

Diagramas TTT – Tratamientos Térmicos

Transformaciones Metaestables frente a Estados de Equilibrio

En las aleaciones metálicas pueden ocurrir transformaciones de fase al variar la temperatura, la composición y la presión externa. Sin embargo, los tratamientos térmicos utilizan exclusivamente variaciones de temperatura para inducir estas transformaciones, equivalente a cruzar un límite de fase en el diagrama composición-temperatura.

Durante una transformación de fase, una aleación evoluciona a través de estados de equilibrio caracterizados por el diagrama de fases. La mayoría de estas transformaciones necesitan un tiempo finito para completarse, siendo la velocidad un factor crucial en la relación entre tratamiento térmico y microestructura desarrollada.

Limitaciones de los Diagramas de Equilibrio

Velocidad de Transformación

Los diagramas de equilibrio no indican el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio, una limitación importante para aplicaciones prácticas.

Condiciones Reales

Los sistemas sólidos se aproximan al equilibrio tan lentamente que raramente se consiguen verdaderas estructuras de equilibrio en la práctica industrial.

Microestructuras Preferidas

Para muchas aleaciones de importancia tecnológica, la microestructura preferida es metaestable, intermedia entre el estado inicial y el de equilibrio.

Fenómenos de Subenfriamiento y Sobrecalentamiento

1

Condiciones de Equilibrio

Solo se alcanzan si las velocidades de calentamiento o enfriamiento son extremadamente lentas, hasta el punto de ser poco prácticas industrialmente.

2

Subenfriamiento

En enfriamientos de no equilibrio, las transformaciones ocurren a temperaturas inferiores a las indicadas por el diagrama de fases.

3

Sobrecalentamiento

En calentamientos de no equilibrio, las transformaciones ocurren a temperaturas superiores a las de equilibrio.

4

Intensidad del Fenómeno

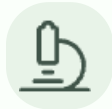
Cuanto mayor es la velocidad de enfriamiento o calentamiento, mayor es el subenfriamiento o sobrecalentamiento respectivamente.

Importancia de la Cinética en las Transformaciones



Tiempo como Factor Crítico

La influencia del tiempo en las transformaciones de fase es de gran interés para el desarrollo de microestructuras específicas.



Microestructuras Controladas

El control de la cinética permite obtener microestructuras específicas con propiedades mecánicas optimizadas para cada aplicación.

Diagramas de Transformación Isotérmica (Transformación-Temperature, Tiempo)

Definición

Representan gráficamente la transformación en función del tiempo y temperatura, manteniendo la temperatura constante durante la reacción (condiciones isotérmicas).

Aplicación

Permiten diseñar tratamientos térmicos para obtener microestructuras específicas con propiedades mecánicas controladas.

1

2

Componentes

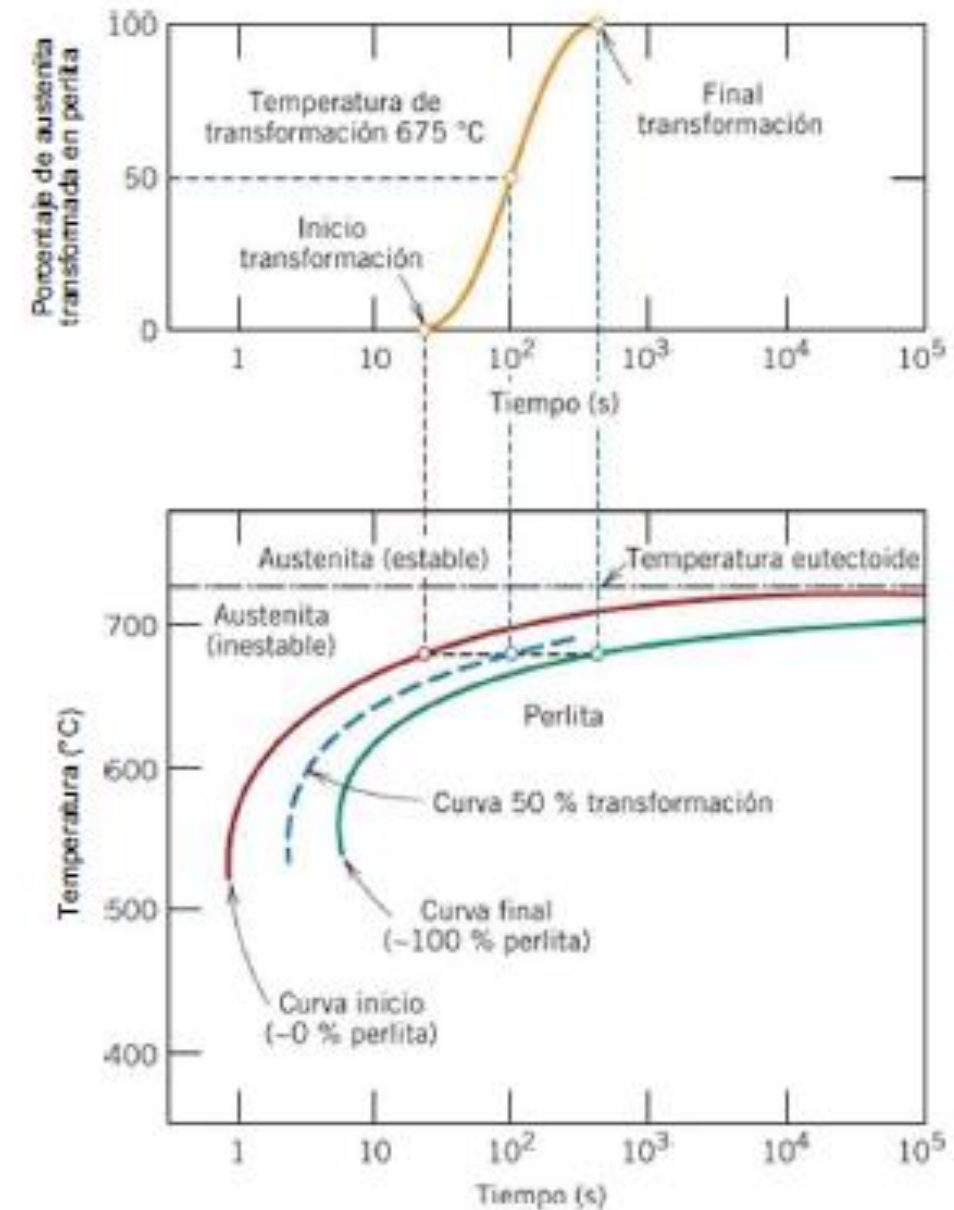
Incluyen curvas de inicio, 50% y fin de transformación, permitiendo predecir la microestructura resultante según el tiempo de mantenimiento a una temperatura específica.

3

4

Limitaciones

Son válidos solo para una composición específica y para transformaciones a temperatura constante.



Tratamientos Isotérmicos en Aceros

Calentamiento a Austenización

La muestra se calienta por encima de la temperatura eutectoide (727°C) para obtener una estructura austenítica homogénea.

Enfriamiento Rápido

Se enfría rápidamente hasta la temperatura de tratamiento isotérmico.

Mantenimiento Isotérmico

Se mantiene a temperatura constante durante un tiempo determinado, permitiendo que ocurra la transformación deseada.

Enfriamiento Final

Se enfría hasta temperatura ambiente, preservando la microestructura obtenida durante el tratamiento isotérmico.

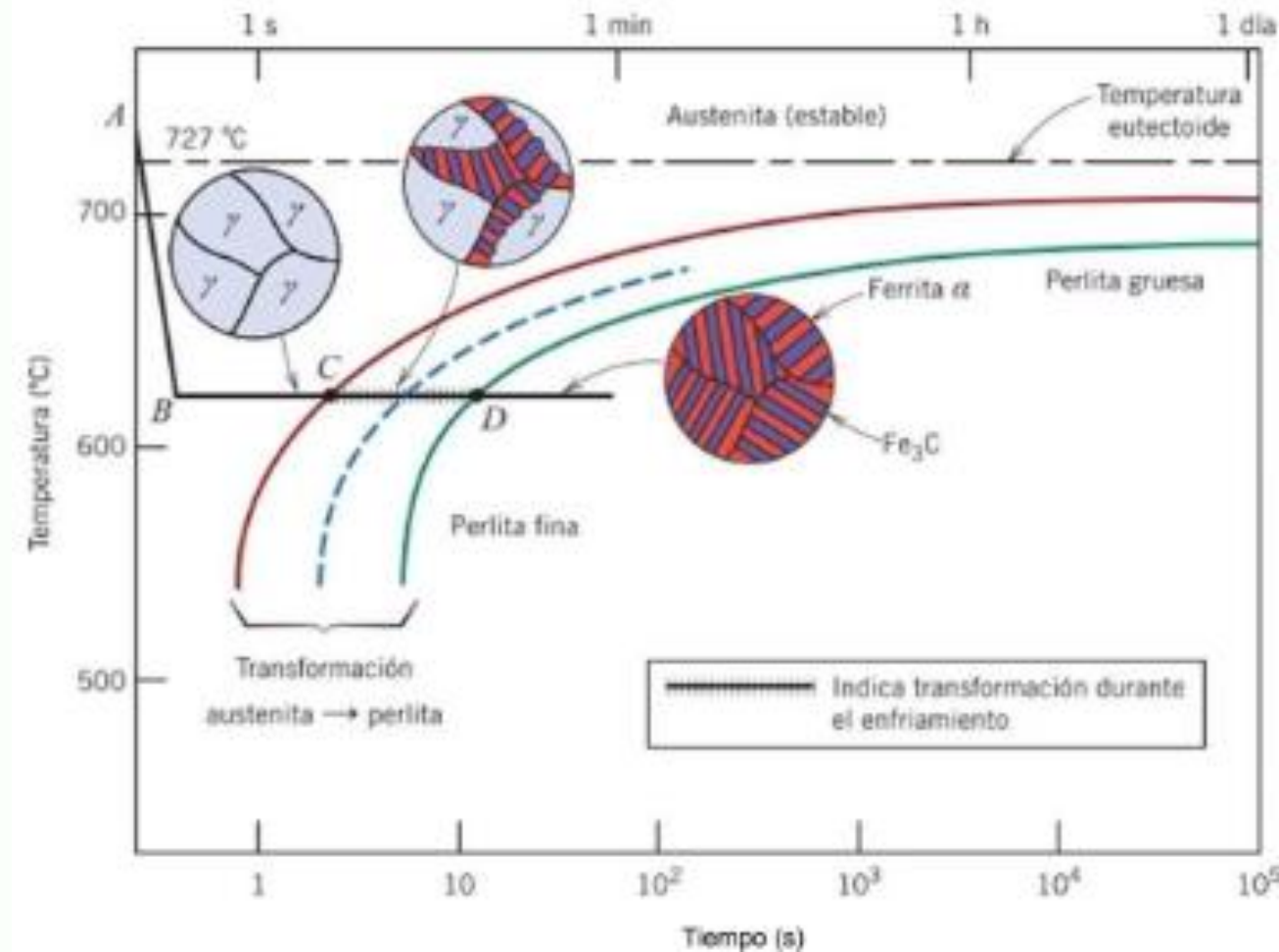


Diagrama TTT para la reacción Eutectoide en Aceros

Procedimiento

Austenita (γ)

Fase inicial con 0,76% C en peso, estructura FCC, estable a alta temperatura.

Perlita

Microestructura resultante formada por láminas alternadas de ferrita y cementita.

Bainita

Consta de fases ferrita y cementita, pero con una morfología diferente a la perlita.

Martensita



Enfriamiento

Al descender por debajo de 727°C (temperatura eutectoide), la austenita se vuelve inestable.

Transformación

La austenita se descompone en ferrita (α) con 0,022% C y cementita (Fe_3C) con 6,70% C.

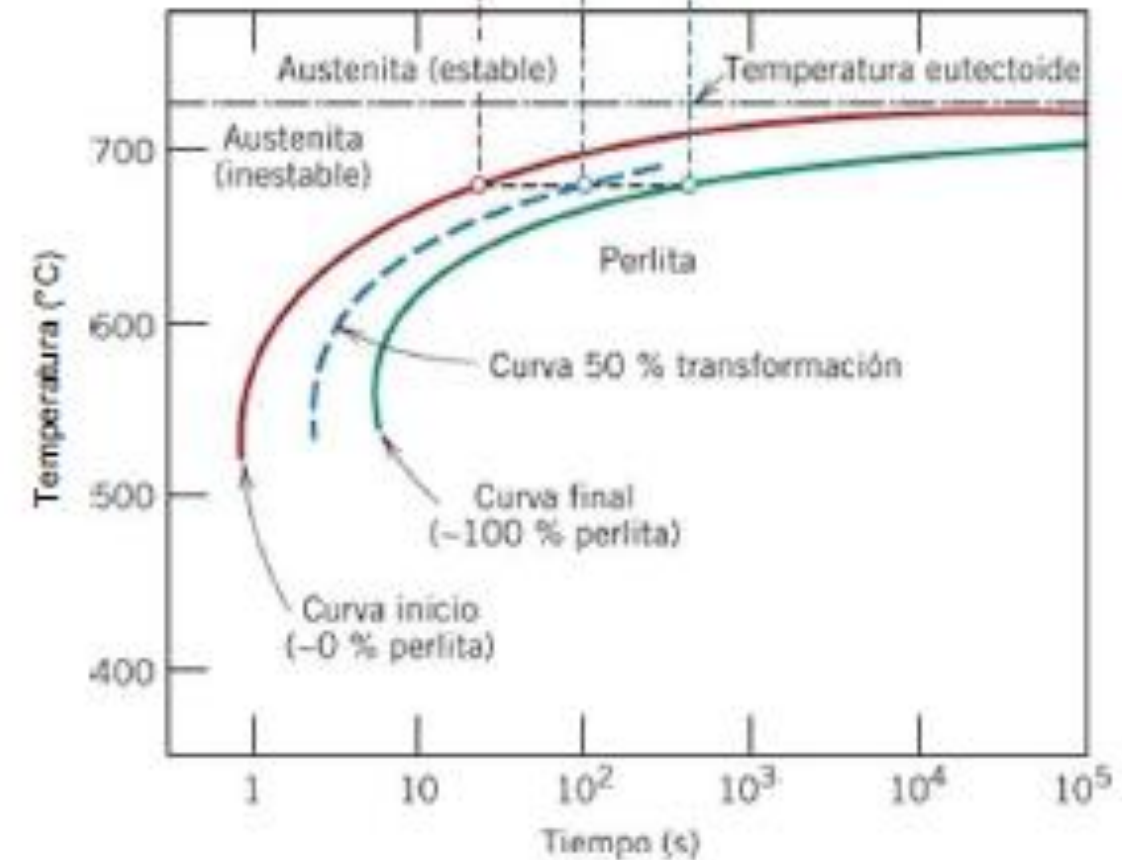
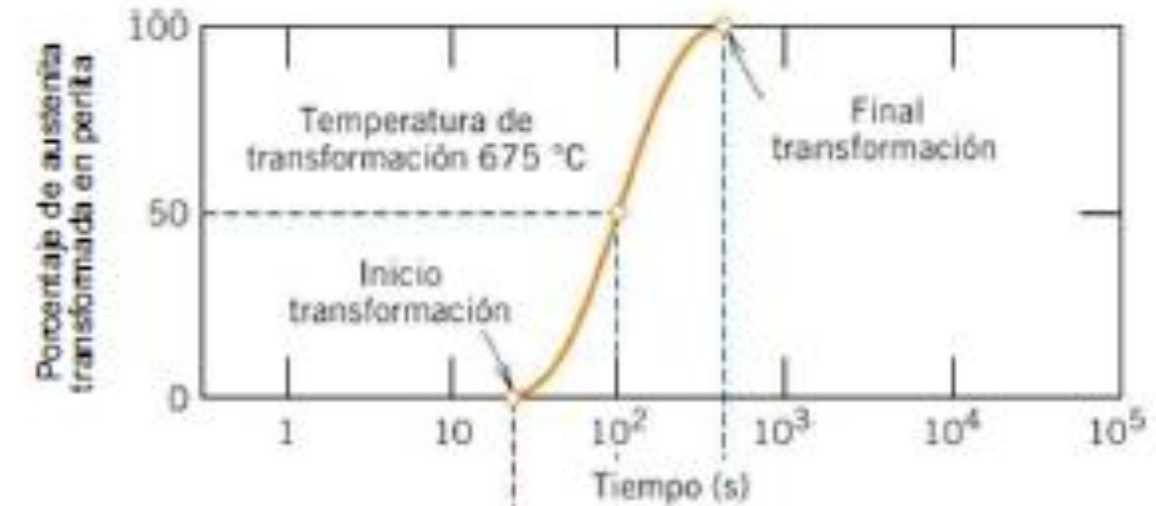


Diagrama TTT para la reacción Eutectoide en Aceros

Austenita (γ)

Fase inicial con 0,76% C en peso, estructura FCC, estable a alta temperatura.

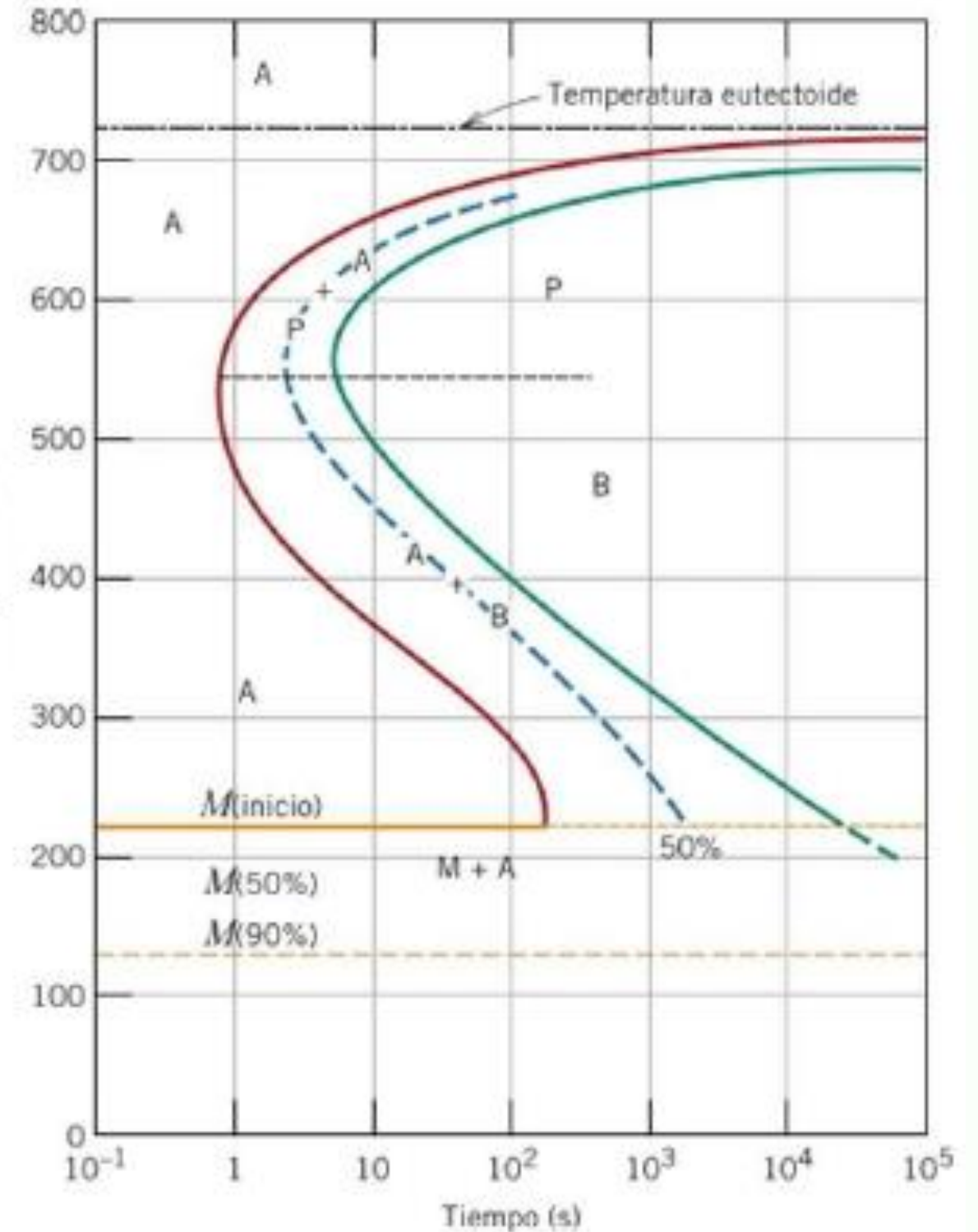
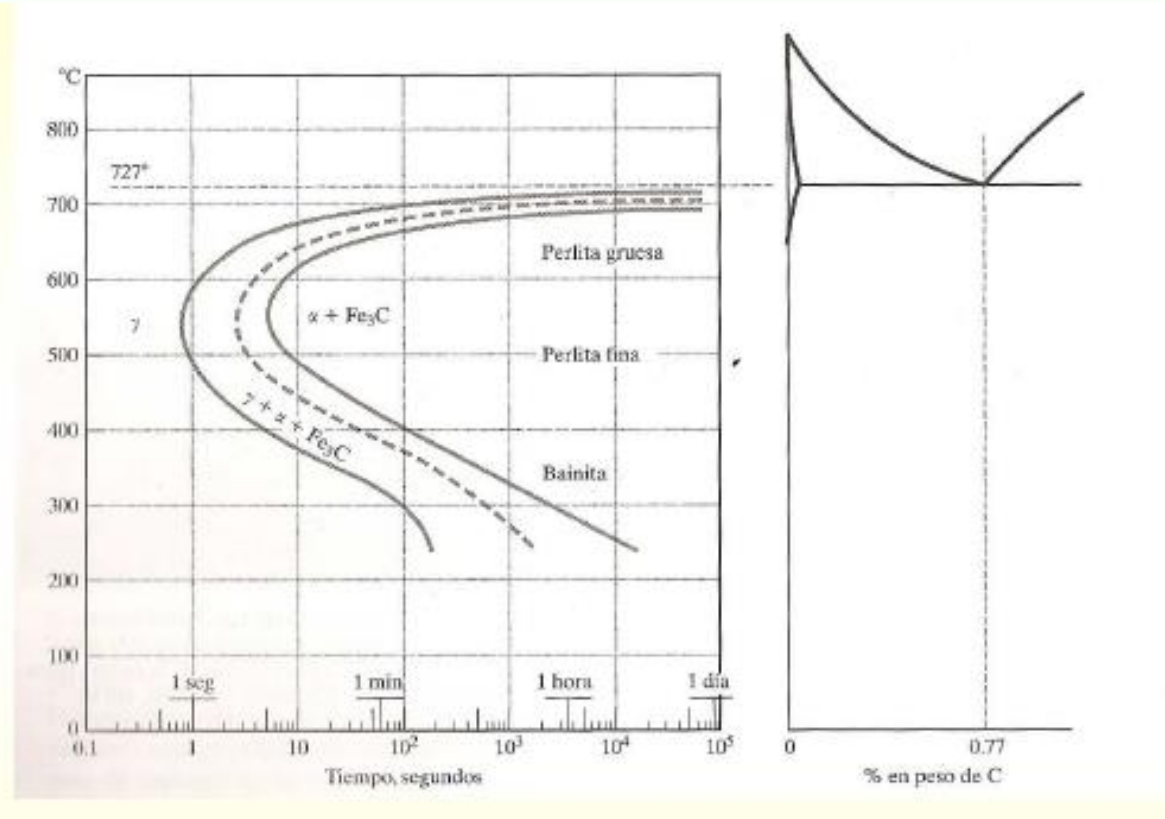
Perlita

Microestructura resultante formada por láminas alternadas de ferrita y cementita.

Bainita

Consta de fases ferrita y cementita, pero con una morfología diferente a la perlita.

Martensita



Perlita Gruesa y Perlita Fina

La relación de espesores entre las láminas de ferrita y cementita suele ser aproximadamente 8:1.

Perlita Gruesa

Se forma a temperaturas inferiores a la eutectoide. Las velocidades de difusión son relativamente elevadas, permitiendo que los átomos de carbono difundan a distancias mayores, formando láminas más gruesas.

Perlita Fina

Se forma a temperaturas más bajas (cercanas a 540°C). La velocidad de difusión del carbono decrece, resultando en láminas más delgadas.

Esta estructura de láminas finas tiene propiedades mecánicas diferentes, que se discutirán luego.



Bainita: Microestructura Intermedia



Composición

Consta de fases ferrita y cementita, pero con una morfología diferente a la perlita.



Rango de Formación

Se forma a temperaturas intermedias, entre 215°C y 540°C, por debajo del rango de formación de la perlita.



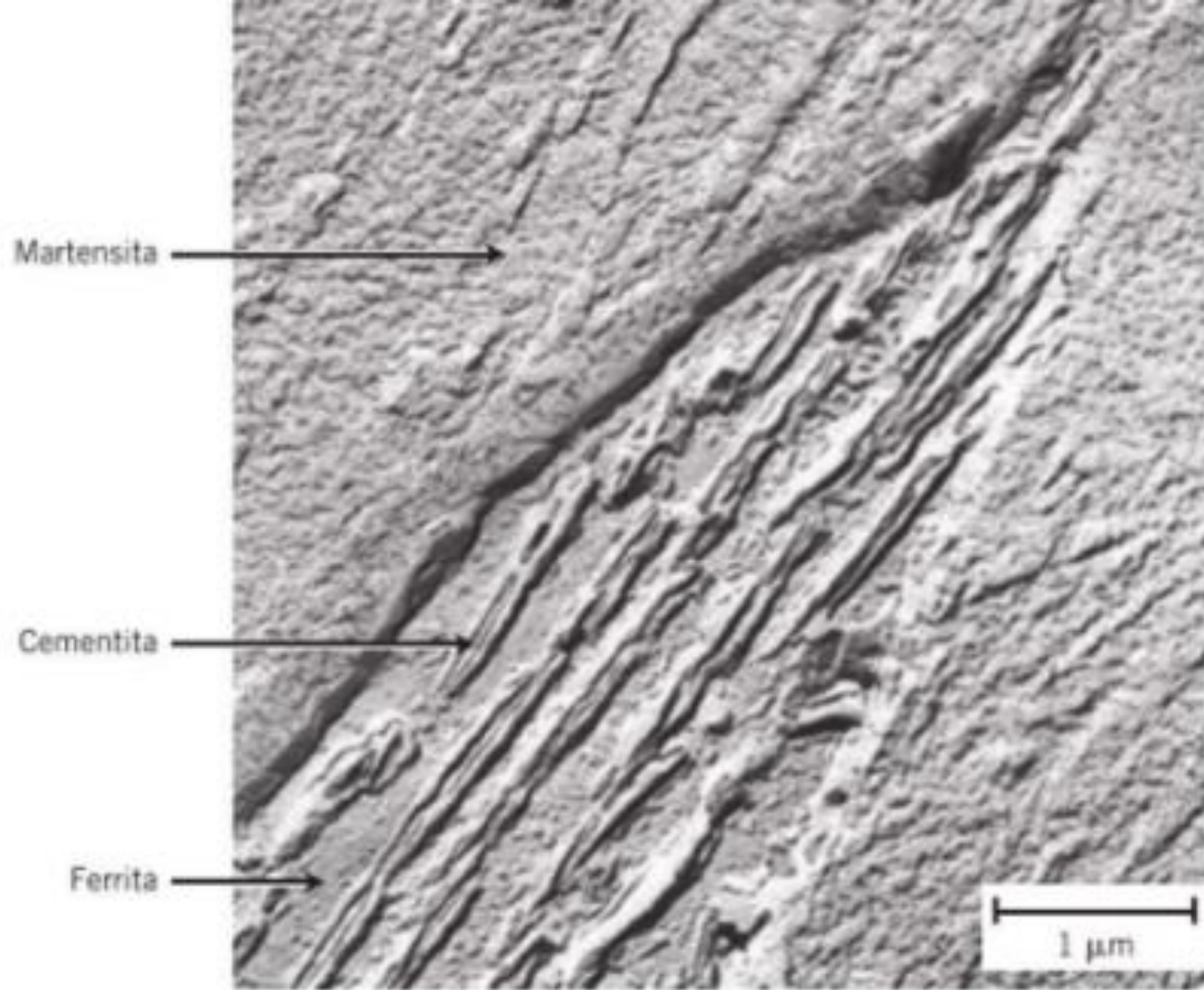
Morfología

Adopta forma de agujas o placas, con partículas alargadas de Fe_3C en una matriz ferrítica.



Observación

Sus detalles microestructurales son tan finos que su resolución solo es posible mediante microscopía electrónica.



Esferoidita: Microestructura de Equilibrio

Formación

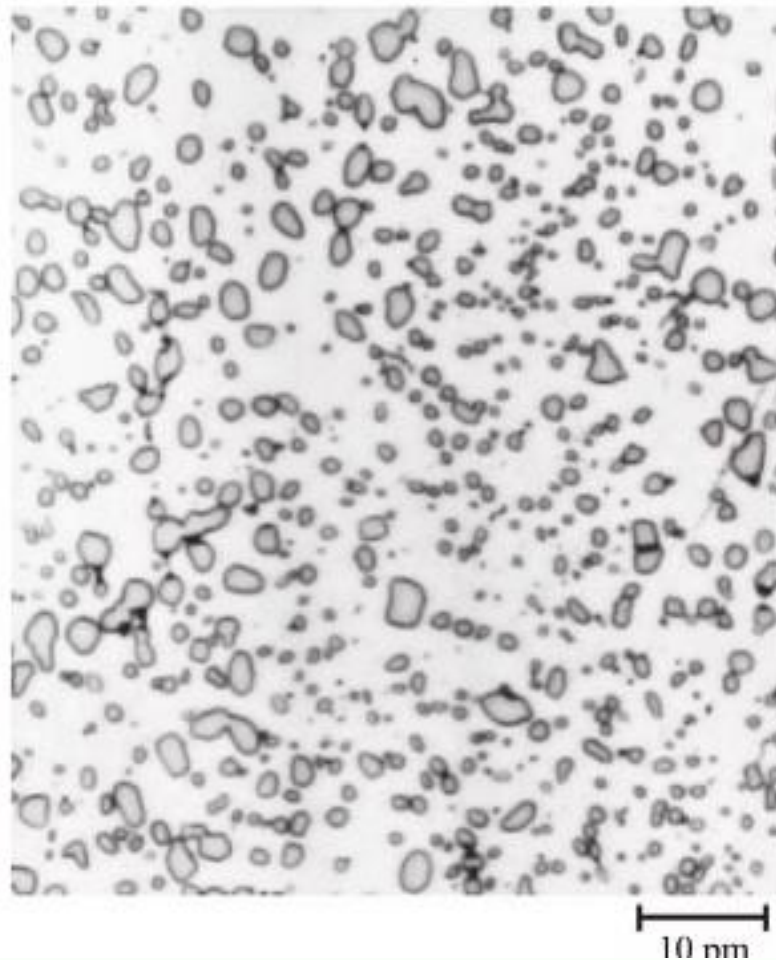
Si un acero con microestructura perlítica o bainítica se calienta hasta una temperatura inferior a la eutectoide durante un período largo (18-24 horas a 700°C), se forma la esferoidita.

Esta transformación ocurre mediante difusión del carbono sin que varíen la composición o las cantidades relativas de ferrita y cementita.

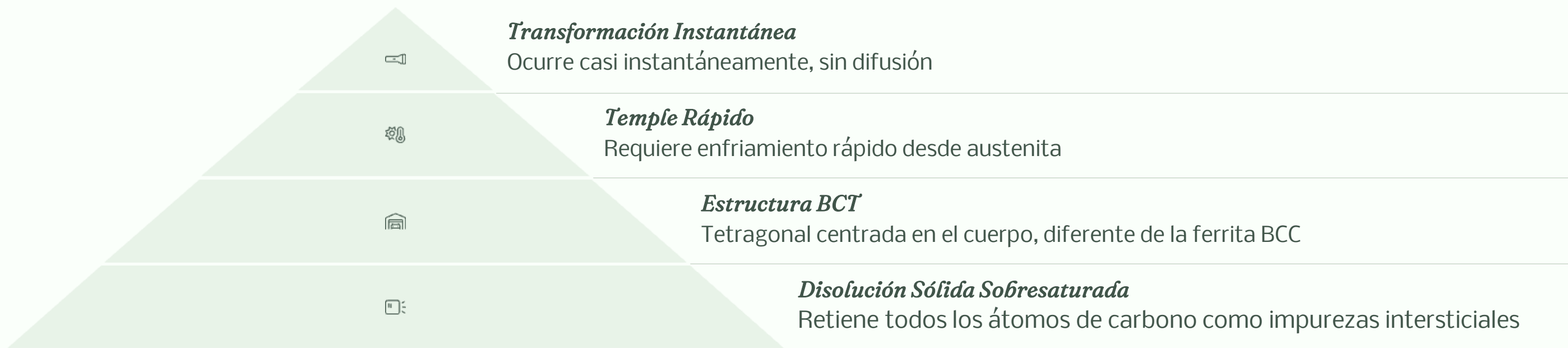
Características

Las partículas de Fe_3C aparecen como esferoides incrustados en una matriz continua de fase α , en lugar de las láminas alternadas de la perlita.

La fuerza impulsora de esta transformación radica en la disminución del área de límite de fase $\alpha\text{-Fe}_3\text{C}$, lo que la hace más estable que la perlita.



Martensita: Transformación Adifusional



El enfriamiento rápido (temple) del acero austenizado hasta temperatura próxima a la ambiental origina la martensita. Esta transformación implica el movimiento cooperativo de un gran número de átomos, con pequeños desplazamientos relativos entre vecinos.



Características de la Martensita



Estructura Cristalina

Celda unitaria tetragonal centrada en el cuerpo (BCT), un cubo alargado en una de sus tres dimensiones, diferente de la ferrita BCC.



Estabilidad

Es una fase de no equilibrio, pero la mayoría de los aceros retienen la estructura martensítica casi indefinidamente a temperatura ambiente.



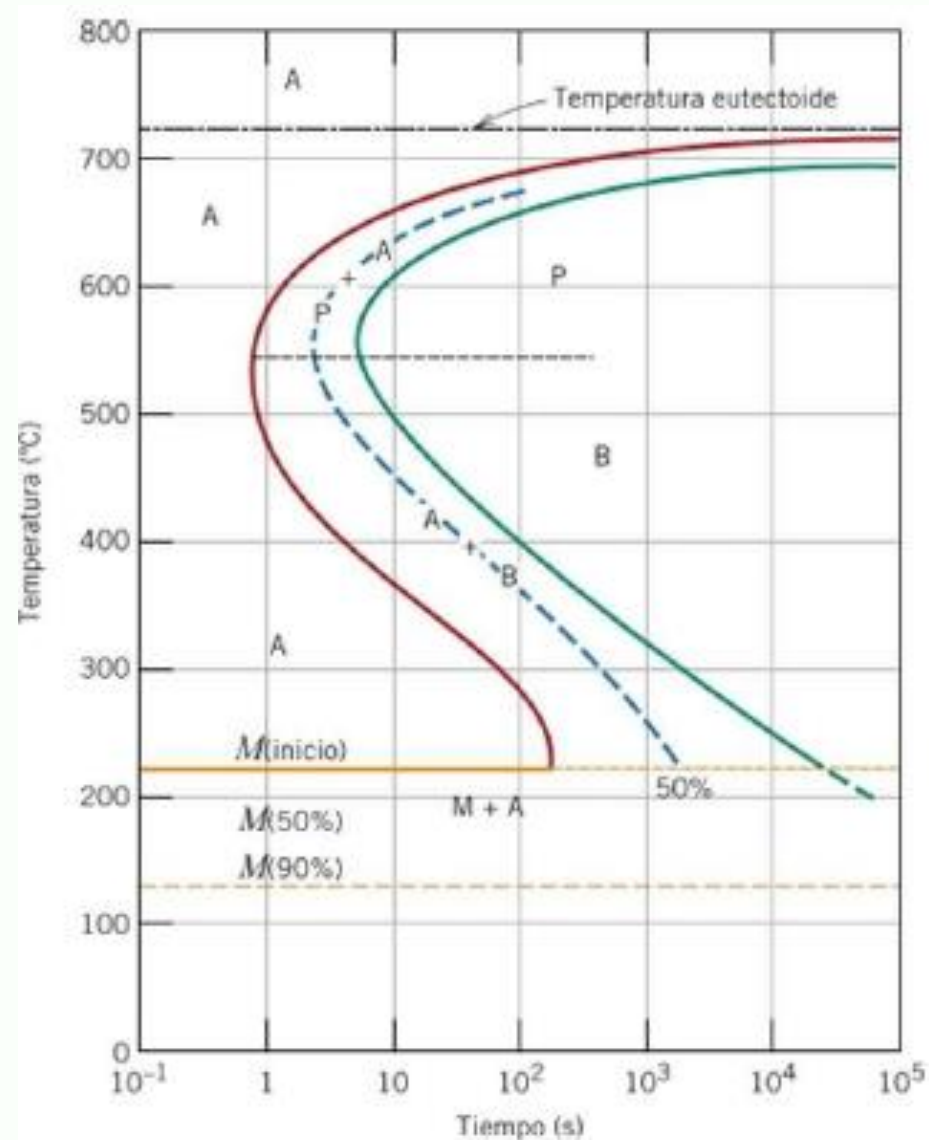
Morfología

Los granos de martensita tienen la apariencia de láminas o agujas. Puede coexistir con otros constituyentes como la perlita o la austenita retenida.



Transformabilidad

Capaz de transformarse rápidamente en otras estructuras si se calienta a temperaturas que comporten una velocidad de difusión apreciable.



La transformación martensítica se representa en el diagrama TTT mediante líneas horizontales: M(inicio), M(50%) y M(90%), que indican el porcentaje de transformación de austenita a martensita.

El carácter horizontal de estas líneas indica que la transformación es atérmica: independiente del tiempo y solo función de la temperatura a la que la aleación es templada. Las temperaturas de estas líneas dependen de la composición del acero, pero deben ser relativamente bajas para impedir la difusión del carbono.

Efecto de los Elementos de Aleación en los Diagramas TTT

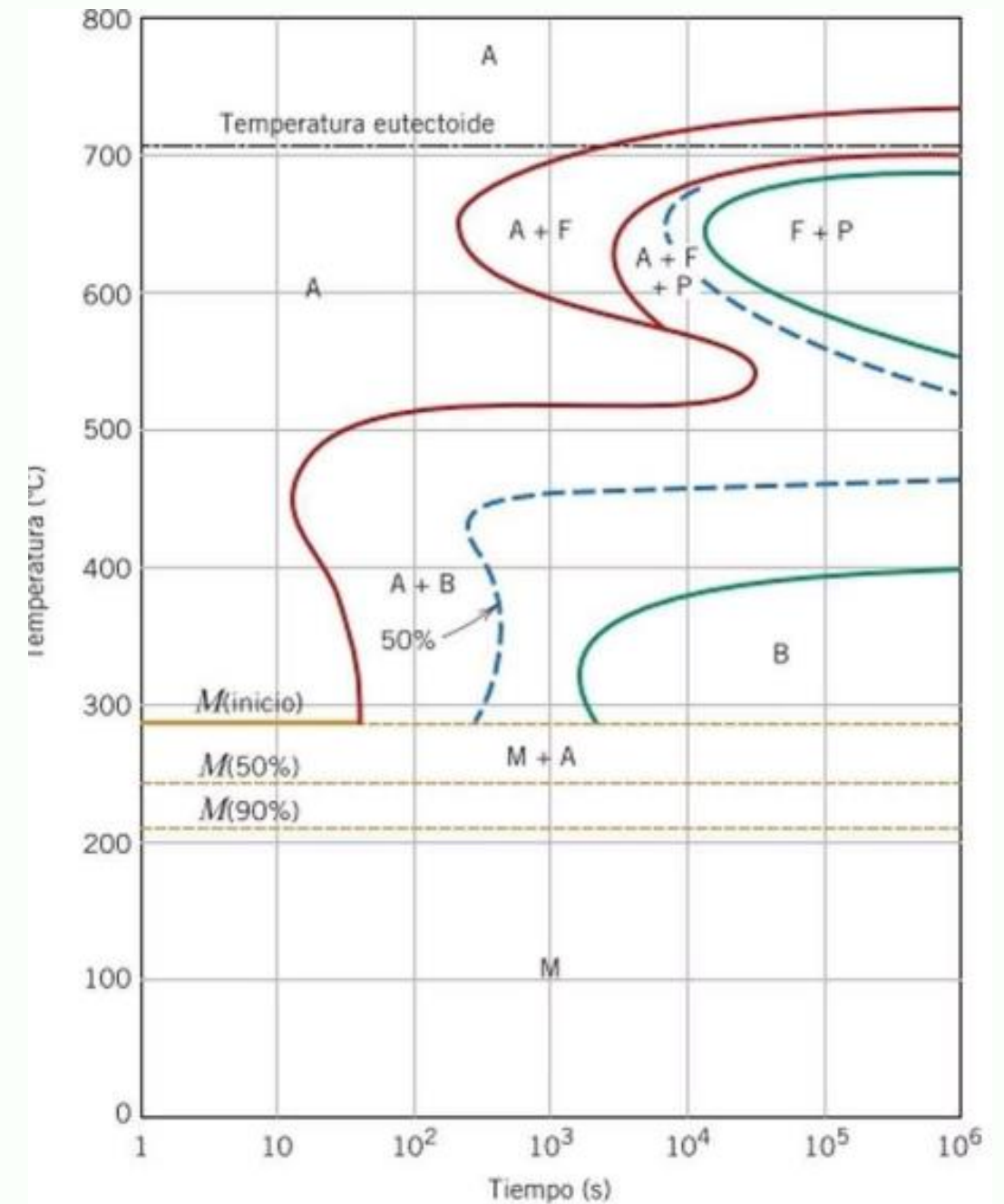
Aceros al Carbono

Contienen carbono como único aleante significativo. Sus diagramas TTT muestran transformaciones más rápidas y a temperaturas más altas. La nariz de la transformación austenita-perlita está más cerca del eje de temperatura, indicando tiempos más cortos para iniciar la transformación.

Aceros Aleados

Contienen apreciables concentraciones de elementos como Cr, Ni, Mo y W, que causan cambios significativos en los diagramas TTT:

1. Aumento del tiempo para alcanzar la nariz de la transformación austenita-perlita
2. Aparición de una nariz propia para la transformación bainítica
3. Separación más clara entre las diferentes zonas de transformación



Ejemplo Práctico: Transformaciones Isotérmicas

Caso A: Transformación Bainítica Completa

Enfriamiento rápido hasta 350°C, mantenimiento durante 10^4 s y temple hasta temperatura ambiente. Resultado: 100% bainita.

1

2

Caso B: Transformación Martensítica

Enfriamiento rápido a 250°C, mantenimiento durante 100 s y temple a temperatura ambiente. Resultado: Casi 100% martensita.

Caso C: Microestructura Mixta

Enfriamiento rápido a 650°C (20 s), luego a 400°C (10^3 s) y temple final. Resultado: 50% perlita y 50% bainita.

3

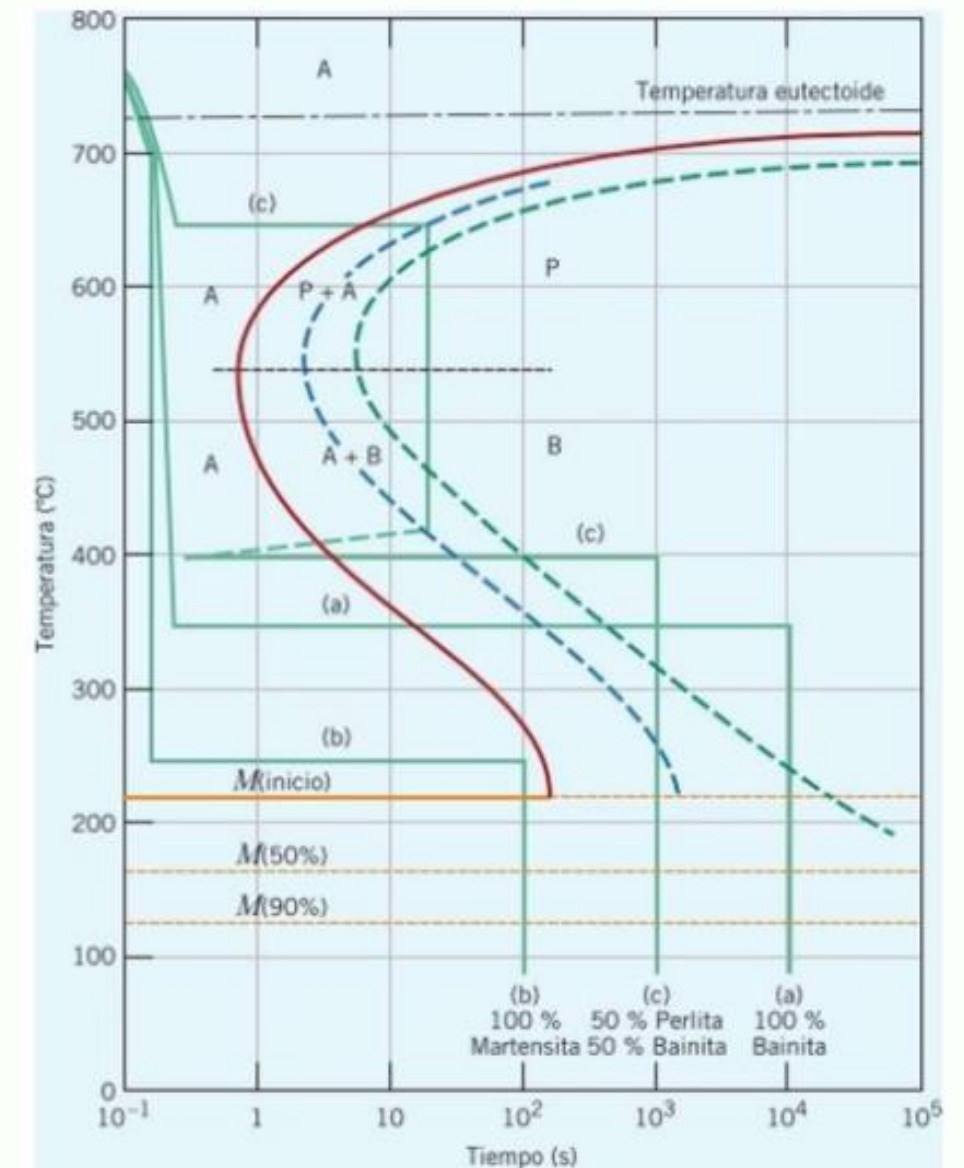
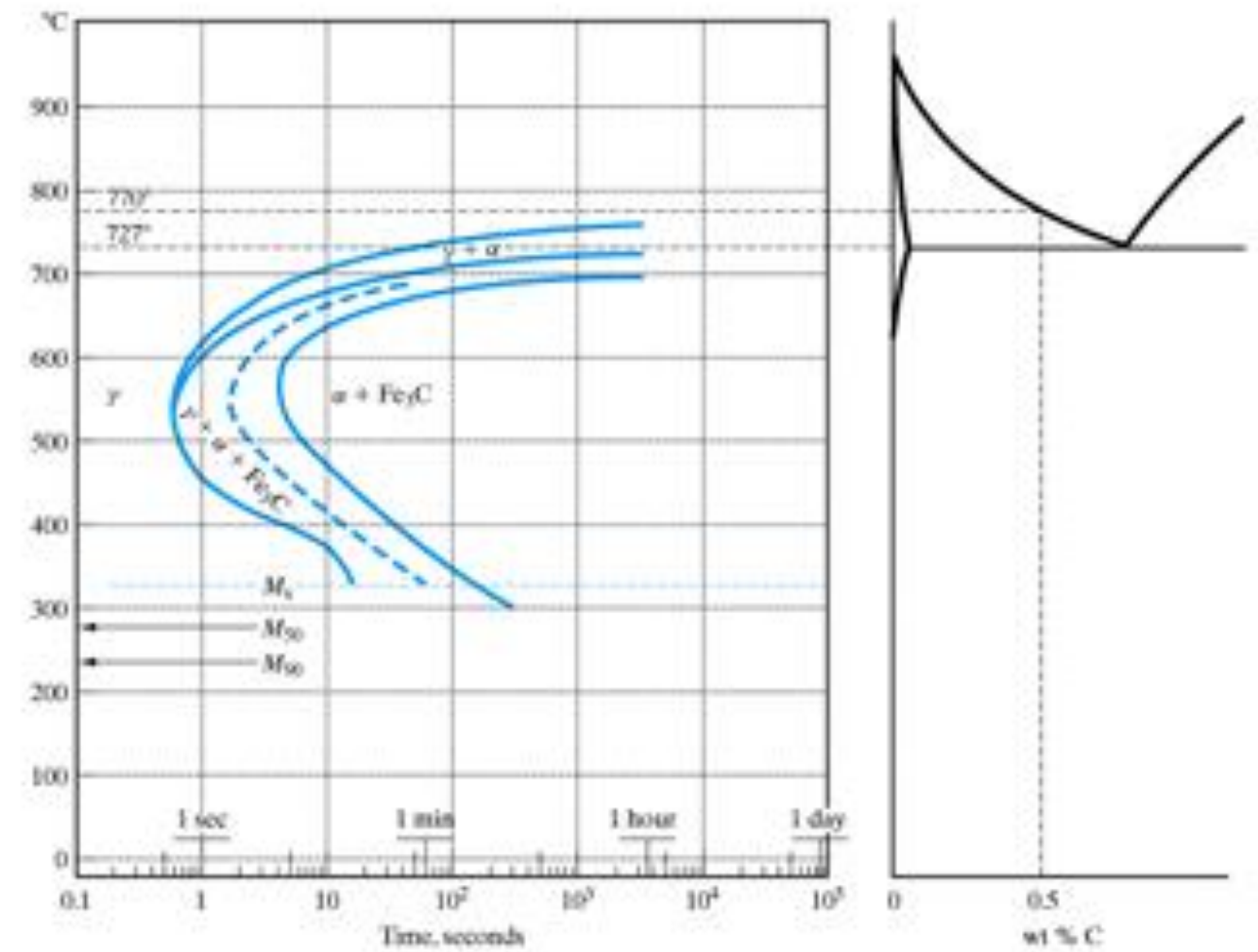
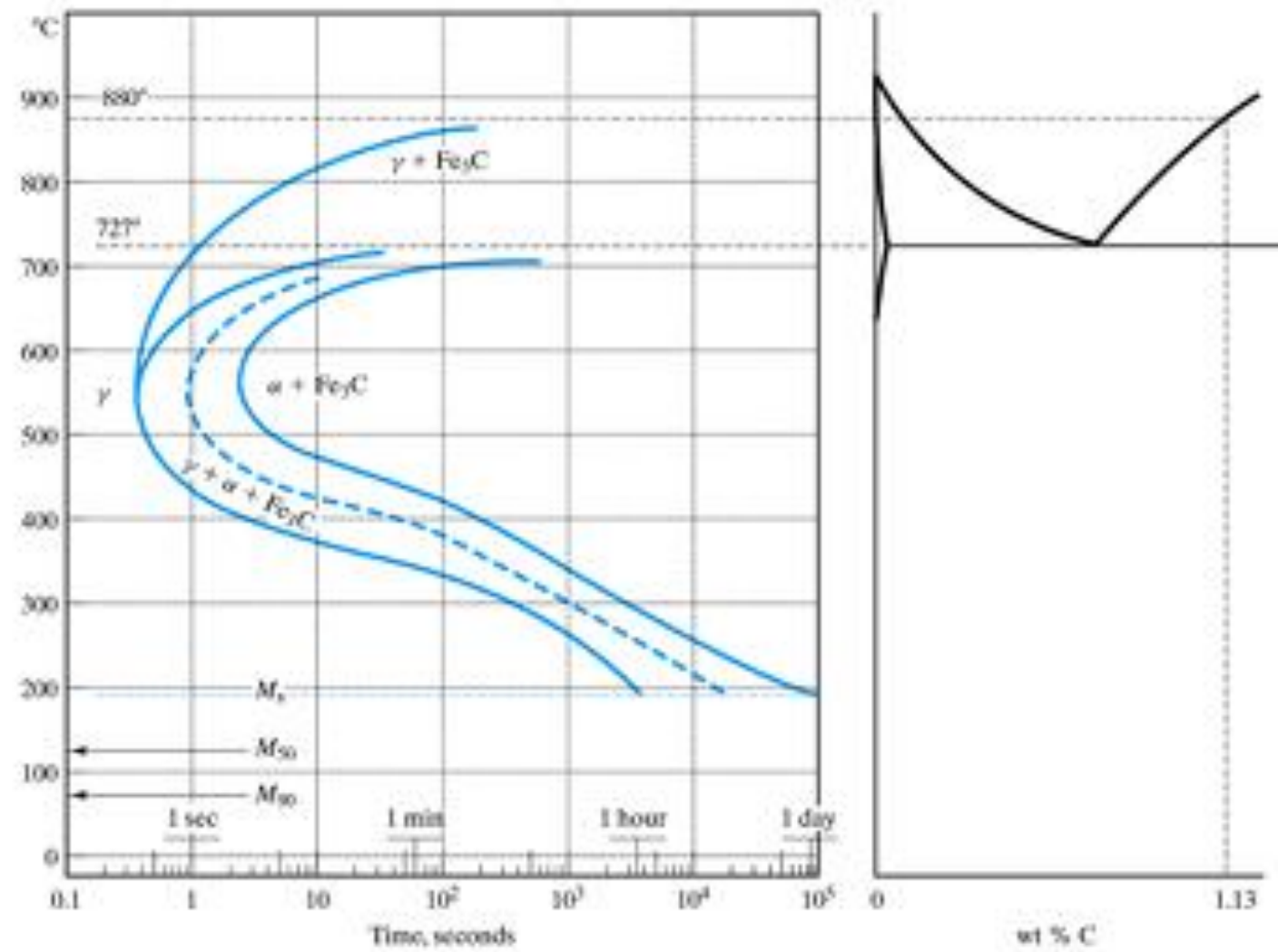
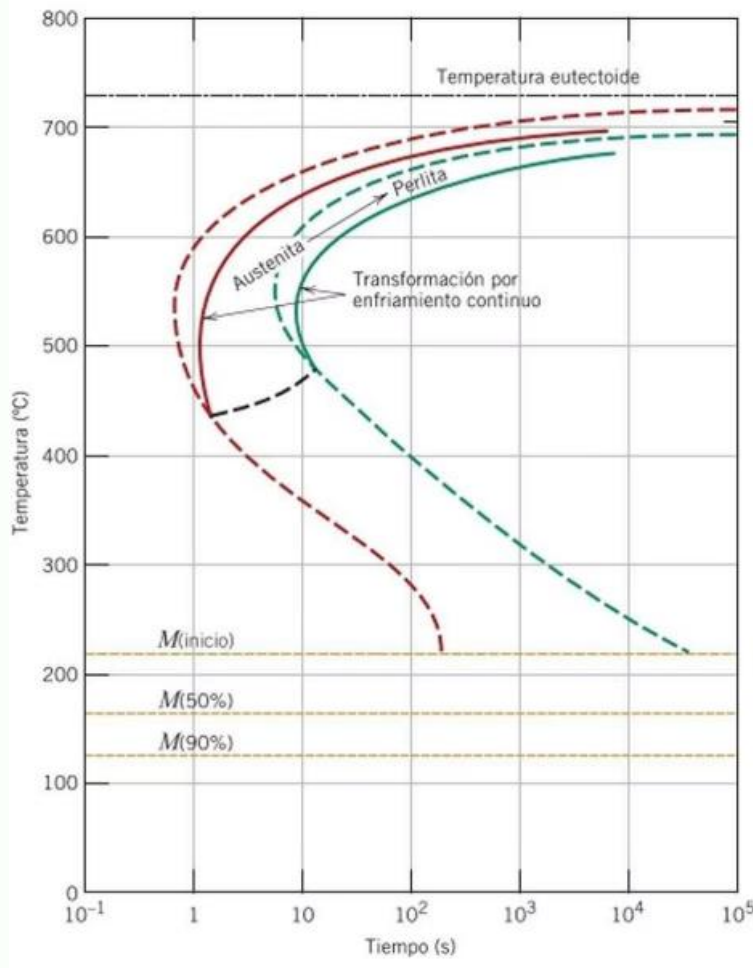


Diagrama TTT Distintos Aceros



Diagramas de Transformación por Enfriamiento Continuo



Los tratamientos isotérmicos son difíciles de realizar en la práctica, ya que requieren enfriar rápidamente una aleación desde una temperatura superior a la eutectoide y mantenerla a temperatura elevada. La mayoría de los tratamientos térmicos del acero implican un enfriamiento continuo hasta temperatura ambiente.

Los diagramas de transformación isotérmica deben modificarse cuando las transformaciones ocurren a temperaturas que cambian continuamente. En los enfriamientos continuos, los tiempos requeridos para que la reacción comience y termine se alargan, desplazando el diagrama hacia tiempos más largos y temperaturas más bajas.

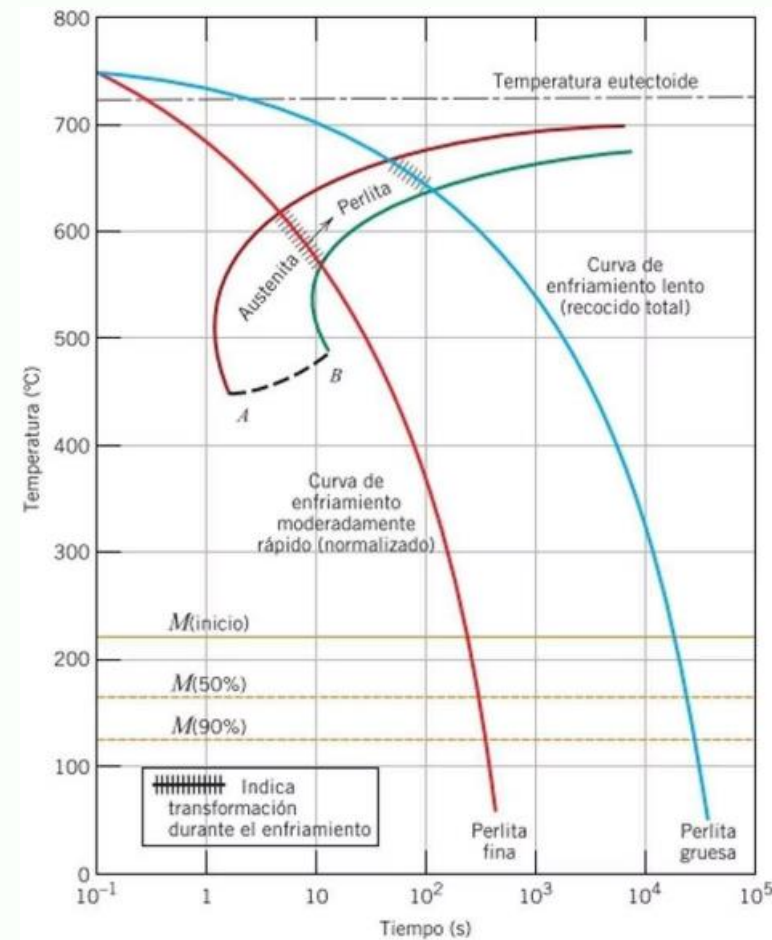
Características de los Diagramas TEC

Definición

La representación gráfica de las cunas de inicio y fin de la transformación se denominan diagramas de transformación por enfriamiento continuo (TEC). Estos diagramas permiten predecir la microestructura resultante después de un tratamiento térmico con enfriamiento continuo.

Control del proceso

La velocidad de enfriamiento se puede controlar modificándola en función del medio de enfriamiento utilizado. Esto permite obtener diferentes microestructuras finales según la velocidad aplicada durante el proceso de enfriamiento.



Interpretación de las Curvas de Enfriamiento

1

Inicio de transformación

La transformación se inicia en el tiempo indicado por la intersección de la gráfica del enfriamiento con la del inicio de la reacción

2

Proceso de transformación

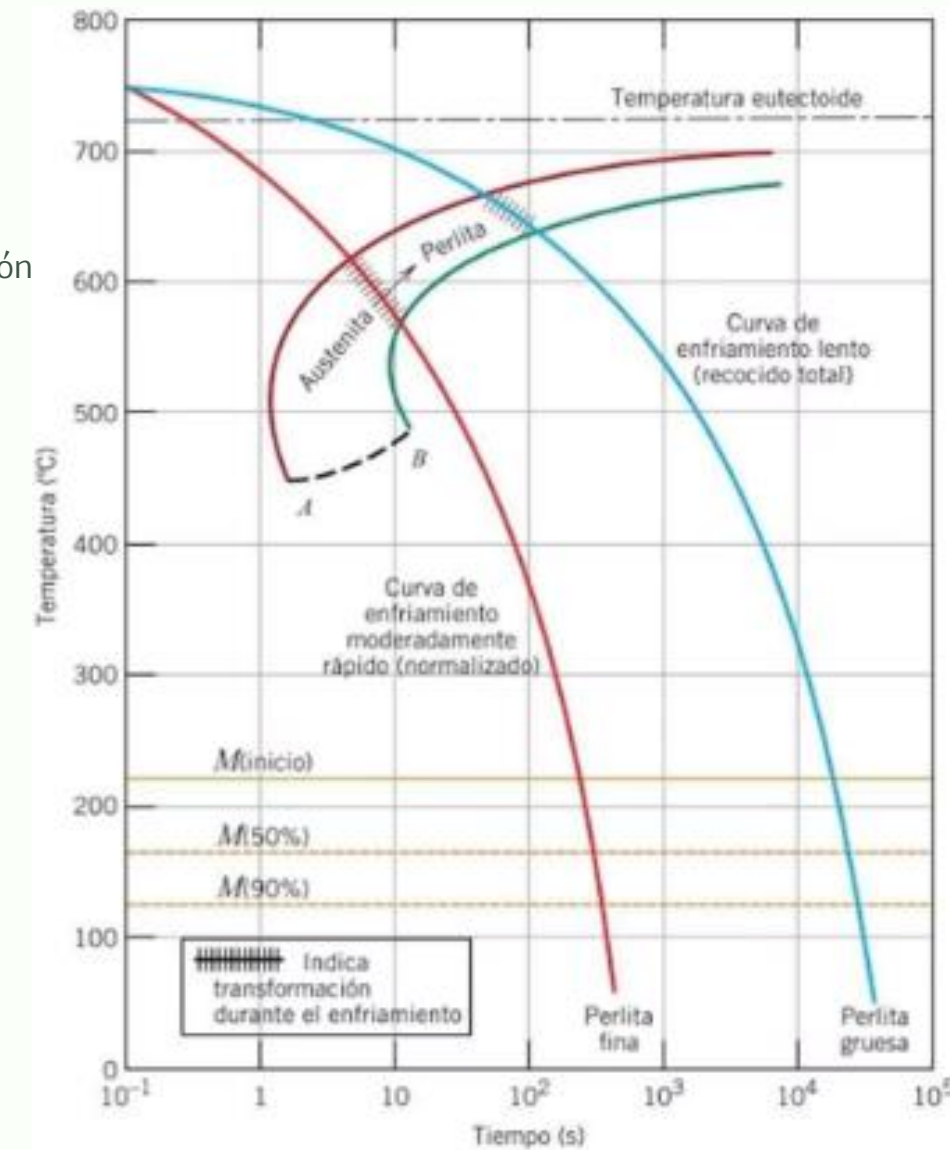
Durante el enfriamiento, la austenita va transformándose según las curvas del diagrama TEC.

3

Fin de transformación

La transformación termina una vez cruzada la curva de final de transformación, obteniendo la microestructura final.

Los productos microestructurales de las curvas de enfriamiento moderadamente rápida y lenta son perlita fina y gruesa



Formación de Bainita en Enfriamiento Continuo



Ausencia en aceros al carbono

La bainita normalmente no se forma al enfriar un acero al carbono de modo continuo hasta temperatura ambiente, ya que toda la austenita se transforma en perlita.



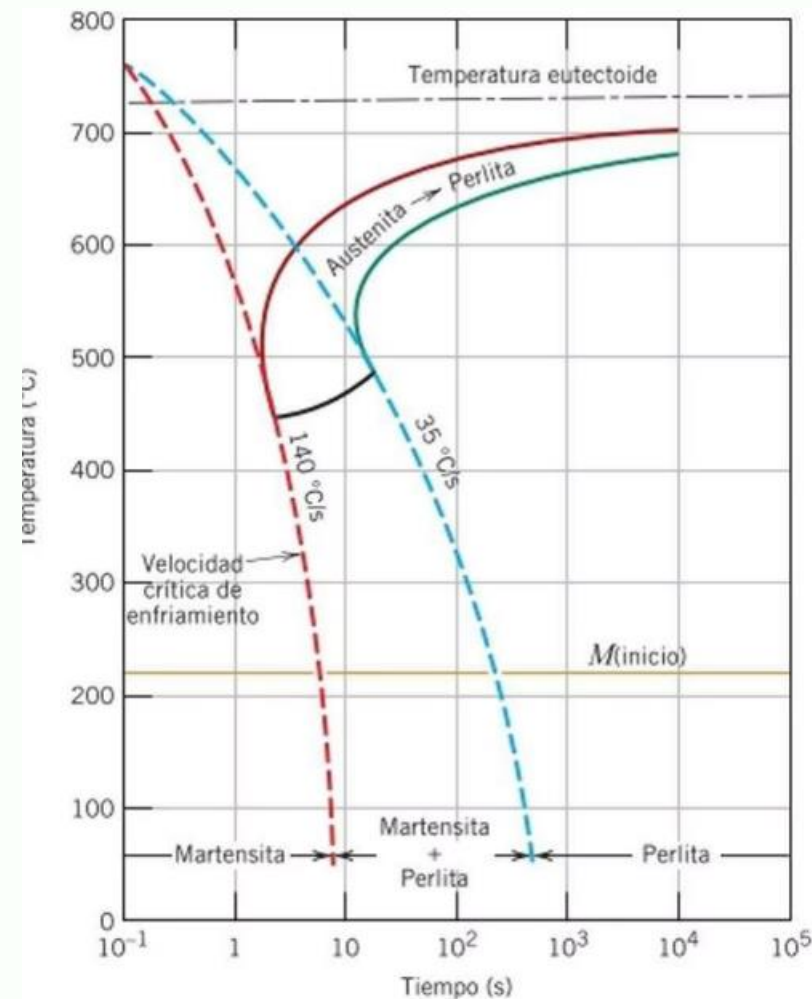
Transformación interrumpida

La región que representa la transformación austenita-perlita termina justo por debajo de la nariz de la curva AB, impidiendo la evolución hacia bainita.



Transformación martensítica

Al continuar enfriando, la austenita que no ha reaccionado comienza a transformarse en martensita al cruzar la línea M(inicio).



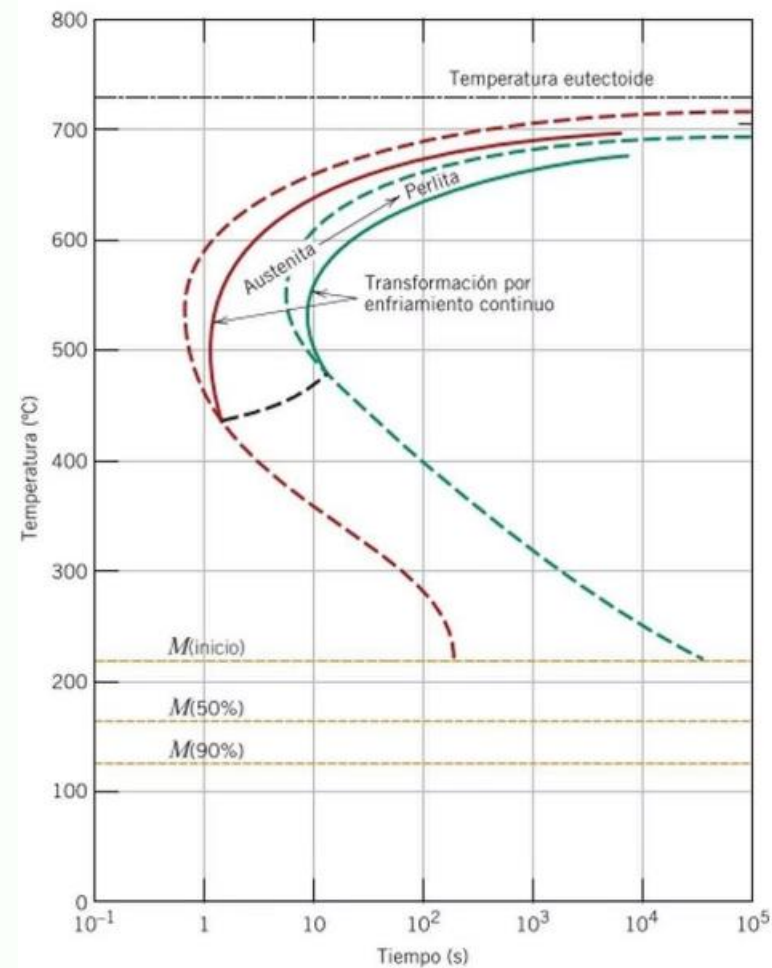
Transformación Martensítica

Temperaturas características

Las líneas M(inicio), M(50%) y M(90%) corresponden a las mismas temperaturas tanto en los diagramas isotérmicos como en los de enfriamiento continuo.

Independencia del tiempo

La transformación martensítica es atérmica, es decir, depende únicamente de la temperatura y no del tiempo, a diferencia de las transformaciones perlítica y bainítica.



Velocidad Crítica de Enfriamiento

Definición

En el enfriamiento continuo del acero existe una velocidad crítica, que representa la velocidad de temple mínima para generar una estructura totalmente martensítica.

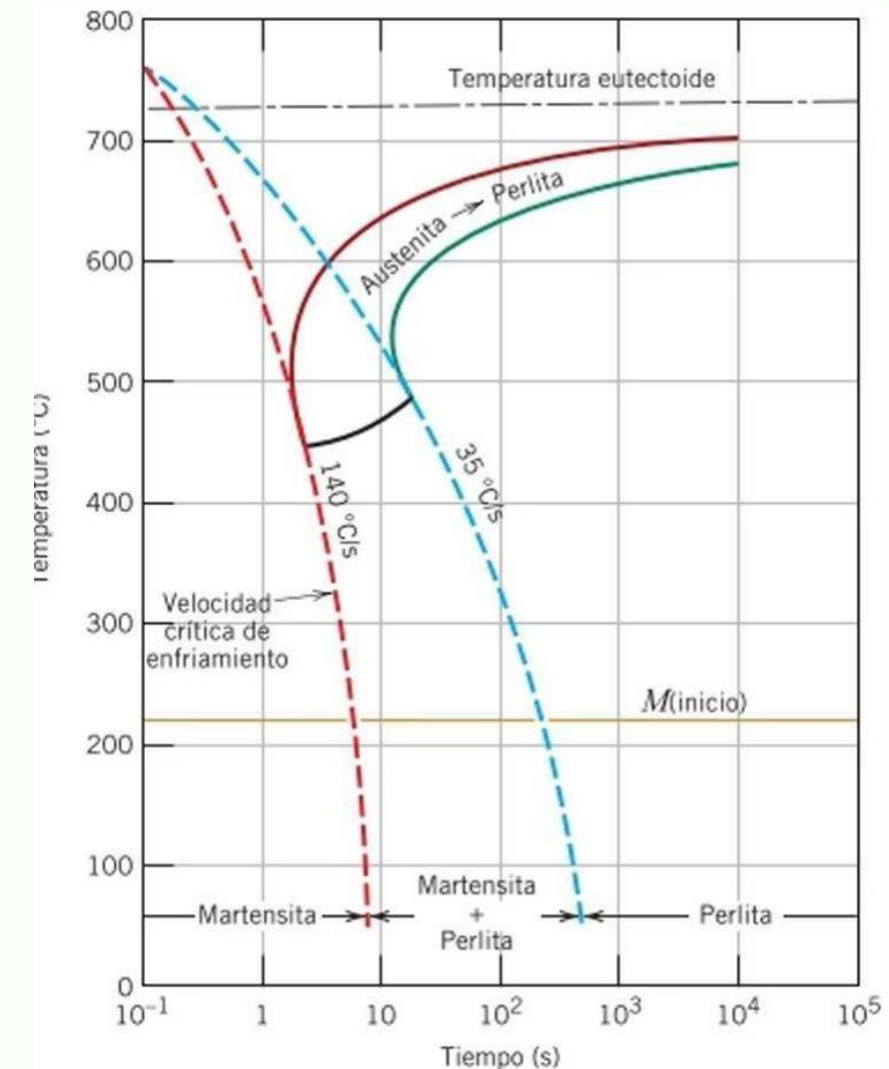
1

Importancia

A velocidades de temple mayores que la crítica, sólo se forma martensita, mientras que a velocidades intermedias se forman tanto perlita como martensita.

Características

Esta velocidad crítica de enfriamiento roza la nariz donde empieza la transformación perlítica en el diagrama TEC.



Influencia de los Elementos de Aleación

Aplicación práctica

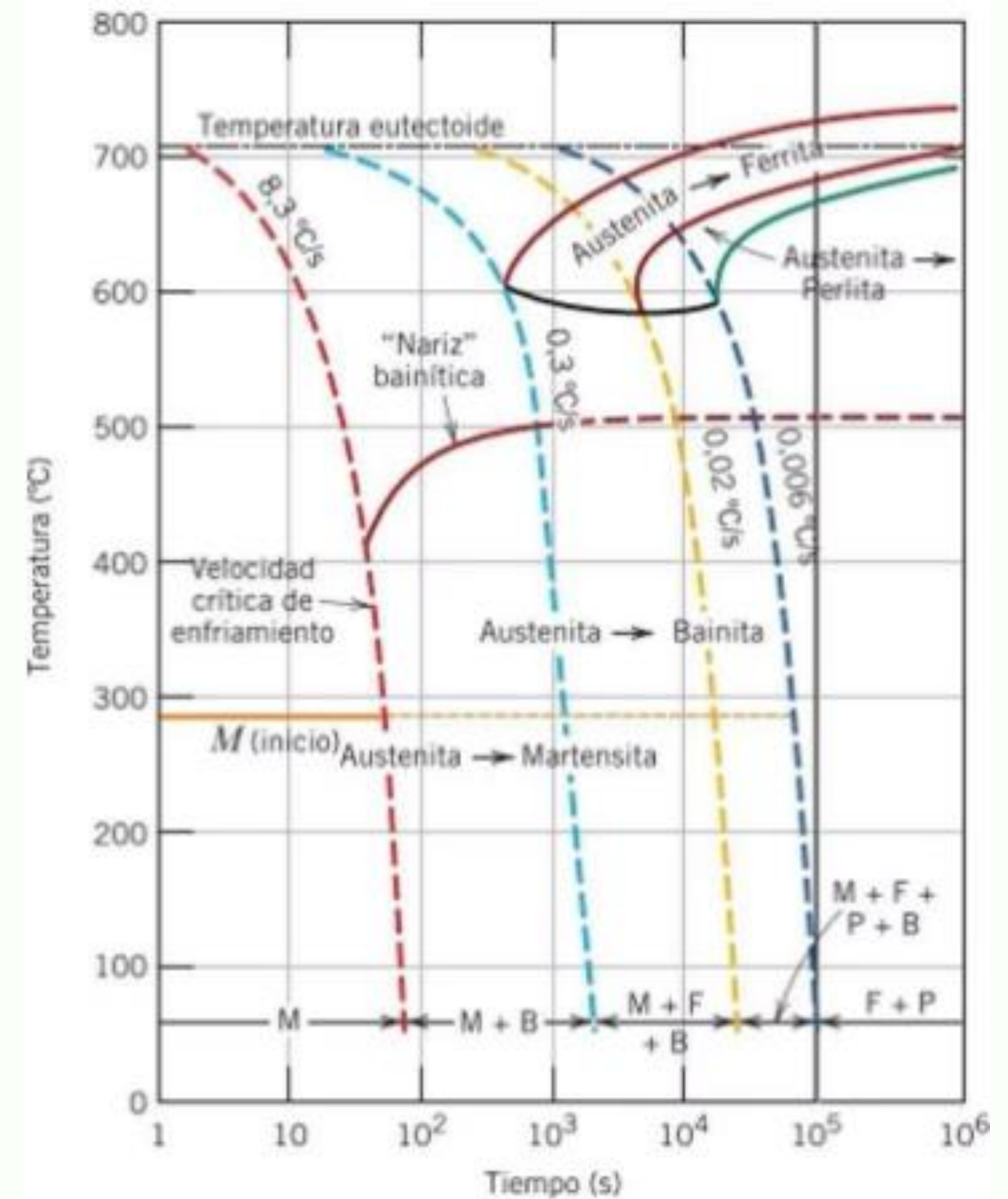
Una de las razones para alear los aceros es posibilitar estructuras totalmente martensíticas en secciones relativamente gruesas.

Elementos aleantes

Otros elementos particularmente efectivos son el cromo, níquel, molibdeno, manganeso, silicio y tungsteno.

Efecto microestructural

Estos elementos deben estar disueltos en la austenita en el momento del temple para facilitar la formación de martensita.



Limitaciones Prácticas

📊 *Contenido de carbono*

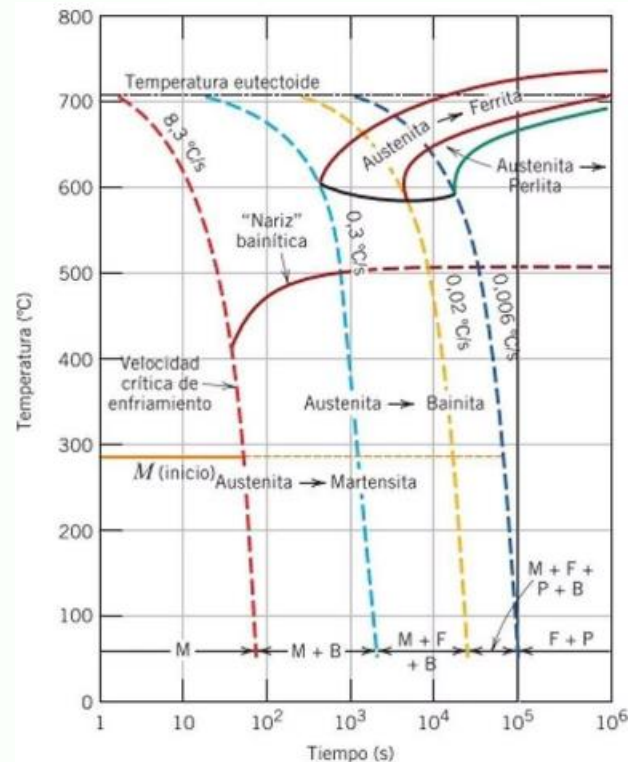
El acero al carbono con menos de 0,25% C en peso normalmente no se trata térmicamente para obtener martensita, ya que las velocidades de temple tan rápidas no son factibles en la práctica.

😊 *Disolución*

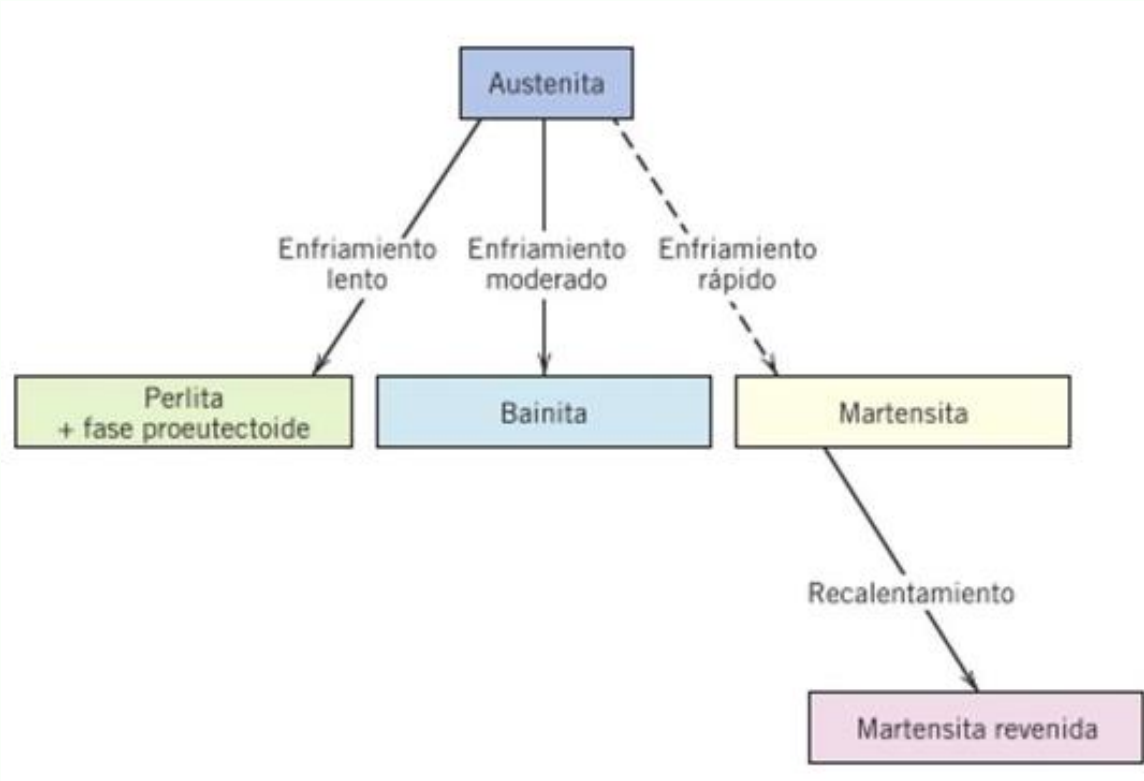
Los elementos de aleación deben estar disueltos en la austenita en el momento del temple para ser efectivos en la susceptibilidad del acero al tratamiento térmico.

🕒 *Utilidad de los diagramas*

Los diagramas de transformación isotérmica y de enfriamiento continuo son diagramas de fases a los que se ha añadido el parámetro tiempo.



Limitaciones PrácticasResumen de transformaciones principales y propiedades



| Microconstituyente Fases presentes | | Disposición fases | Propiedades mecánicas (relativas) |
|------------------------------------|--|--|---|
| Esferoidita | Ferrita α + Fe_3C | Partículas esféricas de Fe_3C relativamente pequeñas en matriz de ferrita α | Blando/a y dúctil |
| Perlita gruesa | Ferrita α + Fe_3C | Capas alternas de ferrita « y Fe_3C relativamente gruesas | Más duro/a y resistente que esferoidita, pero no tan dúctil |
| Perlita fina | Ferrita α + Fe_3C | Capas alternas de ferrita α y Fe_3C relativamente delgadas | Más duro/a y resistente que perlita gruesa, pero no tan dúctil |
| Bainita | Ferrita α + Fe_3C | Partículas muy finas y alargadas de Fe_3C en matriz de ferrita | Más duro/a y resistente que perlita; menos duro/a y más dúctil que martensita |
| Martensita revenida | Ferrita α + Fe_3C | Partículas esferoidales muy pequeñas de Fe_3C en matriz de ferrita« | Resistente, no tan duro/a como martensita, pero mucho más dúctil |
| Martensita | Monofásico/a, tetragonal centrado/a en el cuerpo | Granos en forma de aguja | Muy duro/a y muy frágil |