

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA DE LA AUSTENITA

Estudio de un acero de composición eutectoide con 0,8% de carbono

Concepto I

Para el estudio de los tratamientos térmicos principalmente el recocido, normalizado y temple de los aceros, resulta de mucho interés la representación gráfica en un sistema cartesiano temperatura - tiempo de la transformación austenítica. Se le conoce de distintas maneras.

- 1) Curva "S" por su forma**
- 2) Curva TTT (temperatura, tiempo, transformación)**
- 3) Diagrama de transformación isotérmica de la austenita**

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA DE LA AUSTENITA

Concepto II

Esta curva característica de cada material representa a diversas temperaturas el tiempo necesario para que se inicie y complete la isotérmica transformación de la austenita en otros constituyentes.

Objetivo

La obtención de la curva y su representación gráfica es posible instrumentando estudios de laboratorio que permitan registrar a distintas temperaturas (por debajo de las temperaturas críticas A3, Acm, A1) campo en el cual la austenita es inestable, los tiempos de permanencia y las transformaciones que se producen.

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA DE LA AUSTENITA

Observaciones

- 1) La utilidad del diagrama de equilibrio Fe - C está asociada a la velocidad de enfriamiento con que se produce la transformación de la austenita. Por debajo de las temperaturas críticas la austenita es inestable y se producirá su transformación.**
- 2) Estudios sobre permanencia de la austenita a temperaturas inferiores a las críticas demostraron la profunda influencia que poseen la temperatura y el tiempo en la transformación.**

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA DE LA AUSTENITA

3) La transformación austenítica tiene un inicio y un fin de transformación que está asociada a la temperatura y al tiempo.

4) La MARTENSITA se obtiene por transformación casi instantánea a temperaturas relativamente bajas.

5) La AUSTENITA a temperaturas más elevadas se transforma en estructuras estables. Una vez terminada la transformación no ocurrirán cambios posteriores cualquiera sea la velocidad de enfriamiento.

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA DE LA AUSTENITA

Instrumentación

- 1) Se prepara un lote de probetas de dimensiones reducidas del material que se quiere estudiar.**
- 2) Se calientan en un horno a temperaturas superiores a las críticas produciendo su completa austenización.**
- 3) Se pasan a un horno, baño de sales o metálico con una temperatura subcrítica elegida para su estudio.**

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA DE LA AUSTENITA

4) Se sacan de este horno en intervalos de tiempo (preferentemente en progresión geométrica) 5, 10, 20, 40, 80, etc segundos y se enfrían en agua.

5) Se analiza para cada ejemplar la estructura metalográfica al microscopio y se mide su dureza.

INSTRUMENTACION 1

Probeta utilizada normalmente en la determinación del diagrama T-I.



DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA DE LA AUSTENITA

Resultados

- 1) Si la dureza es igual a la templada directamente desde la temperatura austenítica entonces la transformación no ha comenzado y la estructura que se observa en la metalografía será totalmente martensítica.**
- 2) Luego de transcurrido un cierto tiempo la dureza comenzará a decrecer y la metalografía nos estará indicando que aparecen nuevas estructuras estables en un cierto porcentaje, mientras el remanente será martensita. Señal de tiempo de comienzo de transformación.**

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA DE LA AUSTENITA

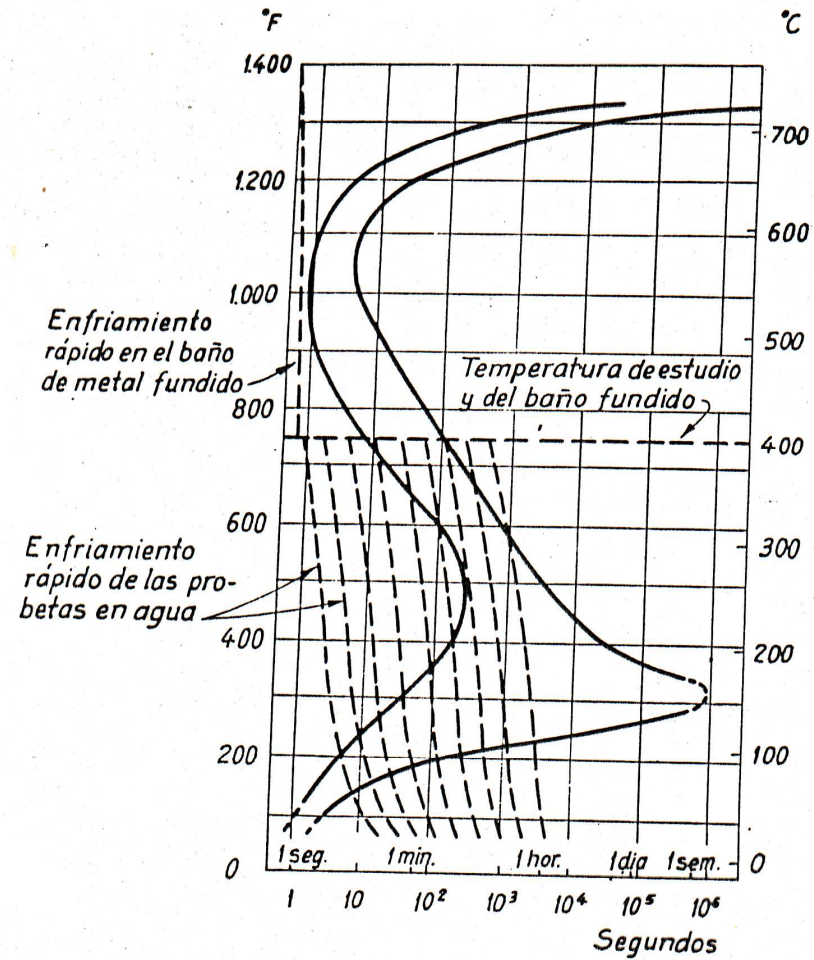
3) Para un determinado tiempo de permanencia a la temperatura subcrítica a estudio, la dureza no variará más y la metalografía nos estará revelando el 100% de transformación en los nuevos constituyentes estables y la ausencia de martensita. Señal de tiempo de fin de transformación.

4) Disponemos entonces de un conjunto de datos para esa temperatura subcrítica a estudio, de porcentajes de transformación en función del tiempo transcurrido. Esto nos permite determinar el tiempo de comienzo y fin de transformación y los porcentajes intermedios entre 0% y 100%.

5) Si este procedimiento se repite para otras temperaturas subcríticas disponemos de un conjunto completo de datos para construir la curva "S" en su fase superior.

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA DE LA AUSTENITA

INSTRUMENTACION 3 y 4



Esquema del proceso que se utiliza para determinar la curva de la «S» de los aceros.

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA DE LA AUSTENITA

RESULTADO 4

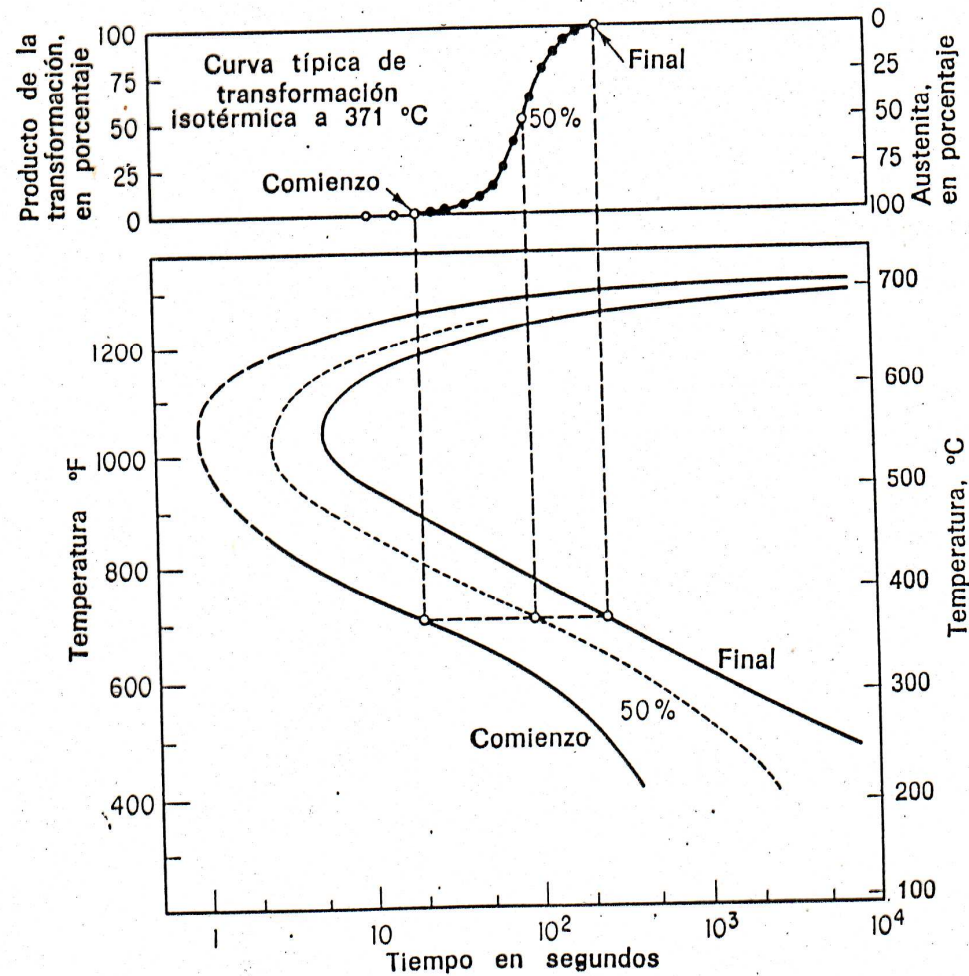
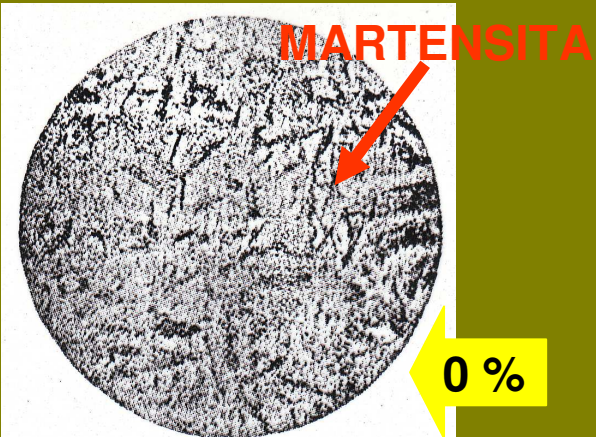
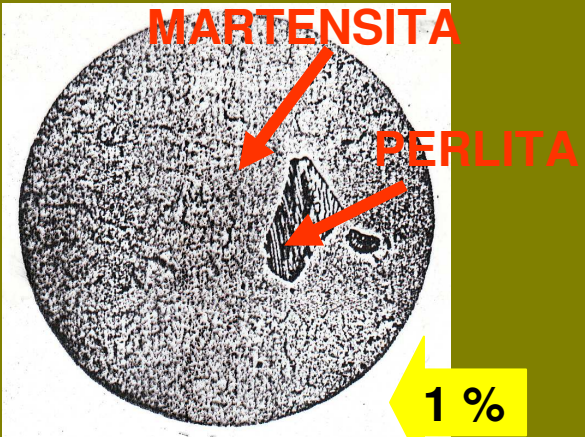


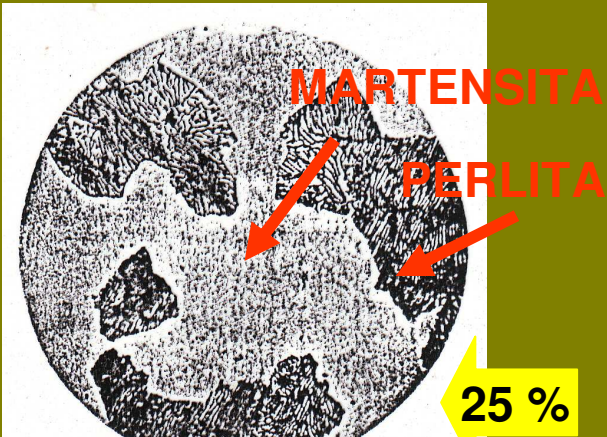
Diagrama en el que se muestra el trazado del diagrama T-I, a partir de las mediciones efectuadas durante la transformación isotérmica.



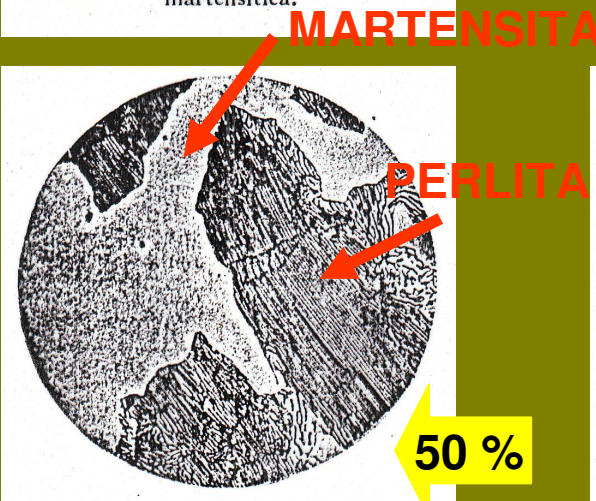
A los diez segundos no ha comenzado la transformación de la austenita. Por efecto del rápido enfriamiento de la probeta en agua, aparece una estructura martensítica.



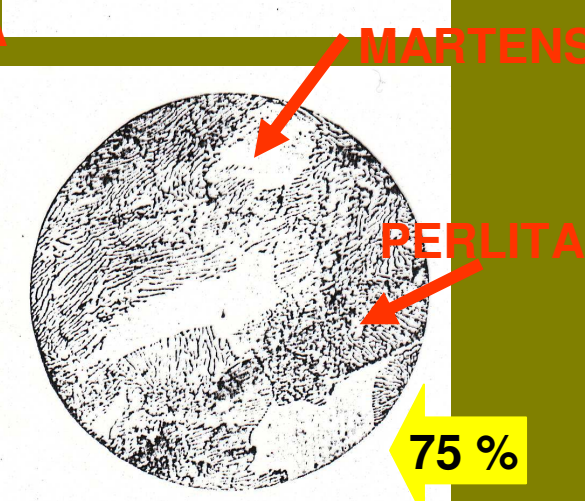
Comienza la transformación de austenita en perlita a los cinco minutos y cincuenta segundos.



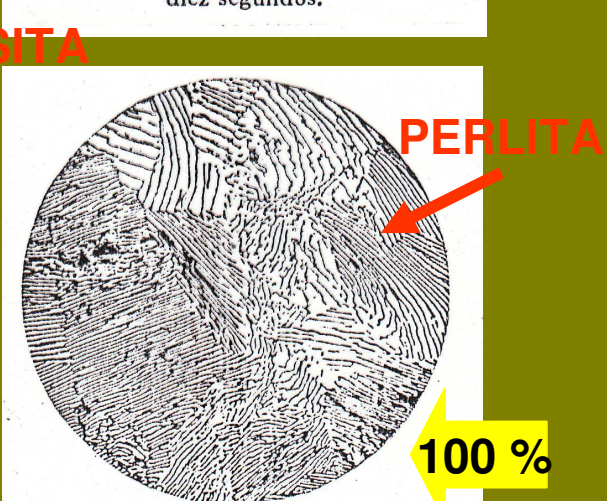
Un 25 % de austenita se ha transformado en perlita, a los diecinueve minutos y diez segundos.



Se ha efectuado la transformación de un 50 % de austenita a los veintidós minutos.



Se ha transformado un 75 % de austenita, a los veinticuatro minutos y diez segundos.

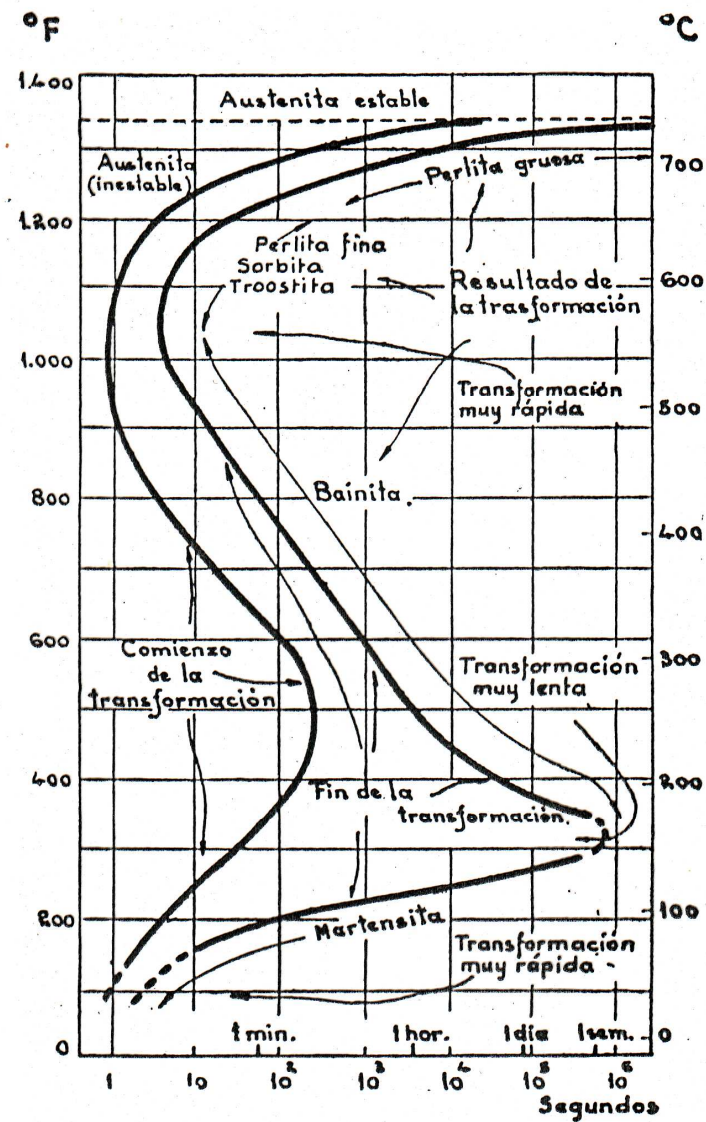


La transformación de la austenita en perlita es completa, a los sesenta y seis minutos y cuarenta segundos.

× 500

Microfotografías de un acero de 0,90 % de C, calentado a 760°, enfriado luego rápidamente en un baño de sales a 705° y mantenido a esa temperatura durante diferentes periodos de tiempo y enfriado luego rápidamente en agua muy fría (Vilella).

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA DE LA AUSTENITA



Curva de la «S» y constituyentes microscópicos resultantes en la transformación isotérmica de la austenita.

Transformaciones a bajas temperaturas

Transformación martensítica

Conceptos

- 1) La transformación de la austenita en martensita se realiza a bajas temperaturas.**
- 2) Dado que la transformación martensítica no depende del tiempo sino de la variación de temperatura, el diagrama de forma "S" obtenido a altas temperaturas adquiere otra configuración en su parte inferior .**

3) El diagrama final responde a estos fenómenos donde a altas temperaturas la transformación es función del tiempo y a bajas temperaturas ocurre otra transformación que es función de la variación de la temperatura.

4) Las líneas que indican el avance de transformación martensítica no son horizontales como en el caso anterior (variación del tiempo) sino verticales (variación de temperatura).

Objetivo

Consiste en determinar las temperaturas de comienzo de transformación M_s , de fin de transformación M_f y los porcentajes de transformación intermedios, en función de las temperaturas.

Instrumentación

- 1) M_s y M_f dependen de la composición química y de la temperatura de austenización.**
- 2) Dado que la dureza de la martensita es función del porcentaje de carbono los valores de dureza no aportan información sobre porcentajes de transformación a distintas temperaturas.**
- 3) La información se puede obtener metalográficamente utilizando el método de revenido del porcentaje de martensita que se hubiere obtenido a esa temperatura de estudio.**

Ensayos

- 1) Se prepara un lote de probetas de dimensiones reducidas del material que se quiere estudiar.**
- 2) Se calientan en un horno a temperaturas superiores a las críticas produciendo su austenización.**
- 3) Se pasa un ejemplar a un medio refrigerante que esté a la temperatura que se desea estudiar (inferior a M_s).**

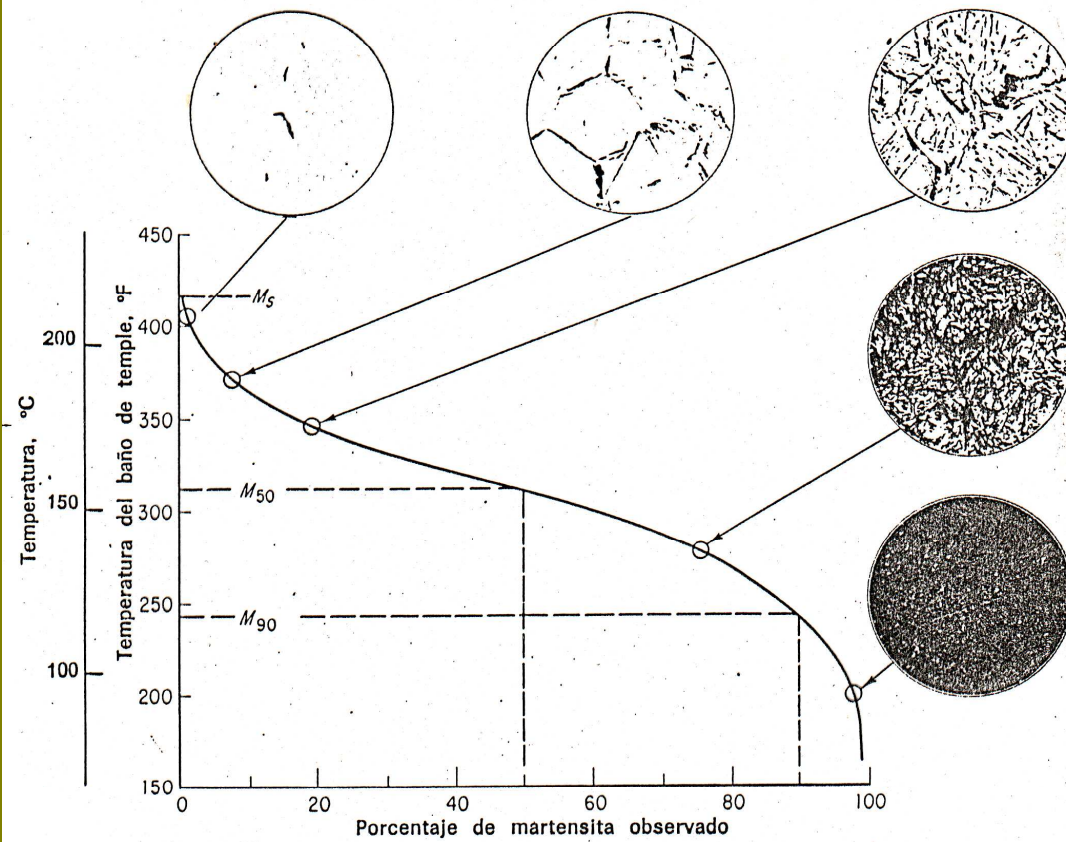
4) Se calienta a una temperatura algo superior a M_s , con lo que se logra el revenido del porcentaje de martensita formado.

5) A continuación se enfría rápidamente hasta la temperatura ambiente.

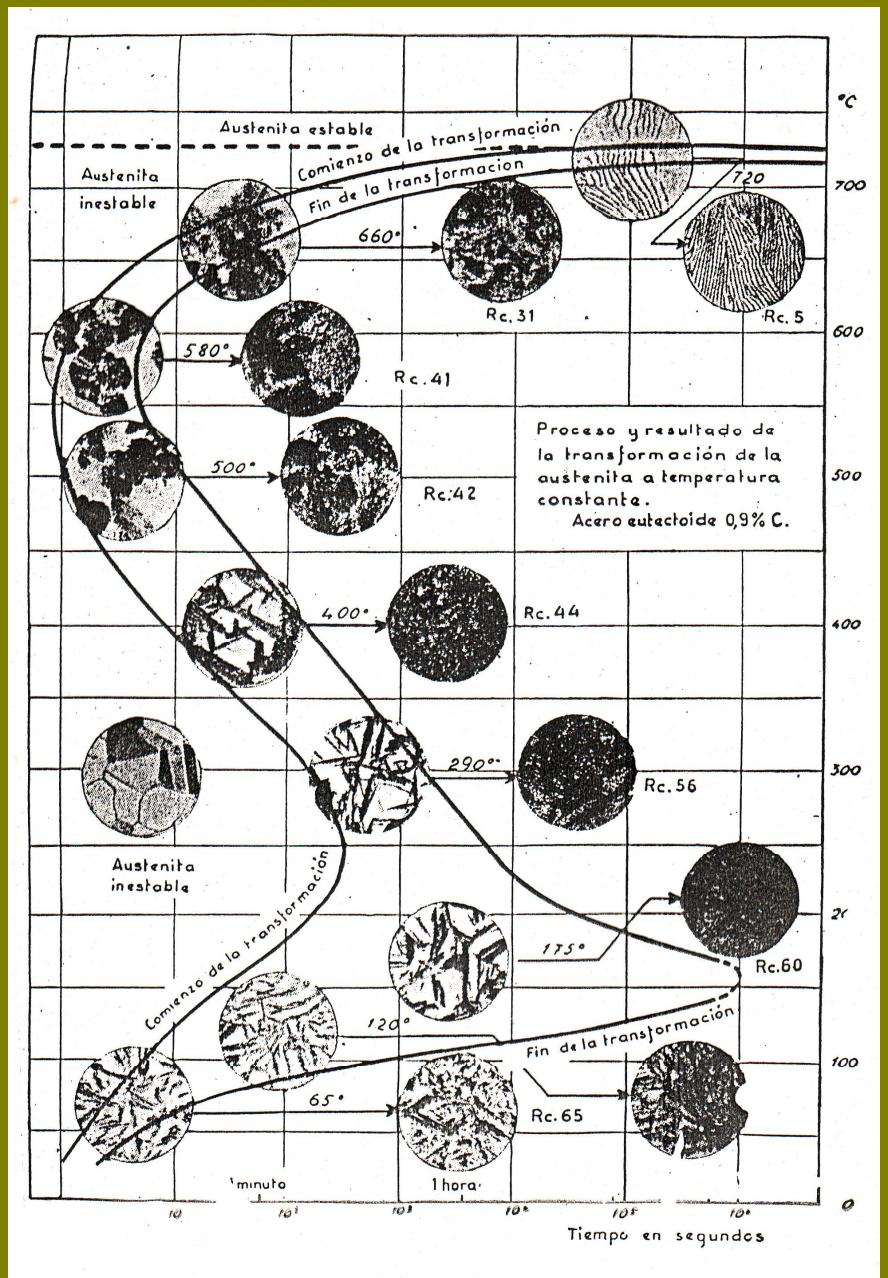
6) Se repite este proceso a distintas temperaturas de estudio con los ejemplares austenizados restantes.

7) Se analizan los distintos ejemplares metalográficamente. Dado que la martensita revenida aparecerá más oscura (producto de la oxidación) que la obtenida entre la temperatura a estudio y M_f , se podrá cuantificar el porcentaje de martensita que se había alcanzado a la temperatura a estudio.

ENSAYO 7



Avance de la transformación de la austenita en martensita. Las microestructuras $\times 500$.



RESULTADO 5

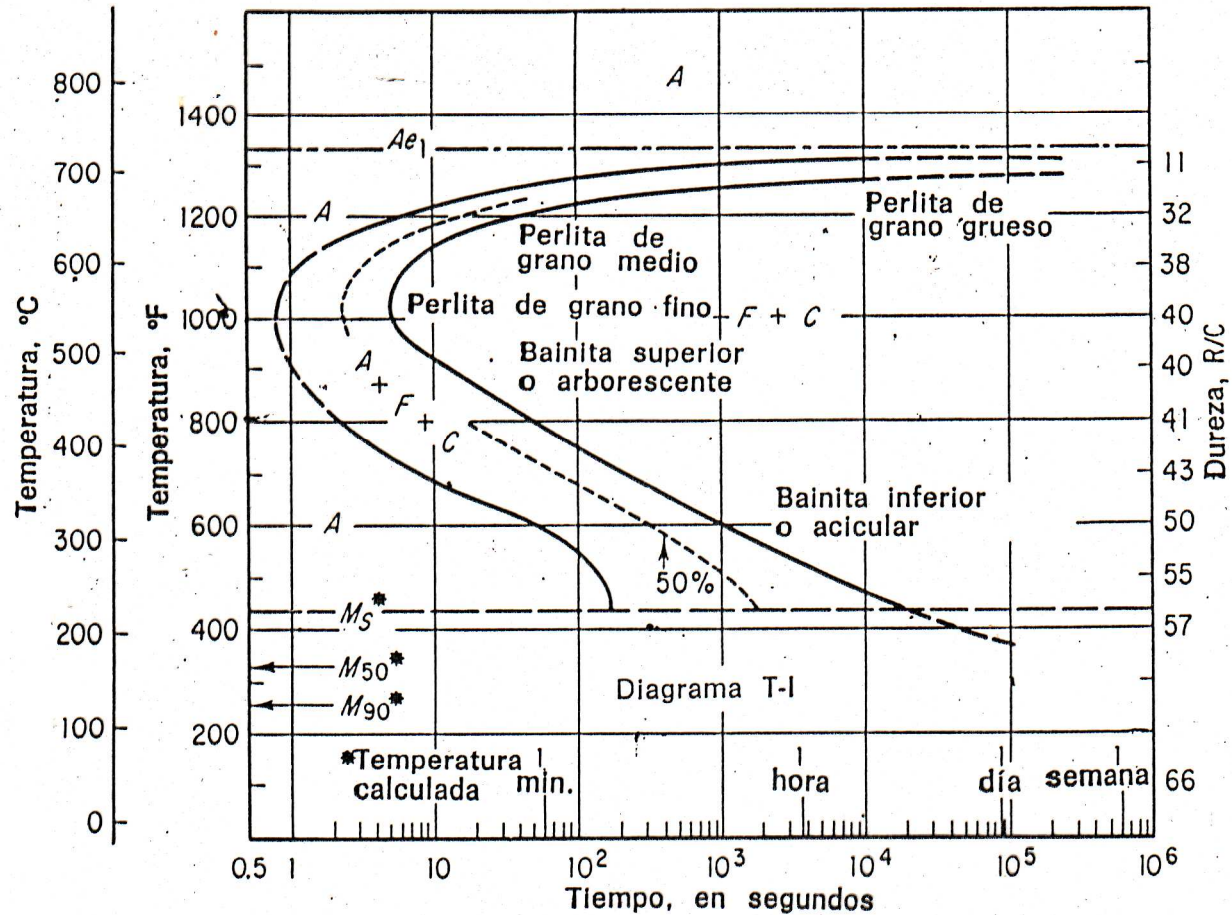
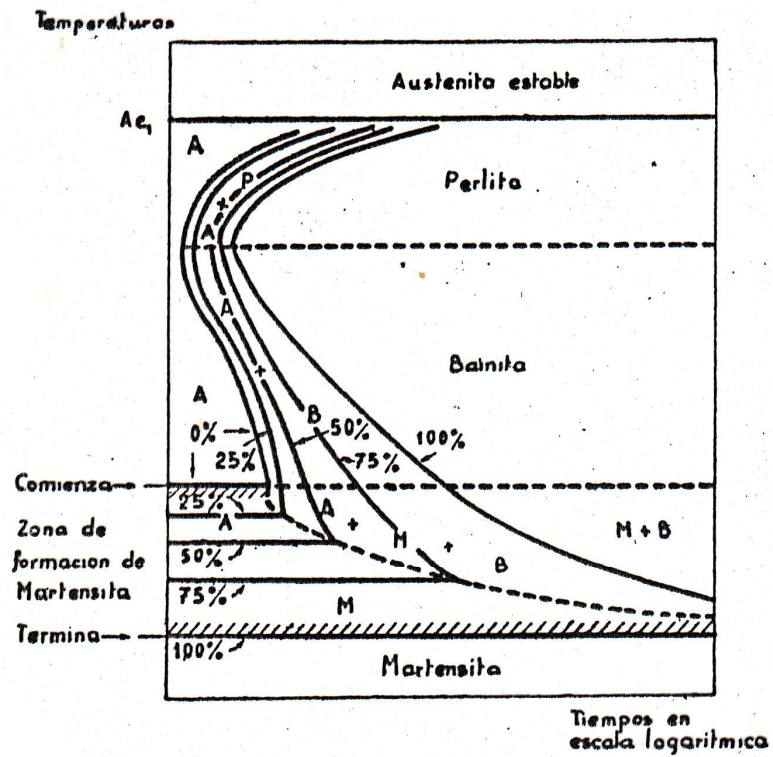


Diagrama T-I de un acero eutectoide 1080 de composición, 0,79 % de C, 0,76 % de Mn; austenizado a 900°C, tamaño de grano 6A = austenita, F = ferrita, C = carburo, M = martensita.

Resultados

El conjunto de datos sobre porcentajes de transformación alcanzados a distintas temperaturas permite construir la parte inferior de la curva "S".



Avance de las transformaciones de la austenita. En la zona martensítica del diagrama, se ha introducido la modificación debida a Morris Cohen.

Estructuras

PERLITA

- * Mezcla eutectoide de ferrita y cementita**
- * Resistencia aproximada 84 kg/mm²**
- * Ductilidad aproximada 20%**

*** Dureza**

- a) Perlita gruesa 15 HRc**
- b) Perlita media 20 HRc**
- c) Perlita fina 30 HRc**

*** Distancia interlaminar**

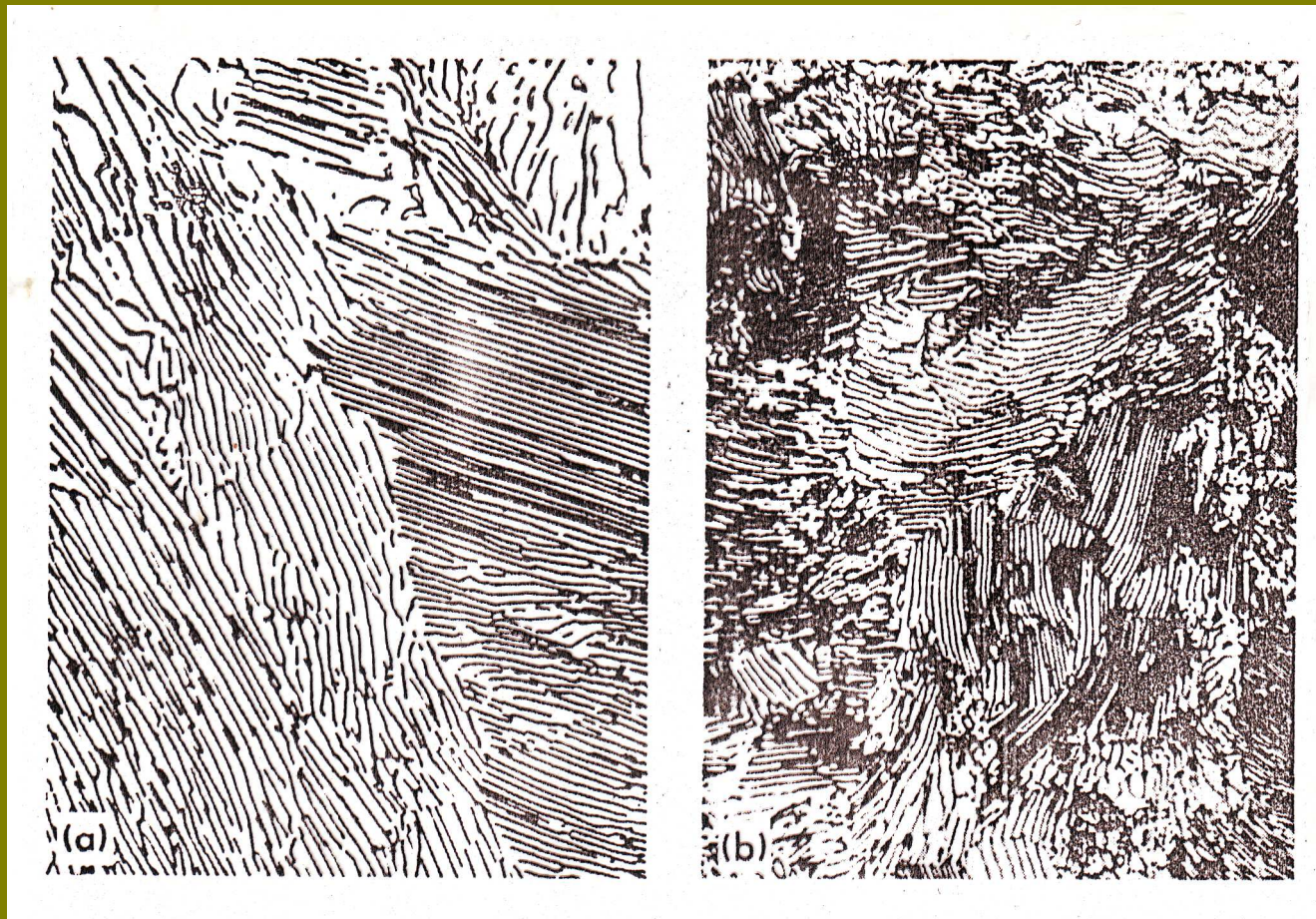
- a) Perlita gruesa > 400 micrones**
- b) Perlita media 200 - 400 micrones**
- c) Perlita fina < 200 micrones**

BAINITA SUPERIOR

- * Aspecto arborescente o plumoso**
- * Dureza aproximada 40 - 50 HRc**

BAINITA INFERIOR

- * Aspecto acicular**
- * Dureza 50 - 60 HRc**



Estructuras perlíticas obtenidas por transformación isotérmica de la austenita a distintas temperaturas subcríticas. (a) 704°C, (b) 662°C, (c) 621°C, (d) 579°C, aumentado $\times 1.500$. Obsérvese cómo la perlita es cada vez más fina al descender la temperatura.

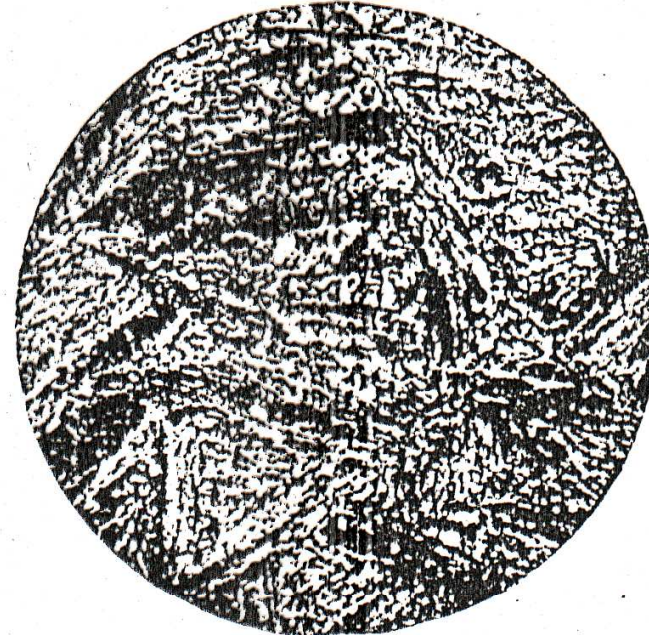


Estructuras perlíticas obtenidas por transformación isotérmica de la austenita a distintas temperaturas subcríticas. (a) 704°C, (b) 662°C, (c) 621°C, (d) 579°C, aumentado $\times 1.500$. Obsérvese cómo la perlita es cada vez más fina al descender la temperatura.



× 2.500

Bainita superior obtenida en la transformación isotérmica a 550° de un acero de 0,80 % de carbono.



× 2.500

Bainita inferior acicular muy fina obtenida en la transformación isotérmica a 350° de un acero de 0,80 % de carbono.



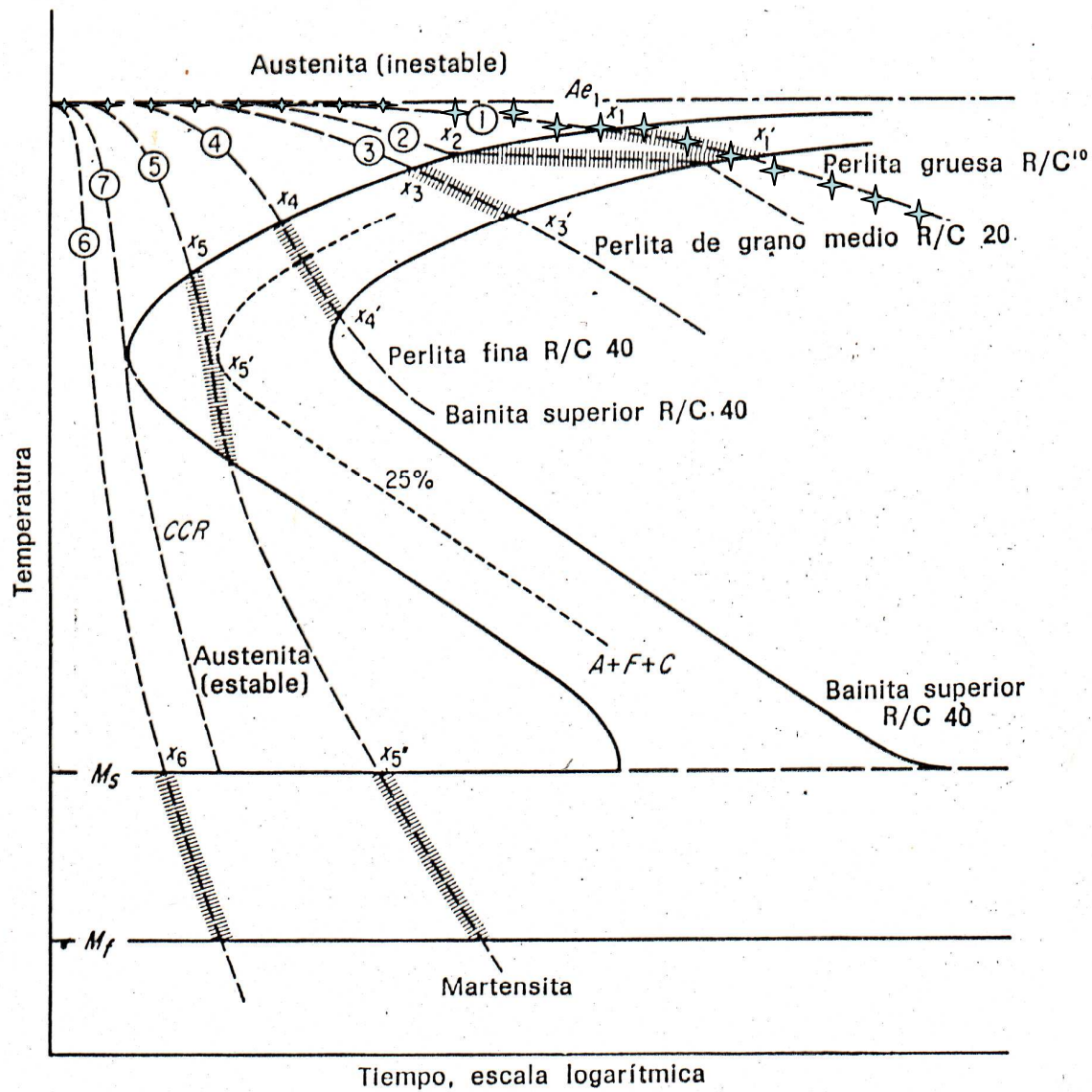
Bainita arborescente y perlita fina en una matriz martensítica (blanca), $\times 1.000$.



Bainita acicular o inferior, $\times 2.500$.

Relación entre las curvas de enfriamiento y los diagramas TI

Si disponemos de las curvas de enfriamiento temperatura - tiempo obtenidas durante un tratamiento térmico y las superponemos a los diagramas de transformación isotérmica TI (características del material) podemos predecir las estructuras metalográficas probables y por consiguiente las propiedades mecánicas esperadas.



Curvas de enfriamiento superpuestas a un diagrama T-I hipotético, correspondiente a un acero eutéctico. Las partes rayadas de las curvas indican la transformación.



Curva 1



Proceso

- * X_1 - Comienzo de la transformación de la austenita.
- * X'_1 - Fin de la transformación de la austenita.

Resultados

- * Perlita de grano grueso.
- * Dureza aproximada 15 HRc.

Observaciones

Es posible que pueda identificarse alguna diferencia en el tamaño de la perlita obtenida entre X_1 y X'_1 que no se reflejará sustancialmente en las propiedades mecánicas.

Luego de X'_1 se puede enfriar a cualquier velocidad y la estructura no sufrirá modificaciones.

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico corresponde a un recocido.

Curva 2

Proceso



- * Se enfría rápidamente hasta X_2**
- * Se mantiene a dicha temperatura entre X_2 y X'_2**
- * Luego de finalizar la transformación en X'_2 se puede enfriar a cualquier velocidad y la estructura no se modificará**

Resultados

- * Perlita uniforme**
- * Dureza aproximada entre 15 - 20 HRc**

Observaciones

La pieza tendrá propiedades mecánicas uniformes debido a la idéntica microestructura

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico corresponde a un recocido isotérmico

Curva 3



Proceso

- * X_3 - Se inicia la transformación de la austenita en perlita gruesa
- * X'_3 - Termina la transformación de la austenita en la zona de perlita media
- * Dado que $tx_3 - tx'_3 > tx_1 - tx'_1$ la variedad de la perlita es mayor que en el caso anterior

Resultados

- * La perlita resultante del tratamiento es gruesa a media variando las cantidades relativas en función del escalón de temperaturas
- * Dureza aproximada 15 - 20 HRc

Observaciones

Las pequeñas variaciones de dureza debido al tipo de perlita se manifestarán en la dureza promedio de la microestructura.

Luego de X'_3 se puede enfriar a cualquier velocidad y la estructura no sufrirá modificaciones.

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico corresponde a un normalizado

Curva 4

Proceso



- * X_4 - Comienza la transformación de la austenita en perlita media
- * X'_4 - Finaliza la transformación de la austenita en perlita fina

Resultados

- * La perlita que surge del tratamiento varía entre media y fina en función de la pendiente de la curva de enfriamiento
- * Dureza aproximada 20 - 30 HRc

Observaciones

Como en el caso anterior las variaciones de dureza debido a las diferencias en la perlita se manifestarán en la dureza promedio.

Luego de X'_4 cualquiera sea la velocidad de enfriamiento la estructura no sufrirá modificaciones.

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico corresponde a un temple suave en aceite o en aire forzado

Curva 5



Proceso

* X_5 - Comienza la transformación de la austenita en perlita fina

* X'_5 - La curva de enfriamiento es tangente a la curva de 25% de transformación, por lo que alcanza a esa temperatura este valor máximo de transformación

*** La transformación se detiene en X'_5 ya que la curva de enfriamiento corta porcentajes menores de transformación .**

La perlita no puede transformarse en austenita a temperaturas bajas, por lo que el porcentaje transformado se estaciona en ese 25% de perlita alcanzado y el 75% de austenita remanente se transformará en otras estructuras a bajas temperaturas.

*** En X''_5 que coincide con M_s comienza la transformación martensítica del remanente de austenita.**

*** En M_f finaliza la transformación y se completa el 100%.**

Resultados

- * La estructura resultante estará integrada por un 25% de perlita fina y un 75% de martensita.**

Tratamiento Térmico

El tratamiento térmico corresponde a un temple con velocidad de enfriamiento inferior a la crítica con corte de la nariz de la curva "S"

Curva 6



Proceso

- * La velocidad es tan rígida que escapa la nariz de la curva "S"
- * La transformaci3n de la austenita en martensita comienza en X_6 que coincide con M_s
- * La transformaci3n del 100% finaliza en X'_6 que coincide con M_f

Resultados

- * Estructura totalmente martensítica

Observaciones

La transformación en martensita se alcanza a una velocidad de enfriamiento superior a la crítica

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico corresponde a un temple en agua

Curva 7



Esta curva de enfriamiento es tangente a la nariz de la curva "S" y es la mínima velocidad que permite alcanzar una transformación martensítica total (velocidad crítica de temple).

Descomposición de la austenita en enfriamiento continuo - Diagramas TC

Conceptos

*** La superposición de curvas de enfriamiento temperatura - tiempo sobre los diagramas TI no es un procedimiento estrictamente correcto, ya que las primeras son obtenidas en un proceso de enfriamiento continuo mientras las segundas en transformaciones isotérmicas.**

*** Para ello es necesario construir los diagramas de transformación continua TC y entonces sí superponer las curvas de enfriamiento.**

*** Sin embargo las curvas TC ofrecen mayores dificultades de obtención y en la práctica no proporcionan significativas ventajas.**

*** Las curvas TC son similares a las TI desplazándose ligeramente las líneas de comienzo y fin de transformación hacia la derecha y hacia abajo.**

*** Dado que las curvas TC son más favorables que las TI para el resultado del tratamiento, se puede utilizar las curvas TI en lugar de las TC teniendo en cuenta esas limitaciones.**

Descomposición de la austenita en enfriamiento continuo - Diagramas TC

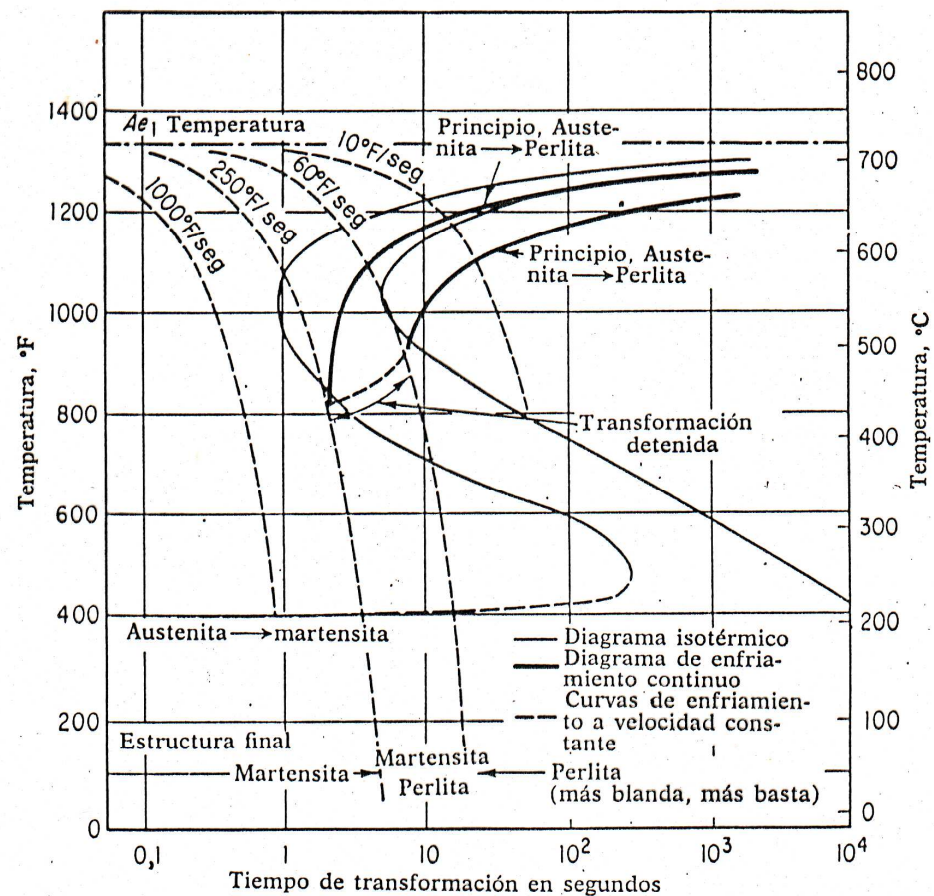
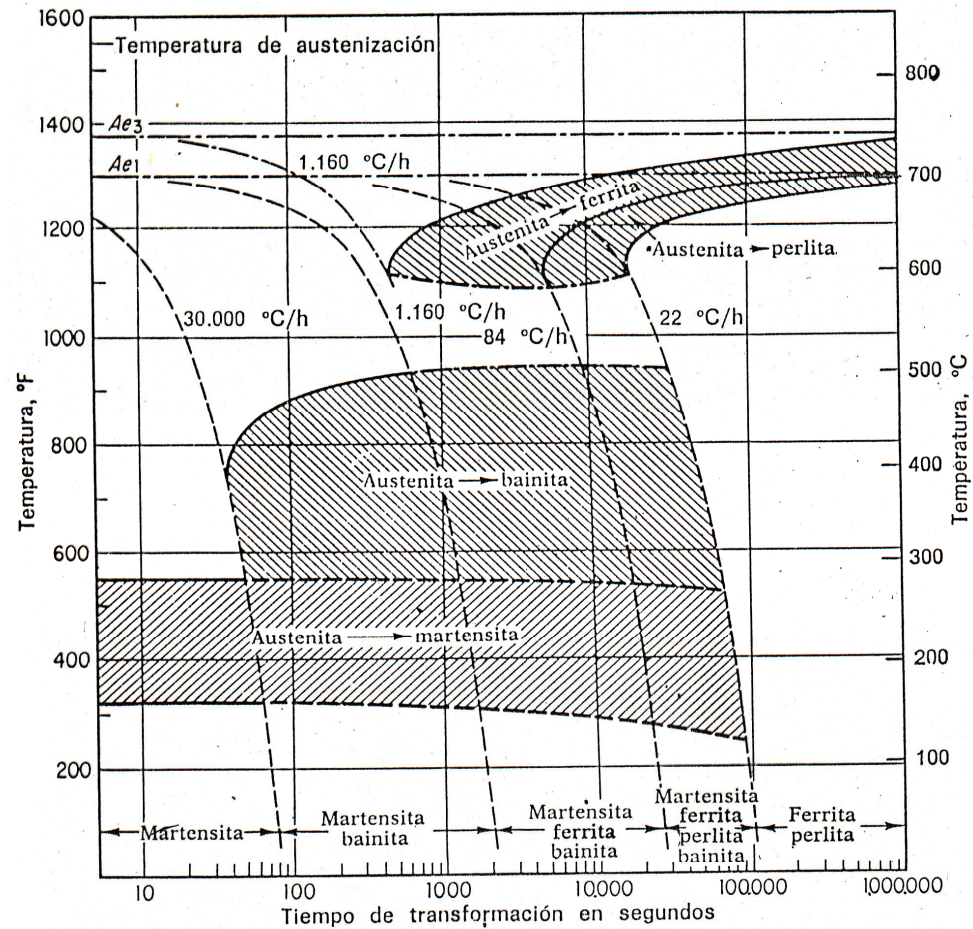


Diagrama de enfriamiento continuo deducido del diagrama de transformación isotérmica de un acero ordinario al carbono eutectoide.

Diagrama TC de un acero SAE 4340



Diagramas T-C de un acero de triple aleación de composición 0,42 % de carbono, 0,78 % de manganeso, 1,79 % de níquel, 0,80 % de cromo, 0,33 % de molibdeno.

Diagramas TI de aceros hipoeutectoides e hipereutectoides

Estos aceros tienen de particular y distinto a los aceros eutectoides una tercera línea que aparece generalmente por encima de la nariz de la curva "S" y que indica la zona de transformación de la austenita en ferrita o cementita según el tipo de acero.

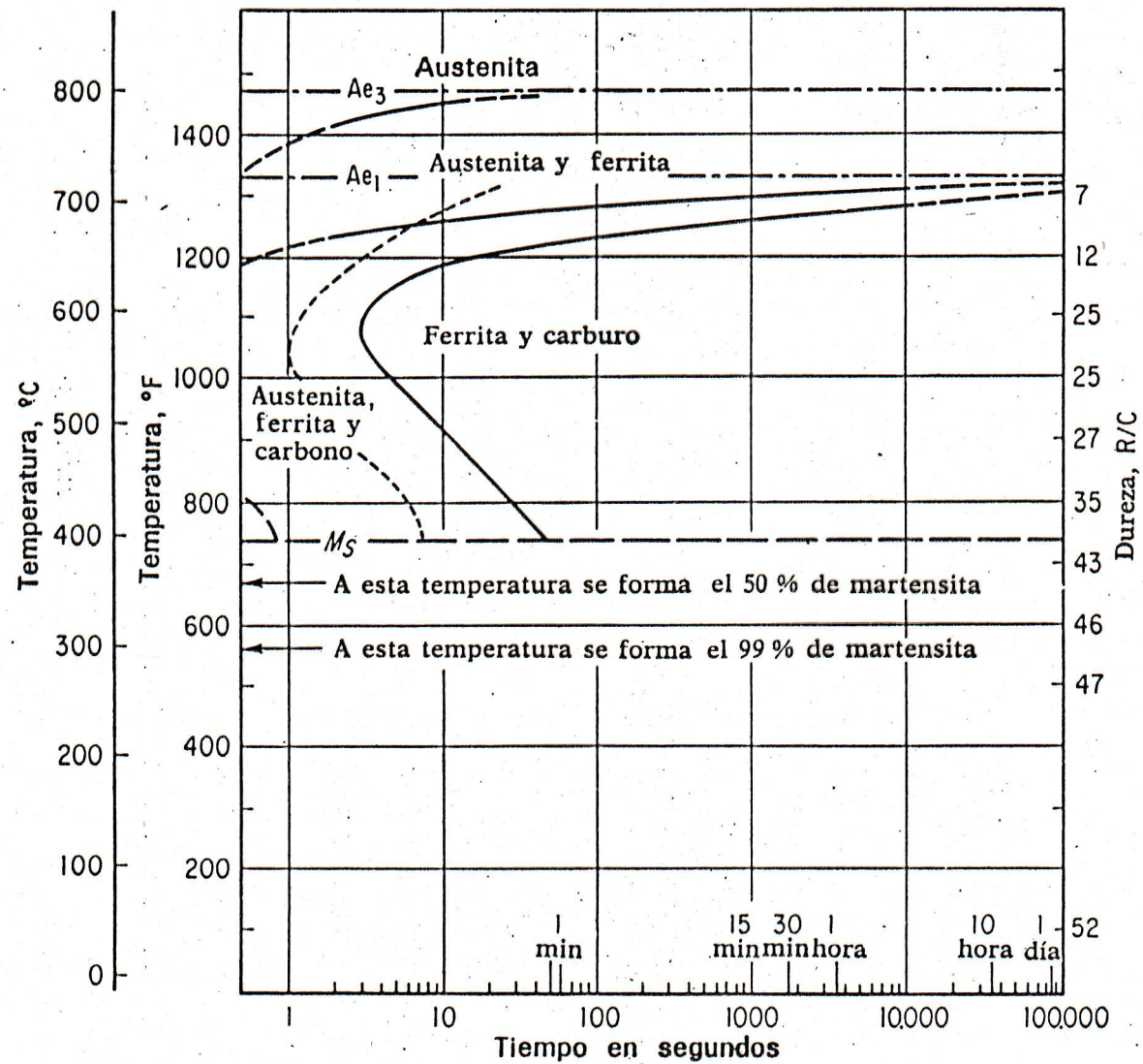


Diagrama T-I de un acero de 0,35 % de carbono y 0,37 % de manganeso. Tamaño del grano: el 75 %, de 2 a 3; el 25 %, de 7 a 8. Austenizado a 843°C.

Factores que influyen en la posición de las curvas TI

Condiciones determinantes

- 1) Composición química**
- 2) Tamaño de grano austenítico**

Factores que influyen en la posición de las curvas TI

Efectos sobre las curvas TI

- 1) El aumento del % C desplaza la curva "S" hacia la derecha**
- 2) El aumento del % de los elementos de aleación desplaza la curva "S" hacia la derecha**
- 3) El aumento del tamaño de grano austenítico desplaza la curva "S" hacia la derecha**

Consecuencias

- 1) Menor velocidad crítica de temple**
- 2) Facilita el temple**
- 3) Mejora la profundidad del temple**

Factores que influyen en la posición de las curvas TI

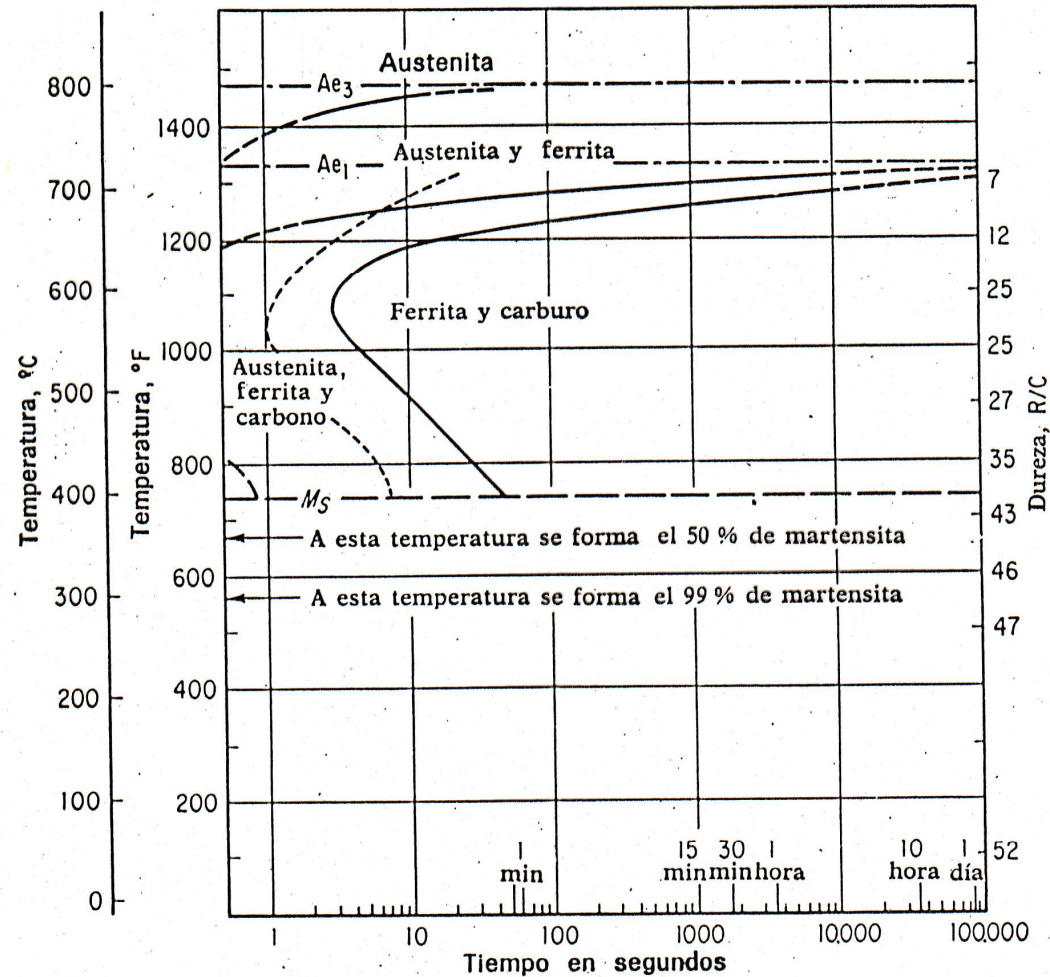


Diagrama T-I de un acero de 0,35 % de carbono y 0,37 % de manganeso. Tamaño del grano: el 75 %, de 2 a 3; el 25 %, de 7 a 8. Austenizado a 843°C.

Factores que influyen en la posición de las curvas TI

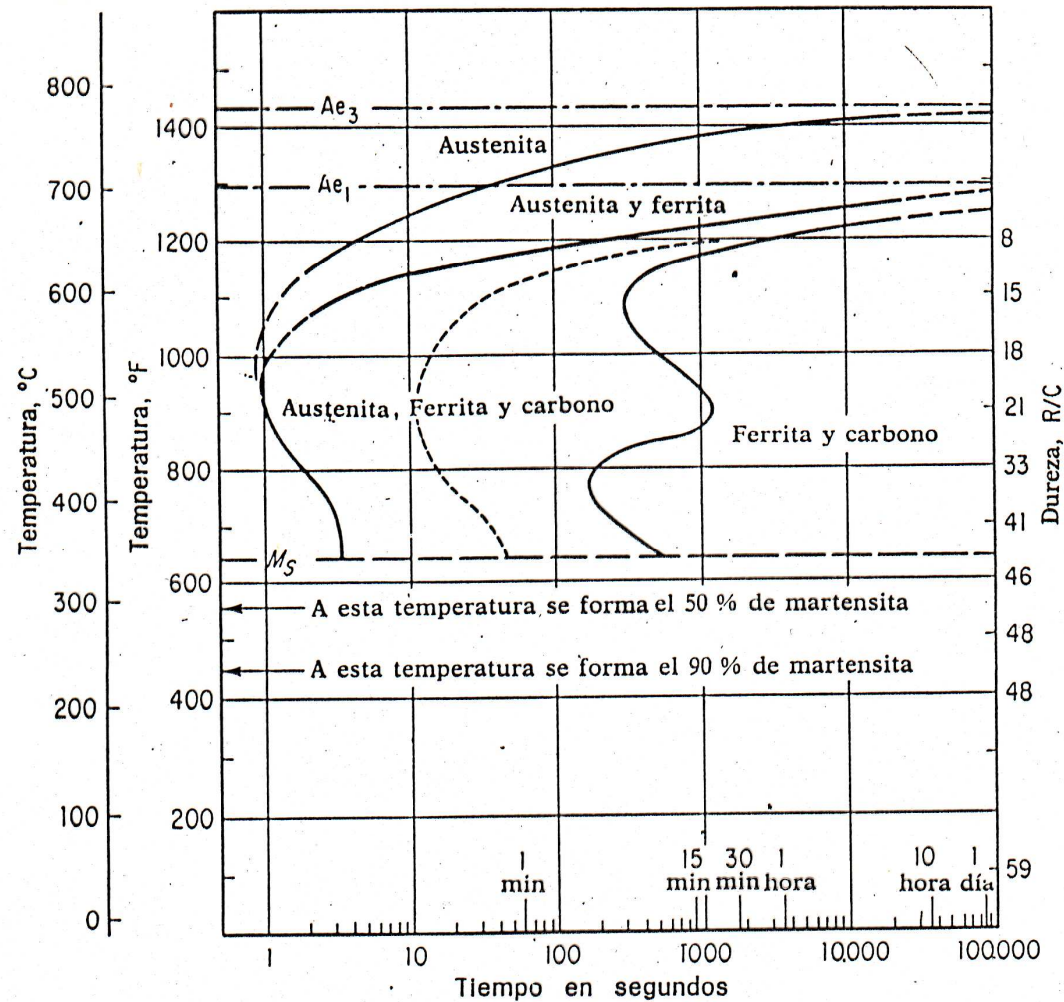


Diagrama T-I de un acero de 0,35 % de carbono y 1,85 % de manganeso. Tamaño de grano: el 70 %, 7; el 30 %, 2. Austenizado a 843°C.

Factores que influyen en la posición de las curvas TI

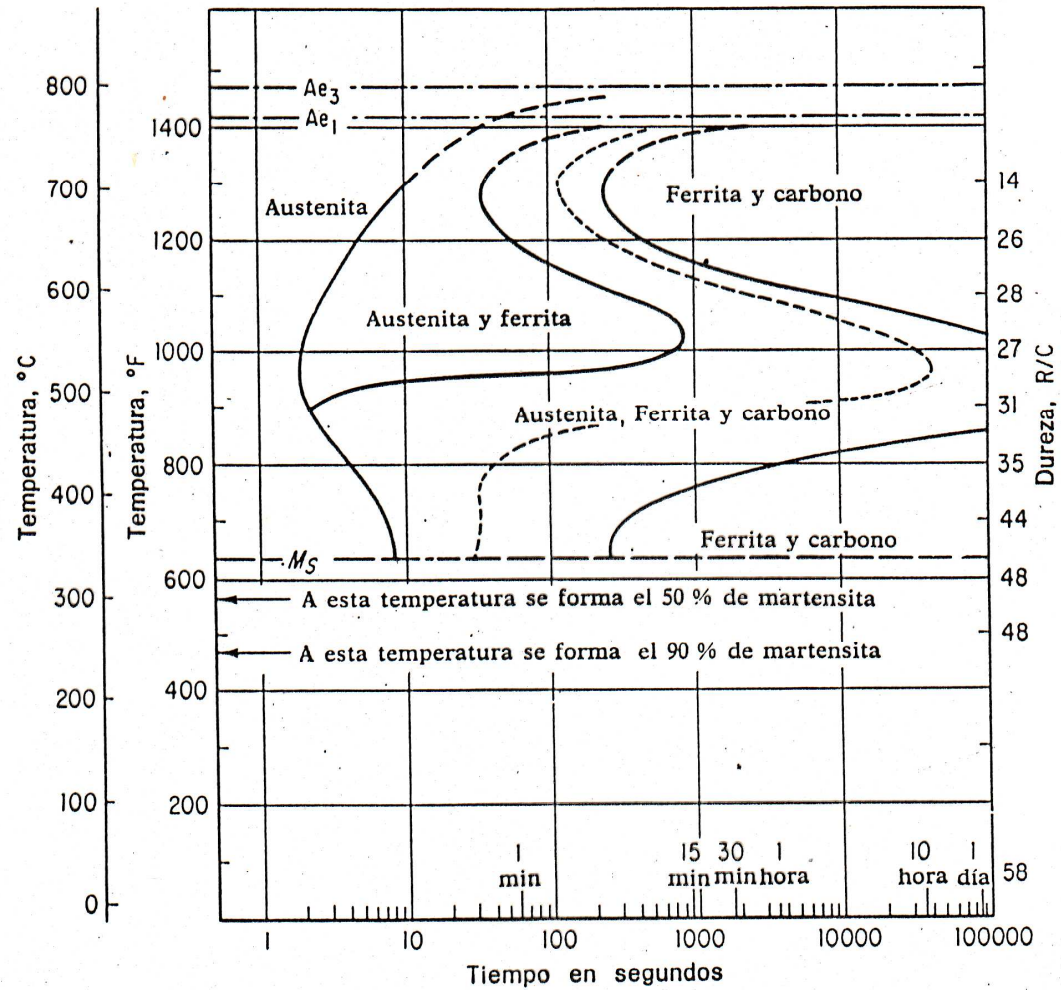


Diagrama T-I de un acero de 0,33 % de carbono, 0,45 % de manganeso y 1,97 % de cromo. Tamaño de grano: 6 a 7. Austenizado a 870°C.

Influencia del tamaño del grano austenítico sobre la posición de las curvas TI

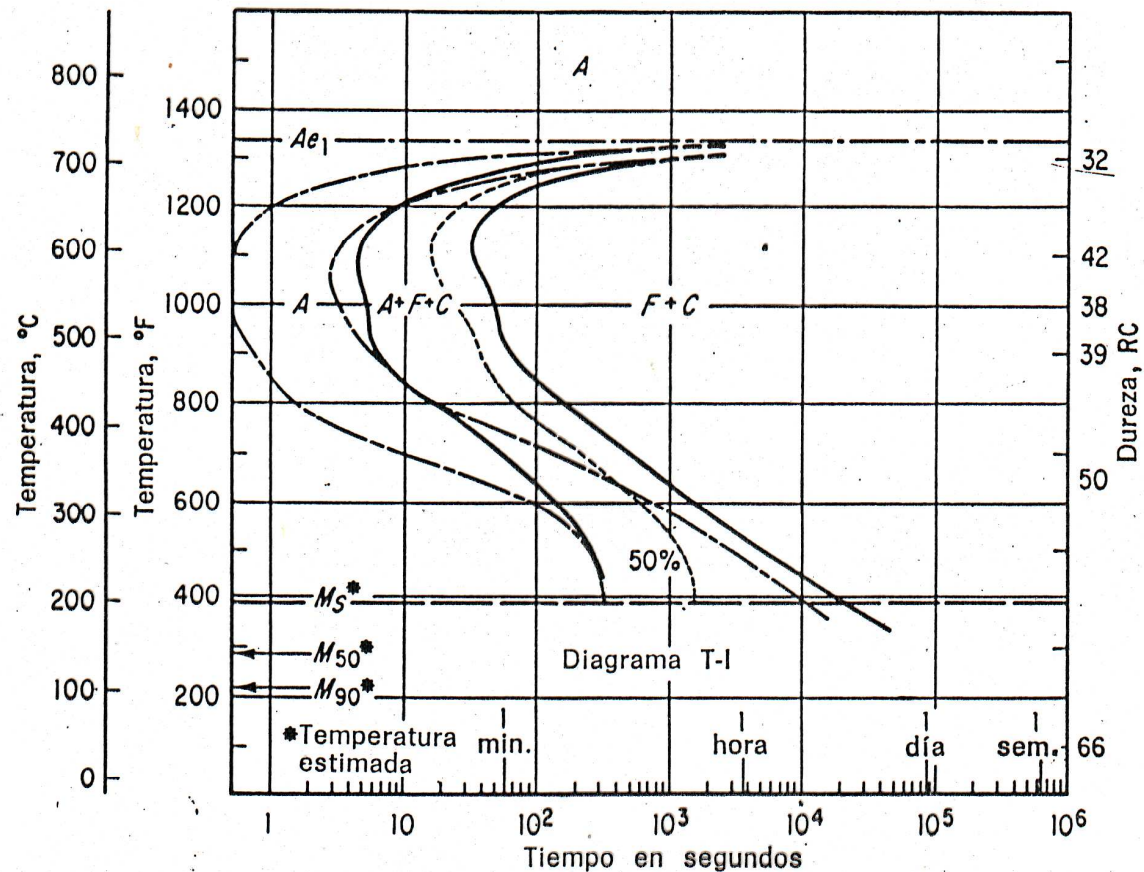


Diagrama T-I de un acero de 0,87 % de carbono, 0,30 % de manganeso y 0,27 % de vanadio. Tamaño de grano: 2 a 3. Temperatura de austenización 1.500°C. ---- Tamaño de grano: 11. Temperatura de austenización 810°C.

Influencia de los elementos de aleación sobre las curvas TI

- 1) El efecto de los elementos aleados es acumulativo. Si agregamos Mn al acero su curva TI se desplaza hacia la derecha. Si adicionamos a este Cr la curva se corre más hacia la derecha.**

Influencia de los elementos de aleación sobre las curvas TI

2) Los elementos aleados bajan la velocidad crítica de temple.

Ejemplo

Acero SAE 4340 ➔ Composición : (0,42%C , 0,78%Mn , 1,79%Ni , 0,8%Cr , 0,33%Mo)

➔ Velocidad crítica de temple 8°c / seg.

Acero SAE 1085 ➔ Composición : Acero común al carbono eutectoide

➔ Velocidad crítica de temple 140 °c / seg.

Consecuencia ➔ Mejoran la templabilidad de los aceros

Influencia de los elementos de aleación sobre las curvas TI

- 3) La influencia de los elementos de aleación sobre la curva TI es que la desplazan hacia la derecha según el siguiente orden: V, W, Mo, Cr, Si, Ni**