

## OTROS TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

### ● Temple incompleto

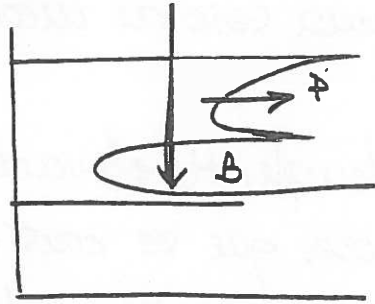
La obtención de un temple completo (99% de martensita), hasta el centro de la barra, tiene una serie de inconvenientes como hemos visto:

- Se necesita una severidad del temple,  $H$ , elevada o una mayor templeabilidad del acero, que se consigue con más elementos de aleación y menor  $M_s$ : más caro.
- Hay mayor posibilidad de grietas, por mayor  $H$  o menor  $M_s$ , y total formación de martensita.

Con un temple incompleto, perderíamos dureza en el centro de la pieza, pero tal vez no en la superficie, y esto no es problema si la barra trabaja a flexión o torsión (pues el núcleo no trabaja) y además la diferencia de durezas se minimiza con el efecto igualador del revenido.

Justificamos así la no necesidad de templear el 99%, siendo práctica usual obtener en el centro un mínimo de 50% de martensita si el resto es todo bainita. Decimos bainitas (inferiores), pues sin ser martensita tiene un comportamiento similar a ella. lo que no admitimos es tener femita o perlita, que son estructuras con mucha menor resistencia.

Para obtenerlo lo que necesitamos es que en un diagrama TTT, la zona perlítica esté retrasada respecto de la bainítica, para lo que emplearemos elementos formadores de carburos, como Cr y Mo que además nos proporcionan dureza secundaria.



Hollomon y Jaffe dieron un método empírico para calcular la templeabilidad con diferentes criterios: perlítica, bainítica y martensítica al 99% y al 50%. (ver 11/145) y permite evaluar las posiciones relativas de las curvas de transformación y las posibilidades de obtener diferentes microestructuras con diferentes enfriamientos o diámetros.

### ● Tratamiento subcrítico

Se realiza para transformar la austenita retenida en martensita. Como vimos, ese enfriamiento debe hacerse de inmediato tras el temple para evitar la estabilización de la austenita, y puede hacerse directamente o en varias etapas.

Vemos por ejemplo en la figura 282, que si se realiza el enfriamiento subcrítico, obtenemos un 98%.

Dureza  
Rockwell C

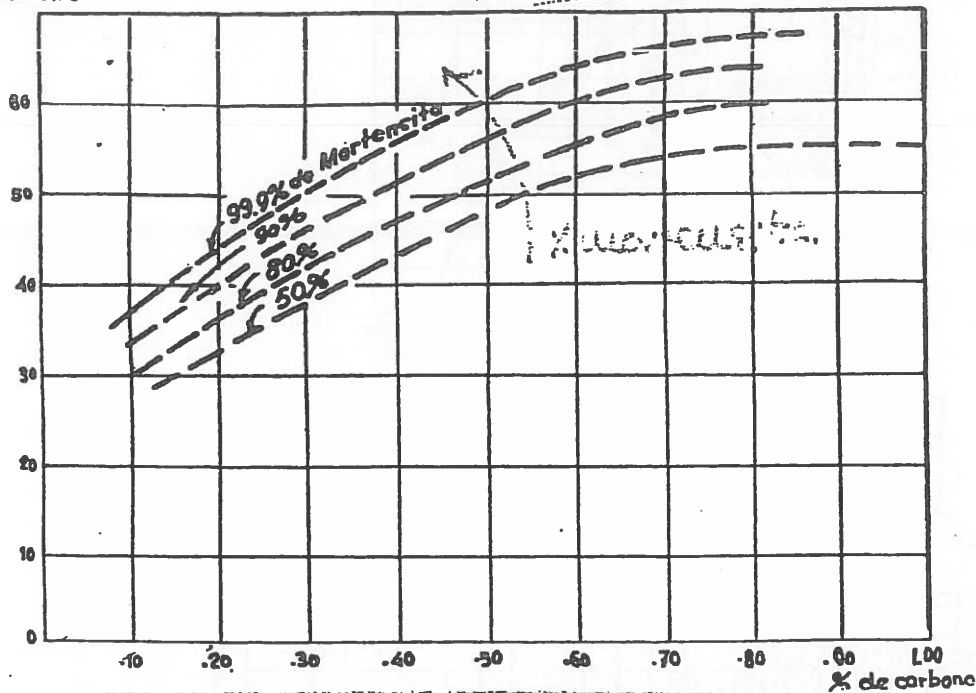


Fig. 66.—Durezas de las estructuras con diversas dosificaciones de martensita en función del % de C.

Variedad Dureza con % C y % martensita.  
DAME NUESTRO

Efecto igualador del  
revenido.

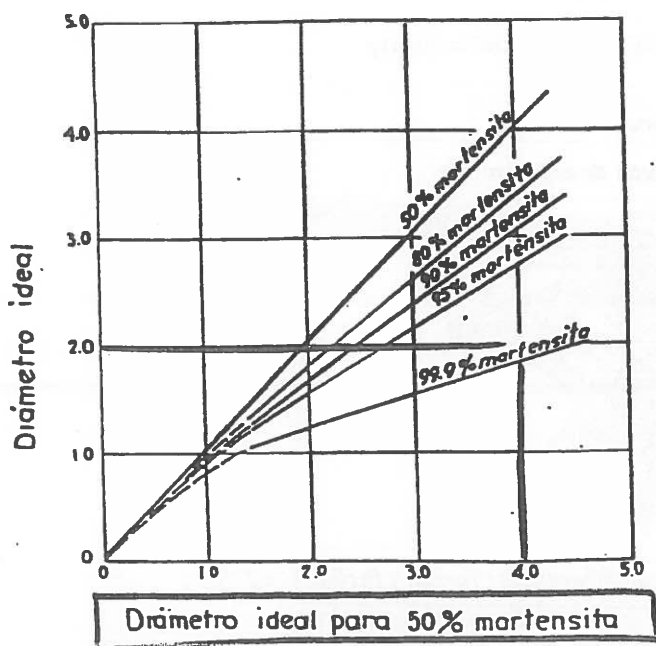


Fig. 104.

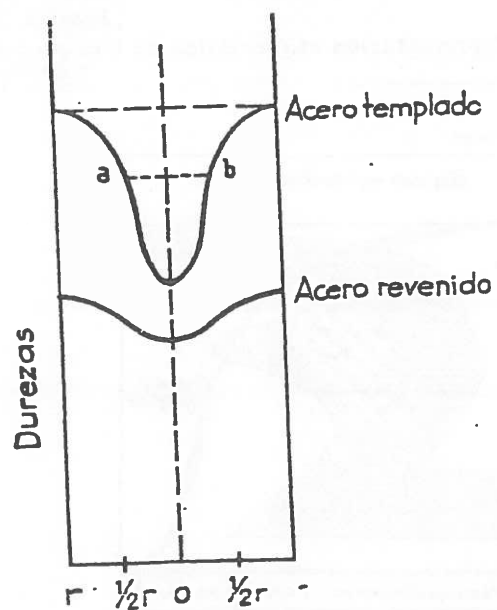
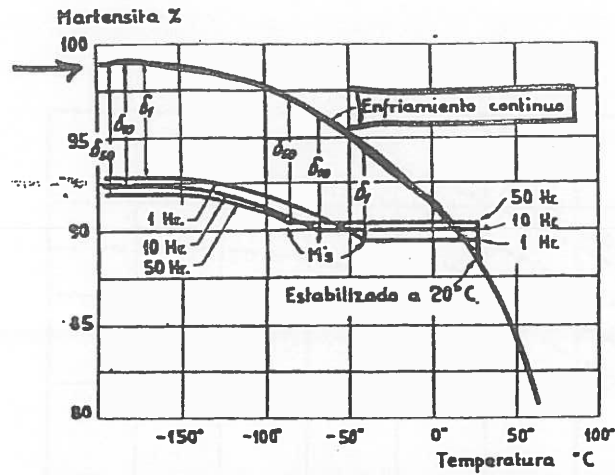


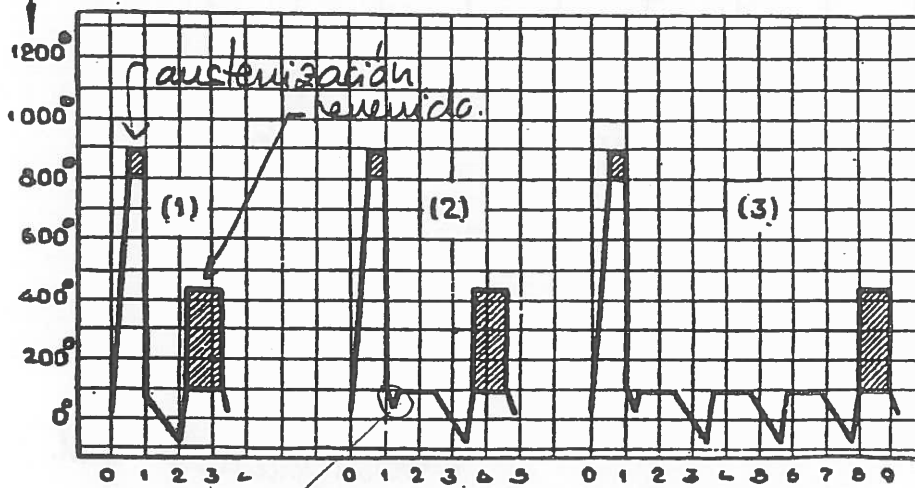
Fig. 79.

(  $D_i = .0 \times a 99\% \leftrightarrow D_i = 4.0 \times a 50\%$  )



**FIGURA 282**  
Efecto, en el proceso de transformación de la austenita en martensita, de la permanencia a la temperatura ambiente, de un acero de 1 % de C templado. Las probetas fueron calentadas a 790° y enfriadas hasta 20°, y mantenidas a esa temperatura durante 1, 10 y 50 horas y luego enfriadas a temperaturas subcero.

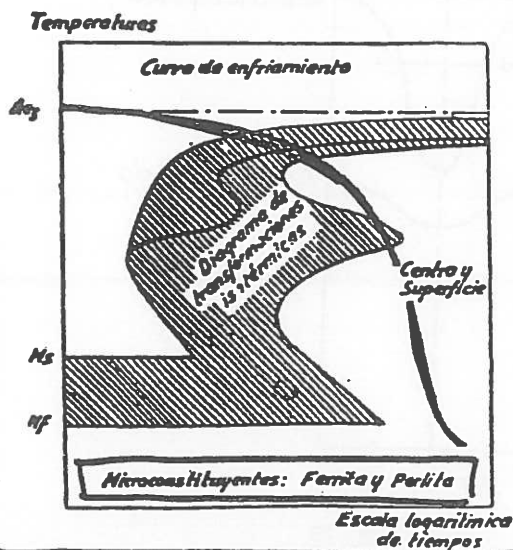
Temperaturas



**FIGURA 285.**

Representación esquemática de tres procesos de tratamiento con enfriamiento subcero.

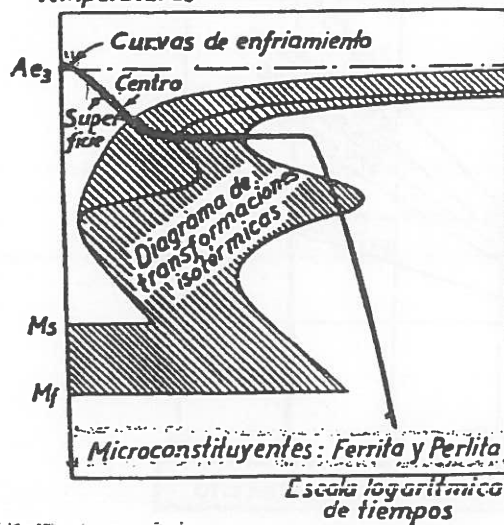
REGENERACIÓN



**FIGURA 269**

Representación esquemática de un recido de regeneración lento

Temperaturas



**FIGURA 270**

Representación esquemática de un recido isotérmico.

de martensita mientras que si no lo hacemos se obtiene un 93%.

### Origena tensiones y agrietabilidad.

No siempre se hace de esa forma, sino que se hace en varias etapas como se representa en la figura 285.

- (1) Temple subcoo tal cual
- (2) Antes de seguir enfriando, caliento un poquito, mantengo un tiempo, y luego ya enfrio otra vez
- (3) Este proceso puede ser necesario más de una vez!

### ● Recocido

- Recocido total o de regeneración: austenización seguida de enfriamiento lento para obtener una estructura perlítica.

- Recocido isotérmico: austenización seguida de transformación isotérmica en zona perlítica.

- Recocido globular: calentamiento a temperatura ligeramente inferior a  $A_1$  (subcrítico) u oscilante alrededor de  $A_1$  para conseguir una globulización de los carburos (fomenta más la difusión, de forma que la cementita va globulizándose y coalesciendo  $\rightarrow$  + estable). Este recocido produce máximos de blandamiento y maquinabilidad y es imprescindible para ablandar aceros de alta templeabilidad.

Variantes:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{recocido globular subcrítico: } T < A_1 \\ \text{recocido globular oscilante: } T = A_1 \pm \Delta T \end{array} \right.$

- Recocidos de homogeneización.
- Recocidos contra acritud.

### ● Normalizado

Consiste en una austenización, seguida de un enfriamiento que se realiza normalmente al aire. Sea más correcto definirlo como austenización, seguida de un enfriamiento lo suficientemente lento como para obtener femita y perlita pero el más rápido dentro de los enfriamientos que we dan estos dos constituyentes. En realidad, ambos "criterios" son el mismo cuando el acero "se emplea bien": un acero de alta templeabilidad, se emplea para piezas grandes (para una pequeña no haría falta!), pero si ese acero se emplea en una pequeña, si enfriamos al aire es probable que temple, luego ya no estamos haciendo un normalizado (aunque enfriamos al aire). En este caso, decimos que el acero se está "empleando mal" y por eso definimos el normalizado como el enfriamiento más rápido para obtener femita y perlita.

Este tratamiento da lugar a estructuras de grano fino, luego muchas veces se aplica como pretratamiento, previo a otros, pues, en primer lugar, ese grano fino se va a heredar (y sabemos que nos interesa) y por otro lado va a austenizar mejor,...



Dureza  
Brinell

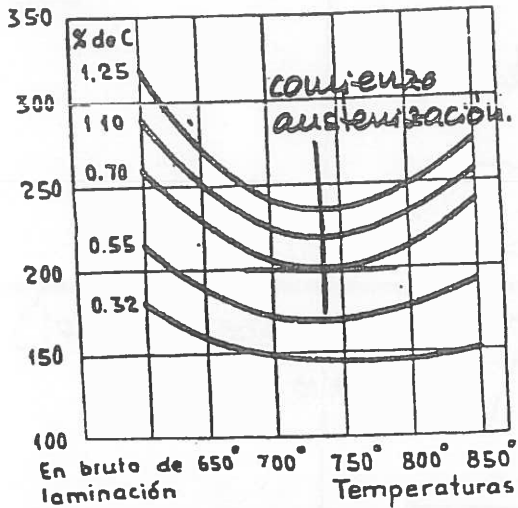


FIGURA 297

Influencia de la temperatura del recocido de ablandamiento, en la dureza de diversos aceros al carbono. Los aceros se mantuvieron cinco horas a temperatura y luego se enfriaron al aire.

Dureza  
Brinell

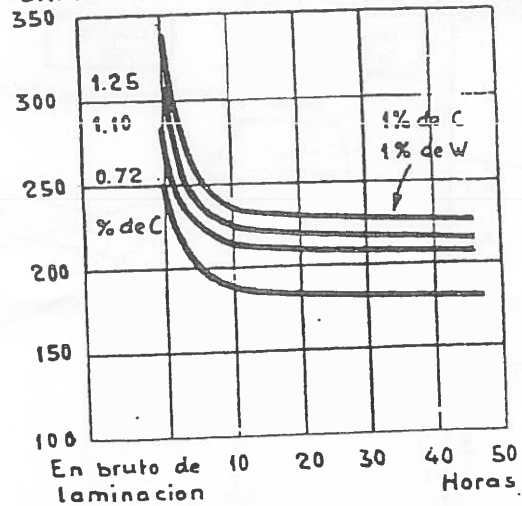


FIGURA 298

Influencia de la duración del recocido de ablandamiento, en la dureza de diversos aceros. Los aceros se calentaron a 715° y luego se enfriaron al aire.

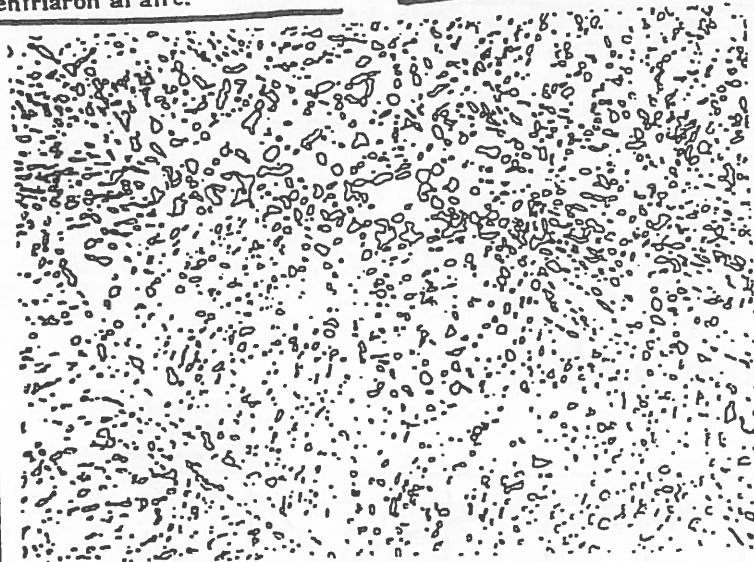
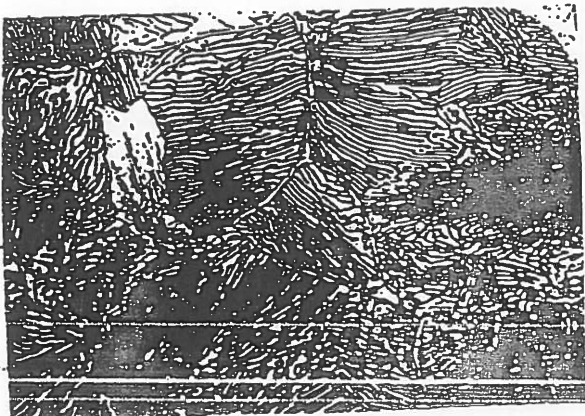
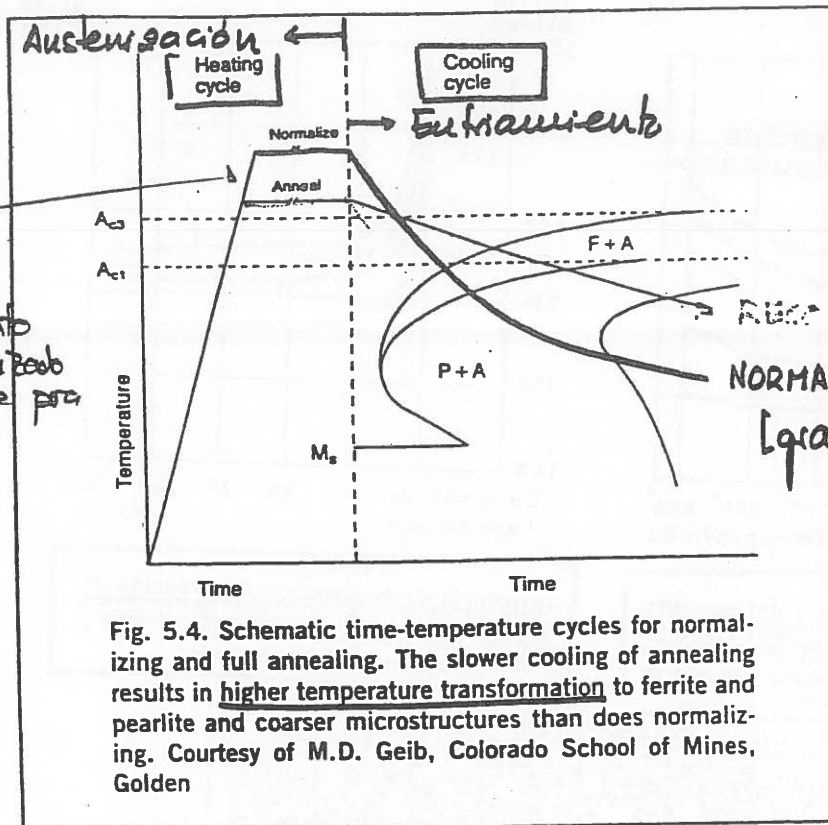


Fig. 5.5. Spheroidized microstructure in an Fe-0.66C-1Mn alloy formed by heating martensite at 704 °C (1300 °F) for 24 h. Picral etch. Magnification, 1000×. Courtesy of A.R. Marder and A. Benscoter, Bethlehem Steel Corp., Bethlehem, PA





## Recocido contra acritud.

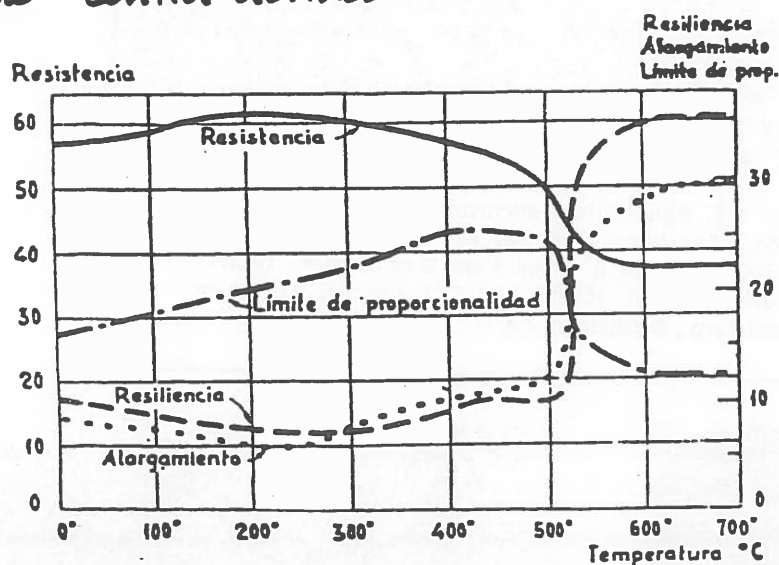
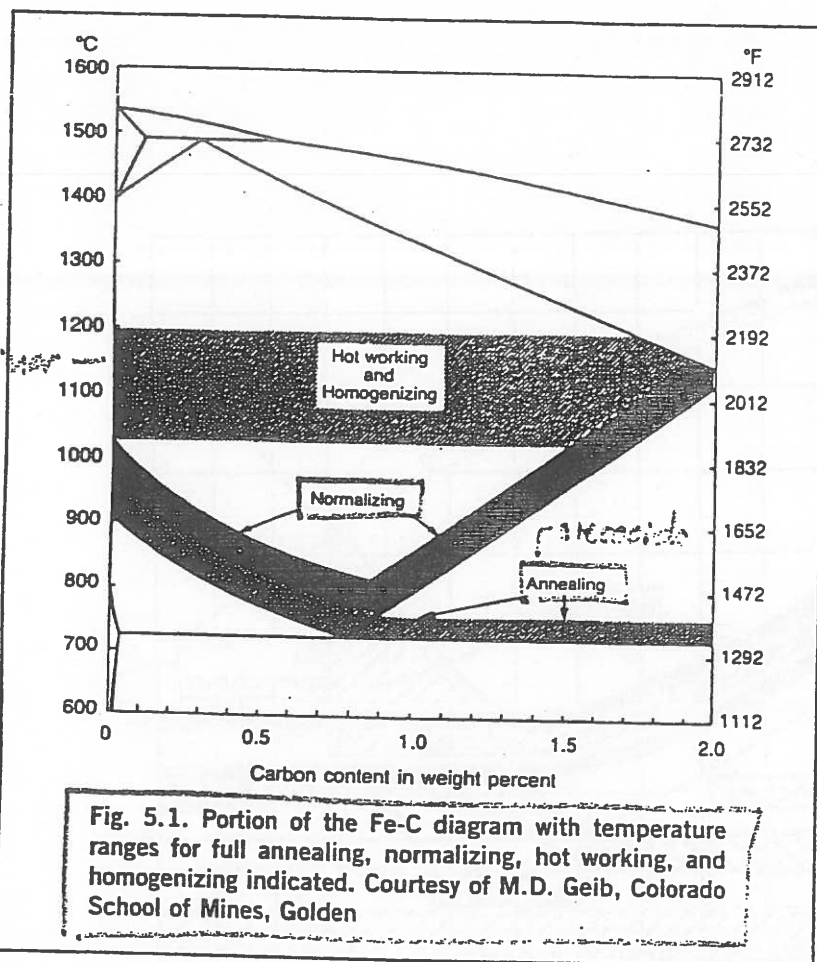


FIGURA 306

Influencia de la temperatura de recocido en las características mecánicas de un acero de 0,09 % de carbono estirado en frío.

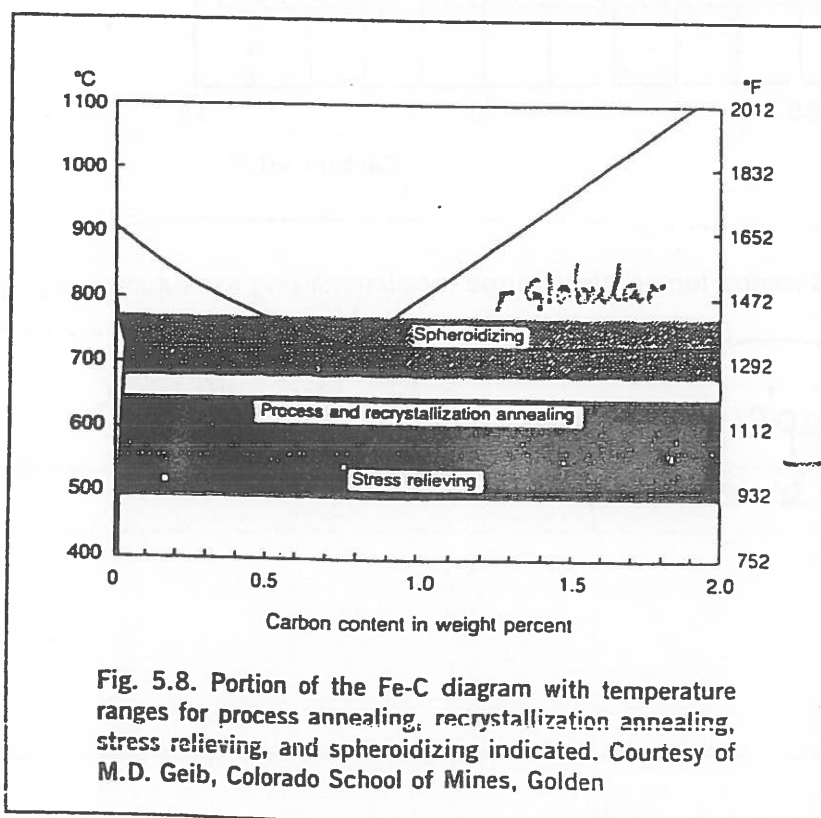


laminar

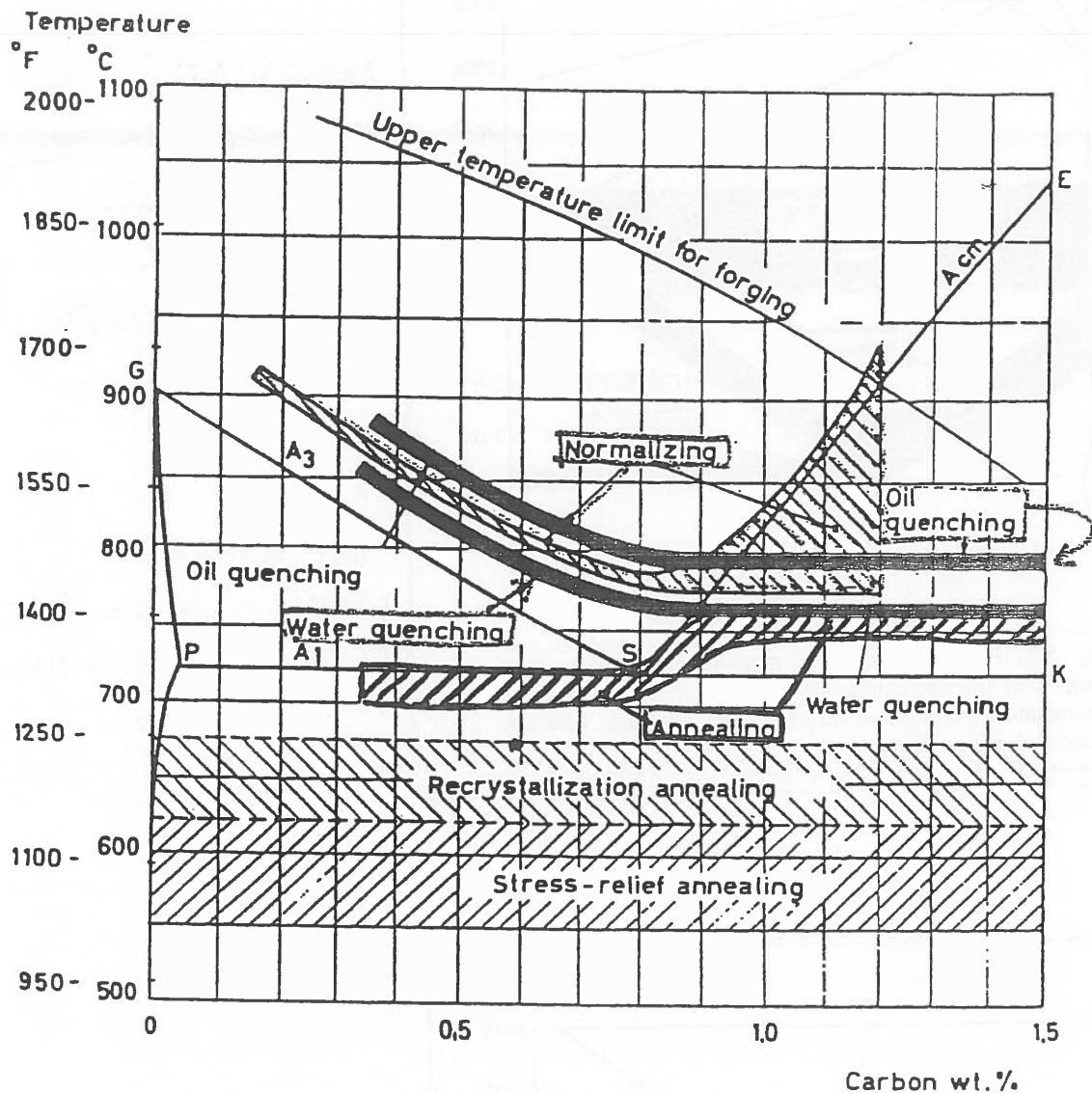


RANGOS DE  
TEMPERATURA <sup>de</sup> <sub>acuerdo con</sub>  
ACONSEJABLES  
PARA CADA  
TRATAMIENTO.  
(Templizado >  
> Templado)

↑  
xq? PENSARLO!  
¿Porque si partiera de la  
T<sub>de</sub> de resaca o por una  
Forja? Fig. 5.4



— resaca o por una forja

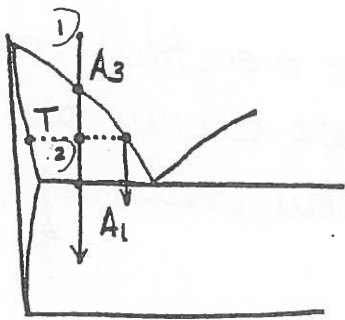


**Fig. 6-32** Iron-carbon phase diagram showing temperature range for austenitizing for subsequent heat treatment. (From same source as Fig. 6-22)

• Por qué recomienda templear con agua si la temperatura es menor y con aceite si es mayor? — Pensarlo.

## • Tratamientos intercríticos

Se definen como aquellos tratamientos en los que la austenización se realiza a temperaturas comprendidas entre los puntos críticos inferior y superior,  $A_1$  y  $A_3$ . El calentamiento de aceros de bajo carbono a esas temperaturas da lugar a femita + austenita, que al enfriar produce diversas estructuras en función del enfriamiento (femita y perlita o martensita).

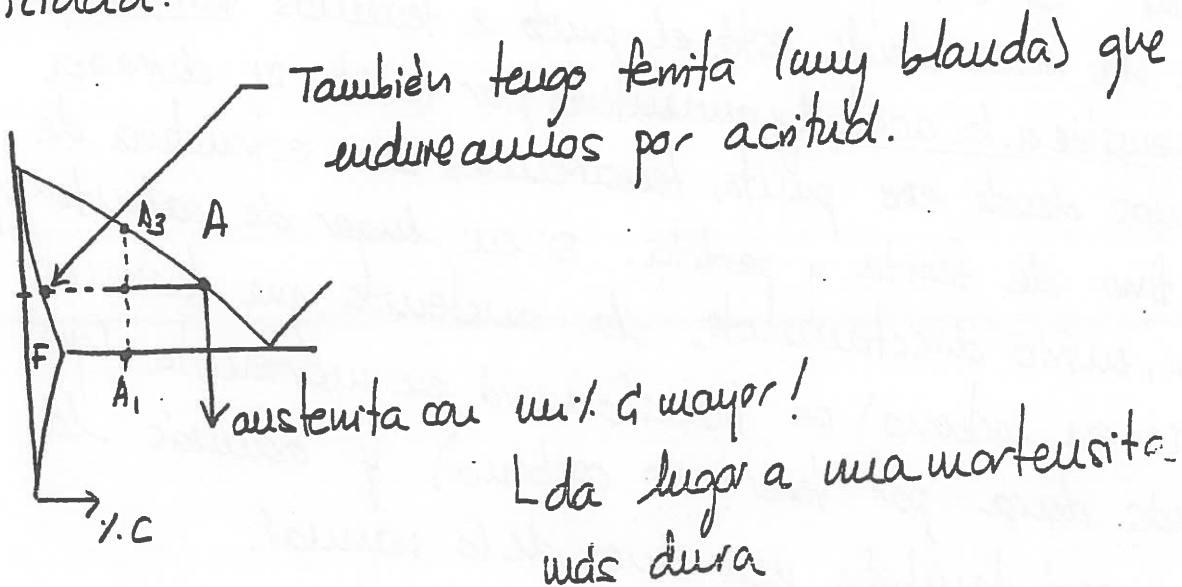


Estos tratamientos son de grandísima utilidad en automoción, por ejemplo, donde el precio de las piezas es fundamental. Una pieza como el cigüeñal, que requiere por su aplicación una elevada resistencia y una elevada tenacidad, es muy cara de conseguir. Si esta pieza la vamos forjando desde  $A_1$  hasta  $A_3$ , en la zona donde está el punto 2, tenemos femita, que es más sensible a la acritud y aumentará, por tanto, su dureza. Si enfriamos desde ese punto, tendremos una estructura de grano fino de femita y perlita. Si en lugar de calentar y enfriar, enfriamos directamente, la austenita que tenemos (más rica en carbono) se transformará en martensita (que será más dura por tener más carbono) y además la femita será también más dura de lo normal.

Obtenemos entonces algo que no es tan bueno como lo que podríamos tener si austenizáramos y templemos pero que no es tan malo y es mucho más barato!

Estos aceros se denominan microaleados o HSLA (alta resistencia y baja aleación):

- Si se temple, la austenita es de alto contenido en carbono, tiene templeabilidad  $\rightarrow$  la martensita es dura y su formación introduce alta densidad de dislocaciones en la ferrita (+dura)
- Si se temple en aceros forjados (en caliente o en frío) con tamaño como afinaute de grano, los granos son muy finos y elevan la resistencia (a veces se temple desde ferrita con estructura completamente austenítica)
- Se añade Niobio y Titanio para obtener una fina dispersión de carburos y nitruros en la ferrita.
- Puede obtenerse una óptima combinación de resistencia y plasticidad.



icha más  
sa por mucha  
os plasticidad

mucha más dureza y  
plasticidad similar  
al acero al carbono!

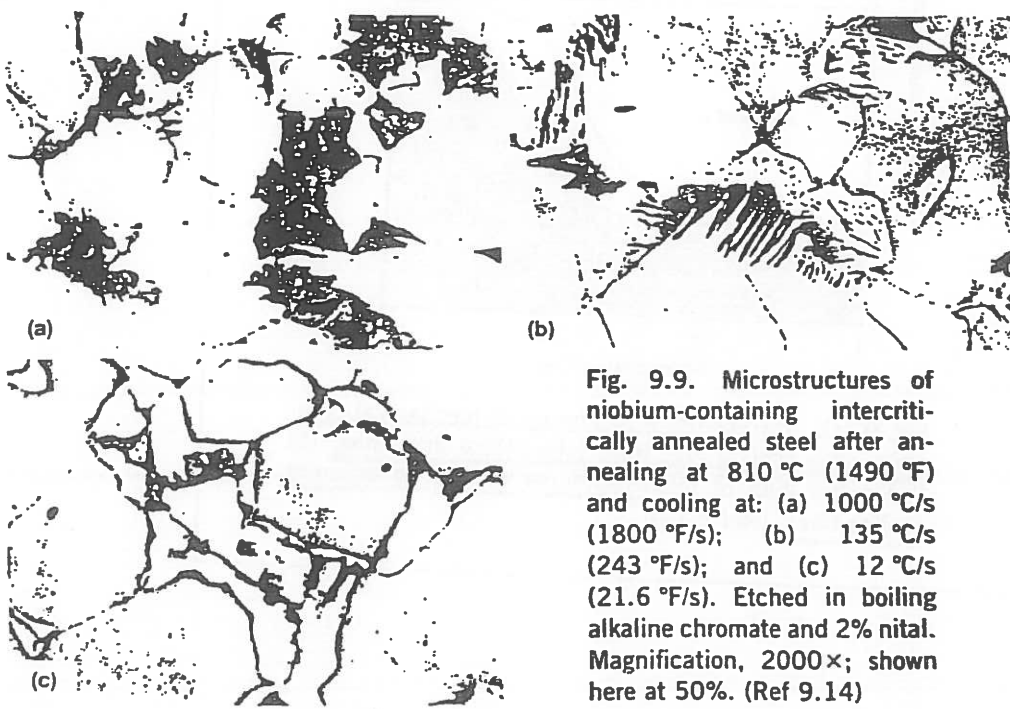
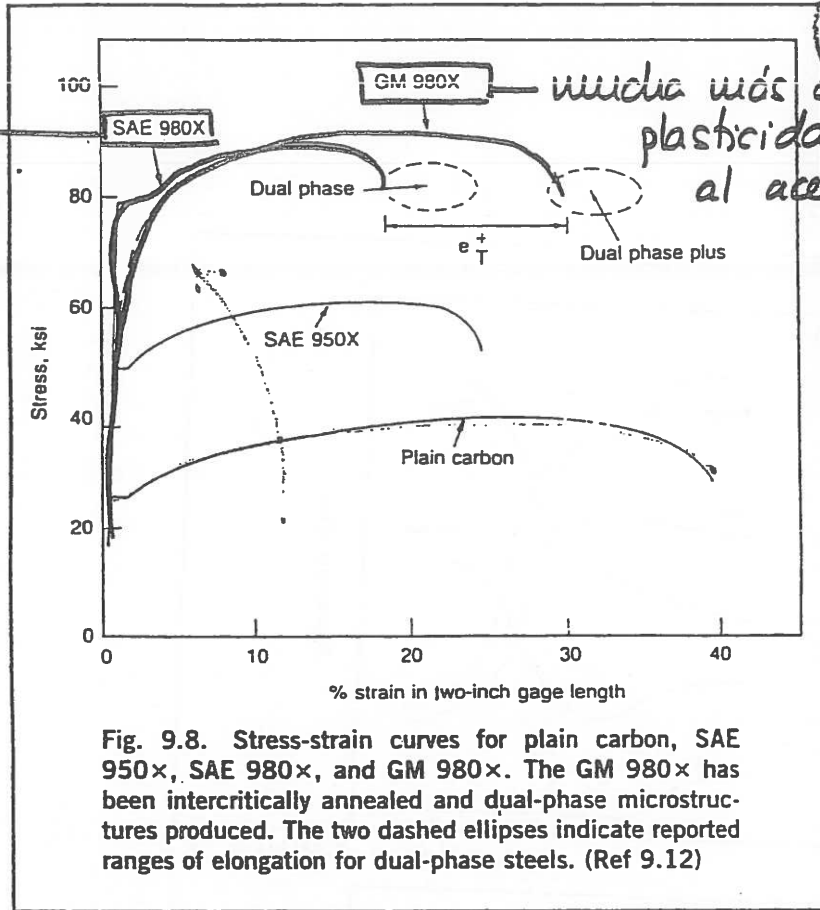


Fig. 9.9. Microstructures of niobium-containing intercritically annealed steel after annealing at 810 °C (1490 °F) and cooling at: (a) 1000 °C/s (1800 °F/s); (b) 135 °C/s (243 °F/s); and (c) 12 °C/s (21.6 °F/s). Etched in boiling alkaline chromate and 2% nital. Magnification, 2000x; shown here at 50%. (Ref 9.14)

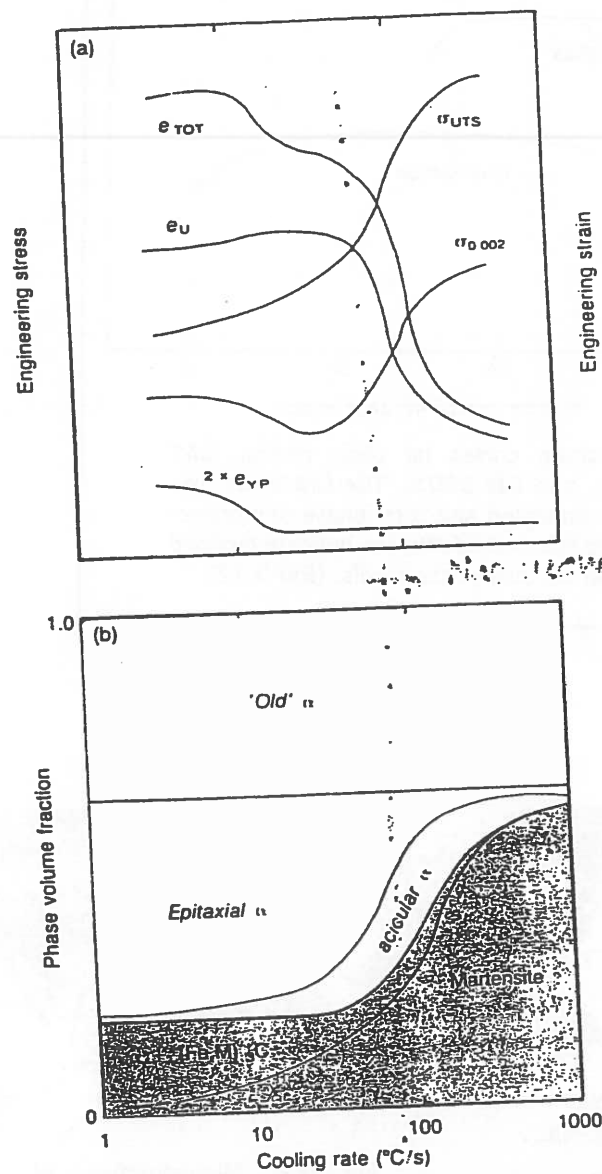
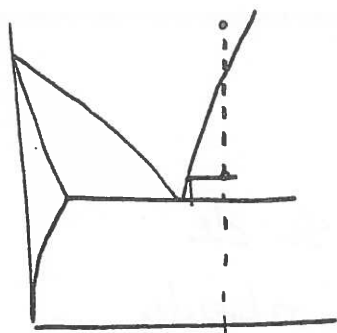


Fig. 9.10. (a) Schematic of change in mechanical properties with cooling rate from intercritical annealing. (b) Schematic map of microstructures formed by different cooling rates. (Ref 9.14)



## ● Tratamientos de aceros hipereutectoides

Si la austenización de estos aceros se realiza por encima de  $A_{cm}$  tenemos muchos problemas asociados.



- Se ha de hacer a  $T$  muy alta (la curva tiene mucha pendiente), luego tenemos mucho riesgo de tener grano muy basto.  
[Aumento excesivo de grano austenítico]

- La austenita tiene un alto contenido en carbono y  $M_s$  muy baja, luego tenemos una muy alta agrietabilidad en el temple.

- Como  $M_s$  es muy baja, en el temple, al llegar a la temperatura ambiente, tenemos mucha austenita retenida, que me obliga a realizar un temple subcrítico con el consiguiente riesgo de grietas ...

Son muchos los factores en contra de realizar un temple completo. Si realizamos un temple incompleto austenizando por debajo de  $A_{cm}$ , obtendremos austenita y carburos globulizados dispersos.

Si austenizo ligeramente por encima de  $A_{Fe}$   
En el temple se tiene mayor templeabilidad, dureza de martensita similar, menor agrietabilidad y menos austenita retenida, aunque los carburos pueden disminuir la templeabilidad.

Como austenizo por debajo de  $A_{cm}$  y la temperatura es menor, no tengo peligro de tener grano demasiado basto. Además, como la austenita tiene un contenido en carbono menor, tenemos menor tendencia a la formación de grietas y menos austenita retenida. Inconveniente: no tenemos homogeneidad.

### ● Tratamientos termomecánicos.

Es, como su propio nombre indica, una combinación de un tratamiento térmico con uno mecánico (forja en caliente, en frío - laminación -, ...)

Un ejemplo, que ya hemos visto, son los tratamientos de aceros microaleados con forja previa.

Pueden clasificarse en tres tipos:

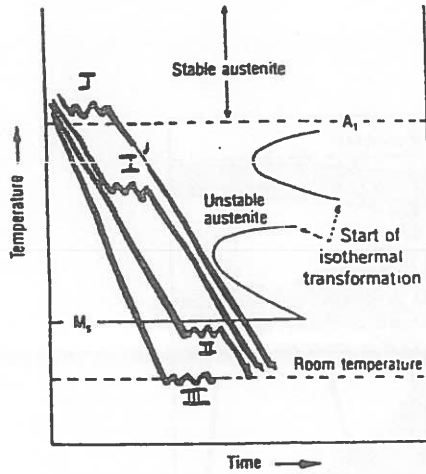
- Deformación previa a la transformación de la austenita, a temperaturas superiores a  $A_1$  o inferiores en la zona de la "bahía" (ausforming), que:

- Requiere aceros de alta templeabilidad, que retrasen las transformaciones bainítica y perlítica.
- Si la deformación se produce por debajo de una temperatura denominada  $M_s$ , puede inducir transformación martensítica (proceso TRIP): cuando deformamos la austenita, le estamos provocando inestabilidad, que es lo que produce, por sí sola, que al alcanzar  $M_s$  se produzca la transforma-

≡ proceso de deformación.

Deformación previa a la transformación:  $T > A_1$

Def. previa a transf:  $T < A_1$   
(baja)



II. Deformación durante la transformación martensítica (al inicio)  
L se deforma poco, pero algo caeigo pues aún tengo poca martensita.

Fig. 9.4. Schematic diagram of the U.S. classification of thermomechanical treatments superimposed on a time-temperature-transformation diagram. (Ref 9.8)

muación  
de la  
ustificación

bahía  
o mucho t  
hacer lo  
e quera!)

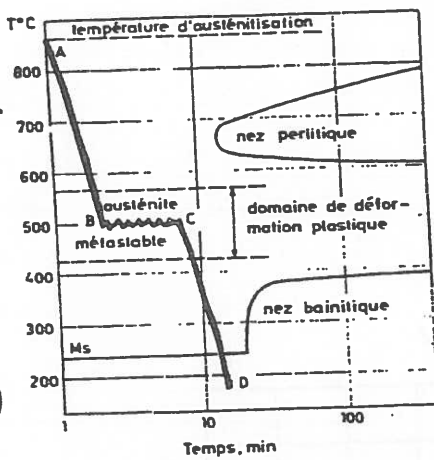


Fig. 277. Diagramme T.T.T. type d'une nuance d'acier convenant pour le traitement thermo-mécanique

deformar. durante la transform.

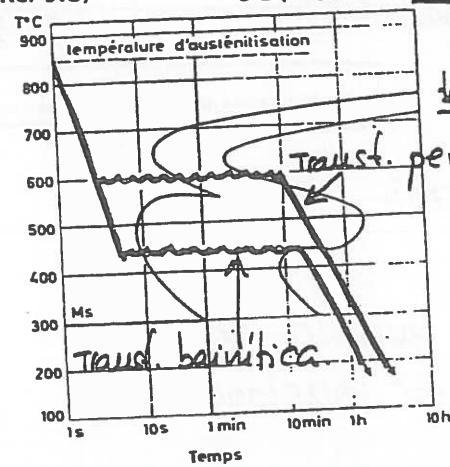


Fig. 278. Déformation plastique d'une austénite métastable au cours de sa transformation en perlite ou en bainite

Esquema de propiedades obtenidas o es muy importante).

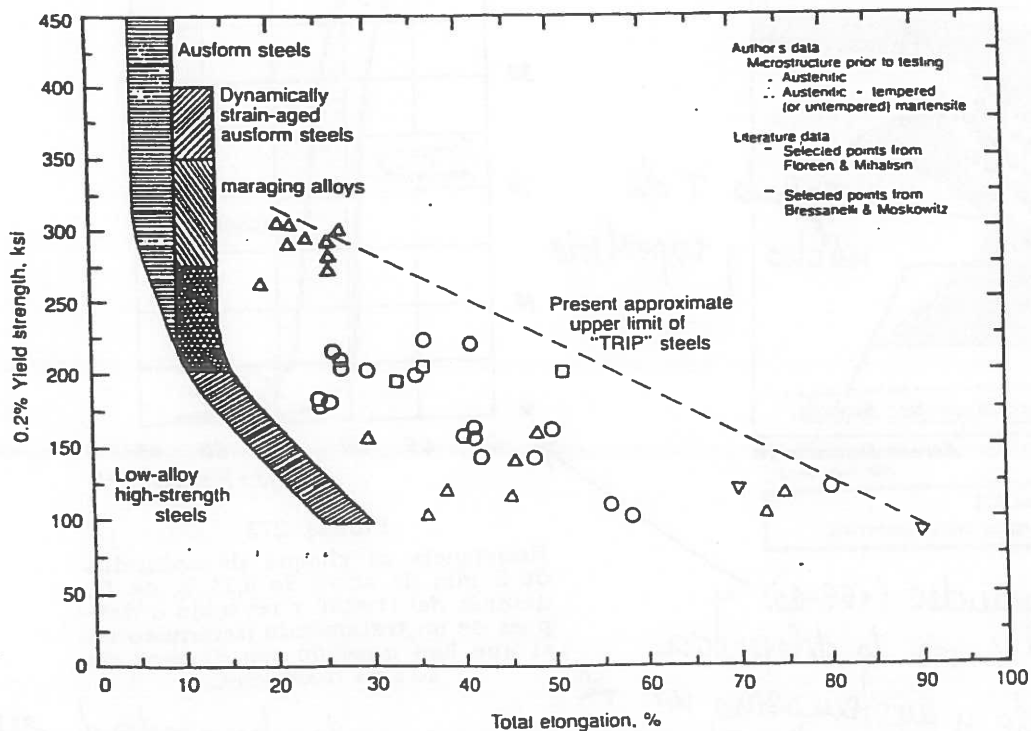


Fig. 9.6. Yield strength versus total elongation for various classes of high-strength steels and thermomechanical treatments. (Ref 9.9)

# MARTEMPERING

enfrio  
baste un poco  
por encima de  $M_s$   
Enfrio: martensita  
Revenido  
hasta igualar las  
del núcleo y superficie.

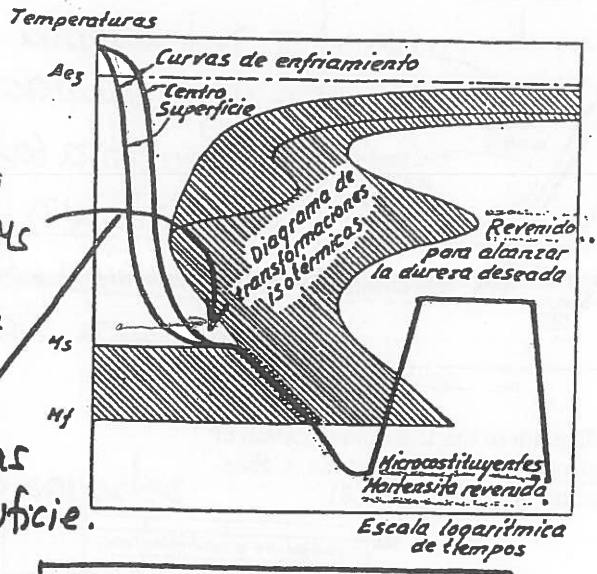


FIGURA 275  
Representación esquemática del martempering.

# AUSTEMPERING

Enfrio  
Mantengo por encima de  $M_s$   
hasta completar transformación  
bainítica  
Temple de enfriar (NO REVENIDO!)

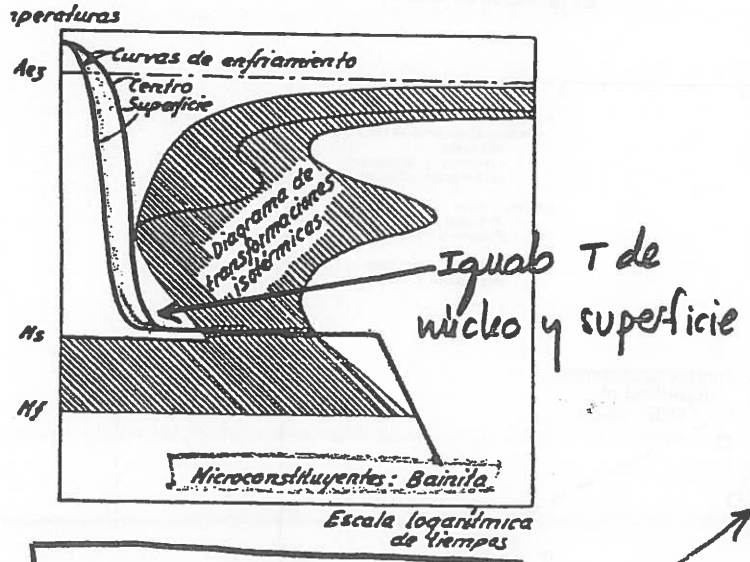


FIGURA 272  
Representación esquemática del austempering.

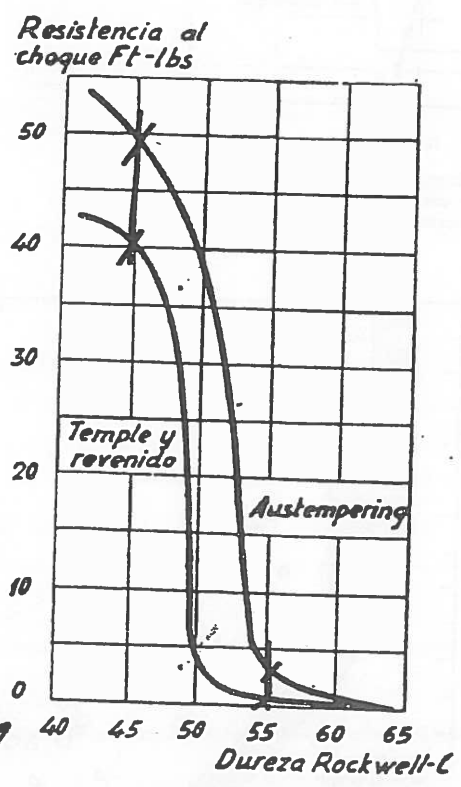


FIGURA 273  
Resistencia al choque de redondos de 5 mm de acero de 0,74 % de C, después del temple y revenido o después de un tratamiento isotérmico en el que han quedado con durezas de 40 a 60 Rockwell-C.

Para durezas grandes (55-60) y muy grandes (>60) la diferencia entre bonificado y austempering no es muy grande, pero ver, p.e. la gran diferencia de tenacidad entre ambos tratamientos con una dureza de 50 Rockwell-C!!!

ción martensítica. Entonces, aunque no alcancamos  $M_s$ , si le damos suficiente deformación, podemos obtener ese nivel de inestabilidad que nos produzca la transformación martensítica!

- Deformación durante la transformación bainítica o perlítica.
- Deformación tras la transformación (generalmente martensítica);  
es difícil de realizar, pues la martensita es muy dura y no se deforma casi nada.

Son tratamientos que proporcionan buenas plasticidades con altas resistencias, aunque son poco usados.

### • Austempering y martempering

Son tratamientos que intentan reducir o evitar la agrietabilidad en el temple que procede de los altos gradientes térmicos y la transformación martensítica, con su incremento de volumen a baja temperatura... buscamos entonces minimizar estos factores. Obtener martensita no lo puedo evitar, pues es lo que busco, luego intentaremos hacer que los gradientes térmicos sean lo menores posible.

Son tratamientos en los que se enfría el acero, ya austemizado, en baños de sales o metales fundidos en los que permanece isotérmicamente:

- 1. A temperaturas ligeramente superiores a  $M_s$
- 2. Hasta igualar las temperaturas de superficie y núcleo

Para ello, como tengo que permanecer un tiempo por encima de  $M_s$ , necesitamos un acero de alta templeabilidad, para que en ese tiempo no comience la transformación bainítica.

En el martempering, se realiza después un enfriamiento lento (normalmente al aire), de forma que obtenemos martensita  $\Rightarrow$  necesita un revenido posterior

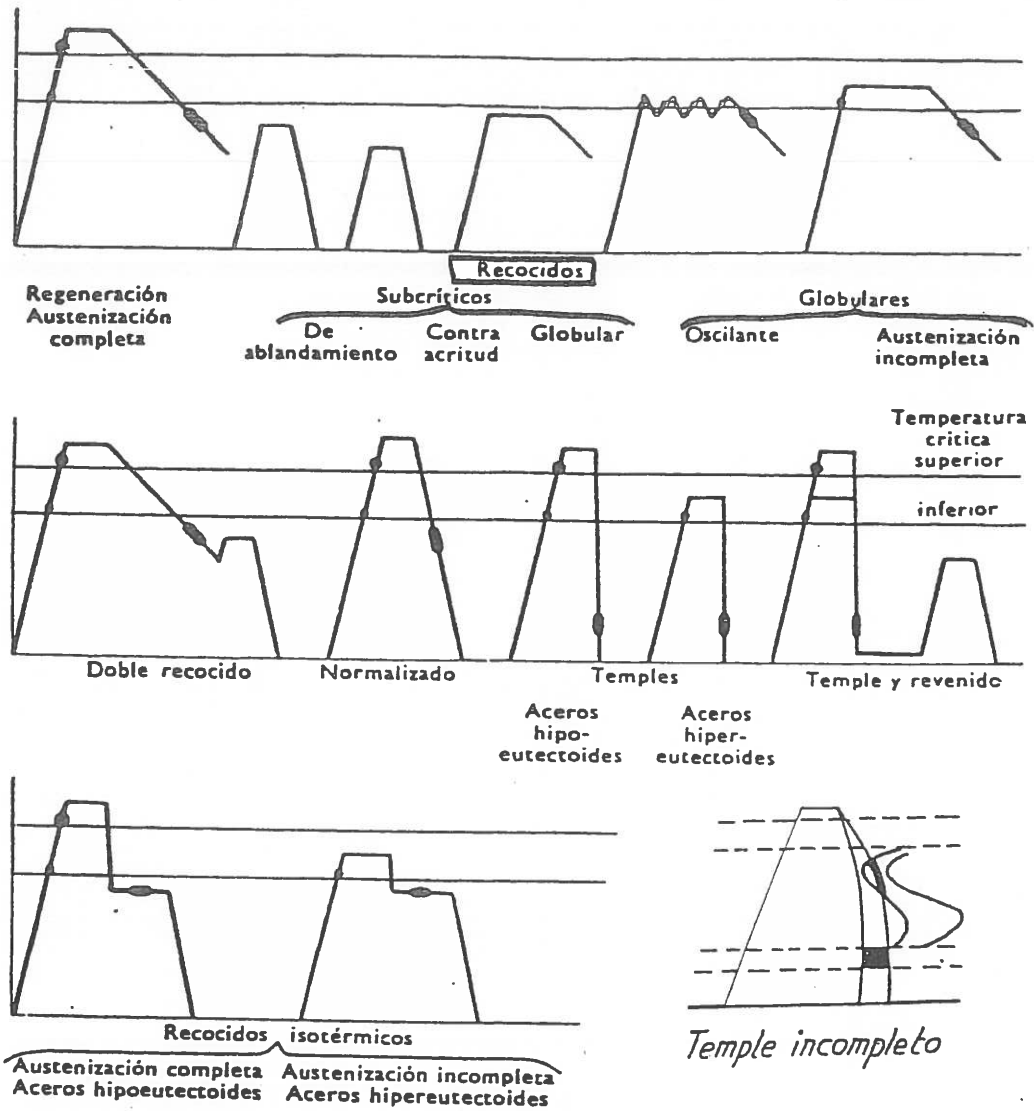
En el austempering, prosigue la permanencia isotérmica a dicha temperatura hasta completar la transformación bainítica, no siendo necesario un revenido posterior: no tenemos gradientes térmicos y se forman bainitas, no martensita  $\rightarrow$  disminuye ese aumento de volumen asociado a la transformac. martensítica: minimizo el problema de las grietas y obtengo una estructura que no es tan dura como la martensita pero que no está mal. Puede incluso obtenerse mayor tenacidad que por un bonificado en el que se obtiene la misma resistencia (ver figura 273)

$\hookrightarrow$  la razón en ambos tratamientos reside en disminuir la agrietabilidad y tensiones, por eliminar o minorar gradientes de temperatura durante la transformación.



# RESUMEN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DEL ACERO ESTRUCTURAL

M/180



**FIGURA 56**  
Esquema de los tratamientos térmicos más empleados y del desplazamiento de las zonas de transformación. Los puntos y zonas negras señalan las temperaturas de transformación del acero. (Ver figura 166.)

