los técnicos mencionaban que el equipo no funcionaba.

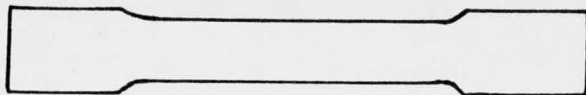
Solución.- Se procedió a verificar cual era la falla que tenía la máquina y de esta manera tratar de darle solución. Bien lo que tenía era la falta de una banda, se compró, colocó y se puso a funcionar.

Problema.- No se contaba con asesoramiento sobre la manera de soldar por resistencia dicha cinta de corte.

Solución.- En la máquina tiene un dispositivo para efectuar la soldadura a tope, cortando la cinta de corte a 90° en ambos lados, uniéndolo con unas mordazas y luego aplicar una descarga eléctrica, después hay que darle un leve calentamiento para que mejoren sus propiedades del material y no se rompa inmediatamente.

Problema.- Cuando se quiso mecanizar el radio en la zona calibrada de la probeta en el cepillo y usando un buril como se ilustra en la fig.(II.5). No se pudo hacer con exactitud, ya que queda en forma de una huella que proporcionará la falla en esa zona, la cual es inconveniente. Al cambiarlo en sentido contrario, el maquinado y tratar de adaptarlo de nuevo, resulta una pérdida de tiempo innecesario y solamente se pueden mecanizar 4 especímenes.

Solución.- Con un fresador de una pulgada y un juego de plantillas patrón, se verificó que el radio fuera el correcto, aunque no en una forma precisa y usando la fresadora se facilita el trabajo ahorrando demasiado tiempo de mecanizado.



Problema.- Se requerían mecanizar lotes de 8 a 10 probetas cada uno.
Solución.- Esto se logró colocando unas bridas, de tal manera que se pudiera mecanizar lo pretendido. Y Para que se tuviera una buena exactitud, se colocaron unos topes en la mesa y con el auxilio de un comparador de carátulas también. El otro método es colocando unas prensas en serie, nivelándolas con un comparador de carátulas para que queden alineadas y sus respectivos topes en la mesa de la fresadora.

Problema.- Al estar efectuando el mecanizado en el sentido correcto, se observó que se jalaba la mesa de la fresadora ocasionando desnivel en las bridas y las probetas se deterioraban.

Solución.- Se tuvo que usar la fresadora primero como taladro y posteriormente avanzar en el sentido correcto del mecanizado.

Problema.- Para efectuar los recocidos y las pruebas de tensión, no se contaba con el respectivo equipo, ya que la ENEP Aragón se encontraba en paro.

Solución.- Se hizo una solicitud para usar el equipo en los laboratorios de resistencia de materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y se me permitió efectuar las pruebas.

Problema.- Encontrar un extensómetro que tuviera la carrera suficiente para graficar hasta la rotura de la probeta.

Solución.- Se encontró un extensómetro tipo cono que sí permite graficar hasta la rotura de la probeta, éste se colocó en la parte baja del cabezal inferior.

Problema.- Encontrar la escala ó rango adecuado para graficar.

Solución.- Existen tres rangos (L = Baja, I = Inermedia, H = Alta). De las graficas se observaba que el rango L era para aceros suaves, la I para aceros semiduros y la H para aceros extremadamente duros. El rango seleccionado fué la L.

Problema.- Como interpretar las gráficas con respecto a las dimensiones de la probeta después de la rotura.

Solución.- Se usó el manual del extensómetro de cono(17), en el cual se explican las escalas de conversión, cuando se usa un cono y cuando un brazo, teniendo en cuenta los rangos (L, I, H).

Usando el cono: L = 5:1 : I = 10:1 : H = 20:1

" " Brazo L = 50:1: I = 100:1: H = 200:1

Como nosotros usamos el cono con un rango L, se puede interpretar de la siguiente manera, 5mm de alargamiento de la gráfica corresponde a 1mm de alargamiento en la probeta. Comprobando, se mide la probeta antes, $L_0 = 100\text{mm}$ y después de la rotura $L_0 = 124\text{mm}$; esto quiere decir que tuvo un alargamiento de 24mm. De la gráfica se mide cuantos milímetros tiene de alargamiento hasta la rotura y usando la conversión de 5:1, nos da un alargamiento de 22.1mm. Comparando ambos resultados, se tiene una diferencia de 1.9 mm, lo cual es mínimo y quiere decir que nuestro procedimiento es correcto.

Problema.- Efectuando las pruebas de dureza Rockwell, algunas probetas no asentaban bien por los bordes y rugosidades que presentaban.

Solución.- Se procedió a esmerilar únicamente las partes donde van a ser ensayadas, procurando que no se alteren sus propiedades del material.

Problema.- Para el ensayo de metalografía, se montaron los trozos de metal una de cada lote en una sola probeta. Al tratar de dejarlas el acabado a espejo se observó que algunas presentaban rayaduras.

Solución.- Se procedió a fabricar una probeta de cada lote.

CAPITULO III

ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

- III.1.- Medidas del tamaño de grano a 100x y cálculo del número de granos por pulgada cuadrada.
- III.2.- Análisis de los datos obtenidos con la prueba de tensión.
 - III.2.1.- Esfuerzo de cedencia.
 - III.2.2.- Esfuerzo último ó a carga máxima.
 - III.2.3.- Deformación última ó a carga máxima.
- III.3.- Análisis del coeficiente de endurecimiento por deformación " n ".
- III.4.- Análisis de la dureza Rockwell B.
- III.5.- Análisis de las principales relaciones tensión-dureza.
 - III.5.1.- Comparación del esfuerzo de cedencia de la prueba de tensión con las ecuaciones propuestas.
 - III.5.2.- Comparación del esfuerzo último ó a carga máxima ingenieril ó nominal con las fórmulas propuestas.
 - III.5.3.- Comparación de las deformaciones últimas reales con las - ecuaciones propuestas.

En este capítulo se analizarán las gráficas e información obtenida con los procedimientos enmarcados en el capítulo I y II, de tal forma que proporcionen las bases para un correcto análisis de la misma.

La manera de procesar los resultados obtenidos mediante gráficas, presenta una nueva forma para analizar estos, ya que se observa el comportamiento de cada uno de los lotes y también se evita la rutina de incluir tablas.

III.1.- Medidas del tamaño de grano a 100x y cálculo del número de granos por pulgada cuadrada.

Se introducen con la finalidad de observar su comportamiento conforme avanza el tiempo de recocido y a la vez poder ampliar nuestro análisis de la prueba de tensión-dureza.

Encontrando primero el tamaño de grano según las mallas de referencia de la ASTM a 100x, estos se ilustran mejor en la fig.(III.1). En la gráfica se observa que existe crecimiento del grano del lote 2 al 3 y a partir de éste al 5 comienza a homegenizarse la estructura.

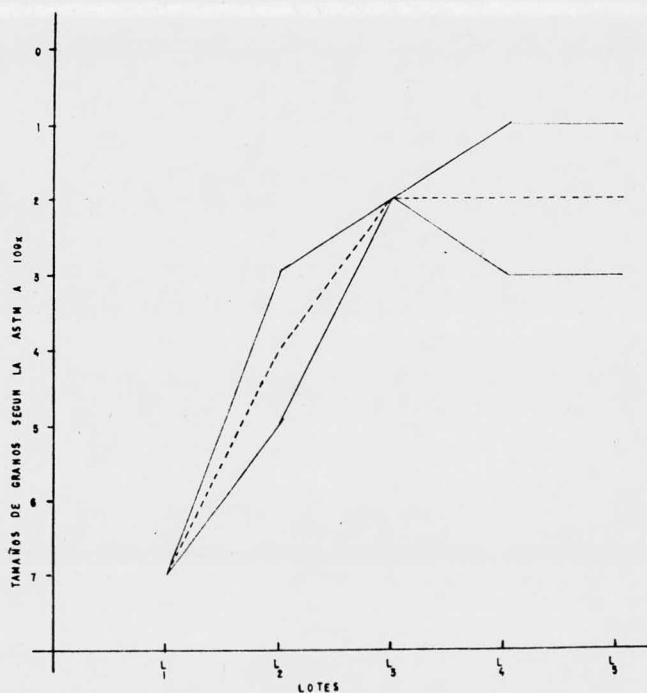


FIG. III-1 TAMAÑOS DE GRANOS SEGUN LA ASTM A 100x - LOTES

Posteriormente encontramos el tamaño del grano con el ocular milimétrico a 100x, incluido en el microscópio metalográfico, estos se observan mejor en la fig.(III.2). En esta gráfica se comprueba una vez más por lo dicho en los autores Avner(1) y Van Vlack(2), que el tamaño del grano crece en los recocidos conforme se incrementa la temperatura ó su respectivo tiempo. También este método proporciona una guía del comportamiento de nuestro material, ya que se proporcionan los diámetros medios de los granos; aunque estos no son esféricos y tampoco tienen la misma dimensión.

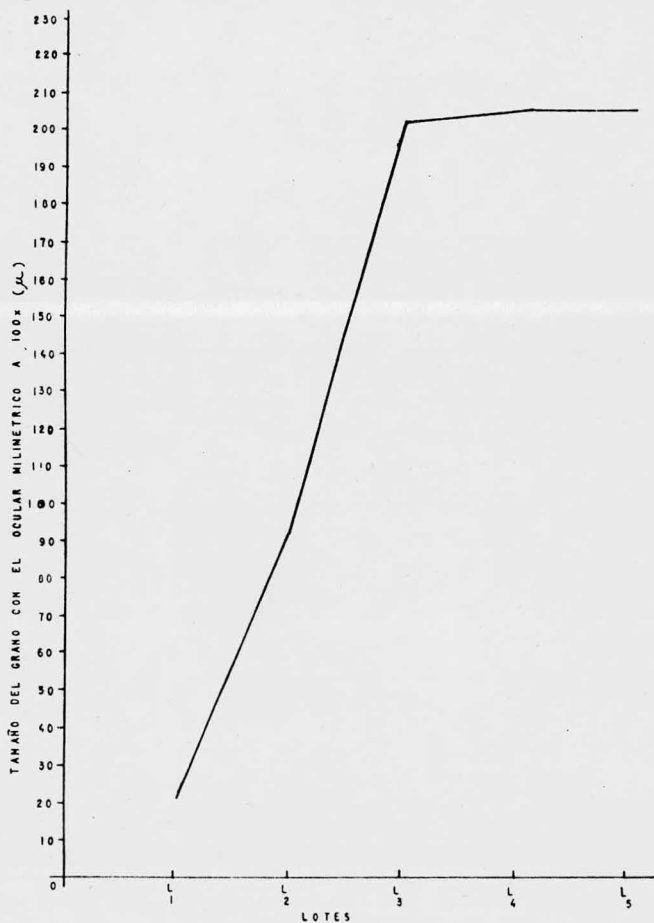


FIG III-2 TAMAÑO DEL GRANO CON EL OCULAR MILIMETRICO A 100x - LOTES

Ahora obtendremos los números de granos por pulgada cuadrada usando la fórmula 60 mencionada en el capítulo I, estos resultados se proporcionan en la fig.(III.3). En esta gráfica se nota que conforme avanza el tiempo de recocido del lote 2 a 3 la cantidad de granos por pulgada cuadrada disminuye y del 3 a 5 permanecen aparentemente constantes, ya que aquí es más notoria la diferencia de tamaños, --pués regresando a los datos obtenidos en la fig.(III.1), se nota el rango de tamaños entre 1, 2, 3, cuando se presenta este fenómeno -- quiere decir que los pequeños mueren a expensas del crecimiento de los grandes, lo que implica un cambio desfavorable mecánicamente hablando.

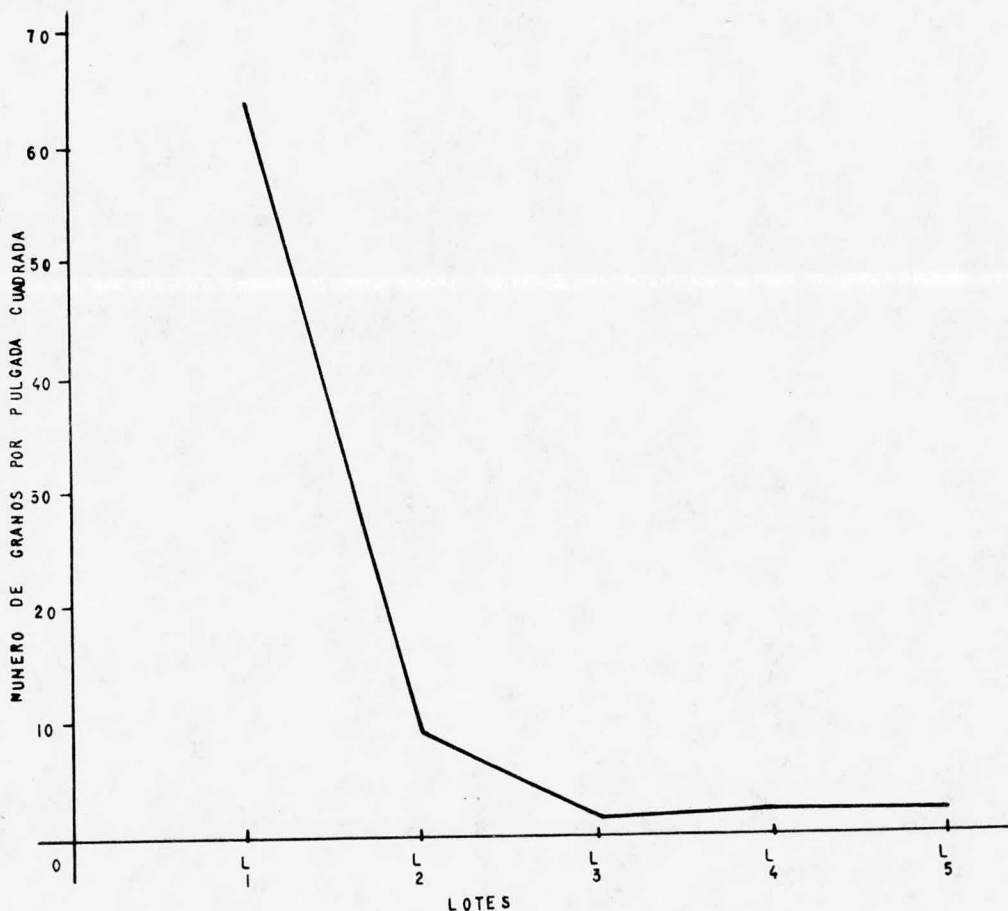
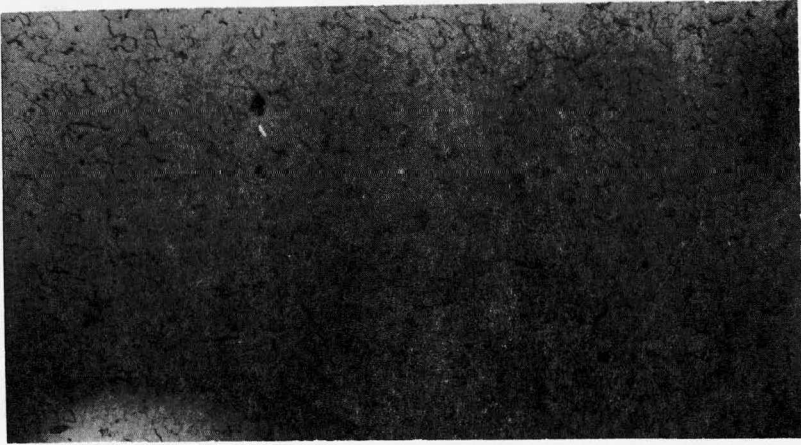


FIG III-3 NUMEROS DE GRANOS POR PULGADA CUADRADA - LOTES

Por último analizando las fotografías 1,2,3 y 4 a 100x y la 5 a 200x de los respectivos lotes, atacados con nital, fases presentes ferrita y perlita(la ferrita se observa de color blanco y la perlita se nota de color obscuro).

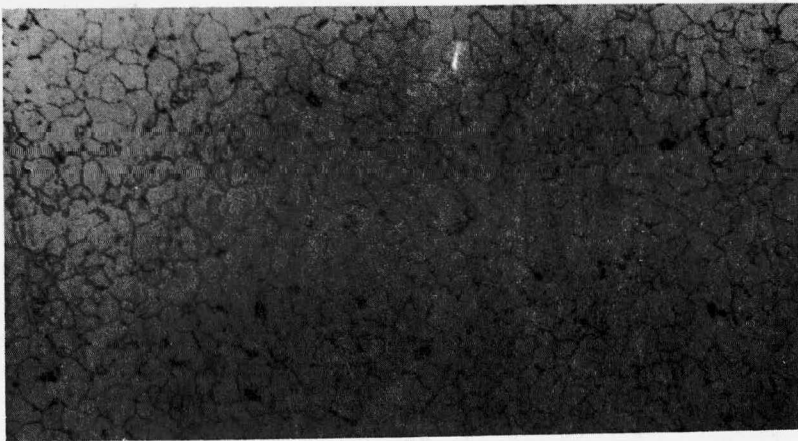
En la fotografía No.1, se puede observar como el tamaño de grano es muy pequeño y la poca cantidad de perlita que existe, esto justifica que se trata de un acero al bajo carbono.



Fotografía No.1.- Material base normalizado.

- Tamaño de grano según la ASTM = 7

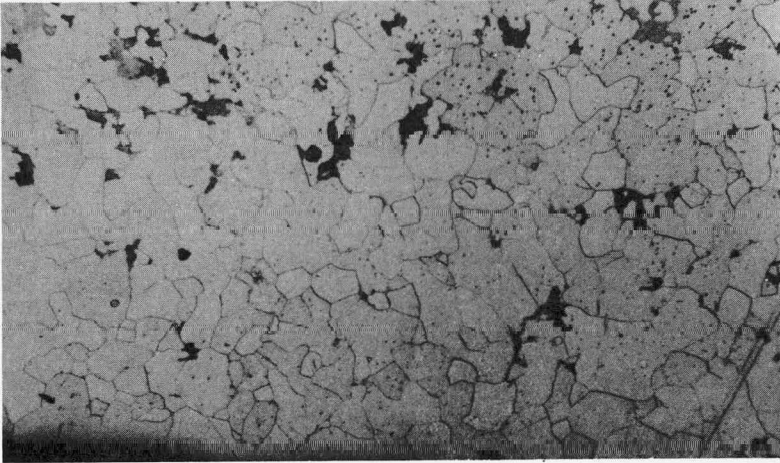
La fotografía No.2, recocido a 930°C a 2 horas, en ella se muestra como comienza a crecer en forma proporcional el tamaño de grano con la perlita, ocasionando el deterioro de las propiedades mecánicas.



Fotografía No.2.- Recocido a 930°C a 2 horas.

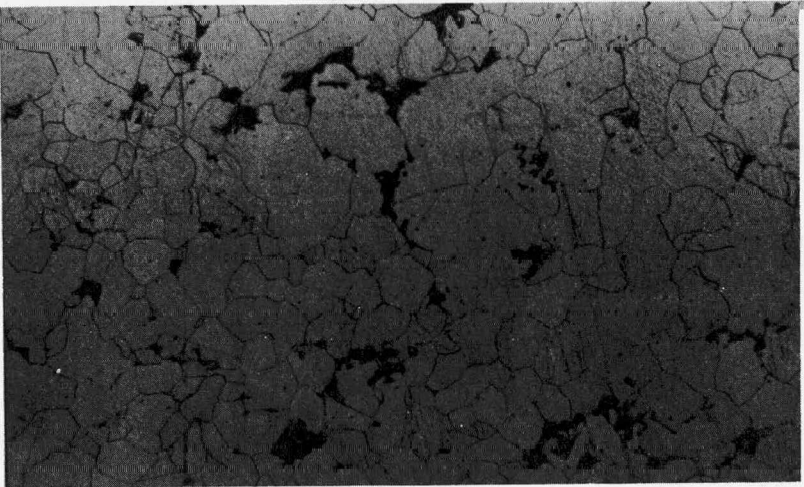
- Tamaño del grano según la ASTM = 3,4 y 5.

Fotografía No.3, recocido a 930°C a 3 horas, se puede observar como la perlita se comienza a ir hacia el centro del metal, continuando - su crecimiento proporcional con el tamaño del grano.



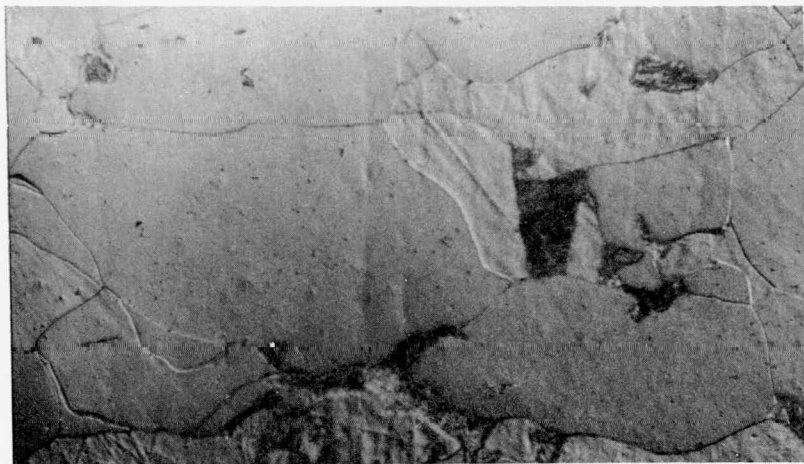
Fotografía No.3.- Recocido a 930°C a 3 horas. .
- Tamaño del grano según la ASTM = 2.

En la fotografía No.4, recocido a 930°C a 4 horas, en esta se puede notar el crecimiento máximo que adquiere el tamaño de grano, también se puede observar que tiene granos grandes y pequeños, lo cual justifica lo dicho por Avner(1) y Van Vlack(2) que los granos pequeños mueren a expensas de los grandes, para continuar uniformándose.



Fotografía No.4.- Recocido a 930°C a 4 horas.
- Tamaño del grano según la ASTM = 1,2 y 3.

La fotografía No.5, recocido a 930°C a 4 horas, en la cual se puede observar como la perlita se localiza en los intersticios de los granos y tiende a juntarse en los respectivos límites, ocasionando un debilitamiento del material al encontrarse una fase dura en medio de la fase blanda (ferrita).



Fotografía No.5,-- Recocido a 930°C a 4 horas

- Tamaño del grano según la ASTM = 1,2 y 3.

Referente a las fotografías anteriores, aparte de observar el comportamiento en el tamaño del grano, también es posible apreciar la distribución de la perlita y ferrita a medida que se incrementa el tiempo de recocido. Esto complementa lo analizado anteriormente.

III.2.- Análisis de los datos obtenidos con la prueba de tensión.

Los ensayos para conocer las propiedades mecánicas de los materiales en una máquina de tensión, son los más completos debido a su versatilidad. En este subcapítulo analizaremos la información producida en este trabajo, considerando los esfuerzos de cedencia, últimos ó a carga máxima, así como la deformación última a la tensión.

III.2.1.- Esfuerzo de cedencia.

En la mayoría de los dispositivos mecánicos es indispensable que las tensiones se encuentren dentro de la zona elástica, para evitar las deformaciones plásticas. Por este motivo es importante el límite de fluencia ó esfuerzo de cedencia de un metal ó aleación.

Analizando la fig.(III.4), la gráfica del esfuerzo de cedencia presenta el mismo comportamiento que la del número de granos por pulgada cuadrada. Se observa también que en nuestro material base normalizado, el tamaño del grano es fino y homogéneo y las propiedades mecánicas son altas, además los resultados no son tan dispersos. En los recocidos de embastecimiento de grano, el hecho de presentar resultados muy dispersos implica heterogeneidad en las propiedades mecánicas, las cuales los hacen no aptos comercialmente hablando.

El esfuerzo de cedencia baja porque tiene crecimiento de grano según Avner(1), Van Vlack(2), los cuales especifican que el embastecimiento del grano deterioran las propiedades mecánicas de los materiales, en este caso el esfuerzo de cedencia bajó, lo cual concuerda con los autores consultados. Si observamos las fotografías 2,3 y 4 a los mismos aumentos 100x, vemos que la ferrita crece junto con la perlita, además se localizan en los intersticios entre granos, contribuyendo -- al deterioro ya mencionado.

III.2.2.- Esfuerzo último ó a carga máxima.

El esfuerzo último debe ser considerado en los metales, como una medida de la carga máxima que puede soportar un material, bajo las muy restrictivas condiciones de carga monoaxial. Esta es una propiedad -- fácil de determinar, muy útil para las especificaciones y para el --- control de calidad de un producto.

Analizando la fig.(III.5) del esfuerzo último ó a carga máxima y comparándola con el esfuerzo de cedencia, tienen aparentemente el mismo comportamiento, solamente que ésta decae en forma continua, afectada por el embastecimiento del grano y la cantidad de perlita concentrada en los límites, lo cual hace que el material sea frágil y no resista más a la tensión.

III.2.3.- Deformación última ó a carga máxima.

Es la relación obtenida al dividir el alargamiento entre la longitud original a carga máxima. Esta tiene como finalidad señalar el punto donde comienza la estricción de un metal hasta llegar a la rotura -- sin aumento de carga alguna y muestra también la plasticidad del material.

Analizando la fig.(III.6) de la deformación última ó a carga máxima, en ella se puede notar que en nuestro material base normalizado es -- baja y en los recocidos es alta, debido al crecimiento uniforme tanto de ferrita como de perlita, esta última concentrándose en los límites del grano, como se ilustra en la fotografía No. 5. También en esta -- propiedad se cumple que en los materiales duros ó frágiles es baja y en los dúctiles ó blandos es alta, según los autores consultados(1,2), mostrándose además la heterogeneidad de la misma en los resultados -- presentados en la gráfica.

III.3.- Análisis del coeficiente de endurecimiento por deformación "n".

El coeficiente de endurecimiento por deformación nos expresa el aumento de la resistencia a la deformación que adquiere un metal, como consecuencia de provocar una deformación plástica y cuanto mayor es el valor, también es grande su capacidad de endurecimiento por deformación.

Quando se trata de provocar deformaciones como la embutición, el estirado, esta propiedad dificulta el trabajo, porque endurece el metal, obligando a introducir mayores esfuerzos conforme progresa la -- deformación.

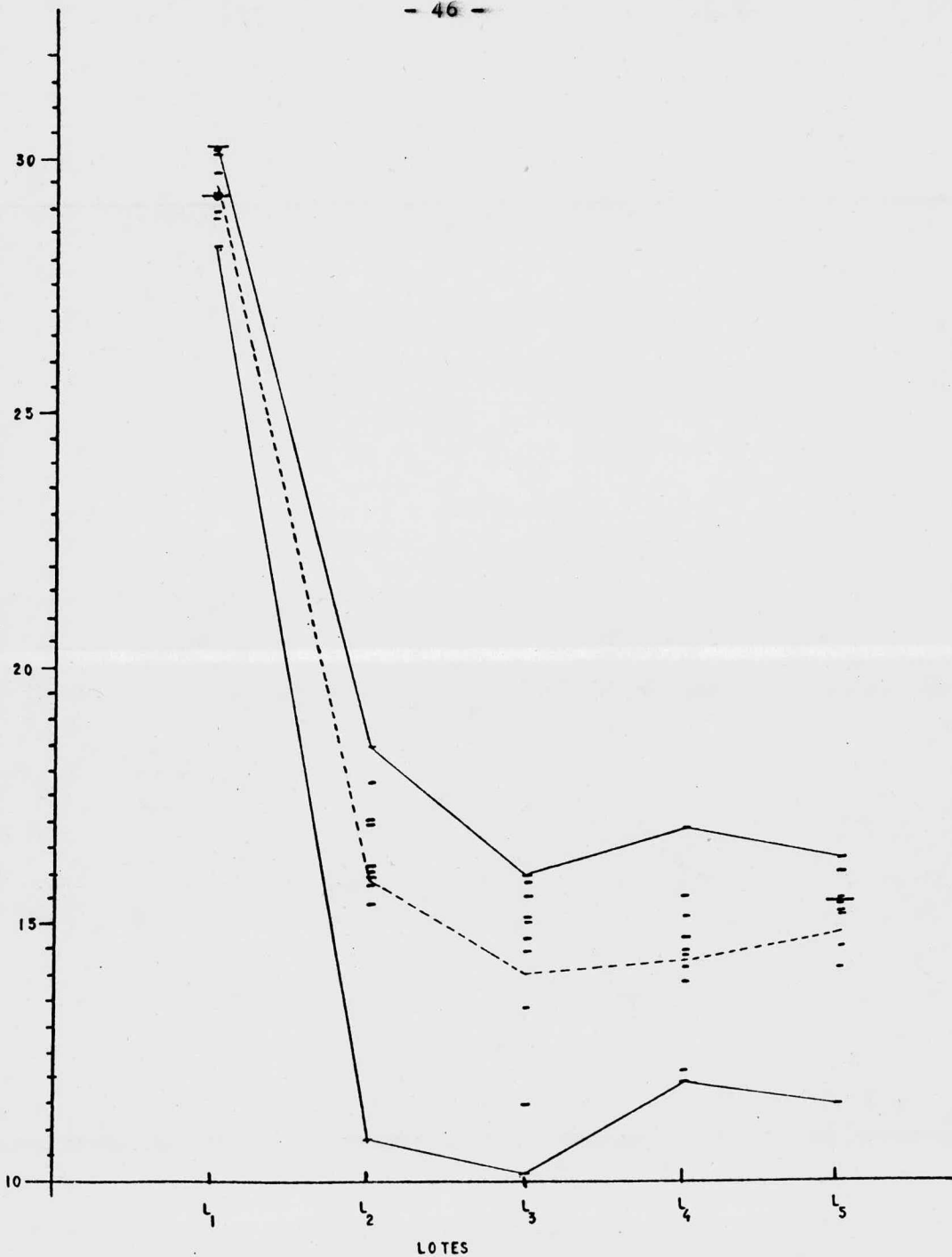


FIG III-4 ESFUERZOS DE CEDENCIA - LOTES.

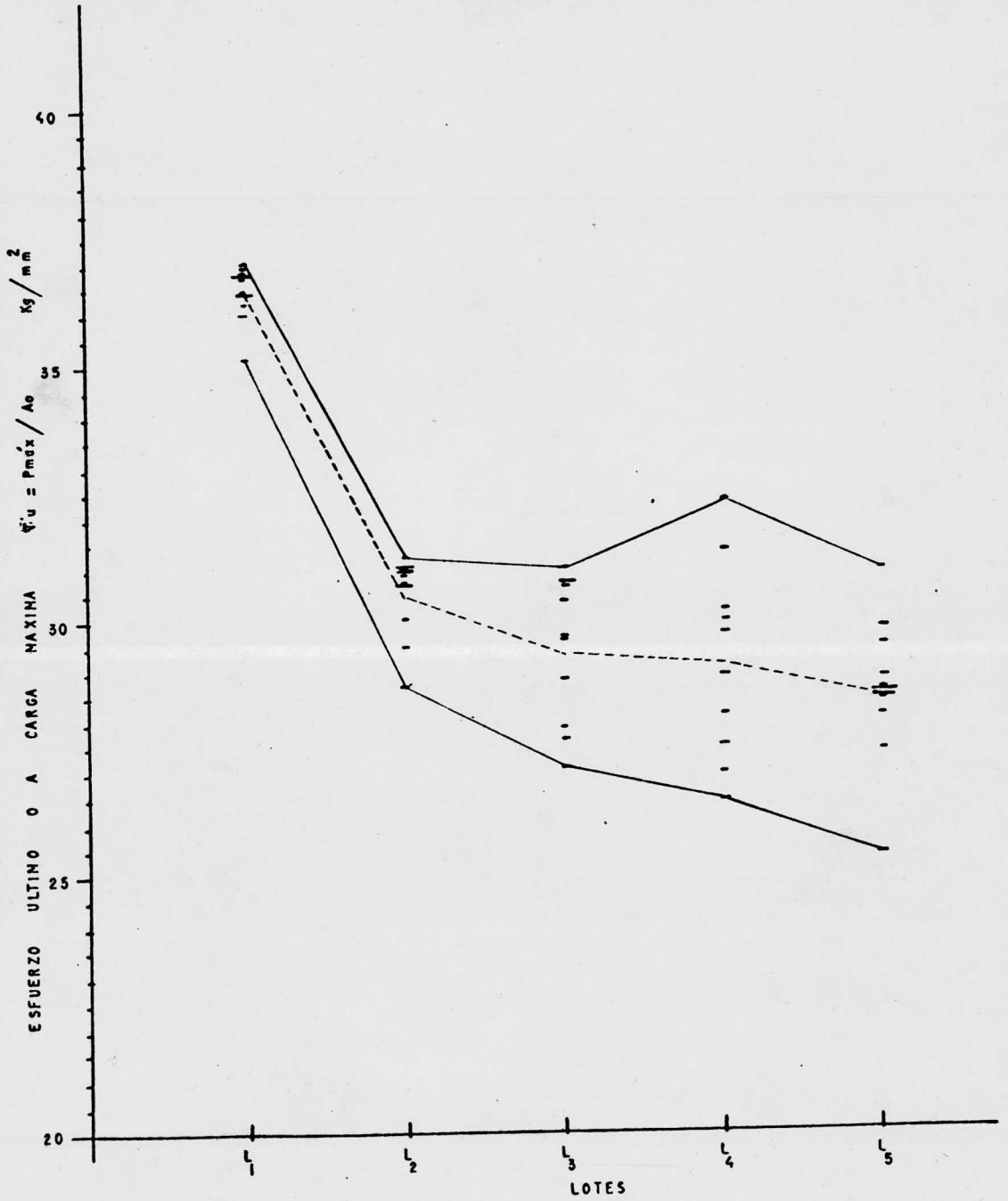


FIG III-5 ESFUERZO ULTIMO O A CARGA MAXIMA - LOTES

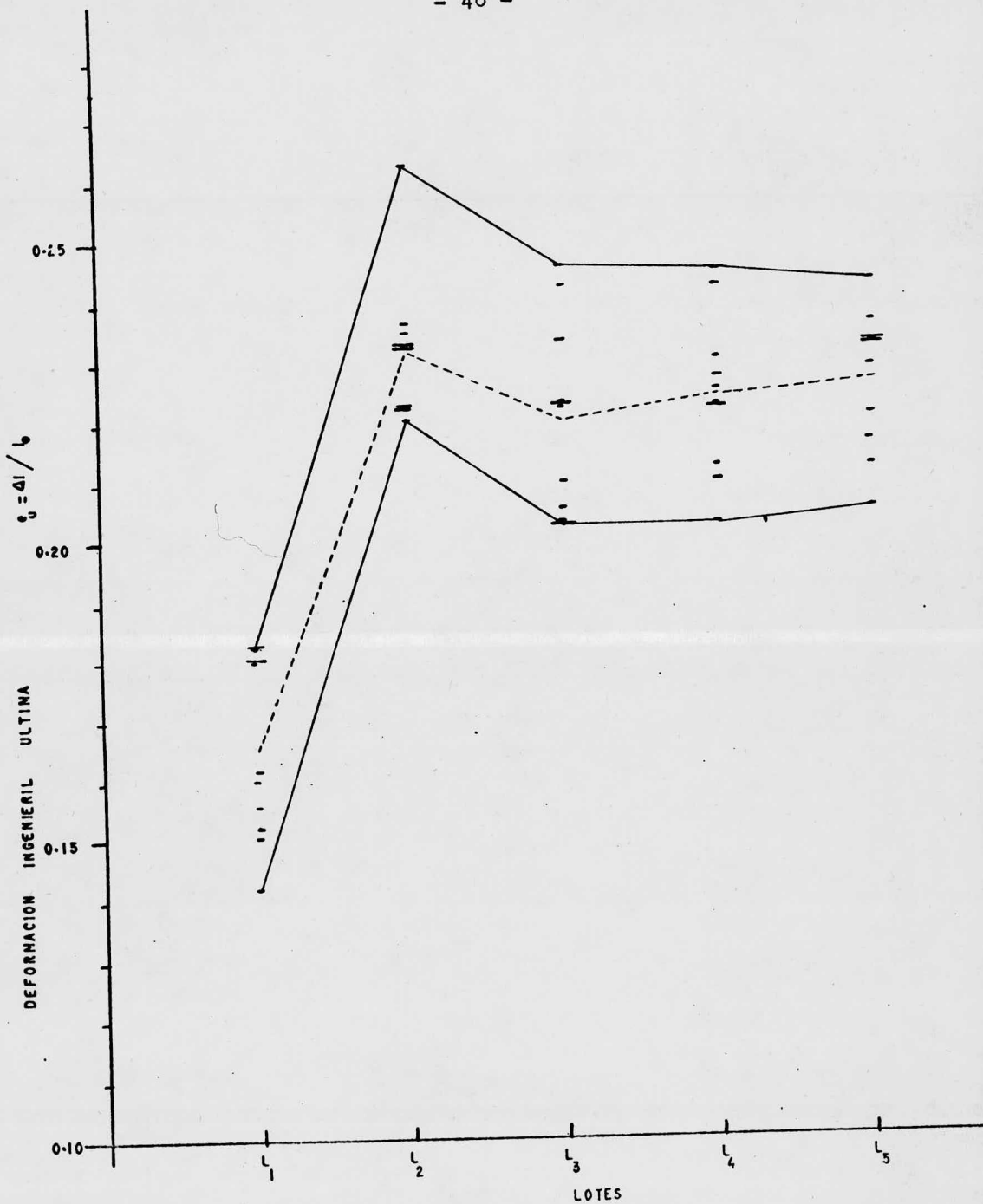


FIG III-6 DEFORMACION INGENIERIL ULTIMA - LOTES

En el capítulo II se mencionó la forma de encontrar " n " y de la -- cantidad de pruebas hechas, solamente presentaremos los resultados y análisis obtenidos con la elaboración de la fig.(III.7).

En ella encontramos una situación opuesta al análisis del esfuerzo -- de cedencia y el esfuerzo último ó carga máxima, tal vez tenga que -- ver la situación estructural analizado como factor predeterminante.

Al comparar " n " con los valores reportados en la literatura (3), -- se observa que solamente algunos resultados del lote 1 coinciden con el reportado $n = 0.26$, esto implica que el procedimiento de cálculo -- fué el correcto, ya que los valores antes señalados consideran -- recocidos de normalizado en aceros de bajo carbono.

No obstante en este trabajo se aprecia un incremento en el valor de " n " para los recocidos de embastecimiento de grano, esto implica -- que el material con grano grande tendrá mayor resistencia a la ras-- gadura, porque su pendiente es más alta y esto es benéfico sí lo -- utilizáramos en procesos de estirado ó embutido.

Definitivamente debe haber una influencia estructural en el valor de " n " que sería necesario profundizar en otro estudio con objeto de -- determinar con exactitud las causas. Pero no dudamos de que el grano -- crecido y la perlita en los intersticios tenga que ver en este -- fenómeno.

III.4.- Análisis de la dureza Rockwell B.

La prueba de dureza puede hacerse en una forma sencilla y la informa-- ción obtenida se evalúa inmediatamente para el control de calidad en -- producción.

Las variaciones de la dureza se presentan en una gráfica conforme a-- vanza el tiempo de recocido, mostrándose en la fig.(III.8).

No resulta muy clara la diferencia de estos lotes al probar la dure-- za. Se aprecia una ligera tendencia a incrementarse a medida que a--umenta el tiempo de recocido.

Prácticamente se podría decir que el tamaño de grano no influencia -- en forma drástica la dureza, esto puede complementar de una manera -- opuesta la regla que nos indica que los granos entre más pequeños -- mayores propiedades mecánicas presentan.

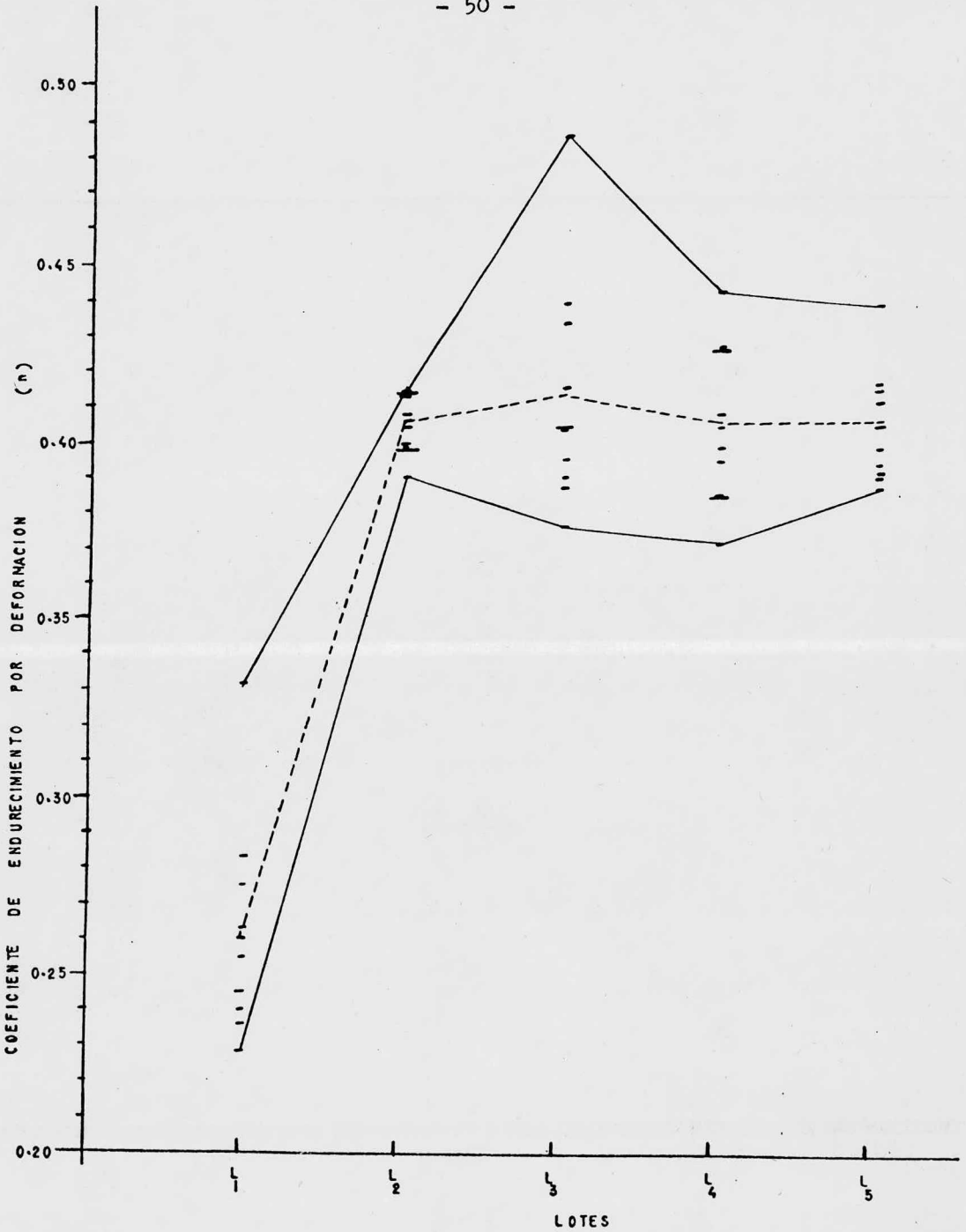


FIG III-7 COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION - LOTES

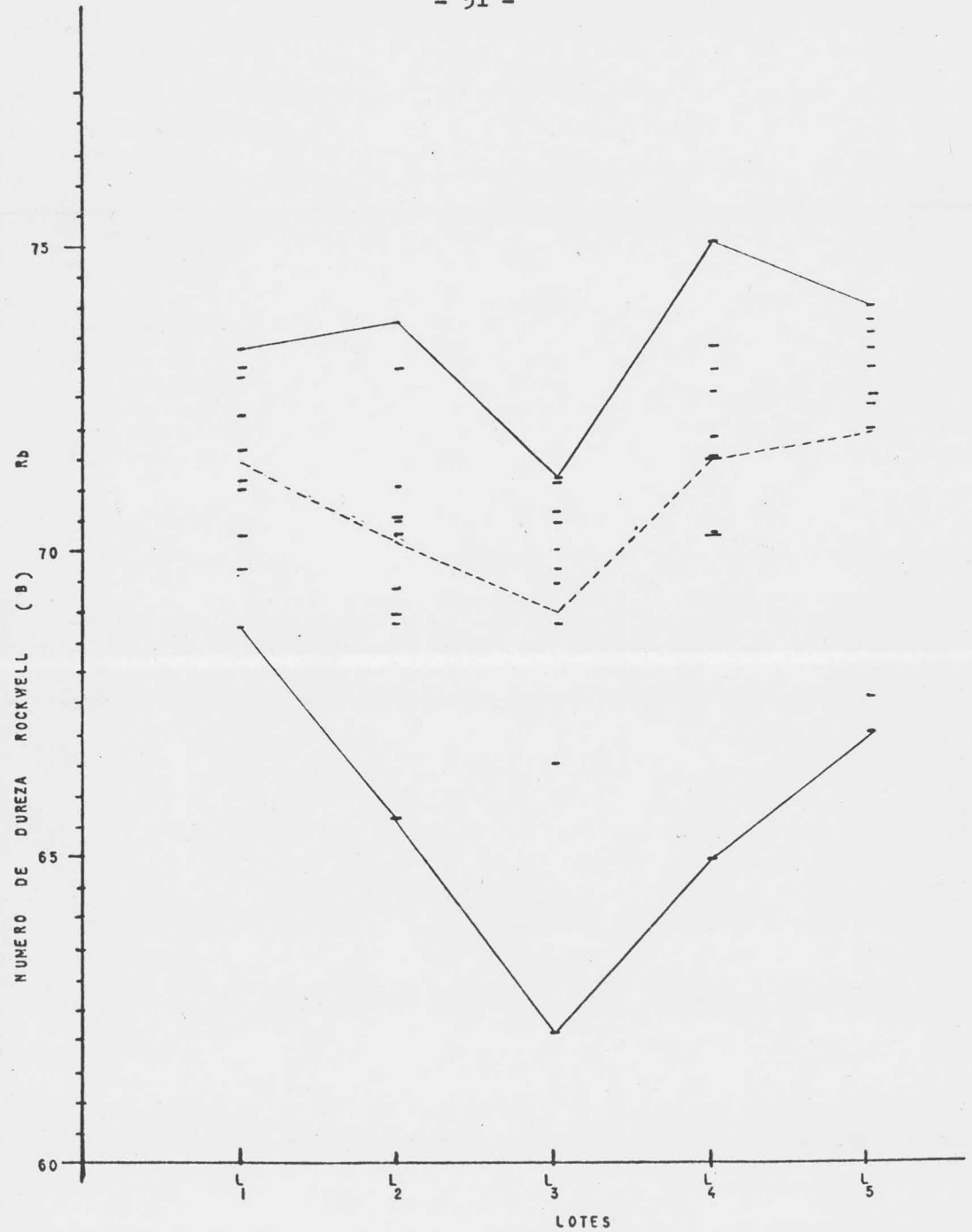


FIG III-0 NUMERO DE DUREZA ROCKWELL (B) - LOTES

III.5.- Análisis de las principales relaciones tensión-dureza.

En esta parte se analizarán las ecuaciones propuestas por los diferentes autores para interrelacionar la tensión-dureza.

III.5.1.- Comparación del esfuerzo de cedencia de la prueba de tensión con las ecuaciones propuestas, como se muestra en la fig.(III.9). Esto tiene como finalidad poder analizar el comportamiento de las fórmulas propuestas con la de referencia obtenida de la prueba de tensión.

Comparando la ecuación de Cahoon(11) con nuestro esfuerzo de cedencia de referencia, se observa que para nuestro material base normalizado presenta un valor demasiado inferior a lo pretendido, probablemente debido al bajo valor del coeficiente de endurecimiento por deformación y en los demás materiales recocidos el rango de variación no es tan alto y se puede decir que para nuestro primer caso no es recomendable y en el segundo sí.

Usando el método de Dinda(16) coincide para nuestro material normalizado y en los recocidos no, por lo cual se recomienda sólo en esos casos.

III.5.2.- Comparación del esfuerzo último ó a carga máxima ingenieril nominal con las fórmulas propuestas, como se ilustra en la fig.(III.10). Este párrafo tiene como finalidad comparar las ecuaciones sugeridas con la obtenida en la prueba de tensión.

Comparando la ecuación de Kehl(4), se observa que en nuestro metal base normalizado se aproxima bastante y en el caso de los recocidos presenta valores demasiados altos. De lo anterior se puede decir que no obtenemos lo pretendido y por tanto desechamos este método.

Las fórmulas de Cahoon(12) y de Tabor(11), tienen el mismo comportamiento, en ellas se puede notar también que en nuestro material normalizado se obtienen valores aproximados y en los recocidos resultados muy grandes, por lo cual no se recomiendan.

La ecuación propuesta por Cahoon(12) modificada en este trabajo de tesis, se visualiza que sí correlaciona para nuestros materiales normalizados y recocidos, aunque se presentan unos valores un poco elevados en los lotes 4 y 5; pero esto es debido al incremento de dureza que tiene en ellos.

III.5.3.- Comparación de las deformaciones últimas reales con las ecuaciones propuestas, como se observa en la fig.(III.11). Tiene la finalidad de efectuar comparaciones con la obtenida por medio de una prueba de tensión.

Sí observamos las gráficas de Hollomon y Low(5) y la de Tabor(12), tienen el mismo comportamiento, en nuestro material base normalizado se aproximan y en los recocidos presentan valores demasiados altos,

debido al coeficiente de endurecimiento por deformación. De lo anterior se puede decir que estos métodos no son recomendables.

De la ecuación de Hollomon y Low(5) modificada en este trabajo de tesis, entre una constante de 1.9, se nota que sí correlaciona, aunque presente unos resultados ligeramente elevados.

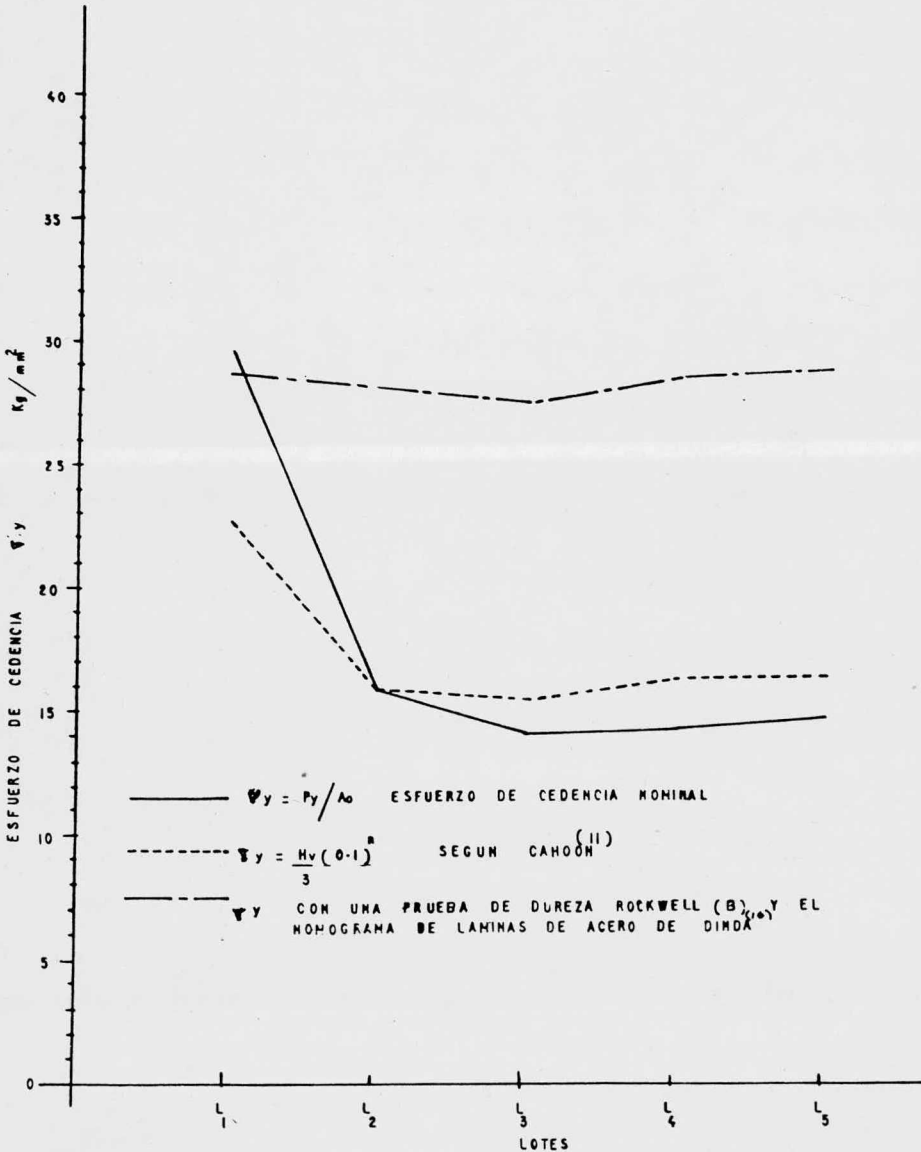


FIG III-9 COMPARACION DEL ESFUERZO DE CEDENCIA CON LAS ECUACIONES PROPUESTAS

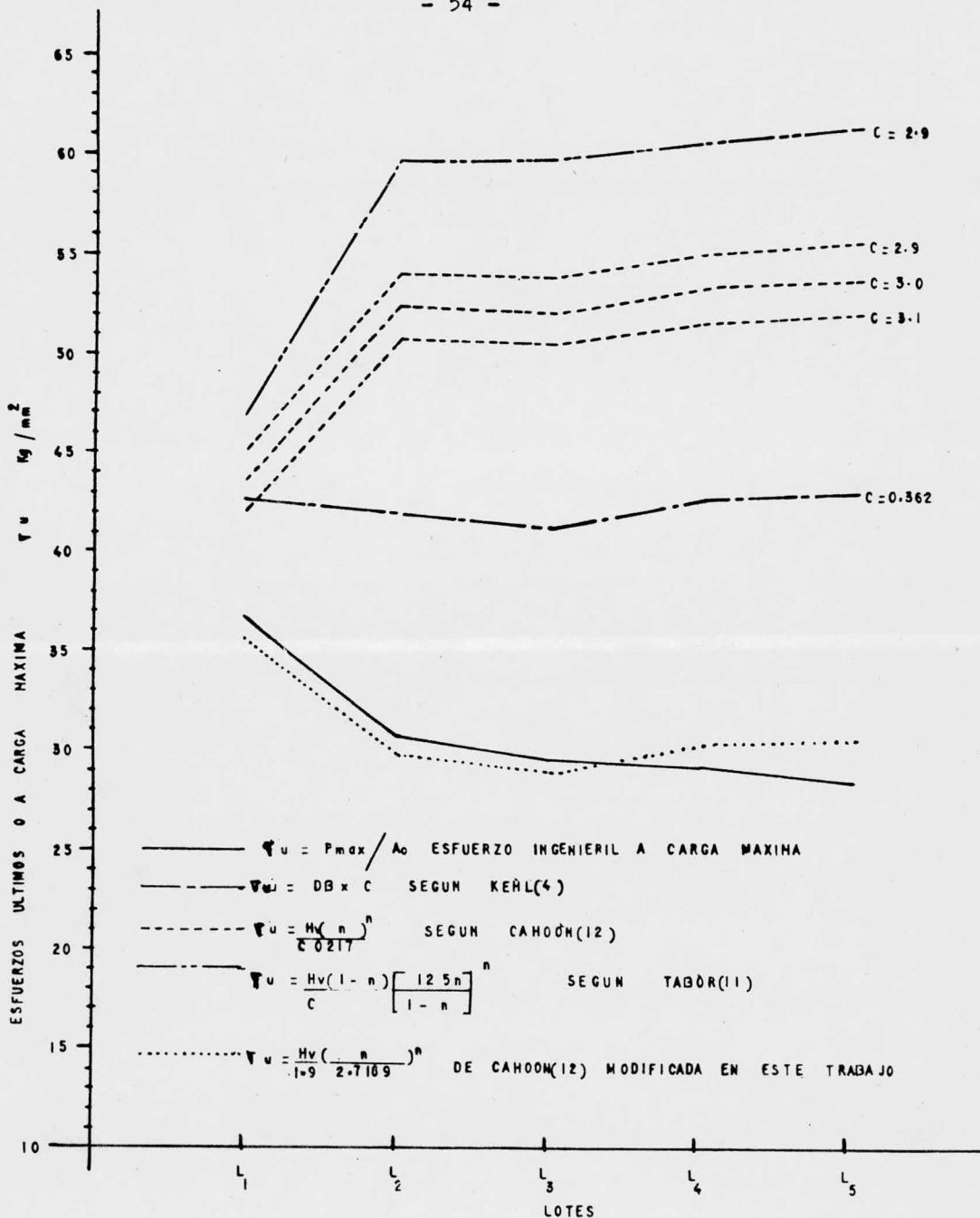


FIG III-10 COMPARACION DEL ESFUERZO ULTIMO NOMINAL CON LAS ECUACIONES PROPUESTAS

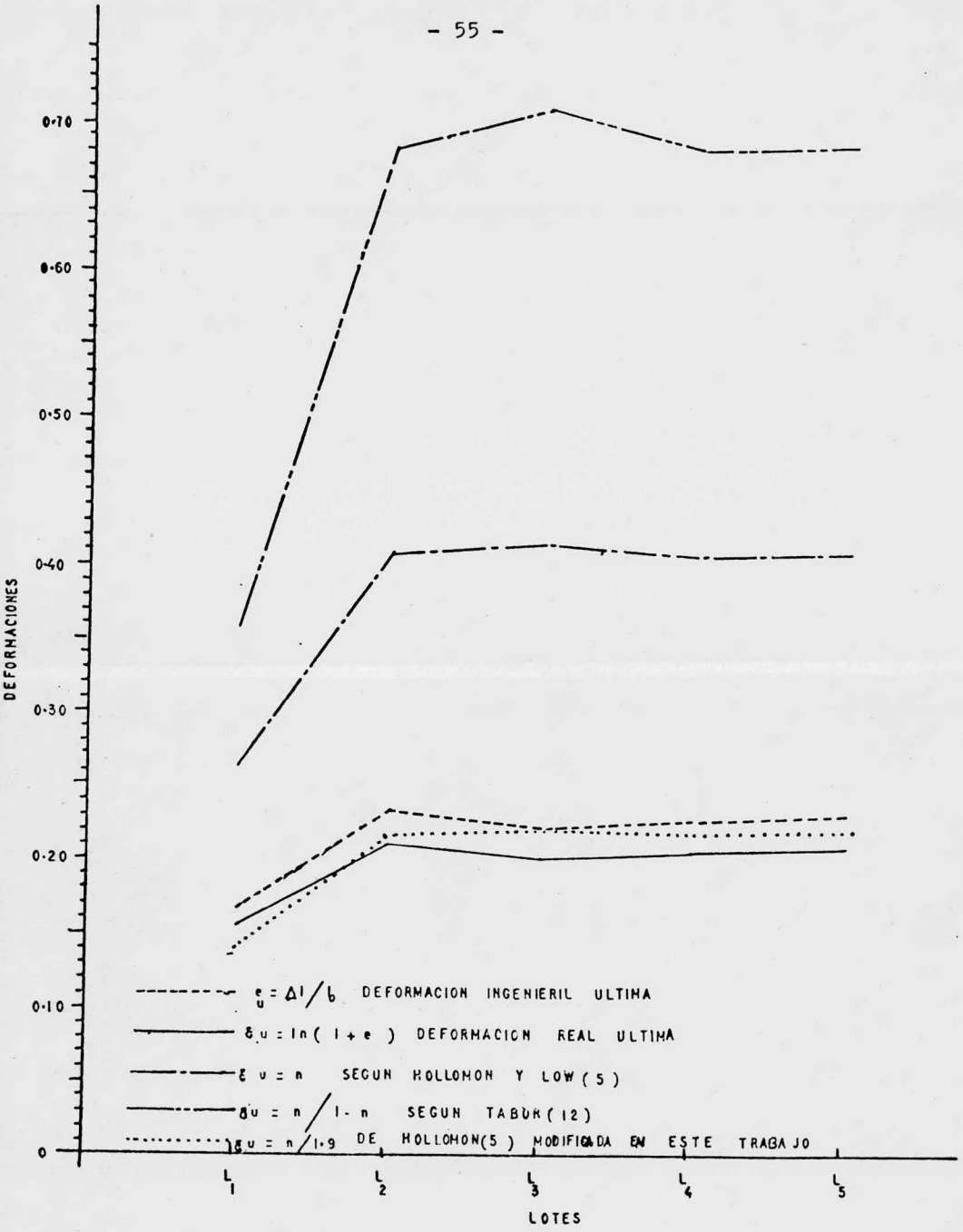


FIG III-11 COMPARACION DE LA DEFORMACION REAL CON LAS ECUACIONES PROPUESTAS

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1).- El coeficiente de endurecimiento por deformación fué obtenido de la prueba de tensión, según el método del capítulo I.3. También puede encontrarse con un ensayo de dureza Meyer ó con la medida del tamaño de grano sustituto en el metal deformado, como se describe en el capítulo I.4.
- 2).- El coeficiente de endurecimiento por deformación " n ", en nuestro metal base normalizado es bajo y en los recocidos es alto, para después permanecer constante conforme se incrementa el tiempo de recocido.
- 3).- El esfuerzo de cedencia obtenido de la ecuación de Cahoon(11), se ajusta bastante en el caso de los recocidos y en el metal base normalizado presenta resultados muy bajos, por lo cual sí funciona para el primer caso y para el segundo no.
- 4).- El esfuerzo de cedencia encontrado por el método de Dinda(16), con una prueba de dureza Rockwell B y usando el nomograma para láminas de acero, solamente es válido en el metal base normalizado y en los recocidos no.
- 5).- La fórmula sugerida por Kehl(4) para obtener el esfuerzo último ó a carga máxima, se aproxima en nuestro material base normalizado y en los recocidos se incrementa conforme avanza el tiempo. De lo anterior no es recomendable este método.
- 6).- De la ecuación propuesta por Cahoon(12) para hallar el esfuerzo último ó a carga máxima, los resultados obtenidos se aproximan a lo pretendido cuando $C = 3.1$ en nuestro metal base normalizado y en los recocidos presentan valores muy altos. Por tanto se puede decir que esta fórmula no sirve para correlacionar esta propiedad.
- 7).- La fórmula propuesta por Tabor(11) para encontrar el esfuerzo último ó a carga máxima, también muestra el mismo comportamiento que la de Cahoon(12), por lo cual la rechazamos.
- 8).- De la ecuación de Cahoon(12) para encontrar el esfuerzo último modificada en este trabajo de tesis, correlaciona para nuestros materiales normalizados y recocidos, como se ilustra en la fig.(III.10); pero usando una constante de $C = 1.9$ y la base de los logaritmos naturales, presentando resultados aceptables.
- 9).- Las fórmulas propuestas para encontrar las deformaciones últimas ó a carga máxima de Tabor(12) y Hollomon(5), presentan valores cercanos a lo pretendido en nuestro material base normalizado y en los recocidos se obtienen resultados muy altos, por lo cual no son recomendables estas ecuaciones.
- 10).- La ecuación de Hollomon(5) para encontrar la deformación última modificada en este trabajo de tesis, se aproxima bastante en nuestros materiales normalizados y recocidos, cuando el coeficiente de endurecimiento por deformación se divide entre 1.9.

11).- Al crecer la perlita en los intersticios de los granos de ferrita, contribuyen al deterioro de las propiedades mecánicas.

12).- Fórmulas ó métodos en donde se encontró correlación entre la tensión-dureza para el metal base normalizado.

12.1.- Esfuerzo de cedencia.

- El método de Dinda(16), con una prueba de dureza Rockwell B y el nomograma de laminas de acero.

12.2.- Esfuerzo último ó a carga máxima.

- La ecuación de Cahoon(12) modificada en este trabajo de tesis.

$$\sigma_u = \frac{Hv}{1.9} \left(\frac{n}{2.7189} \right)^n$$

12.3.- Deformación última ó a carga máxima.

- La fórmula de Hollomon y Low(5) modificada en este trabajo.

$$\epsilon_u = \frac{n}{1.9}$$

13).- Ecuaciones ó métodos en donde se encontró correlación entre la tensión-dureza para el material recocido ó de embastecimiento de grano.

13.1.- Esfuerzo de cedencia.

- Ecuación de Cahoon(11).

$$\sigma_y = \frac{Hv}{3} (0.1)^n$$

13.2.- Esfuerzo último ó a carga máxima.

- Fórmula de Cahoon(12) modificada en este trabajo de tesis.

$$\sigma_u = \frac{Hv}{1.9} \left(\frac{n}{2.7189} \right)^n$$

13.3.- Deformación última ó a carga máxima.

- La ecuación de Hollomon y Low(5) modificada en este trabajo.

$$\epsilon_u = \frac{n}{1.9}$$

Recomendaciones.

Si se quisieran aplicar las ecuaciones para correlacionar las propiedades de la prueba de tensión con las de dureza, se recomendaría usar el método: $\text{LOG } \sigma_R - V_s - \text{LOG } \xi$, para encontrar el coeficiente de --endurecimiento por deformación " n ". Seleccionando una velocidad en la cual se puedan leer los valores de las cargas y también una cierta escala (L = Baja, I = Intermedia, H = Alta) para graficar cargas unitarias - V_s - alargamientos unitarios, dependiendo del metal.

El extensómetro debe colocarse de tal manera que pueda graficarse --- hasta la rotura, aunque esto no es necesario, aparte de ello que ---- tenga la carrera suficiente para poder graficar lo pretendido y comprobar que se está trabajando en la escala adecuada. Este método --- presentaría una ventaja, ya que pueden obtenerse las deformaciones, - los esfuerzos de cedencia y los esfuerzos últimos ó a carga máxima, - para ser comparados posteriormente por las ecuaciones propuestas. En el caso de que se usara lámina de acero, también se podría encontrar el esfuerzo de cedencia por medio de pruebas de durezas Rockwell: Rf, Rb, Rg, R15T, R30T, R45T, y usando el nomograma de Dinda(16) para laminas de acero. Cuando no se cuente con los nomogramas con un pe--netrador esférico y variando las cargas se grafica:

$\text{LOG } P/d^2 - V_s - \text{LOG } d/D$, para encontrar la constante " A ", la cual está relacionada para el esfuerzo de cedencia por $\sigma_y = 325 A$.

Donde:

$$d = 2\sqrt{h(D - h)}$$

d = Diámetro de la penetración

D = Diámetro del penetrador

h = Profundidad de penetración.

Los resultados obtenidos del esfuerzo de cedencia pueden ser comparados con los de referencia, encontrados en la prueba de tensión.

También se recomendaría efectuar una serie de pruebas análogas a este trabajo de una gran variedad de materiales seleccionando los resultados que sí correlacionan las propiedades de la prueba de tensión con los de dureza, haciendo una tabla de: n, σ_y , σ_u , ξ_u , los cuales -- servirán como referencia para posteriores trabajos que quieran encontrar las mismas propiedades pero con un ensayo de dureza.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Sydney H. Avner
Introducción a la Metalurgia Física
Mc Graw Hill
2a. Edición 1979
p. 139-153, 235-239, 253-263.
- 2.- Van Vlack
Materiales para Ingeniería
Editorial CECSA, 1979
p. 140-141.
- 3.- George E. Dieter
Metalurgia Mecánica
Editorial Aguilar, 1967
p. 253-267, 301-315.
- 4.- Kehl, George L.
Practica Metalográfica
Madrid, Editorial Aguilar, 1963
p. 216-217.
- 5.- Calvo Rodés Rafael
Metales y aleaciones
Tomo II.- Propiedades y tratamientos
Instituto Nacional de Técnica Aeronautica " Esteban Terrados ".
Madrid, 1957.
p. 81-116.
- 6.- Determinación de las Durezas Rockwell.
Dirección General de Normas.
D - 119 - 1975.
- 7.- Determinación de la Dureza Vickers en Materiales Metálicos.
Dirección General de Normas.
NOM - B - 118 - 1974.
- 8.- Determinación de la Dureza Brinell en Materiales Metálicos.
Dirección General de Normas.
NOM - B - 116 - 1981.
- 9.- Métodos de Prueba de Tensión para Productos de Acero.
Dirección General de Normas.
NOM - B - 310 - 1981.
- 10.- Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents
(n - values) of Metallic Sheet Materials ANSI/ASTM E 646-78
p. 739-748.

- 11.- J. R. Cahoon, W. H. Broughton, and A. R. Kutzak.
The Determination of Yield Strength from Hardness Measurements.
Metallurgical Transactions.
Volume 2, July, 1971.
p. 1979-1983.
- 12.- J. R. Cahoon.
And Improved Equation Relating Hardness to Ultimate Strength.
Metallurgical Transactions.
Volume 3, November, 1972.
p. 3040.
- 13.- John Moteff and Paul R. Sieber.
A Correlation Between the Hot-Hardness and the Hot-Tensile ---
Properties of AISI 304 Stainless Steel.
Metallurgical Transactions.
Volume 5, January, 1974.
p. 315-317.
- 14.- J. Moteff, R. K. Bhargava, and W. C. Mc Cullough.
Correlation of the Hot-Hardness with the Tensile Strength of
304 Stainless Steel to Temperatures of 1200^oC.
Metallurgical Transactions A.
Volume 6A May, 1975.
p. 1101-1104.
- 15.- D. J. Abson F. J. Gurney.
Hardness, Strength, and Elongation Correlations for some Tita-
nium-Base Alloys.
Metals Technology.
November 1974.
p. 483-489.
- 16.- Robert A. George, Subimal Dinda, and Arthur J. Kasper.
Estimating Yield Strength from Hardness Data.
Metal Progress.
p. 30-35.
- 17.- Deflectometer - model PD - 1M
Microformer tips
Baldwin-Lima-Hamilton Corp.
Electronics & Instrumentation Div.
Waltham 54, Massachusetts 10/57

I N D I C E

	Páginas
CAPITULO I.- FUNDAMENTOS TEORICOS.	
I.1.- Prueba de tensión	1
I.1.1.- Principales conceptos usados en la prueba de tensión	1-2
I.1.2.- Fórmulas empleadas en la prueba de tensión	3
I.1.3.- Dimensiones de la probeta de tensión plana	4
I.2.- Pruebas de durezas	4-10
I.3.- Cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación	11
I.4.- Análisis de la correlación tensión-dureza, realizada por los investigadores en este ramo.....	11-22
I.5.- Recocidos	23
I.6.- Fases del sistema hierro-carbono.	24-25
CAPITULO II.- TRABAJO EXPERIMENTAL.	
II.1.- Procedimientos que intervienen en la fabricación de la probeta de tensión plana.....	26-29
II.2.- Procedimientos para efectuar los recocidos de las probetas de tensión.	30
II.3.- Proceso para efectuar la prueba de tensión	30
II.4.- Prueba de dureza Rockwell(B)	31
II.5.- Proceso para fabricar las probetas metalográficas, obtención de micrografías y cálculo del tamaño de grano.	32
II.6.- Cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación (n) del metal base	33-35
II.7.- Problemas y soluciones presentados en la elaboración de probetas y pruebas	36-38

	Páginas
CAPITULO III.- ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS.	
III.1.- Medidas del tamaño de grano a 100x y cálculo del número de granos por pulgada cuadrada	39-44
III.2.- Análisis de los datos obtenidos con la prueba de tensión.	44
III.2.1.- Esfuerzo de cedencia	44 y 46
III.2.2.- Esfuerzo último ó a carga máxima	45 y 47
III.2.3.- Deformación última ó a carga máxima.	45 y 48
III.3.- Análisis del coeficiente de endurecimiento por deformación " n ".....	45 y 49-50
III.4.- Análisis de la dureza Rockwell B	49 y 51
III.5.- Análisis de las principales relaciones tensión-dureza	52
III.5.1.- Comparación del esfuerzo de cedencia de la prueba de tensión con las ecuaciones propuestas	52 y 53
III.5.2.- Comparación del esfuerzo último ó a carga máxima ingenieril ó nominal con las fórmulas propuestas.	52 y 54
III.5.3.- Comparación de las deformaciones últimas reales con las ecuaciones propuestas.....	52-53 y 55
CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	56-58
BIBLIOGRAFIA	59-60
INDICE	61-62