

REVENIDO

la martensita formada en el tempe se da al aero, como hemos visto:

- Máxima dureza y resistencia
- Mínima plasticidad y máxima fragilidad
- Elevadas tensiones internas

la fragilidad característica de la martensita se debe a

- Gran distorsión de la red tetragonal
- Segregación de impurezas en bordes de grano
- Posible presencia de carburos
- Tensiones internas

El revenido es un calentamiento posterior al tempe, que puede realizarse a muchas temperaturas pero siempre inferiores a A₁. Provoca transformaciones a una estructura fina de precipitado (llamada óptima) de carburos en una matriz de férta, de forma que origina una progresiva pérdida de dureza y fragilidad. Como partimos de una estructura frágil y dura, y seguimos calentando vamos ganando plasticidad, este tratamiento térmico permite elegir una combinación resistencia-tensión adecuada al servicio requerido (con algunas limitaciones como iremos viendo)

Denominamos bainitido al temple seguido de revenida.

• Transformaciones en el revenido.

Son transformaciones térmicas, regidas por la difusión, luego para que se desarrollen las etapas de nucleación y crecimiento necesitamos tiempo y temperatura.

En la martensita formada en el temple pueden producirse algunas transformaciones a temperaturas próximas a la temperatura ambiente ($T < 100^{\circ}\text{C}$), como por ejemplo:

- Formación de agrupamientos de pocos átomos de carbono en bordes de la martensita y en dislocaciones
- Agrupamientos mayores ordenados en planos de la martensita
- Formación de óxidos de largo periodo en la martensita
- Transformación isotérmica de la austenita revenida.

En calentamientos posteriores al temple, la martensita y la austenita revenida se transforman según un esquema de cinco etapas:

1^a etapa (100 a 250 °C)

da martensita "suelta" algo de carbono, quedando con un contenido $\% \text{C} = 0'2\%$. : da lugar a la formación de carburos de transición que forma de vainas.

[carburo E]

MIGACIÓN DE
PIEDADES
CÁNICAS
Y EL
VENIDO

Oil-quenched 4340

SINGLE HEAT RESULTS

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Grain Size
Ladle	.41	.67	.023	.018	.26	1.77	.78	.26	6-8
Critical Points, F:						Ac, 1350	Ac, 1415	Ar, 890	Ar, 720

Treatment: Normalized at 1600 F; reheated to 1475 F; quenched in agitated oil.
.530-in. Round Treated; .505-in. Round Tested. As-quenched HB 601.

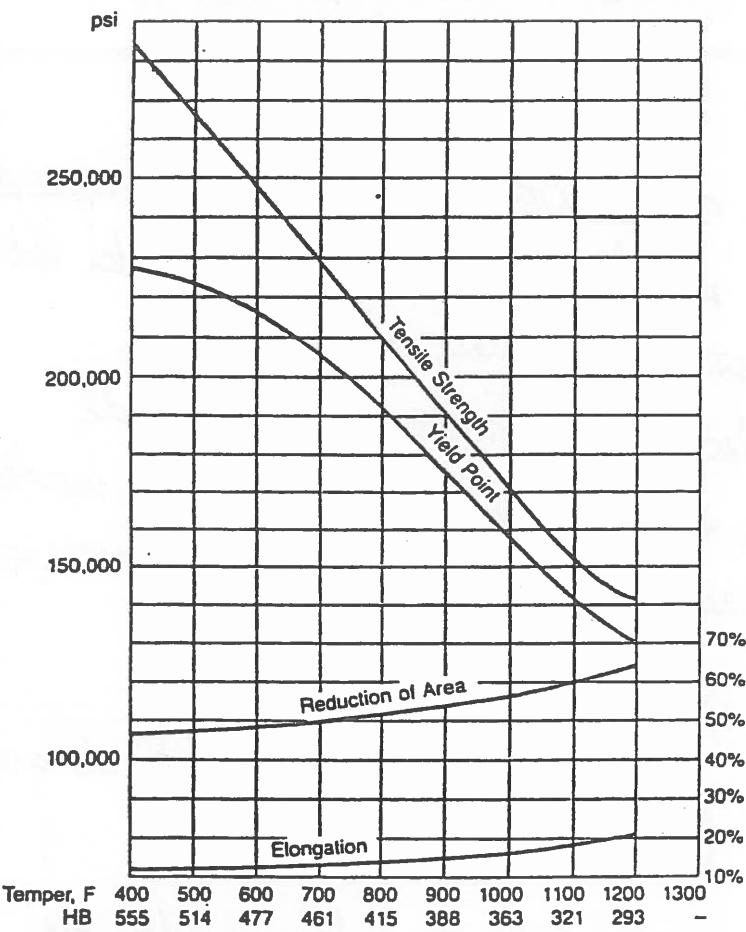


Fig. 8.4. Change in mechanical properties with tempering temperature for oil-quenched 4340 steel. (Ref 8.3)

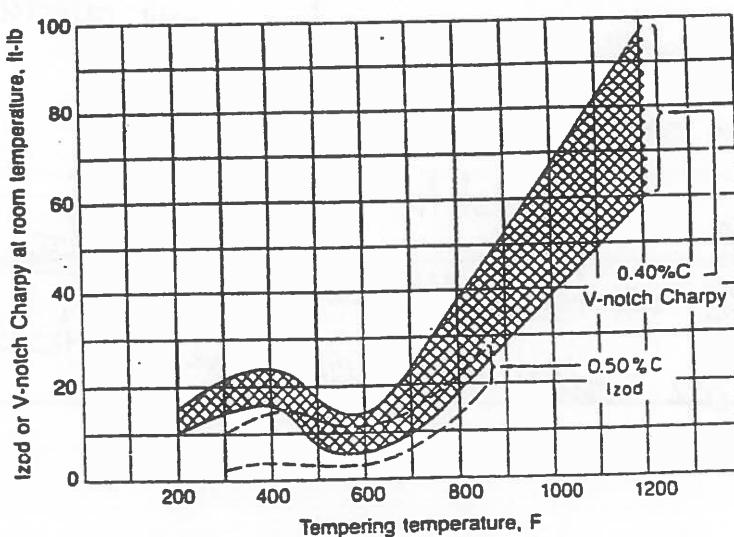


Fig. 8.1. Impact toughness as a function of tempering temperature of hardened, low-alloy, medium-carbon steels. (Ref 8.1)

los carburos son precipitados coherentes, y son:

- { - carburo γ (Fe_2C): ortorómbico
- { - carburo ϵ ($Fe_{2,4}C$): hexagonal

2^o etapa (150 a 300 °C)

Transformación de la austenita retendida en un agregado de ferrita y cementita. La ferrita aún no tiene la red α relajada, con lo que existen tensiones internas.

Se inicia esta etapa después de formarse carburos de transformación; la austenita está entre las llamas de martensita, y ahí se formará la cementita. Lo formado es diferente de las bainitas.

3^o etapa ($T > 250, 350$ °C): se forma cementita desde lo que era martensita:

Los carburos de transformación se van transformando en cementita, inicialmente con forma de placas, en el interior y en los bordes de la martensita. El carbono que queda en la martensita, se va saliendo de ella, y se va transformando así mismo en cementita. Al perder el carbono, la martensita se va transformando en ferrita, inicialmente en placas con altas tensiones, que va formando matriz.

SECCION DE
TENACIDAD
DURANTE
REVENIDO

M/158

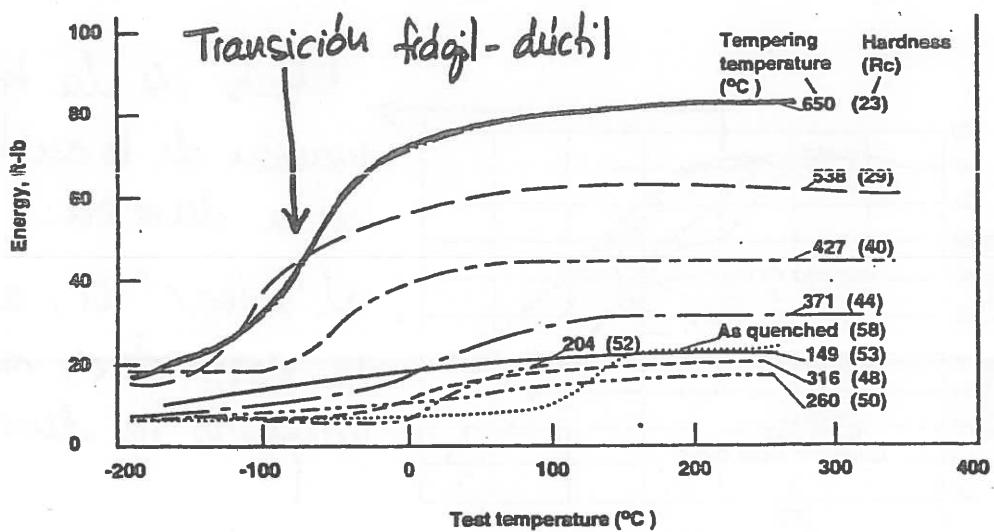
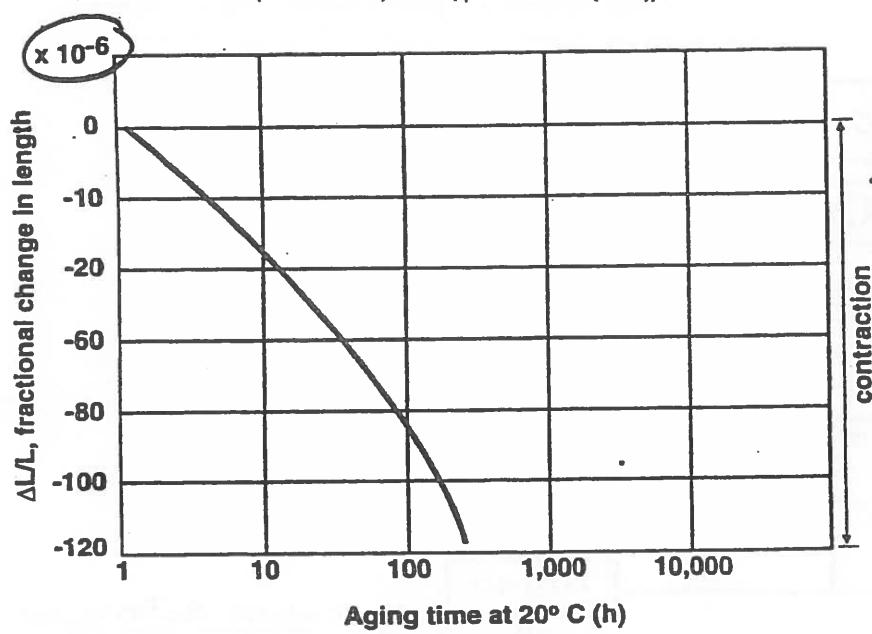
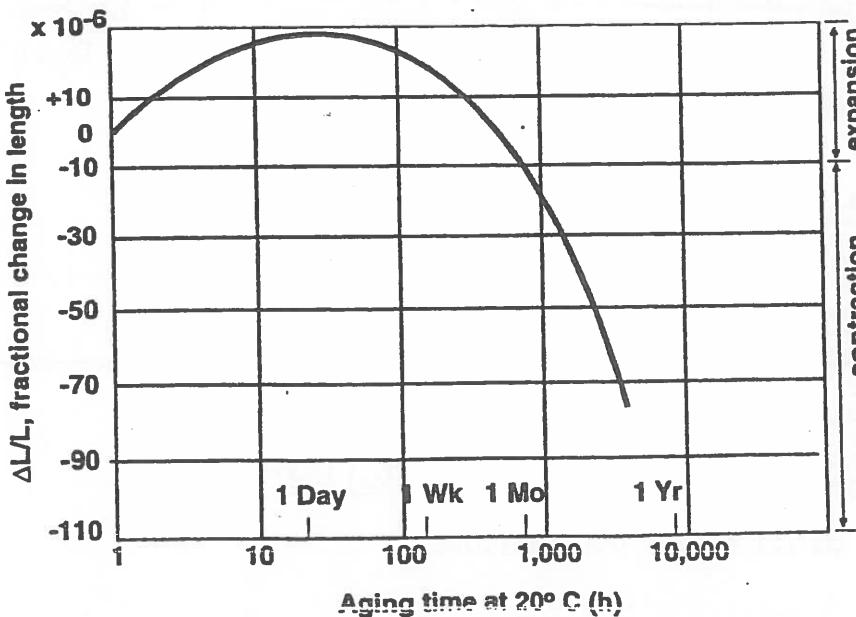


Fig. 5-8 Impact curves for a steel which has been tempered at different temperatures. (Adapted from F.R. Larson and J. Nunes, Proc. ASTM, Vol 62, p. 1192-1209 (1962))



La martensita se contrae, aunque muy poco y tarda mucho t en hacerlo

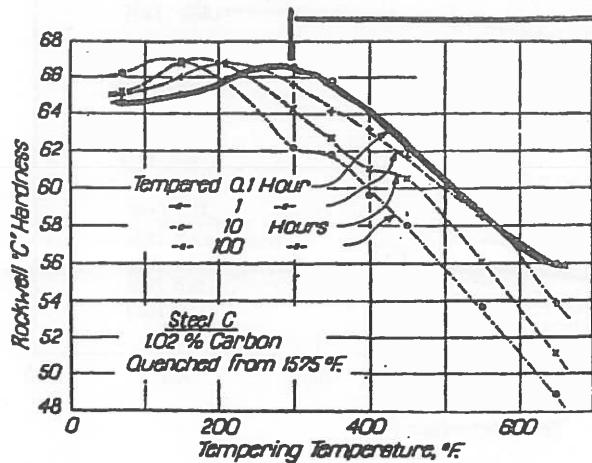
(a)



Dilataciu de la austenita retinida en una trans. isotermica al "soltando" q.

(b)

Fig. 5-23 (a) Change in length for a 1.0% C-1.5% Cr-0.2% V steel after austenitizing at 845 °C followed by oil quenching, cooling to -195 °C, then length measured at 20 °C. (b) Change in length at 20 °C after austenitizing at 845 °C followed by quenching into oil at 20 °C. (Adapted from B.L. Averbach, M. Cohen, and S.G. Fletcher, Trans. ASM, Vol 40, p 728 (1948))



Efecto de la transformación de la austenita en la dureza:
al "soltar" C, aumenta la plasticidad, disminuyendo la dureza

Fig. 5-24 The effect of tempering time on the hardness of a 1.02% C steel. (From S.G. Fletcher and M.Cohen, Trans. ASM, Vol 32, p 333 (1944))

TEMPERING = REVENIDO

QUENCHED = TEMPLADO.

ESQUEMA DE LAS CINCO ETAPAS DEL REVENIDO

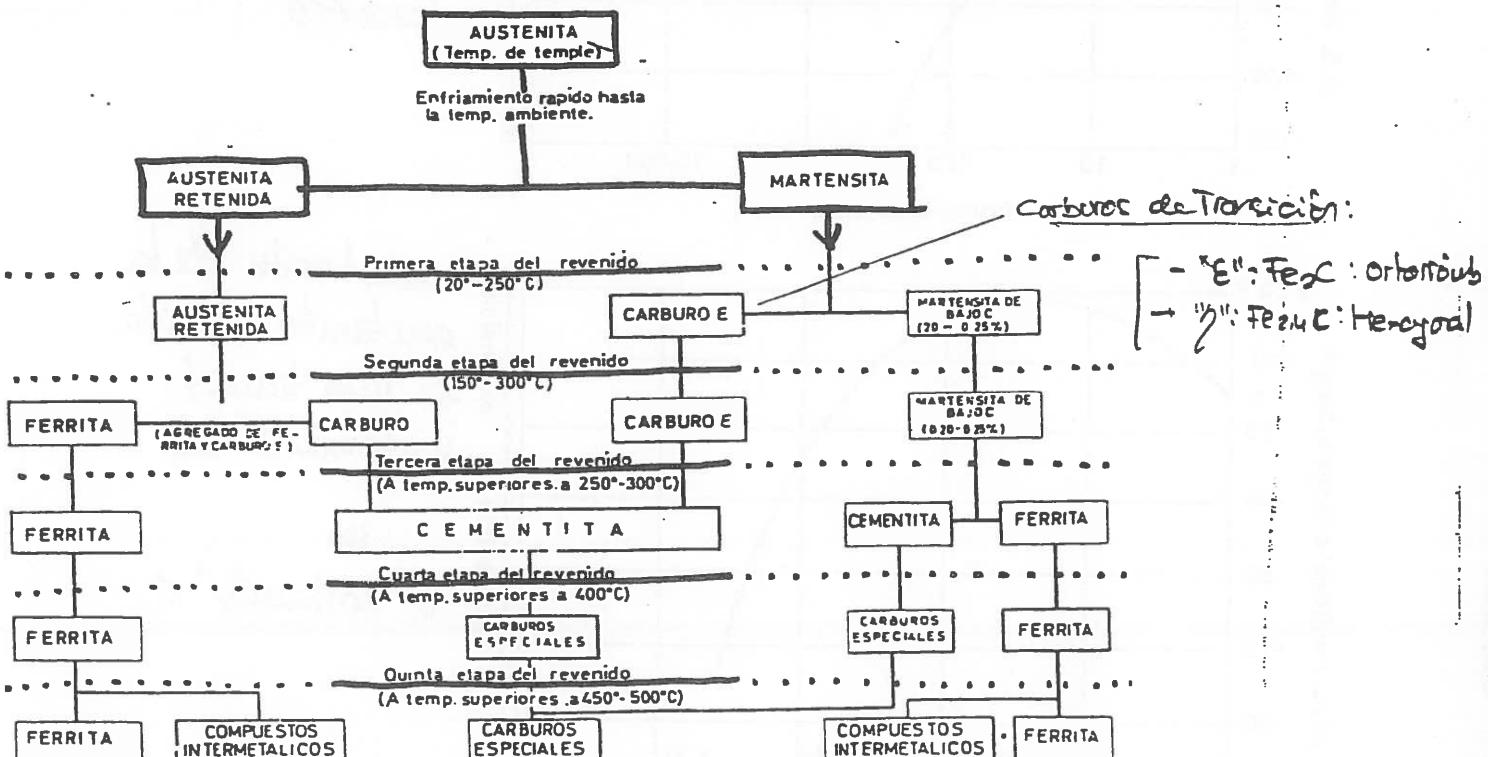


Fig. I-1.—Esquema de las etapas del revenido.

Al ir aumentando la temperatura:

- La cementita irá globuleando (a $T > 400^{\circ}\text{C}$) y coalesciendo (a $T > 600^{\circ}\text{C}$) esto es, se van uniendo los globulitos para formar otras mayores, que por tener menor energía son más estables.
- La ferrita sufrirá un proceso de restauración (entre 350 y 400°C), recristalización (a $T > 600^{\circ}\text{C}$) y crecimiento de grano.

→ Todo ello provocará un notable ablandamiento y aumento de la plasticidad

4^a etapa ($T > 400^{\circ}\text{C}$)

Es una evolución de la 3^a etapa que existirá en el caso de aceros aleados con elementos formadores de carburos: Mo, Cr, V, W, Ti

- Se forman carburos especiales con esos elementos mediante dos mecanismos (le "roban" el carbono a la cementita):

- . Transformación 'in situ' de la cementita
- . Formación de esos carburos por intercambio, tras disolverse la cementita en la matriz de ferrita.

El precipitado es coherente, y al ser más duros que la cementita dan lugar a un endurecimiento 'extra': dureza secundaria.

5^a etapa ($T > 500^{\circ}\text{C}$)

Se produce la precipitación desde la férmita de compuestos intermetálicos, cuando hay elementos de aleación capaces de formarlos, provocando un endurecimiento.

• Fragilidad de revestidos bajos (FMR)

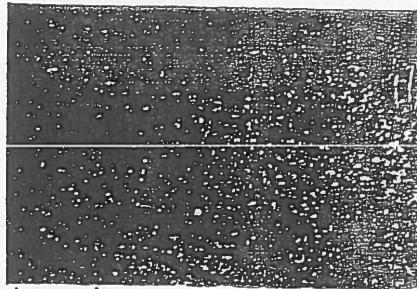
También llamada fragilidad de martensita revestida.
Fragilidad de los 300°C , se produce por revestidos entre 250 y 400°C . Normalmente se asocia a la precipitación de tóxos y otras impurezas (N y S , por ejemplo) en los bordes de grano de la austenita, y se manifiesta sólo si se producen en el revestido placas de cementita (a partir de la austenita retenida, en 2^a etapa, o en los cañuelos de la 3^a etapa), pues tienen una alta dureza y se favorece la formación de grietas.

Es suficiente (causa inmediata) con que se forme esa película de cementita, pero para su formación es necesaria la presencia de impurezas (causa primaria).

Por tanto, para evitar o, al menos, mitigar este fenómeno podemos recurrir a:

- utilizar aceros sin impurezas: son muy caros, pero pueden minimizarse las impurezas con aleación de

M/160



Lajas martensita Fig. 1-2 200^o

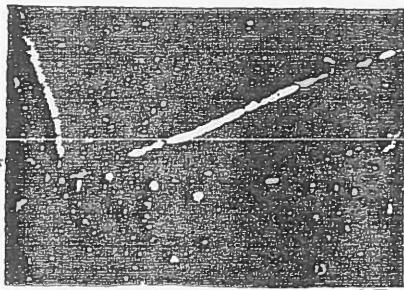


Fig. 1-3 300^o



(=1.3 : + aumenta) Fig. 1-4 300^o

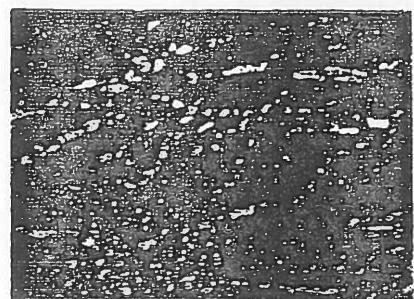


Fig. 1-5 400^o

- al IT se va rompiendo la cementita e irá globulizandolo poco a poco

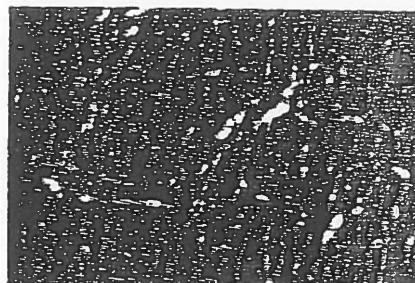


Fig. 1-6 500^o

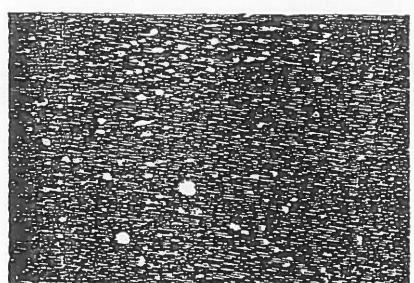
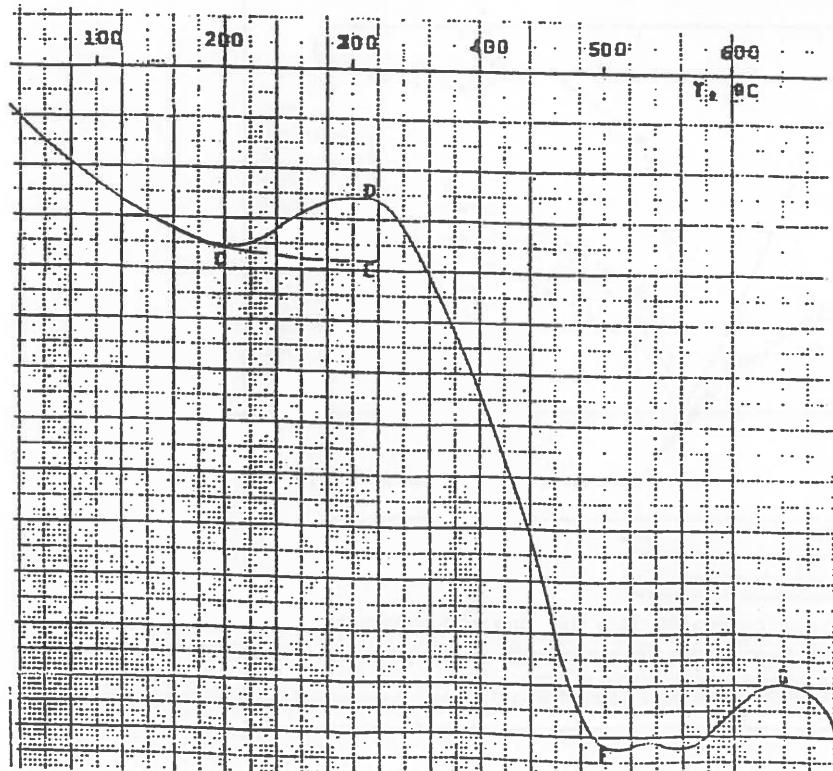
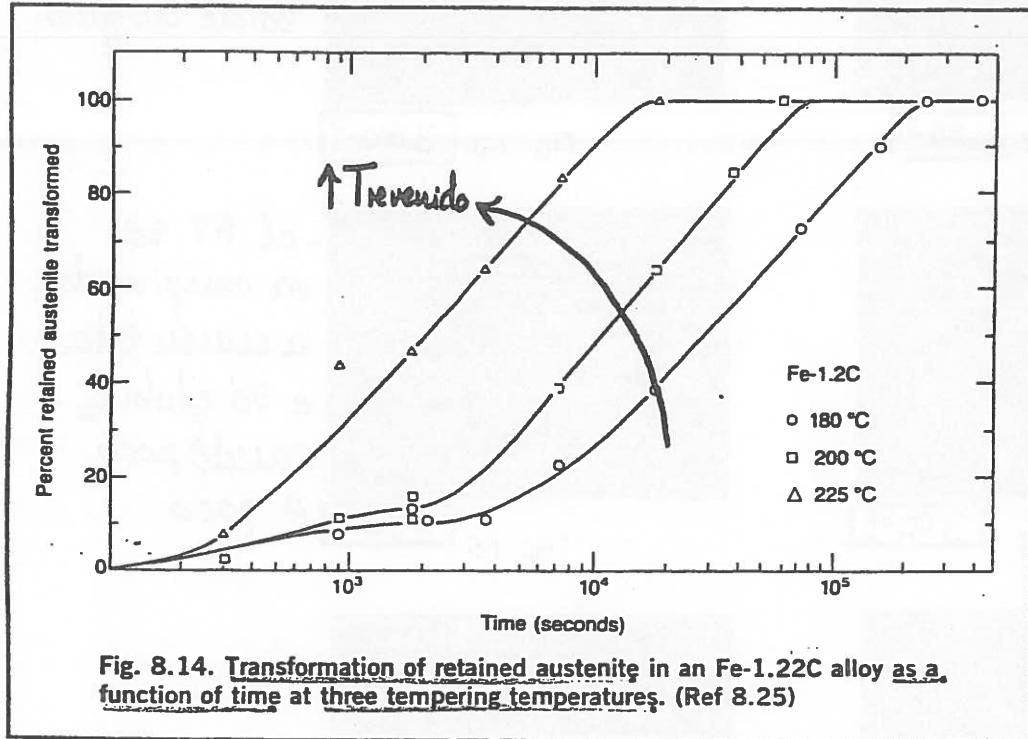


Fig. 1-7 600^o

cementita globulizada ✓



TRANSFORMACIÓN DE LA AUSTENITA RETENIDA



Formación cementita.

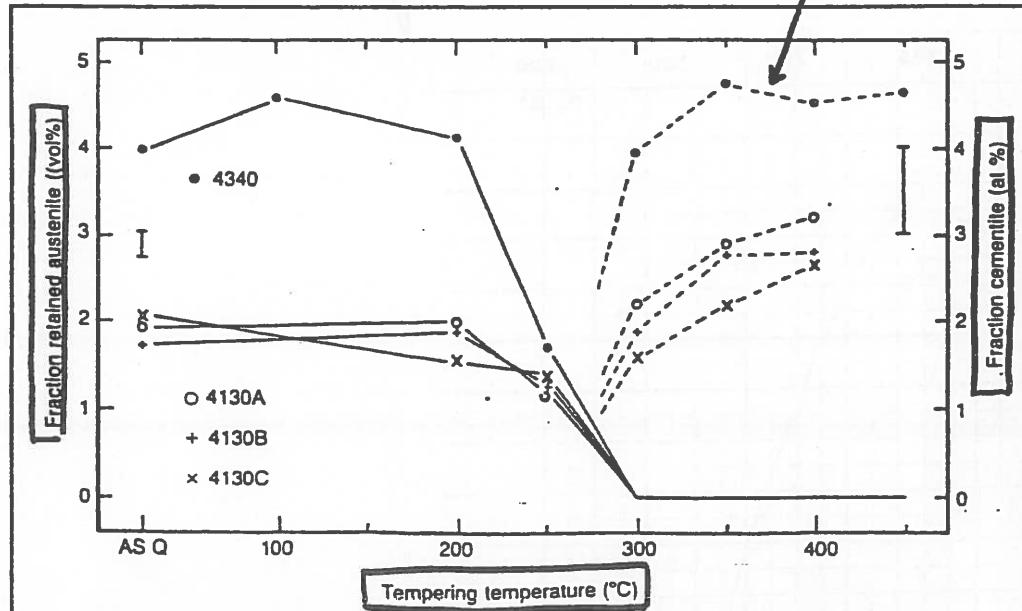


Fig. 8.15. Retained austenite and cementite as a function of tempering temperature in 4340 and 4140 type steels. The amounts of the phases were determined by Mössbauer spectroscopy. (Ref 8.27)

REZA

SUNDARIA

yo soy
maestros
carburos
(apta: T > 400°C)

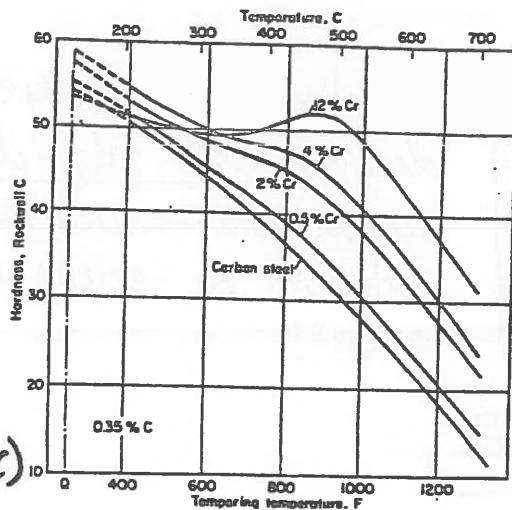


Fig. 5-35 Tempering curves for Cr steels containing 0.35% C, showing secondary hardening. (From same source as Fig. 5-34)

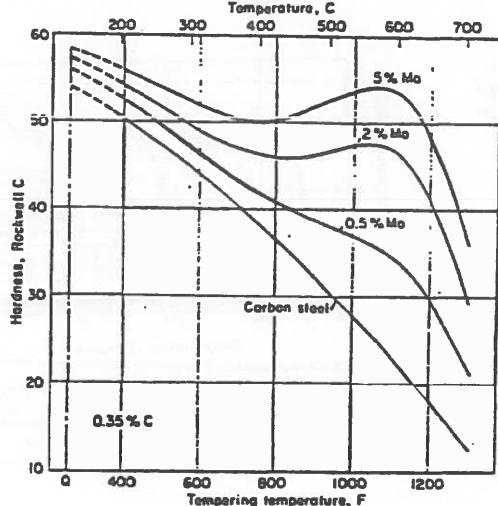


Fig. 5-36 Tempering curves for (a) Mo steels and (b) Mo-Cr steels, showing secondary hardening. (From same source as Fig. 5-34)

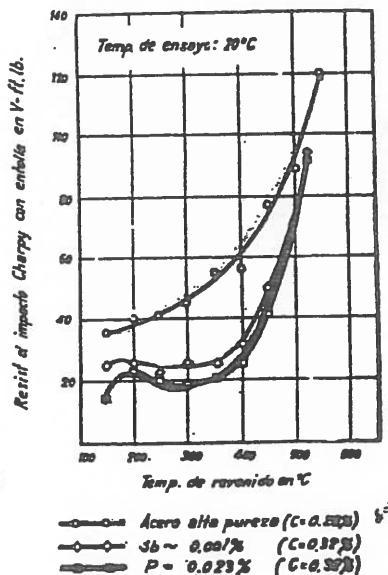


Fig. I-12.—Influencia del fósforo y del antimonio sobre la resiliencia de aceros (Cr-Ni-Mo) (Ni=1.5%; Cr=1%; Mo=0.25%) de alta pureza (30).

Fragilidad de
revenidos bajas
[Precipitación
de impurezas]
P, Sb, N, ...
[250-400°C]

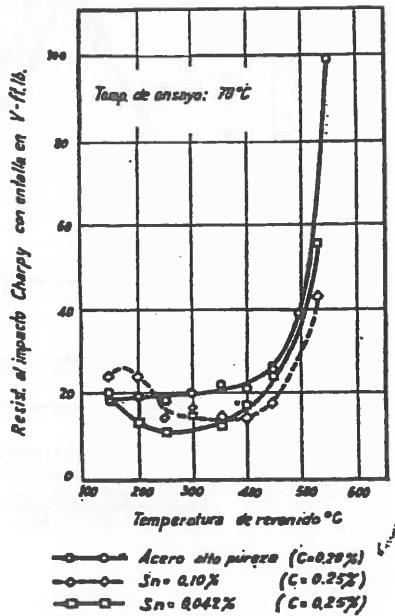


Fig. I-13.—Influencia del estaño sobre la resiliencia de aceros Cr-Ni-Mo (Ni=1.5%; Cr=1%; Mo=0.25%) de alta pureza (30).

mayor fragilidad, pero
sin la "bañera"

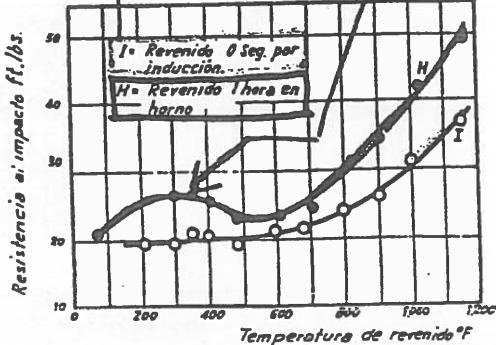


Fig. I-14.—Resistencia al impacto de un acero AISI-3140 revenido en horno y revenido por inducción (31).

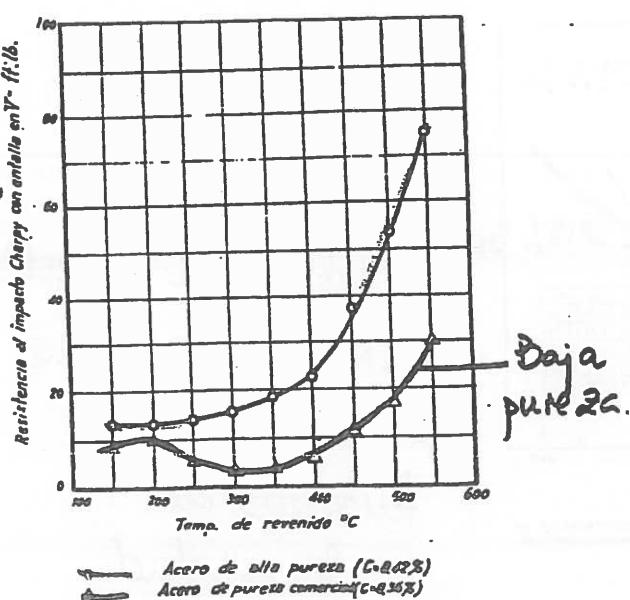


Fig. I-10.—Resistencia de dos aceros Cr-Ni-Mo de diferentes purezas (30).

SECCIÓN DE VÉRTICES BAJOS

A.)
MR)

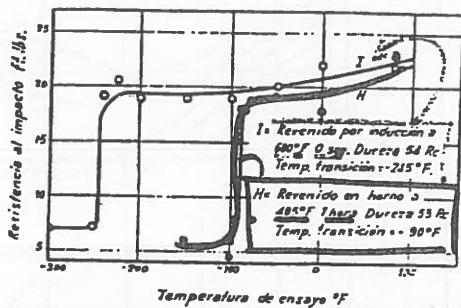


Fig. I-15.—Curvas de transición del acero AISI-3140 revenido en horno y revenido por inducción. Dureza 53-54 Rc. (31).

Cambio en la temperatura de transición frágil-ductil: en un acero revenido por inducción se produce mucho antes!

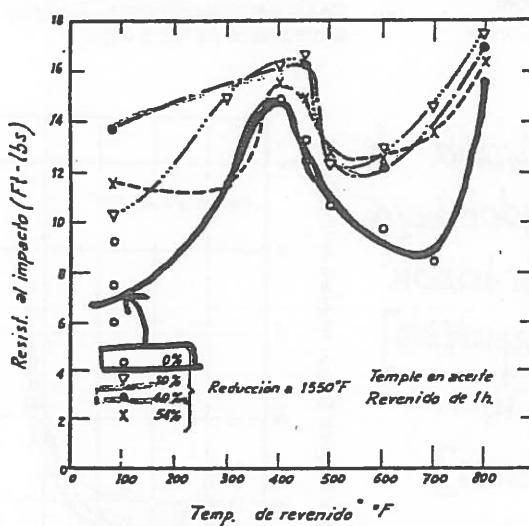


Fig. I-18.—Variación de la resistencia al impacto con la temperatura de revenido en el acero AISI-4340 con varios porcentajes de reducción a 1.550°F (32).

Modificación de la "bañera" por la desformación de la austenita.

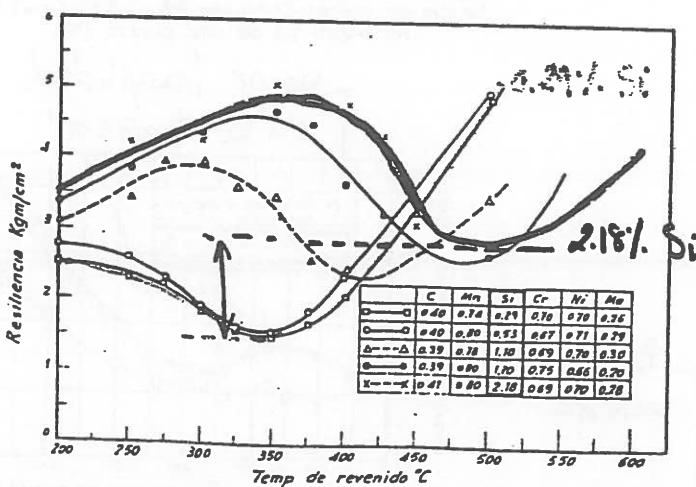


Fig. I-22.—Variación del mínimo de resiliencia al aumentar el silicio en un acero Cr-Ni-Mo (Poggio).

EFFECTO DE ANADIR Si

mitiga (reduce) de resiliencia + grande) y retrasa (se produce a T mayor) el fenómeno de fragilidad.

elementos puros colados en vacío. Se obtienen entonces aceros de muy alta resistencia y alta tenacidad, como los empleados en la fabricación de frenos de aterrizaje.
(Tiene aplicaciones limitadas, pues son muy caros de obtener!)

- Realizar revenidos con calentamientos por inducción, de forma que tenemos tratamientos cortos que impiden la formación de la película de cementita (no le dan tiempo).
- Deforzar la austenita antes de la formación de la martensita; así se originan muchos subgranos en los que precipitarán nuevas impurezas.
- Añadir Silicio: mitiga y retrasa el fenómeno pues modifica la cinética de formación de las películas.

O Fragilidad de revenidos (FR)

Es similar a la fragilidad de revenidos bajos y se produce por revenidos entre 375 y 575°C con tiempos de revenido largos.

Para que se produzca, es necesaria la presencia de impurezas, como P, ^{antimónico}Sb, Sn o ^{arsénico}As, que provocan segregaciones en los bordes de los antiguos granos austeníticos.

Algunos elementos de aleación interaccian con este proceso, de dos formas diferentes:

- Acelerándolo, como las combinaciones Mn-Si ó Cr-Ni, pero sobre todo el Mn \Rightarrow el Si es buena adición para evitar la fragilidad de revestidos bajos, pero no para los demás revestidos!
- Retrasándolo, como hace el Mo, que forma agrupaciones de átomos de Mo-P que dificulta que el P llegue al borde de grano.

Para evitar o mitigar este fenómeno, podemos recurrir a:

- Eufriar rápidamente tras revestidos a $T > 575^{\circ}\text{C}$
- Añadir Mo (indico en cantidades inferiores a 0,15% su efecto es importante)
- Rebajar el contenido de Si, pero sobre todo de Mn.

• Otras causas de fragilidad

- Fragilidad por hidrógeno

El acero puede contener hidrógeno de su obtención, cogerlo del ambiente o adquirirlo en procesos como recubrirlo con electrolíticos o limpieza con dardos; se desplaza al borde de grano, acelerando la propagación de grietas intergranulares y provocando roturas retardadas.

El efecto del hidrógeno adquirido puede eliminarse, o al menos minorarse, por permeación prolongada

AGILIDAD DE EVENIDOS (FR.)

11/163

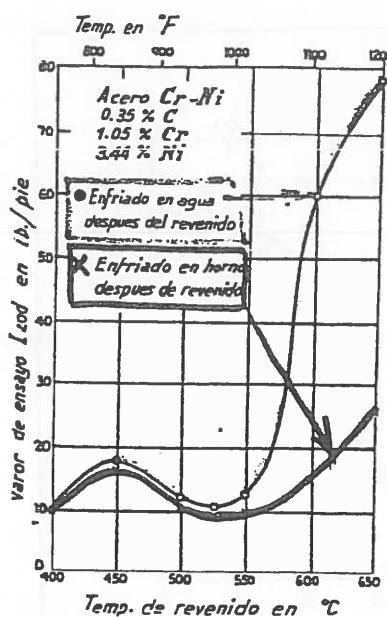
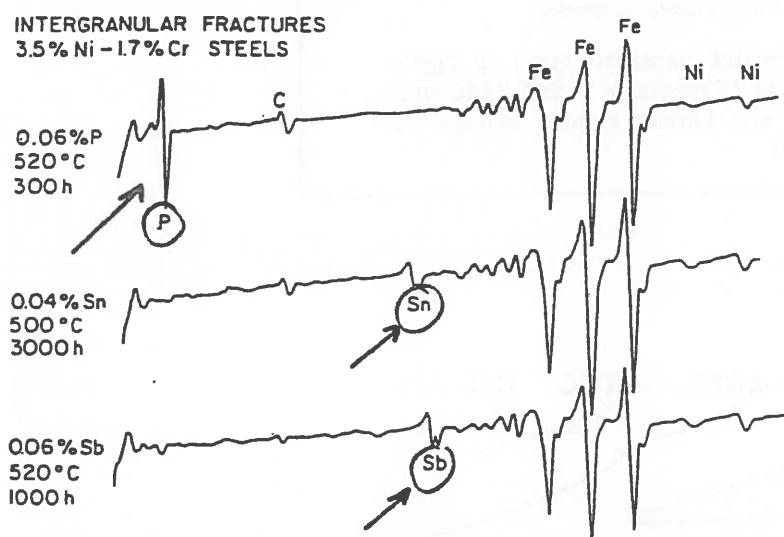


Fig. 76.—Influencia de la velocidad de enfriamiento en la fragilidad de revenido. (Crafts y Lamont).

INTERGRANULAR FRACTURES 3.5% Ni - 1.7% Cr STEELS



Examples of Auger spectra from intergranular fractures of three Ni-Cr steels doped with phosphorus, tin, and antimony, respectively.

Espectros sobre fracturas: nulos el efecto de las inclusiones.

Diagrama TTT de esta transformación

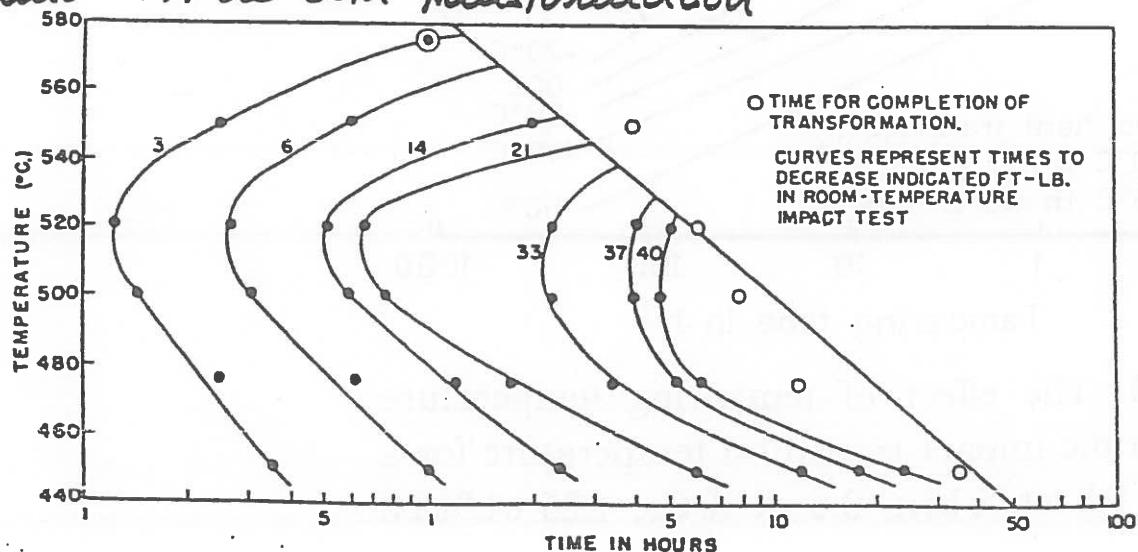


FIG. 137. Time-temperature-transformation diagram for temper-brittleness precipitation. After Hollomon (134).

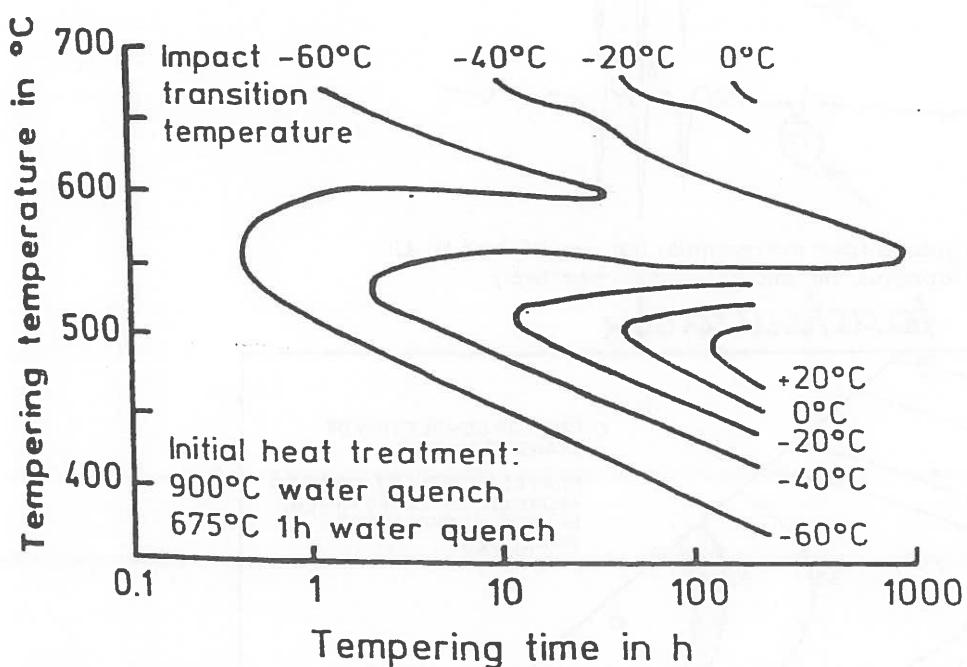
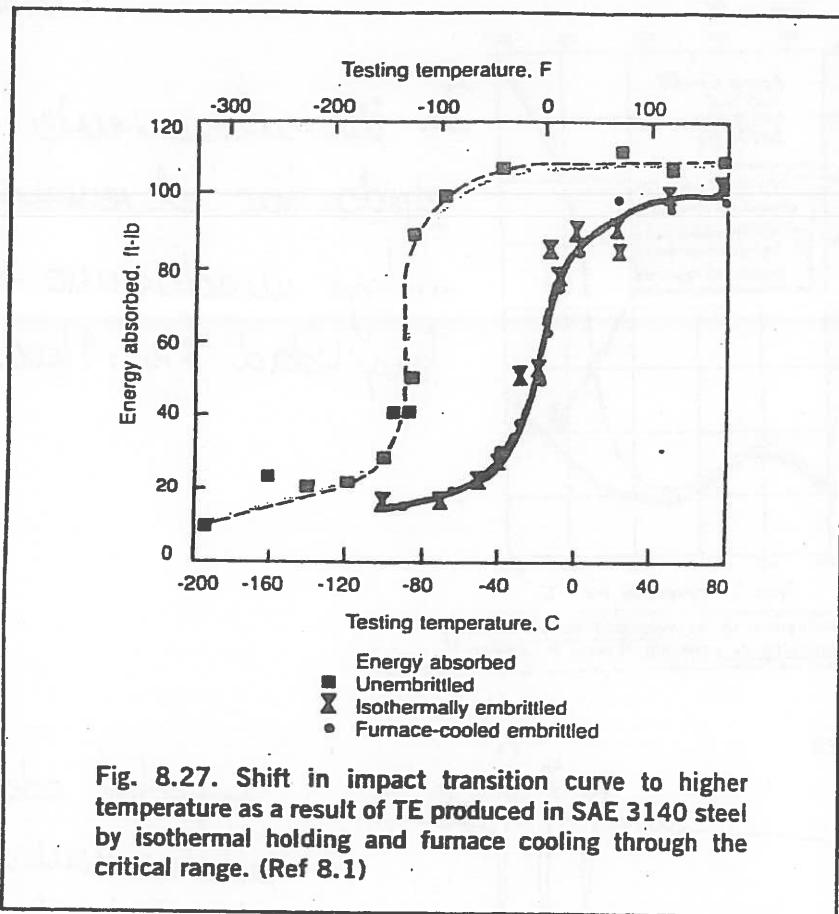


Figure 10-21. The effect of tempering temperature and time on the impact transition temperature for a 0.4 wt.% C, 0.8 wt.% Mn, 0.6 wt.% Cr, 1.25 wt.% Ni steel.

a 150° (denominado 'baking'), que debe realizarse inmediatamente tras el proceso.

- Fragilidad por metal líquido

para ello son necesarios tres factores:

- contacto con metal líquido (Pb, Sn, Zn, Al, Cd, Li)
- solicitudes de tensión
- Temperaturas entre 200 y 500°C

Se debe a inclusiones de metales que funden a una temperatura no muy alta: se dilatan, aumentan tensiones, ...
Son susceptibles los aceros con Pb para fácil mecanización.

- Fragilidad por nitruro de aluminio

El nitruro de aluminio vienen que se empleaba como estimulante de grano, pero si se produce su precipitación en los bordes de los antiguos granos de austenita (por exceso), se presenta este tipo de fragilidad.

Se presenta sobre todo en aceros moldeados, aunque también en aceros forjados con mucho exceso de NAl.

- Fragilidad por sobrecaleamiento en forja

Una temperatura alta de forja disuelve las inclusiones de SMn que precipitan, al enfriar, en el borde de grano (que ademas es blando), provocando fragilidad tras temprado y revenido.

Se mitiga con elementos fumadores de sulfatos como el carbonato o tierras raras. También puede evitarse un exceso de Mn que estabilice el SMn, pero origina después fragilidad de revenidos.

• Efecto del tamaño de la pieza

Si templamos una barra con un diámetro superior al diámetro crítico, obtendremos en la superficie una estructura totalmente martensítica (temple completo) pero pero parcialmente martensítica en el interior (temple incompleto) originando una curva U de dureza (muy mayor en la superficie que en el interior).

Durante el revenido, se ablanda más la martensita que la mezcla con otros constituyentes: cuanto más dureza tengo en el temple más dureza pierdo en el revenido! Por ello, el revenido tiene un efecto igualador: la diferencia de durezas entre superficie y interior después del revenido es menor que la diferencia después de templar.

Este efecto se pone de manifiesto en las curvas Jouiny. Si nos fijamos en la fig 80; la diferencia entre el extremo templado y no templado en dureza es $60 - 10 = 20$ Rockwell C, mientras que en el revenido a 650° , la misma diferencia es sólo de 6 Rockwell C!

OTRAS CAUSAS DE FRAGILIDAD

11/16/5

agitación por
hidrógeno.
minimizar el
efecto con el
baking?

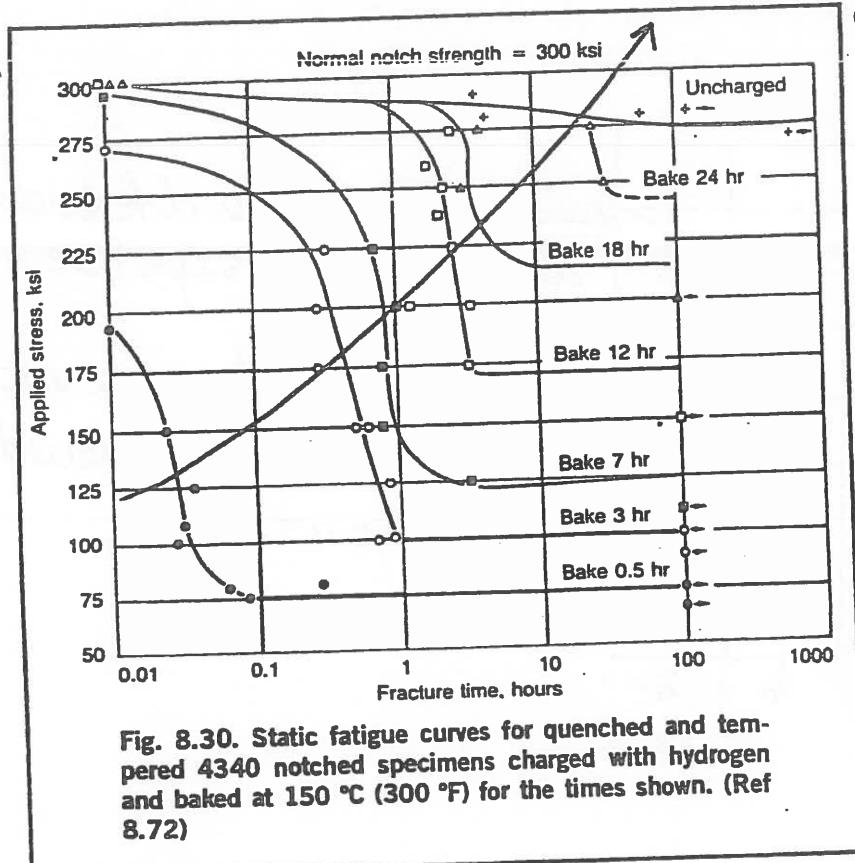


Fig. 8.30. Static fatigue curves for quenched and tempered 4340 notched specimens charged with hydrogen and baked at 150 °C (300 °F) for the times shown. (Ref 8.72)

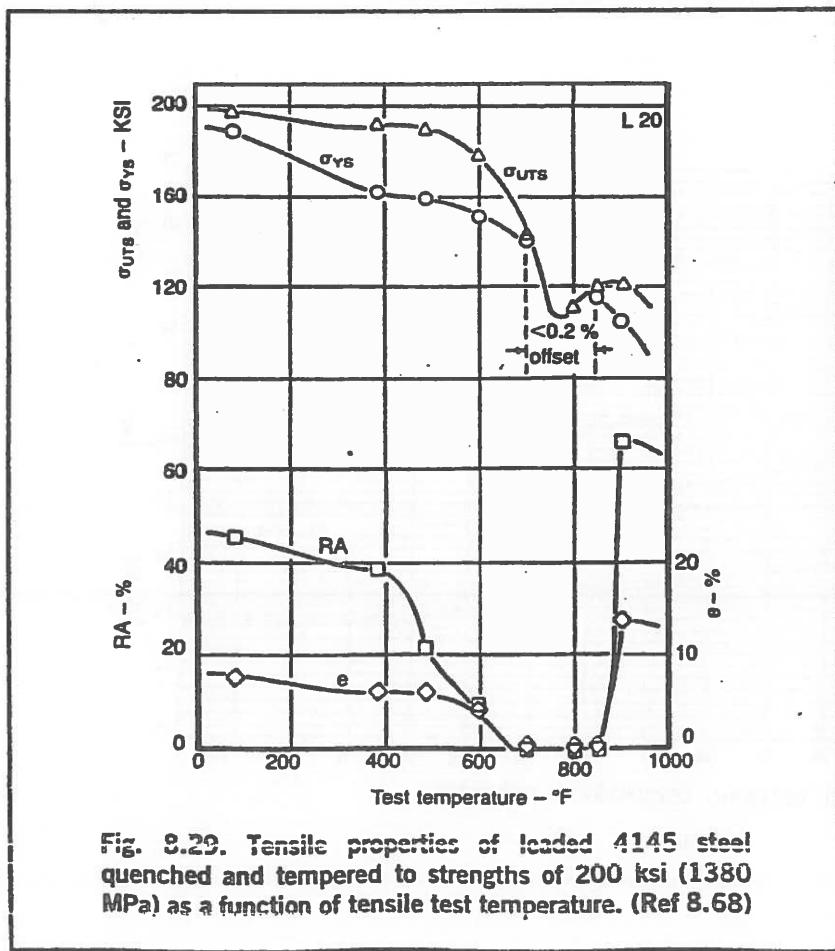


Fig. 8.29. Tensile properties of loaded 4145 steel quenched and tempered to strengths of 200 ksi (1380 MPa) as a function of tensile test temperature. (Ref 8.68)

EFFECTO DEL TAMAÑO DE LA PIEZA

Efecto igualador
revenido

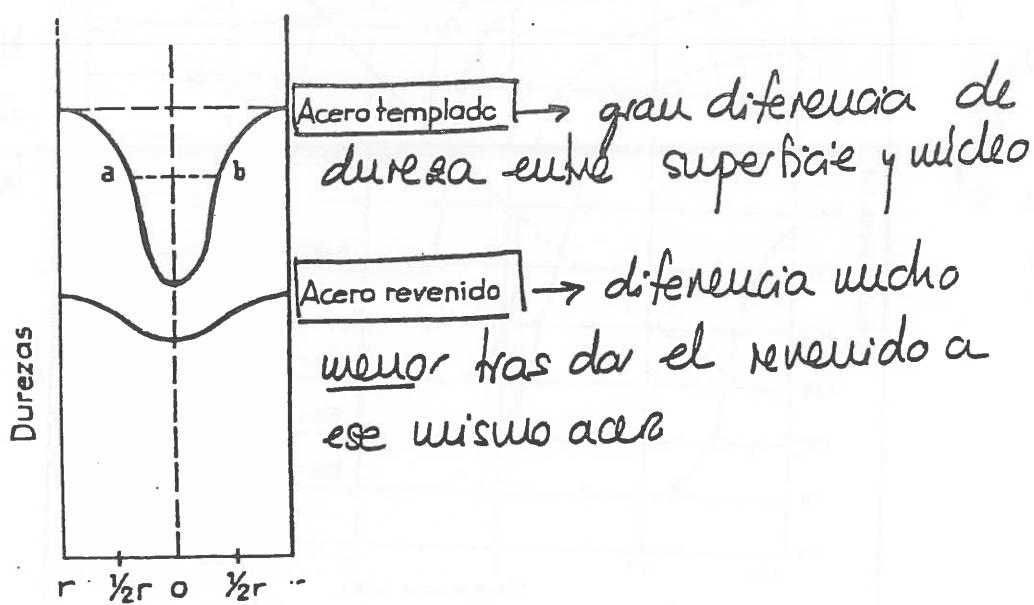


Fig. 79.

Efecto igualador del revenido en las curvas Jominy:

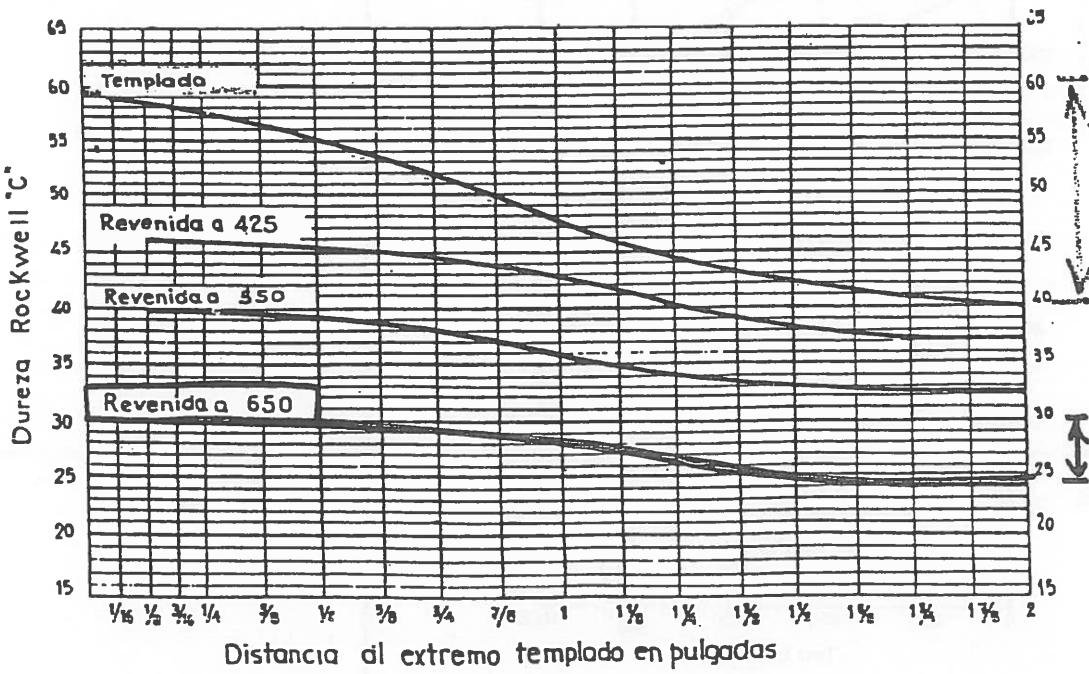


Fig. 80.

• Efecto del tiempo de revenido

Las transformaciones del revenido son transformaciones térmicas, por difusión, por lo que el tiempo influye en su evolución y, por lo tanto, en el ablandamiento que produce. Una misma dureza puede obtenerse con diferentes combinaciones de temperatura y tiempo; Hollomon y Tait dieron el parámetro que resume el efecto combinado de temperatura y tiempo:

$$\boxed{T \cdot (C + \log t)} \quad \left\{ \begin{array}{l} T: \text{temperatura en } ^\circ\text{C} \\ C: \text{constante } \approx 20 \\ t: \text{tiempo en horas} \end{array} \right.$$

Esta expresión es análoga a la que vimos en fluencia para el parámetro de Larson-Miller: aunque parezca que no tiene nada que ver una cosa con la otra, si tienen algo en común: son fenómenos regidos por la difusión. Podemos hacer entonces la misma aplicación del parámetro que vimos: con las mismas aplicaciones del parámetro que vimos, p.e., dos revenidos diferentes (en temperatura y tiempo) que dan el mismo valor del parámetro, producirán el mismo ablandamiento.

Vemos en la figura 5-32 el efecto del tiempo de revenido en la dureza para diferentes temperaturas. Por ejemplo, a 200°C , y en una escala logarítmica de tiempo, vemos que la influencia es pequeña, y

prácticamente lineal. Sin embargo, a 600°C , los primeros minutos son mucho más efectivos, llegando luego a la misma variación lineal. A esa temperatura, por ejemplo, en una hora hemos conseguido un buen efecto, y aumentar más el tiempo no me supone ganar mucho.

• Efecto de elementos de aleación

El contenido en carbono del acero marca la dureza del templete (dureza martensítica) e influye en el comportamiento del revestido: cuanto más carbono tenga, más dureza pierde.

Los elementos de aleación aumentan la dureza de la estructura de precipitado por disolverse en la ferrita o formar carburos, y retrasan el abblandamiento producido por el revestido.

Algunos elementos, como el Mn, Ni, Si, tienen un efecto similar a todas las temperaturas, como se aprecia en la fig 5-34 (aumenta el contenido del aleante y se retrasa el abblandamiento en el revestido), pero los elementos formadores de carburos, como el Cr, Mo, W, V, tienen un efecto más acusado en el margen de temperaturas en el que se forman los carburos especiales, representativo de la dureza secundaria. (Fig 5-35)

M/167

EFFECTO DEL TIEMPO DE REVENEDO.

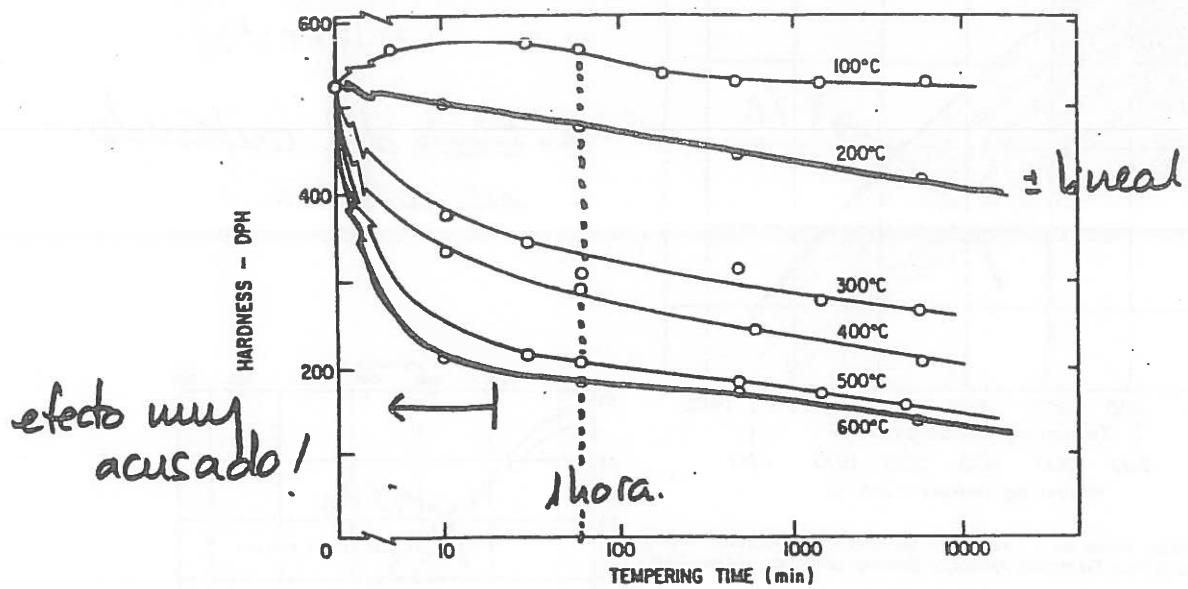


Fig. 5-32 Tempering curves for a 0.18% C steel. (From G.R. Speich, Trans. AIME, Vol 245, p 2553)

Efecto combinado de T_y t.

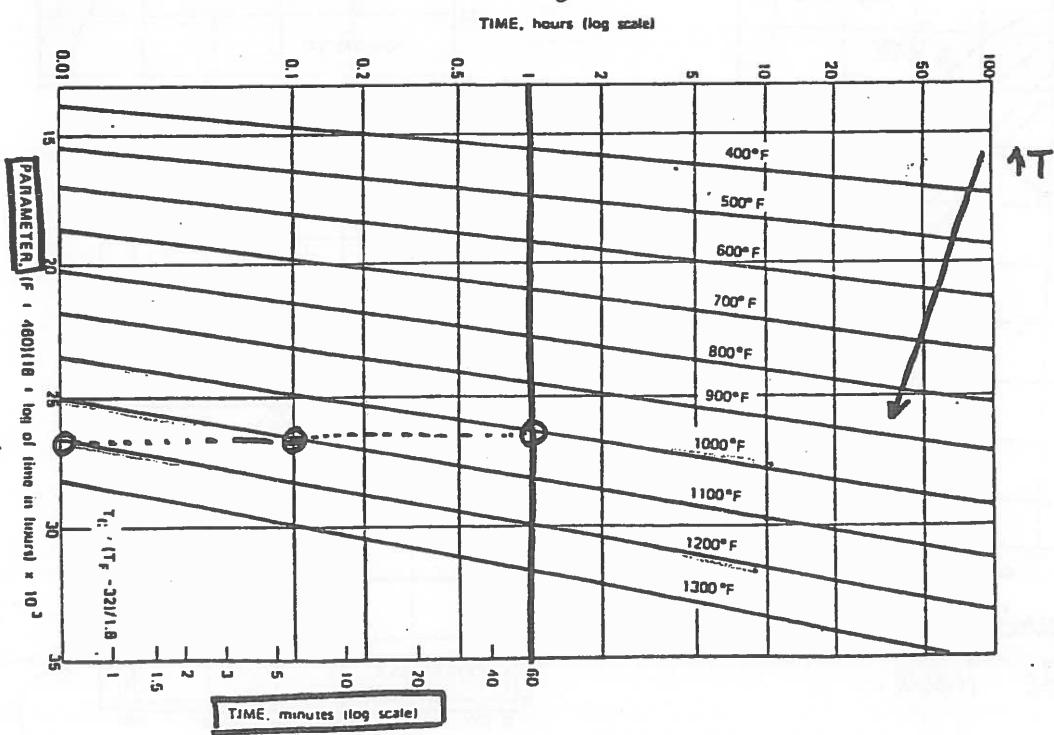
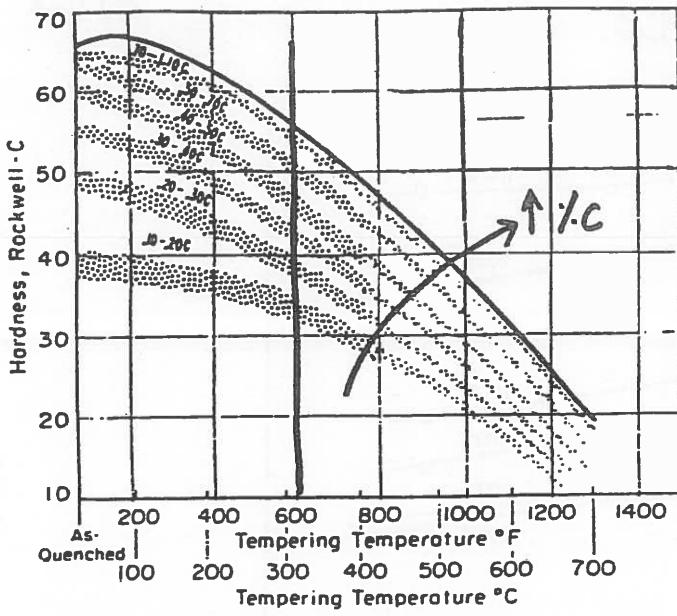
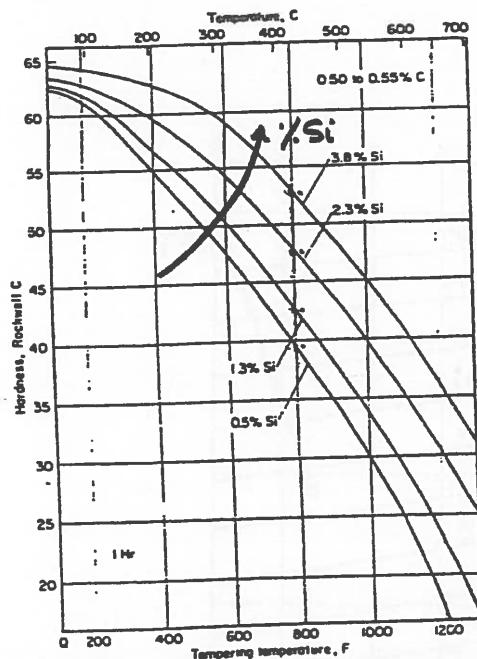


Fig. 5-45 Chart showing relationship of tempering parameter to tempering temperature and time. (From R.A. Grange, C.R. Hribal, and L.F. Porter, Met. Trans., Vol 8A, p 1775 (1977))



L 5-3 Hardness of plain carbon steels as a function of tempering temperature. (Adapted from E.C. Bain, *Principles of Heat Treatment*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1961.)

Mn, Si, Ni → similar efecto a cualquier temperatura.



A medida más alto d que más % aleante tiene.

INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALIAGACIÓN

← Efecto del carbonido en carburo.

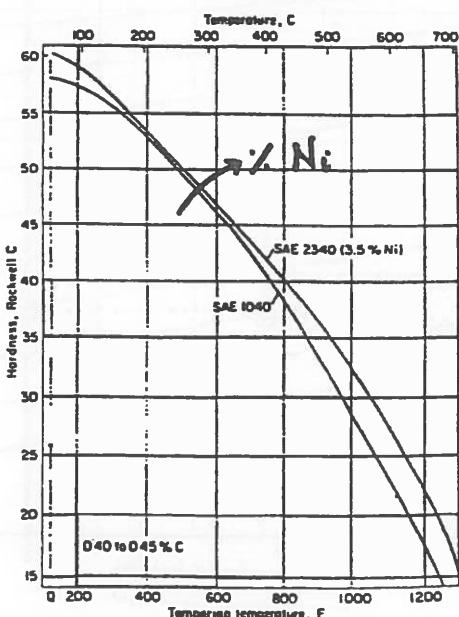
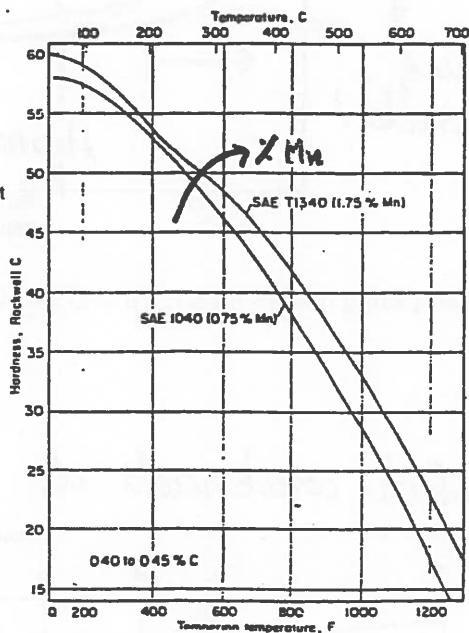


Fig. 5-34 Tempering curves of some alloy steels compare to those of plain carbon steels of the same carbon content. (a) Quenched 0.50 to 0.55% C steel as influenced by silicon content. (b) Quenched 0.40 to 0.45% C steels as influenced by about 3.5% Ni. (c) Quenched 0.40 to 0.45% C steels as influenced by an increase of manganese from about 0.75 to 1.75%. (From E.C. Bain and H.W. Paxton, *Alloying Elements in Steel*, 2nd ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio (1961))

Vemos que, p.e., el efecto del Ni no es muy grande; aunque siendo un 3.5% no aumenta demasiado la dureza.

↪ elementos gamiágens: mismo efecto a
cualquier temperatura

elementos alfaágens: comportamiento diferente
según T: se produciría dureza secundaria o no

Holloman y Jaffe definieron el parámetro H_c (dureza
característica) representativo del comportamiento del acero
en el senoido, de su fenduría a ablandarse. Esta
fenduría depende, como hemos visto, de los contenidos
en carbono y de los elementos de alación.

$$H_c = A + \sum a_i x_i$$

$$A = \text{cte}$$

$a_i = \text{cte}$ para elementos gamiágens

$a_i = f(T)$ para elementos alfaágens, Cr, Mo, W, V, ...

$x_i = \%$ alante

$$H_A = B \cdot T (C + \log t) \rightarrow \text{dureza de ablandamiento}$$

↪ $H_R = H_c - H_A$ = dureza obtenida en el senoido

De esta forma obtenemos una cifra representativa
del comportamiento del acero en el senoido y, además,
volvemos a lo de siempre: no une importa cómo
lo consigo, t, T, % alantes... sino lo que consigo

"No me importa que el gato sea blanco o negro
mientras caee ratones"

Existen otros métodos para calcular durezas de temple,
induso para temple no completamente morteñicos.

11/16/9

Efecto de elementos formadores de carburos
 $(Cr, Mo, W, V) \rightarrow$ dureza secundaria a determinadas T.

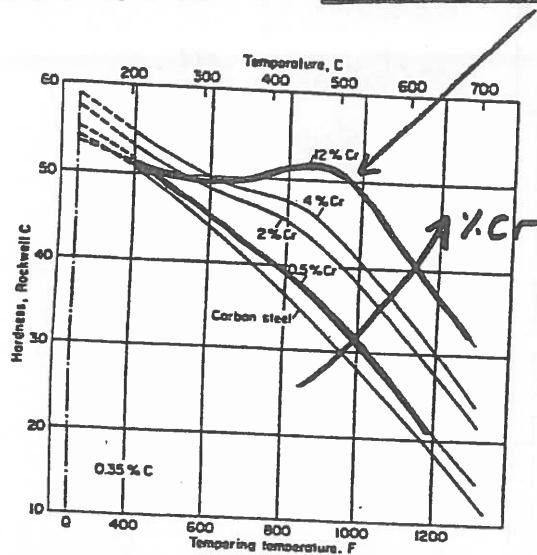
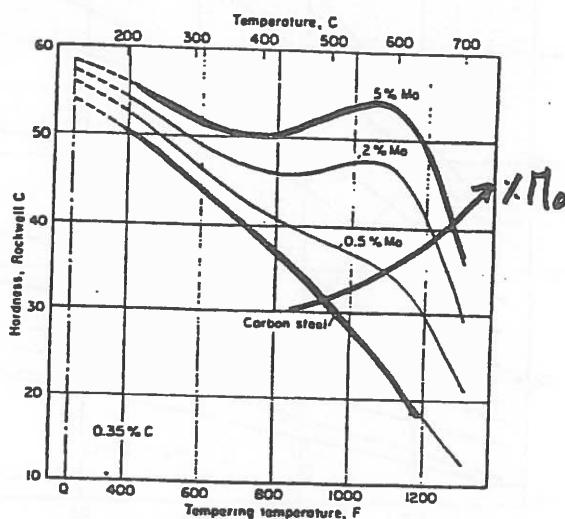
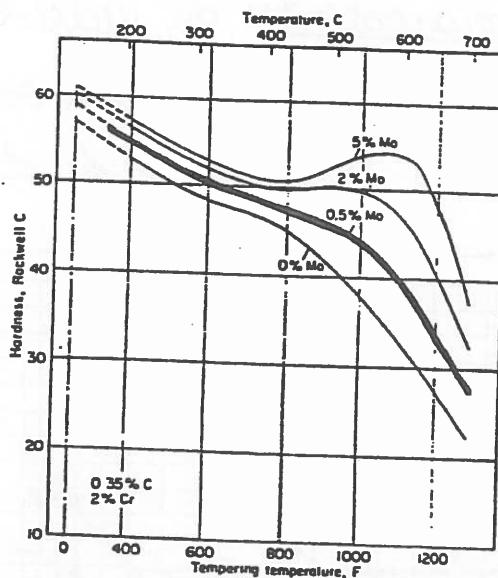


Fig. 5-35 Tempering curves for Cr steels containing 0.35% C, showing secondary hardening. (From same source as Fig. 5-34)



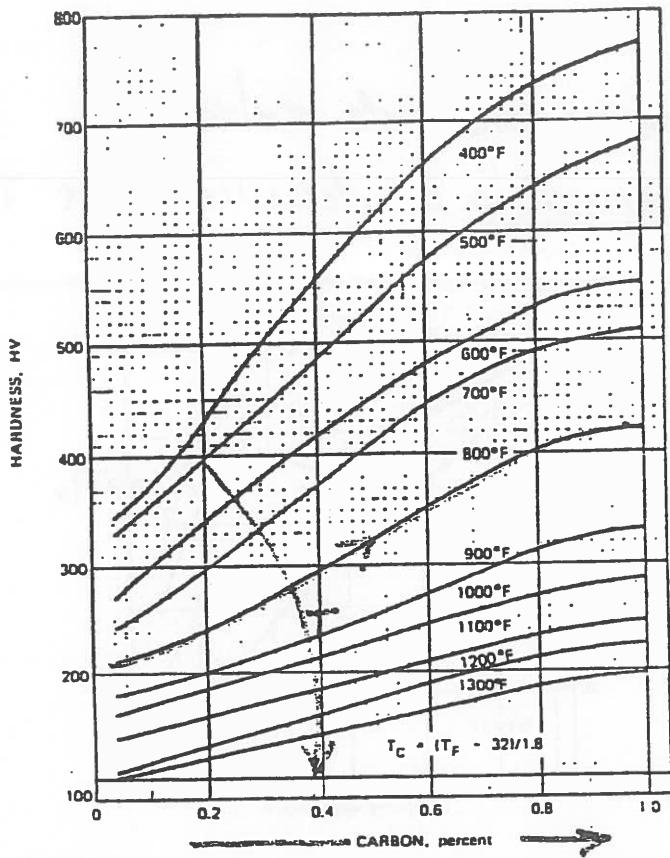
(a)

$Cr - Mo$: pico de dureza secundaria a diferente temperatura, pero con un comportamiento análogo.



(b)

Fig. 5-36 Tempering curves for (a) Mo steels and (b) Mo-Cr steels, showing secondary hardening. (From same source as Fig. 5-34)



Efecto combinado
de temperatura y
contenido en
carbono en
la dureza del
acero.

Fig. 5-42 Base tempering curves (one hour tempering time) from the data in Fig. 5-41. (From R.A. Grange, C.R. Hribal, and L.F. Porter, Met. Trans., Vol 8A, p 1775 (1977))

podemos calcular la dureza del revenido de un acero en
función de su composición sin necesidad de ensayos!

Efecto de los aleantes en la dureza: un % de uno
de ellos produce un incremento de dureza de tanto.

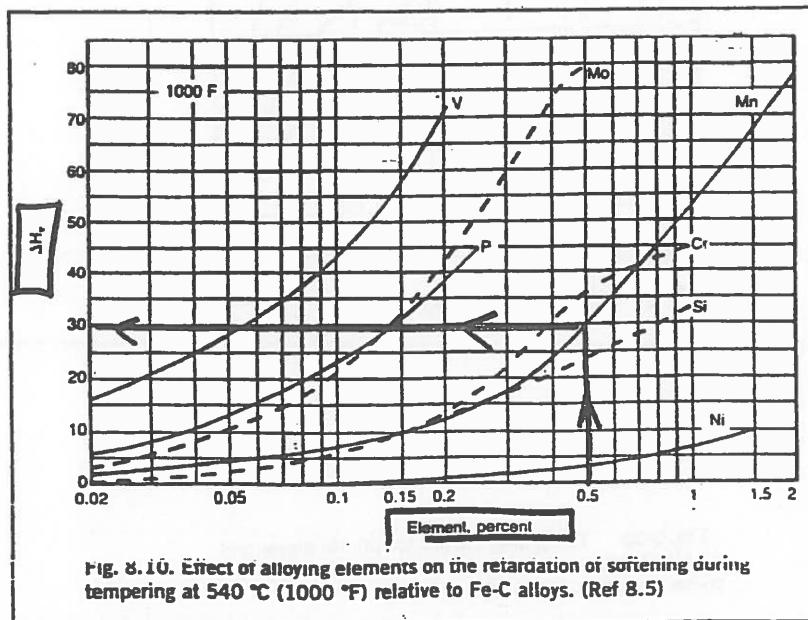


Fig. 8.10. Effect of alloying elements on the retardation of softening during tempering at 540 °C (1000 °F) relative to Fe-C alloys. (Ref 8.5)