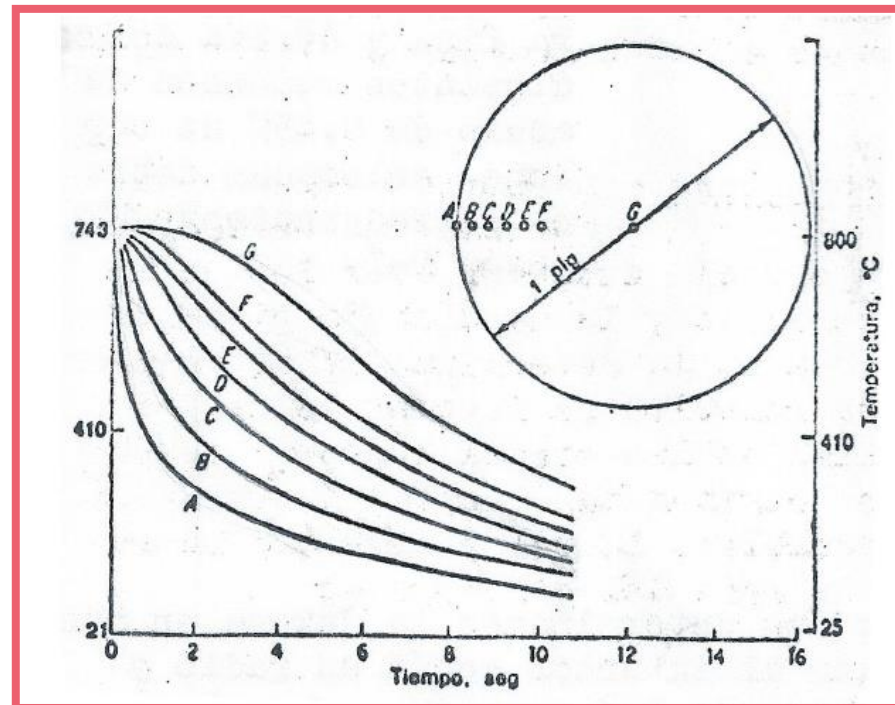




TEMPLABILIDAD O PENETRACIÓN DEL TEMPLE

NOTA: RECORDAR QUE ESTA PRESENTACIÓN ES SOLO UNA GUÍA DIDÁCTICA. AMPLIAR TEMA CON APUNTES DE LA CÁTEDRA.

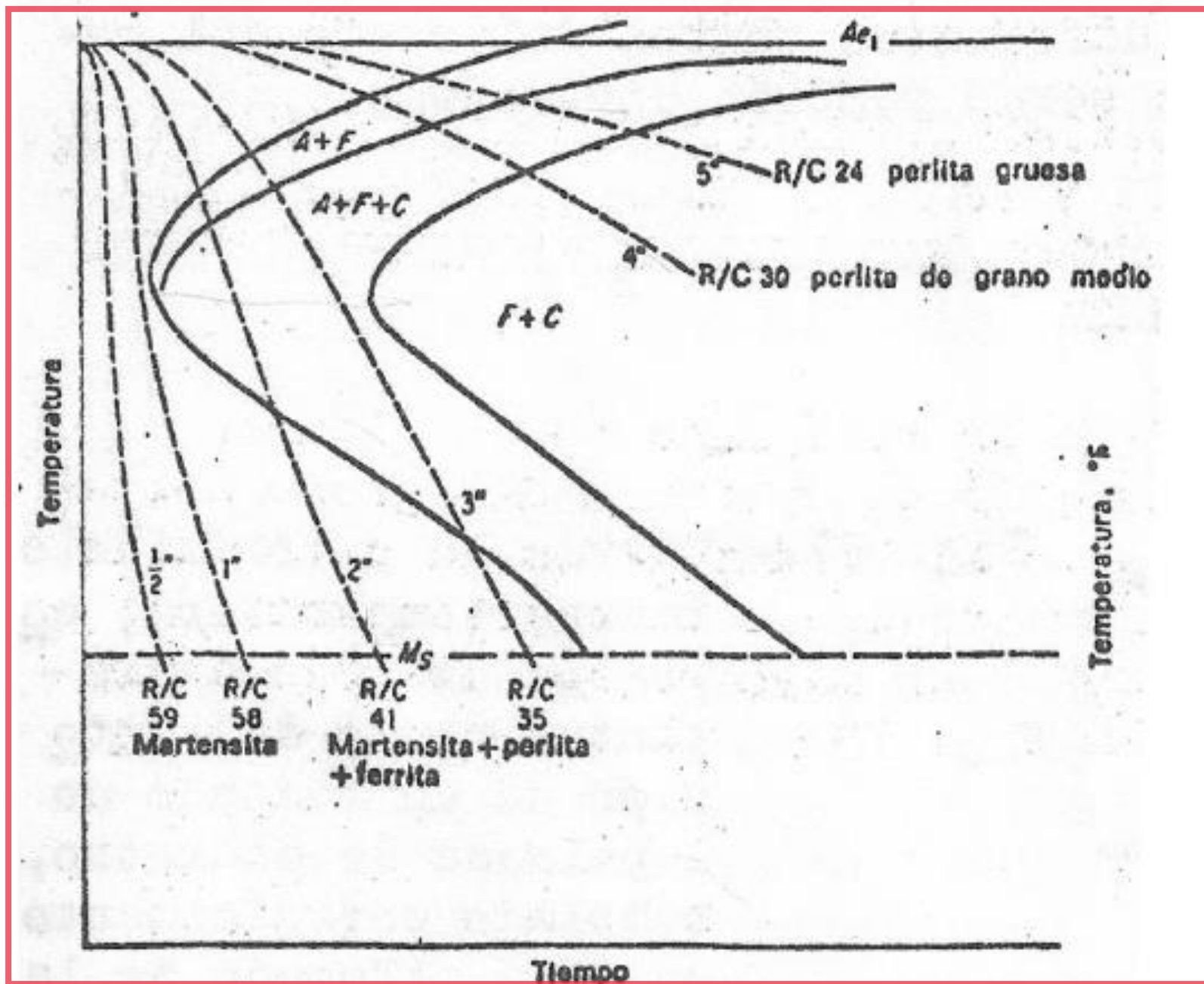
- El **calor del interior de la pieza se disipa hacia el exterior** por conducción a través de la pieza hasta llegar al medio refrigerante.
- Por lo tanto la **velocidad de enfriamiento hacia el interior** de la pieza es **menor que en la superficie**. Esta diferencia es muy notable en las piezas de gran tamaño.
- La muestra las curvas de enfriamiento de un **redondo de 1"** templado energicamente en distintas zonas del interior del redondo. Si como se observa en la figura las velocidades de enfriamiento son distintas en los diferentes puntos del radio del redondo, en los mismos las durezas serán también diferentes. (Figura: corte transversal)



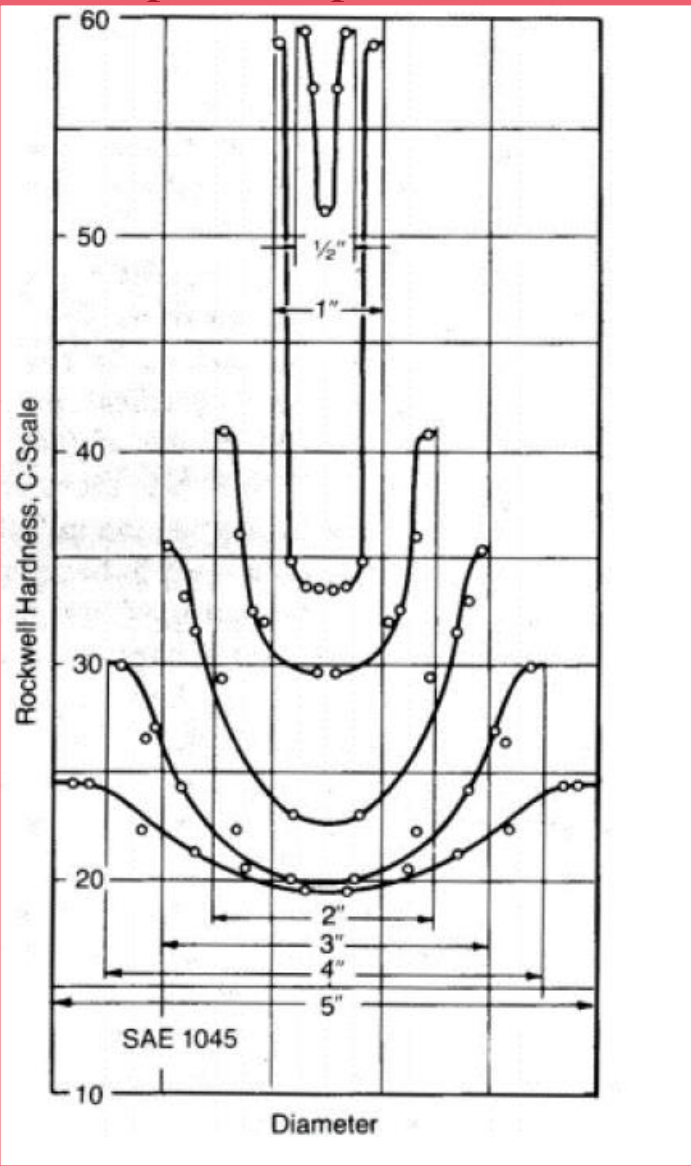
Tomemos 6 probetas de un acero 1045, de diámetros variables de 1/2" y 5". Llevémosla a la temperatura de austenización y luego templémosla en agua. Si medimos la dureza superficial de las mismas obtendremos los siguientes resultados:

Diámetro de la probeta, en pulg.	Dureza Rockwell C superficial
0,5	59
1	58
2	41
3	35
4	30
5	24

Estos resultados indican que las velocidades de enfriamiento en las superficies de las probetas de 1/2" y 5" son diferentes como consecuencia de la diferencia de tamaño de las probetas. En el caso de las de 1/2" y 1" como la velocidad de enfriamiento es superior a la crítica, su estructura final será martensita y tiene dureza máxima. La probeta de 5" tiene que disipar una cantidad de calor muy grande en relación con el área de su superficie, que el temple en agua es ineficaz y se hubiera tenido el mismo resultado dejando enfriar al horno la misma.

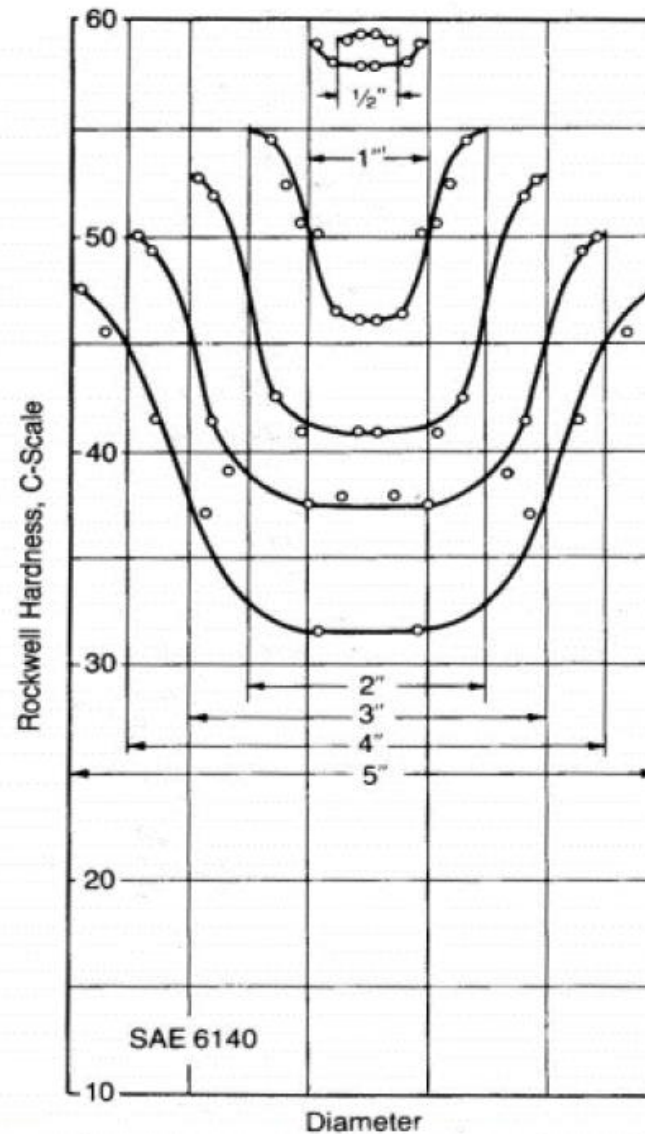
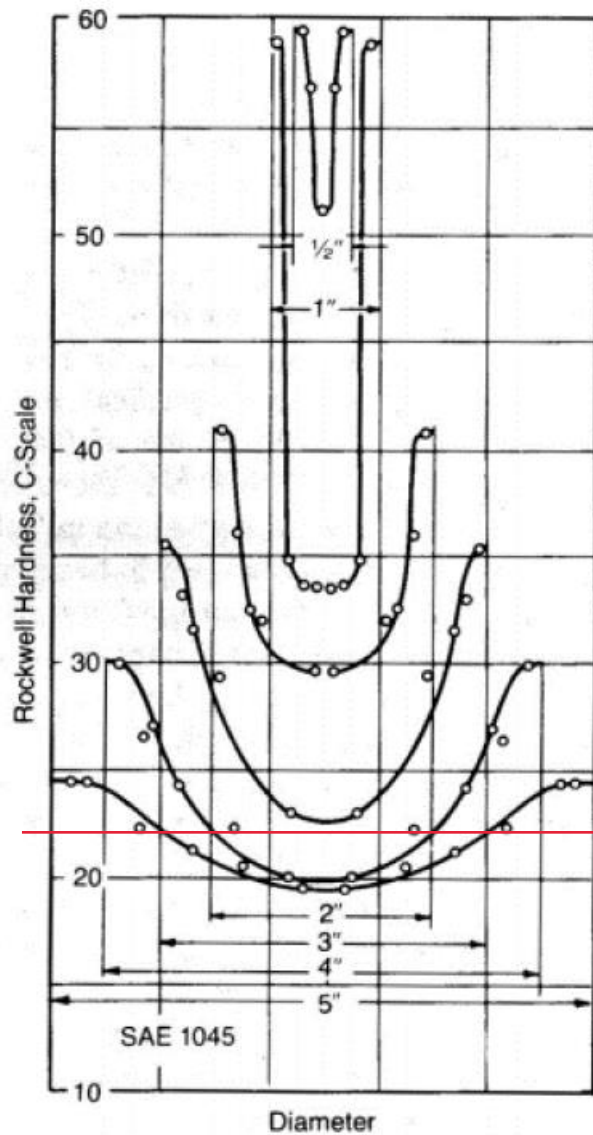


- Si a las mismas probetas les determinamos la dureza en sus secciones transversales del exterior al interior según radio y representamos en abscisas los diámetros de las secciones normales y en ordenadas la dureza, obtendremos la curva de la figura. Esta curva se llama **curva “U”**, y se observa que su forma indica inmediatamente hasta qué punto se ha templado la pieza.



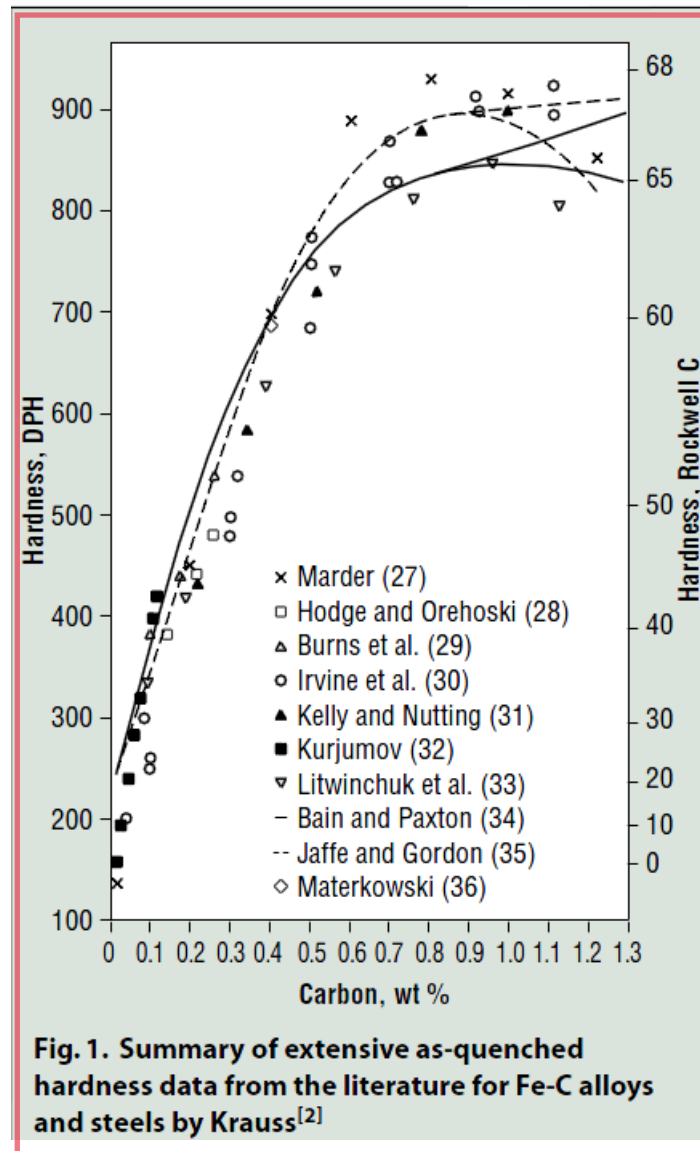
Curvas de penetración de temple de diversos redondos templados en agua para SAE 1045.

- Curvas de penetración de temple de diversos redondos templados en agua:
 - SAE 1045 vs SAE 6140.



- La templabilidad de un acero está determinada por la penetración del temple y en las probetas consideradas (SAE 1045) no ha penetrado profundamente:
 - Acero tiene **BAJA TEMPLABILIDAD**.
 - SAE 1045: distintos redondos presenta HRc 30 => zonas con misma velocidad de enfriamiento.
 - EN UN ACERO DE DETERMINADA **COMPOSICIÓN QUÍMICA Y TAMAÑO DE GRANO AUSTENÍTICO**, CUALQUIERA SEA EL TAMAÑO Y FORMA DE LA PIEZA Y LAS CONDICIONES DE TEMPLE, SIEMPRE QUE LA VELOCIDAD REAL DE ENFRIAMIENTO SEA LA MISMA SE OBTENDRÁ LA **MISMA DUREZA**.
 - Es conveniente aclarar que la recíproca no es siempre correcta. En un acero de **composición química y tamaño del grano austenítico determinado** puede obtenerse la **misma dureza en la superficie y corazón del redondo ensayado con velocidades de enfriamiento diferentes** siempre que ambas velocidades sean mayores que la velocidad crítica de temple.
 - La **dureza** máxima que se puede tener en los aceros al templearlos es función principalmente del **contenido de carbono** del acero.

- Dureza de la martensita en función del contenido de carbono en aleaciones Fe-C y en aceros:



Los análisis expuestos anteriormente permiten hacer las siguientes afirmaciones:

Templabilidad

- es una medida de la **profundidad** y la **distribución** de la dureza inducida por enfriamiento desde la condición austenítica.

Templabilidad no es dureza (resistencia a la penetración)

- se utilizan medidas de dureza para determinar la **extensión de la transformación** martensítica en el interior de una probeta.

Acero de alta templabilidad

- el que endurece (o forma martensita) tanto en la superficie como en su interior

Templabilidad de un acero depende de:

1. Composición del acero

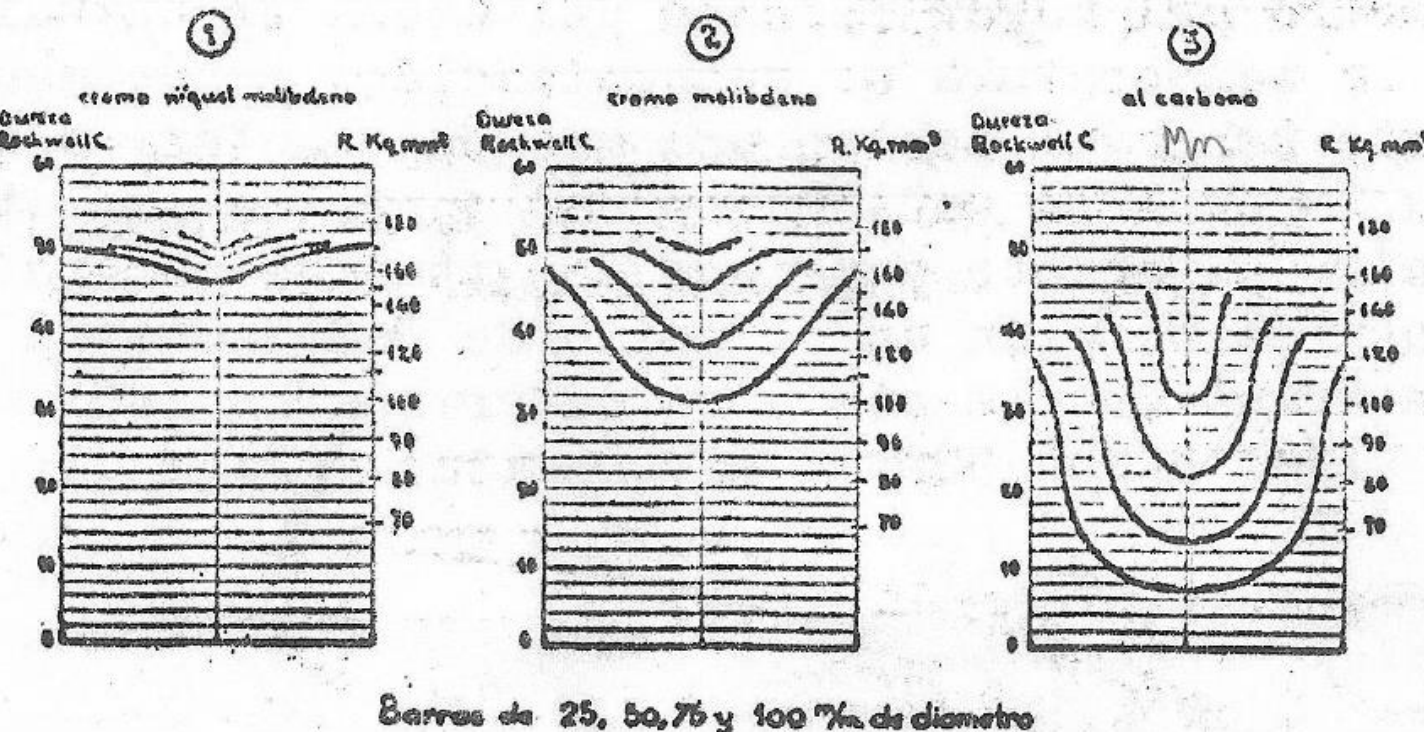
- Templabilidad depende de los elementos aleados (como Mn, Cr, C, Ni y Mo), generalmente desplazan las curvas de enfriamiento a la derecha
 - ⇒ menor velocidad crítica de temple
 - ⇒ se tiene templado a una velocidad más baja.

(1-2-3). Redondos de 25, 50, 75 y 100 mm de diámetro:

Acero N°1 C=0,32%; Cr=0,75%; Ni=2,75%; Mo=0,52%

Acero N°2 C=0,32%; Cr=01,03%; Mo=0,22%

Acero N°3 C=0,32%; Mn=0,45%



2. Tamaño del grano austenítico

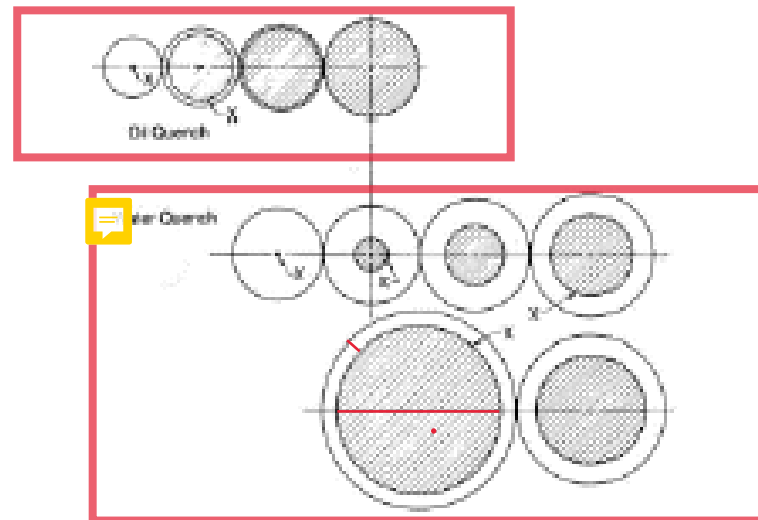
- al aumentar el tamaño del grano las curvas de enfriamiento se desplazan a la derecha:
 - ⇒ menor velocidad crítica de temple
 - ⇒ se tiene templado a una velocidad más baja.

EXPRESIÓN Y MEDICIÓN DE LA TEMPLABILIDAD

-Dos factores afectan velocidad de enfriamiento:

- Uno es la capacidad del calor de difundir desde el interior hacia la superficie del acero
- El otro es la capacidad del medio de temple de remover calor desde la superficie del mismo.
- La capacidad de un acero de transferir calor está caracterizada por su difusividad térmica (área por unidad de tiempo). En la práctica, es casi imposible controlar las propiedades térmicas de los aceros y la manera principal de controlar la velocidad de enfriamiento es la que se realiza mediante una selección apropiada del medio de temple.
- La transferencia de calor entre la interfase de un acero y el medio de temple es un proceso complejo que depende fundamentalmente de la emisividad del acero (velocidad a la cual la superficie irradia calor) y las corrientes de convección dentro del medio de temple que remueven calor de la interfase.

- La efectividad de un medio de temple dado para remover el calor se evalúa con un parámetro conocido como "severidad de temple". Esta medida de enfriamiento o potencia de enfriamiento se identifica con la letra "H" y se determina experimentalmente por temple de una serie de barras redondas de un acero dado. La Fig. 7 muestra esquemáticamente los resultados de temples en agua y en aceite de barras de acero de SAE 3140 (acero níquel-cromo con 0.4%C). Las áreas rayadas representan las áreas no endurecidas de las barras y se asume que menos de 50% de martensita representa una microestructura no endurecida. A mayor diámetro de barra (D), mayor es el diámetro de la zona no endurecida (D_u).
- Representación esquemática de la extensión del endurecimiento en barras templadas en agua y en aceite. El material de las barras es un acero SAE 3140 de varios diámetros. Las áreas rayadas representan los núcleos no-endurecidos de las barras.



- Relación de diámetros endurecidos y no endurecidos en función de los diámetros para barras templadas en agua y aceite. (Concepto de severidad)

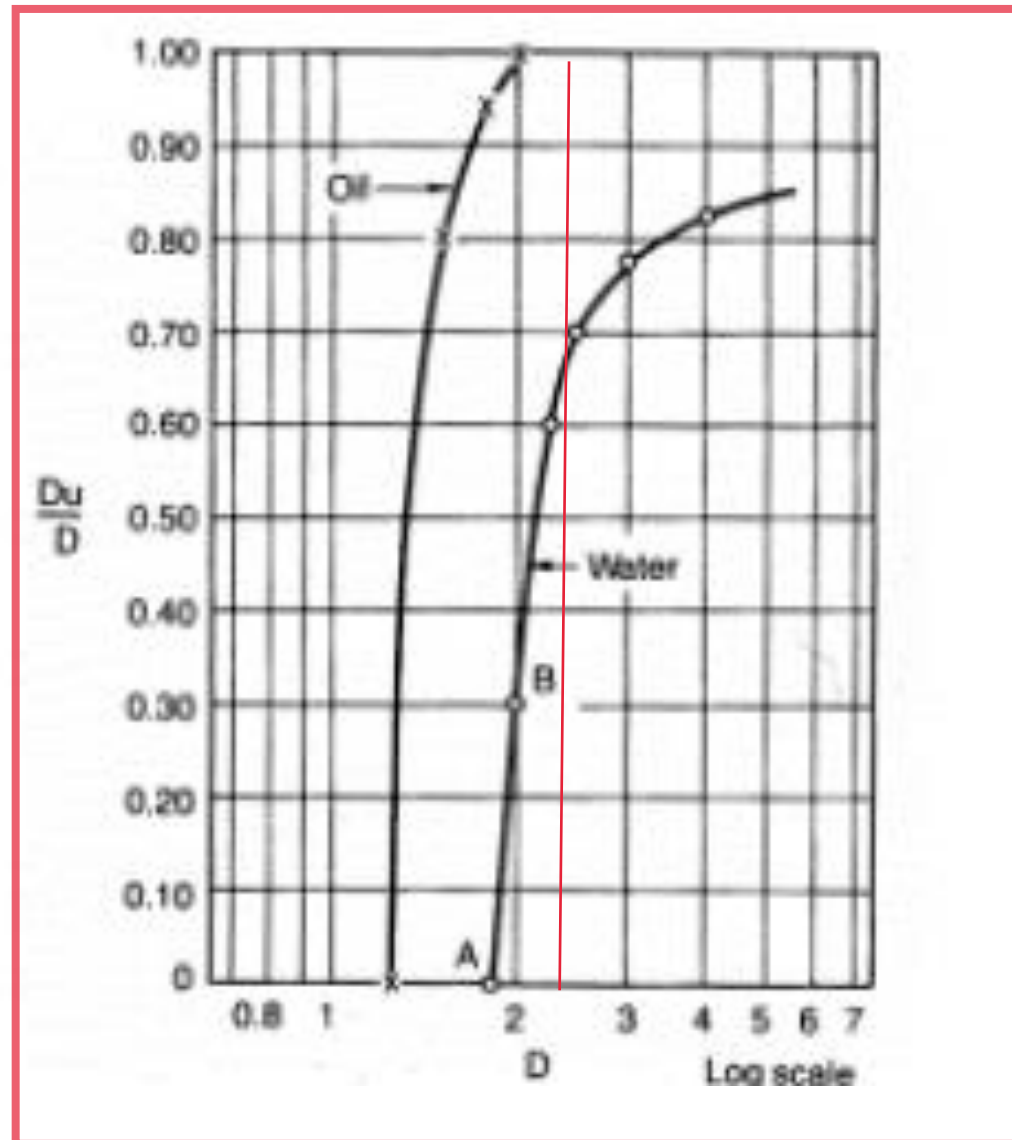


Tabla 1- Severidad de temple (H) para distintos medios de temple.

	Air	Oil	Water	Brine
No circulation of fluid or agitation of piece	0.02	0.25 to 0.30	0.9 to 1.0	2
Mild circulation (or agitation)		0.30 to 0.35	1.0 to 1.1	2 to 2.2
Moderate circulation		0.35 to 0.40	1.2 to 1.3	. . .
Good circulation		0.4 to 0.5	1.4 to 1.5	. . .
Strong circulation	0.05	0.5 to 0.8	1.6 to 2.0	. . .
Violent circulation		0.8 to 1.1	4	5

Tabla 2- Velocidades de enfriamiento relativas para distintos medios de temple.

Quenching medium	Cooling rate(s) from 717–550 °C (1323–1022 °F) relative to that for water at 18 °C (65 °F)	Quenching medium	Cooling rate(s) from 717–550 °C (1323–1022 °F) relative to that for water at 18 °C (65 °F)
Aqueous solution, 10% LiCl	2.07	Oil 20204	0.20
Aqueous solution, 10% NaOH	2.06	Oil, Lampers light	0.18
Aqueous solution, 10% NaCl	1.96	Water at 122 °F	0.17
Aqueous solution, 10% Na ₂ CO ₃	1.38	Oil 23441	0.16
Aqueous solution, 10% H ₂ SO ₄	1.22	Oil 14530	0.14
Water at 32 °F	1.06	Emulsion of 10% oil in water	0.11
Water at 65 °F	1.00	Copper plates	0.10
Aqueous solution, 10% H ₃ PO ₄	0.99	Soap water	0.077
Mercury	0.78	Iron plates	0.061
Sn ₃ Cd ₃ at 356 °F	0.77	Carbon tetrachloride	0.055
Water at 77 °F	0.72	Hydrogen	0.050
Rapeseed oil	0.30	Water at 166 °F	0.047
Trial oil No. 6	0.27	Water at 212 °F	0.044
Oil P20	0.23	Liquid air	0.039
Oil 12455	0.22	Air	0.028
Glycerin	0.20	Vacuum	0.011

(a) Determined by quenching a 4 mm diameter ball, which when quenched from 800 °C (1480 °F) into water at 18 °C (65 °F) cooled at the rate of 1810 °C (3280 °F) per second over the range 717 to 550 °C (1323 to 1022 °F). This cooling rate in water at 18 °C (65 °F) is rated as 1.00 in the table, and the rates in the other media are compared with it (Ref 18.22). Source: Ref 18.18, 18.23

FORMAS DE EXPRESAR Y MEDIR LA TEMPLABILIDAD

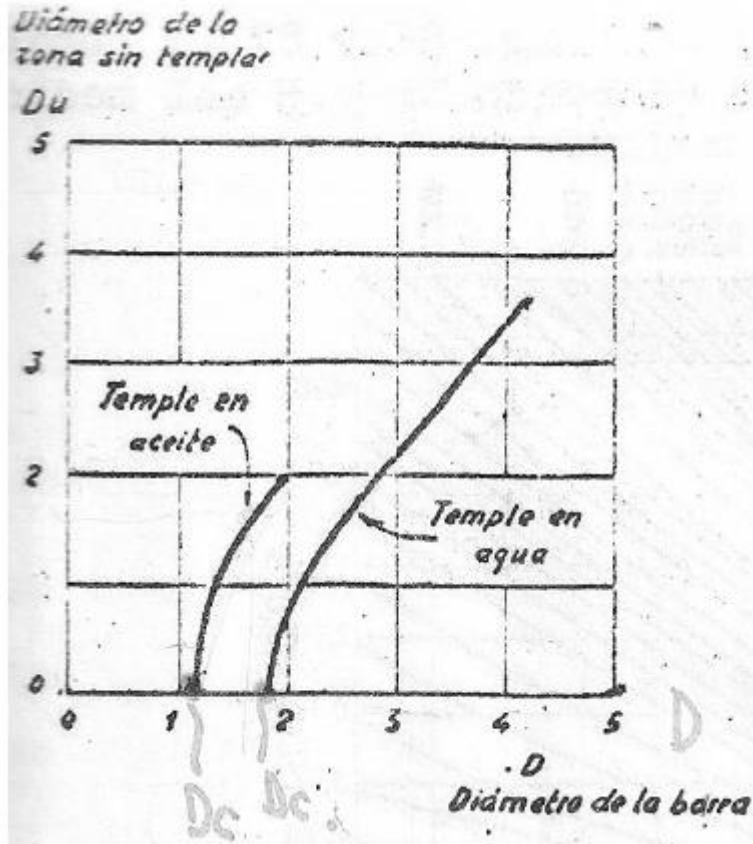
- Criterio que fija el límite entre la zona templada y sin templar de un redondo de acero o pieza:
 - la microestructura debe contener 50% de martensita.

DIÁMETRO CRÍTICO IDEAL, D_i

D_u : diámetro de la probeta que no ha tomado temple.

Díámetro crítico

Se representa en ejes cartesianos: en **ordenadas** los valores de **Du para cada probeta** y en **abscisas** **los diámetros de las probetas** resultando una curva . La intersección de esta curva con el eje de las abscisas señala el **DIÁMETRO CRÍTICO** correspondiente al acero en el medio de enfriamiento elegido ya que $Du=0$ indica que el centro del redondo de diámetro **D** se encuentra totalmente templado



Determinación de los diámetros críticos de un acero templado en agua y aceite.

Luego se determina la severidad H del medio de enfriamiento elegido por medio de tablas (ej. tabla pag. 41) o en la forma siguiente: Se utiliza el gráfico de la fig. 9, para lo cual (si se realiza en forma manual) a modo de ejemplo se podría colocar un papel transparente en la misma escala se representan los valores de Du/D de cada probeta versus D . La curva resultante se superpone a las del gráfico de la fig. 9 hasta encontrar la coincidente. Luego el valor $H \times D$ encontrado para cualquiera de los puntos se lo divide por diámetro correspondiente y se obtiene el valor de H .

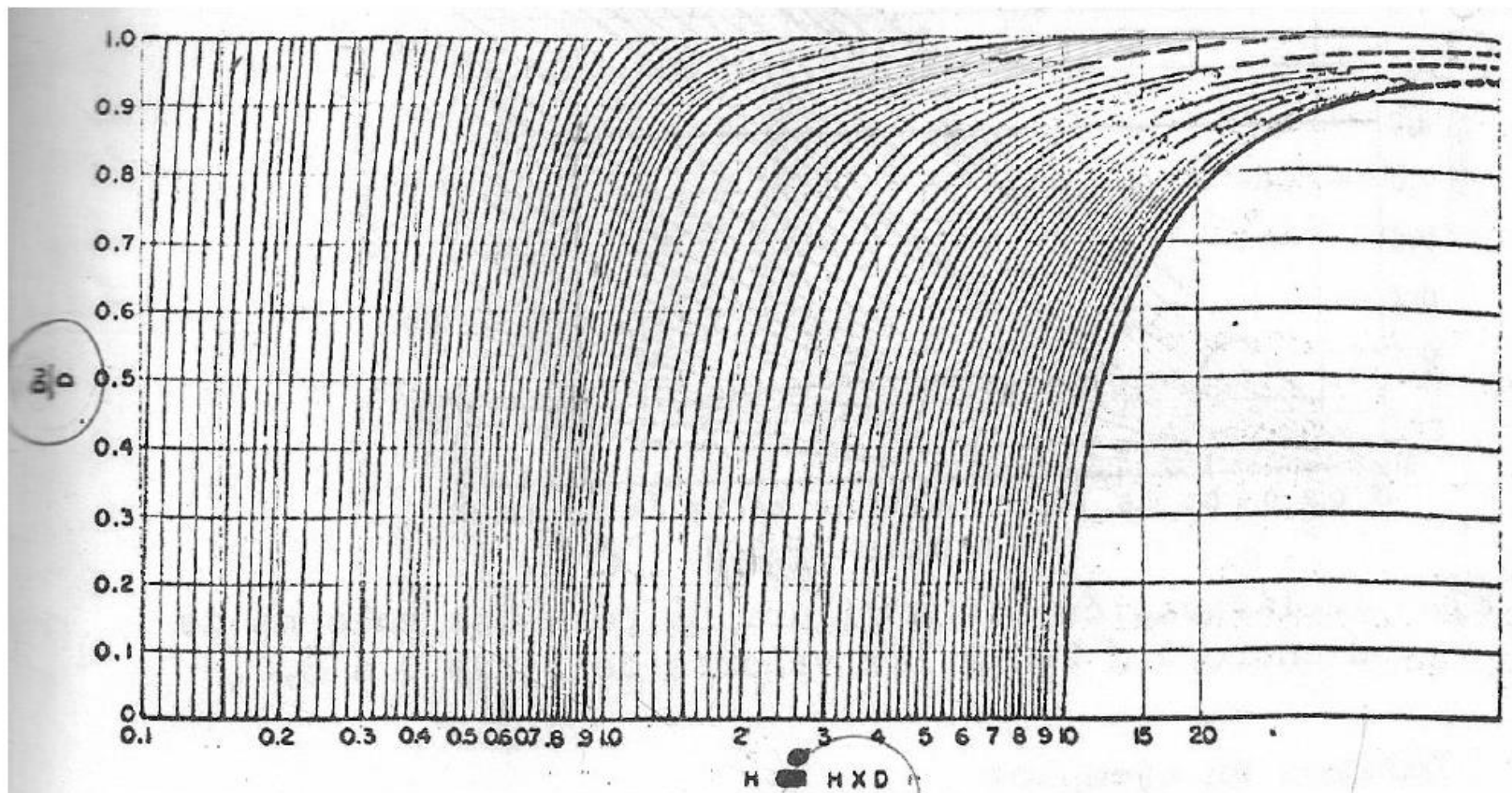


Fig. 9 – Curvas para estimar la severidad de temple de una serie de cilindros.

Con el valor conocido de H y las fig. 10 y 11 se obtiene el diámetro crítico ideal. Lógicamente conocido D_i y H del medio, las figuras permiten calcular D_c para ese medio.

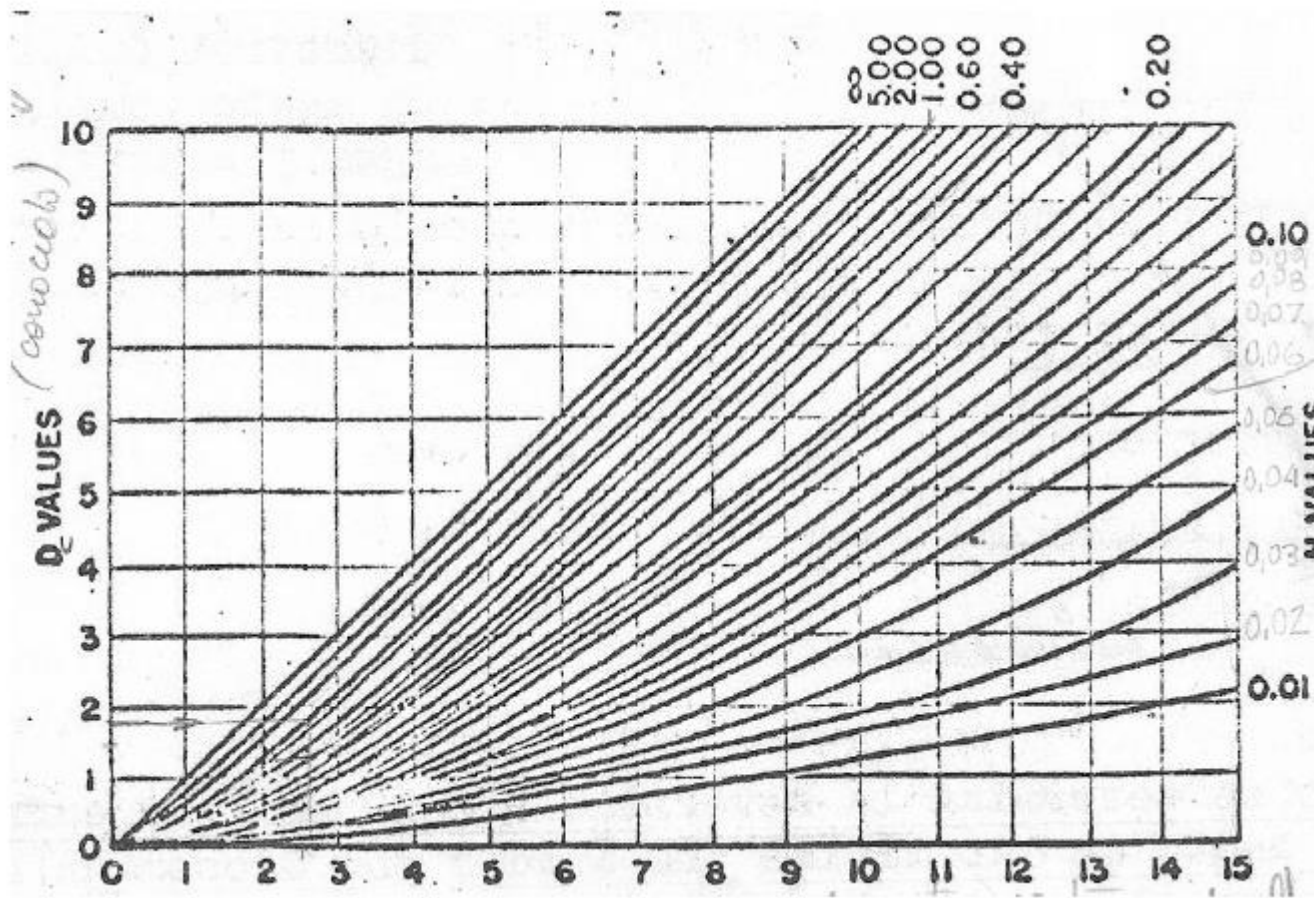


Fig. 10 – Relación entre el diámetro ideal, diámetro crítico y severidad de temple.

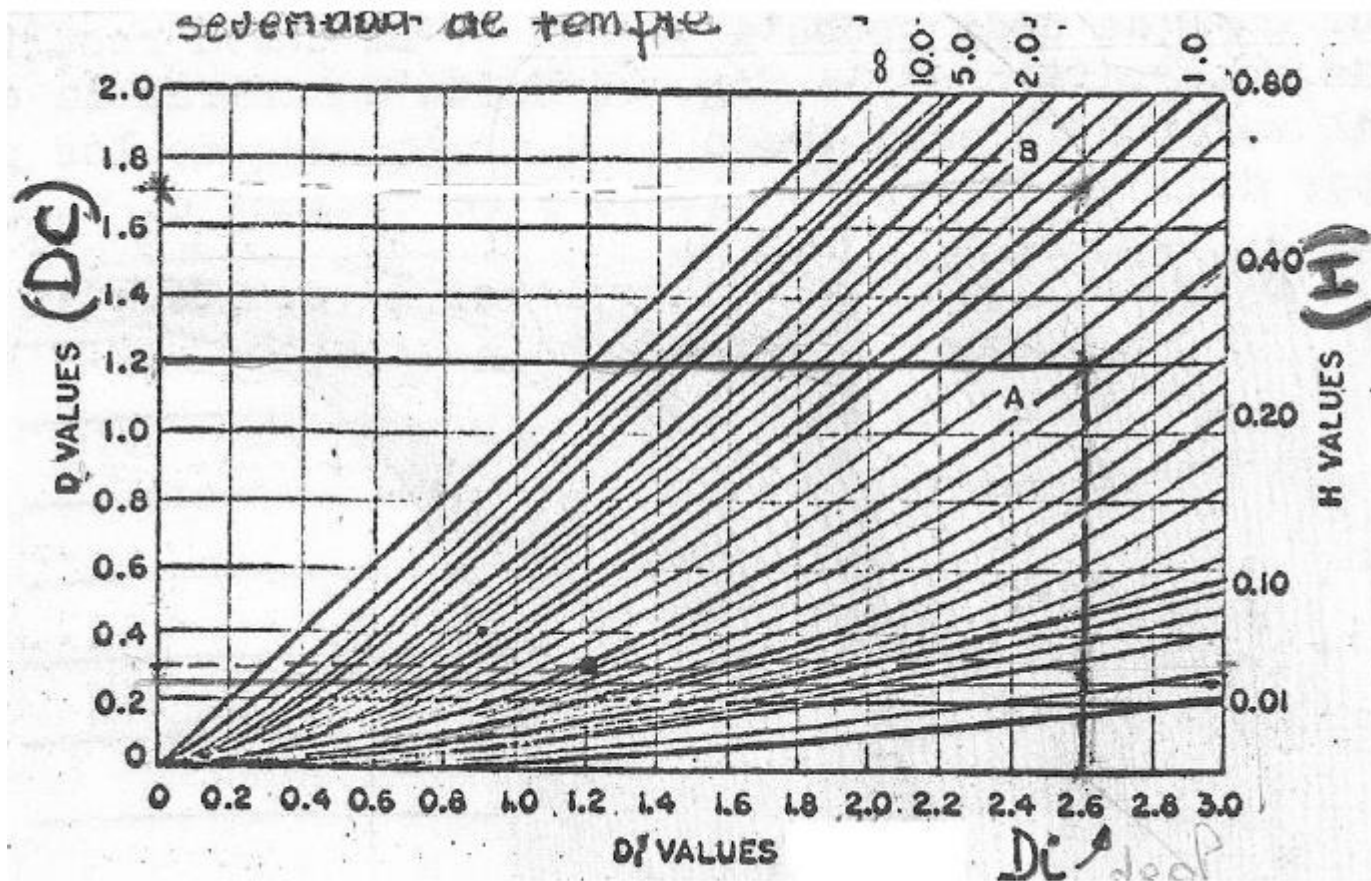


Fig. 11 – Amplificación de la figura 10 para los valores de D entre 0 y 2 y los valores de D_i de 0 a 3

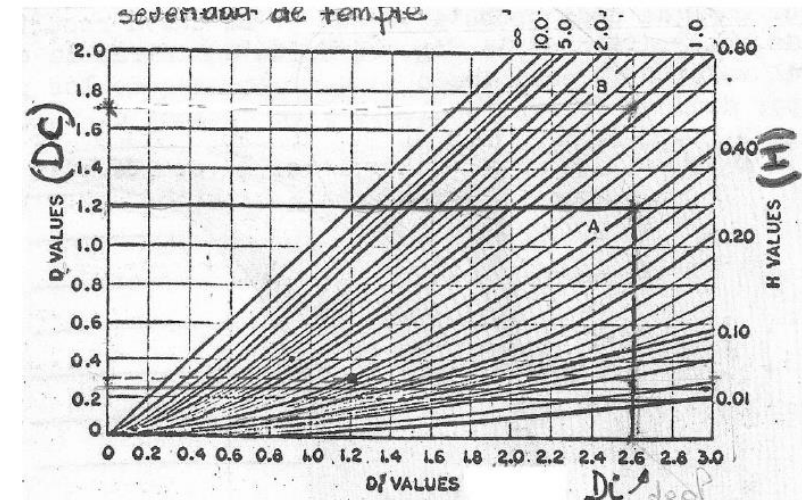
EJEMPLOS:

1) Acero: 0,41% C; 0,60% Cr y 1,2% Ni

Dc 1,2" temple en aceite agitación moderada.

Leemos en la tabla (tabla pag. 41): $H=0,4$

En el gráfico para $D_c=1,2''$ y $H=0,4$, $D_i=2,6''$



2) Conocido el diámetro crítico ideal del acero $D_i=2,6''$,
determinar D_c enfriado en aire tranquilo y en agua tranquila.

Para aire tranquilo : $H=0,02$ y entrando en el gráfico con $D_i=2,6''$, D_c resulta $1/4''$

Para agua en reposo (tabla pag. 41): $H=1$ y el gráfico nos da $D_c=1,7''$

De “1)” y “2)” : un redondo del acero dado para quedar totalmente templado (el centro con 50% de martensita), luego del enfriamiento debe tener como máximo:

en agua en reposo $1,7''$ de diámetro

en aceite con agitación moderada $1,2''$ de diámetro

en aire tranquilo 1/4" de diámetro

Además del método directo de valorar la templabilidad descrito anteriormente, está el ENSAYO DE TEMPLADO EN UN EXTREMO O DE JOMINY, de gran importancia.

DETERMINACIÓN DE LA TEMPLABILIDAD

Ensayo Jominy

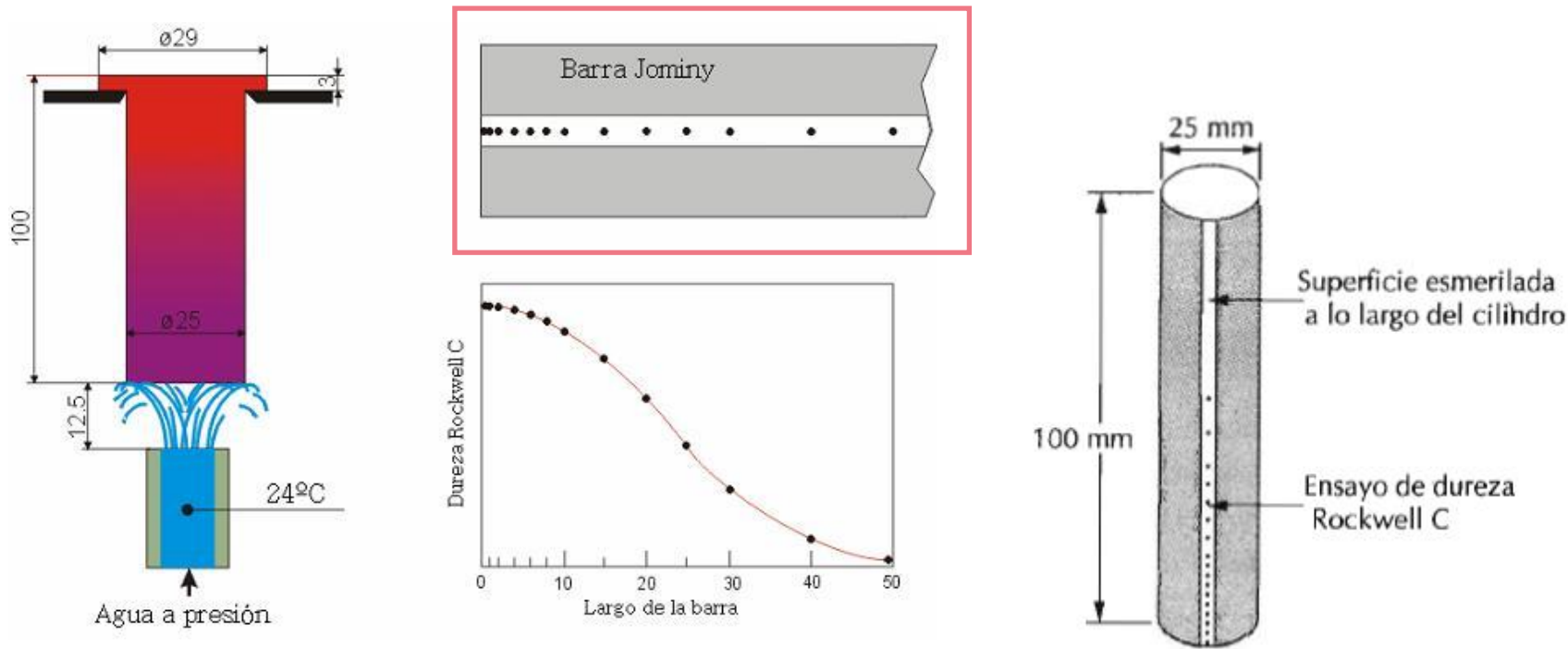
-En este ensayo se mantienen constantes los factores que influyen en la profundidad del endurecimiento de la pieza (excepto composición):

- Tamaño de la pieza
- Forma de la pieza
- Tratamiento de temple

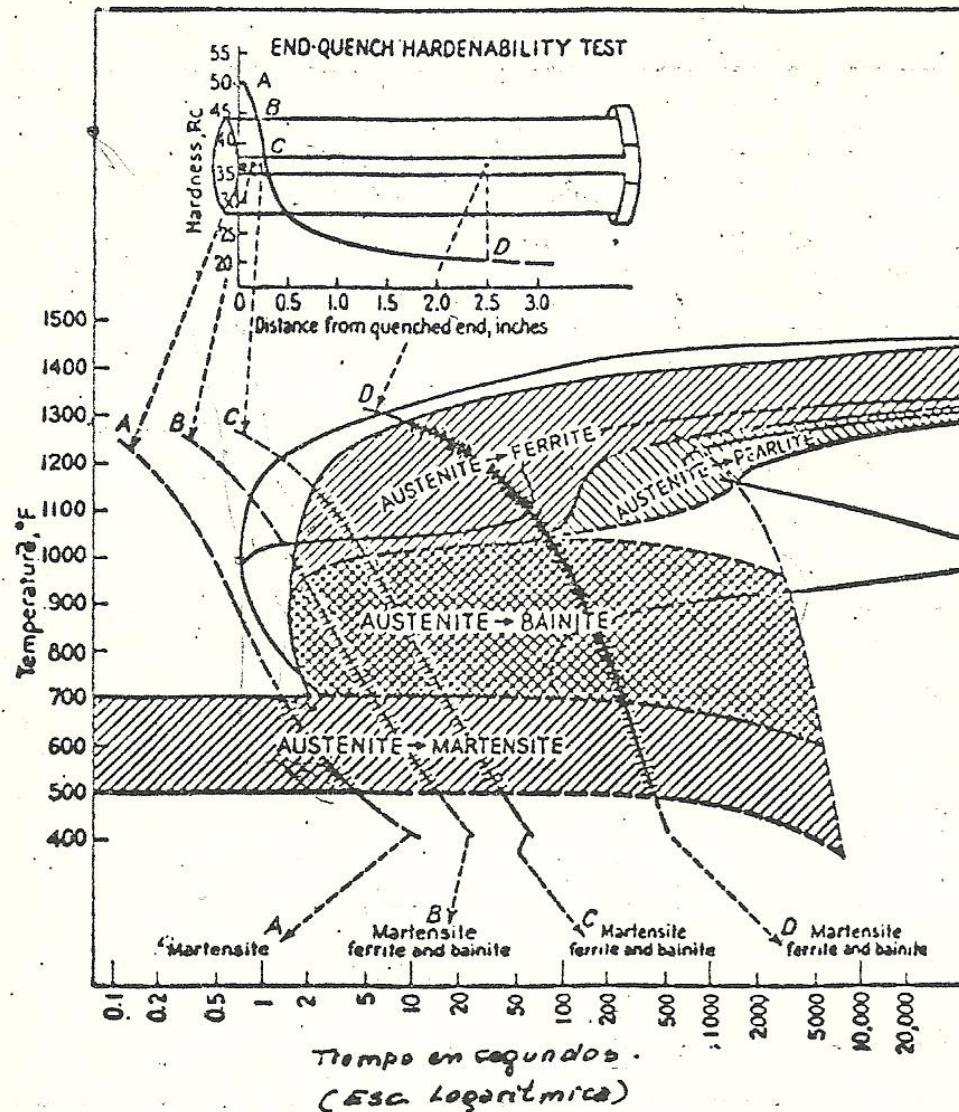
-Este ensayo consiste en:

- Templar una probeta cilíndrica de **25 mm** de diámetro por **100 mm** de largo.
- Para ello:
 1. Se emplea una probeta con dimensiones normalizadas.
 2. Se lleva a un horno en el cual se mantiene hasta temperatura de **austenización**.
 3. Se coloca en un soporte y se le arroja agua (temperatura ambiente) en el extremo inferior, con esto se realizará un enfriamiento de abajo a hacia arriba.
 4. Se mide la dureza a lo largo de la probeta (**generalmente Rockwell C**).

5. Se realiza un grafico de dureza en función del largo de la barra (**curvas de Jominy o de templabilidad**)



-Mientras más inclinada sea la curva menos templable es el acero.

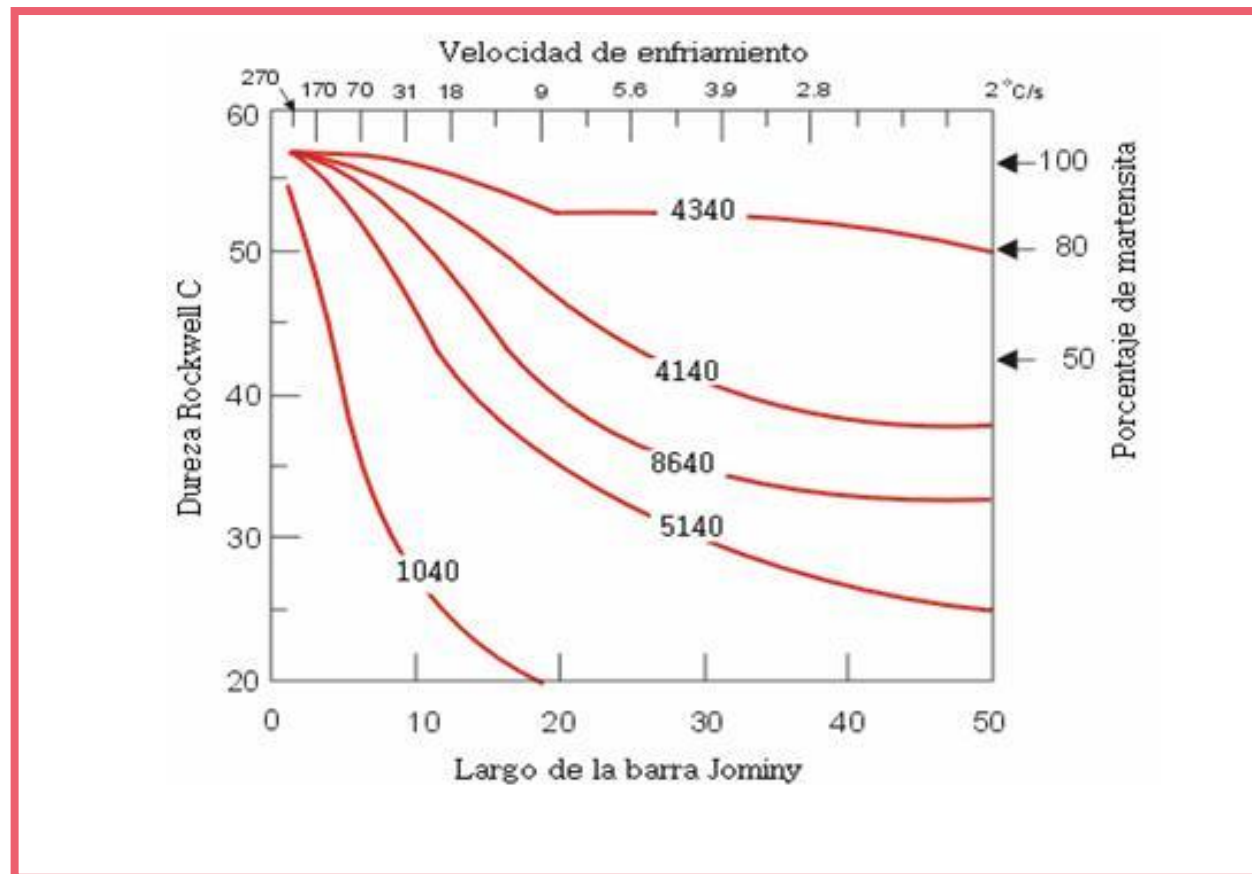


Ver fig. 61

Fig. 92.- Relación entre los diagramas T-I y de transformación continua y los valores obtenidos en el ensayo Jominy de un acero del tipo 8630. (Tomado de "U.S.S. Carilloy Steels", U.S. Steel Corporation.)

-La curva de templabilidad indica:

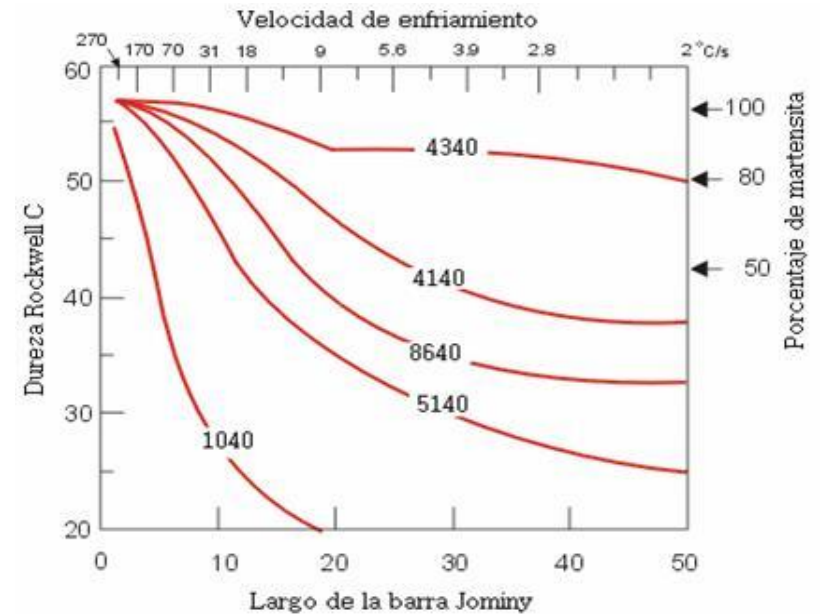
- si la dureza disminuye rápidamente conforme nos alejamos del extremo templado
⇒ el acero tiene baja templabilidad
- si las curvas son casi horizontales
⇒ el acero tiene alta templabilidad (se endurece rápido cuando sufre temple).



Curvas de templabilidad de diferentes aceros con 0,4% C

-Para el gráfico anterior:

- A medida que nos alejamos del extremo templado, la dureza (HRC) disminuye
 - ⇒ el descenso de la dureza en la curva inferior es más rápido
 - ⇒ acero con baja templabilidad
- Curvas de templabilidad dependen de la presencia de elementos aleantes.



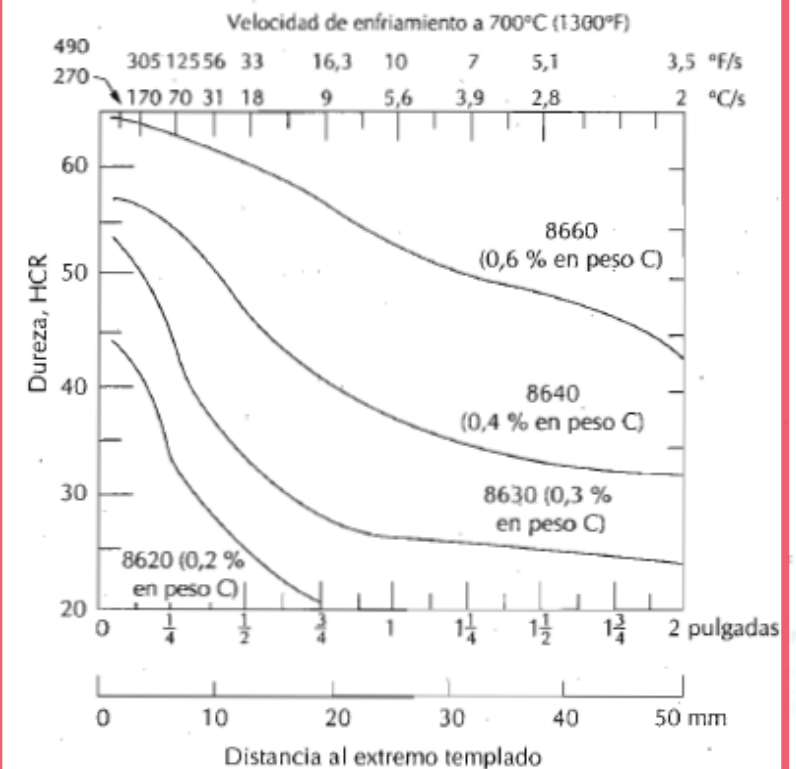
-Curvas de templabilidad también dependen del contenido de carbono

- Figura: Aceros aleados de la serie 8600 con diferentes contenidos de carbono.

Nota sobre nomenclatura: Tipos de acero:

10xx (acero de carbono ordinario)

41xx (Cromo 0.50, 0.80 ó 0.95, Molibdeno 0.12, 0.20 ó 0.30)



43xx (Niquel 1.83, Cromo 0.50 ó 0.80, Molibdeno 0.25)

51xx (Cromo 0.80, 0.88, 0.93, 0.95 ó 1.00)

86xx (Niquel 0.55, Cromo 0.50, Molibdeno 0.20)

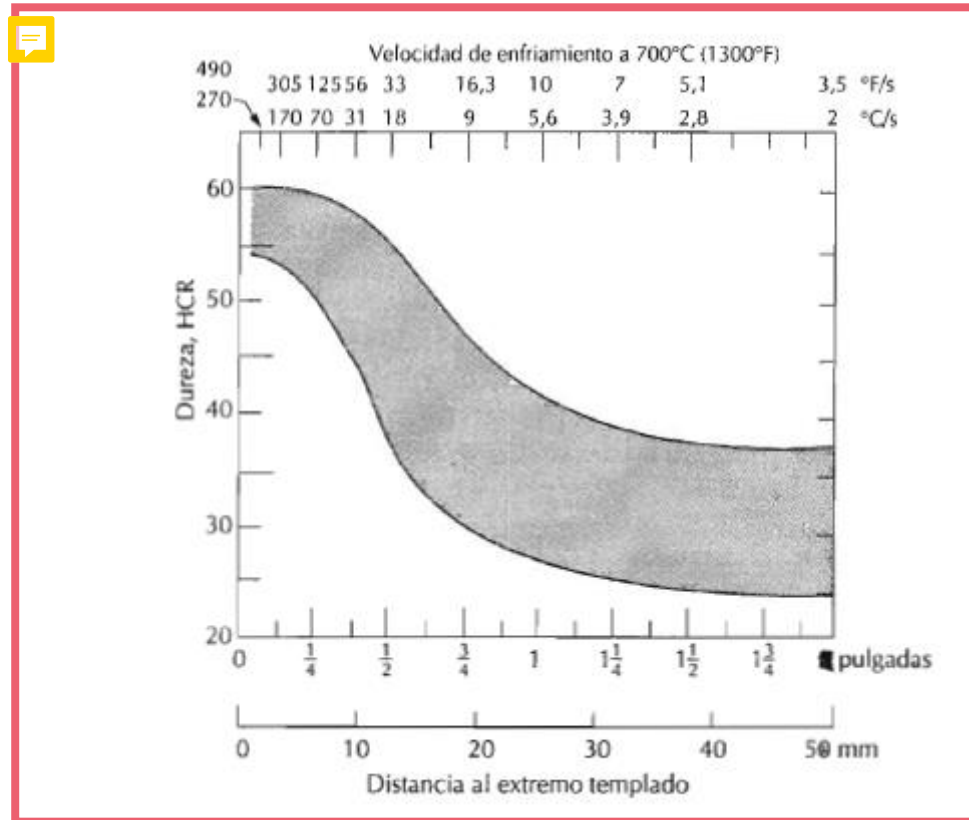
Bandas de Templabilidad:

-En la producción industrial del acero se producen pequeñas variaciones en cuanto a:

- su composición y tamaño de grano
⇒ esto modifica los datos de templabilidad

-Bandas de templabilidad

- bandas con la máxima y mínima templabilidad para una aleación en particular:



Banda de templabilidad de acero 8640.

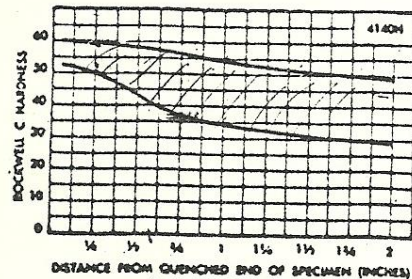
- Una aleación específica con una H (Hardenability) indica que:
 - su composición y características son tales que su curva de templabilidad entra dentro de la banda específica.
 - Ej.: 1040H, 4340H

-A muchos aceros se les ha construido la banda de templabilidad y normalizado en algún sistema internacional.

-Los aceros para los cuales se construyen las bandas tomando como medio de enfriamiento el agua:

- se dice que tienen una **severidad** H igual a 1.

End-Quench Hardenability Band



STEEL, AISI

4140H

Chemical Composition

C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
%	%	%	%	%	%	%
.37-.45	.70-1.05	.20-.35	.80-1.15	.15-.25	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{16}$

¹P and S are 0.040 max in open hearth steel and 0.025 max in electric furnace steel, AISI

"J" distancia en Pulgadas.

	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{15}{16}$	1	$1\frac{1}{8}$	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$	2					
Max	60.0	60.0	60.0	59.5	59.0	59.0	58.5	58.0	58.0	57.5	57.0	56.0	55.5	55.0	54.5	54.0	53.0	52.0	51.5	51.0	50.5	50.0	49.5	49.0
Min	52.5	52.0	51.0	50.0	48.5	47.0	45.0	43.5	41.5	40.0	38.5	37.5	36.5	35.5	34.5	34.0	33.0	32.0	31.5	31.0	30.0	30.0	29.5	29.5

Fig. 94.- Banda de templabilidad normal y valores obtenidos en el ensayo Jominy de un acero 4140 H. (American Iron and Steel Institute.).-

La templabilidad se especifica mediante dos puntos, del siguiente modo:

- Mediante los valores máximos y mínimos de dureza correspondiente a una distancia determinada. La distancia tiene que estar situada en la probeta con relación al extremo templado, de tal modo que corresponda a la sección utilizada por el usuario.- En la fig. 94 podría ser J50-59.5 = $\frac{4}{16}$ pulgadas. ($\frac{1}{4}$)
- Indicando la distancia mínima y máxima que limitan el intervalo en el que la dureza presenta un valor determinado. Ejemplo: J50 = $\frac{4}{16}$ a $\frac{28}{16}$ pulgadas.

 $\frac{1}{4}$ $1\frac{3}{4}$

Análisis de fractura

-Método cuantitativo, utilizado en aceros de baja aleación.

-Consiste en:

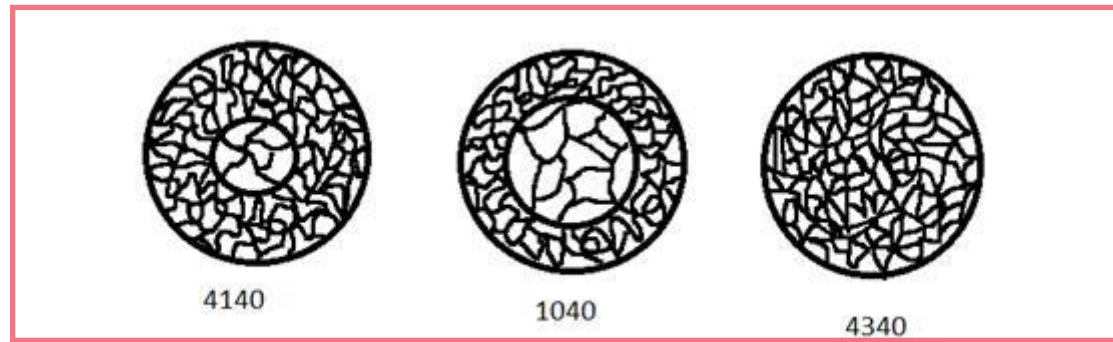
1. templar probetas cilíndricas,
2. se rompen,
3. se observa la fractura en el microscopio, se distinguen:
 - a. zona con temple: granos finos,
 - b. zona sin temple: granos gruesos.

-De acuerdo a lo anterior la *profundidad* del temple será:

- *Templabilidad baja*: mayor proporción de grano grueso que fino
- *Templabilidad moderada*: aproximadamente igual proporción de grano grueso que fino
- *Templabilidad alta*: mayor proporción de grano fino que grueso.

-Ejemplo de este método:

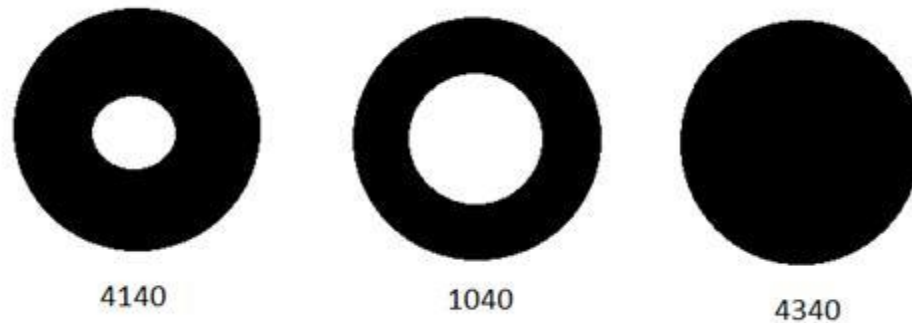
- Tenemos tres aceros: SAE 1040 4140 4340
- Al momento de romper las probetas se observa lo siguiente:



- Podemos observarlas las diferentes texturas de la fractura, donde esta es más fina hubo temple,
⇒ el de más alta templabilidad es el 4340 AISI SAE.

-Variante de este ensayo:

- una vez hecho el temple, no se rompan las probetas, sino que se cortan,
- se atacan con reactivo Nital al 5% (ácido nítrico 5 ml y Alcohol isopropílico 95ml)



- Podemos ver los diferentes colores de las zonas templadas (periferia) y zonas no templadas (núcleo) en los diferentes aceros.

-Podemos decir que la primera forma de este ensayo es un *análisis por textura* y el segundo caso es por *ensayo metalográfico* (ASTM E3).

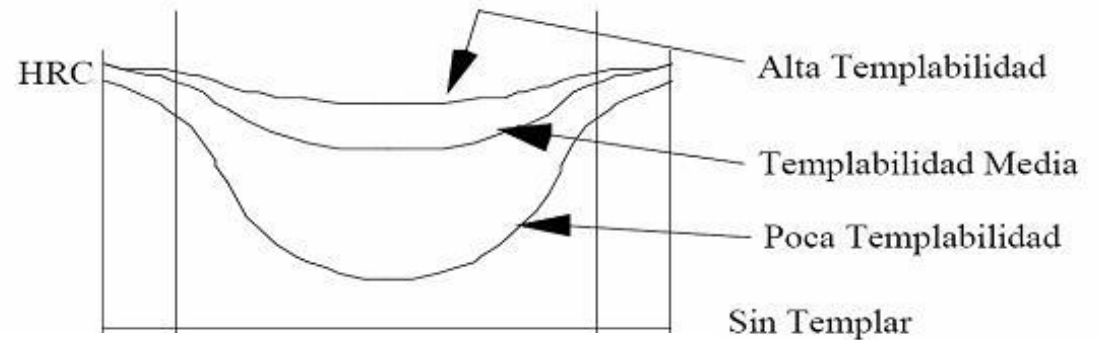
Ensayo de Grossman o de templabilidad por las curvas en U

-Consiste en:

1. en temprar barras cilíndricas de diferentes diámetros,
 2. se rompen,
 3. sobre la sección de rotura se mide la dureza (siguiendo una línea radial o diámetro)
 4. se grafica la **dureza** vs **distancia al centro donde se midió dureza**
- ⇒ se obtienen curvas en forma de U.

-Cuando más plana es la curva:

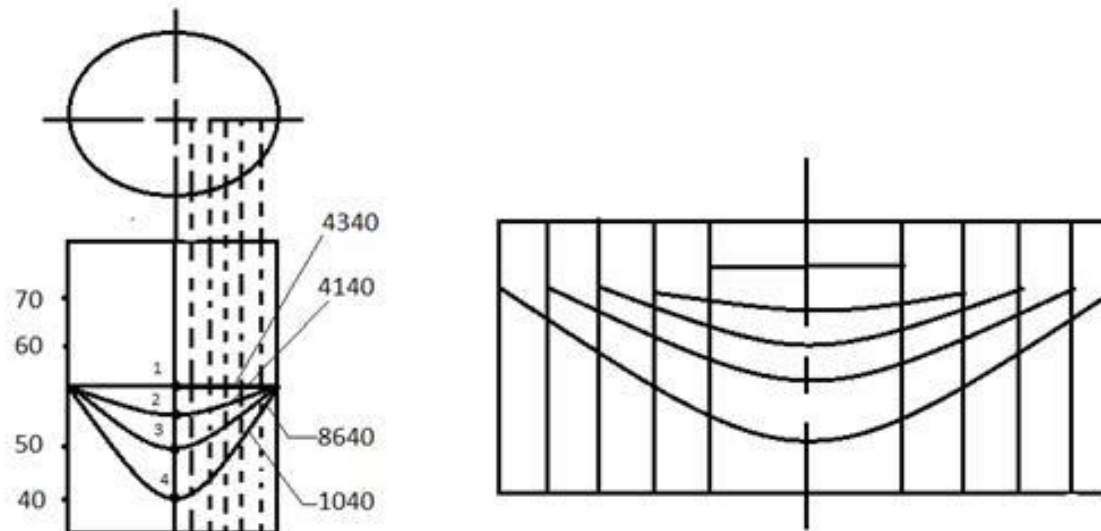
- mayor templabilidad (tendrá dureza similar en interior como en la superficie)



-Ejemplo de este método:

- utilizamos los aceros AISI SAE: 1040
4140 4340 8640,

- probetas de 20 mm de diámetro.
- Hecho el temple se cortan las probetas, luego (si se hace en forma manual) en un papel milimetrado graficamos el diámetro y en la ordenada graficamos la dureza que se va tomando desde la periferia hasta el núcleo.
- En este ejemplo puede observarse la influencia de la composición química en la templabilidad.



Comparación de la dureza alcanzada entre la superficie y el nucleó de diferentes aceros.