

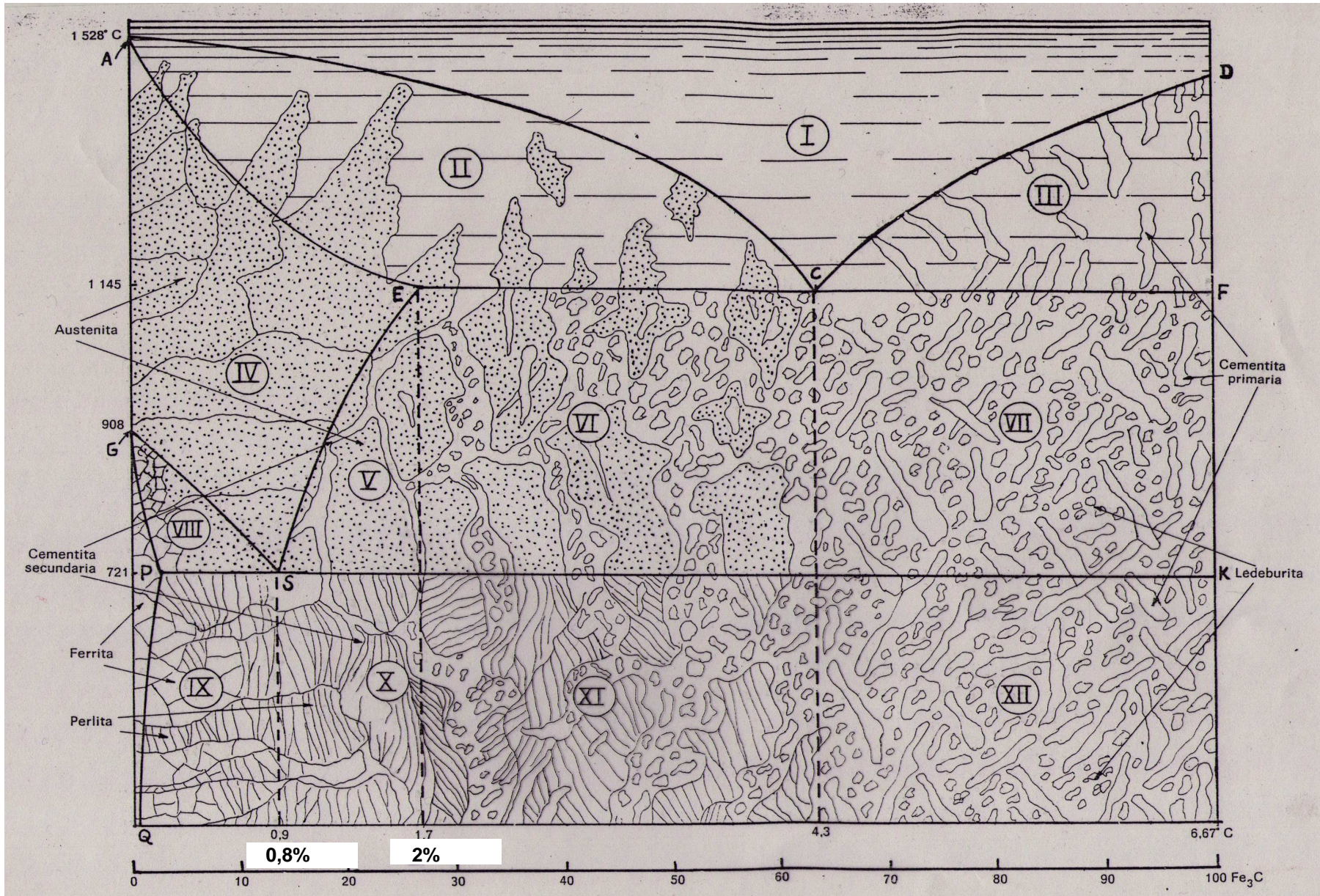


# ESTUDIO Y ENSAYO DE MATERIALES

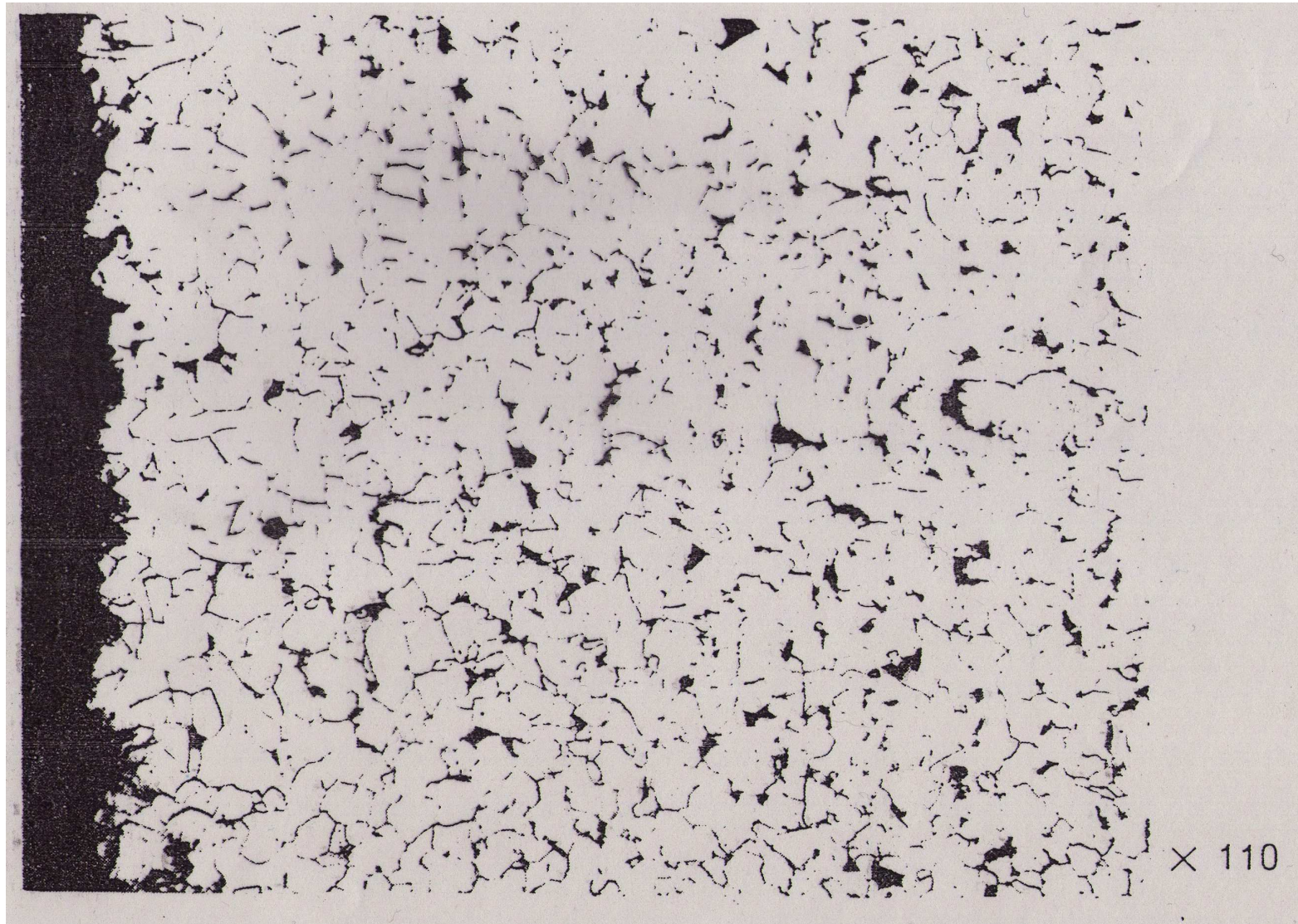
INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD CATÓLICA  
ARGENTINA



# DIAGRAMA HIERRO CARBONO Fe-C



## FERRITA



Acero extradulce:  $C = 0,10\%$ . Ferrita proeutectoide en forma de polígonos y pequeñas áreas oscuras de perlita. Tubo de caldera.

## FERRITA

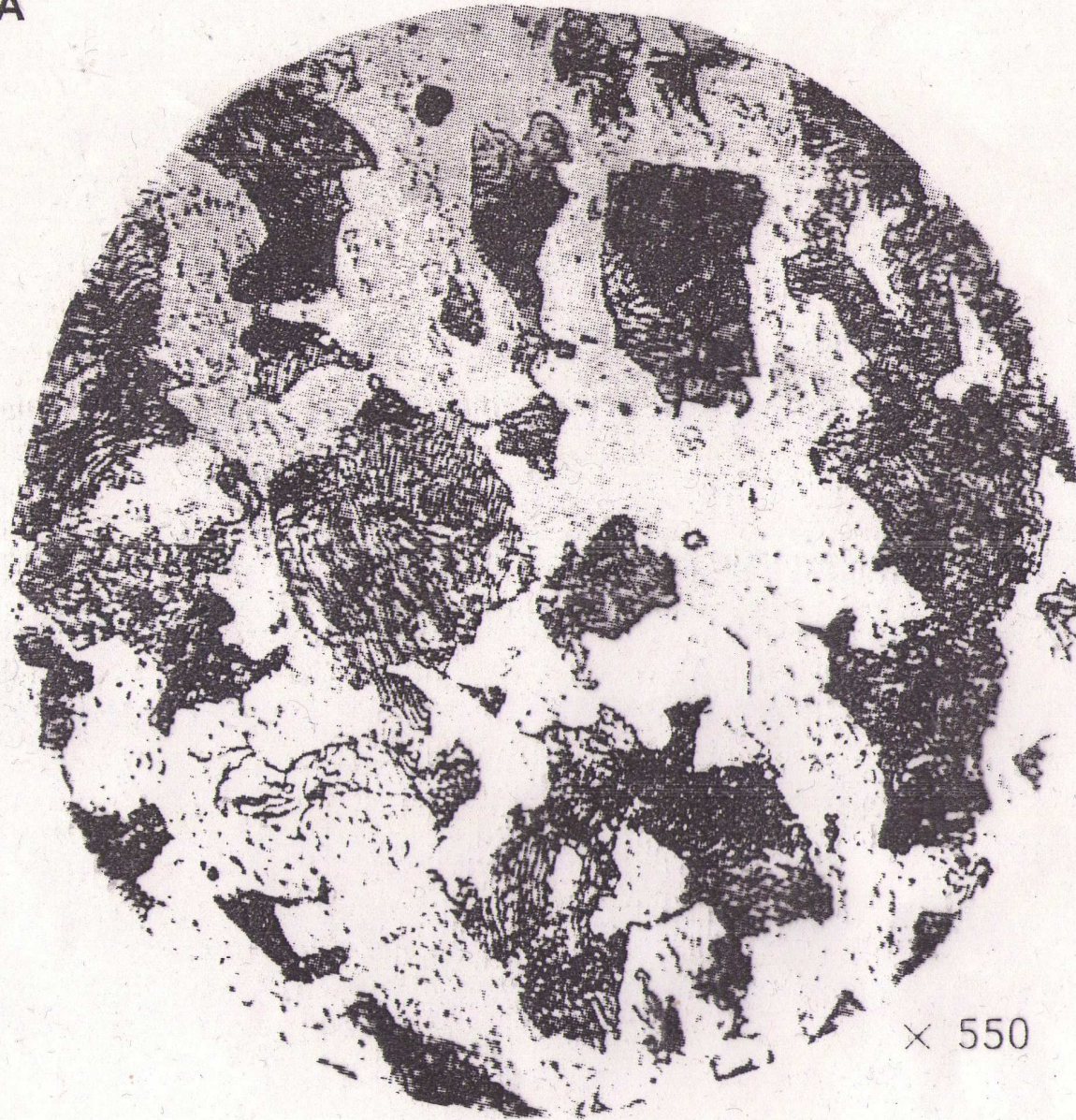


FIG. VIII-8. Acero al carbono (hipoeutectoide: C = 0,38 %). Perlita laminar y ferrita proeutectoide. Ataque: nital 2<sup>o</sup>.

× 550

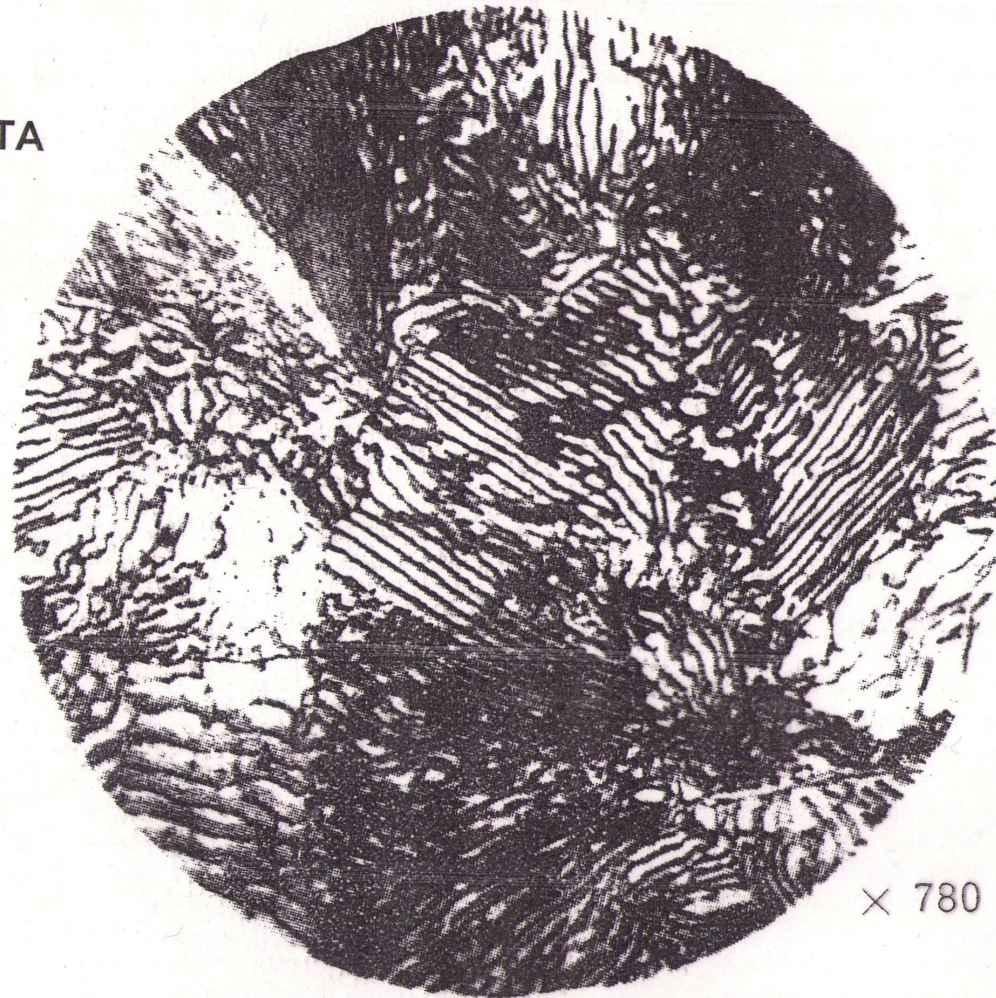
FERRITA



× 140

Acero hipoeutectoide: C = 0,52 ‰. Perlita y ferrita en forma de red o malla.

PERLITA



Acero al carbono (eutectoide: C = 0,87 %).

Perlita laminar.

Acero recocido a 780° C.

Dureza:  $HR_B = 97$ ,  $H = 222$ .

Ataque: picral 4 %.



## PERLITA



FIGURA 20

× 1.500

Perlita grosera. Formada por láminas de cementita (negra) y ferrita (blanca) (Vilella).

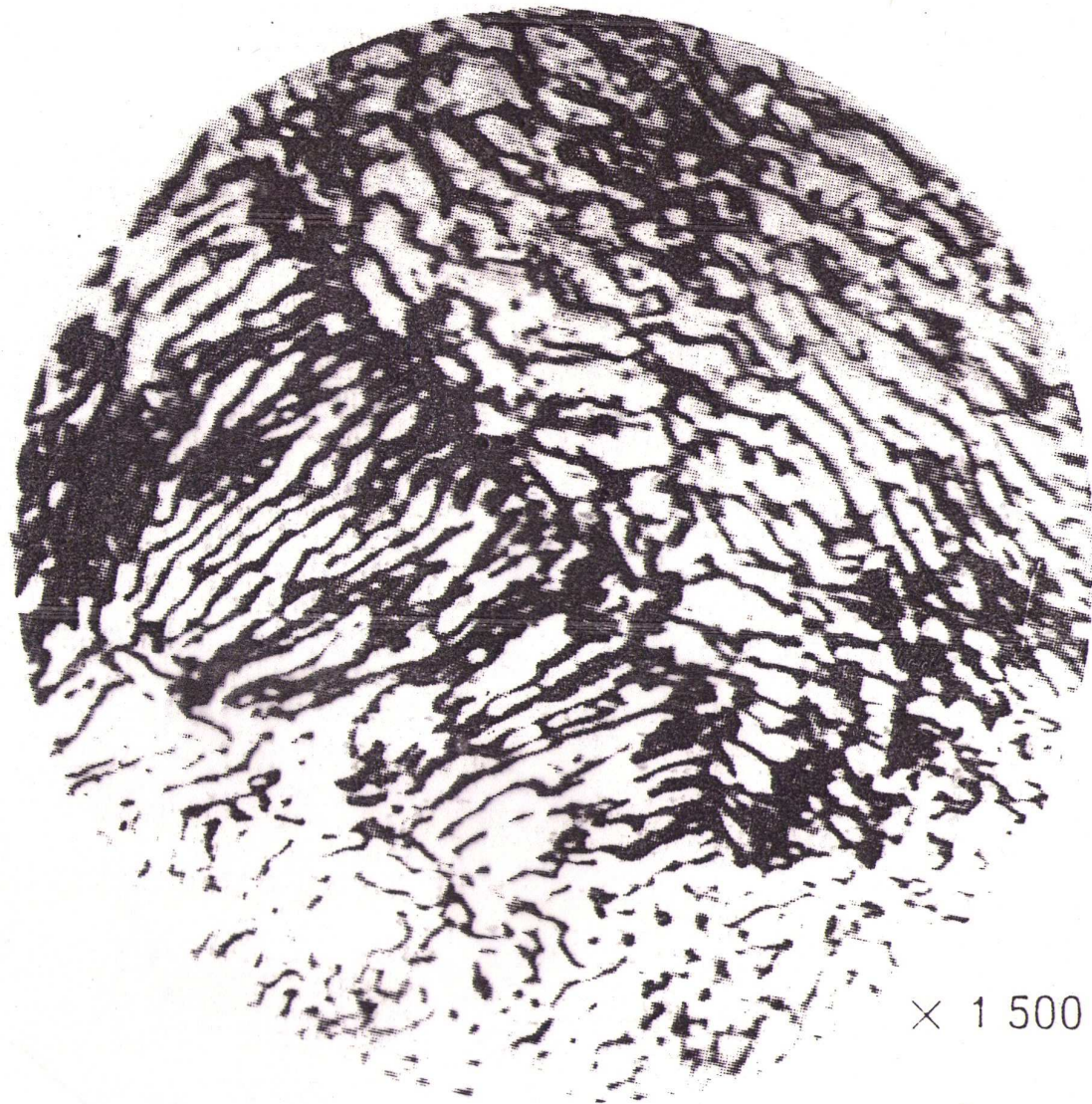
## CEMENTITA SECUNDARIA

Acero al carbono (extra duro: C = 0,87 ‰). Eutectoide perlita. Perlita laminar constituida por láminas blancas de cementita y oscuras de ferrita. Acero recocido a 780° C.

Dureza:

HR<sub>B</sub> = 97, H = 222.

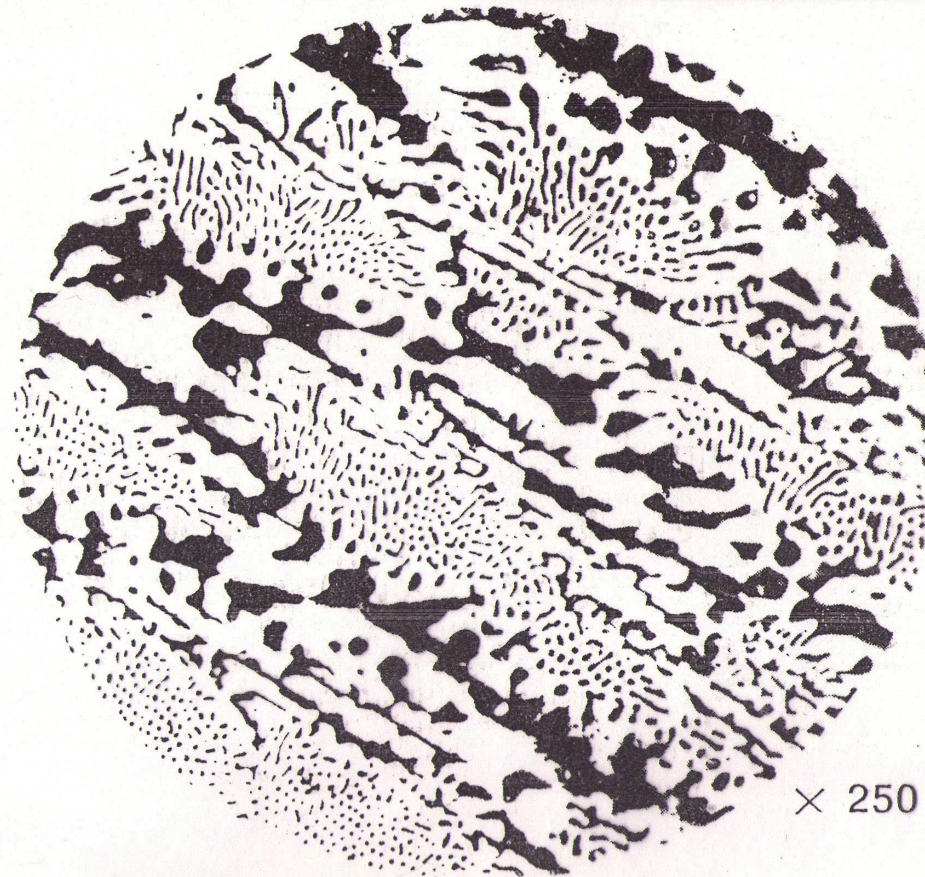
Ataque: picral 4 ‰.



× 1 500

Formando parte del eutectoide (fase cementita de la perlita laminar)

CEMENTITA  
PRIMARIA

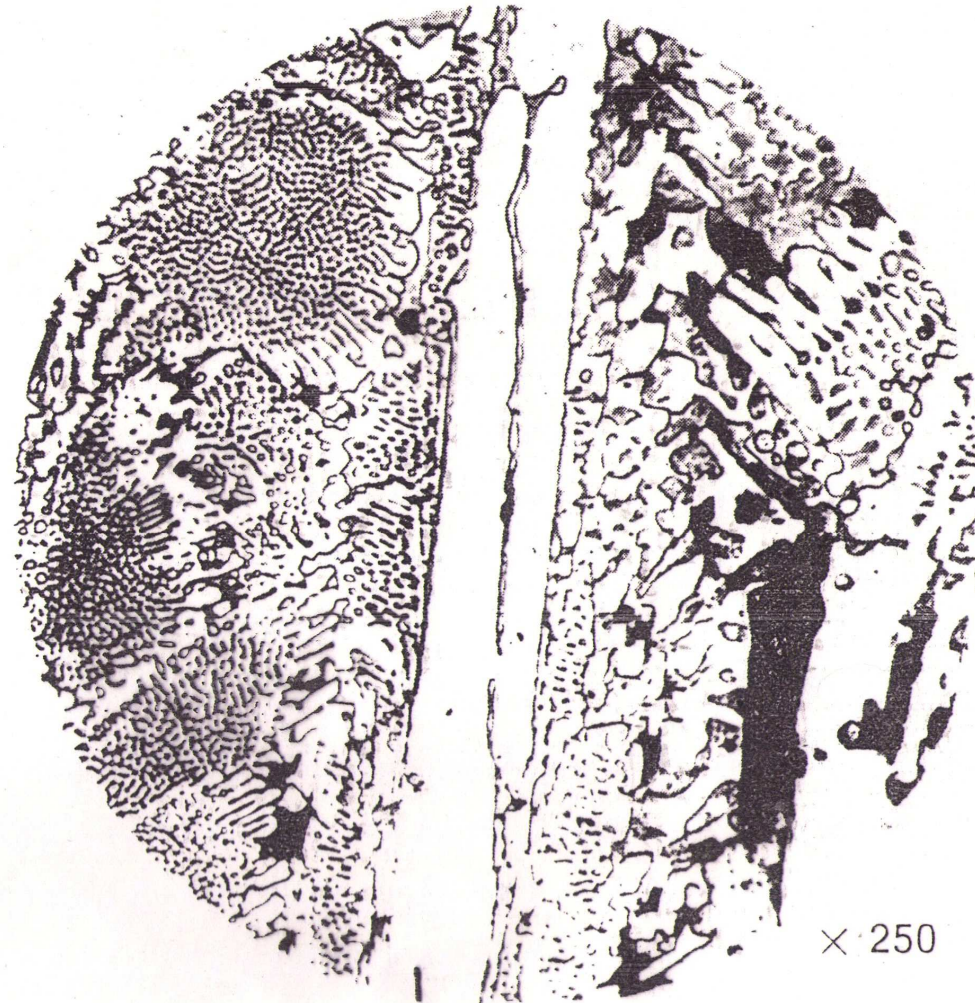


Fundición blanca eutéctica. Ledeburita (eutéctico formado por cementita primaria y cristales mixtos constituidos por perlita y cementita secundaria).

Dureza:  $HR_c = 57$ ,  $H = 573$ .

Ataque: nital 2 %.

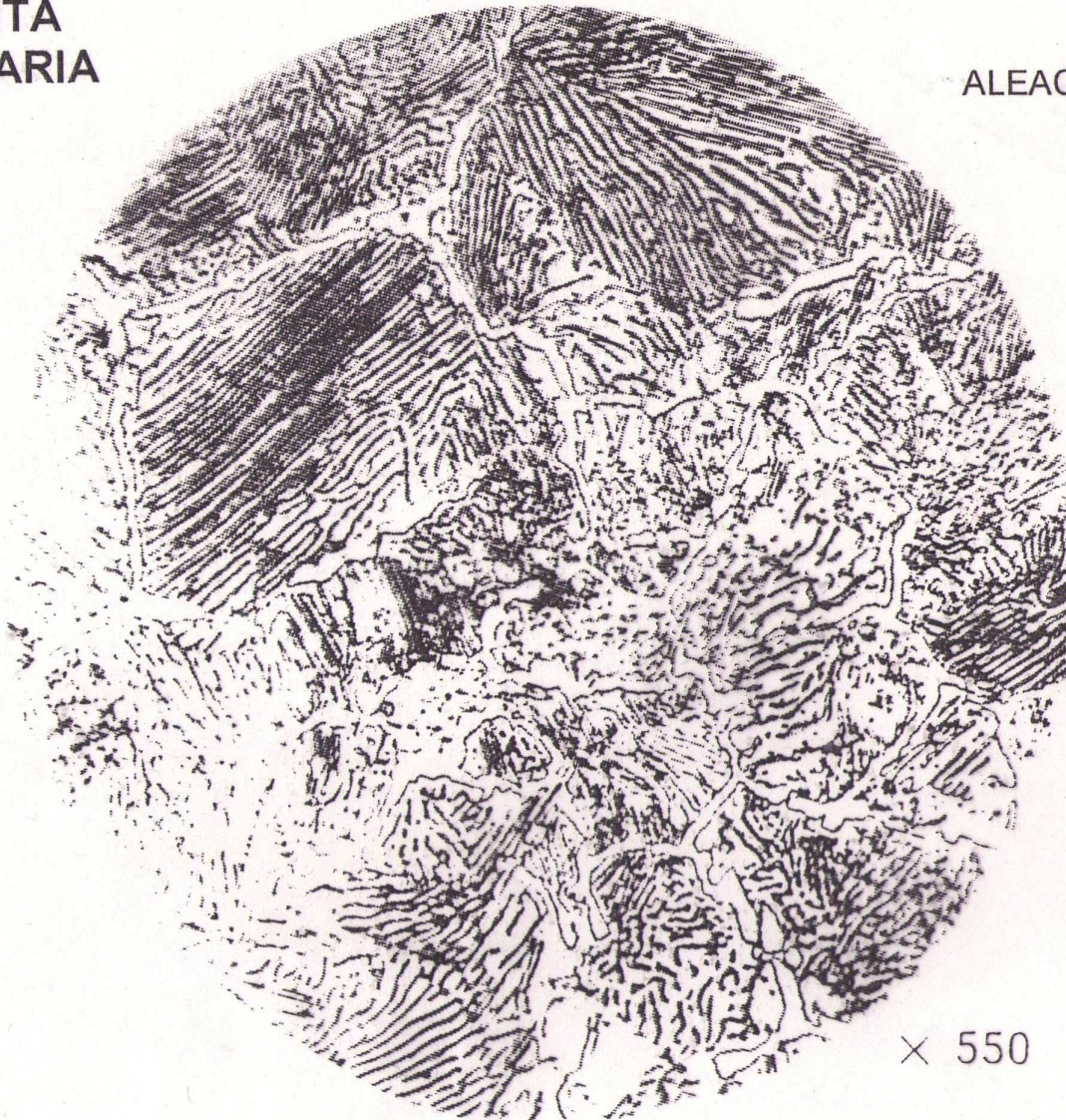
CEMENTITA  
PRIMARIA



Fundición blanca hipereutética. Le-  
deburita y cementita primaria en forma de agujas  
blancas o callejones.



## CEMENTITA SECUNDARIA



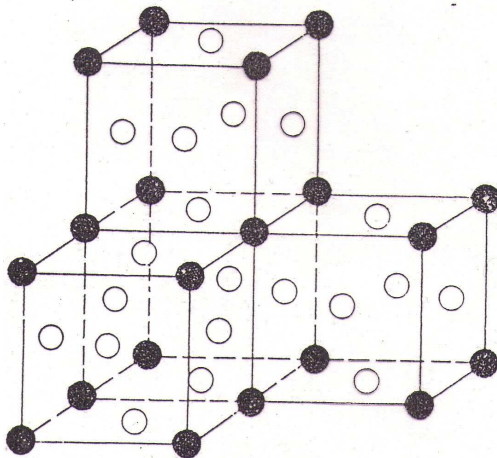
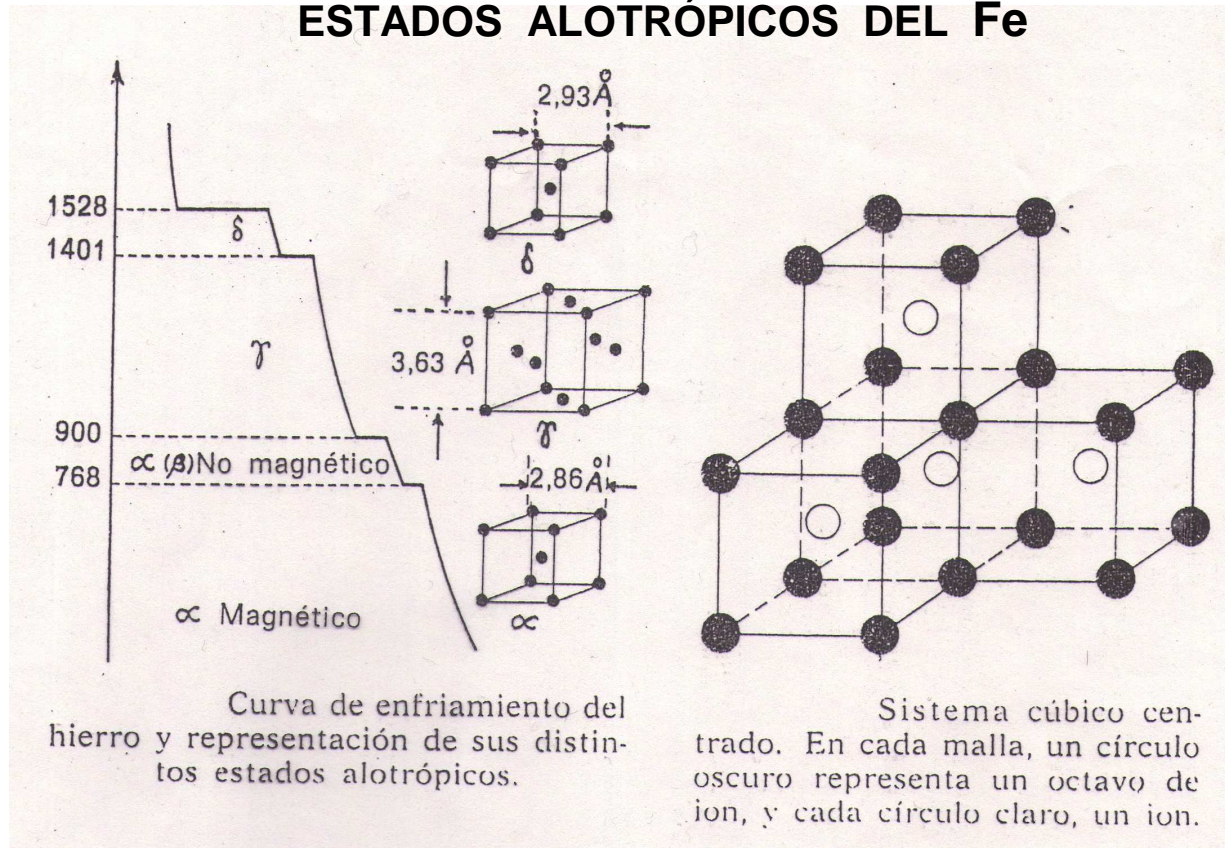
CEMENTITA SECUNDARIA  
(PROEUTECTOIDE)  
ALEACIONES CON MÁS DE 0,9 % DE C.

Acero  
al carbono (hipereu-  
tectoide: C = 1,3 ‰).  
Perlita laminar y ce-  
mentita en forma de  
red o malla.  
Ataque: nital 2 ‰.

× 550

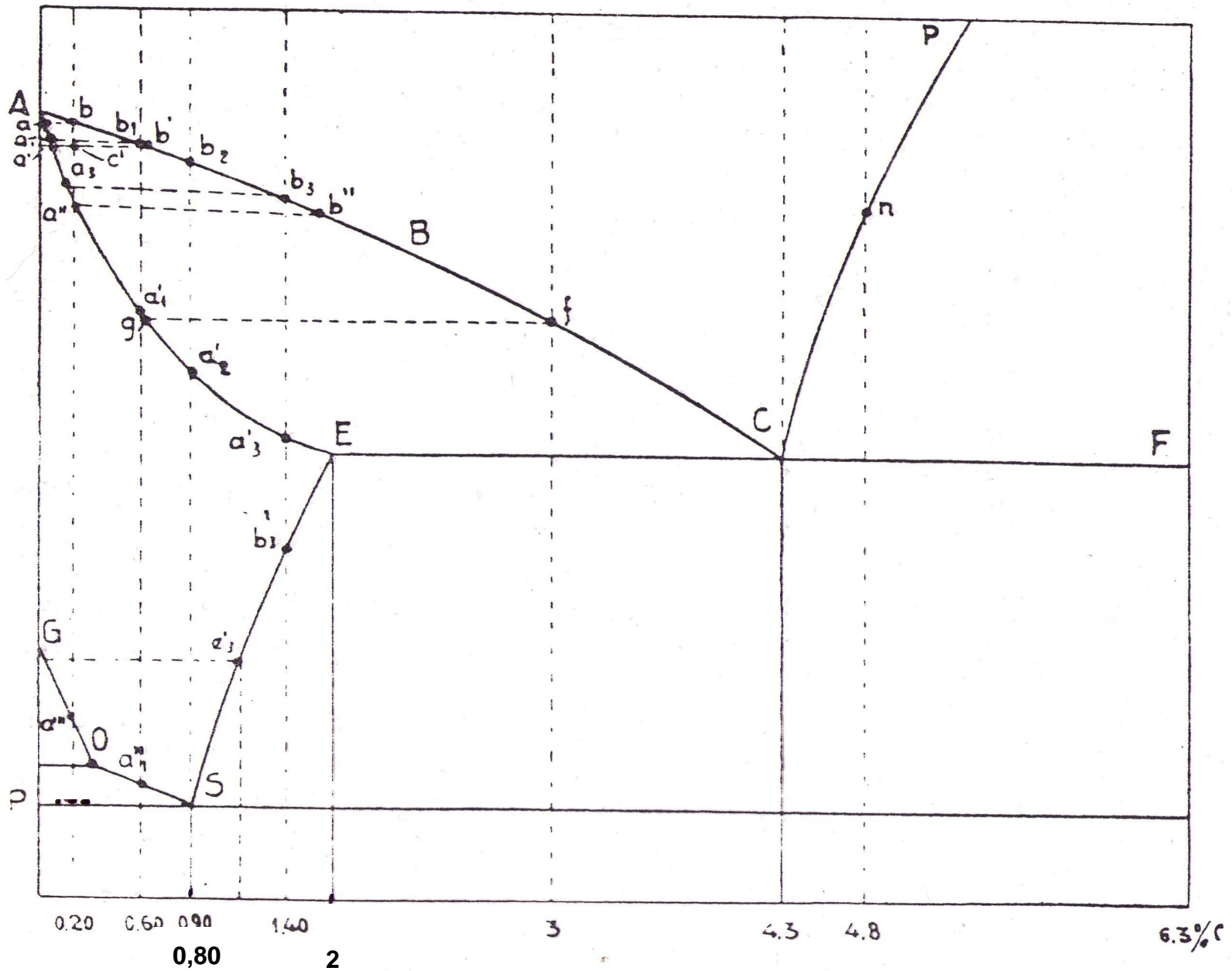


## ESTADOS ALOTRÓPICOS DEL Fe



Sistema cúbico de caras centradas. En una malla, cada círculo oscuro representa un octavo de ion, y cada círculo, medio ion.

# DIAGRAMA Fe - C





## ACEROS AL CARBONO RECOCIDOS

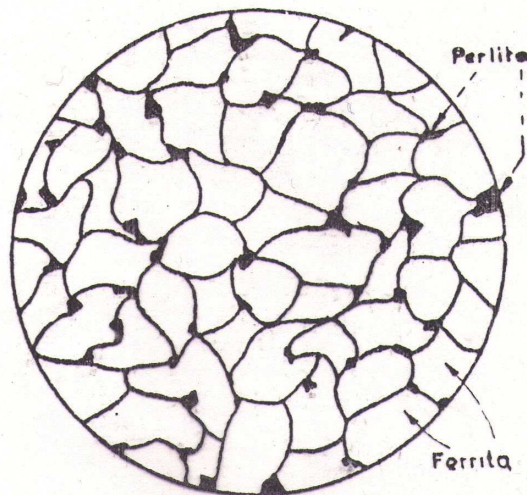


FIGURA 12  
× 150  
0,10 % de C

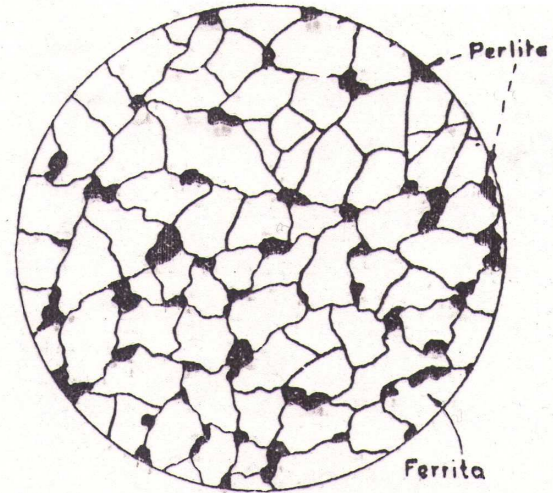


FIGURA 13  
× 150  
0,20 % de C

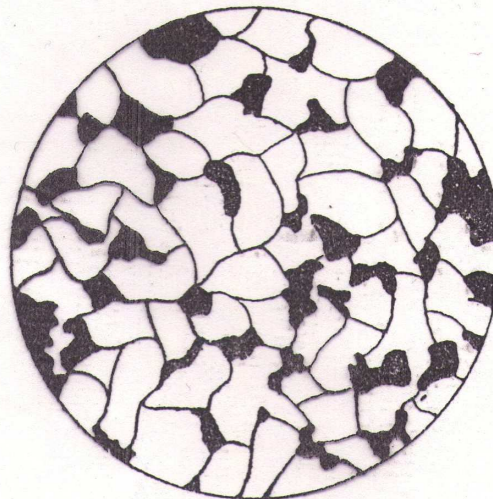


FIGURA 14  
× 150  
0,30 % de C

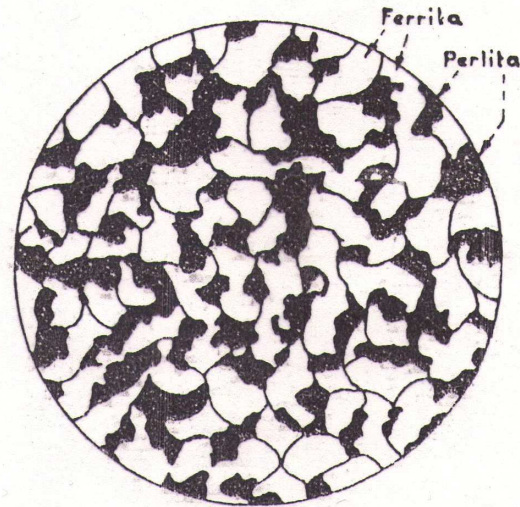


FIGURA 15  
× 150  
0,40 % de C



## ACEROS AL CARBONO RECOCIDOS

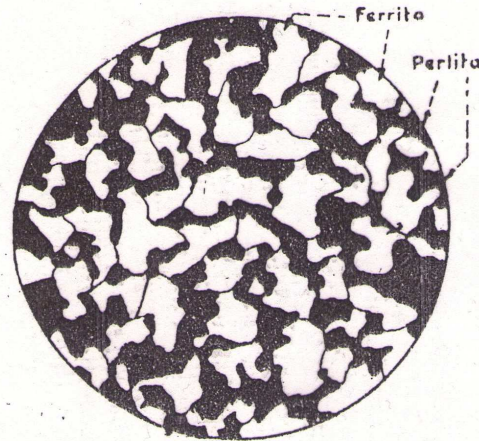


FIGURA 16  
× 150  
0,50 % de C

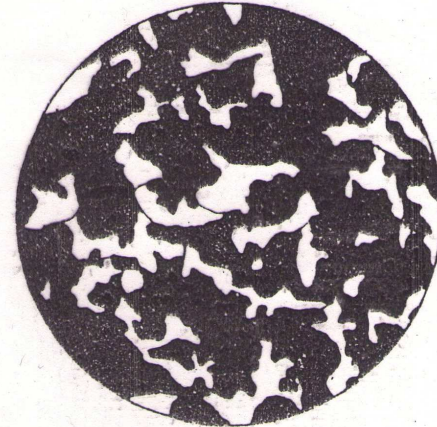


FIGURA 17  
× 150  
0,60 % de C

Microestructura de los aceros al carbono recocidos.

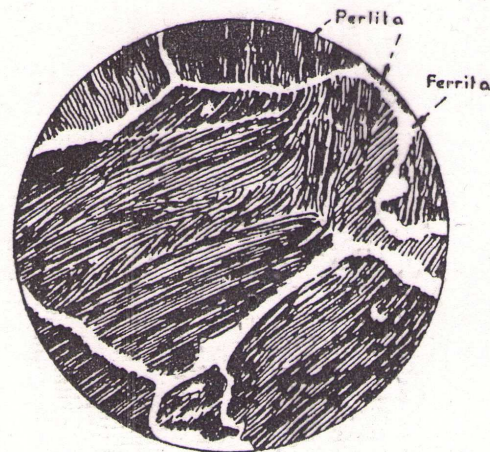


FIGURA 18  
× 450  
0,75 % de C

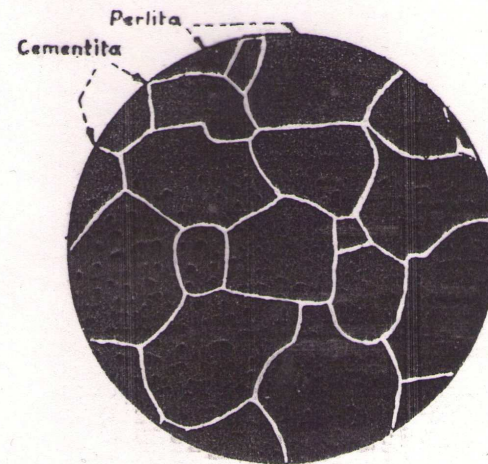
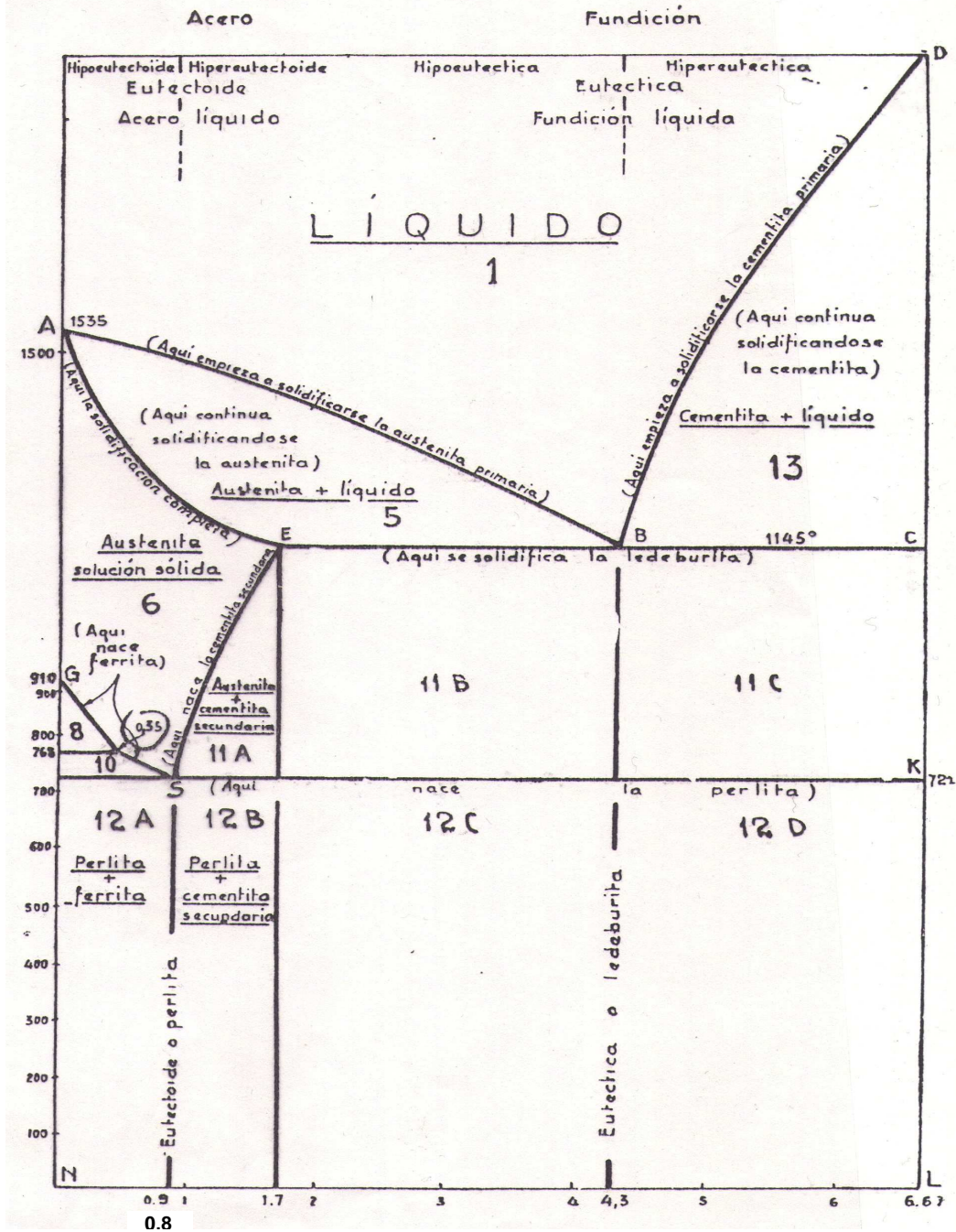
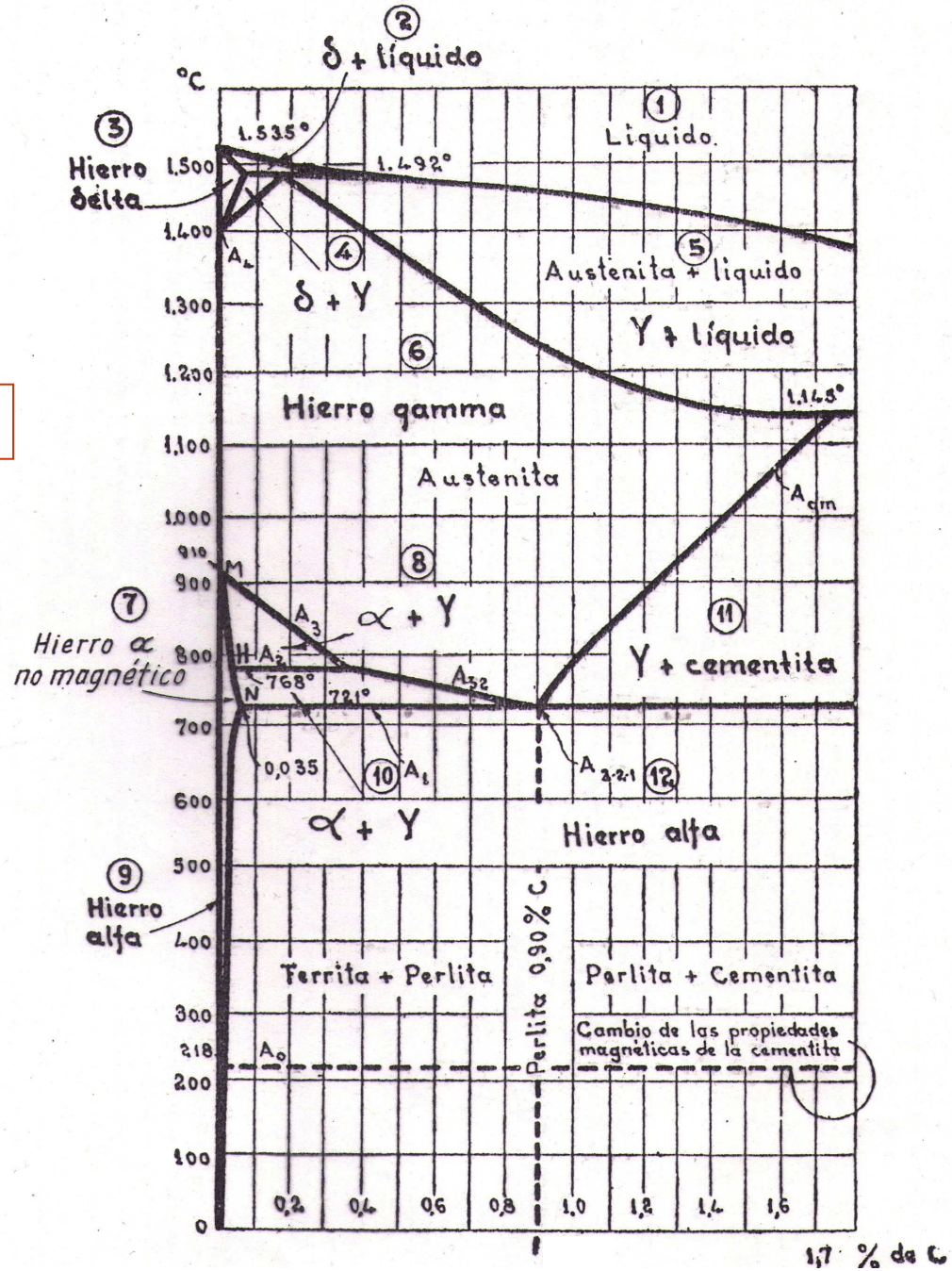


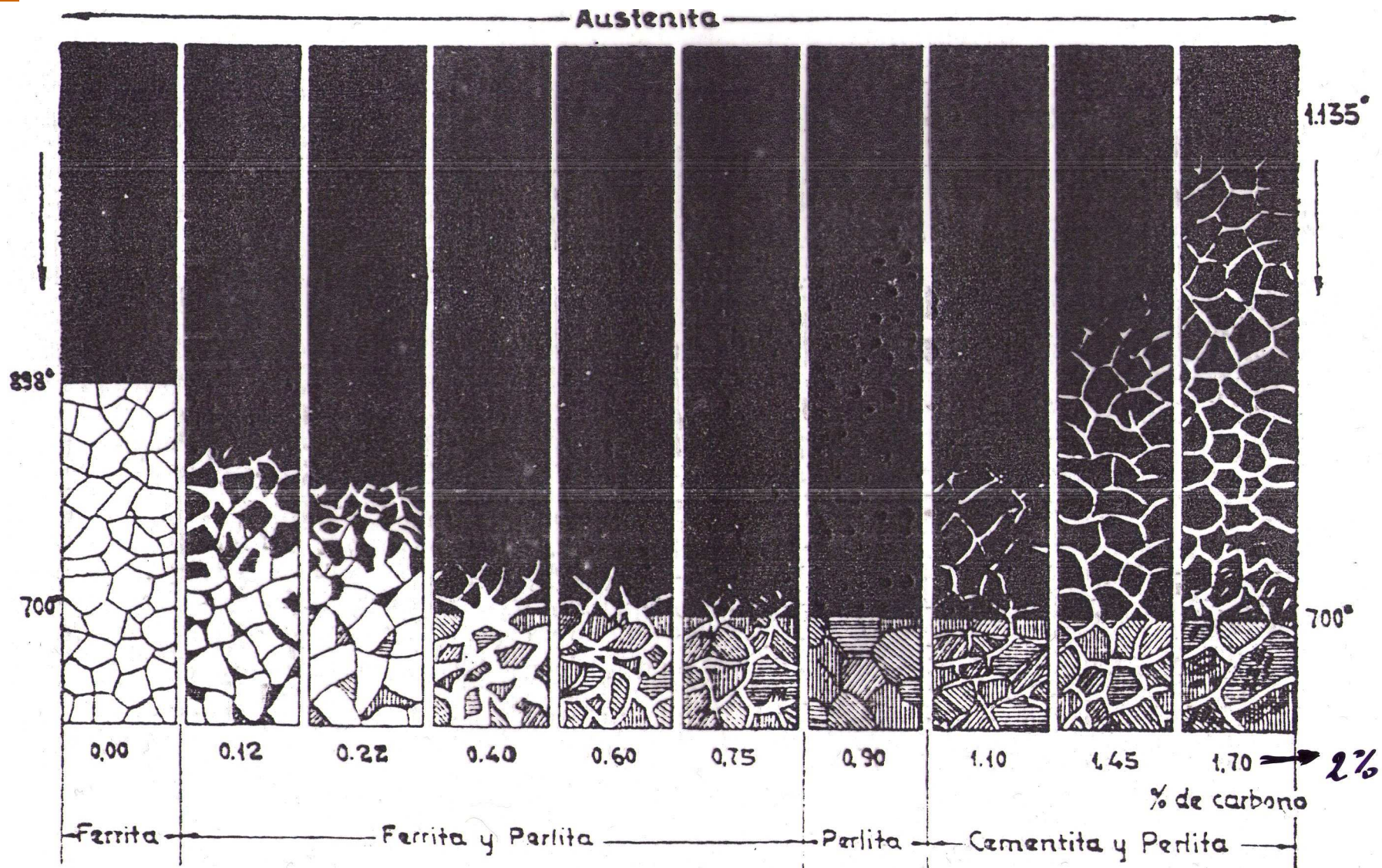
FIGURA 19  
× 250  
1,20 % de C

# DIAGRAMA Fe-C

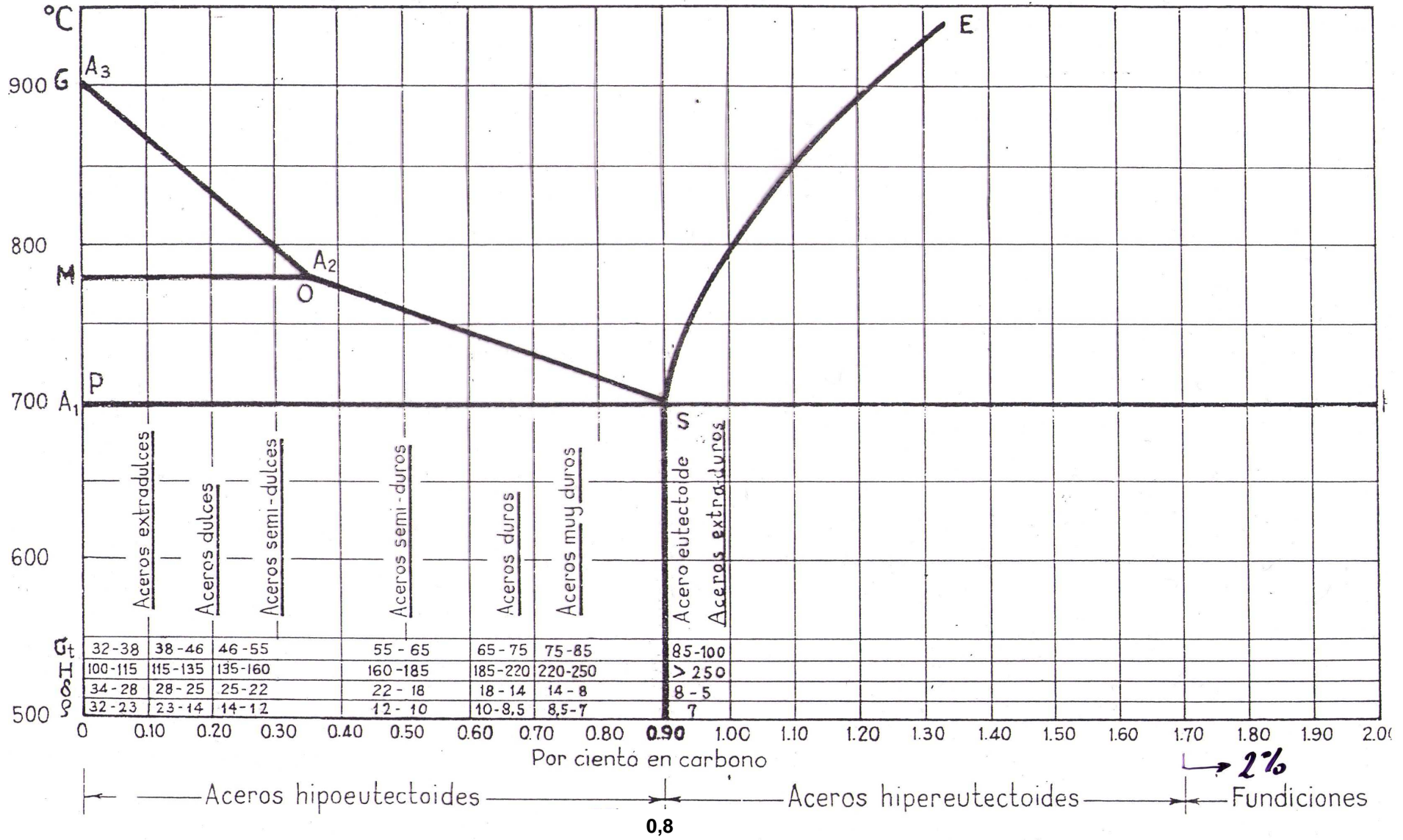


# DIAGRAMA Fe-C





Descomposición de la austenita en otros constituyentes, en el proceso de enfriamiento de diversas aleaciones hierro-carbono.

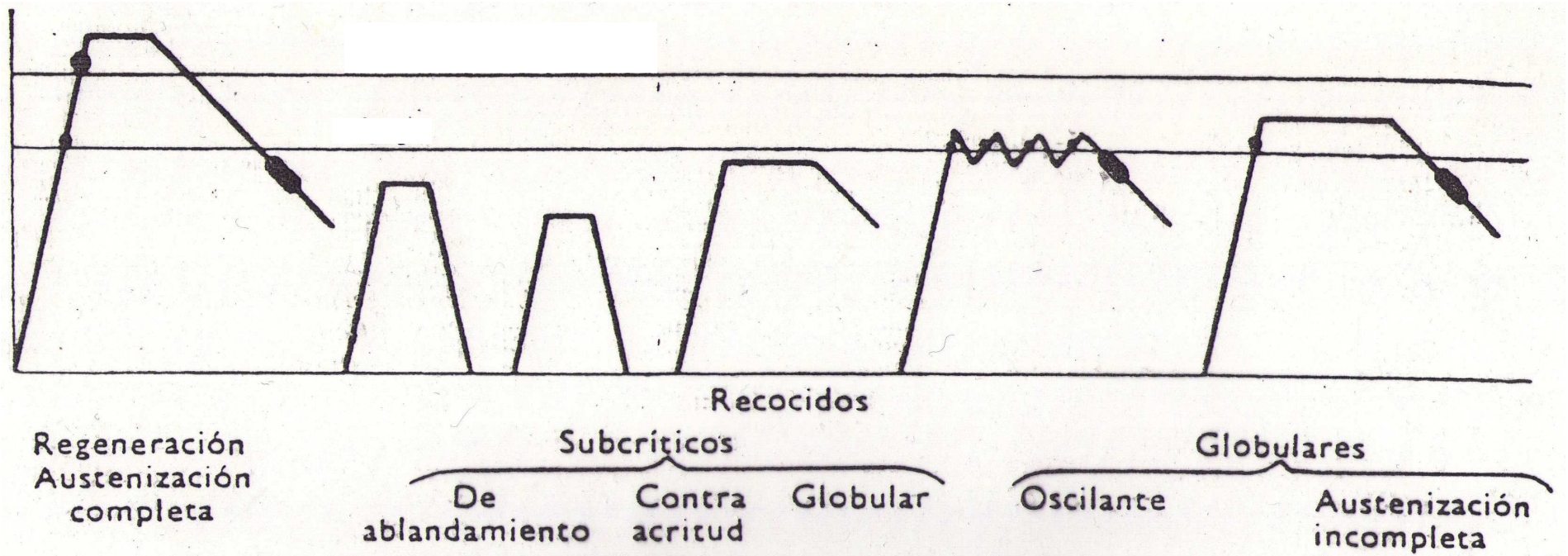


$\delta$ :  $\Delta\%$   
 $\beta$ : Resiliencia

Clasificación de los aceros.

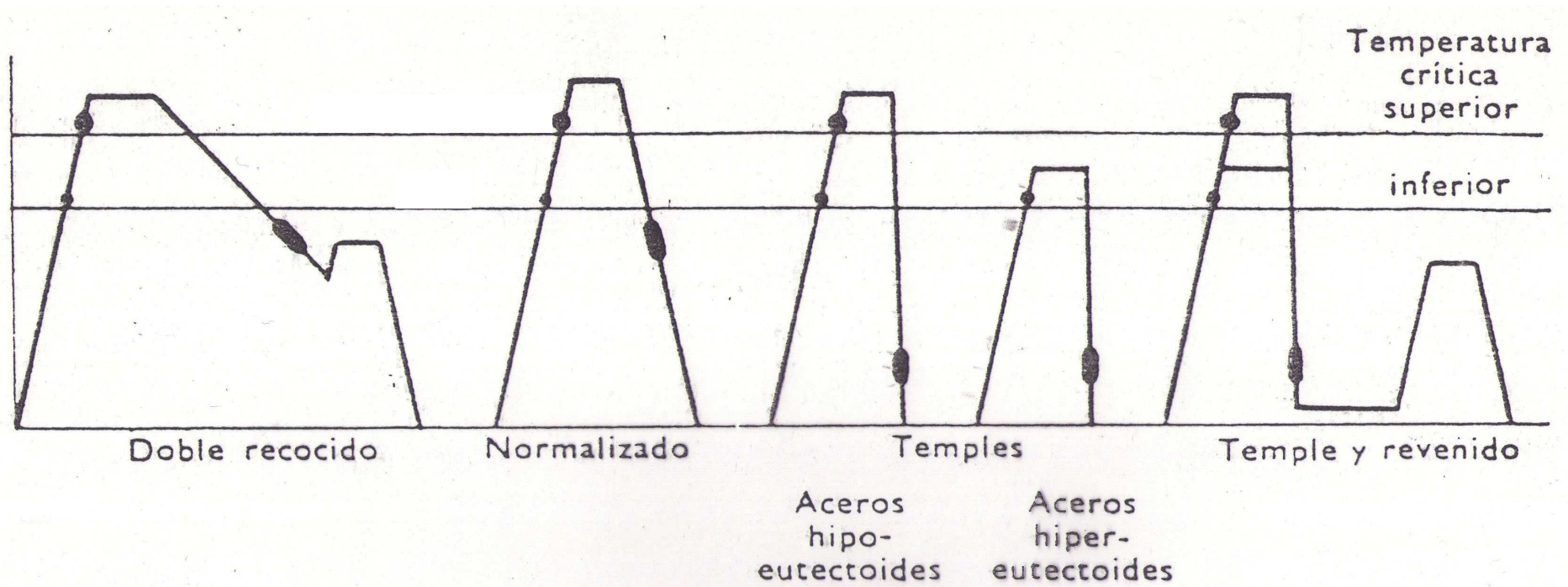


## TRATAMIENTOS TÉRMICOS





## TRATAMIENTOS TÉRMICOS





## TEMPERATURAS DE RECOCIDO, TEMPLE Y NORMALIZADO

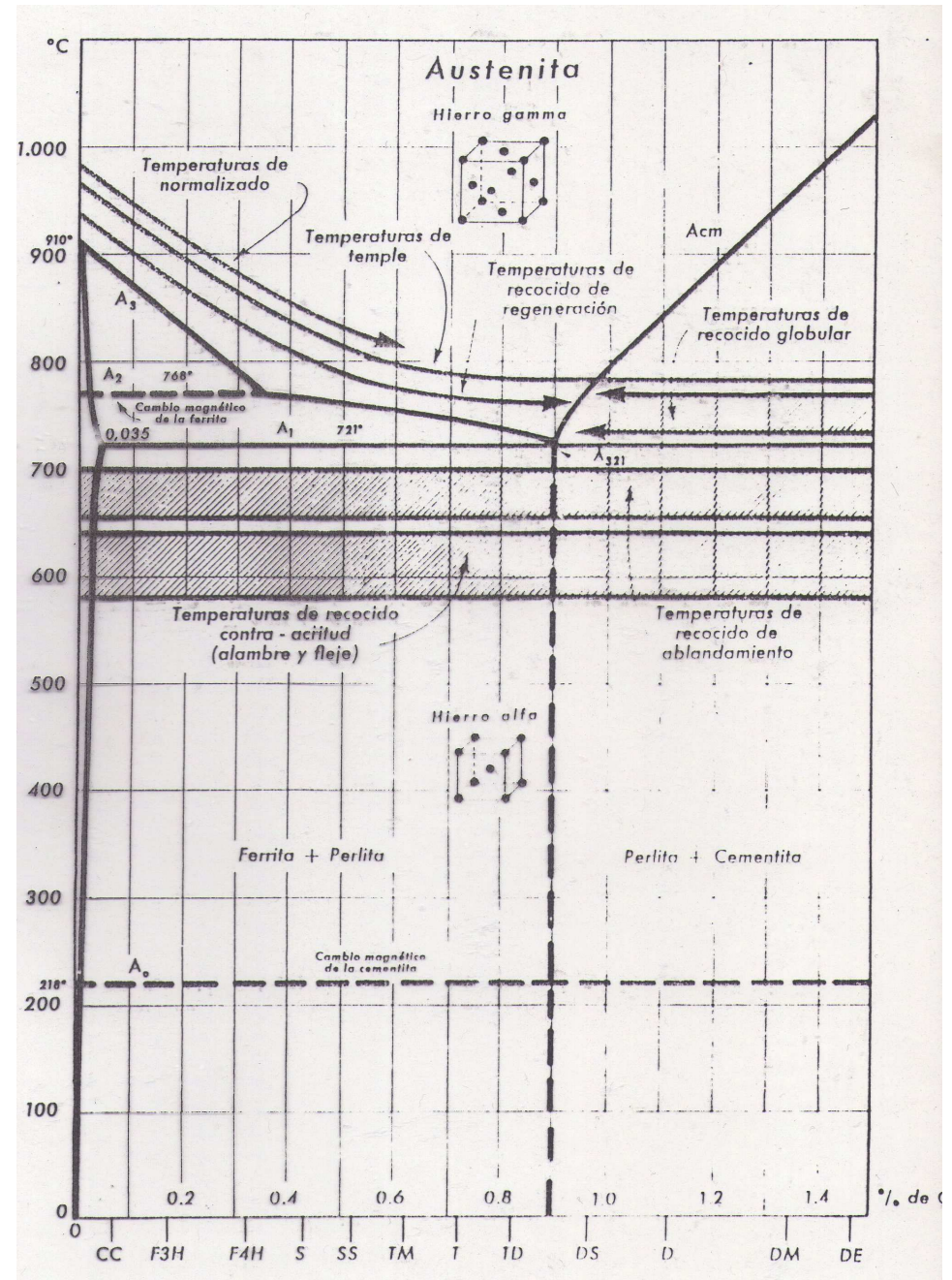
ACEROS HIPOEUTECTOIDES AL C Y ALEADOS  
CON AUSTENIZACIÓN COMPLETA

TEMPERATURA DE RECOCIDO	20 C - 40 C $>$ T <sub>cr</sub> SUPERIOR
TEMPERATURA DE TEMPLE	40 C - 60 C $>$ T <sub>cr</sub> SUPERIOR
TEMPERATURA DE NORMALIZ.	50 C - 70 C $>$ T <sub>cr</sub> SUPERIOR

T<sub>cr</sub> = Ac<sub>3</sub>  $\longrightarrow$  AUSTENIZACIÓN PARA  
ACEROS HIPOEUTECTOIDES



# TEMPRATURAS DE TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS AL CARBONO





## RECOCIDO DE REGENERACIÓN - TEMPLE - NORMALIZADO

### DURACIÓN DEL CALENTAMIENTO - PERMANENCIA A TEMPERATURA CONCEPTOS GENERALES



PARA QUE TODA LA MASA ESTÉ FORMADA POR CRISTALES DE AUSTENITA HACE FALTA QUE EL ACERO PERMANEZCA UN CIERTO TIEMPO A LA T. DE TTO.

EL TIEMPO DE PERMANENCIA SE CUENTA A PARTIR EN QUE TODA LA MASA DEL ACERO HA ALCANZADO  $A_c$  o  $A_{cm}$

$A_{cm}$  : austenización hipereutécticos

$A_{321}$  : austenización eutécticos

#### HOMOGENEIZACIÓN DE LA AUSTENITA :

AL SOBREPASAR LA  $T_{cr}$ , SI BIEN TODO EL C FORMA SOLUCIÓN CON LA AUSTENITA, ALGUNAS REGIONES PUEDEN TENER MÁS C QUE OTRAS. LA DIFUSIÓN DEL C PRODUCIRÁ LA HOMOGENEIZACIÓN COMPLETA EN EL TIEMPO.

DIFUSIÓN DEL C ↑ CUANDO T ↑

T ↑ : CRECIMIENTO DE GRANO

RETARDAN LA HOMOGENEIZACIÓN:

- LAS INCLUSIONES (P ES UNA BARRERA EN BORDE DE GRANO)
- LOS ALEANTES (Cr, Tu, etc. FORMAN CARBUROS COMPLEJOS)

SE PREFIERE PROLONGAR LA DURACIÓN DEL TTO. Y EFECTUARLO A TEMP. RELATIVAMENTE BAJAS



## RECOCIDO DE REGENERACIÓN - TEMPLE - NORMALIZADO

### DURACIÓN DEL CALENTAMIENTO - PERMANENCIA A TEMPERATURA

CALENTAMIENTOS RÁPIDOS → > TIEMPO DE PERMANENCIA

NORMALIZADOS → < TIEMPO DE PERMANENCIA

LOS RECOCIDOS SUELEN SER MÁS PROLONGADOS  
PARA FAVORECER LA DIFUSIÓN

LAS ESTRUCTURAS DE FUERTE ALEACIÓN EXIGEN MUCHO TIEMPO

EN GENERAL

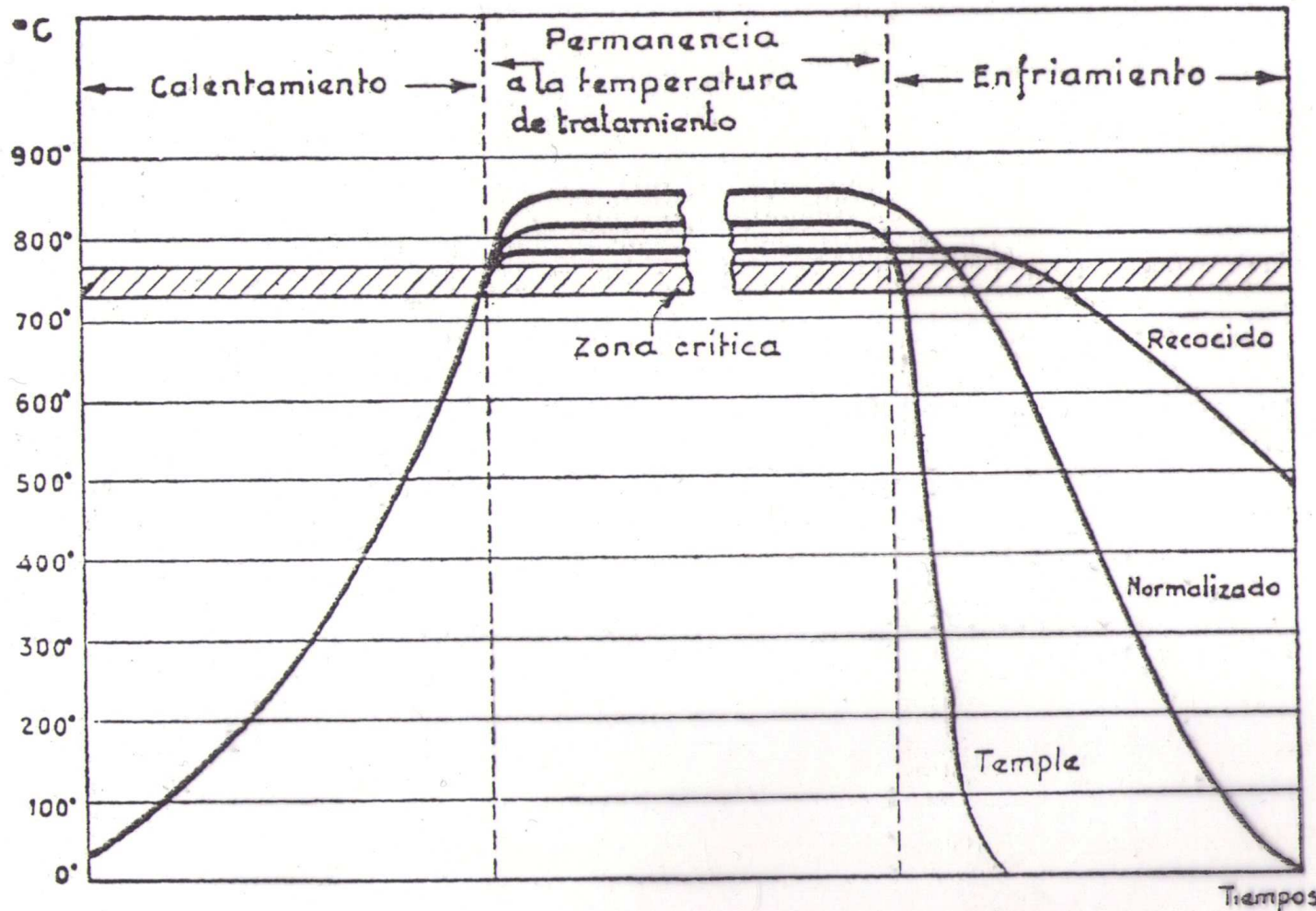
VEL. DE CALENTAMIENTO LENTA  
1h/ " de Diámetro

- TIEMPO DE PERMANENCIA
- ½ h/ " de Diámetro

VEL. DE CALENTAMIENTO RÁPIDA  
½ h/ " de Diámetro

- TIEMPO DE PERMANENCIA
- 1 h/ " de Diámetro

## RECOCIDO DE REGENERACIÓN - TEMPLE - NORMALIZADO



**PIEZAS GRUESAS  
CALENTAMIENTO:**

**FUERTES TENSIONES INTERNAS POR LA DESIGUAL DILATACIÓN ENTRE LA PERIFERIA Y EL CENTRO Y POR LAS CONTRACCIONES AL ATRAVESAR LAS ZONAS CRÍTICAS.**

**PIEZAS DE POCO ESPESOR Y FORMAS SENCILLAS:  
DIRECTAMENTE A HORNOS A ALTA TEMP.  
750 C a 850 C**

**LA VELOCIDAD DE ENFRIMIENTO CARACTERIZA Y DIFERENCIA PRINCIPALMENTE A ESTAS 3 CLASES DE TRATAMIENTOS.**

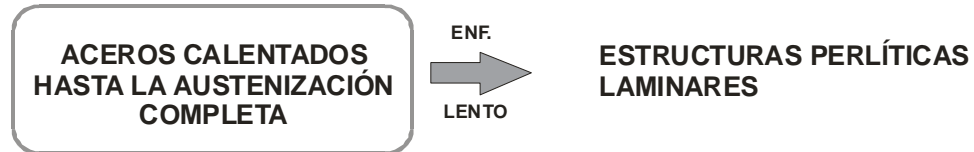
**LAS ETAPAS DE CALENTAMIENTO Y PERMANENCIA A TEMPERATURA SE PUEDEN ESTUDIAR A LA VEZ.**

**NO INTRODUCIR EN HORNO CON  $T > 350$  C :  
A PIEZAS FRÍAS DE  $\Phi > 200$  mm**



## RECOCIDO DE REGENERACIÓN (AUSTENIZACIÓN COMPLETA)

### VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO - TERMINACIÓN DEL RECOCIDO



MÁS LENTO EL ENFRIAMIENTO  $\Rightarrow$  MÁS BLANDO QUEDA EL ACERO

$> V_e \Rightarrow >$  DUREZA ACERO DEMASIADO DURO: RECOCIDO INACEPTABLE

••  $V_e$  INDUSTRIALES: 10 °/h - 20 °/h - 30 °/h  
50 °/h - 100 °/h

100% de transformación de la austenita  $\rightarrow$  Se ha rebasado  $Ar_1$  en el enfriamiento

TEMPERATURA DE APARICIÓN DE  $Ar_1$



COMPOSICIÓN DEL ACERO  
VEL. DE ENFRIAMIENTO



## RECOCIDO DE REGENERACIÓN (AUSTENIZACIÓN COMPLETA)

### VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO - TERMINACIÓN DEL RECOCIDO

ACERO AL CARBONO PARA HERRAMIENTAS (ALTO C):

PARA  $V_e = 10 \text{ }^\circ\text{C/h}$   $\rightarrow$   $Ar_1 = 700 \text{ }^\circ\text{C}$  : TRANSF. COMP.  $700/680 \text{ }^\circ\text{C}$

PARA  $V_e = 20 \text{ }^\circ\text{C}$   $\rightarrow$   $Ar_1 = 680 \text{ }^\circ\text{C}$  : TRANSF. COMP.  $680/650 \text{ }^\circ\text{C}$

TEMPERATURAS PARA  
LAS CUALES SE DA POR  
TERMINADO EL  
TTO. DE RECOCIDO

SE RETIRA  
  
DEL HORNO

AC. AL C :  $600/650 \text{ }^\circ\text{C}$

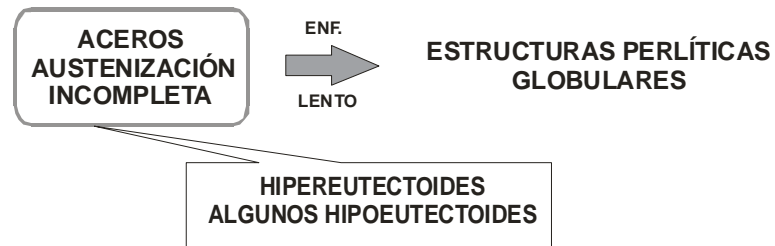
AC. ALEADOS:  $500/650 \text{ }^\circ\text{C}$

% de carbono	De austenización completa $^\circ\text{C}$	De austenización incompleta $^\circ\text{C}$	Subcrítica
0,60	800 $^\circ$	760 $^\circ$	680 $^\circ$
0,70	775 $^\circ$	760 $^\circ$	680 $^\circ$
0,80	760 $^\circ$	750 $^\circ$	680 $^\circ$
0,90	760 $^\circ$	750 $^\circ$	680 $^\circ$
1,00	825 $^\circ$	760 $^\circ$	680 $^\circ$
1,10	860 $^\circ$	780 $^\circ$	680 $^\circ$
1,20	900 $^\circ$	780 $^\circ$	680 $^\circ$

Temperaturas recomendadas para el recocido de los aceros de herramientas.



## RECOCIDO GLOBULAR DE AUSTENIZACIÓN INCOMPLETA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO - TERMINACIÓN DEL RECOCIDO



•• Ve INDUSTRIALES: 10 °/h - 15 °/h - 20 °/h



SE UTILIZAN TEMP. COMPRENDIDAS ENTRE LA CRÍTICA INFERIOR Y LA SUPERIOR

DEL 70% - 80% DE LA MASA ALCANZA LA AUSTENIZACIÓN COMPLETA

EJ.:

AC. 1,25 % C →

AUSTENIZACIÓN COMPLETA	→	PERLITA LAMINAR (220 HB)
AUSTENIZACIÓN INCOMPLETA	→	PERLITA GLOBULAR (180 HB)



## RECOCIDO GLOBULAR DE AUSTENIZACIÓN INCOMPLETA

### VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO - TERMINACIÓN DEL RECOCIDO

AC. 1,25 % C → TEMPLE → ESTRUCTURA RECOCIDA  
PREVIA MÁS FAVORABLE → GLOBULAR

Distribución micrográfica más uniforme  
Mayor tenacidad después del temple

EN GENERAL:

TEMPERATURAS RECOMENDADAS  
PARA LA AUSTENIZACIÓN INCOMPLETA

ACEROS AL C → 760/780 °C

ACEROS DE ALTA ALEACIÓN → 875 °C

Ac. rápidos  
indeformables de 13% Cr  
de 18% de Wolframio, etc.

ACEROS DE MEDIA ALEACIÓN → 800/850 °C



## RECOCIDOS MÁS RECOMENDADOS

### 1) AUSTENIZACIÓN INCOMPLETA Y ENFRIAMIENTO LENTO:

AC. PARA HERRAMIENTAS (SON CASI SIEMPRE HIPEREUTECTOIDES).

### 2) RECOCIDOS SUBCRÍTICOS DE ABLANDAMIENTO:

AC. AL C O ALEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE  
PIEZAS Y MAQUINARIAS

LOS AC. AL C O ALEADOS TAMBIÉN SE SUELEN ABLANDAR CON RECOCIDOS DE AUSTENIZACIÓN COMPLETA O INCOMPLETA. MUCHAS VECES LA DUREZA OBTENIDA CON LOS RECOCIDOS SUBCRÍTICOS ES SOLO UN POCO MAYOR QUE LA OBTENIDA CON LOS DE AUSTENIZACIÓN, E IGUALMENTE ACEPTABLE PARA EL MECANIZADO. LOS RECOCIDOS SUBCRÍTICOS SON MÁS ECONÓMICOS POR SER DE MENOR DURACIÓN.

EN LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS, EN CAMBIO, LOS RECOCIDOS DE AUSTENIZACIÓN INCOMPLETA, DAN DUREZAS MUY INFERIORES A LOS SUBCRÍTICOS. ADEMÁS SE OBTIENEN ESTRUCTURAS GLOBULARES QUE SON LAS DE MEJOR MECANIZACIÓN.

PARA AC. AL C  
CUANDO LA PROPIEDAD QUE MÁS INTERESA ES LA MAQUINABILIDAD,  
SE RECOMIENDA:

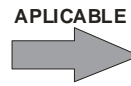
< 0,35% C → NORMALIZADO

> 0,45% C → RECOCIDO DE AUSTENIZ. INCOMPLETA Y ENF. LENTO.



## NORMALIZADO - ENFRIAMIENTO

NORMALIZADO



AC. AL C DE 0,15% - 0,40% DE C  
PARA FABRICACIÓN DE PIEZAS

DESPUÉS DE LA FORJA O LAMINACIÓN.  
PARA BORRAR TTOS. ANTERIORES

Composición % de C	Temperatura °C
0,10	935°
0,20	910°
0,30	880°
0,40	860°
0,50	840°

TABLA VI

Temperaturas recomendadas para el normalizado de los aceros al carbono

EL ESPESOR DE LAS PIEZAS EJERCE BASTANTE INFLUENCIA EN LAS METALOGRAFÍAS QUE SE OBTIENEN LUEGO DEL NORMALIZADO: CAMBIA LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.

% de C	Tratamiento	R Kg/mm <sup>2</sup>	E Kg/mm <sup>2</sup>	A %	$\rho$ Kgm/cm <sup>2</sup>
0,15	Normalizado .	45	27	27	23
	Recocido . . .	42	25	30	25
0,30	Normalizado .	58	35	20	16
	Recocido . . .	50	30	22	18
0,50	Normalizado .	70	42	16	7
	Recocido . . .	60	38	18	10

TABLA VII

Características mecánicas de tres aceros al carbono de construcción en estado recocido y normalizado.

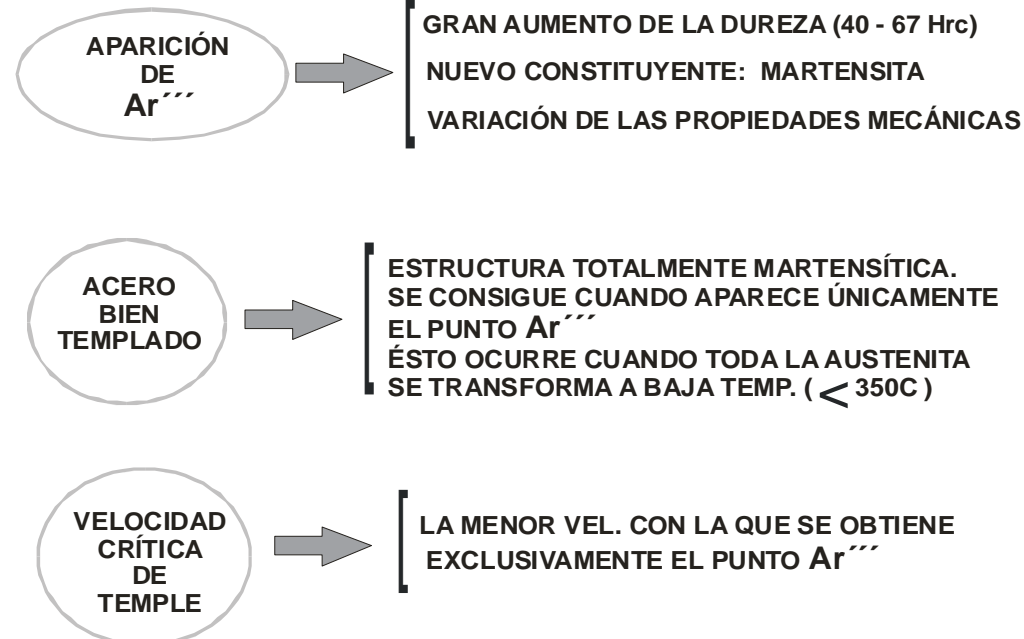


## TEORÍA DEL TEMPLE

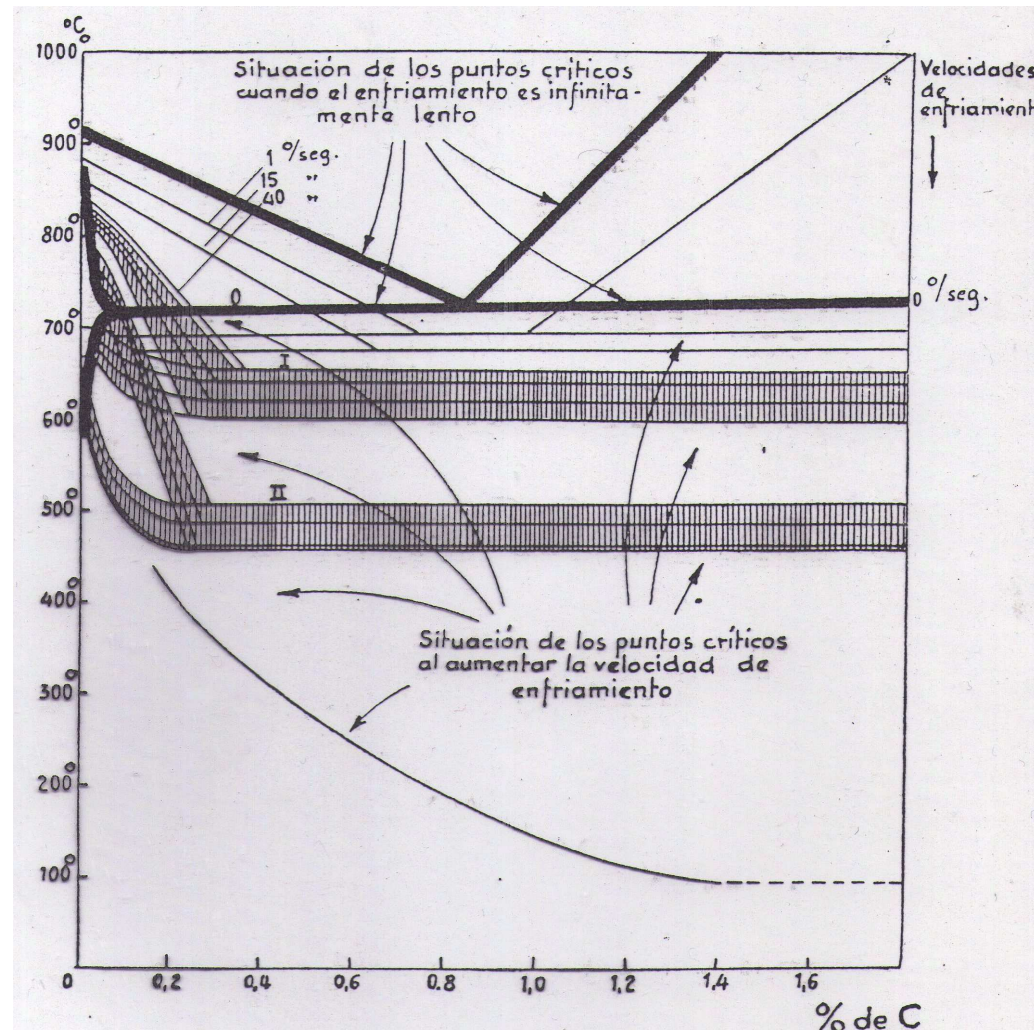
CUANDO POR EFECTO DE UN ENFRIAMIENTO RÁPIDO,  $A_r$  DESCENDE HASTA LAS PROXIMIDADES DE 650 C - 600 C, SE PRODUCE UN SALTO, APARECE OTRO PUNTO DE TRANSFORMACIÓN  $A_r''''$  DE 0 C - 350 C.

TODA LA MASA DEBE ENCONTRARSE EN ESTADO AUSTENÍTICO ANTES DE COMENZAR EL ENFRIAMIENTO

EN LOS HIPEREUTECTOIDES NO SE LLEGA A LA AUSTENIZACIÓN COMPLETA. QUEDAN CARBUROS SIN DISOLVER



## INFLUENCIA DEL MEDIO DE ENFRIAMIENTO SOBRE LA ESTRUCTURA Y LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

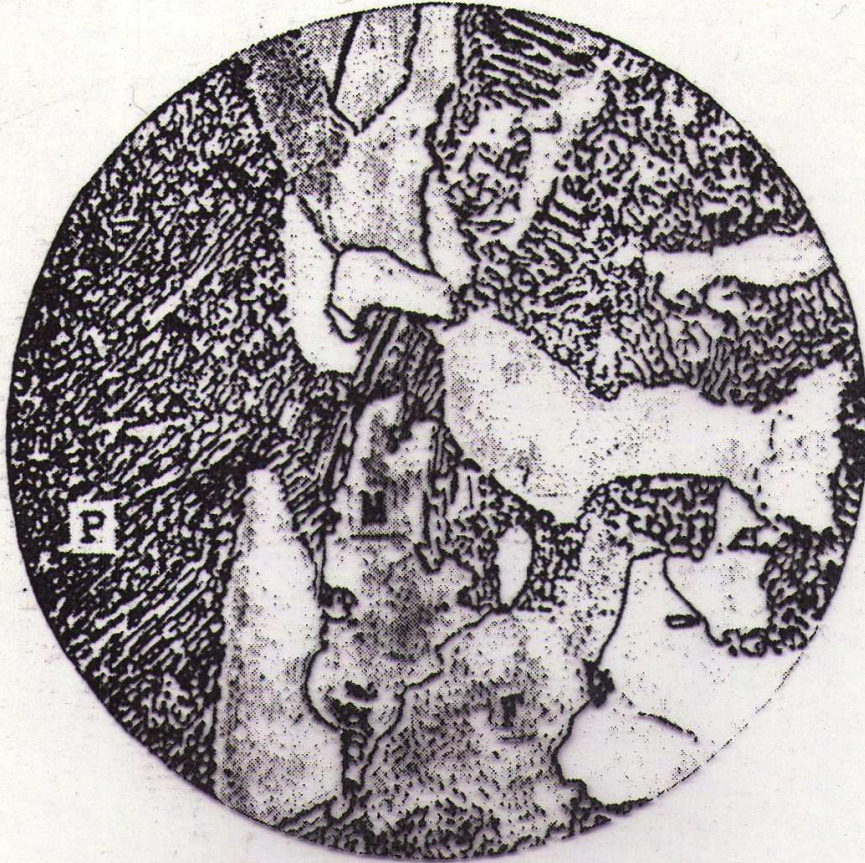


LA TRANSFORMACIÓN DE LA AUSTENITA EN UNA ESTRUCTURA ESTABLE DE FERRITA Y PERLITA REQUIERE DE UN DETERMINADO TIEMPO. SOLO PUEDEN OBTENERSE SI EL ENFRIAMIENTO SE PRODUCE A UNA CIERTA VELOCIDAD.

A MAYORES VELOCIDADES SE OBTIENEN ESTRUCTURAS DE TRANSICIÓN.

AUMENTANDO PROGRESIVAMENTE LA V<sub>enf</sub>. EL PUNTO Ar (transformación de la austenita), APARECE CADA VEZ A TEMP. MÁS BAJAS

## ESTRUCTURAS DE ACEROS TEMPLADOS



× 1.000

Acero de 0,45 % de carbono.  
Templado a 732° en agua.  
Perlita, ferrita y martensita.



× 1.000

Acero de 0,45 % de carbono.  
Templado a 750° en agua.  
Ferrita y martensita.

## ESTRUCTURAS DE ACEROS TEMPLADOS



× 1.000

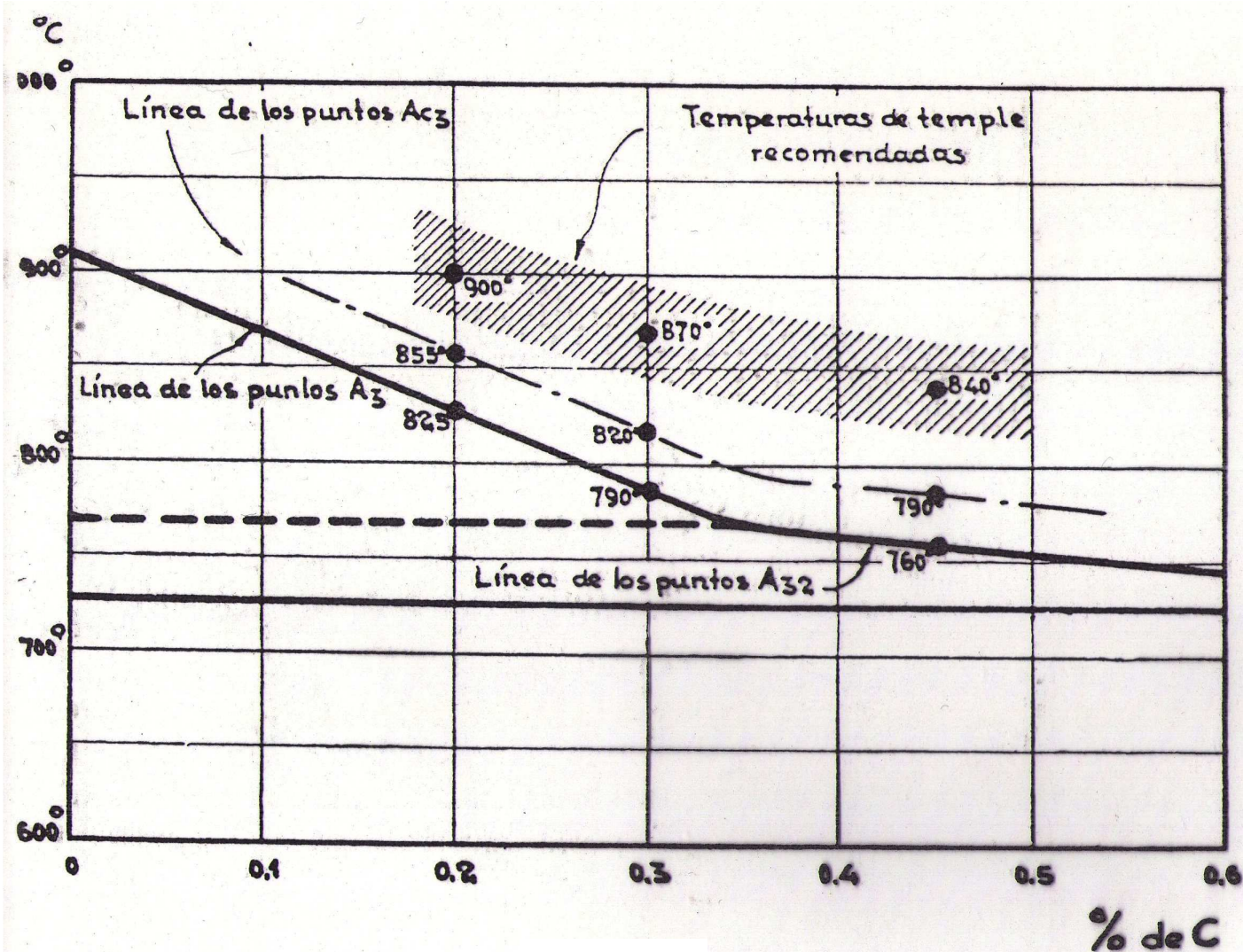
Acero de 0,45 % de carbono.  
Templado a 775° en agua.  
Ferrita y martensita.



× 1.000

Acero de 0,45 % de carbono.  
Templado a 790° en agua.  
Martensita.

## TEMPLE EN ACEROS HIPOEUTECTOIDES

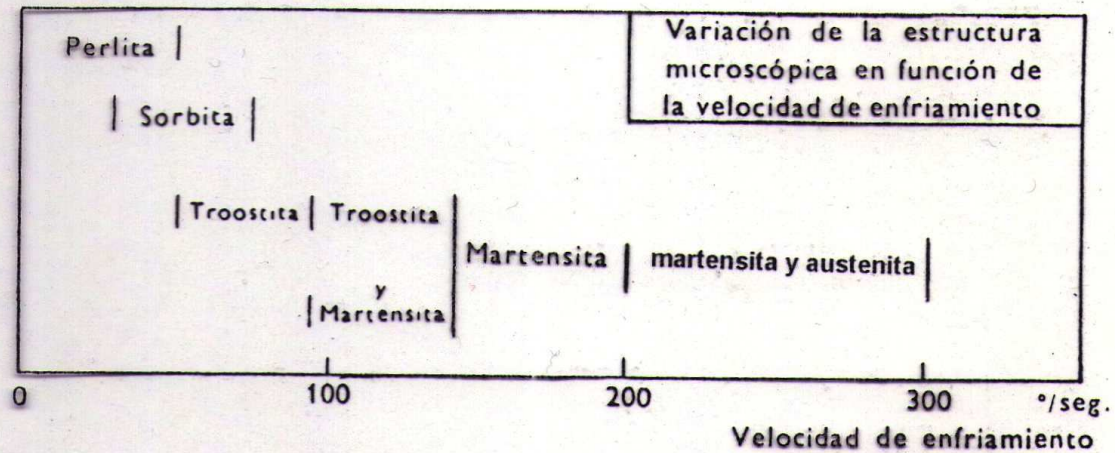
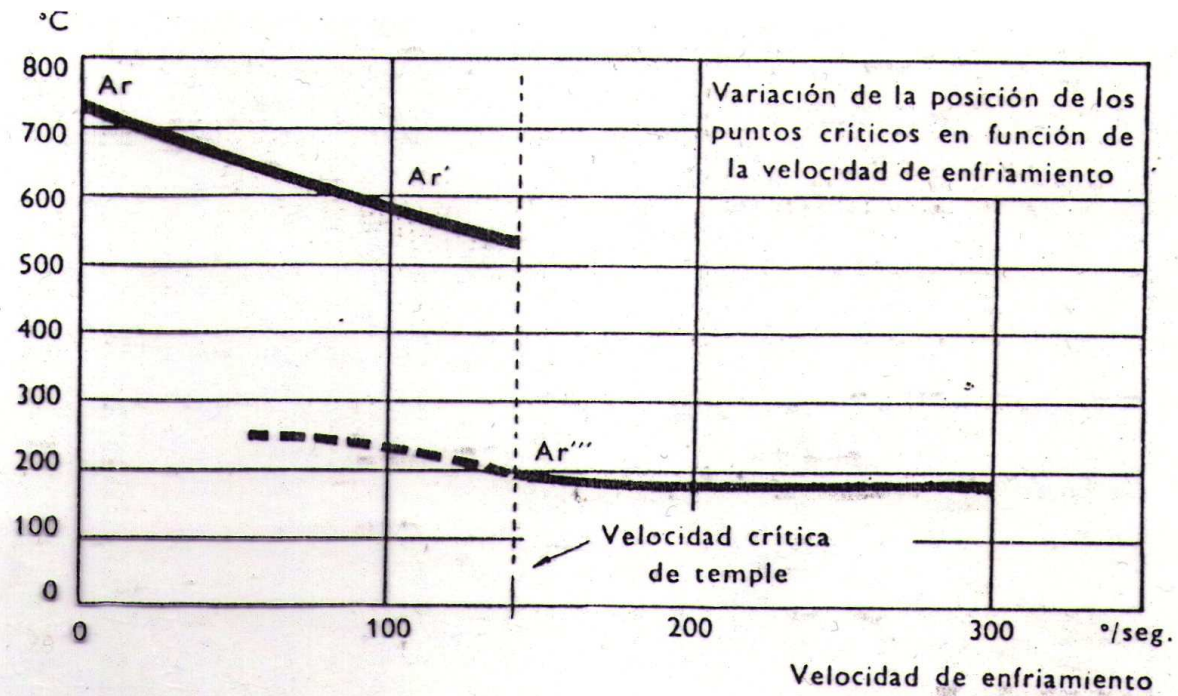


ACEROS < 0,9% C  
 AUSTENIZACIÓN COMPLETA.  
 DE LO CONTARIO NO SE  
 ALCANZARÁ TODA LA DUREZA  
 QUE SE PUEDE OBTENER.  
 QUEDARÁ FERRITA SIN  
 DISOLVER.

Temperaturas críticas teóricas del diagrama hierro-carbono, temperaturas críticas en el calentamiento y temperaturas de temple recomendadas para los aceros hipoeutectoides.



## VELOCIDAD CRÍTICA DE TEMPLE



## RELACIÓN CON LA DUREZA

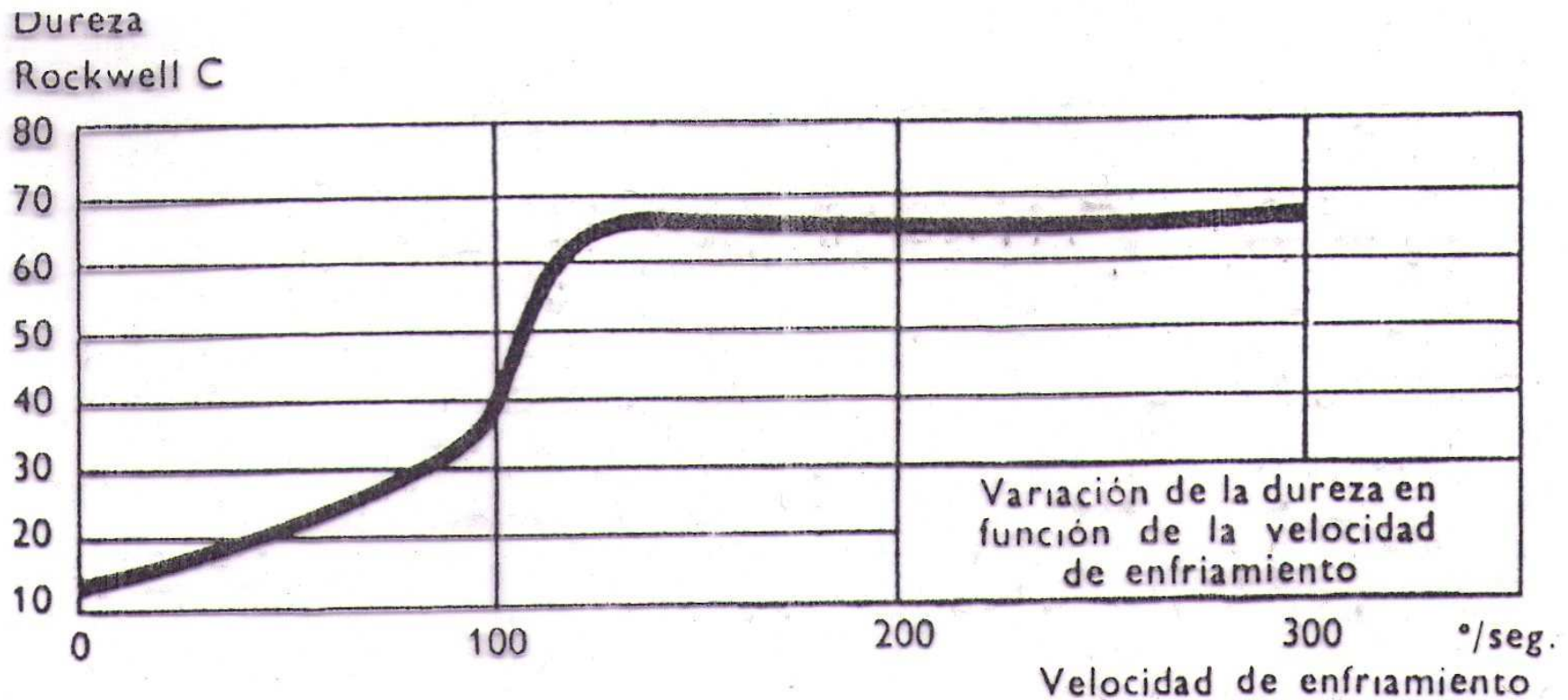


FIGURA 74

Influencia de la velocidad de enfriamiento en la situación de los puntos críticos, en los constituyentes microscópicos resultantes y en la dureza que se obtienen en el temple de un acero de 0,90 % de carbono.

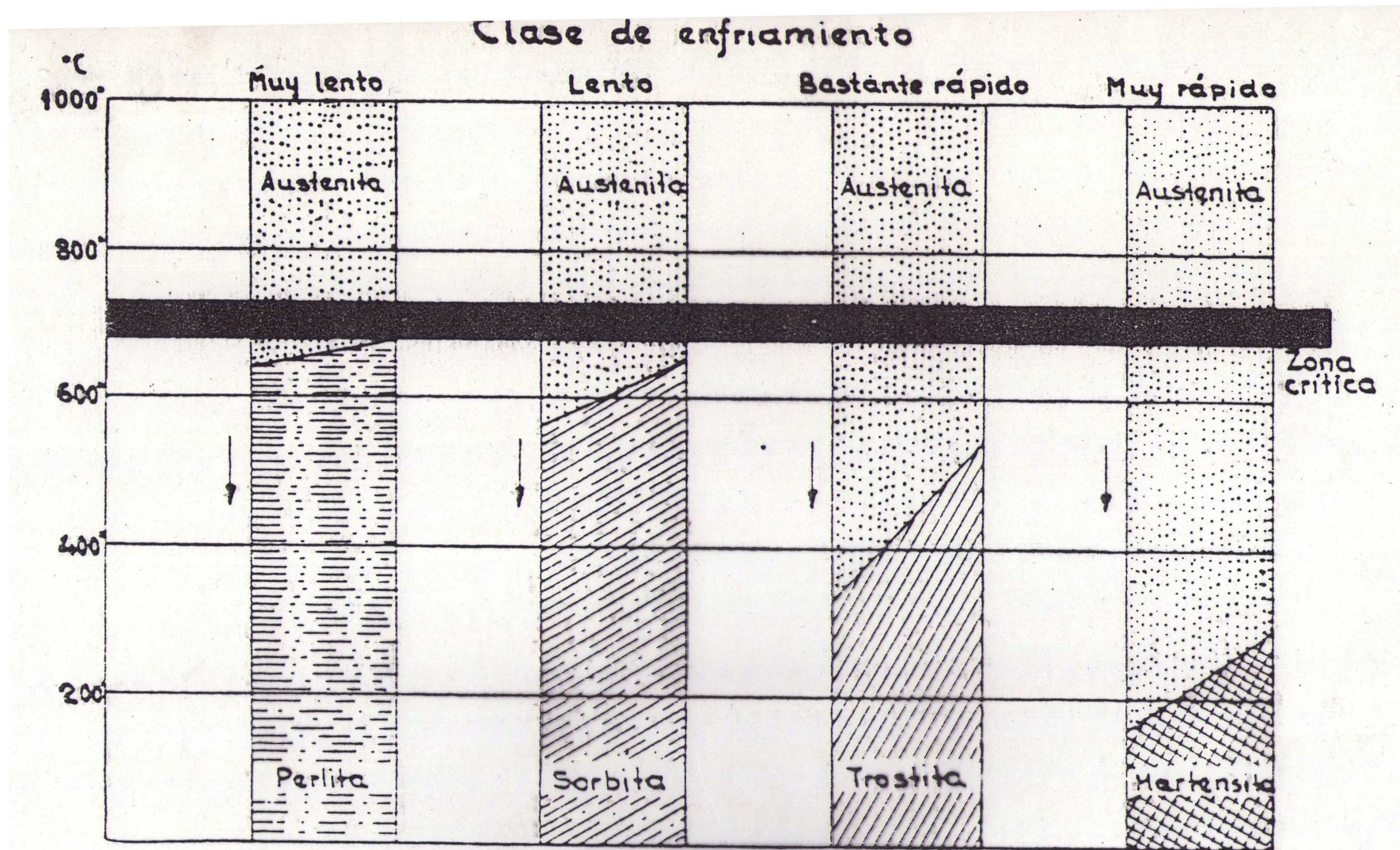
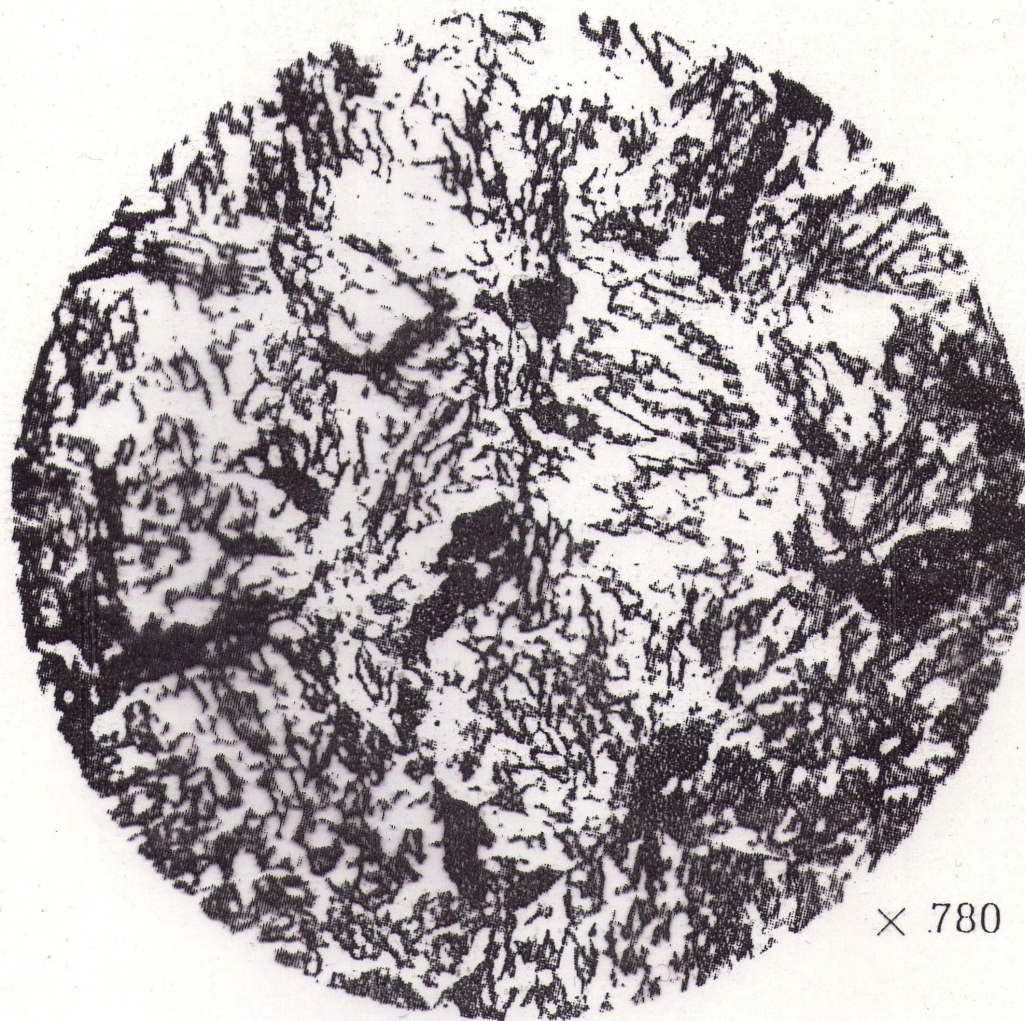


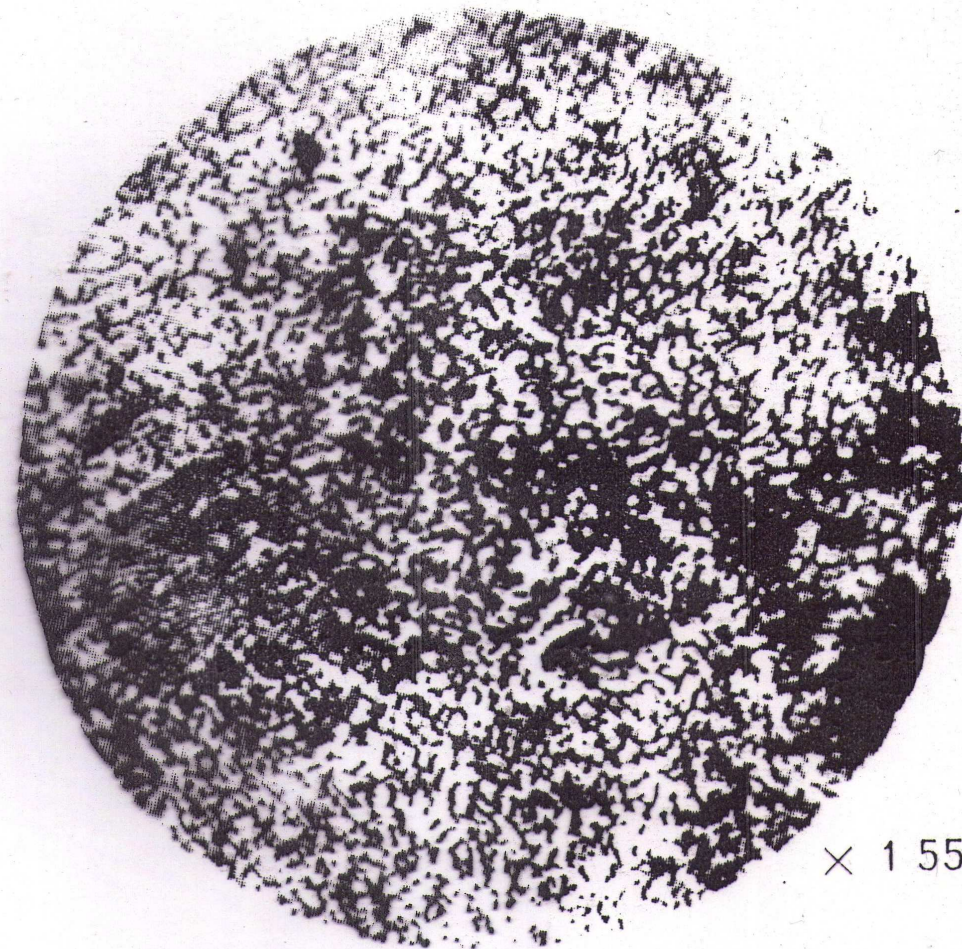
FIGURA 73

Influencia de la velocidad de enfriamiento sobre la temperatura de transformación de la austenita y sobre los constituyentes que se obtienen



× 780

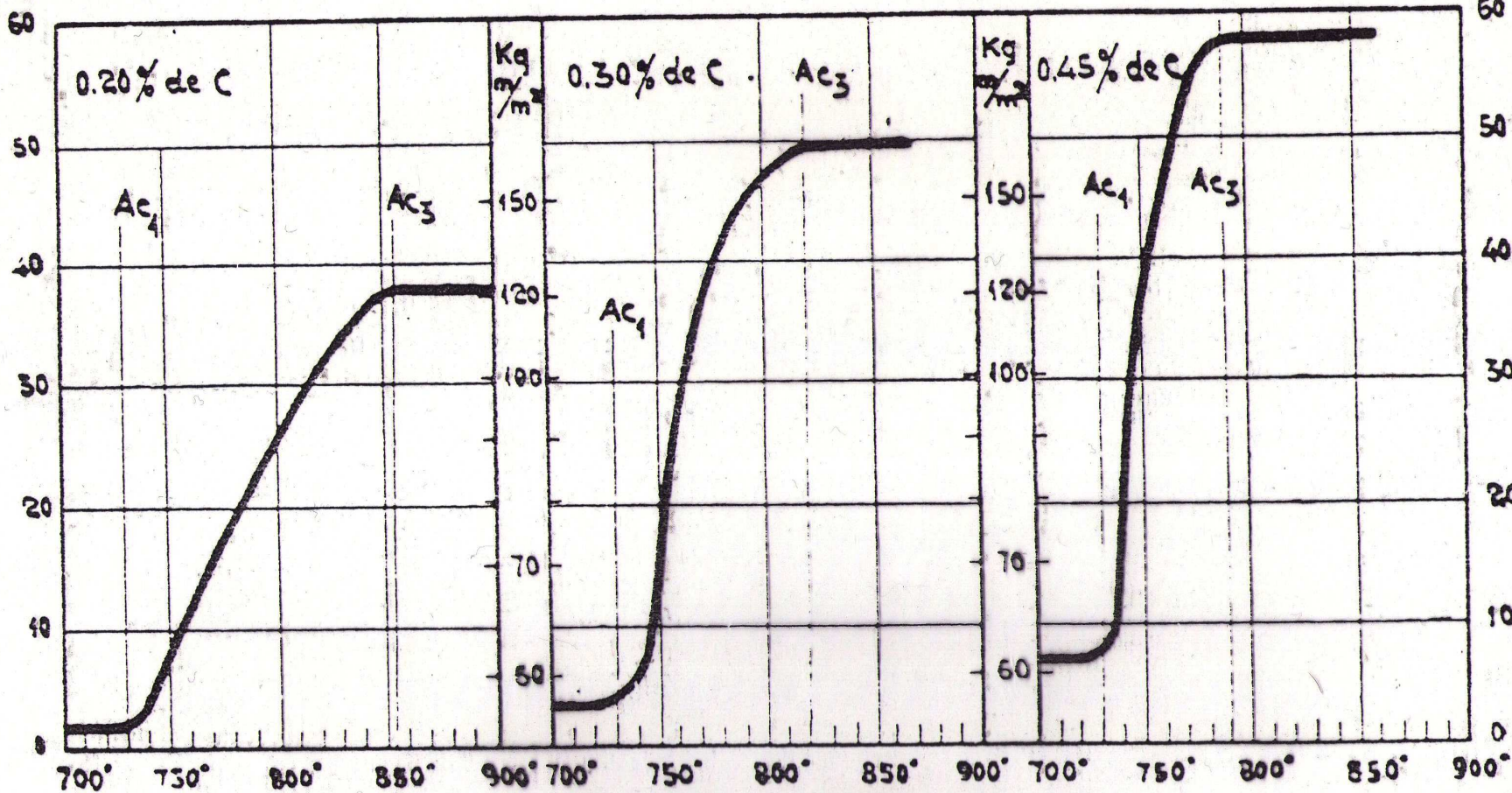
Acero al carbono (hipoeutectoide: C = 0,45 %).  
Martensita y nódulos oscuros de troostita.  
Temple a 840° C en aceite a 19° C.  
Dureza:  $HR_C = 55$ , H = 547.  
Ataque: picral 4 %.



Acero al carbono (eutectoide:  
 $C = 0,87\%$ ). Sorbita (partículas esferoidales  
de cementita en ferrita).  
Templado a  $780^{\circ}C$  en agua y revenido por  
debajo de  $A_p$ .  
Ataque: picral  $4\%$ .

Rockwell C

Rockwell C



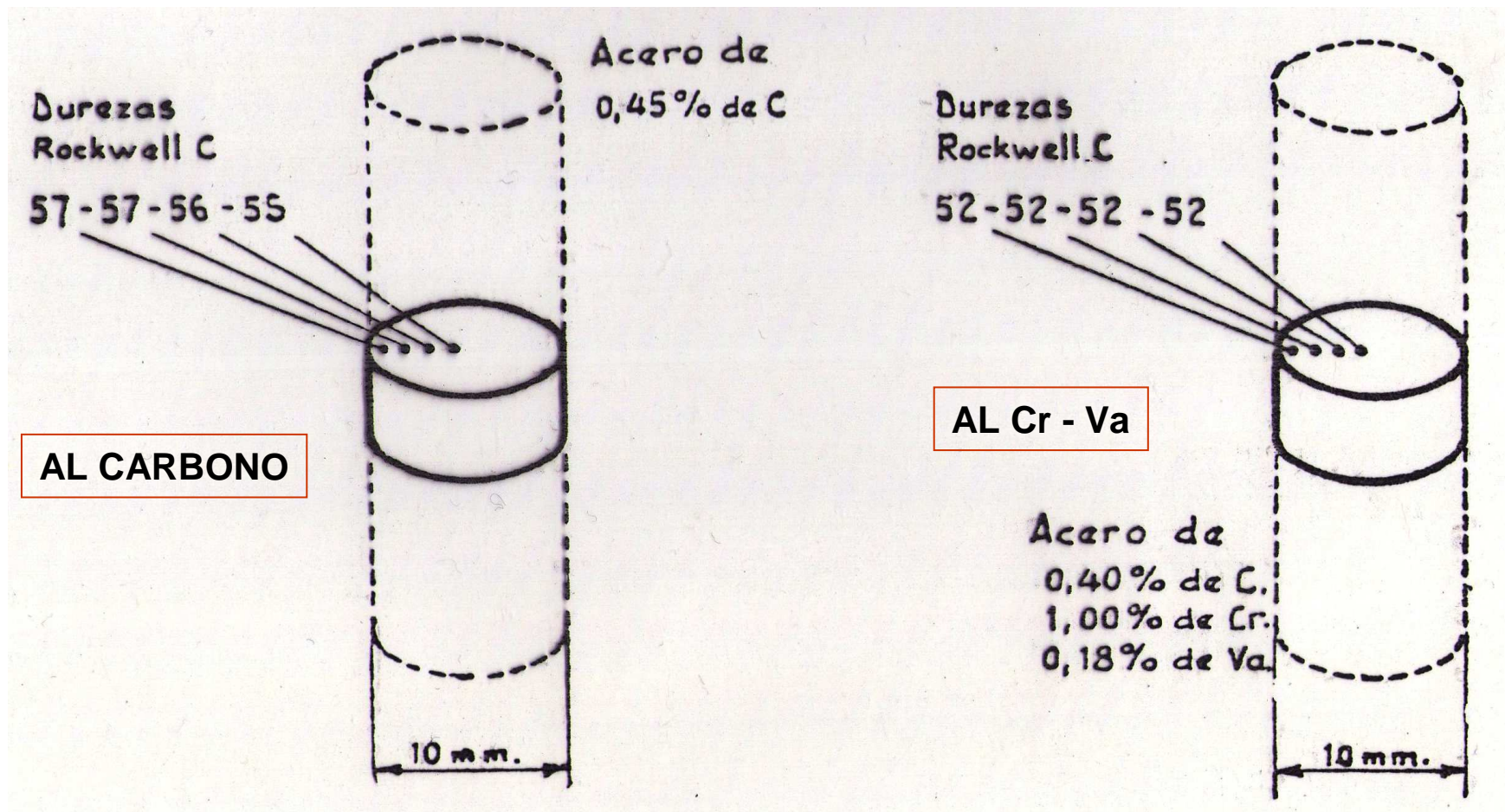
Temperatura de temple

Influencia de la temperatura de temple en la dureza y resistencia de tres aceros al carbono de construcción.

## TEMPLABILIDAD O PENETRACIÓN DEL TEMPLE

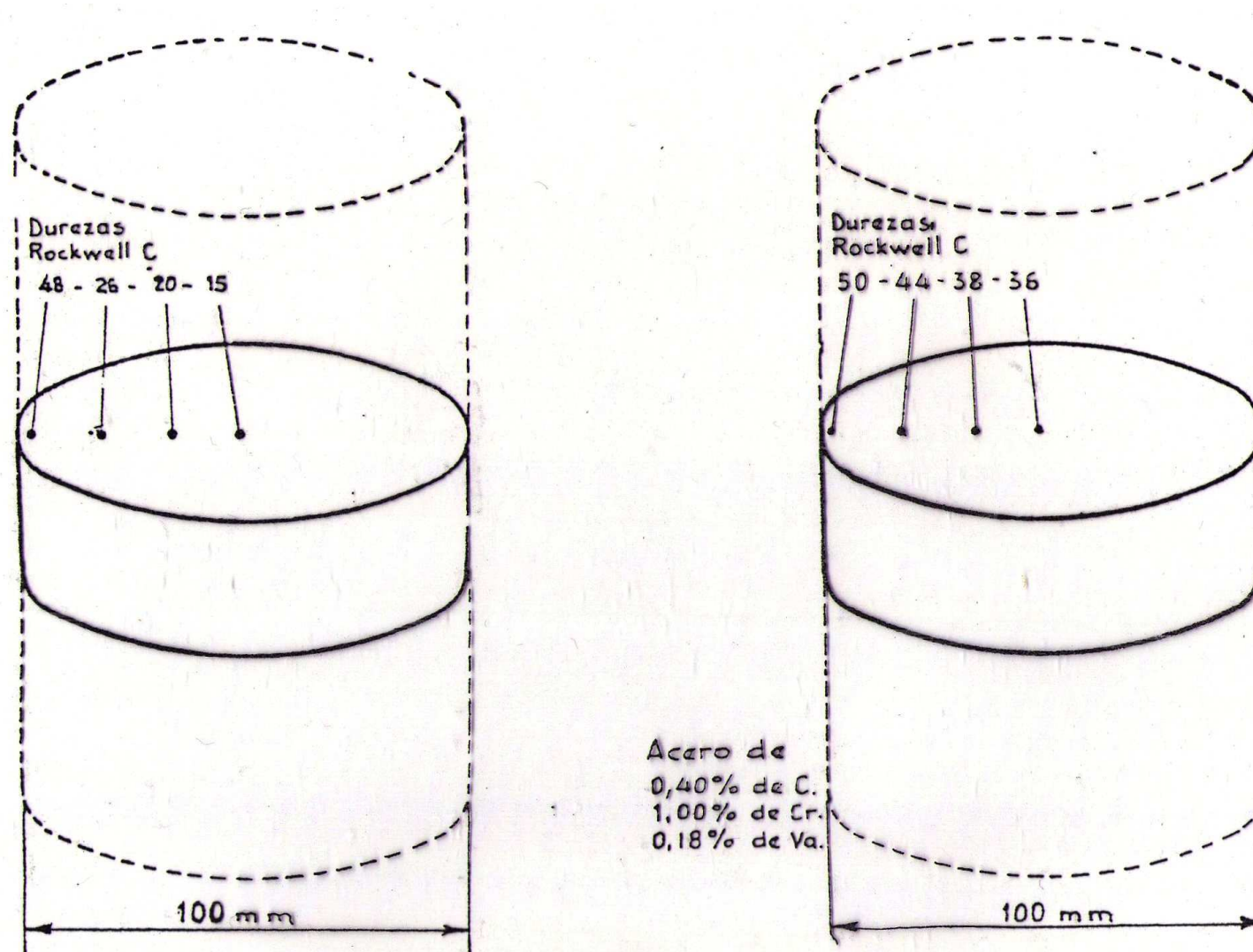
TEMPLABILIDAD

VIENE DETERMINADA POR LA PROFUNDIDAD Y DISTRIBUCIÓN DE LA DUREZA EN EL INTERIOR DE LAS PIEZAS



LA MÁXIMA DUREZA OBTENIDA ES FUNCIÓN DEL % DE C.

## TEMPLABILIDAD O PENETRACIÓN DEL TEMPLE



**EN EL ACERO AL C LA DUREZA DISMINUYE MUY RÁPIDAMENTE DEL EXTERIOR AL INTERIOR.  
EN EL ACERO AL CROMO - VANADIO LA DUREZA SE CONSERVA MÁS UNIFORME.  
LA TEMPLABILIDAD DEL ACERO ALEADO ES MAYOR.**