

Mecanismo de disipación de calor de temple

Consecuencias de un tratamiento térmico

* **Microestructura**



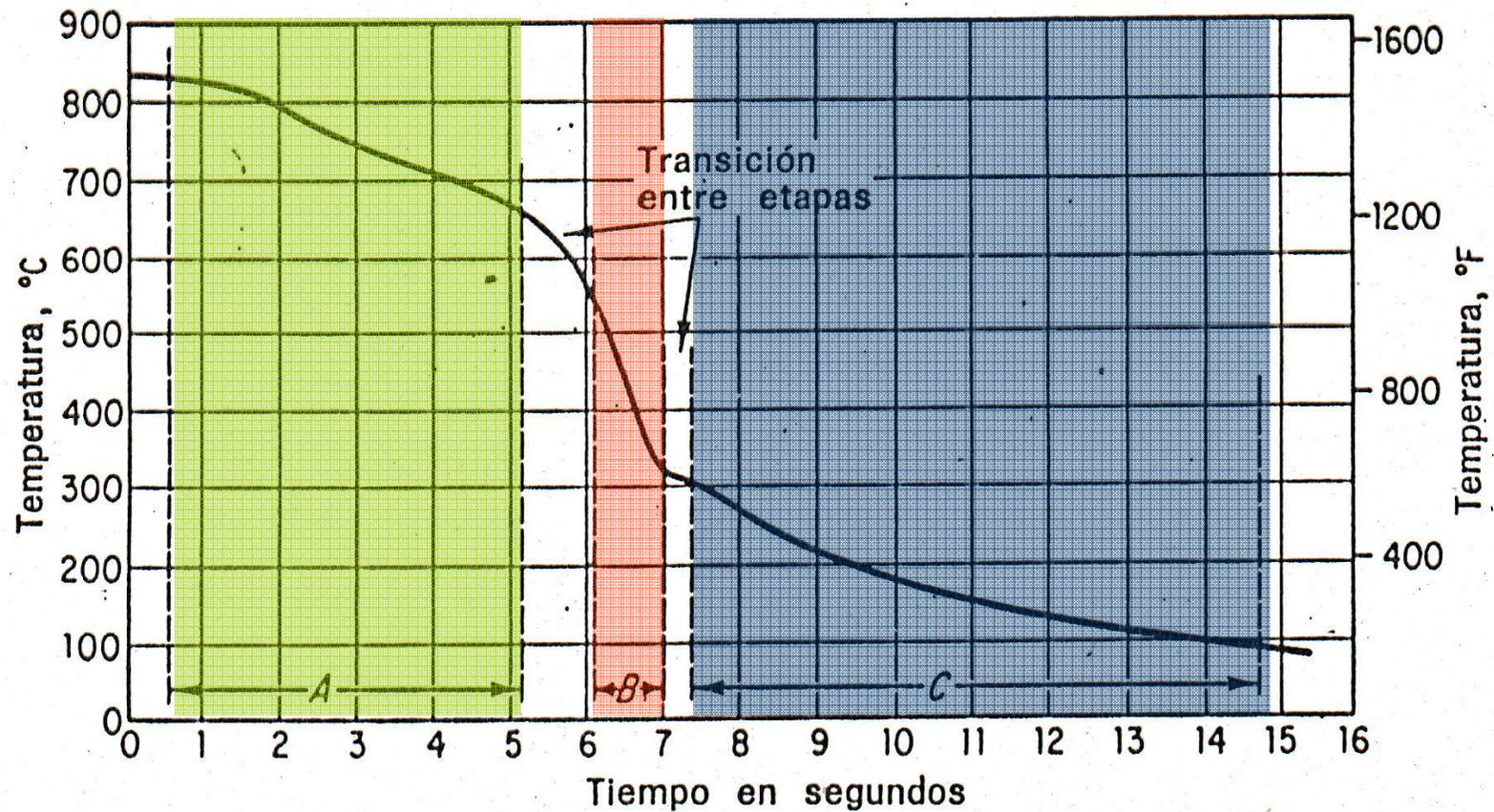
dependerán



**velocidad de
enfriamiento real**

* **Propiedades mecánicas
(dureza, resistencia, etc)**

Curva tipo de enfriamiento



Curva típica de enfriamiento de un cilindro de poco diámetro, templado en agua caliente.

Etapas del enfriamiento

Etapa A - Enfriamiento por capa de vapor

Proceso

- * Al introducir una pieza de metal caliente en un medio de enfriamiento se forma una capa delgada de vapor en la superficie de esta.**
- * Dado que la capa de vapor es mala conductora del calor la velocidad de enfriamiento es baja.**

Mecanismo de disipación

- * Conducción**
- * Radiación**

Etapa B - Enfriamiento por transporte de vapor

Proceso

- * Llega un momento en que se produce el rompimiento de la capa de vapor y el metal entra en contacto con el líquido.**
- * El enfriamiento se realiza líquido contra metal.**
- * Se origina una violenta ebullición**
- * El metal cede calor muy rápidamente en forma de calor latente de vaporización.**

Mecanismo de disipación

- * **Conducción**
- * **Convección**

Etapa C - Enfriamiento por líquido

Proceso.

- * **Etapa que se da cuando la temperatura del metal es igual a la de ebullición del líquido.**
- * **Ya no se forma vapor y el enfriamiento se produce en líquido.**
- * **La velocidad es la menor de todas.**

Mecanismo de disipación

- * Conducción**
- * Convección**

Observación

La velocidad de enfriamiento se puede determinar por la tangente a la curva de enfriamiento. La pendiente de la tangente da un valor de la velocidad de enfriamiento.

Factores que influyen en la velocidad de enfriamiento

- * Medio de temple
- * Temperatura del refrigerante
- * Estado superficial de la pieza
- * Forma y tamaño de la pieza

Medios de temple

Medio de temple ideal

- * Velocidad de enfriamiento grande al principio para evitar el corte de la nariz de la curva "S".
- * Velocidad de enfriamiento pequeña por debajo de la nariz de la curva "S" para evitar deformaciones.

*** Ninguno cumple con estos requisitos.**

- * Agua y soluciones acuosas de sales inorgánicas consiguen durante las etapas A y B velocidades muy altas, pero por debajo de la nariz de la curva las velocidades son elevadas y pueden aparecer grietas y deformaciones.
- * El aceite tiene la etapa A más larga, la etapa B más corta y por debajo de la nariz las velocidades son más bajas.

Medios de temple

1) Solución acuosa 10% de Na Cl (salmuera)

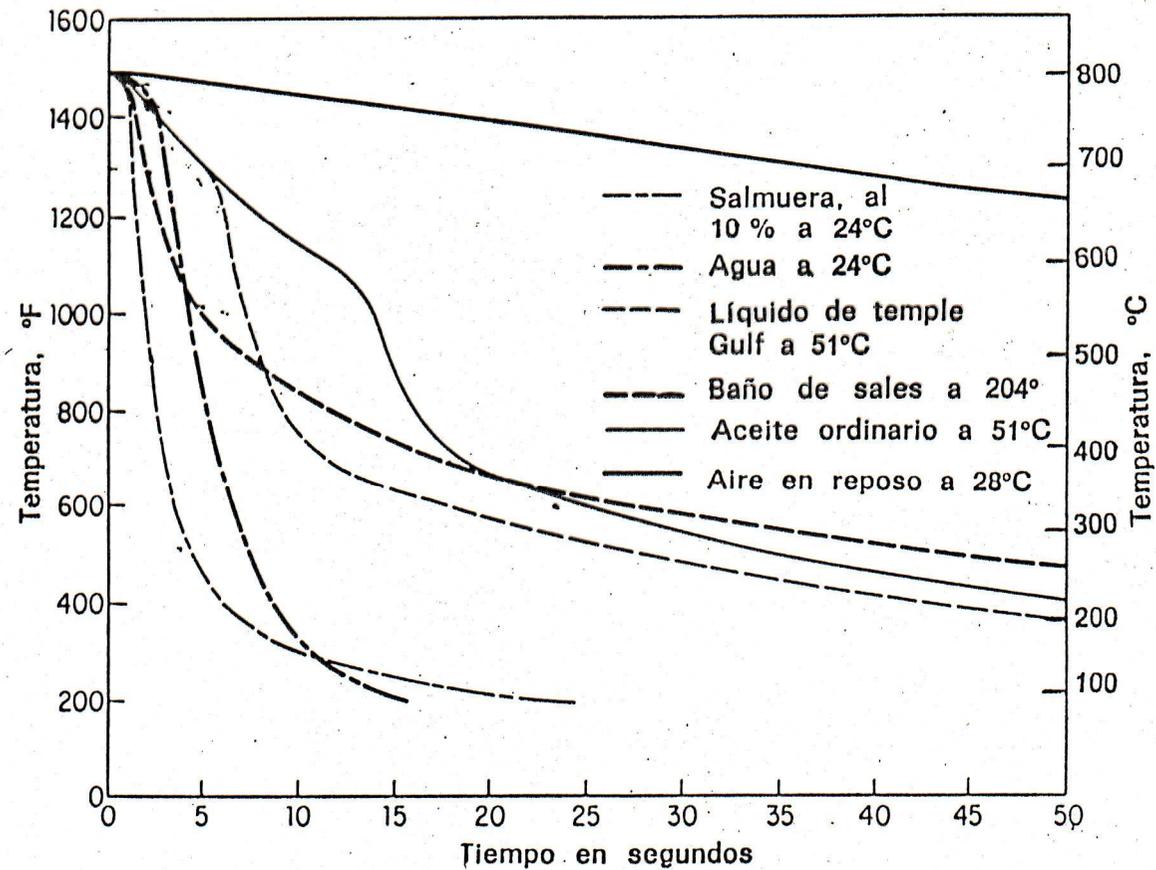
2) Agua H₂O

3) Sales líquidas o fundidas

4) Aceite

5) Aire

Influencia de los medios de enfriamiento en la velocidad de enfriamiento



Curvas de enfriamiento del centro de cilindros de 1/2 pulgada de diámetro y 2,5 pulgadas de longitud de acero inoxidable, templadas sin agitación.

Influencia de la temperatura del medio refrigerante

- * Al aumentar la temperatura del medio disminuye la velocidad de enfriamiento, debido a la mayor duración de la etapa A, como consecuencia de que el punto de ebullición está más próximo (válido para agua y salmuera).**

- * En el aceite entre 49 - 65 °C el efecto es inverso, dado que la viscosidad del refrigerante disminuye mejorando la evacuación de calor.**

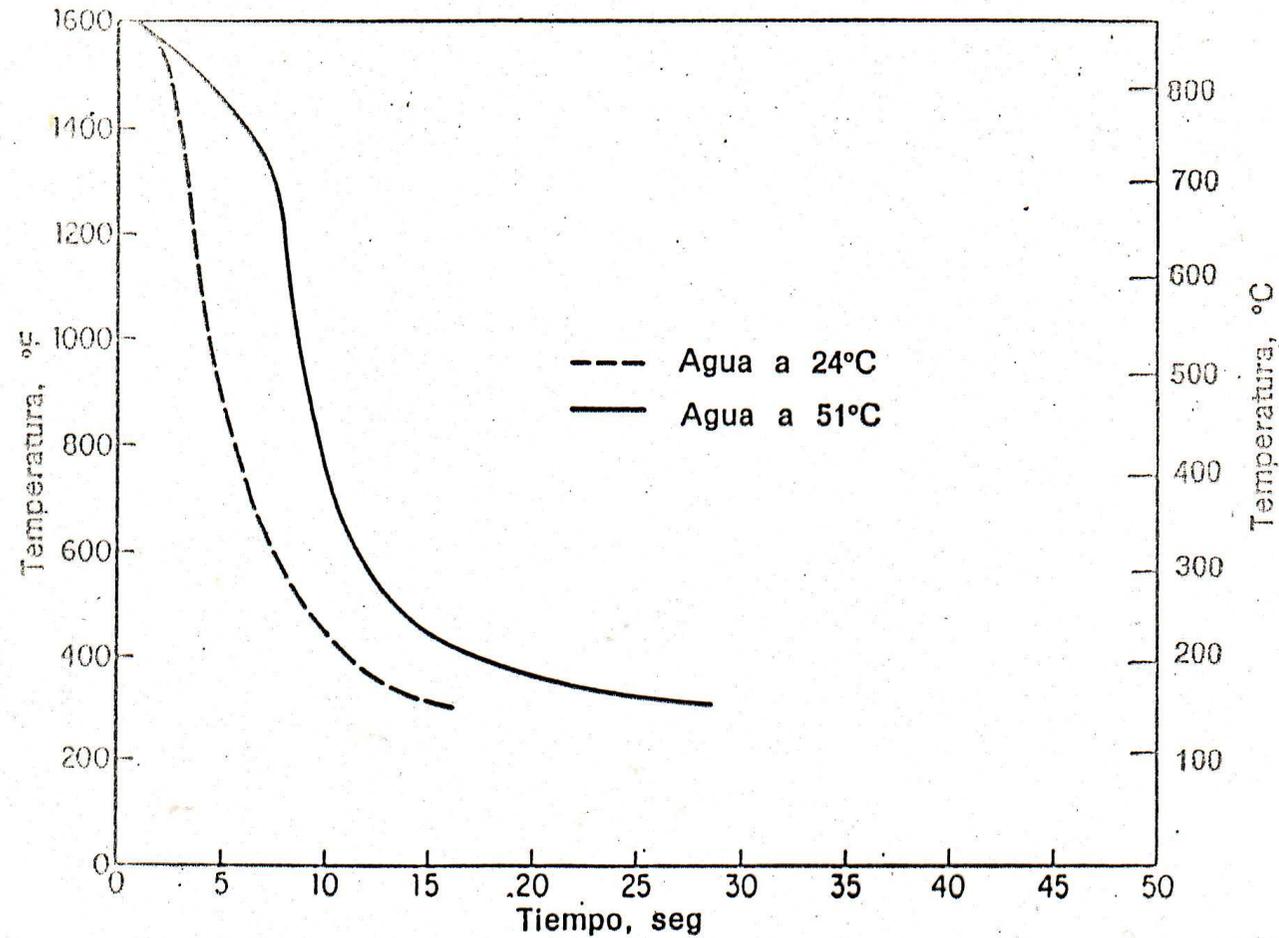
Métodos de controlar la temperatura

- * Para evitar que la temperatura del refrigerante no se eleve durante el enfriamiento de una partida de piezas hay que calcular el volumen de líquido o adecuar las instalaciones introduciendo:**
 - a) Intercambiadores de calor**
 - b) Aumentar la circulación**
 - c) Aumentar el grado de agitación**

Velocidades de enfriamiento en el centro de cilindros de acero inoxidable de 1/2 pulgada de diámetro y de 2,5 pulgadas de longitud cuando se templen en distintos medios desde la temperatura de 815° C*

Método temple	Velocidad a 704°C, °C por seg		Velocidad a 649°C, °C por seg		Velocidad media entre 676—482°C, °C por seg	
	24°	51°	24°	51°	24°	51°
Salmuera (10 %)	212	164,4	212	180	292,1	159
Agua	112	25,5	124	65	122	97,7
Líquido de temple Gulf	44,4	47,2	94,5	100	75	76
Aceite	20	17,8	16,7	14,4	21,6	24,4
Solución acuosa con 10% de aceite sulfo- nado	20	16,7	20	16,7	18,9	15,5
Aire en reposo	2,8	—	2,2	—	1,6	—
Sales fundidas (a 204°C)	90		72,2		36,7	

Curvas experimentales de enfriamiento procesadas con distinta temperatura del medio refrigerante



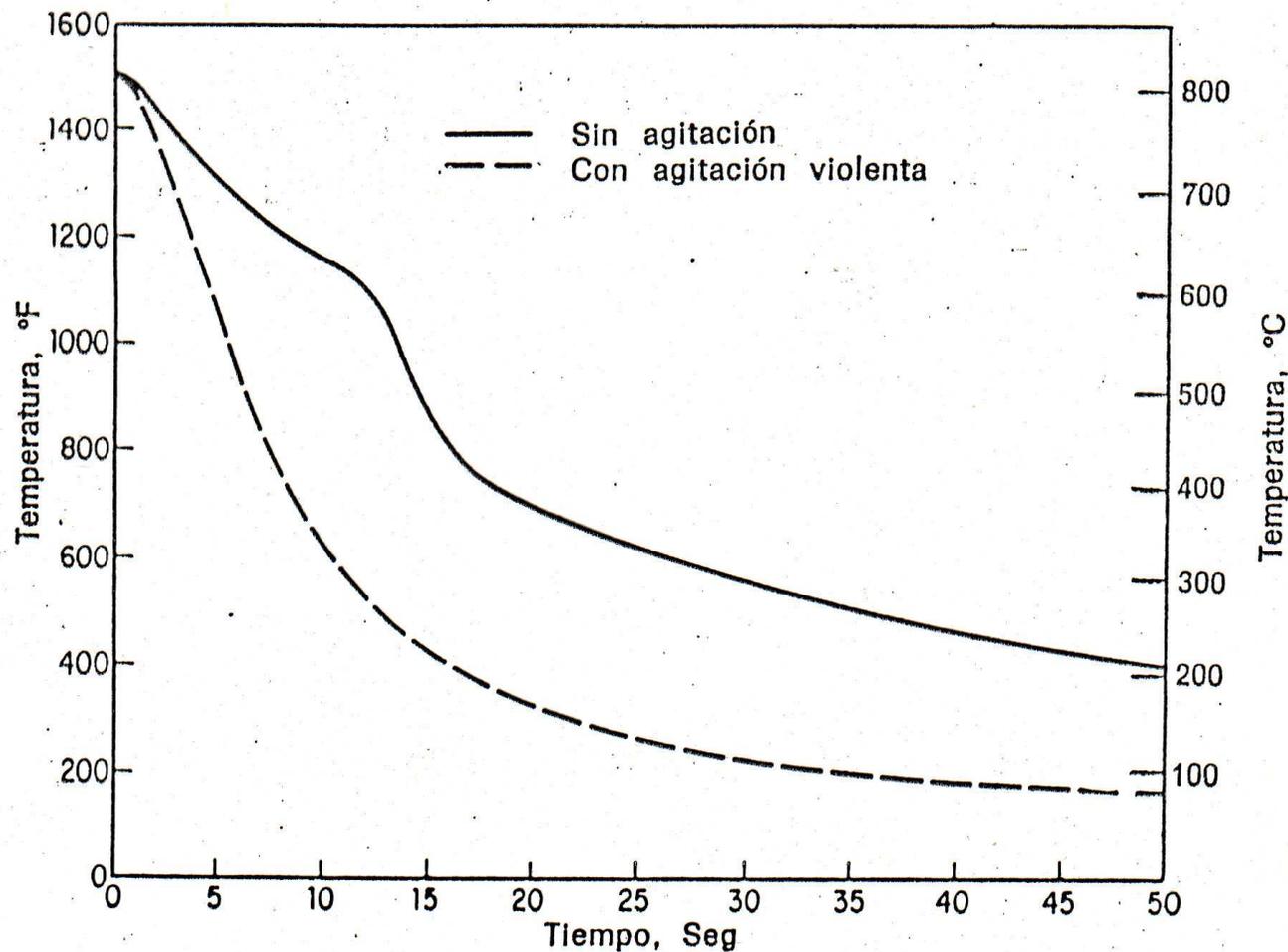
Curvas de enfriamiento del centro de probetas, templadas sin agitación en agua a 24°C y 51°C.

Influencia del grado de agitación del refrigerante

Severidades relativas de temple en distintas condiciones tomando como 1,0 la del agua en reposo*.

Agitación	Aceite	Agua	Salmuera
Reposo	0,25—0,30	0,9—1,0	2
Suave	0,30—0,35	0,9—1,1	2—2,2
Moderada	0,35—0,40	1,2—1,3	
Media	0,40—0,50	1,4—1,5	
Fuerte	0,50—0,80	1,6—2,0	
Violenta	0,80—1,10	4	5

Influencia del grado de agitación del refrigerante



Influencia de la agitación sobre las curvas de enfriamiento del centro de probetas de acero inoxidable, templadas en aceite normal. Temperatura del aceite 51°C.

Influencia del estado superficial

Si exponemos a los materiales ferrosos al contacto con atmósferas oxidantes se forma en su superficie una capa de óxido de hierro (cascarilla) que es aislante, por lo que se dificulta la extracción del calor, variando la velocidad crítica de temple.

Métodos para evitar la oxidación

- 1) Proteger por metalizado con metales más nobles**
- 2) Uso de atmósferas protectoras**
- 3) Hornos de sales**
- 4) Recubrir la pieza con viruta de fundición**

Influencia del tamaño y masa de las piezas

Observaciones

- * **La relación superficie de la pieza / masa es un factor importante sobre la velocidad de enfriamiento.**
- * **La relación estará fuertemente condicionada por la forma, siendo de valor mínimo la esférica.**
- * **Alambres y placas delgadas se enfrían rápidamente.**

Ejemplo

Se considera un cuerpo cilíndrico de secciones extremas despreciables

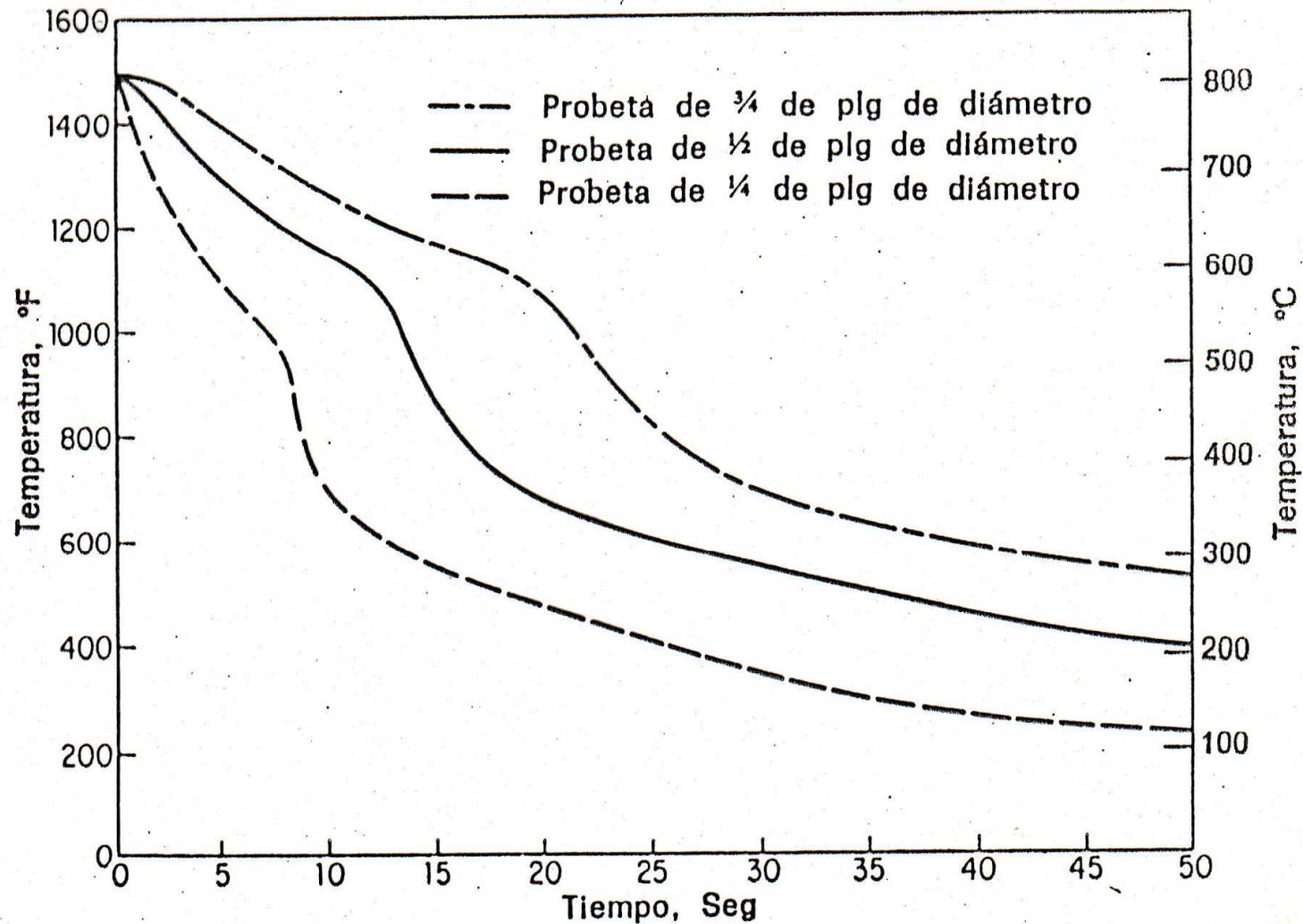
Area lateral = circunsferencia X long. del cilindro

Masa = área de la sección recta X long. X densidad

$$\text{Vel. de enf. (} f = \frac{\text{Area de la superficie}}{\text{Masa}} \text{)} = \frac{\pi D L}{(\pi/4) D^2 L \rho} = \frac{4}{D \rho}$$

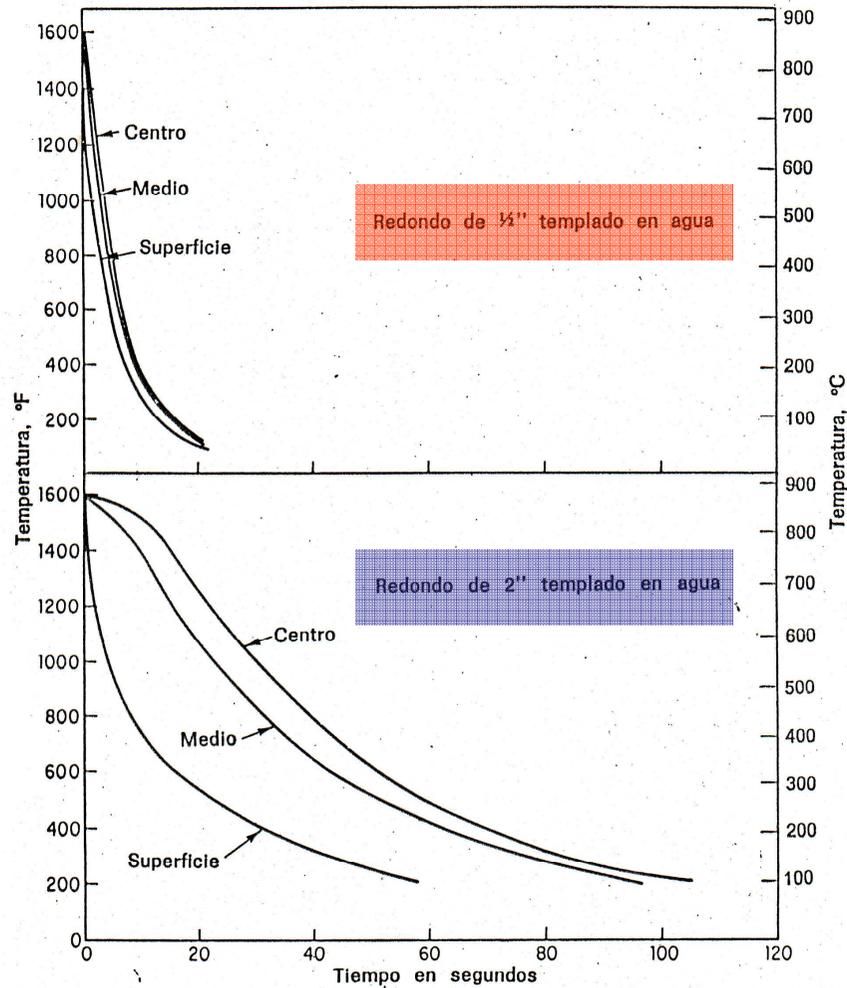
Conclusiones

La velocidad de enfriamiento es inversamente proporcional al diámetro y a la densidad.



Influencia de la masa sobre las curvas de enfriamiento del centro de las probetas de acero inoxidable, templadas en aceite normal de temple. Temperatura del aceite 51°C.

Efecto de masa sobre la velocidad de enfriamiento



Curvas de enfriamiento correspondientes a la superficie, al punto medio del radio y al centro de dos barras de diferente diámetro templadas en agua.

Ejemplo práctico

- * Tratamiento térmico - temple**
- * Material - acero SAE 1045**
- * Temperatura de tratamiento - 850 °C**
- * Medio de enfriamiento - agua**
- * Diámetros 1/2" - 5"**

**Diámetro de la probeta
en pulgadas**

**Dureza superficial
HRc**

0.5

59

1.0

58

2.0

41

3.0

35

4.0

30

5.0

24

Conclusiones

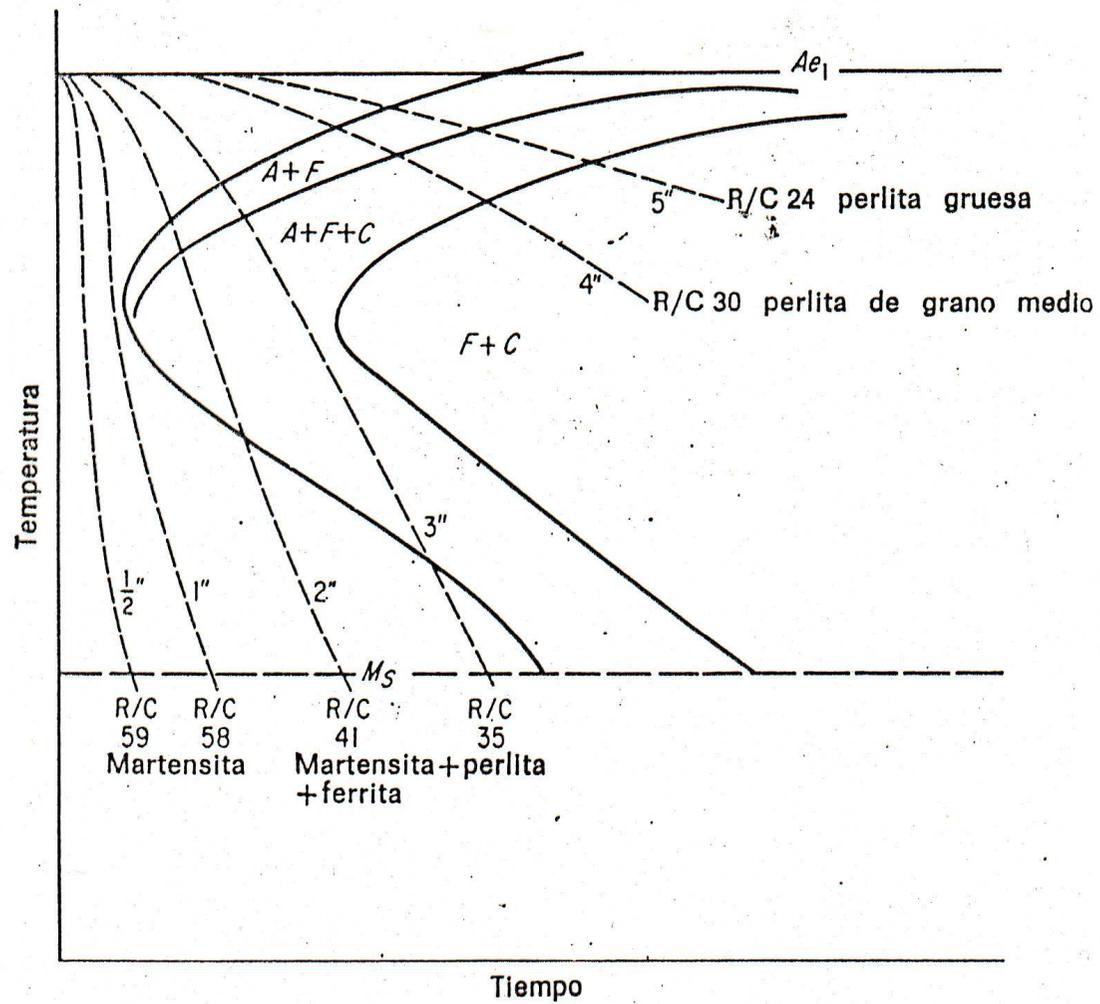
**Probetas 1/2 - 1" - Velocidad de enfriamiento superior a la crítica
(Estructura totalmente martésítica)**

**Probetas 2 - 3" - Velocidades intermedias
(Estructura mezcla de martensita/perlita/ferrita)**

**Probetas 4 - 5" - Velocidades de enfriamiento lentas
(Estructura perlita / ferrita)**

Observaciones

En realidad la probeta de 5" tiene que disipar mucho calor en relación con el área, es decir que el temple es ineficaz ya que se hubieran obtenido resultados similares enfriando en horno.

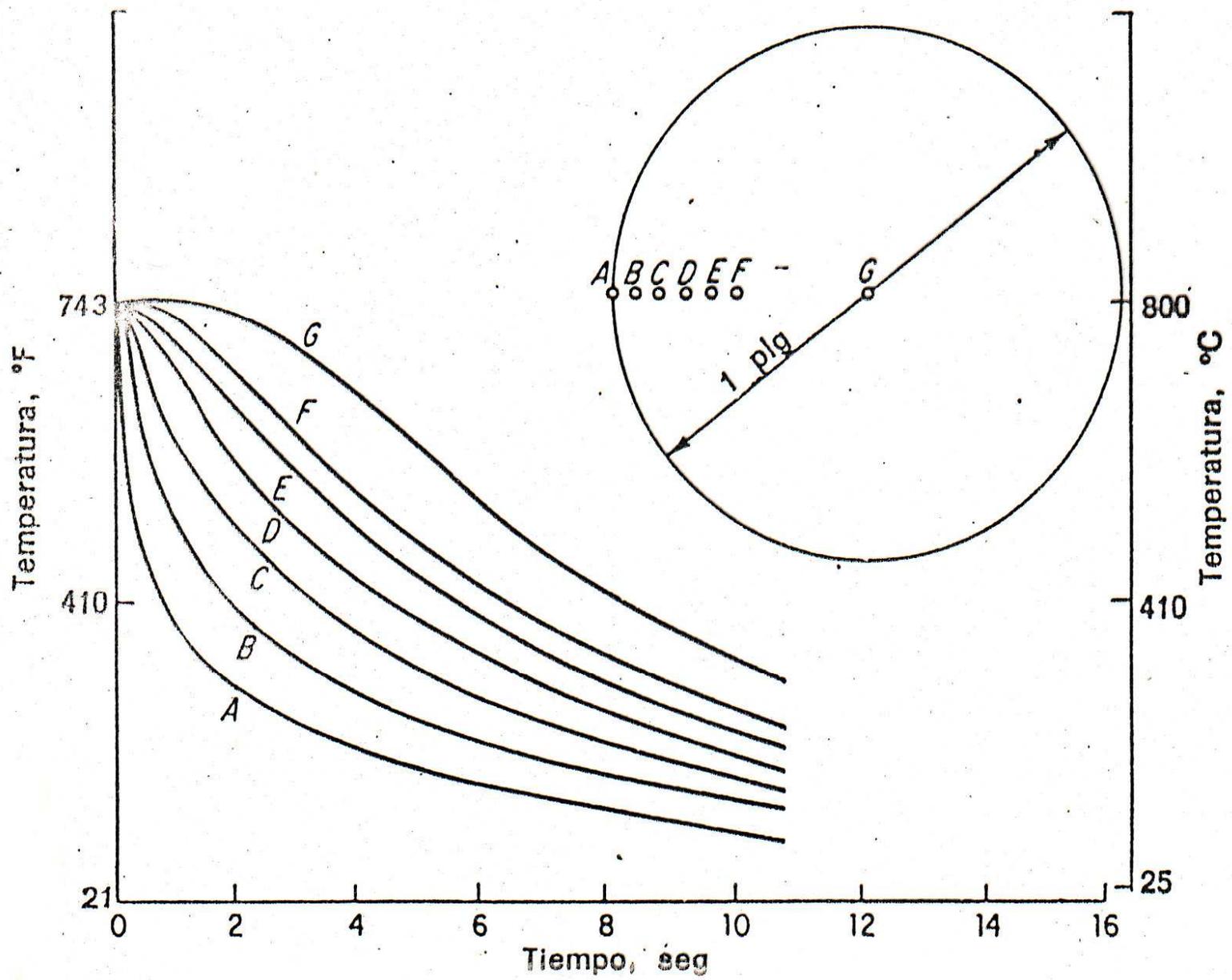


Curvas de enfriamiento superficial, estructura final y dureza de los distintos redondos de acero de 0,45% C colocadas sobre el correspondiente diagrama T-I

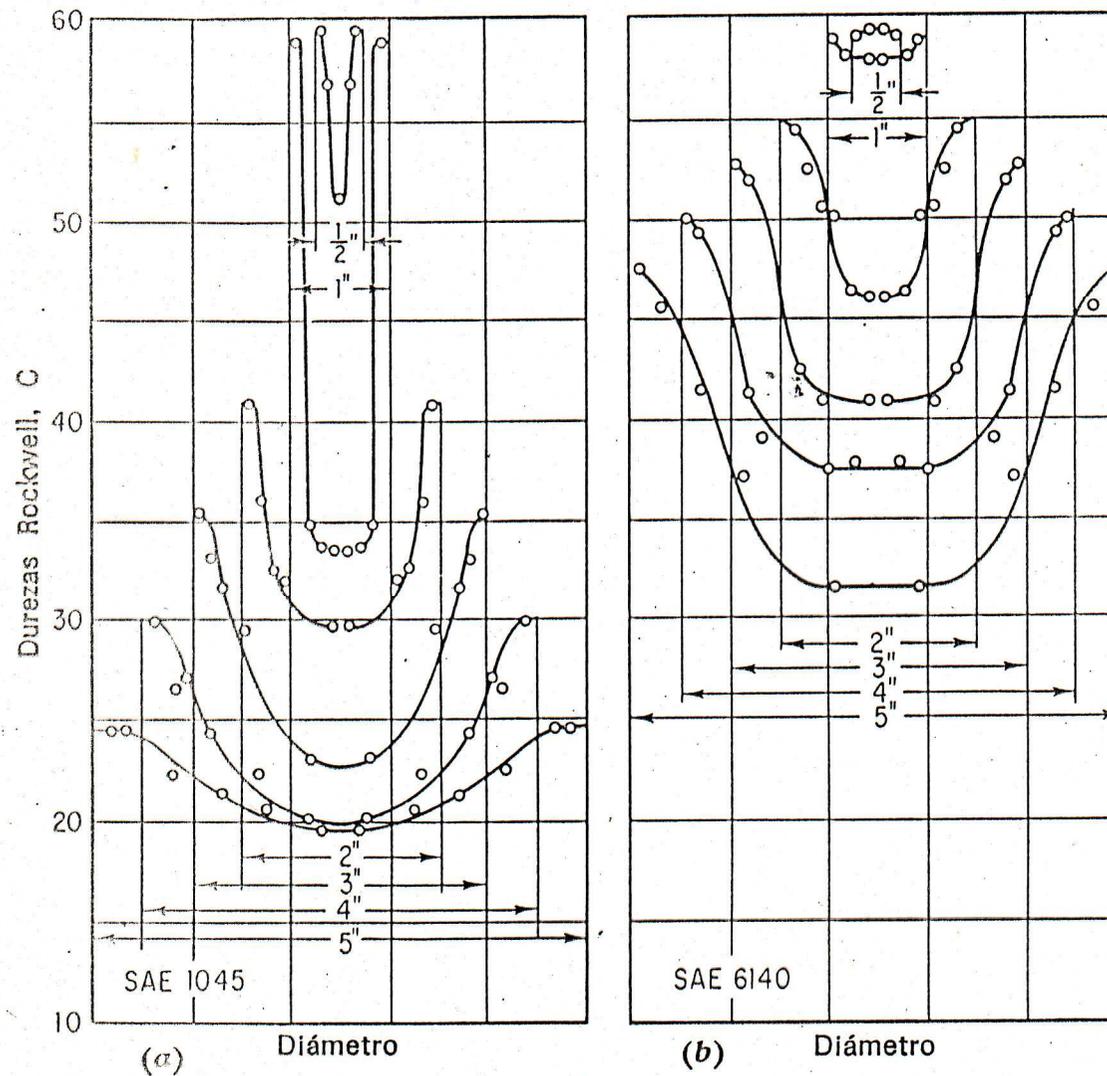
Curvas de penetración de temple

Observaciones

- * **La medición de la dureza superficial nos muestra exclusivamente el resultado logrado en esa zona, la que se encuentra en contacto con el medio refrigerante, pero las velocidades de enfriamiento varían hacia el interior de la pieza.**
- * **El calor del interior se elimina por conducción a través de la pieza hasta alcanzar la superficie y así pasa al medio de enfriamiento.**
- * **Dado que la extracción se realiza de esa forma, la velocidad de enfriamiento disminuye hacia el interior de la pieza.**
- * **Si las velocidades son distintas para diferentes puntos, las estructuras y por consiguiente las durezas serán distintas.**
- * **Se puede construir un gráfico dureza - distancia que ilustre para un material dado, los resultados obtenidos de un temple en condiciones específicas.**

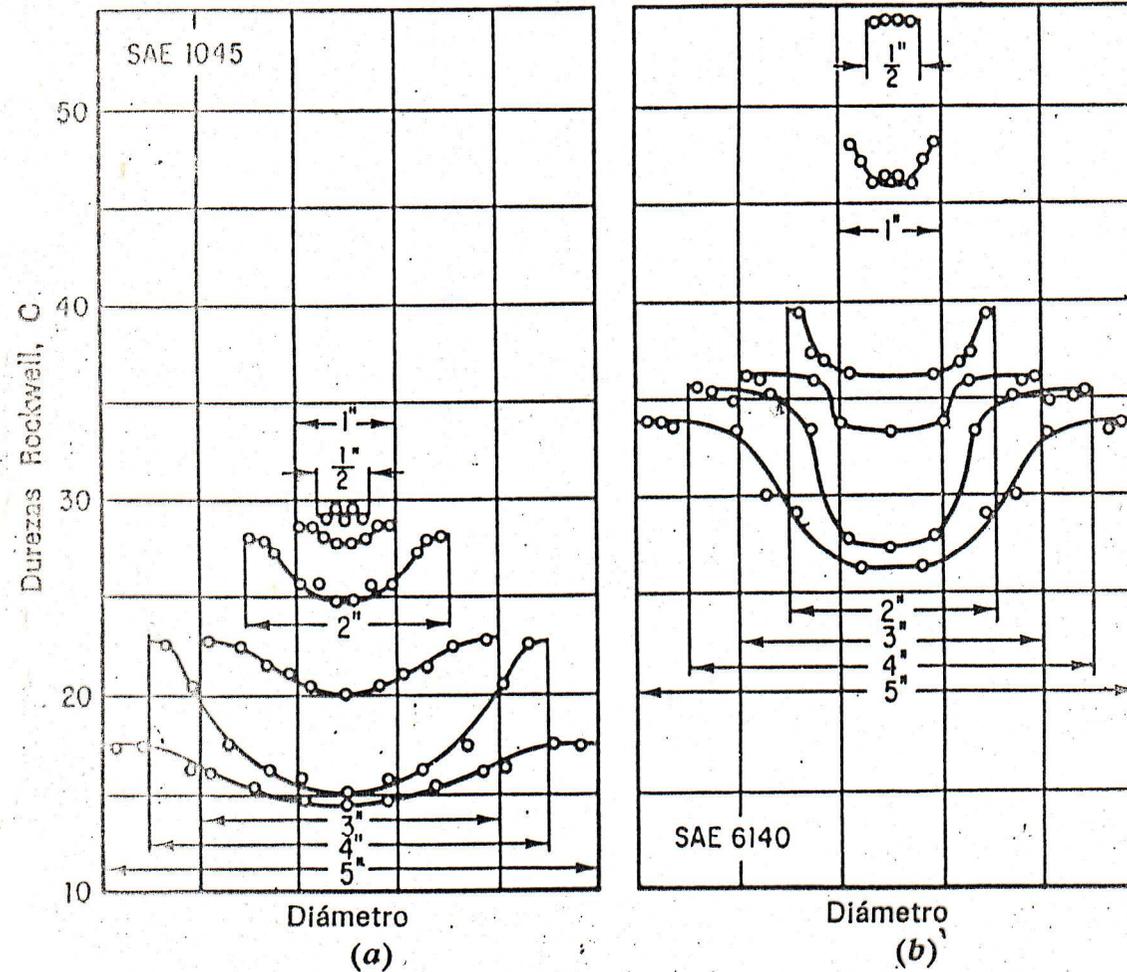


Curvas "U" aceros SAE 1045 y SAE 6140 templados en agua



Curvas de penetración de temple de diversos redondos templados en agua. (a) Acero SAE 1045; (b) acero cromo-vanadio SAE 6140.

Curvas "U" aceros SAE 1045 y SAE 6140 templados en aceite



Curvas de penetración del temple en redondos de distinto diámetro, templados en aceite. (a) Acero SAE 1045; (b) acero cromo-vanadio SAE 6140.

Conclusiones

- * Las curvas nos indican la penetración del temple mostrándonos hasta donde ha templado la pieza.**
- * En un acero de composición química y tamaño de grano austenítico determinado, cualquiera sea la forma y tamaño de grano de la pieza y las condiciones de temple, se alcanzará la misma dureza para iguales velocidades de enfriamiento reales.**
- * Iguales durezas no implican necesariamente iguales velocidades de enfriamiento.**

¿ Como mejorar la templabilidad de un acero ?

1) Para igual velocidad de enfriamiento



Disminuir velocidad crítica de temple



* Elementos de aleación

* Tamaño de grano austenítico

2) Supuesta fija TI



Aumentar velocidad de enfriamiento



* Medio de enfriamiento

* Grado de agitación

* Temperatura del refrigerante

Templabilidad de un acero

Concepto

- * Un acero se elige por la composición química

Ejemplo

AISI 4340

%C 0,38 - 0,43 / %Mn 0,6 - 0,8 / %Si 0,2 - 0,35 / %Ni 1,65 - 2,0

%Cr 0,7 - 0,9 / %Mo 0,2 - 0,3

- * Estas variaciones dan distintas velocidades críticas de temple, por lo que se obtendrán distintas propiedades mecánicas. Por lo tanto en el proyecto se fijan las propiedades mecánicas que debe cumplir la pieza una vez tratada térmicamente

Ensayo Jominy

Conceptos

- * Este ensayo permite construir la curva de templabilidad que sirven para elegir el material que satisfaga las condiciones de proyecto.
- * Ha sido estandarizado según normas ASTM A255 - 48T, AISI, SAE

Instrumentación

- * Se utiliza una probeta standart de forma cilíndrica, mecanizada de $\Phi 25,4$ mm (1") de diámetro y de 101,6 mm (4") de largo
- * 1° Calienta en un horno con atmósfera controlada hasta lograr la total austenización

* 2° Colocarla en el dispositivo especial, suspendida en el soporte del equipo

Están normalizados:

- a) **Diámetro del orificio de salida del agua**
- b) **Distancia de la base inferior de la probeta al orificio de salida del refrigerante**
- c) **Altura libre del chorro de refrigerante**
- d) **Temperatura del agua**
- e) **Diámetro del orificio de salida del refrigerante**

* 3° Se mantiene 10 minutos bajo el agua

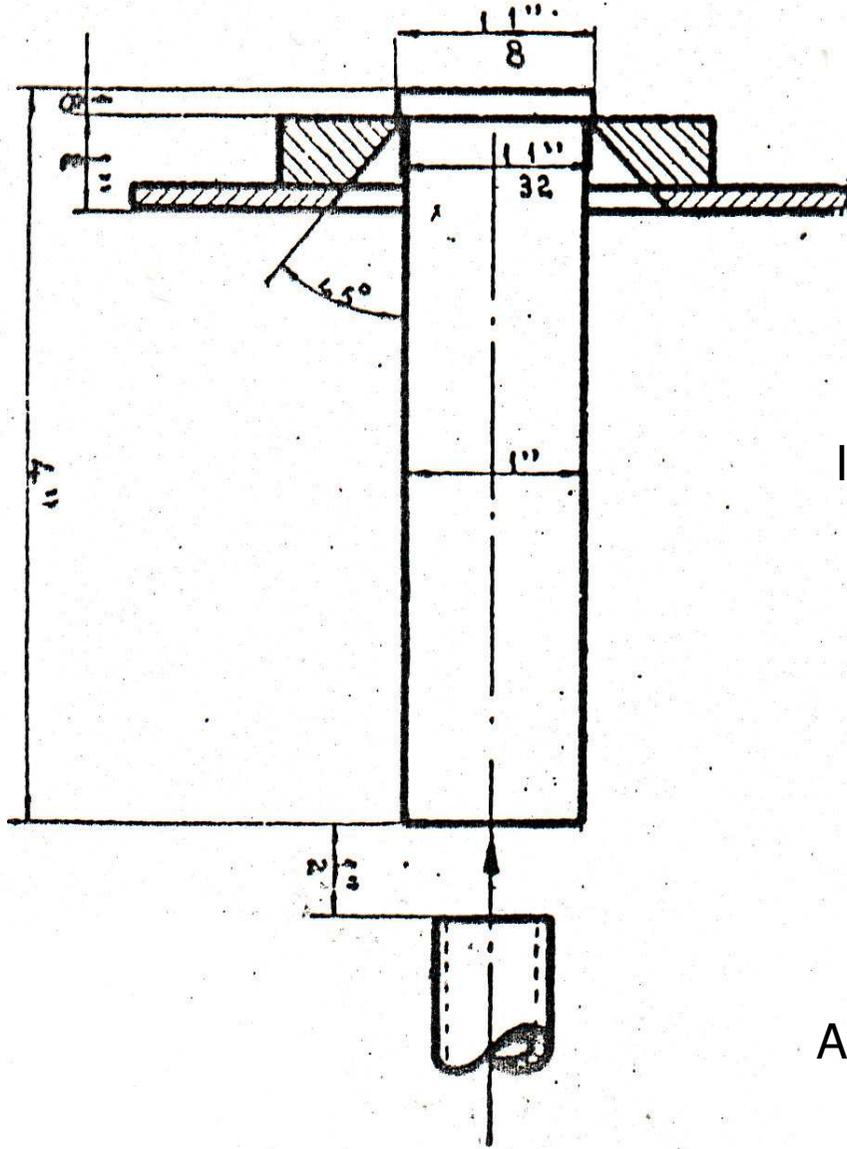
* 4° Eliminar el chorro de agua

* 5° Retirar la probeta del dispositivo

* 6° Rectificar la probeta según dos generatrices opuestas hasta una profundidad de 0,4 mm

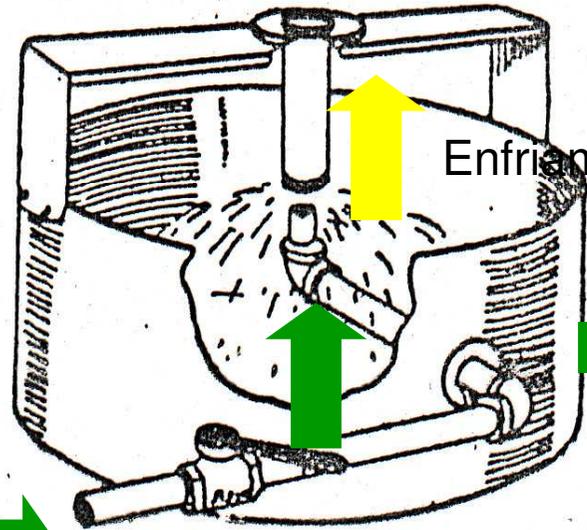
* 7° Medir dureza HRc a intervalos de 1/16" a partir del extremo templado

* 8° Registrar en un gráfico dureza - distancia los valores obtenidos



DISPOSITIVO DE ENSAYO

Ingreso de probeta

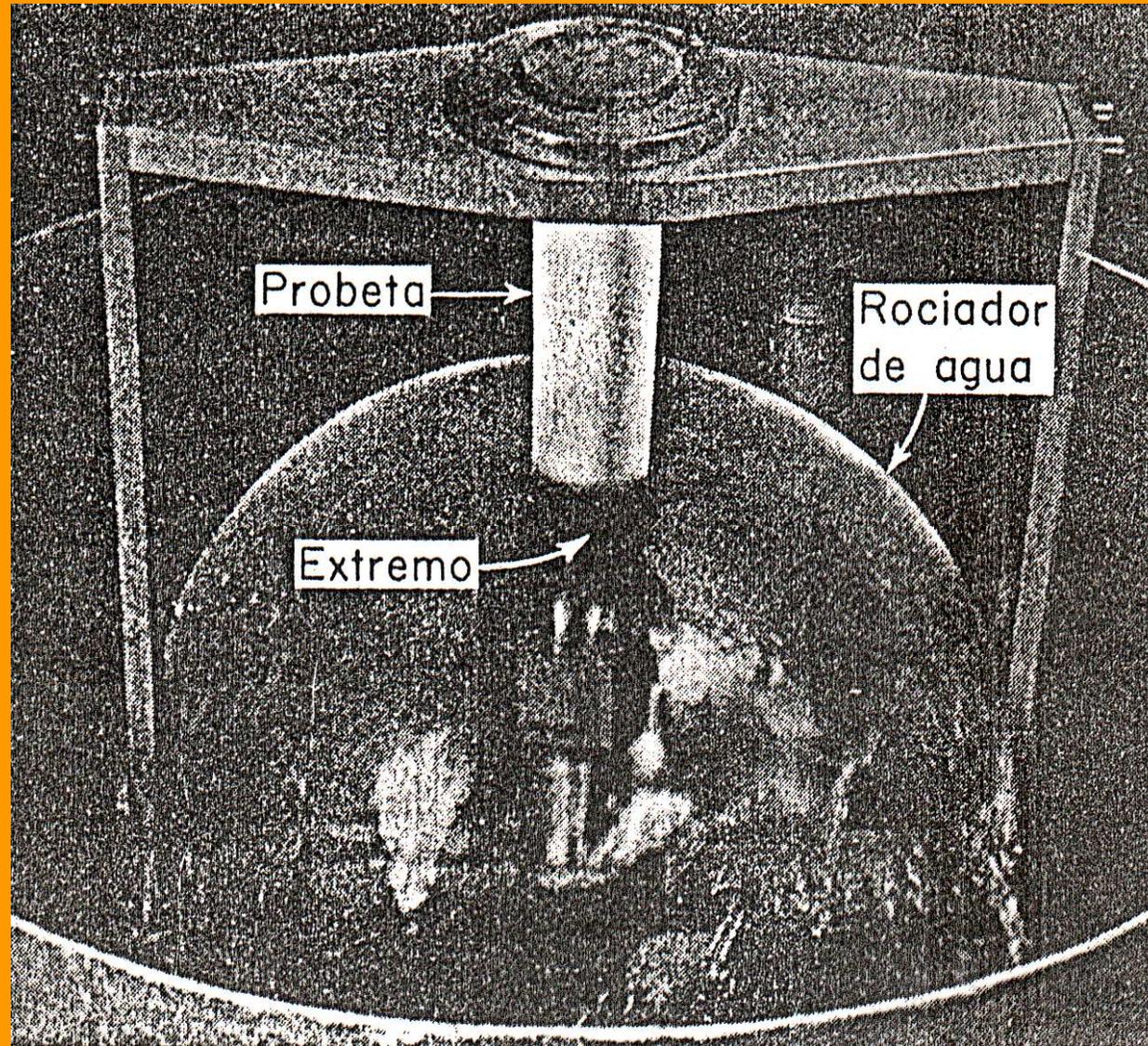


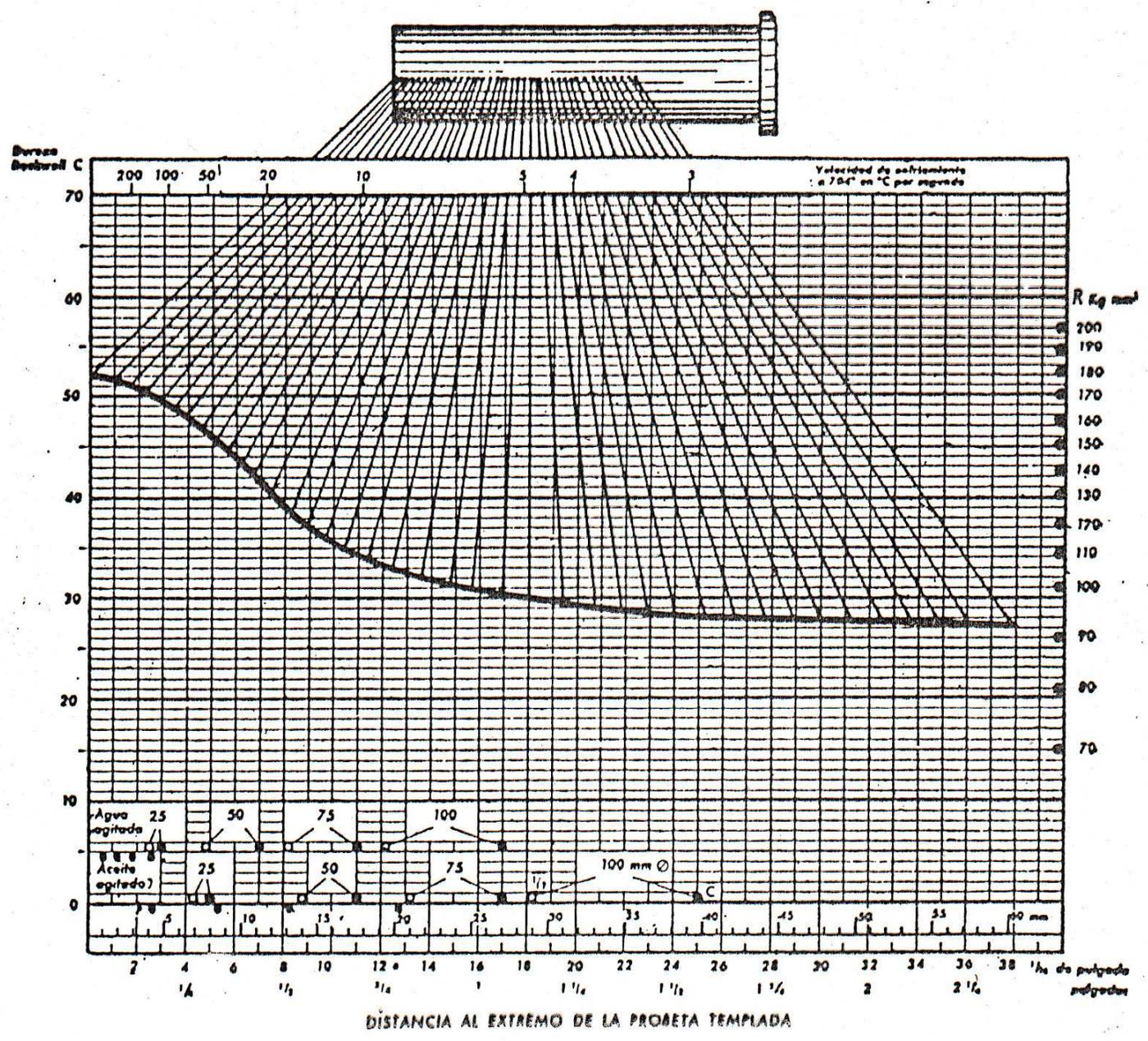
Enfriamiento

Agua



Etapas del ensayo Jominy





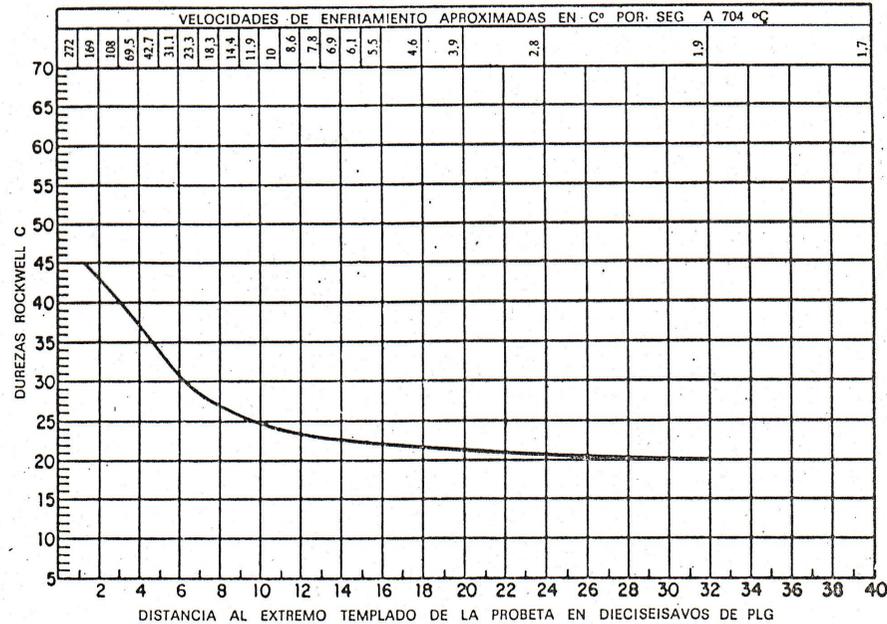
Planilla para el ensayo Jominy

DETERMINACION DE LA TEM-
PLABILIDAD DE UN ACERO SE-
GUN LAS NORMAS A. S. T. M.
(A 255-48 T).

FECHA _____
LABORATORIO _____
PROBETA DEL TIPO _____
ENSAYO N.º _____

Tipo	Colada n.º	Tamaño grano	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Temp. nor- mal, C°	Temp. de temple, C°
4620	35862	8	0.18	0.55	0.018	0.018	0.27	1.79	0.47	0.23	0.14		926

OBSERVACIONES



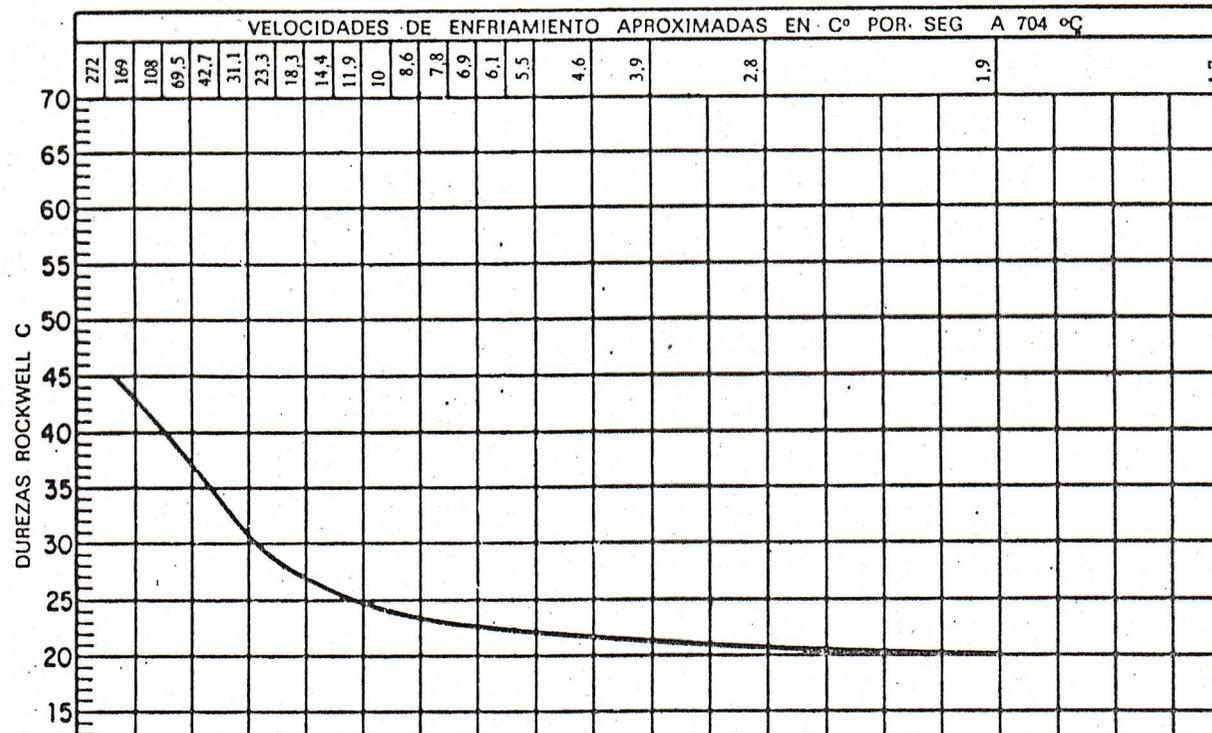
Una curva típica de templabilidad.

DETERMINACION DE LA TEM-
PLABILIDAD DE UN ACERO SE-
GUN LAS NORMAS A. S. T. M.
(A 255-48 T).

FECHA _____
LABORATORIO _____
PROBETA DEL TIPO _____
ENSAYO N.º _____

Tipo	Colada n.º	Tamaño grano	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Temp. nor- mal, C°	Temp. de temple, C°
4620	35862	8	0,18	0,55	0,018	0,018	0,27	1,79	0,47	0,23	0,14		926

OBSERVACIONES



Velocidades de enfriamiento en el ensayo Jominy

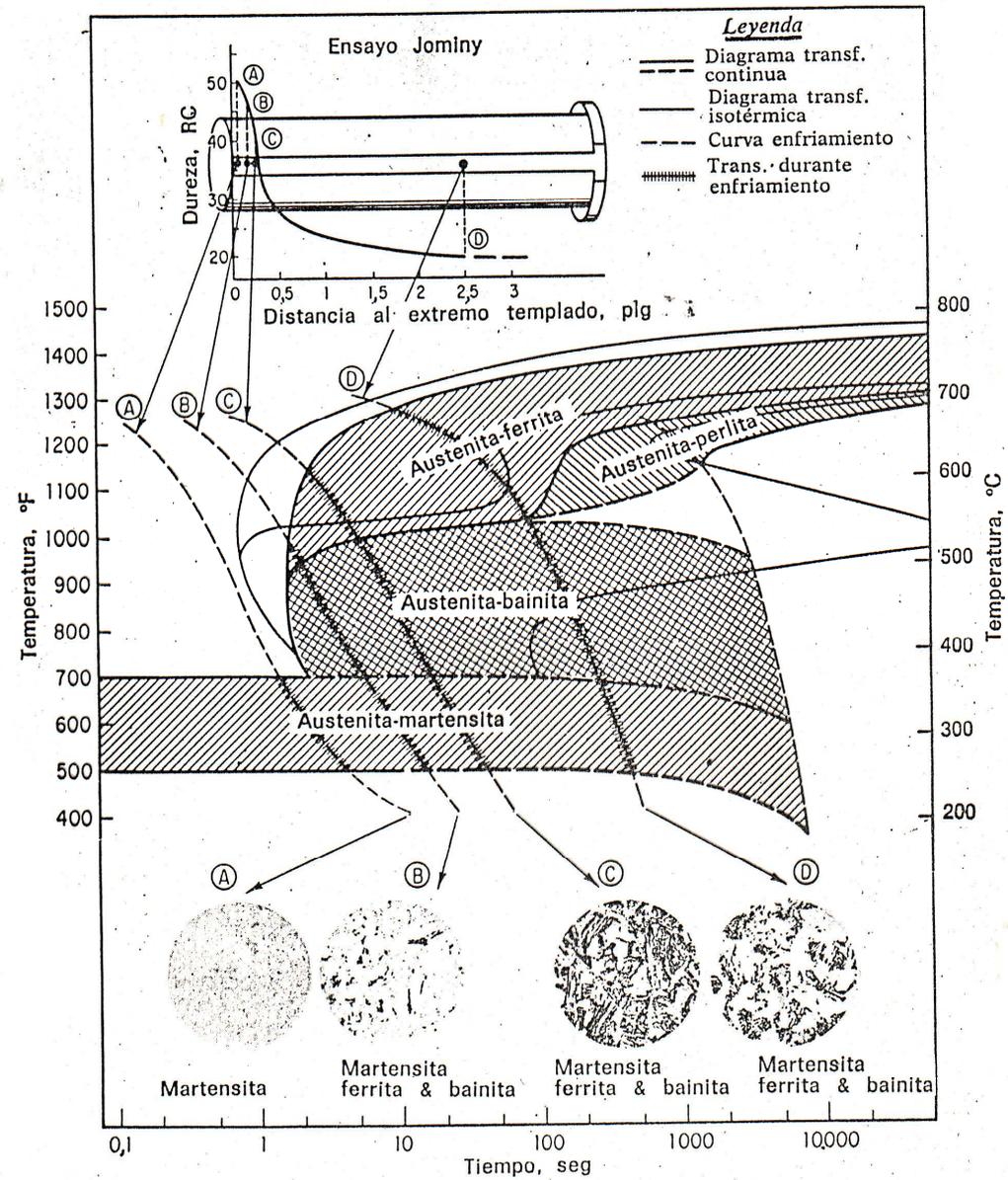
Velocidades de enfriamiento en el ensayo Jominy a distintas distancias del extremo templado de la probeta normal

Distancia al extremo templado pulgadas	Velocidad de enfriamiento, °C por segundo a 704°C	Distancia al extremo templado, pulgadas	Velocidad de enfriamiento °C por segundo, a 704°C
1/16	271,7	11/16	10,8
1/8	170,6	3/4	9,0
3/16	108,3	13/16	8,0
1/4	68,8	7/8	6,9
5/16	42,9	15/16	6,4
3/8	31,3	1	5,6
7/16	23,3	1 1/4	3,9
1/2	17,9	1 1/2	2,8
9/16	13,9	1 3/4	2,2
5/8	11,9	2	1,9

Observaciones

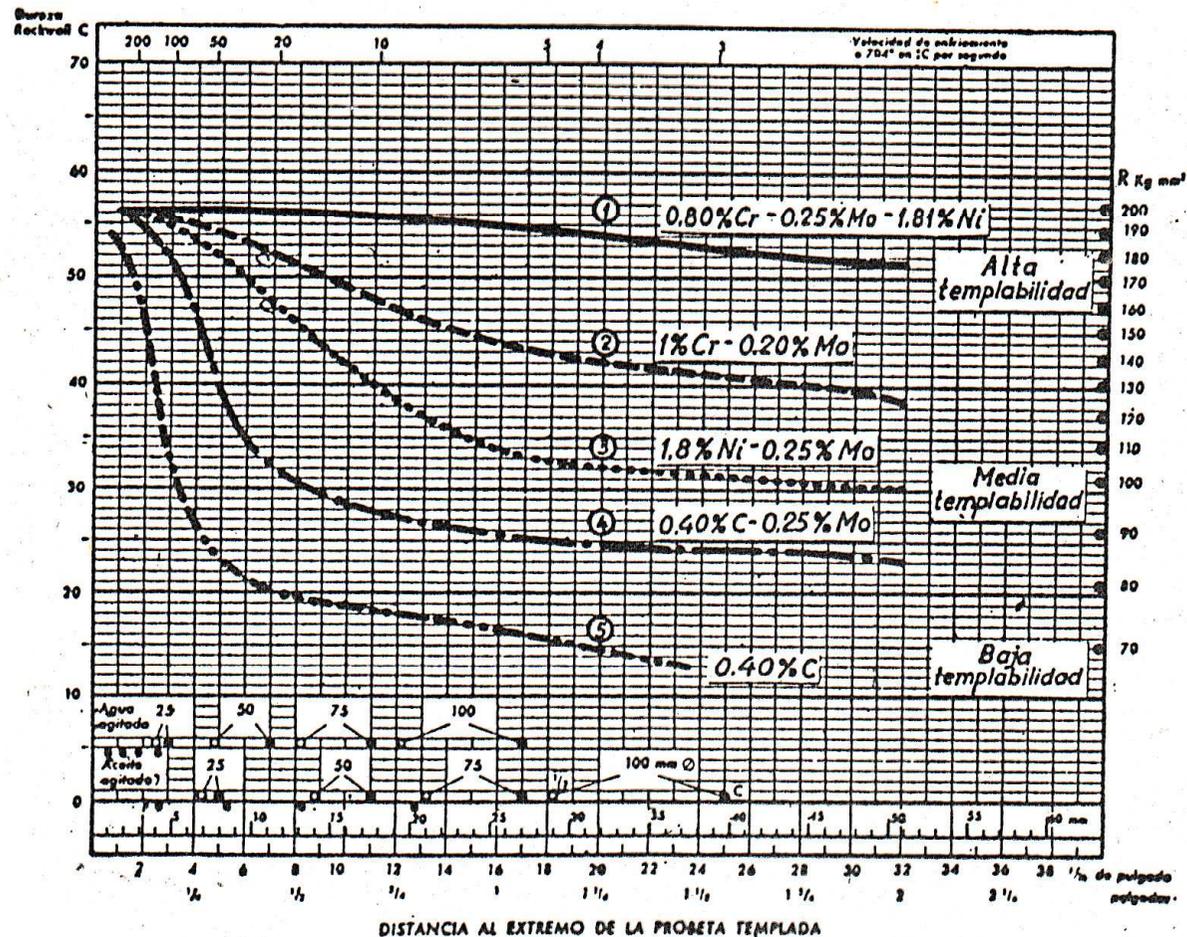
- * La velocidad de enfriamiento varía a medida que nos alejamos de la superficie de contacto de la probeta con el medio de refrigerante**
- * La velocidad de enfriamiento depende no sólo de la variación del tiempo sino de la distancia a la superficie de contacto con el medio refrigerante**
- * La superposición de las curvas de enfriamiento sobre los diagramas TI o TC nos permitirán conocer la transformación austenítica y el gradiente de microestructuras que se origina a lo largo de las generatrices de las probetas en el ensayo Jominy**

Ensayo Jominy en acero SAE 8630

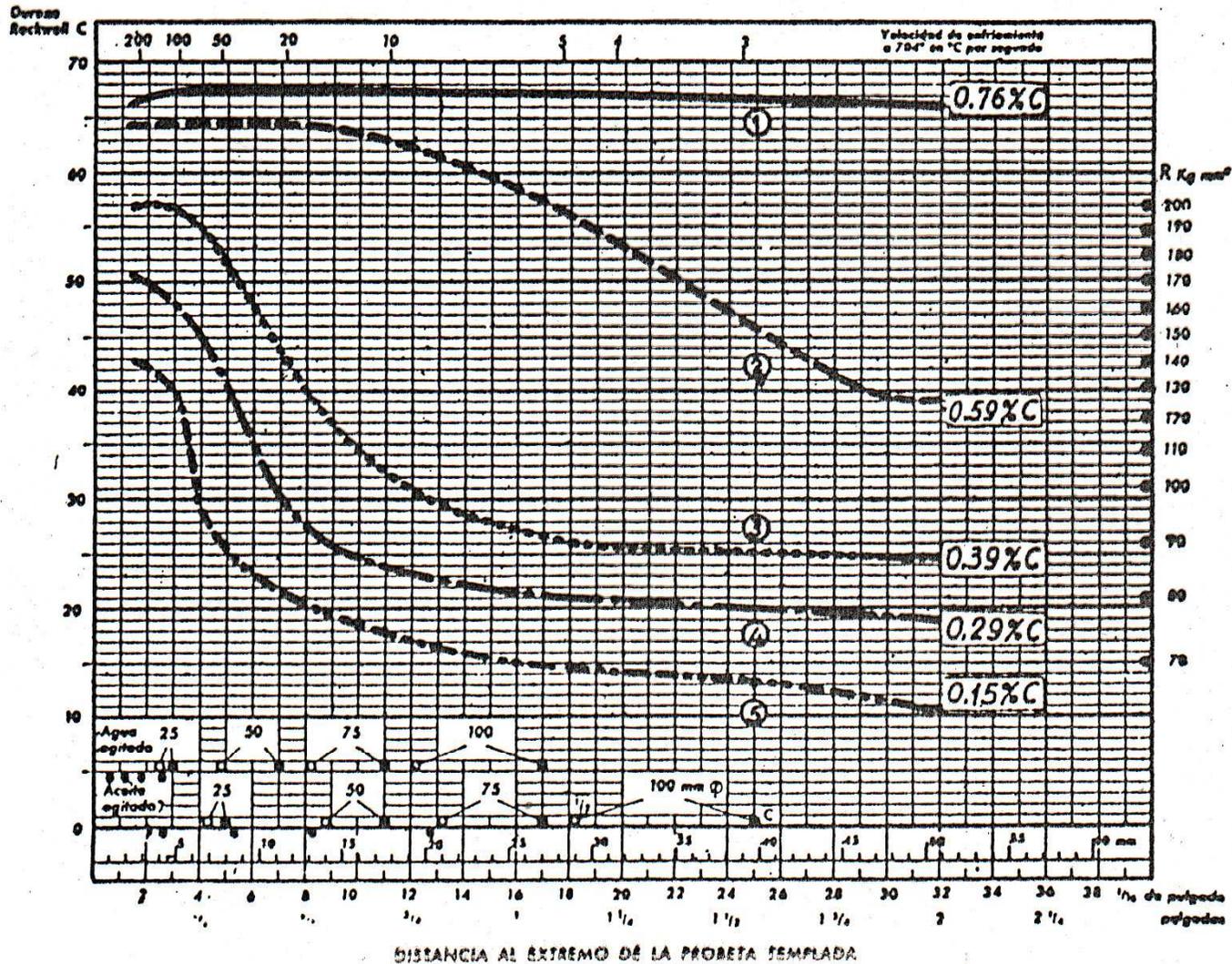


Relación entre los diagramas T-T y de transformación continua y los valores obtenidos en el ensayo Jominy de un acero del tipo 8630.

Influencia de los elementos de aleación sobre las curvas Jominy



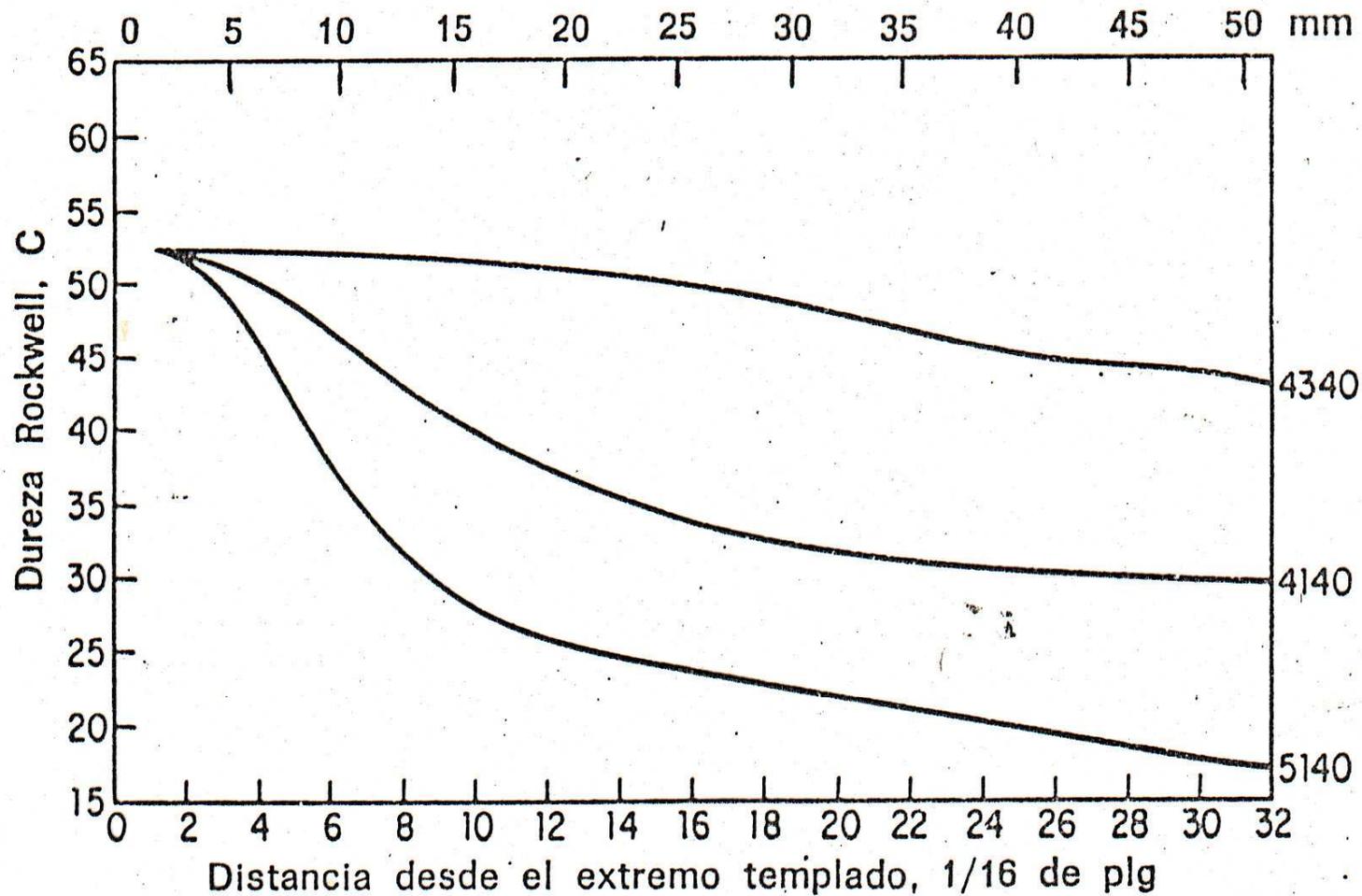
Curvas Jominy de varios aceros de 0,40 % de carbono y diferentes elementos de aleación.



Curvas Jominy de diversos aceros de diferente contenido en carbono y los mismos elementos de aleación.

Mn = 0,50 %; Ni = 1,75 %; Mo = 0,25 %

Curvas Jominy de aceros SAE 4340 4140 / 5140



Curvas de templabilidad de los aceros aleados 4340, 4140 y 5140.

Observaciones

- * Todas las curvas tienen en común el mismo porcentaje de carbono
- * La dureza de partida para todas las aleaciones es igual, ya que la dureza de la martensita depende del tenor de carbono
- * El acero SAE 4340 mantiene esta dureza hasta los 10/16" para decrecer gradualmente, mientras el SAE 4140 y 5140 caen casi de inmediato

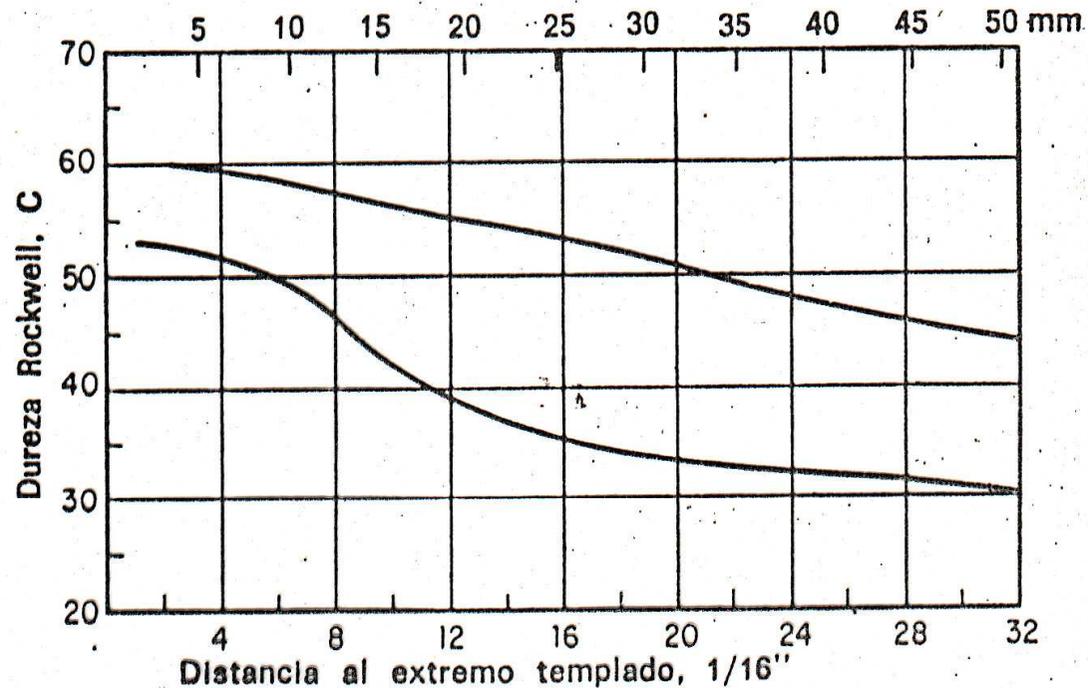
Bandas de templabilidad

Límt. de dureza correspondiente a la especificación		
Distanc. «J» 1/16''	4140H	
	Max	Min
1	60	53
2	60	53
3	60	52
4	59	51
5	59	51
6	58	50
7	58	48
8	57	47
9	57	44
10	56	42
11	56	40
12	55	39
13	55	38
14	54	37
15	54	36
16	53	35
18	52	34
20	51	33
22	49	33
24	48	32
26	47	32
28	46	31
30	45	31
32	44	30

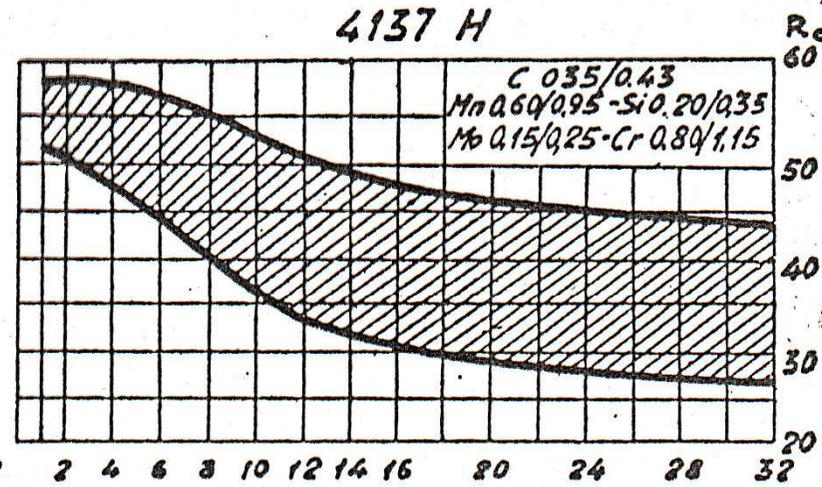
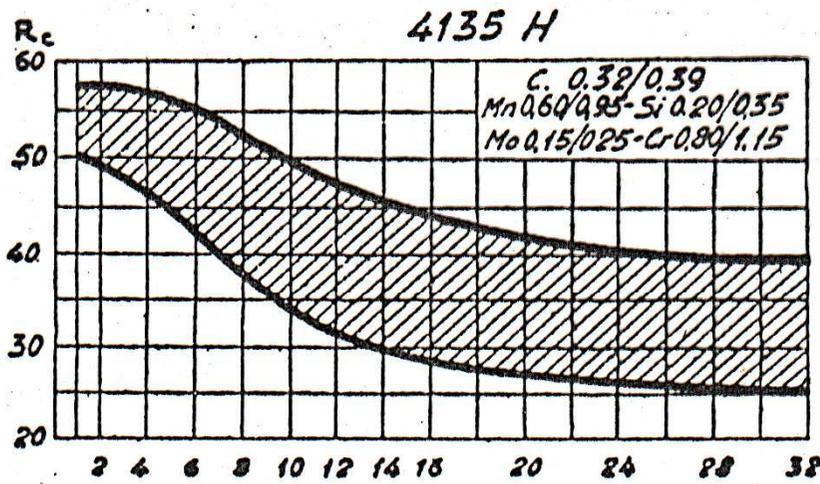
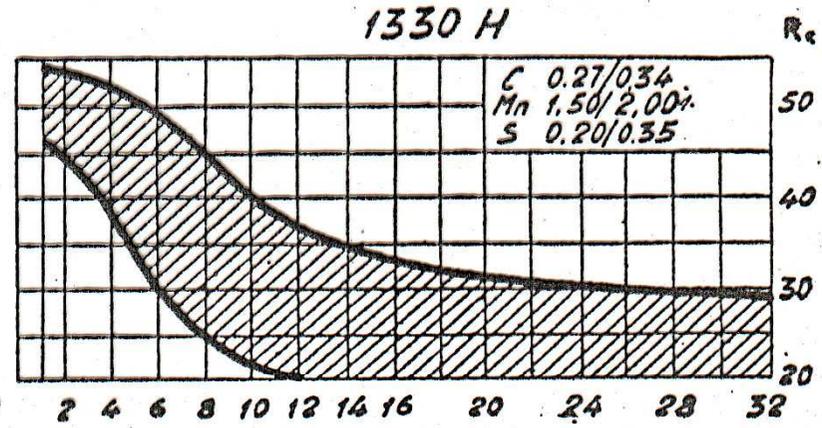
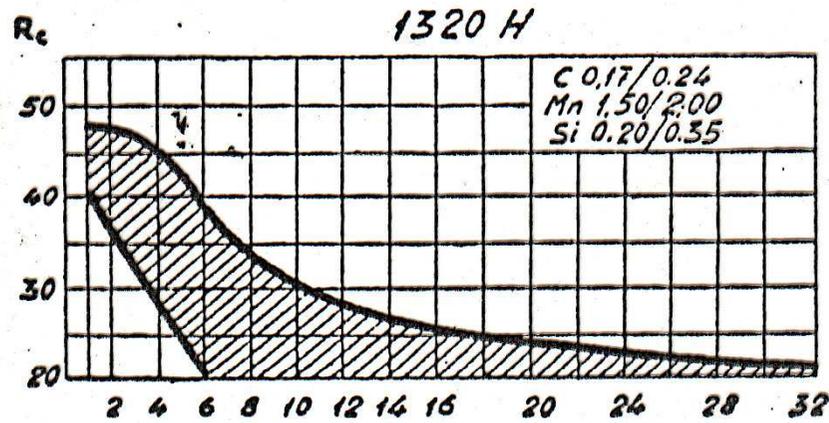
Temperaturas de tratamiento térmico recomendadas por la SAE
 * Normalizado a 871°C
 Austenizado a 843°C
 * Para probetas laminadas o forjadas solamente

Banda de templabilidad 4140 H

C	Mn	Si	Cr	Mo
0,37 / 0,44	0,65 / 1,10	0,20 / 0,35	0,75 / 1,20	0,15 / 0,25



Banda de templabilidad normal y valores obtenidos en el ensayo Jominy de un acero 4140 H.



Bandas de templabilidad de dos aceros al manganeso y dos aceros cromo-molibdeno.

Utilización de los valores de la templabilidad

Procedimiento

- * Saber que dureza queremos en determinado punto
- * Conocer la velocidad de enfriamiento de dicho punto
- * Determinar en la probeta Jominy la situación del punto que cumple esa especificación

Ejemplo

- 1) Barra redonda de acero de Φ 2"
- 2) Templada en aceite con agitación moderada $H = 0,35$
- 3) Se necesita una dureza mínima en el centro de HRc 40

Especificación

J 40 min = 12/16 (3/4")

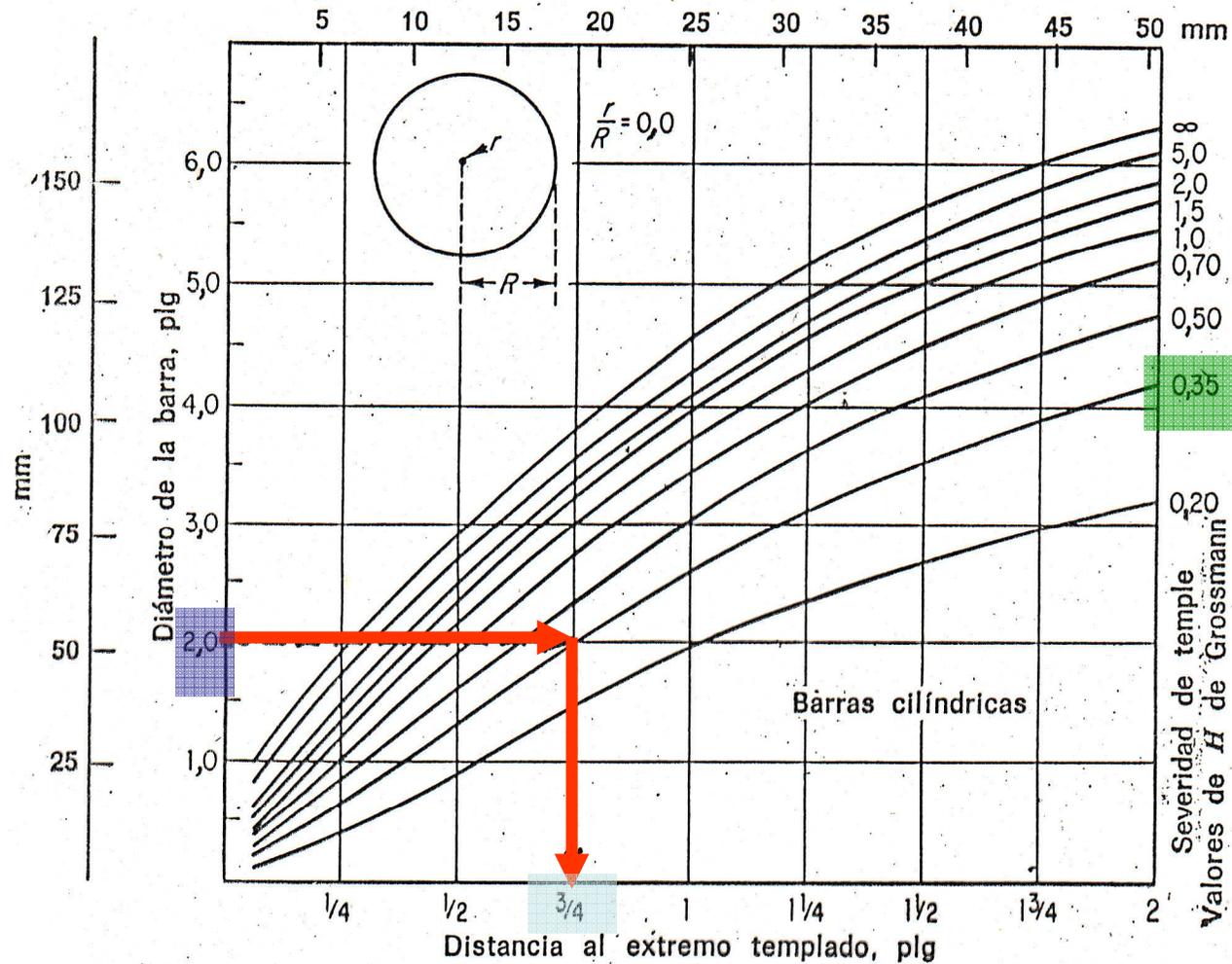
Existen varios materiales que cumplen esa especificación

Selección

- 1) Se parte en la ordenada de $\Phi 2''$ de diámetro hasta alcanzar $H = 0,35$ en el ábaco 
- 2) Se busca en la abscisa la distancia equivalente en la probeta Jominy (ejemplo $3/4''$)
- 3) Se selecciona el acero cuya curva de templabilidad tenga HRc 40 a $3/4''$ de distancia

Abaco para seleccionar material

$r/R = 0$



Curvas de equivalencia entre los puntos de una probeta Jominy y el centro de barras de distintos diámetros en diversas condiciones de temple.



Ejemplo

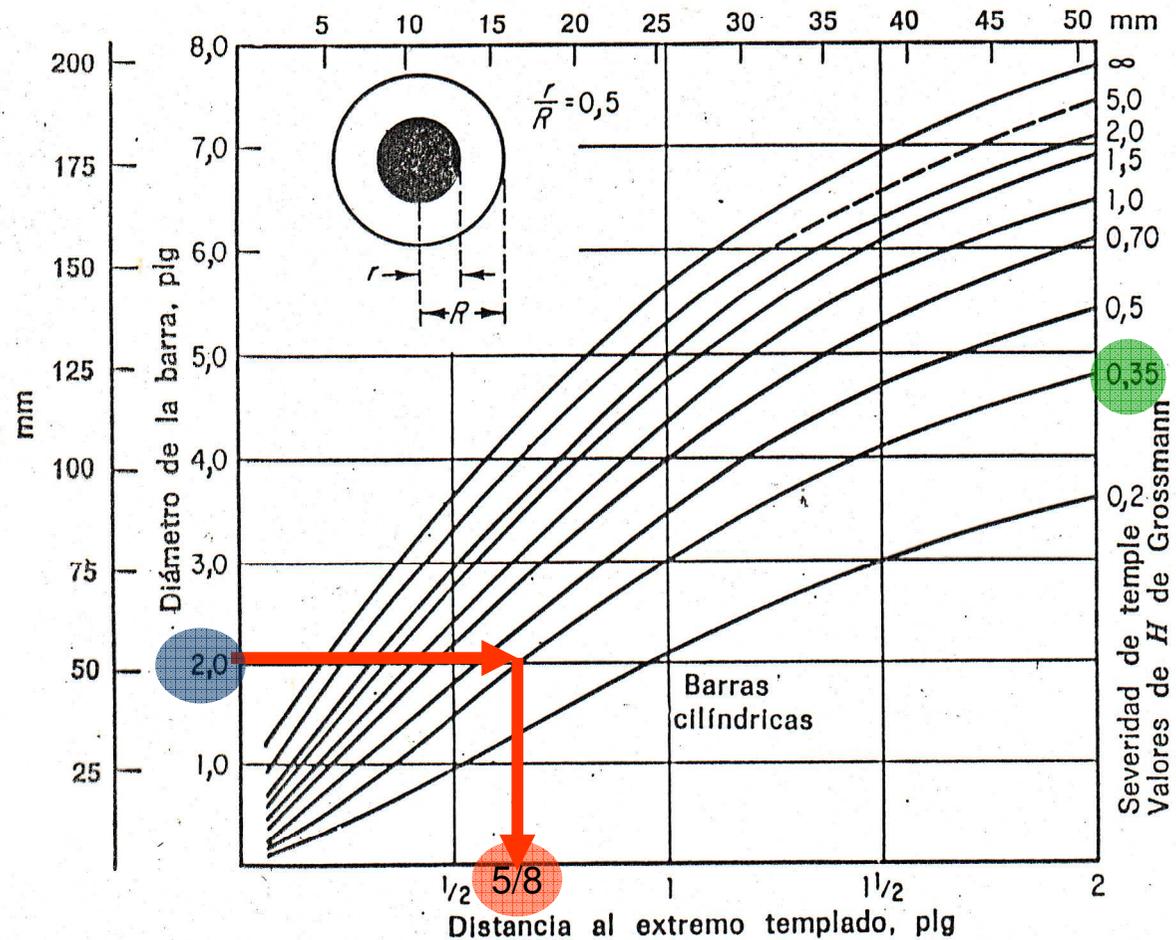
- 1) Barra redonda de acero de $\Phi 2''$
- 2) Templada en aceite con agitación moderada $H = 0,35$
- 3) Se necesita una dureza mínima en $r/R = 0,5$ de HRc 40

Selección

- 1) Se parte en la ordenada de $\Phi 2''$ de diámetro hasta alcanzar $H = 0,35$ en el ábaco 
- 2) Se busca en la abscisa la distancia equivalente en la probeta Jominy (ejemplo $5/8''$)
- 3) Se selecciona el acero cuya curva de templabilidad tenga HRc 40 a $5/8''$ de distancia

Abaco para seleccionar material

$r/R = 0,5$



Curvas de equivalencia entre los puntos de una probeta Jominy y los puntos de barras de distintos diámetros, distantes la mitad del radio del centro, en diversas condiciones de temple.





