

ÍNDICE

10.1. El tiempo: la tercera dimensión

10.2. El diagrama TTT

Transformaciones con difusión

Transformaciones sin difusión (martensíticas)

Tratamiento térmico del acero

10.3. Templabilidad

10.4. Endurecimiento por precipitación

10.5. Recocido

Acritud

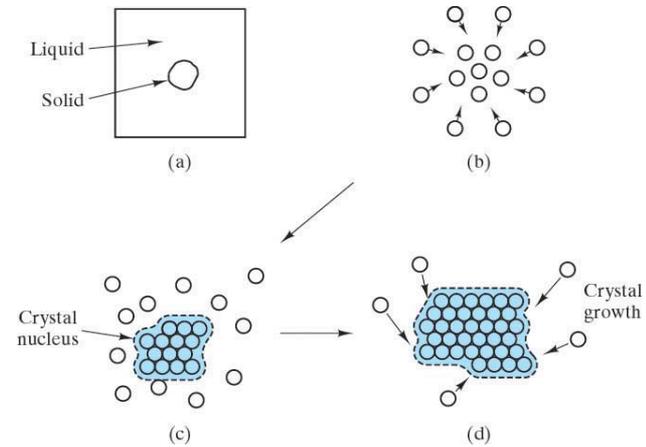
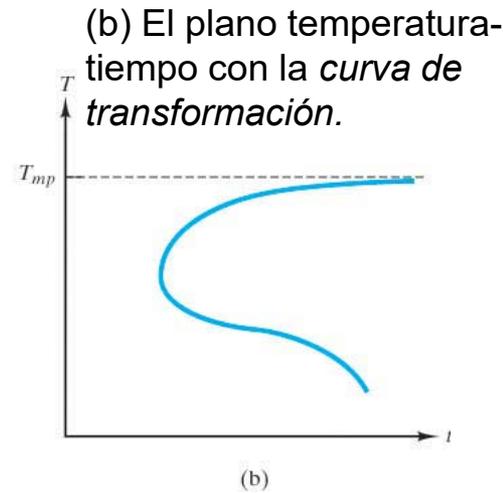
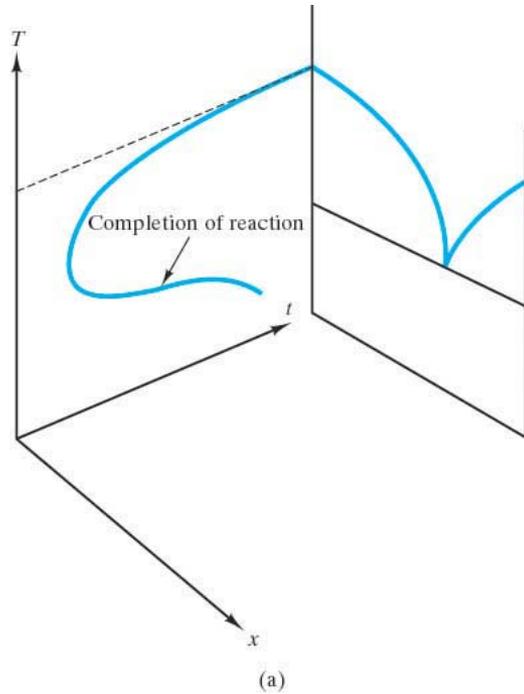
Restauración

Recristalización

Crecimiento de grano

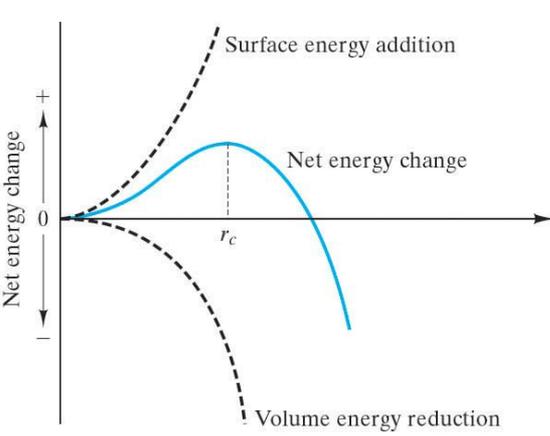
10.6. Cinética de las transformaciones de fase de los no metales

10.1- El tiempo: la tercera dimensión

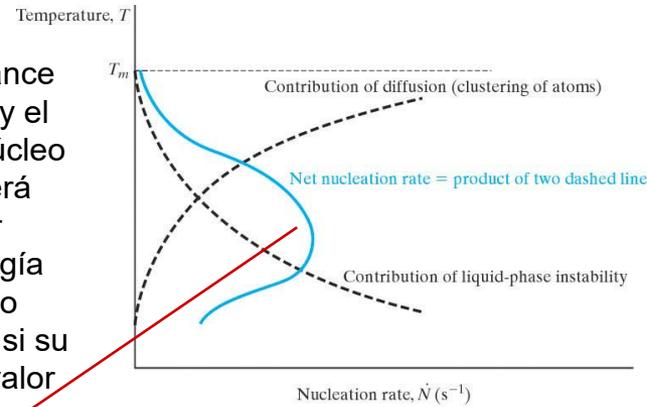


(a) A escala microscópica, un precipitado sólido en el seno de una matriz líquida. El proceso de precipitación se ve a escala atómica como (b) un agrupamiento de átomos adyacentes para formar (c) un núcleo cristalino seguido por (d) el crecimiento de la fase cristalina.

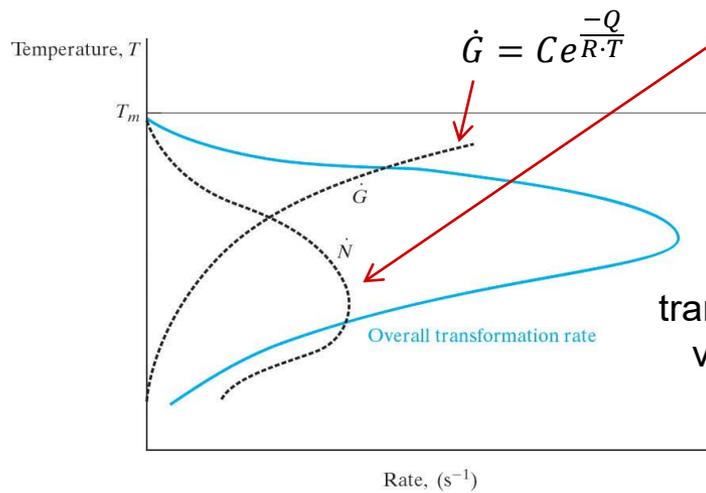
10.1- El tiempo: la tercera dimensión



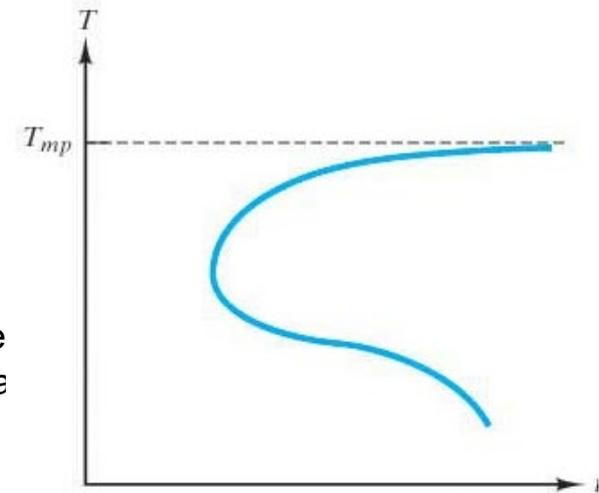
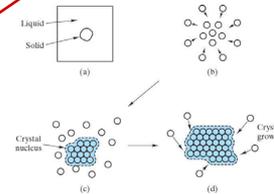
La teoría clásica de la nucleación supone un balance energético entre el núcleo y el líquido que lo rodea. Un núcleo (agrupación de átomos) será estable sólo si su posterior crecimiento reduce la energía neta del sistema. Un núcleo ideal esférico será estable si su radio, r , es mayor que un valor crítico, r_c .



La velocidad de nucleación es el producto de dos factores opuestos (inestabilidad y difusividad).



La velocidad total de transformación es el producto de velocidad de nucleación, \dot{N} y la velocidad de crecimiento, \dot{G}



(b)

10.2- El diagrama TTT.

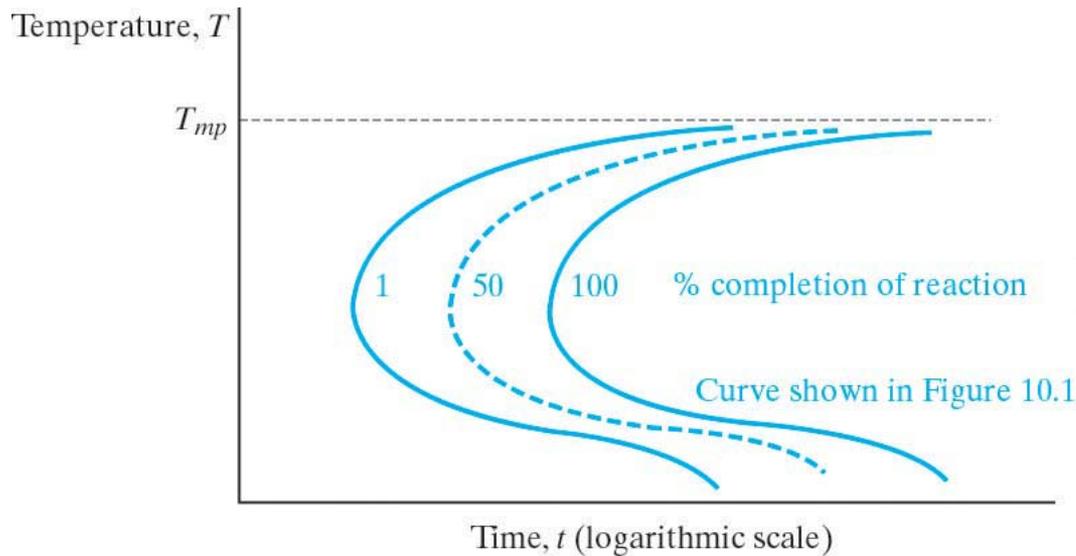


Diagrama **tiempo-temperatura-transformación (TTT)** para la reacción de solidificación, que muestra varias curvas correspondientes a distintos porcentajes de transformación.

Diagrama de transformaciones isotérmicas, las transformaciones están gobernadas por la difusión en estado sólido.

10.2- El diagrama TTT. Transformaciones con difusión

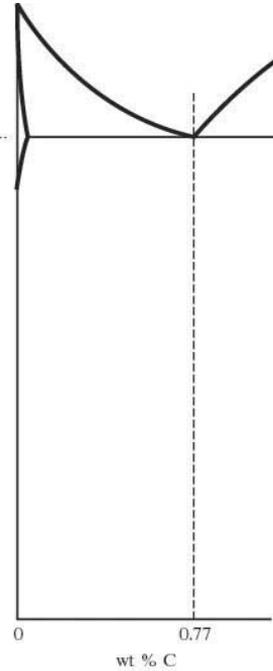
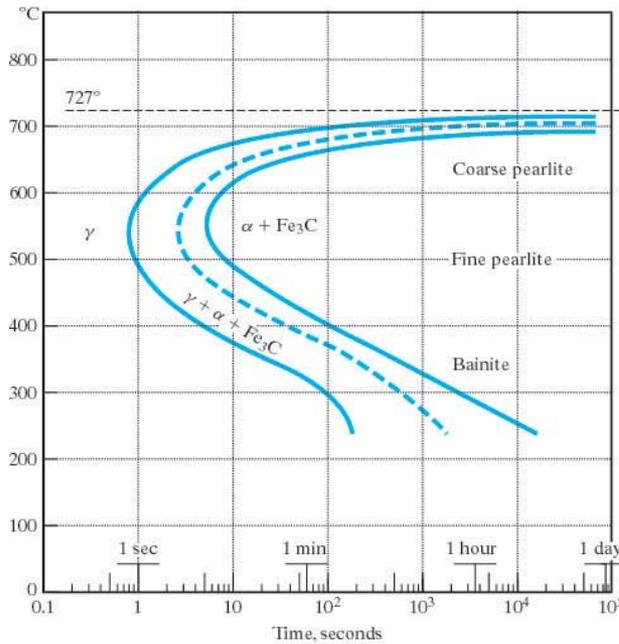
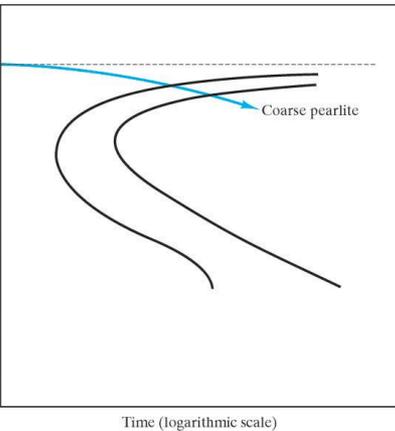
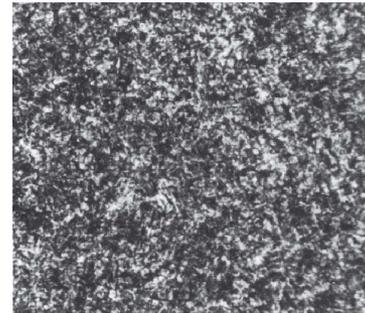


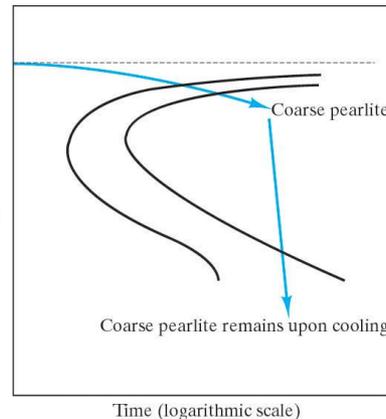
Diagrama TTT para un acero eutectoide en comparación con el diagrama de fases Fe-Fe₃C. Este diagrama muestra que, para ciertas temperaturas de transformación, se forma bainita en lugar de perlita. En general, la microestructura transformada tiene un grano más fino cuanto menor es la temperatura de transformación. La velocidad de nucleación aumenta y la difusividad disminuye al disminuir la temperatura. La curva de trazo continuo de la izquierda representa el inicio de la transformación (~ 1 por ciento de transformación). La curva de trazo discontinuo representa el 50 por ciento de transformación. La curva de trazo continuo de la derecha representa el final efectivo de la transformación (~ 99 por ciento).



Superposición de una secuencia de enfriamiento lento que conduce a la formación de perlita gruesa al diagrama TTT correspondiente al acero eutectoide.



La microestructura de la bainita está asociada a agujas extremadamente finas de Fe- α y Fe₃C, en contraste con la estructura laminar de la perlita



La interpretación de los diagramas TTT requiere la consideración del historial de temperaturas. Por ejemplo, la perlita gruesa, una vez formada, se mantiene estable durante el enfriamiento. Las estructuras de grano más fino son menos estables debido a la energía asociada a la superficie del borde de grano. (Por el contrario, los diagramas de fases representan el equilibrio e identifican las fases estables con independencia del camino seguido para alcanzar un determinado estado.)

10.2- El diagrama TTT. Transformaciones sin difusión (martensíticas)

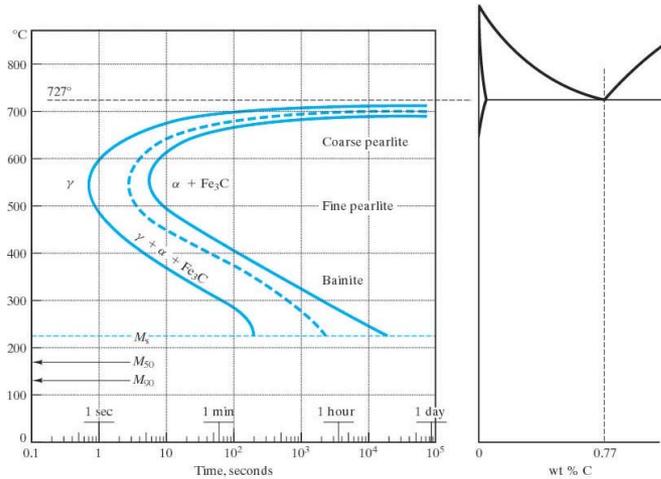
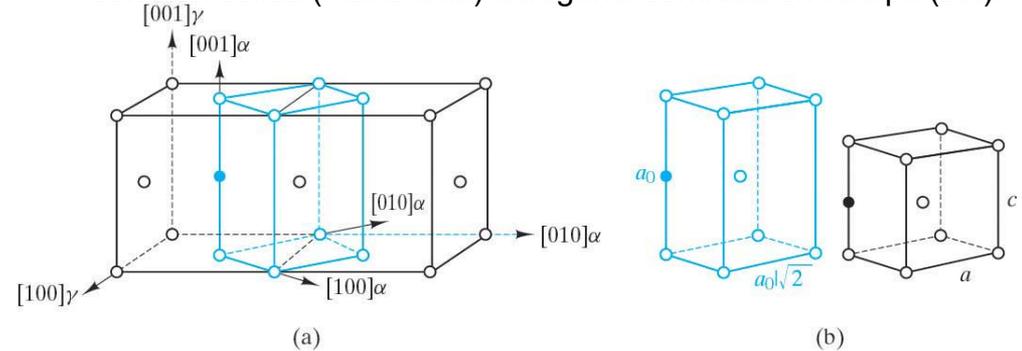


Diagrama TTT para un acero eutectoide. Se muestran distintas etapas de la transformación martensítica, independiente del tiempo (o sin difusión), en forma de líneas horizontales. M_s representa el inicio; M_{50} , el 50 por ciento de la transformación, y M_{90} , el 90 por ciento de la transformación. El cien por cien de martensita no se alcanza hasta llegar a una temperatura final (M_f) de -46°C .

En el caso de los aceros, la transformación martensítica lleva asociada una rápida reorientación de los átomos de C y de Fe desde la solución sólida fcc del Fe-γ (austenita) hasta una solución sólida (martensita) tetragonal centrada en cuerpo (bct).



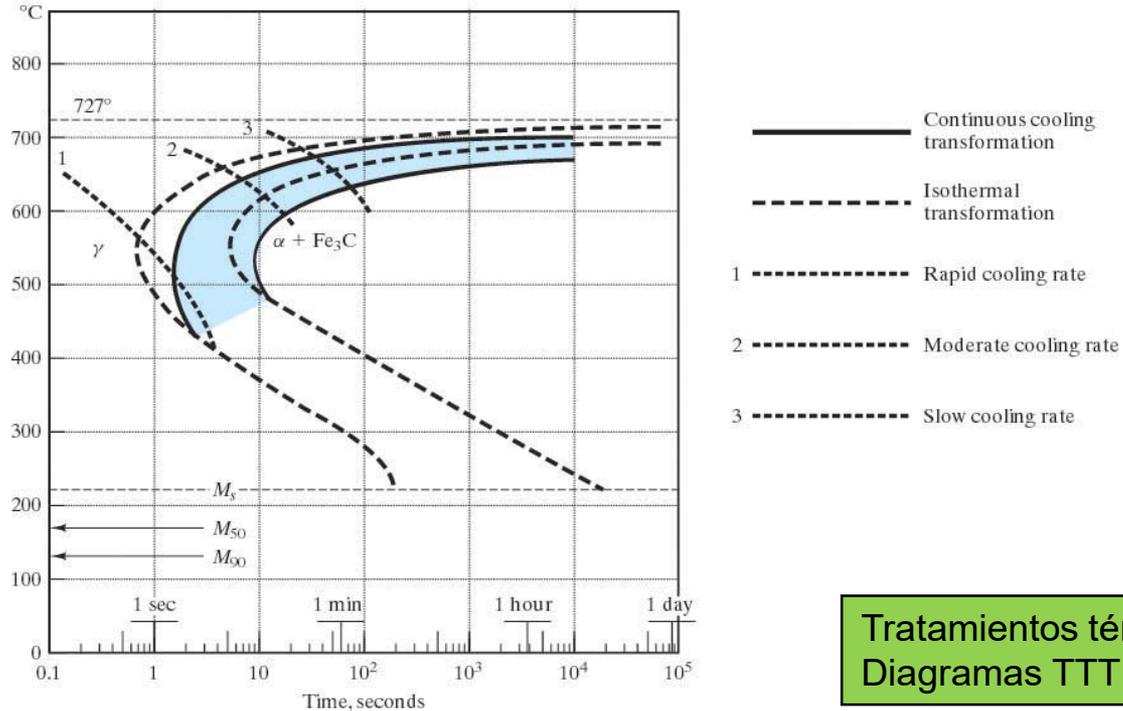
En (a) se muestra la celdilla unitaria bct comparada con la red fcc según los ejes $\langle 100 \rangle_\alpha$.

En (b) se muestra la celdilla unitaria bct después (izquierda) y antes (derecha) de la transformación. Los círculos abiertos representan los átomos de hierro. El círculo sólido representa el átomo de carbono disuelto intersticialmente.



Microestructura acicular o en forma de agujas de la martensita

10.2- El diagrama TTT. Transformaciones sin difusión (martensíticas)



Tratamientos térmicos en aceros.
Diagramas TTT y CCT

Diagrama de transformación de enfriamiento continuo (CCT, *continuous cooling transformation*), superpuesto al diagrama de transformación isoterma. El efecto general del enfriamiento continuo es el desplazamiento de las curvas de transformación hacia abajo y hacia la derecha del diagrama.

10.2- El diagrama TTT. Transformaciones sin difusión (martensíticas)

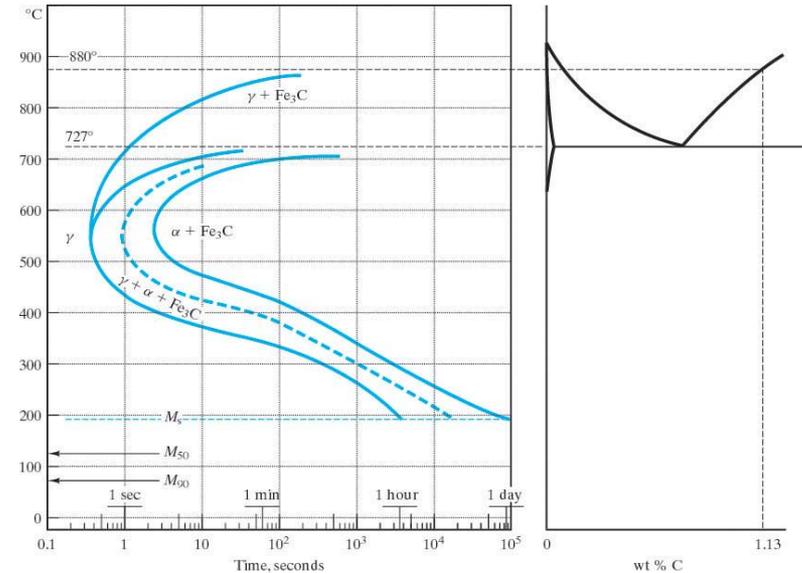
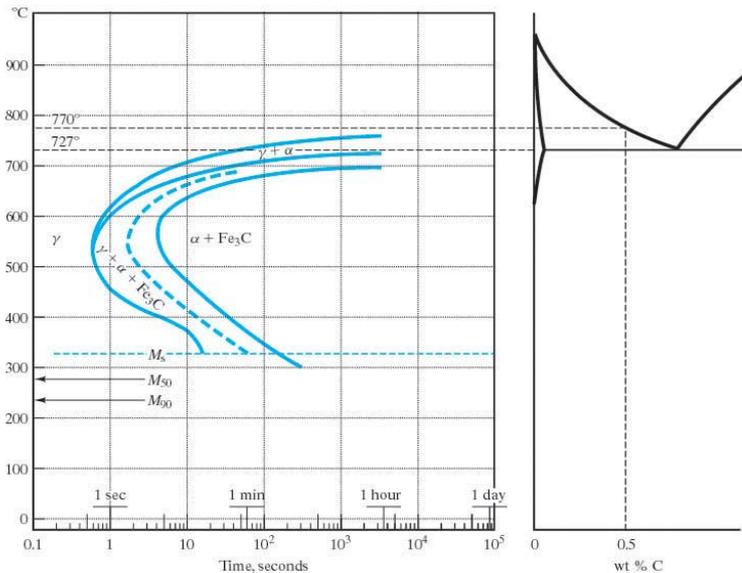
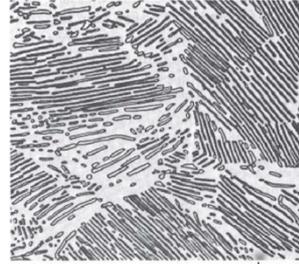
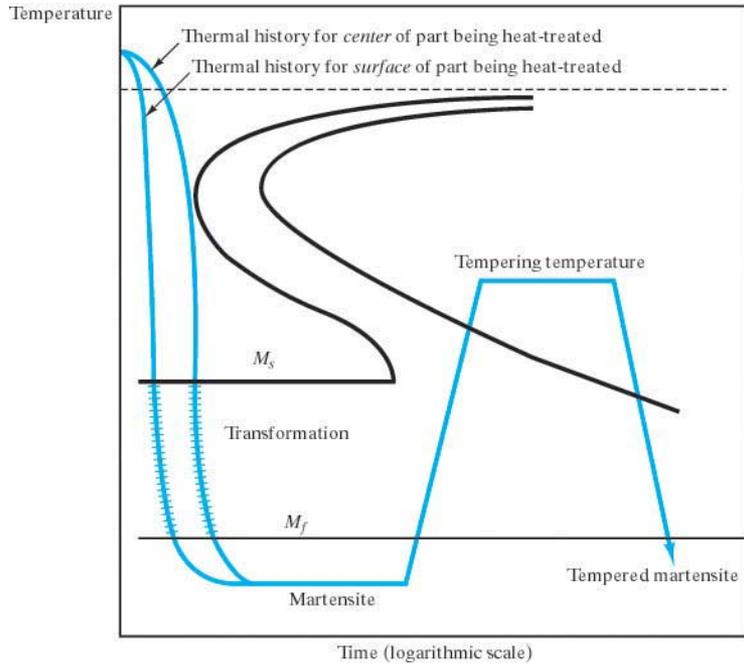


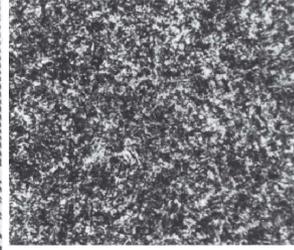
Diagrama TTT para una composición hipoeutectoide (0.5 por ciento en peso de C) comparado con el diagrama de fases Fe-Fe₃C. Comparando las Figuras de los diagramas TTT, se puede observar que la transformación martensítica tiene lugar a temperaturas decrecientes según aumenta en contenido en carbono en las proximidades de la composición eutectoide.

Diagrama TTT para una composición hipereutectoide (1.13 por ciento en peso de C) comparado con el diagrama de fases Fe-Fe₃C.

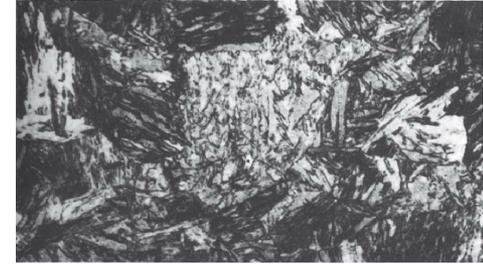
10.2- El diagrama TTT. Tratamiento térmico del acero



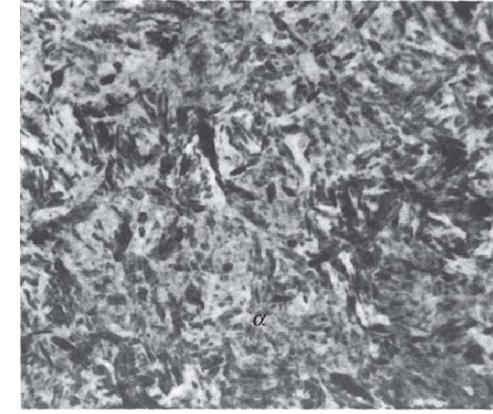
Microestructura correspondiente a la perlita en un acero con 0.8 por ciento en peso de C.



La microestructura de la bainita está asociada a agujas extremadamente finas de Fe- α y Fe_3C , en contraste con la estructura laminar de la perlita



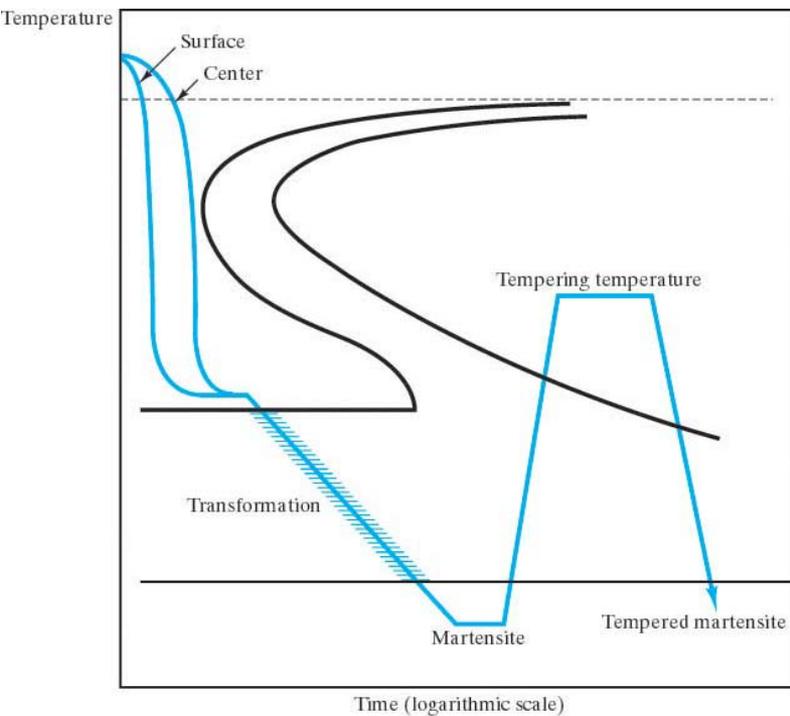
Microestructura acicular o en forma de agujas de la martensita



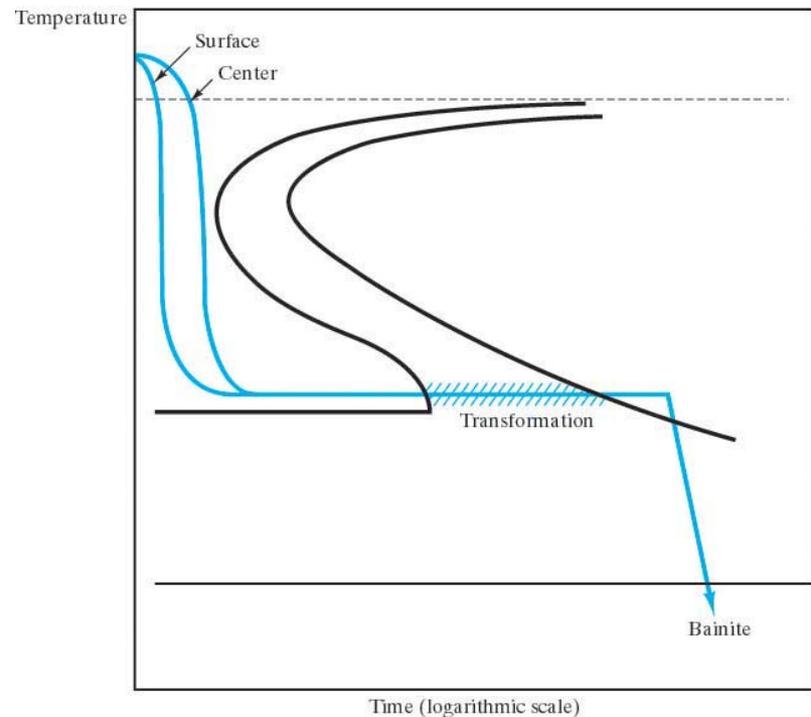
La microestructura de la martensita revenida, aun a pesar de ser una estructura en equilibrio de Fe- α y Fe_3C , difiere de la de la perlita y de la de la bainita.

El revenido se corresponde con un historial térmico [T = f(t)] en el cual la martensita, obtenida mediante el temple de la austenita, se calienta nuevamente. La martensita revenida resultante está formada por las fases de equilibrio, Fe- α y Fe_3C , pero con una microestructura distinta tanto a la de la perlita como a la de la bainita. Debería tenerse en cuenta que el diagrama TTT es, por simplicidad, el correspondiente a un acero eutectoide. En la práctica, el revenido se lleva a cabo generalmente en aceros para los que las reacciones gobernadas por difusión son más lentas, con el fin de realizar temple menos severos.)

10.2- El diagrama TTT. Tratamiento térmico del acero

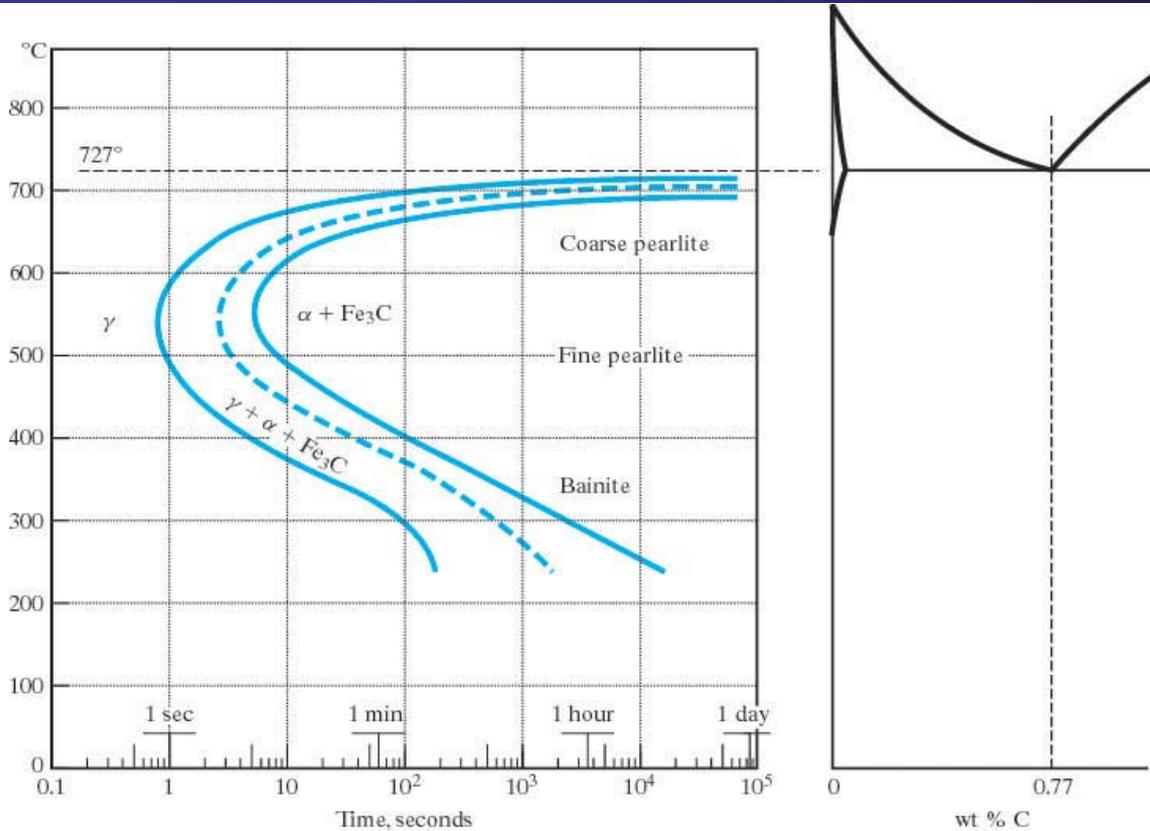


En el martempering, el temple se detiene justo por encima de M_s . El enfriamiento lento a través del intervalo de temperaturas correspondiente a la transformación martensítica reduce las tensiones asociadas al cambio cristalográfico. La etapa de calentamiento final es equivalente al revenido convencional.



Al igual que el martempering, el austempering evita la distorsión y el agrietamiento asociados al temple a través del intervalo de transformación martensítica. En este caso, la aleación se mantiene por encima de M_s durante el tiempo necesario para permitir la transformación completa en bainita.

10.2- El diagrama TTT. Tratamiento térmico del acero



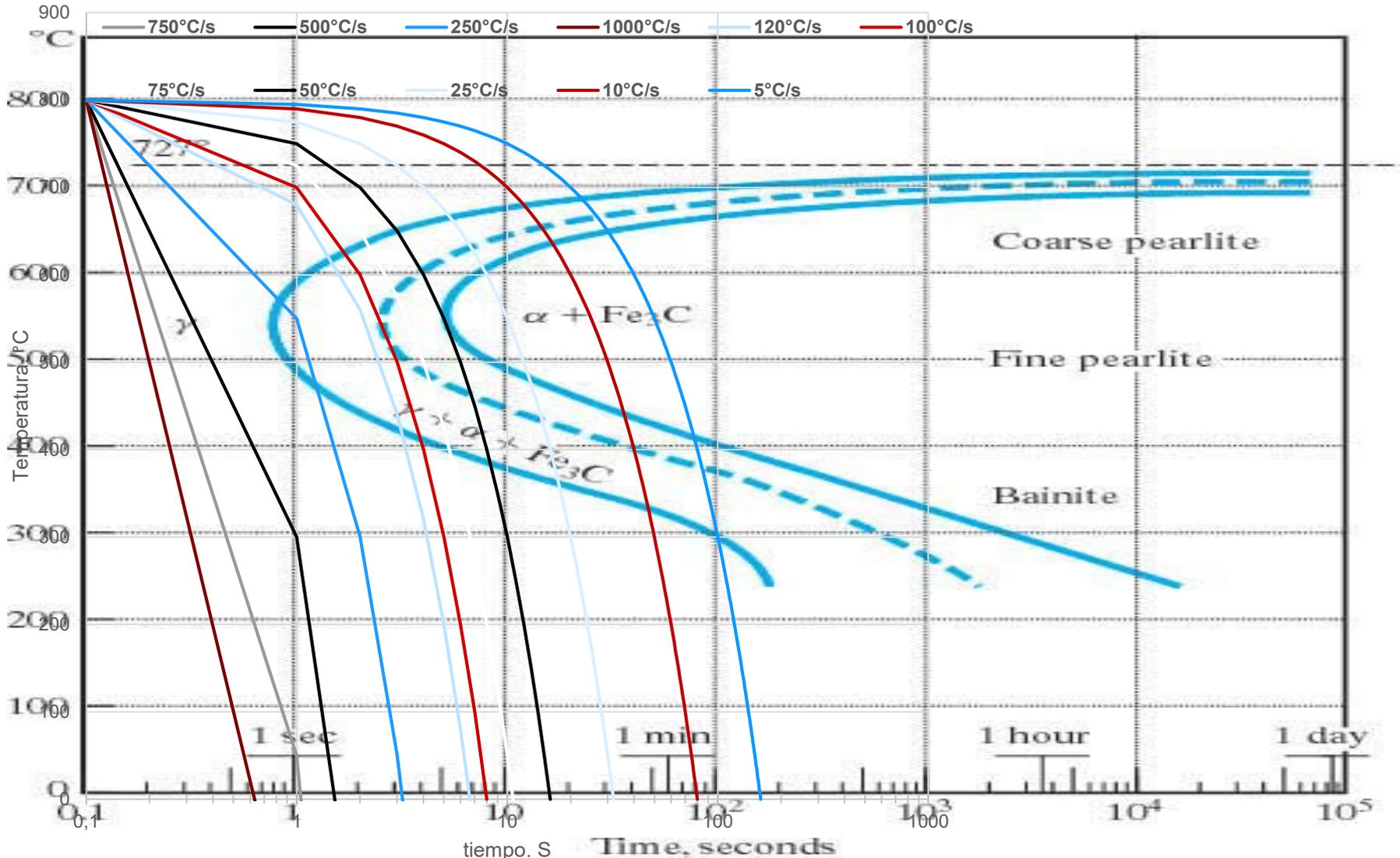
PROBLEMA:

- a) ¿Cuál es el tiempo necesario para que un 50 por ciento de la austenita se transforme en perlita a 600 °C?
- b) ¿Cuál es el tiempo necesario para que un 50 por ciento de la austenita se transforme en bainita a 300 °C?

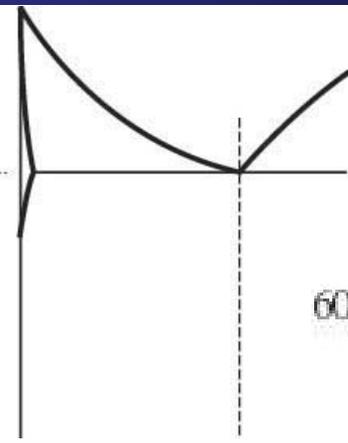
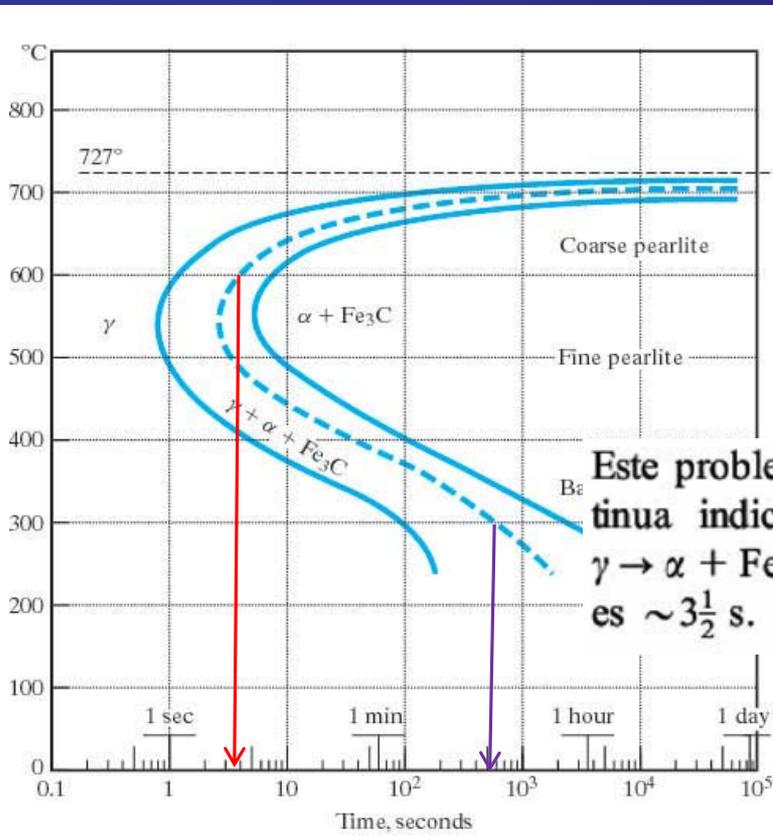
Tratamientos térmicos en aceros. Diagramas enfriamiento TTT problema resuelto. [UDIMA](#)

- c) Calcúlese la microestructura de un acero con 0.77 por ciento en peso de C sometido al siguiente tratamiento térmico: (i) temple instantáneo desde la región γ hasta 500 °C, (ii) mantenimiento a esta temperatura durante 5 s, y (iii) temple instantáneo hasta 250 °C.
- d) ¿Qué ocurriría si se mantuviera la microestructura resultante durante 1 día a 250 °C y posteriormente se enfriara hasta la temperatura ambiente?
- e) ¿Qué ocurriría si la microestructura resultante del apartado (a) se templara directamente hasta la temperatura ambiente?
- f) Realícese un esquema de los distintos tratamientos térmicos.

10.2- El diagrama TTT. Tratamiento térmico del acero

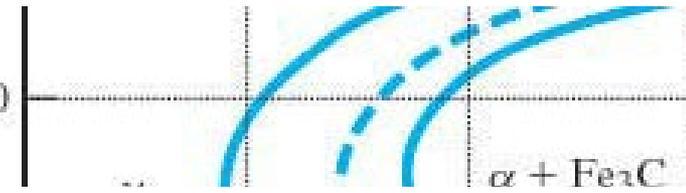


10.2- El diagrama TTT. Tratamiento térmico del acero



PROBLEMA:

a) ¿Cuál es el tiempo necesario para que un 50 por ciento de la austenita se transforme en perlita a 600 °C?



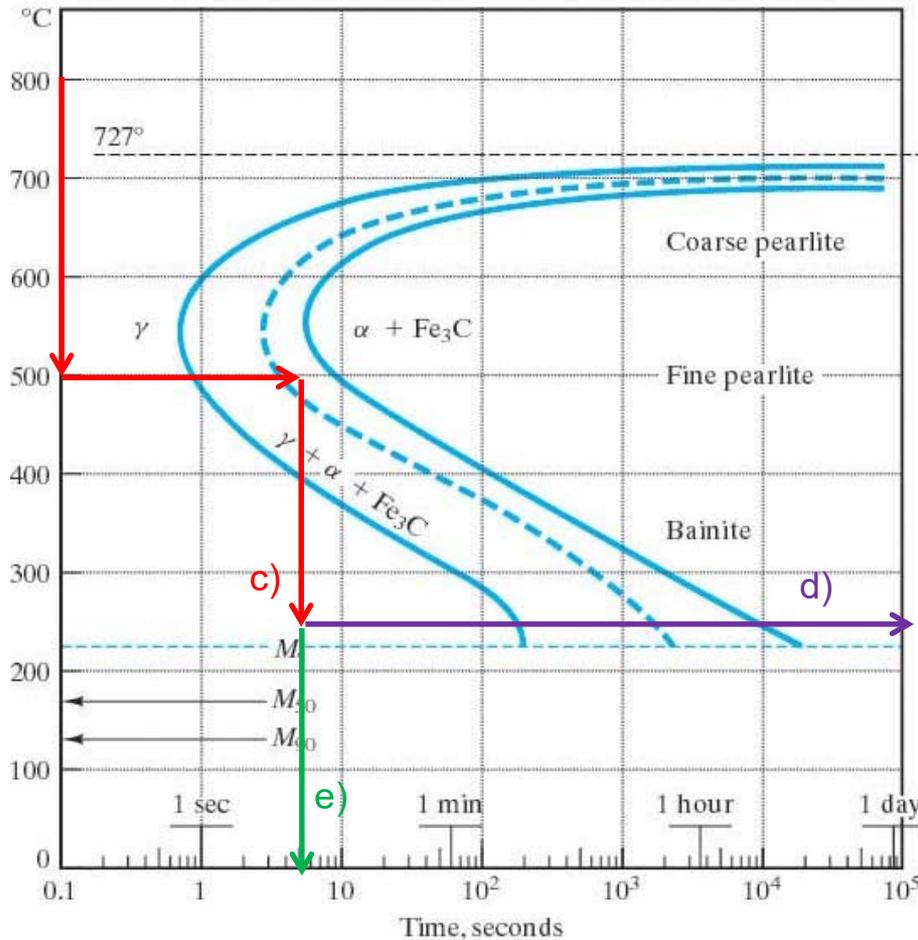
Este problema es una aplicación directa de la Figura 10.7. La línea discontinua indica el punto correspondiente a la mitad de la transformación $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$. A 600°C, el tiempo que se precisa para alcanzar dicha línea es $\sim 3\frac{1}{2}$ s.

b) ¿Cuál es el tiempo necesario para que un 50 por ciento de la austenita se transforme en bainita a 300 °C?

A 300 °C, el tiempo es ~ 480 s u 8 min.



10.2- El diagrama TTT. Tratamiento térmico del acero



c) Calcúlese la microestructura de un acero con 0.77 por ciento en peso de C sometido al siguiente tratamiento térmico: (i) temple instantáneo desde la región γ hasta 500 °C, (ii) mantenimiento a esta temperatura durante 5 s, y (iii) temple instantáneo hasta 250 °C..

Se puede contestar a esta pregunta de forma precisa a partir de la Figura 10.7 suponiendo temples rápidos ideales. Las dos primeras etapas del tratamiento conducen a ~ un 70 por ciento de transformación en perlita fina. El temple final retendrá este estado:

30% γ + 70% perlita fina ($\alpha + Fe_3C$).

d) ¿Qué ocurriría si se mantuviera la microestructura resultante durante 1 día a 250 °C y posteriormente se enfriara hasta la temperatura ambiente?.

La perlita permanece estable, pero la γ retenida tendrá tiempo suficiente para transformarse en bainita, conduciendo al siguiente estado final:

30% bainita ($\alpha + Fe_3C$) + 70% perlita fina ($\alpha + Fe_3C$).

e) ¿Qué ocurriría si la microestructura resultante del apartado (c) se templara directamente hasta la temperatura ambiente?

De nuevo, la perlita permanece estable, pero la mayor parte de la γ retenida se hará inestable. En este caso, se deben considerar los datos correspondientes a la transformación martensítica de la Figura 10.11. La microestructura resultante será

70% perlita fina ($\alpha + Fe_3C$) + ~ 30% martensita.

(Debido a que la transformación martensítica no se completa hasta $-46^\circ C$, quedará a temperatura ambiente una pequeña cantidad de γ no transformada.)

f) Realícese un esquema de los distintos tratamientos térmicos.

10.2- El diagrama TTT. Tratamiento térmico del acero

Problema: Estímese la velocidad de temple necesaria para evitar la formación de perlita en:

(a) Un acero con un 0.5 por ciento en peso de C.

A partir de la Figura 10.16 para un acero con un 0.5 por ciento en peso de C, se debe templear desde el límite de la austenita (700 °C) hasta ~520 °C en ~0.6 s, con lo que se obtiene

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{(770 - 520)^\circ\text{C}}{0.6 \text{ s}} = 420^\circ\text{C/s.}$$

(b) Un acero con un 0.77 por ciento en peso de C.

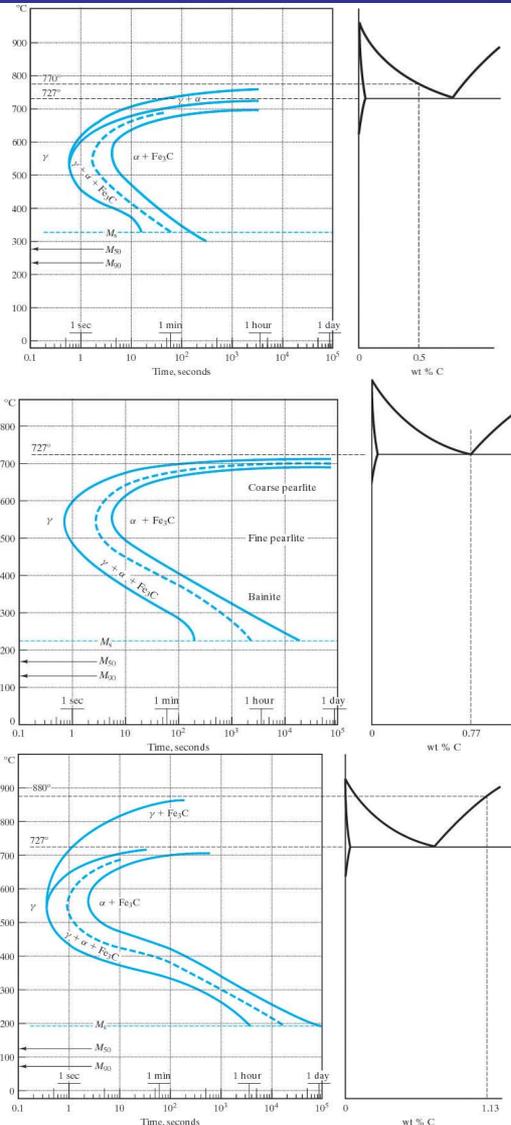
De la Figura 10.11 para un acero con un 0.77 por ciento en peso de C, se deduce que se debe templear desde la temperatura del eutectoide (727 °C) hasta ~550 °C en ~0.7 s, lo que da

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{(727 - 550)^\circ\text{C}}{0.7 \text{ s}} = 250^\circ\text{C/s.}$$

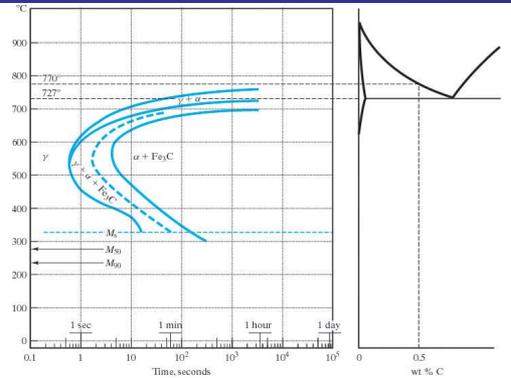
(c) Un acero con un 1.13 por ciento en peso de C.

De la Figura 10.15 para un acero con un 1.13 por ciento en peso de C, se deduce que se debe templear desde el límite de la austenita (880 °C) hasta ~550 °C en ~0.35 s, por lo que resulta

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{(880 - 550)^\circ\text{C}}{0.35 \text{ s}} = 940^\circ\text{C/s.}$$



10.2- El diagrama TTT. Tratamiento térmico del acero



Problema: Calcúlese el tiempo necesario para realizar el tratamiento de austempering a 5°C por encima de la temperatura M_s en el caso de:

(a) Un acero con un 0.5 por ciento en peso de C.

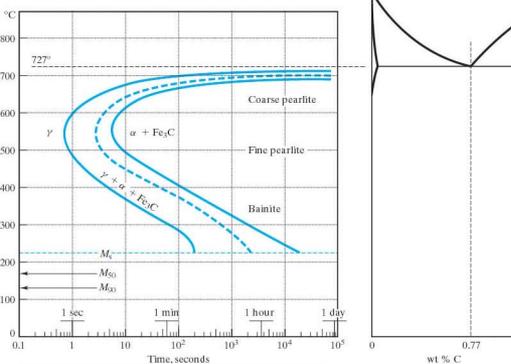
La Figura 10.16 correspondiente un acero con un 0.5 por ciento en peso de C indica que la formación completa de la bainita ocurrirá a 5 °C por encima de M_s en

$$\sim 180 \text{ s} \times 1 \text{ min}/60 \text{ s} = 3 \text{ min.}$$

(b) Un acero con un 0.77 por ciento en peso de C.

Análogamente, la Figura 10.11 para un acero con un 0.77 por ciento en peso de C proporciona un tiempo de

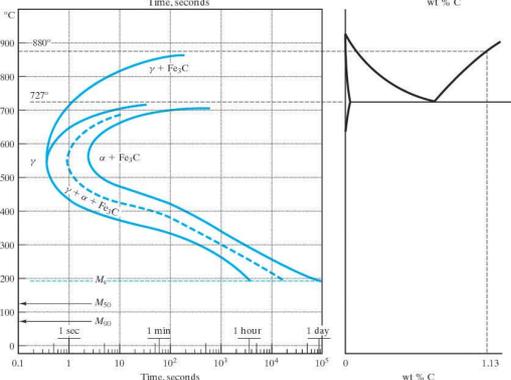
$$\sim \frac{1.9 \times 10^4 \text{ s}}{3600 \text{ s/h}} = 5.3 \text{ h.}$$



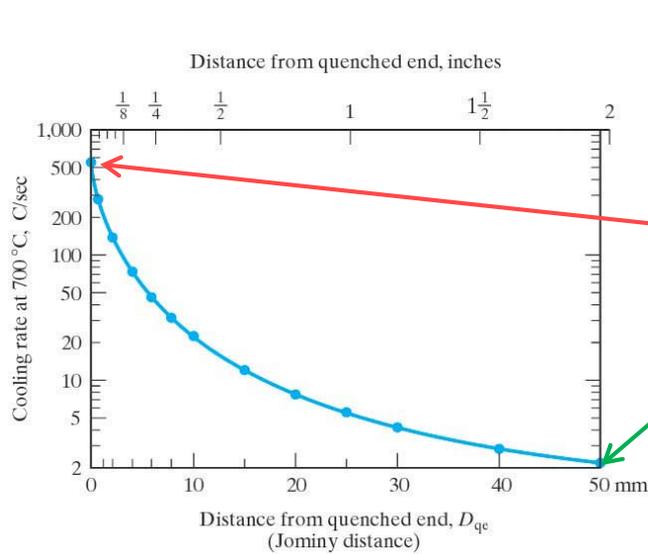
(c) Un acero con un 1.13 por ciento en peso de C.

Finalmente, la Figura 10.15 para un acero con un 1.33 por ciento en peso de C proporciona un tiempo de austempering de

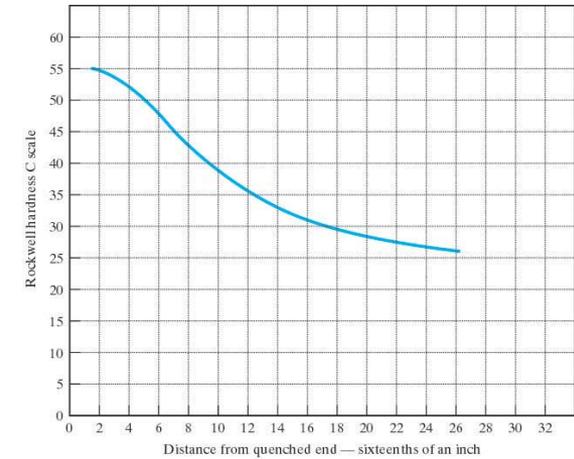
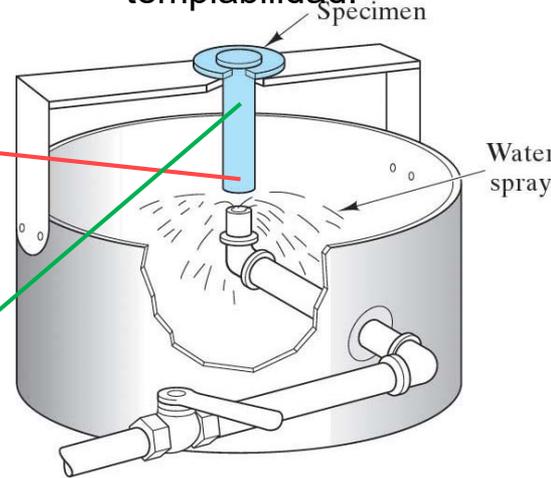
$$\sim 1 \text{ día.}$$



10.3.- Templabilidad



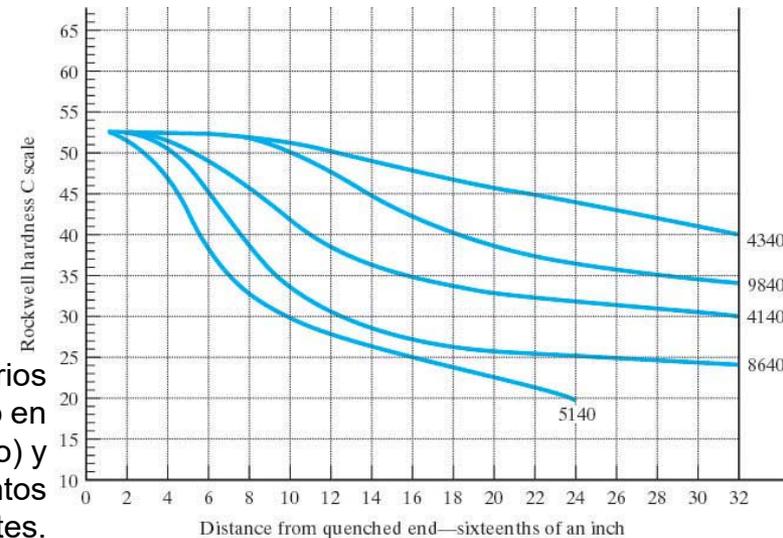
Esquema del ensayo Jominy de templabilidad.



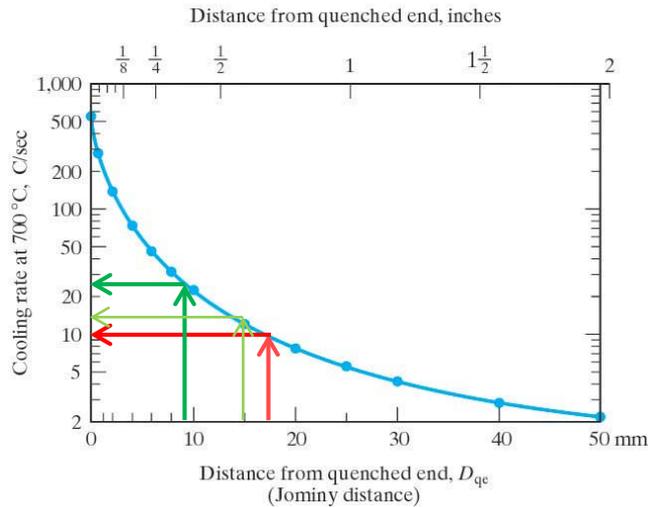
Variación de la dureza a lo largo de una probeta Jominy típica.

La velocidad de enfriamiento de la probeta Jominy varía a lo largo de su longitud. Esta curva es aplicable a casi todos los aceros al carbono y de baja aleación.

Curvas de templabilidad para varios aceros con el mismo contenido en carbono (0.40 por ciento en peso) y distinto contenido en elementos aleantes.

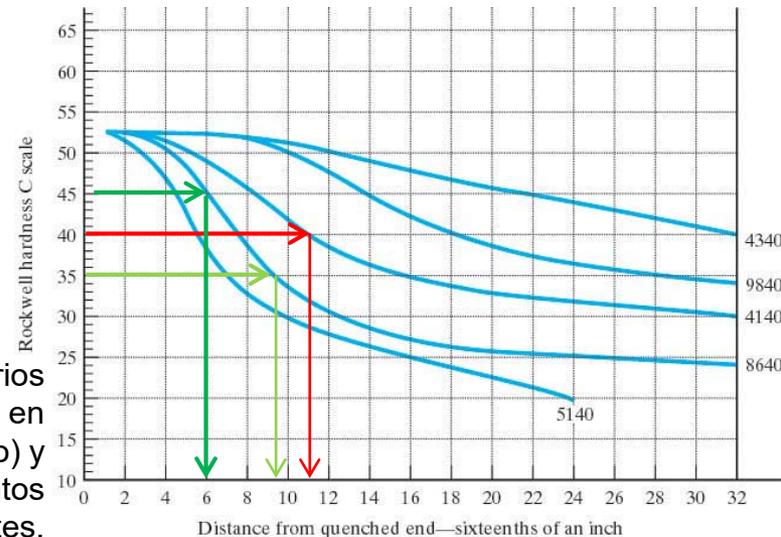


10.3.- Templabilidad



La velocidad de enfriamiento de la probeta Jominy varía a lo largo de su longitud. Esta curva es aplicable a casi todos los aceros al carbono y de baja aleación.

Curvas de templabilidad para varios aceros con el mismo contenido en carbono (0.40 por ciento en peso) y distinto contenido en elementos aleantes.



Problema: (a) Especifíquese la velocidad de temple necesaria para asegurar una dureza de al menos 40 Rockwell C en un acero **4140**.

(b) Especifíquese la velocidad de temple necesaria para asegurar una dureza de no más de 40 Rockwell C en la misma aleación.

Problema: El eje de un volante de motor es de un acero **8640**. La dureza de la superficie es de 35 Rockwell C. ¿En qué porcentaje debería modificarse la velocidad de enfriamiento en el punto en cuestión para que la dureza aumentara hasta un valor más deseable de 45 Rockwell C?

10.3.- Templabilidad

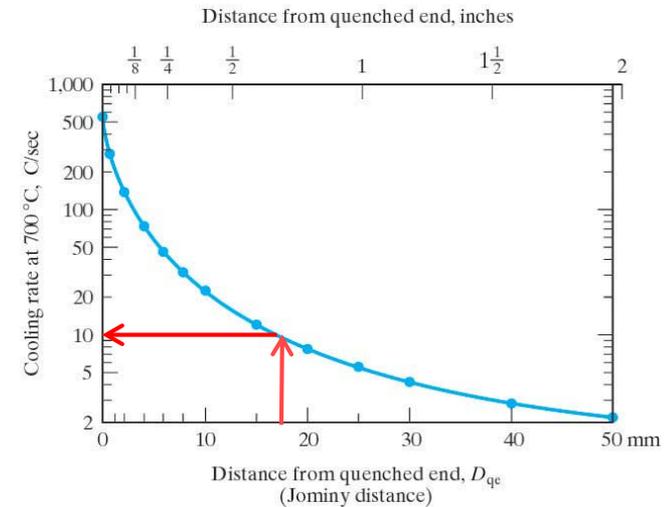
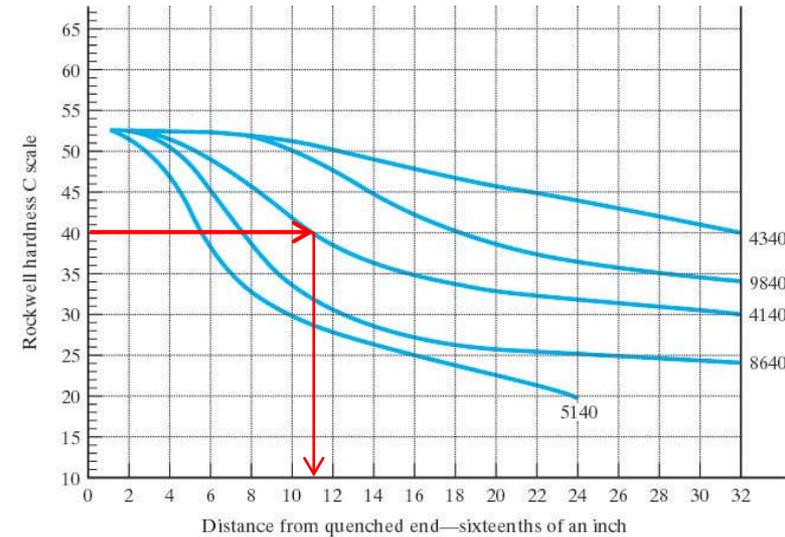
Problema: (a) Especifíquese la velocidad de temple necesaria para asegurar una dureza de al menos 40 Rockwell C en un acero 4140.

Figure 10-24 indicates that C40 occurs in a 4140 steel at $\approx 1\frac{1}{16}$ inch or $D_{qe} = \frac{11}{16} \times 25.4 = 17.5$ mm. Figure 10-22 gives a corresponding quench rate of $\approx 10^\circ\text{C/s}$ (at 700°C).

To ensure a hardness $> C40$ requires, then:
quench rate $> \underline{\underline{\approx 10^\circ\text{C/s}}}$

(b) Especifíquese la velocidad de temple necesaria para asegurar una dureza de no más de 40 Rockwell C en la misma aleación.

Similarly, to ensure a hardness $< C40$ requires:
quench rate $< \underline{\underline{\approx 10^\circ\text{C/s}}}$



10.3.- Templabilidad

Problema: El eje de un volante de motor es de un acero 8640. La dureza de la superficie es de 35 Rockwell C. ¿En qué porcentaje debería modificarse la velocidad de enfriamiento en el punto en cuestión para que la dureza aumentara hasta un valor más deseable de 45 Rockwell C?

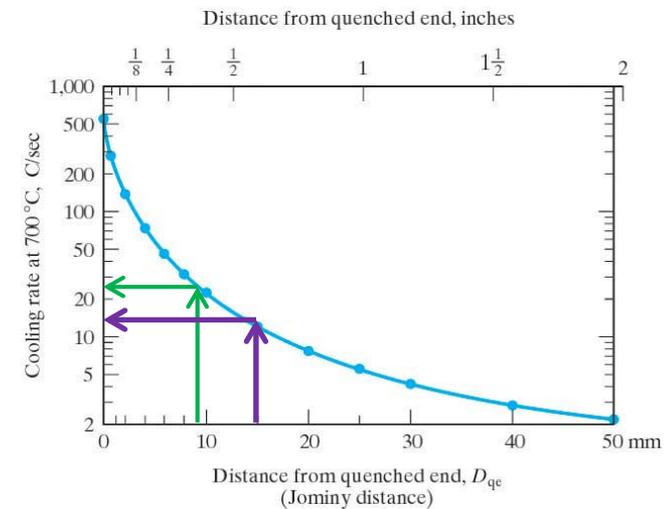
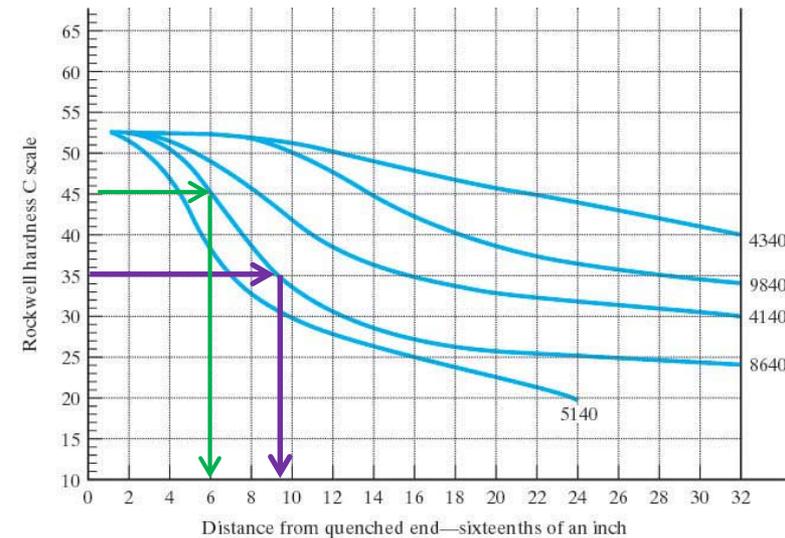
From Figure 10-24, we find that, for 8640, a hardness of C35 occurs at about 9.2 sixteenths distance. Figure 10-22 shows that this distance corresponds to a cooling rate of $\approx 13^\circ\text{C/s}$ (at 700°C).

Similarly, a hardness of C45 occurs at a distance of about 5.8 sixteenths, corresponding to a cooling rate of $\approx 24^\circ\text{C/s}$ (at 700°C).

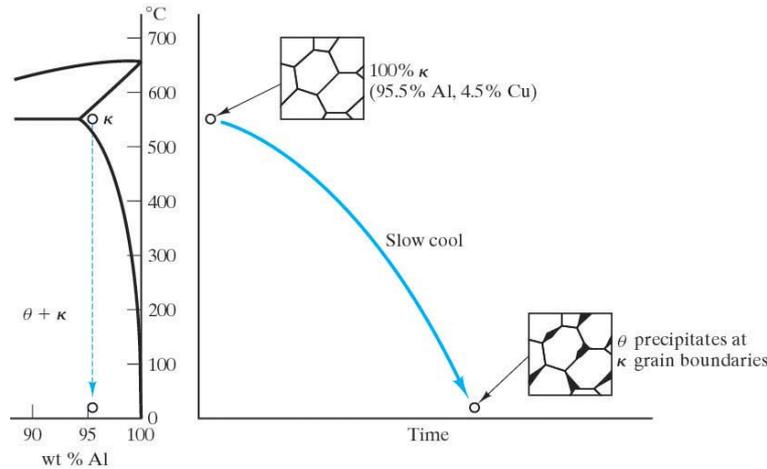
The resulting increase in cooling rate would be:

$$\frac{24 - 13}{13} \times 100\% = \underline{\underline{84.6\% \text{ increase}}}$$

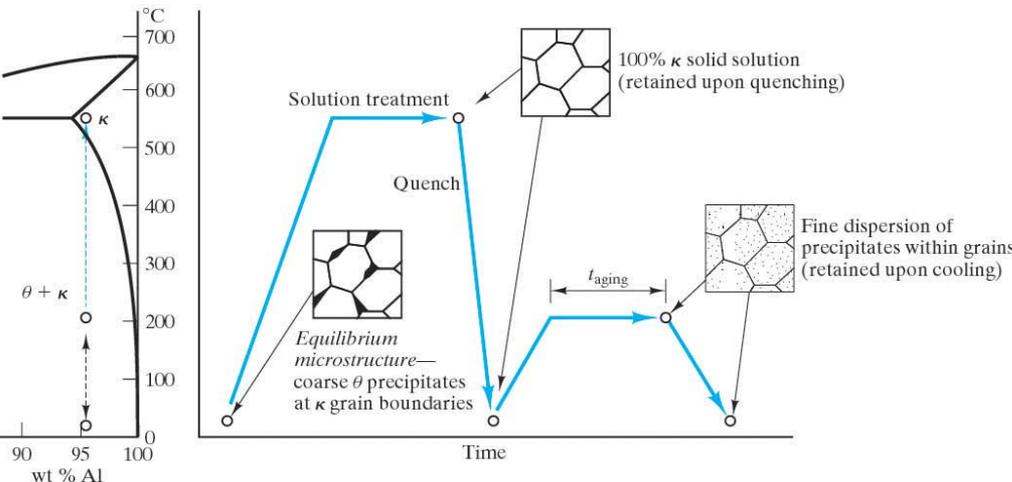
[Mas problemas en:](#)



10.4.- Endurecimiento por precipitación

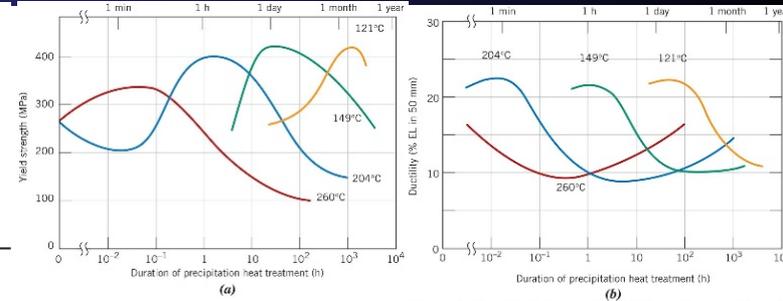
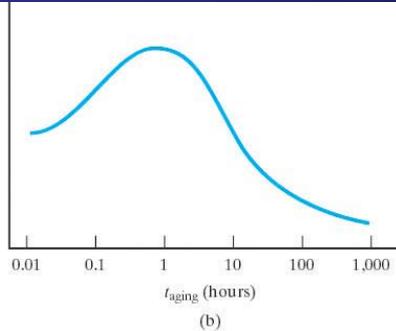
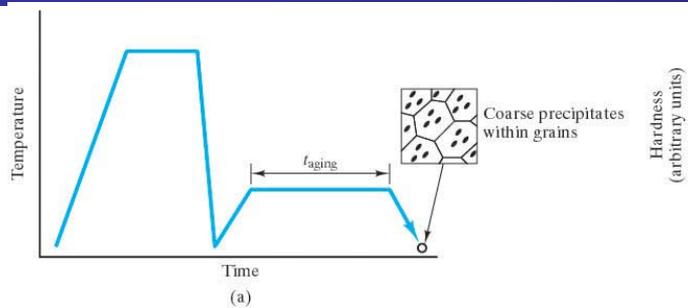


Durante el enfriamiento lento de una aleación Al-Cu (4.5 por ciento en peso) desde la región de una sola fase (κ) del diagrama de fases hasta la región de dos fases ($\kappa + \theta$), se forman precipitados gruesos en los bordes de grano. Estos precipitados aislados afectan en pequeña medida a la dureza de la aleación.



Al templar y posteriormente calentar una aleación Al-Cu (4.5 por ciento en peso), tiene lugar una precipitación fina en el interior de los granos de κ . Estos precipitados resultan efectivos para dificultar el movimiento de las dislocaciones y, en consecuencia, para aumentar la dureza de la aleación (y su resistencia). Este proceso es conocido como endurecimiento por precipitación o maduración.

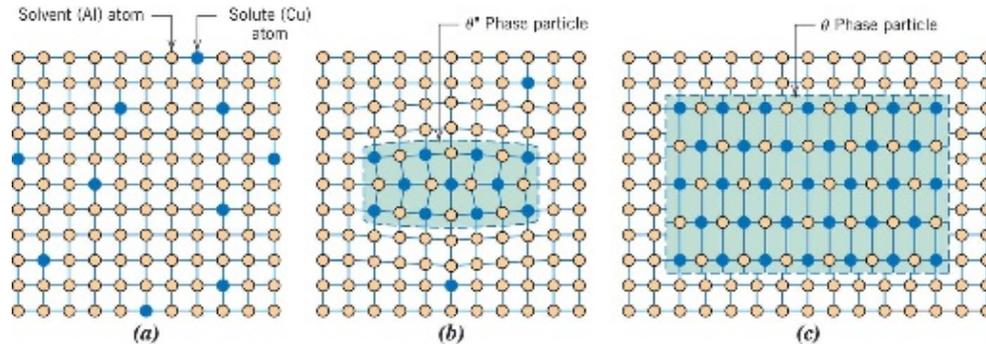
10.4.- Endurecimiento por precipitación



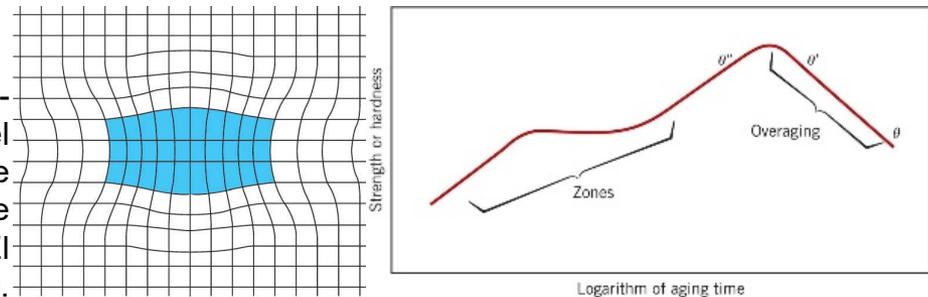
(a) Al aumentar la duración de la etapa de calentamiento posterior al temple, los precipitados coalescen y resultan menos efectivos para el endurecimiento de la aleación. El resultado se conoce como *sobremaduración*.

(b) Variación de algunas propiedades mecánicas con la duración de la etapa de calentamiento posterior al temple (*tiempo de maduración*).

Adapted from Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals, Vol. 2, 9th edition, H. Baker (Managing Editor), 1979. Reproduced by permission of ASM International, Materials Park, OH.



Esquema de la geometría cristalina de una zona de Guinier-Preston (G.P.). Esta estructura es la más efectiva en el endurecimiento por precipitación, y es la que se corresponde con el máximo de dureza. Téngase en cuenta la existencia de entrecaras coherentes según toda la longitud del precipitado. El tamaño del precipitado es, aproximadamente, 15 nm x 150 nm.



10.5.- Recocido.

ABLANDAMIENTO DE LA ESTRUCTURA POLICRISTALINA DEFORMADA: RECOCIDO CONTRA ACRITUD

PROCESO TERMICO QUE PERMITE:

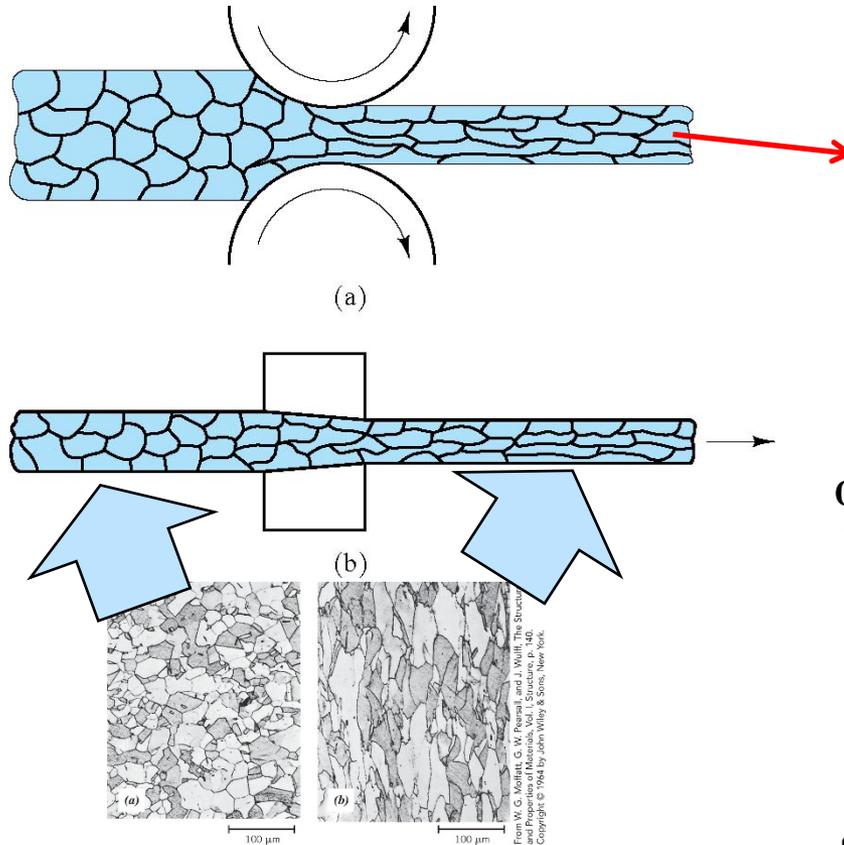
- RECUPERAR LAS CARACTERISTICAS DEL MATERIAL SIN ACRITUD.
- INCREMENTAR EL NIVEL DE DEFORMACIONES FACTIBLES EN UNA ETAPA.
- ELIMINAR TENSIONES INTERNAS.
- CONTROLAR EL TAMAÑO DE GRANO.

**ES EL PROCESO INVERSO AL ENDURECIMIENTO POR ACRITUD EN
CARACTERISTICAS RESISTENTES ... PERO NO EN LA FORMA**

Plasticidad. UPV

Mecanismos de
Endurecimiento. UPV

10.5.- Recocido. Acritud



(a) Un latón con acritud (deformado a través de unos rodillos de tal manera que se reduce su sección transversal en un tercio),

<https://www.youtube.com/watch?v=...>

<https://www.youtube.com/watch?v=...>

$$\%CW = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

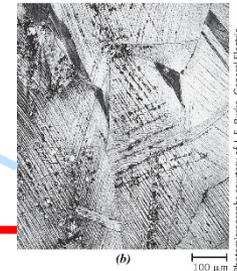
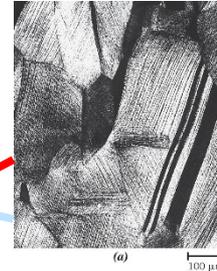
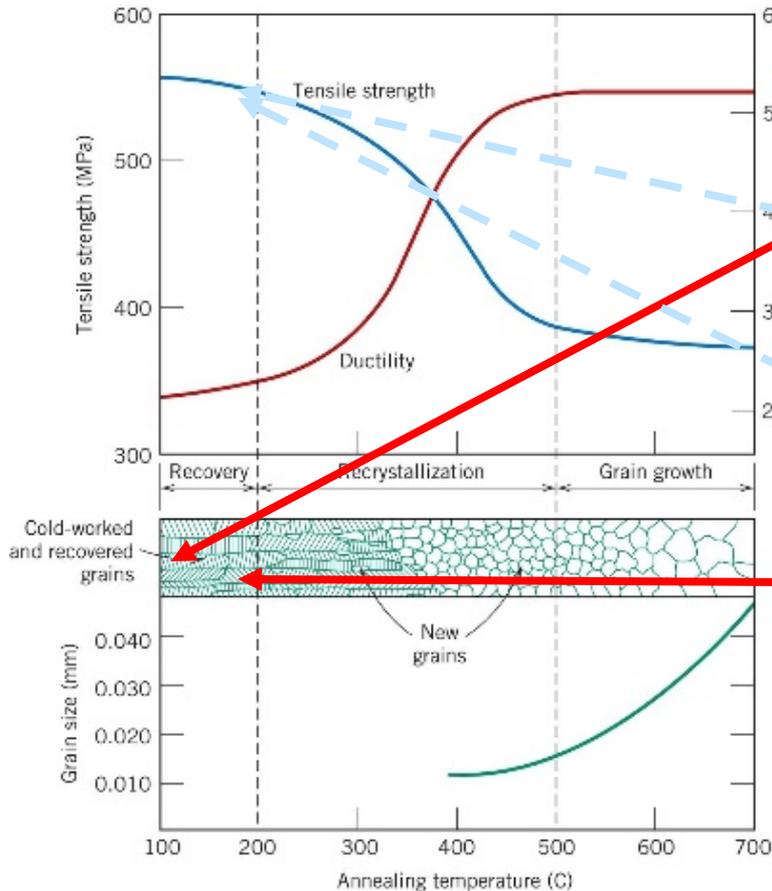
Problema: Una barra de acero de 12.5 mm de diámetro es estirada a través de una hilera de 10 mm de diámetro. ¿Cuál es el porcentaje de acritud que resulta de este proceso?

$$\begin{aligned} \%CW &= \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\% = \frac{\pi (d_o/2)^2 - \pi (d_f/2)^2}{\pi (d_o/2)^2} \times 100\% \\ &= \frac{d_o^2 - d_f^2}{d_o^2} \times 100\% = \frac{(12.5\text{mm})^2 - (10\text{mm})^2}{(12.5\text{mm})^2} \times 100\% \\ &= \underline{\underline{36\%}} \end{aligned}$$

Ejemplos de procesos de deformación en frío: (a) laminado en frío de una barra o chapa y (b) estirado en frío de un alambre. Nótese en estos esquemas que la reducción de área generada por la operación de deformación en frío está asociada con una orientación preferente de la estructura granular.

10.5.- Recocido. Restauración

1. Restauración, Recuperación o alivio de tensiones

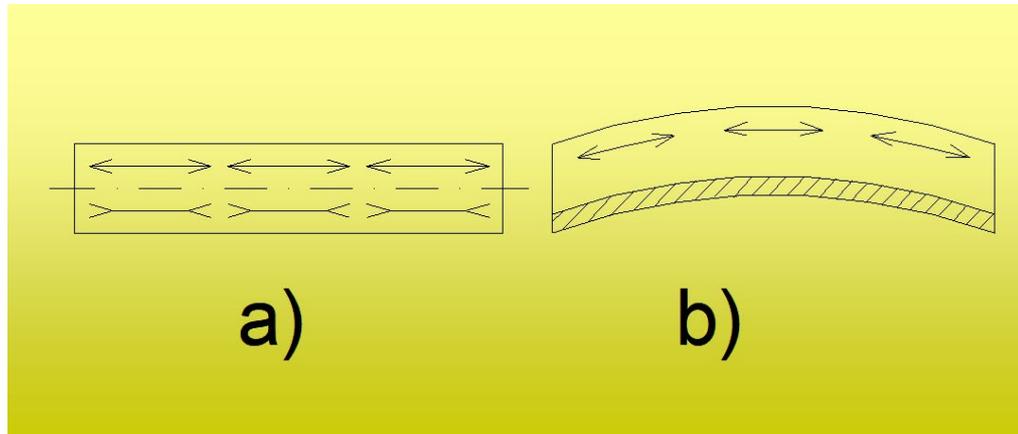


- Reducción de la energía interna almacenada en el proceso, aumento de la difusión atómica.
- Reducción en el número de dislocaciones.
- Recuperación de propiedades físicas: conductividad eléctrica y térmica.

Adapted from G. Sachs and K. R. Van Horn, Practical Metallurgy, Applied Metallurgy and the Industrial Processing of Ferrous and Nonferrous Metals and Alloys, 1940. Reproduced by permission of ASM International, Materials Park, OH.

10.5.- Recocido. Restauración

- ✓ NO SUCEDE CAMBIO ESTRUCTURAL
- ✓ NO SUCEDE CAMBIO RESISTENTE
- ✓ ELIMINA TENSIONES INTERNAS



Pieza sometida a tensiones internas, \longleftrightarrow tracción, \rightrightarrows compresión.

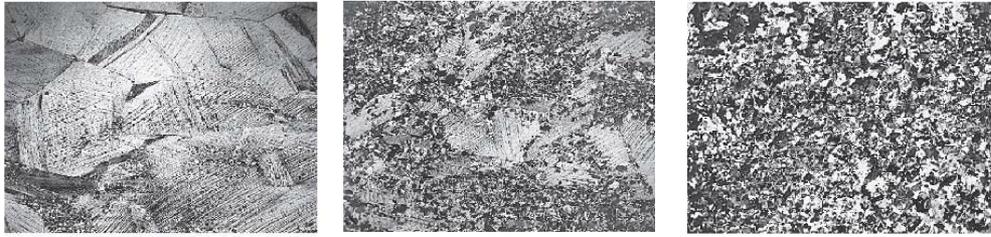
A) antes de mecanizar. B) después de mecanizar la zona comprimida.

El hecho experimental para identificar la presencia de tensiones internas:

AL MECANIZAR, LA PIEZA SE DEFORMA

El recocido de recuperación aporta estabilidad dimensional a las piezas que han de sufrir mecanizados parciales.

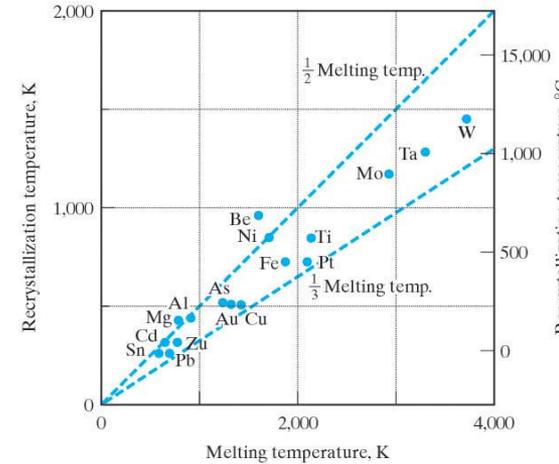
10.5.- Recocido. Recristalización



(b) Después de 3s a 580°C aparecen nuevos granos,

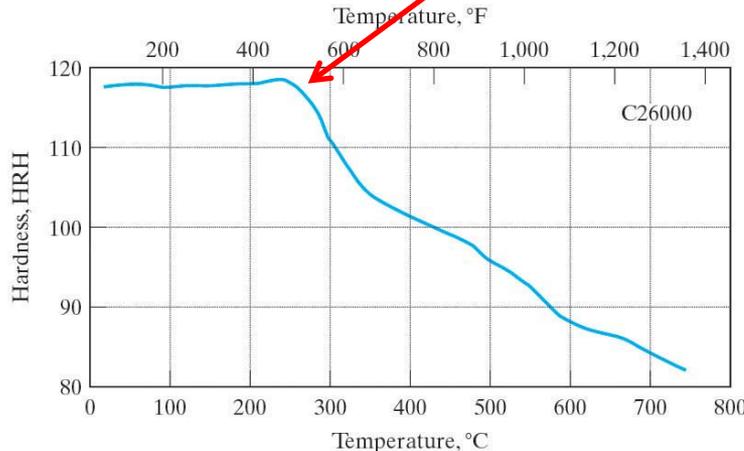
(c) Tras 4s a 580 °C, están presentes muchos más granos nuevos,

(d) Tras 8s a 580°C, tiene lugar la completa recristalización de la estructura,

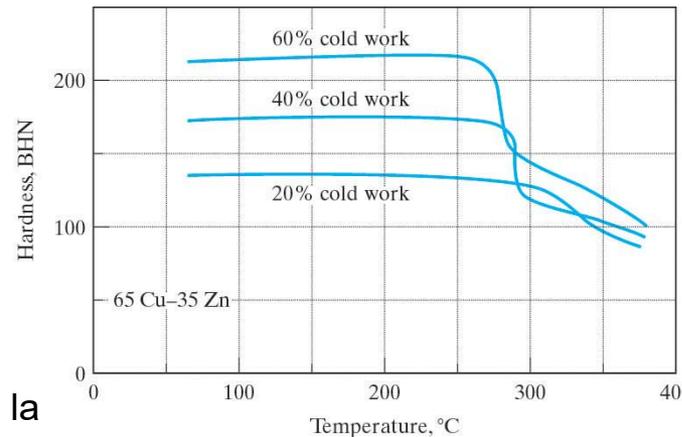


Esta figura es una representación gráfica de la regla empírica que establece que la movilidad atómica es la suficiente para afectar a las propiedades mecánicas cuando la temperatura es superior a un valor comprendido entre 1/3 y 1/2 de T_m en una escala de temperaturas absolutas.

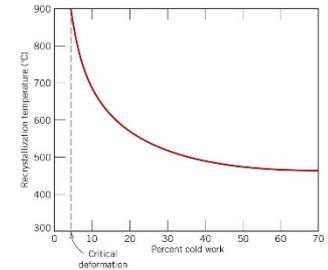
Temperatura de recristalización en función de la temperatura de fusión para varios metales.



La caída acusada de la dureza identifica la temperatura de recristalización, ~ 290 °C para la aleación C26000, «latón de cartuchería».



Para una aleación de cobre con acritud, la temperatura de recristalización disminuye ligeramente al aumentar el grado de acritud.

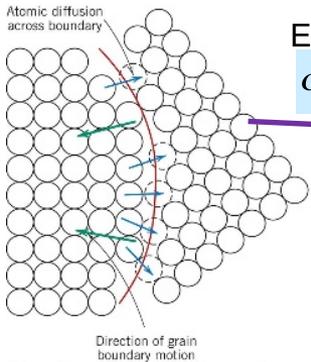


10.5.- Recocido. Crecimiento de grano

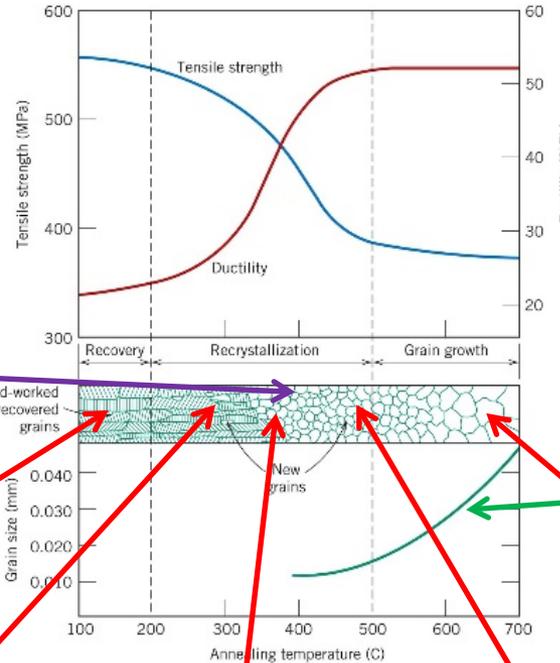
La fuerza que impulsa este proceso es la reducción de los bordes de grano, con una alta energía asociada.

Ecuación de Hall-Petch:

$$\sigma_{yield} = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$



Adapted from L. H. Van Vlack, Elements of Materials Science and Engineering, 6th edition. © 1989 by Addison-Wesley Publishing Company, Inc.



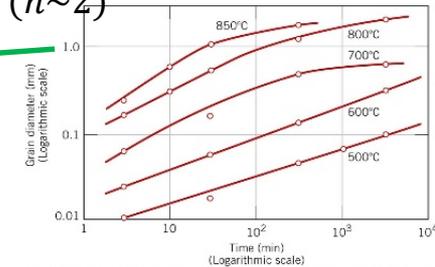
Adapted from G. Sachs and K. R. Van Horn, Practical Metallurgy, Applied Metallurgy and the Industrial Processing of Ferrous and Nonferrous Metals and Alloys, 1940. Reproduced by permission of ASM International, Materials Park, OH.

Esquema del efecto de la temperatura de recocido en la resistencia y en la ductilidad de un latón, que muestra el mayor ablandamiento de la aleación tiene lugar durante la etapa de *recristalización*.

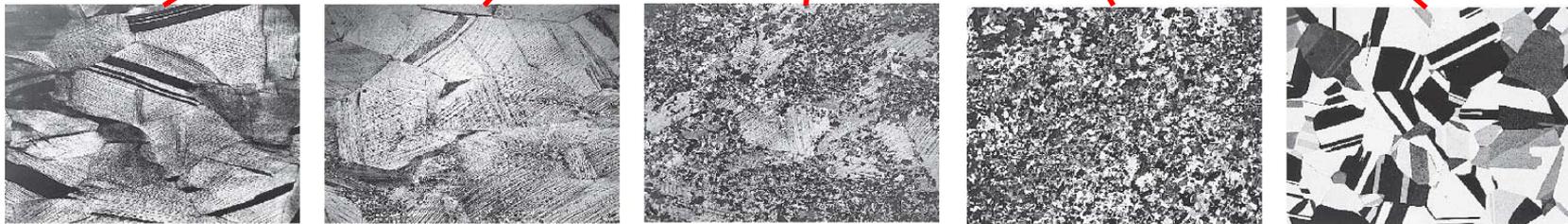
Problema. Deformación plástica y recocido. UPV

<https://www.youtube.com/watch?v=Ql8DqSRBRNg>

$$d^n - d_0^n = Kt \quad (n \sim 2)$$



From J. E. Burke, "Some Factors Affecting the Rate of Grain Growth in Metals." Reprinted with permission from Metallurgical Transactions, Vol. 180, 1949. A publication of The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, Pennsylvania.



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(e) Tras 1 h a 580 °C, la estructura ha experimentado un crecimiento de grano sustancioso.

10.5.- Recocido. Crecimiento de grano

Problema: La recristalización es un proceso térmicamente activado y, como tal, puede ser caracterizado por la expresión de Arrhenius. En primera aproximación, se puede considerar t_R^{-1} como una «velocidad», donde t_R es el tiempo necesario para la recristalización completa de la microestructura. Para una aleación de aluminio con un 75 por ciento de acritud, t_R es 100 horas a 256 °C y sólo 10 horas a 283 °C. Calcúlese la energía de activación correspondiente a este proceso de recristalización.

$$t_R^{-1} = C e^{-Q/RT}$$

$$\frac{10 \text{ h}}{100 \text{ h}} = \frac{C e^{-Q/R(256+273)K}}{C e^{-Q/R(283+273)K}} = 0.1$$

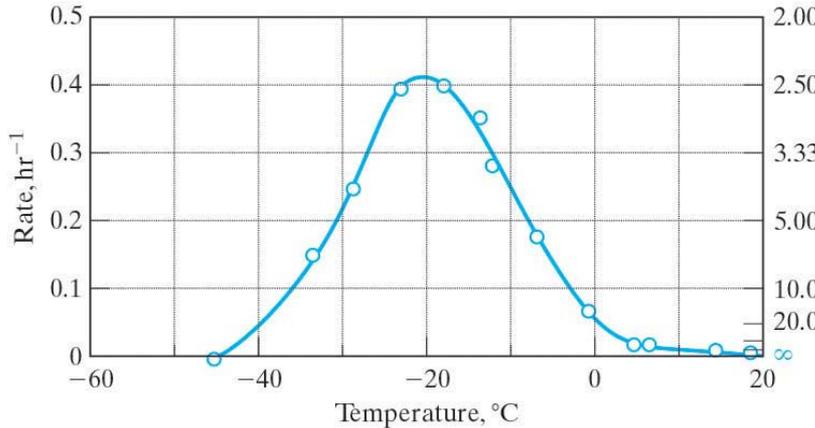
or

$$\ln 0.1 = -\frac{Q}{R} (9.17 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1})$$

giving

$$Q = \underline{\underline{209 \text{ kJ/mol}}}$$

10.6.- Cinética de las transformaciones de fase de los no metales



Velocidad de cristalización del caucho en función de la temperatura.

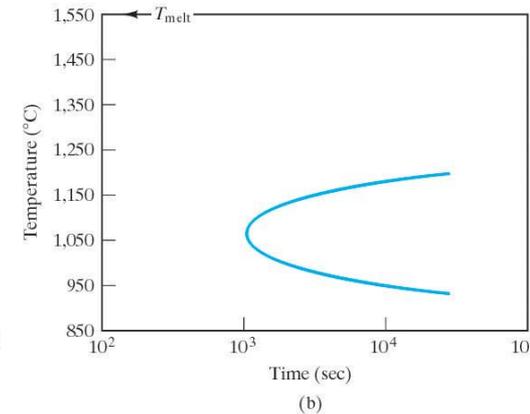
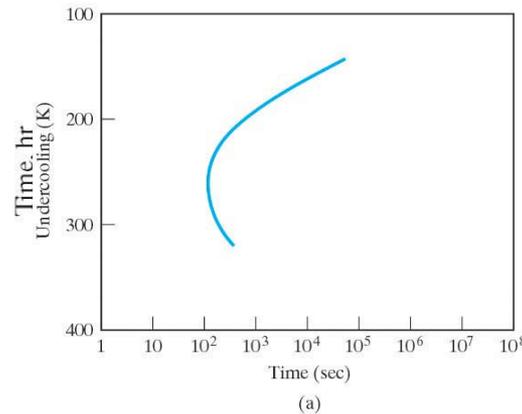
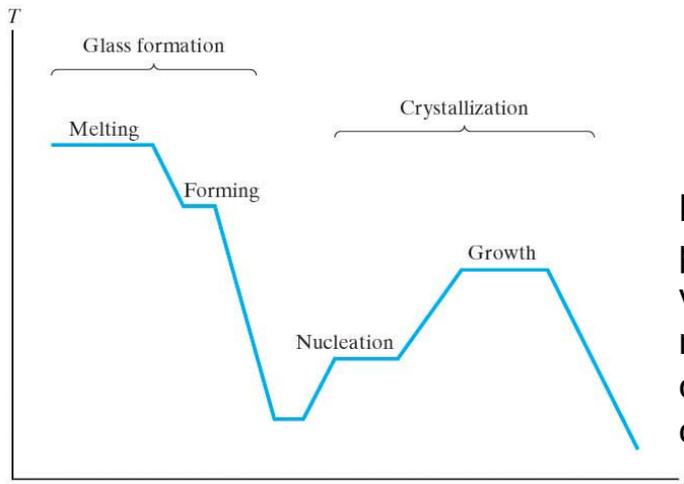
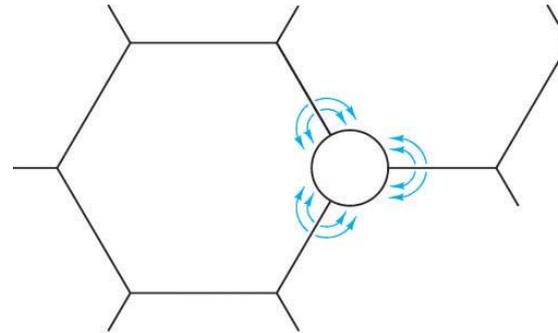
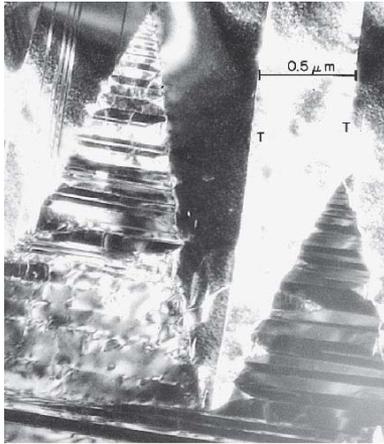


Diagrama TTT para (a) la cristalización fraccionada (10⁻⁴ por ciento en volumen) de un vidrio de composición Na₂O -2SiO₂ y (b) la cristalización fraccionada (10⁻¹ por ciento en volumen) de un vidrio de composición CaO Al₂O₃ -2SiO₂.



Perfil de temperatura típico para la obtención de una vitrocerámica mediante la nucleación y el crecimiento controlados de granos cristalinos.

10.6.- Cinética de las transformaciones de fase de los no metales

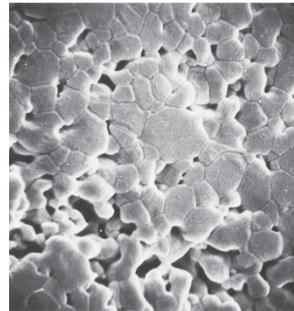
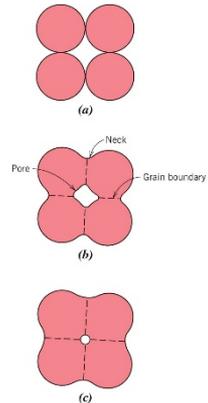


Esquema del mecanismo de sinterizado para la reducción de una masa compacta de polvo, que consiste en la difusión de átomos del material desde los bordes de grano hasta los poros, procediendo, por lo tanto, a su «rellenado». Cada grano de la microestructura era, en su origen, una partícula de polvo aislada en la masa compacta inicial.

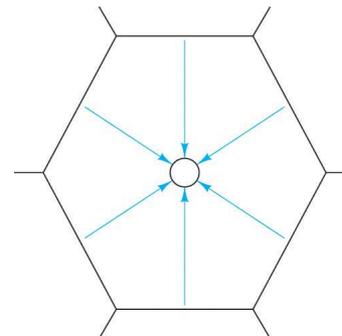
Micrografía electrónica de transmisión de una zircona monoclinica que muestra una microestructura característica de una transformación martensítica. Se observan también maclas, indicadas por la letra T.

<https://www.youtube.com/watch?v=QnUtz bqpnlw>

<https://www.youtube.com/watch?v=dbRxknjTMhY>



From W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, Introduction to Ceramics, 2nd edition, p. 483. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.



El crecimiento de grano dificulta la densificación de una masa compacta de polvo. El camino para la difusión desde el borde de grano hasta el poro (ahora aislado dentro de un grano de gran tamaño) es prohibitivamente largo.

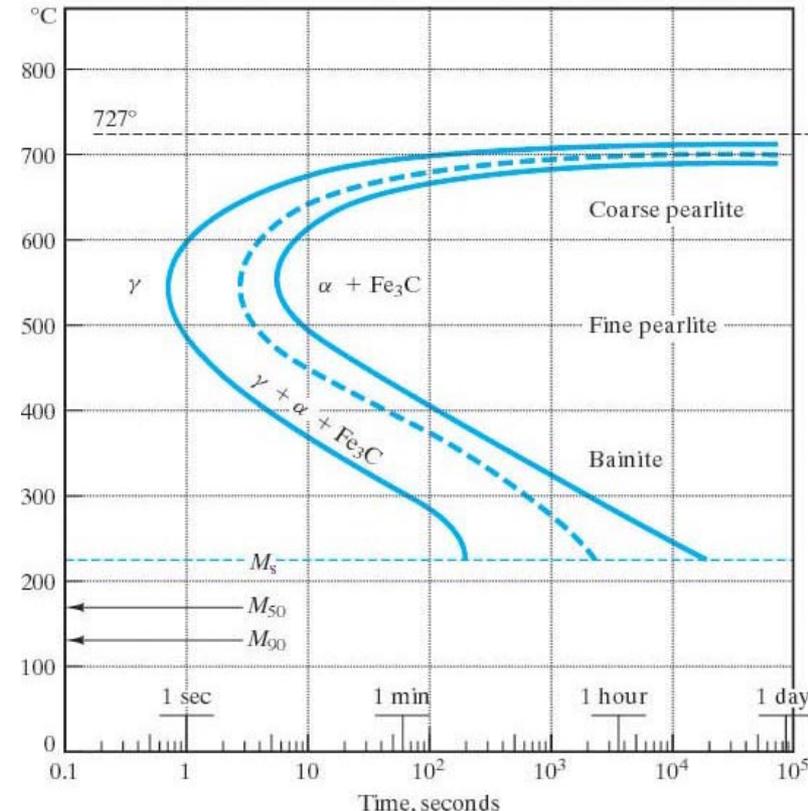
10.7.- Problemas de exámenes

Problema. Dos probetas de la misma aleación metálica y sin deformación previa son conformadas en frío y, por consiguiente, sus secciones reducidas. Una tiene la sección circular y la otra rectangular; y durante el proceso de conformado las secciones mantienen sus respectivas formas. Las dimensiones originales y después de la deformación son:

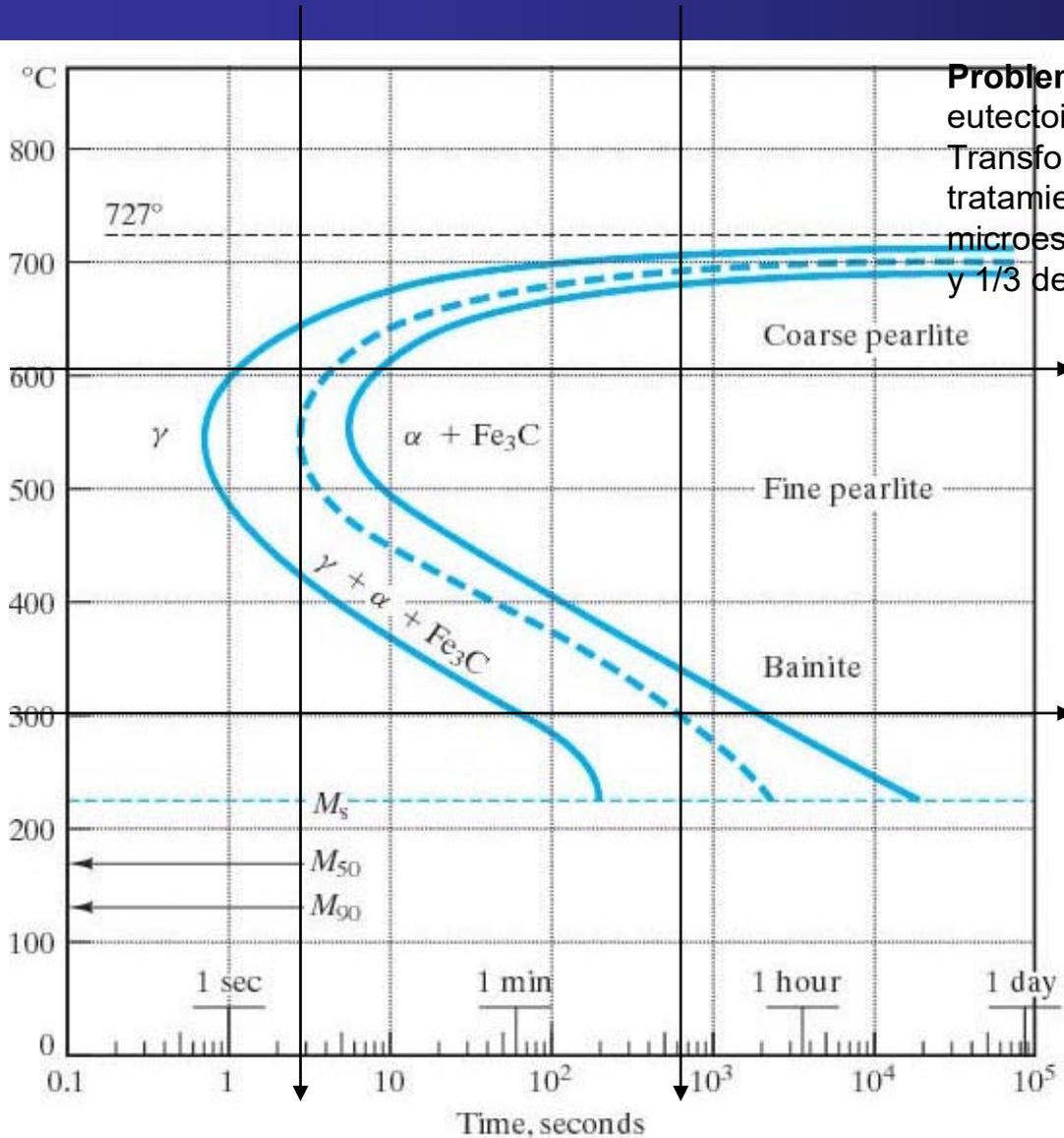
Dimensiones	Circular (diámetro, mm)	Rectangular (espesor x ancho, mm)
Originales	20,0	20,0 x 40,0
Deformadas	16,0	14,0 x 43,8

¿Cuál de estas probetas tendrá mayor dureza después de la deformación plástica? ¿Por qué?

Problema. Disponemos de un acero de composición eutectoide, con ayuda del diagrama Temperatura-Tiempo-Transformación de este acero, Diseña la secuencia de tratamiento completo necesario para obtener una microestructura que presente 1/3 de perlita, 1/3 de bainita y 1/3 de martensita a temperatura de 25°C.



10.7.- Problemas de exámenes



Problema. Disponemos de un acero de composición eutectoide, con ayuda del diagrama Temperatura-Tiempo-Transformación de este acero, Diseña la secuencia de tratamiento completo necesario para obtener una microestructura que presente 1/3 de perlita, 1/3 de bainita y 1/3 de martensita a temperatura de 25°C.

10.7.- Problemas de exámenes

Problema. Disponemos de un acero de composición eutectoide, con ayuda del diagrama Temperatura-Tiempo-Transformación de este acero, hemos diseñado la siguiente secuencia de enfriamiento.

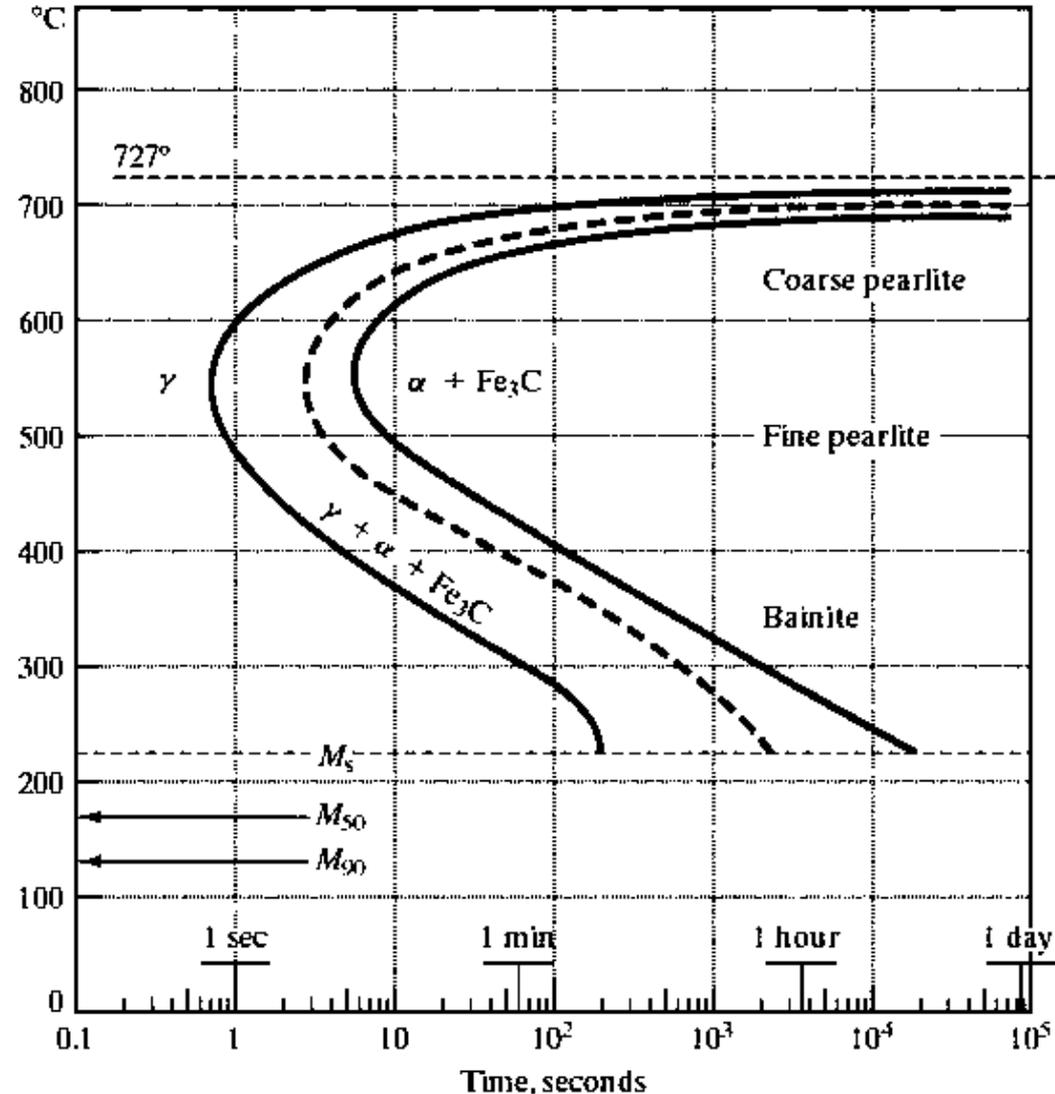
Paso 1: Austenización a 780°C durante 1 hora.

Paso 2: Enfriamiento a 700°C/seg. Hasta 600°C y mantenimiento a esta temperatura 4 segundos.

Paso 3: Enfriamiento a 700°C/seg. Hasta 300°C y mantenimiento a esta temperatura 1000 segundos.

Paso 4: Enfriamiento a 700°C/seg. Hasta 25°C.

¿Qué constituyentes y en qué porcentaje tendremos al finalizar la secuencia de enfriamiento?



10.7.- Problemas de exámenes

Problema : El diagrama de transformación isotérmica de un acero aleado es el representado en la figura siguiente, describir la microestructura final, indicando los constituyentes, de una probeta sometida al siguientes tratamiento:

1. tras la austenización,
2. enfriar rápidamente hasta los 550°C, manteniendo 2 horas y 45 minutos,
3. posteriormente enfriar de posteriormente enfriar de nuevo rápidamente hasta 400°C manteniendo durante 200 s y
4. finalmente enfriar hasta temperatura ambiente

