TEMA 9. TRANSFORMACIONES DE FASE Y TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN ALEACIONES Fe-C

- *Los Diagramas de Fase representan estados y transformaciones en condiciones de equilibrio, pero no aportan información sobre el TIEMPO necesario para alcanzar el equilibrio*
- *En la práctica este tiempo es excesivamente elevado (→ velocidades de transformación muy lentas), por lo que es habitual y, a veces, incluso deseable recurrir a condiciones de no equilibrio*
- *Las transformaciones de fase, tanto en condiciones de equilibrio como fuera de este, y los tratamientos térmicos aplicados para lograrlas, son determinantes en el desarrollo de la estructura de los materiales REALES, y por tanto, para alcanzar las propiedades requeridas*

ESTRUCTURA DEL TEMA

9.1 CINÉTICA DE LAS TRANSFORMACIONES EN ESTADO SÓLIDO

9.2 DIAGRAMAS TTT. APLICACIÓN A LOS ACEROS. MICROESTRUCTURAS RELEVANTES

9.3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS (metales en general)

9. 1 CINÉTICA DE LAS TRANSFORMACIONES EN ESTADO SÓLIDO (I)

Conceptos fundamentales

Transformaciones de fase.- cambios en el nº y tipo de fases del sistema

TIPO		EJEMPLO
CON difusión	Sin cambio de composición	Solidificación metal puro
	Con cambio de composición	Reac. eutectoide
SIN difusión		Transf. *martensítica*

Tratamiento térmico.- Perfil temperatura-tiempo para obtener una microestructura determinada

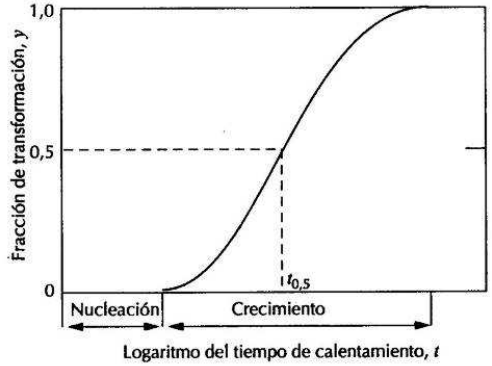
Cinética.- Estudio de la dependencia con el tiempo de las transformaciones de fase, es decir, de las velocidades de transformación.

El factor tiempo

- La mayoría de las transformaciones en estado sólido no transcurren instantáneamente: dependen del tiempo
- Esto es especialmente patente en las transformaciones que implican fenómenos de DIFUSIÓN, que depende de la temperatura y del tiempo
- Microestructuralmente, estas transformaciones conllevan una etapa de nucleación seguida de una etapa de crecimiento
- La cinética de las transformaciones es de capital importancia en la relación entre tratamientos térmicos y microestructuras desarrolladas

9. 1 CINÉTICA DE LAS TRANSFORMACIONES EN ESTADO SÓLIDO (II)

Típicamente la cinética de las transformaciones en estado sólido responde a la gráfica:



$$y = 1 - \exp\left(-kt^n\right)$$

$$r = \frac{1}{t_{0.5}} = A\exp(-Q/RT)$$ *Velocidad de transformación*

(Fte. Callister)

- Los diagramas de fase están limitados a condiciones de equilibrio, que en la práctica no son viables porque se alcanzan a velocidades excesivamente lentas.
- Es más, en ocasiones puede ser preferible que las condiciones sean de NO equilibrio.
- No estar en condiciones de equilibrio implica que:
  - *Ocurren otras transformaciones de fase que las previstas en los DF*
  - *Existen fases de no equilibrio, no recogidas en los DF*
- Por norma general:
  - En enfriamientos de no equilibrio las transformaciones ocurren a menor temperatura que en los DF → ***subenfriamiento***
  - En calentamientos de no equilibrio las transformaciones ocurren a temperaturas superiores que en los DF → ***sobrecalentamiento***

9. 2 DIAGRAMAS TTT (I)

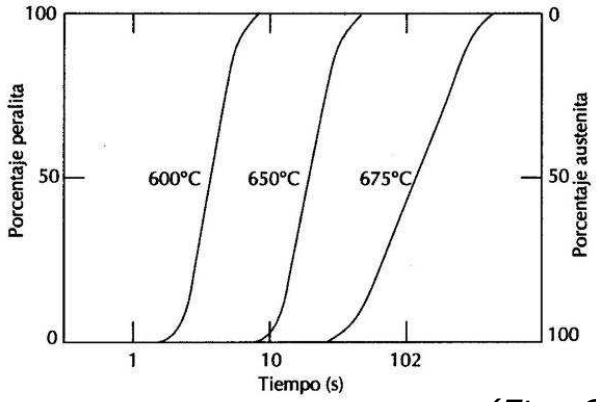
- La forma general de representación que incluye el factor tiempo son los diagramas TTT: Temperatura-Tiempo-Transformación, también conocidos como diagramas de transformación isotérmica.
- Se construyen a partir de las curvas de transformación isotérmicas, representando los puntos de inicio, 50% y fin de transformación, para las diferentes temperaturas.

☞ Consideremos el caso de un **acero eutectoide** (0.77% en peso de C):

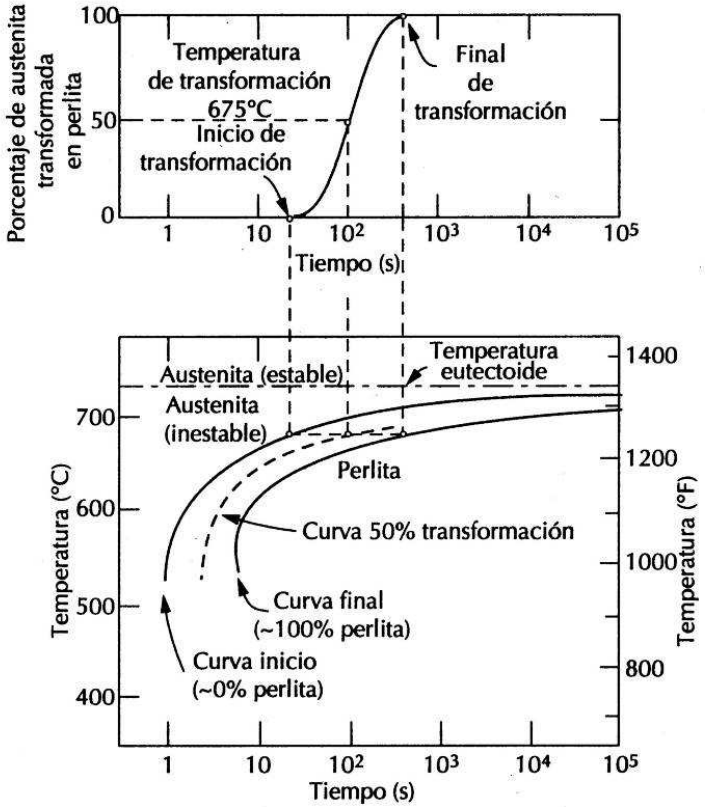
Reacción eutectoide: T=727ºC γ (0.77%C) → α (0.022%C) + Fe_3C *(perlita)*

Restricciones de estos diagramas:
- Composición fija
- Referidos a transformaciones isotérmicas (Tª cte)

Transformación Austenita → Perlita
acero eutectoide



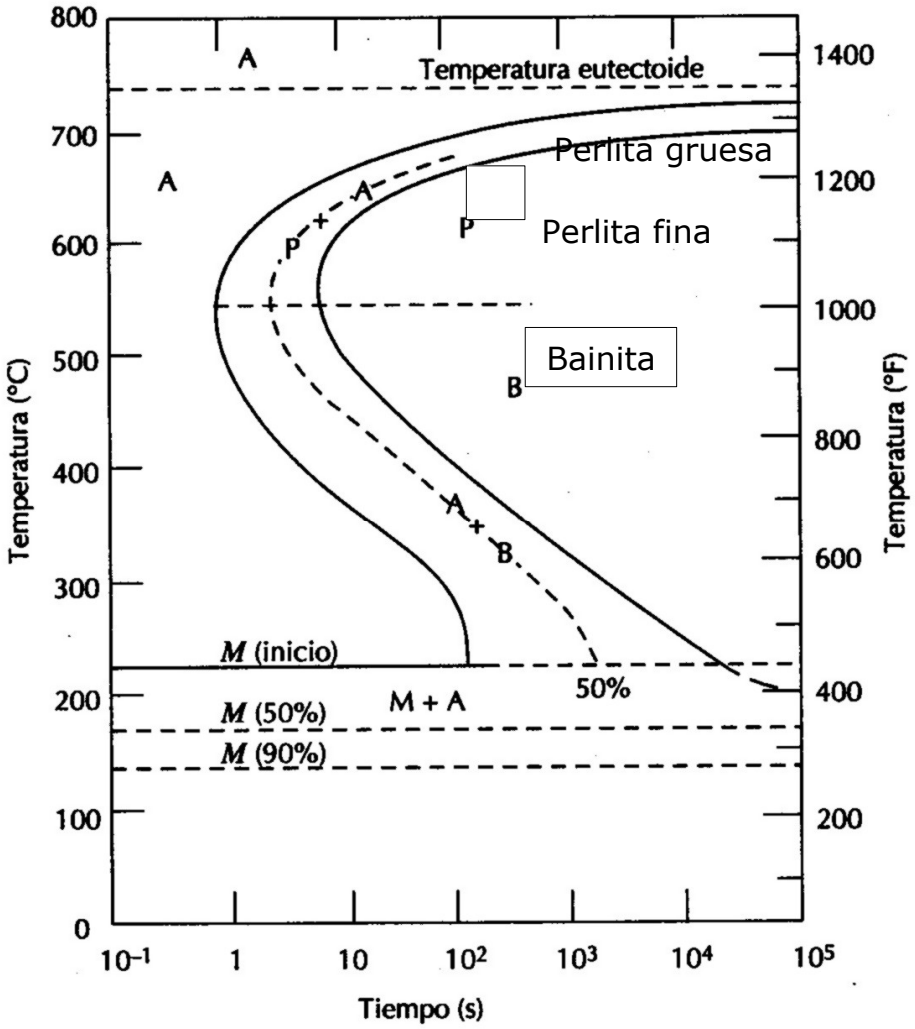
(Fte. Callister)



DIAG. TTT

9. 2 DIAGRAMAS TTT (II) Aplicación a los aceros

Diagrama TTT completo para el acero eutectoide



(Fte. Callister)

9. 2 DIAGRAMAS TTT (III) Acero eutectoide

Microestructuras relevantes

La perlita no es la única microestructura que se puede obtener en el enfriamiento de la austenita

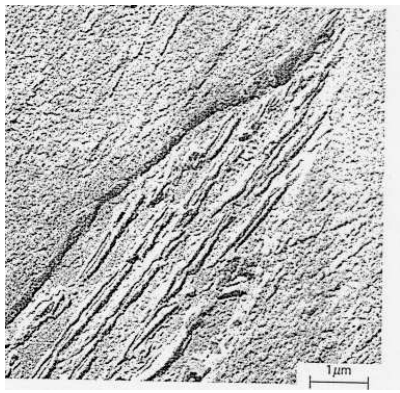
Perlita gruesa.- Se forma para enfriamientos suficientemente lentos, a temp. próximas al eutectoide (727ºC), y se corresponde con la descrita en el DF Fe-C, con una relación 8:1 entre las láminas de ferrita y cementita.

Perlita fina.- A medida de la transformación ocurre a temperaturas más bajas, las láminas de la perlita se hacen más delgadas, pasando a denominarse perlita fina para T≈600-540ºC

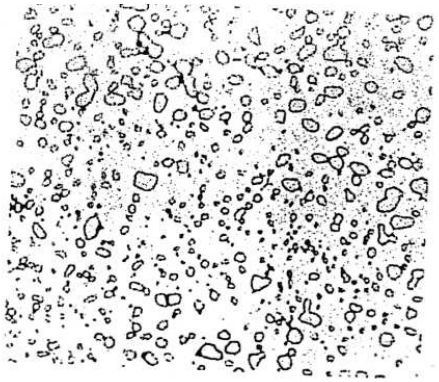
Bainita.- A temperaturas inferiores a 540ºC, la ferrita y cementita aparecen en forma de agujas extremadamente finas, microestructura conocida como bainita.

Esferoidita.- Se forma cuando un acero con microestructura perlítica o bainítica se calienta a temperatura inferior al eutectoide durante un periodo de tiempo suficientemente largo (700ºC, 18-14h por ej.). La cementita aparece como pequeñas partículas esféricas embebidas en una matriz continua de ferrita α, que se forman para reducir la interfase Fe_3C-Feα

PERLITA



BAINITA

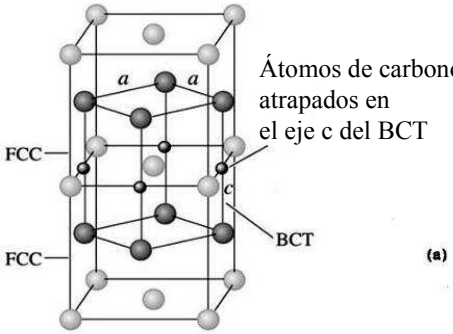


ESFEROIDITA

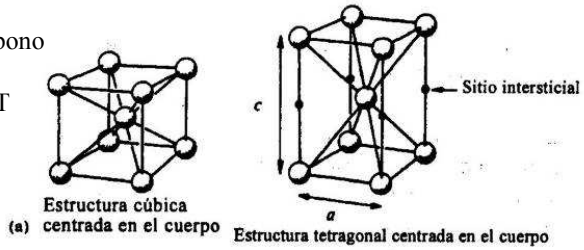
9. 2 DIAGRAMAS TTT (IV) Acero eutectoide

Microestructuras relevantes

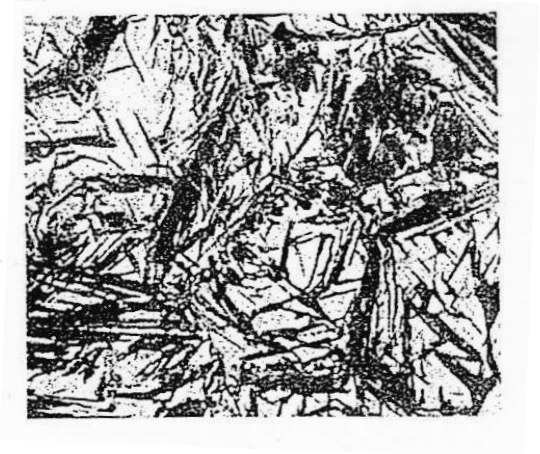
Martensita.-Se forma a bajas temperaturas (< 215ºC) resultado de una transformación sin difusión de la austenita. En lugar de la migración por difusión de los átomos de C para dar lugar a las fases Feα y Fe3C, se produce una reordenación colectiva de los átomos de Fe y C , pasando de la estructura fcc de la austenita a una estructura teragonal centrada en el cuerpo (bct), correspondiente a la martensita



Red fcc de la austenita



Red bcc ferrita y tetragonal centrada de la martensita



MARTENSITA

- La transformación martensítica no es exclusiva de los aceros
- Al no implicar difusión, ocurre casi instantáneamente → no depende del tiempo
- La velocidad de transformación martensítica depende únicamente de la temperatura a la que se la aleación es enfriada rápidamente (*temple*)

9. 2 DIAGRAMAS TTT (V) Acero eutectoide

Microestructuras relevantes: características mecánicas

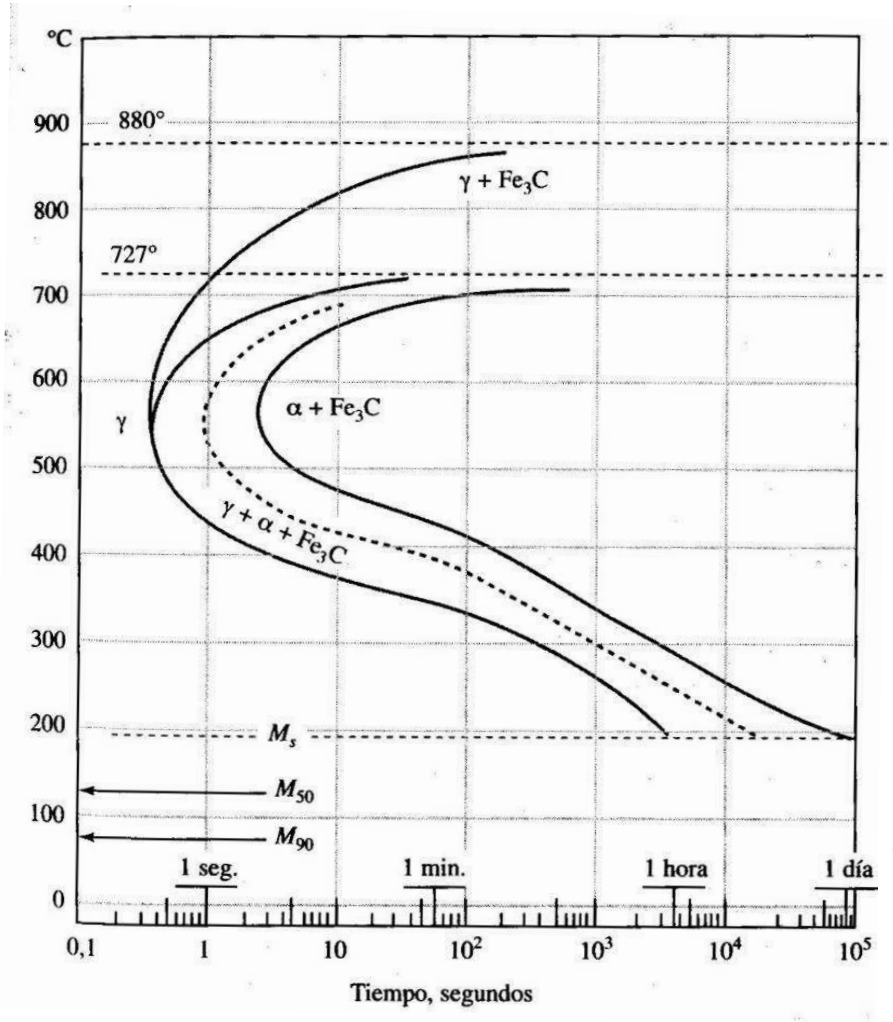
- **Perlita**: Los aceros con perlita fina son mucho más duros y resistente que con perlita gruesa, pero menos dúctilel
- **Esferoidita:** tiene menor dureza y resistencia que la perlita. Son los aceros más blandos y dúctiles
- **Bainita:** los aceros bainíticos son más duros y resistentes que los perlíticos al tratarse de una microestructura más fina. Presentan una conveniente combinación de resistencia y ductilidad.
- **Martensita:** es la microestructura de los aceros más dura y resistente, pero a la vez más frágil. Su ductilidad es prácticamente nula. De hecho, la martensita como tal es inservible en la mayoría de aplicaciones. Se le aplica un tratamiento de *revenido*, calentando a temp. inferior al eutectoide, transformándose en partículas extremadamente pequeñas de cementita dispersas en una matriz de ferrita. La estructura es similar a la esferoidita, pero de menor tamaño.

☞ Hay que resaltar que de todas la microestructuras descritas, las que a parecen a temperatura más alta (más cercana al eutectoide) son las más estables (más cercanas a las condiciones de equilibrio). Así pues, cuando la austenita se transforma en perlita, esta se mantiene a lo largo del enfriamiento.

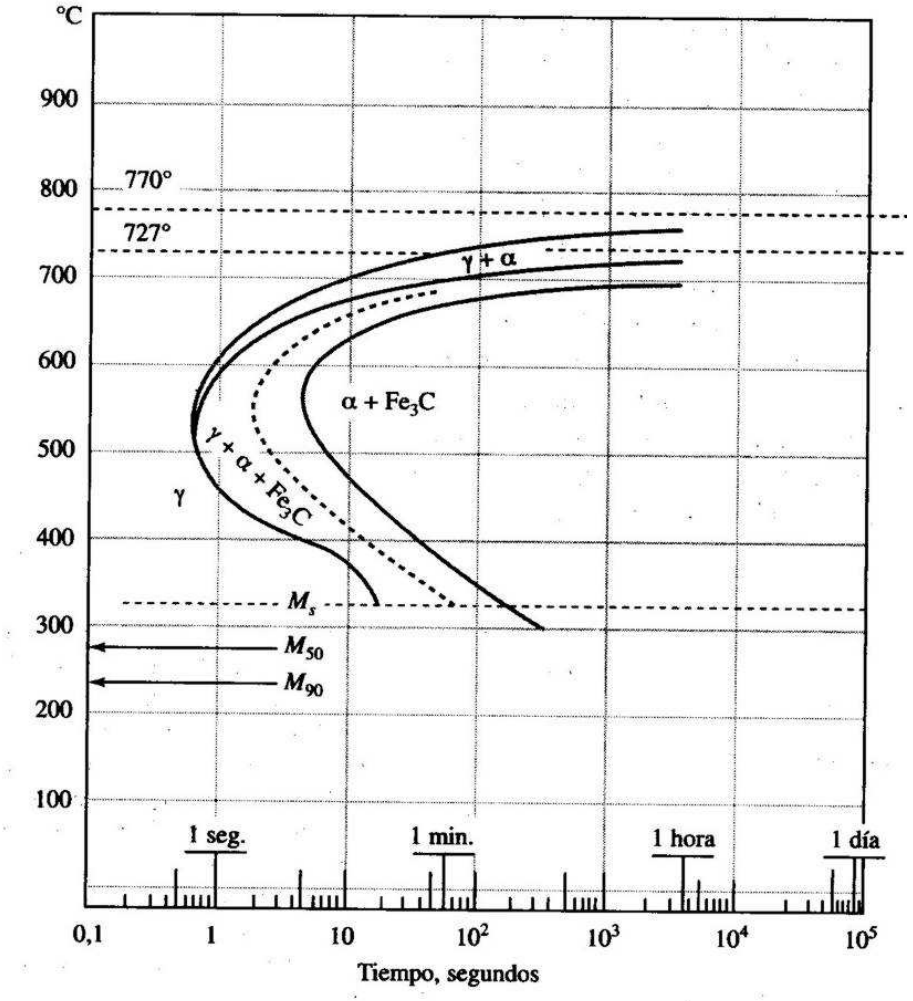
La martensita sólo aparece si el enfriamiento del acero es suficientemente rápido (temple), como para evitar la formación de perlita o bainita.

9. 2 DIAGRAMAS TTT (VI) Acero hiper- e hipo-eutectoide

Diag. TTT acero 1.13%C



Diag. TTT acero 0.5%C



9. 3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS (I)

Perfil temperatura-tiempo para obtener una microestructura determinada

TEMPLE (*quenching*).- Enfriamiento muy rápido hasta temp. Lo suficientemente baja para que la velocidad de transformación sea nula. En el caso de los aceros, se logra la transformación de la austenita en martensita

REVENIDO (*tempering*).- Calentamiento tras el temple a temperatura que permita la transformación. Es el caso de la martensita revenida en aceros, que elimina la excesiva dureza y fragilidad de la martensita resultado del temple.

Martempering.- Caso particular de revenido en aceros, en el que el temple se detiene justo por encima del comienzo de la transformación martensítica para homogeneizar la temp. de la pieza antes de seguir enfriando para que se forme la martensita.

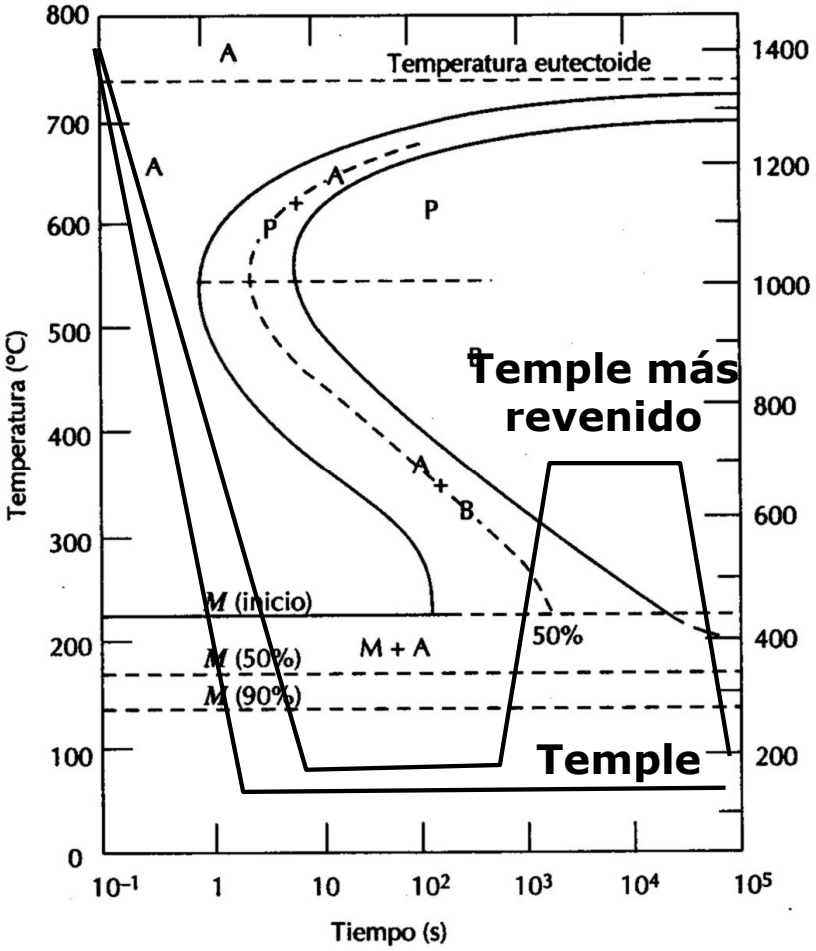
TEMPLE PARCIAL.- Enfriamiento brusco hasta temp. ligeramente superior a la de temple, para que la aleación se transforme parcialmente. Ej. *Austempering* en aceros

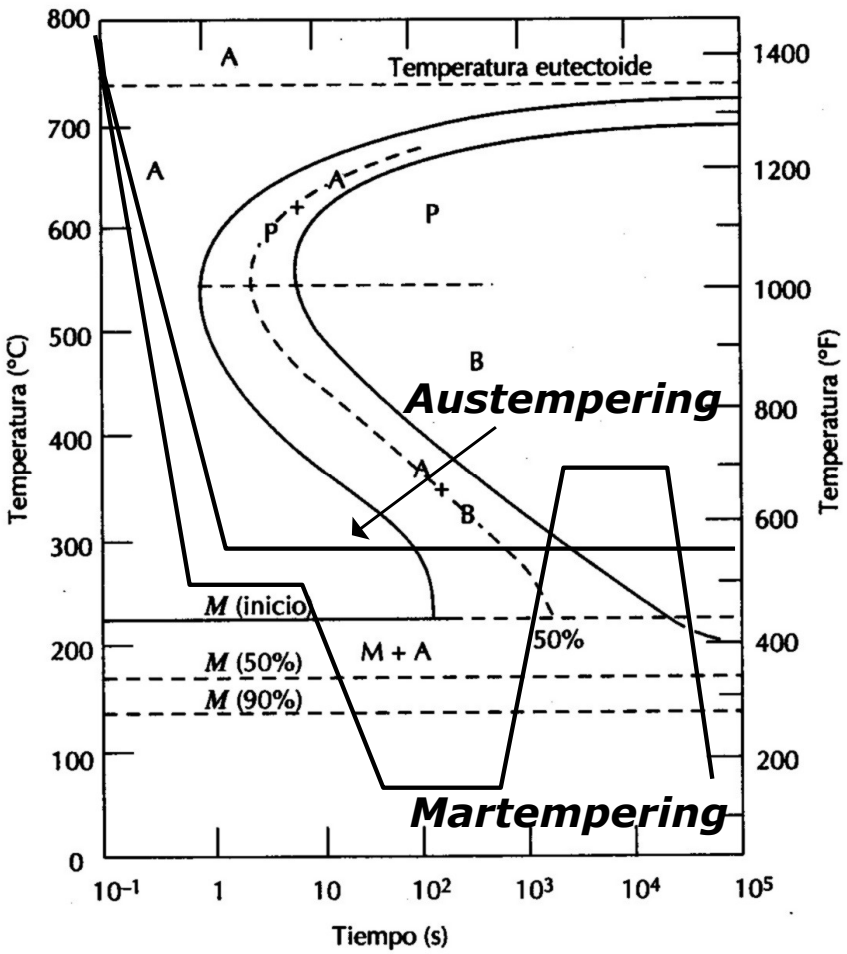
RECOCIDO (*annealing*).- Tratamiento a elevada temperatura, con máxima velocidad de transformación, seguido de enfriamiento lento

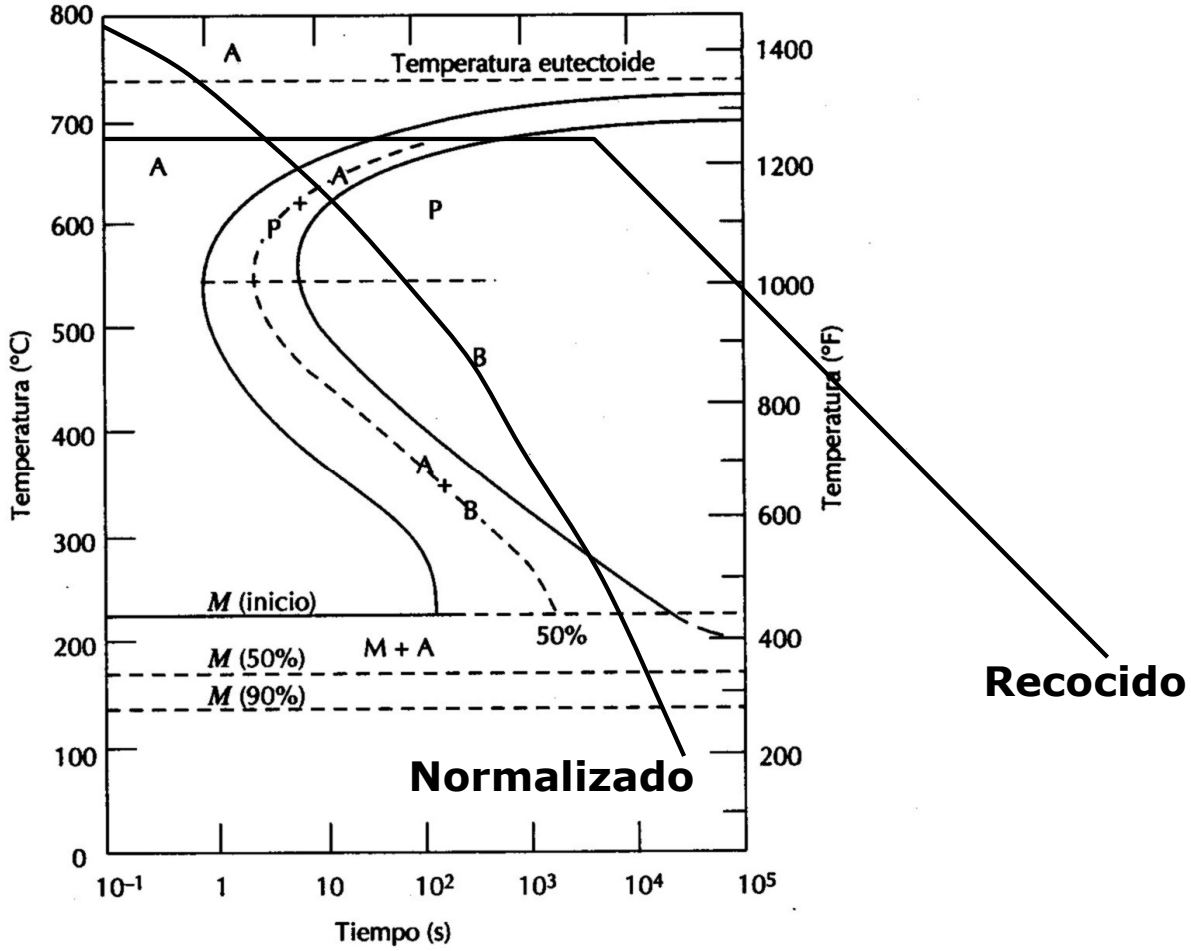
NORMALIZADO.- Calentamiento 55-85ºC por encima de la temperatura crítica superior seguido de enfriamiento moderadamente rápido (al aire). En aceros significa la *austenización* de la pieza y su posterior transformación en perlita fina.

9. 3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS (II)

Representación esquemática de los tratamientos térmicos en diag TTT del acero eutectoide





9. 3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS (III)

Representación esquemática de los tratamientos térmicos en diag TTT del acero eutectoide