



Línea de Investigación: Sólidos Particulados

Programa Educativo: Ingeniería en Ciencia de los Materiales

Nombre de la Asignatura: Tratamientos Térmicos

**Tema: Transformación en estado sólido:
Aspectos Básicos**

Ciclo: Agosto-Diciembre 2011

Profesor(a): Dra. Ana María Bolarín Miró





Tema: Transformación en estado sólido: aspectos básicos

Abstract: En este tema se presentan los aspectos teóricos de la termodinámica asociada a los procesos de transformación de fase en estado sólido, necesarios para entender los tratamientos térmicos.

Keywords: Thermodynamic, “C” curve, diffusion process, critical radius of transformation, solid state transformation

Palabras Clave: Termodinámica, curva “C”, proceso difusivo, radio crítico de transformación, transformación en estado sólido





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES



CINÉTICA DE TRANSFORMACIÓN SÓLIDO-SÓLIDO

MATERIA: TRATAMIENTOS TÉRMICOS
CURSO ESCOLAR: JULIO-DICIEMBRE 2011

CATEDRÁTICO: ANA MA. BOLARÍN MIRÓ





CINÉTICA

TRANSFORMACIÓN SÓLIDO-SÓLIDO



* Cuando sucede un cambio fase, de sólido a sólido, se produce un cambio de estructura cristalina, la cual debe cumplir aspectos termodinámicos y cinéticos.

* Los aspectos cinéticos son aquellos que tienen que ver con la velocidad en la que se produce la gráfica del % de transformación vs. Tiempo de transformación \square curva de Avrami.

- Requiere de dos etapas: nucleación y crecimiento.
- La cinética se estudió a través de la representación



CURVA DE AVRAMI

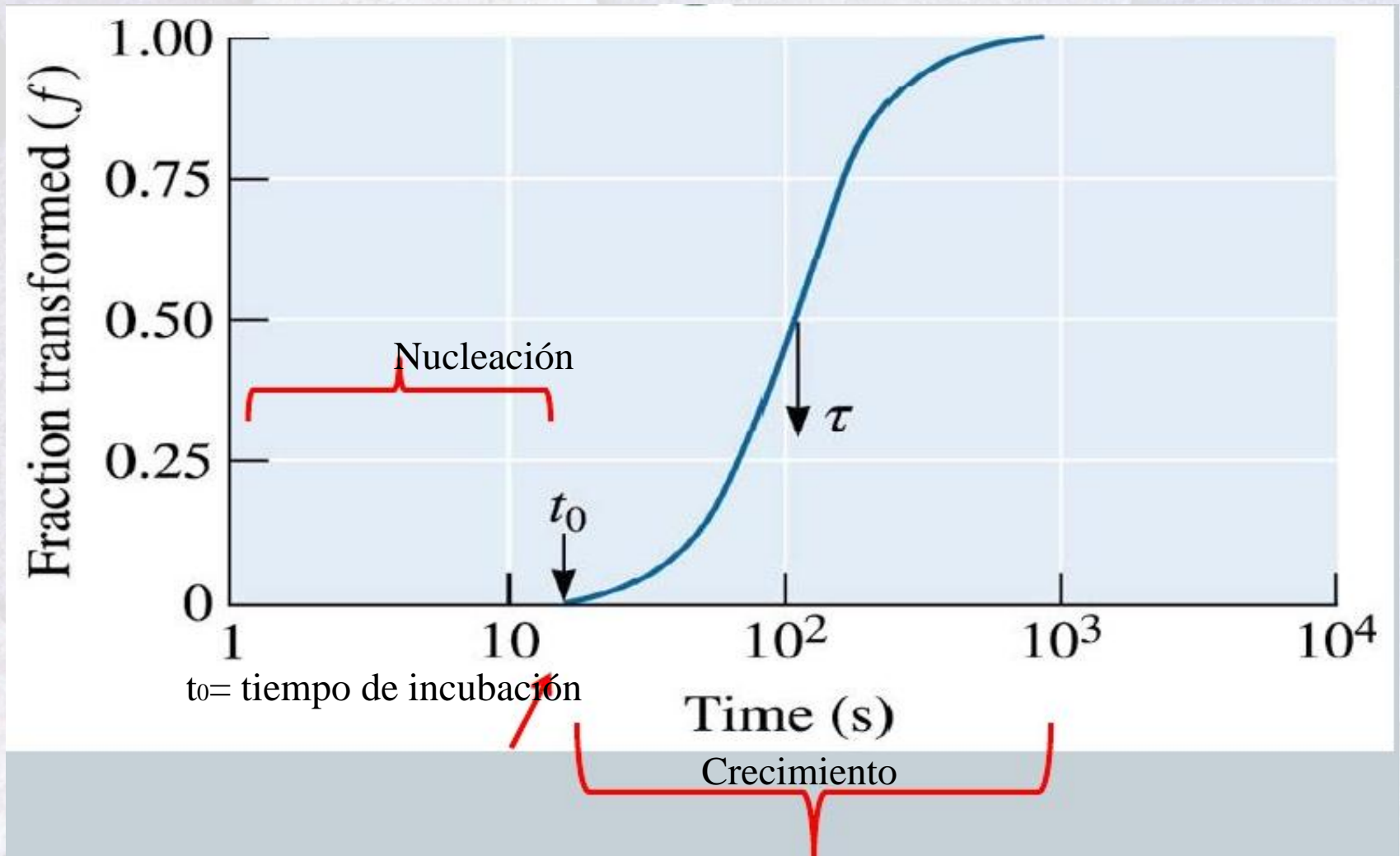
Describes the fraction of a transformation that occurs as a function of time.

This describes most solid-state transformations that involve diffusion, thus martensitic transformations are not described.





ASPECTOS IMPORTANTES CURVA DE AVRAMI





PROCESO DIFUSIVO

El proceso de transformación sólido-sólido puede ser difusivo o adifusivo, lo cual depende de si el proceso se da en condiciones de equilibrio dándole el tiempo necesario para que los átomos difundan hacia su posición de equilibrio.

Es por lo anterior, que es necesario una energía mínima o de activación para iniciar el movimiento de los átomos (difusión)

PROCESOS DIFUSIVOS SÓLIDO-SÓLIDO

- Se define τ como el tiempo en el cual se produce el 50% de transformación.
- Velocidad de transformación es el inverso de $\tau \rightarrow v=1/\tau$
- La velocidad de crecimiento de la nueva fase sigue un comportamiento tipo Arrhenius:

$$V = A \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right)$$

Diagram illustrating the Arrhenius equation for transformation velocity:

- V : Velocidad de transformación
- A : Constante del proceso
- Q : Energía de activación
- R : Constante de gases ideales
- T : Temperatura en K



ECUACIÓN DE AVRAMI

ES POSIBLE DESCRIBIR LA CURVA DE AVRAMI CON UNA ECUACIÓN, Y ÉSTA ES DEL TIPO:

$$f = 1 - \exp(-ct^n)$$

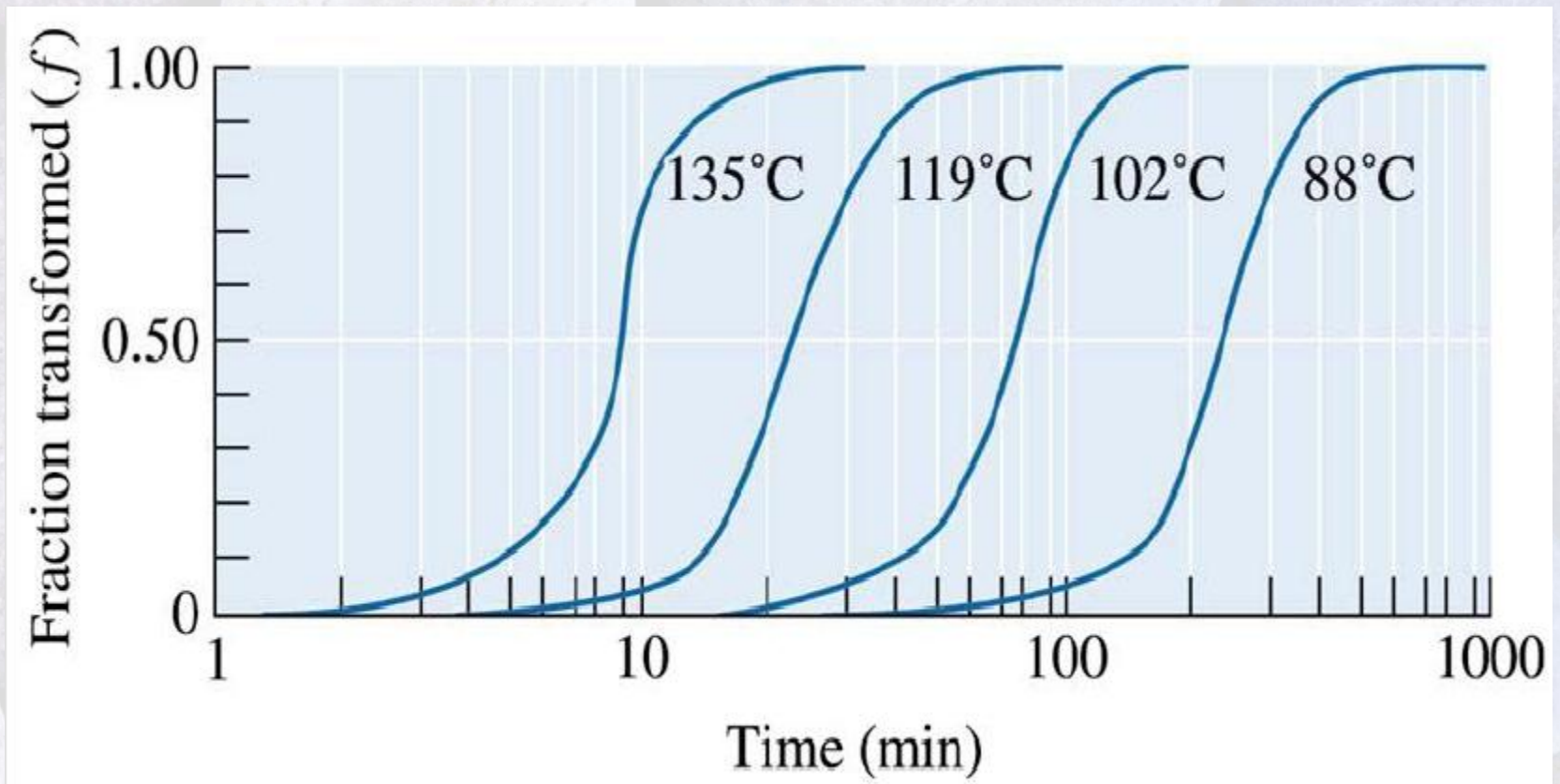
Fracción de transformación

Constante del tiempo
proceso a una T
determinada





Para cada temperatura se obtendrá una curva de Avrami, y así se obtendrán un conjunto de curvas de Avrami para cada material.





EJERCICIOS

1. Se han investigado los valores de n y k de la descomposición de cierto acero, dando seguimiento a la fracción transformada en función del tiempo. A partir de datos experimentales se determinaron valores de n y k , a dos temperaturas. Grafique la fracción transformada en función del tiempo, a 400 y 360° C, con los datos de la siguiente tabla:

Temperatura de descomposición (°C)	n	k (s ⁻¹)
400	2.0	0.085
360	2.0	0.028

2. Cuando se grafica la fracción transformada en función del logaritmo del tiempo, a dos temperaturas distintas, se obtienen dos curvas paralelas (tienen la misma n , pero diferente k), y se ve que los mecanismos de la transformación son iguales. A veces se dice que el proceso es *isocinético*. Para los datos cinéticos que aparecen a continuación, grafique la fracción transformada en función del tiempo a las dos temperaturas. Este proceso, ¿parece ser isocinético?

Temperatura de transformación isotérmica: 415°C		Temperatura de transformación isotérmica: 375°C	
Tiempo (s)	Fración transformada	Tiempo (s)	Fración transformada
2.0	0.032	4.0	0.025
2.5	0.048	5.0	0.037
3.0	0.072	7.5	0.084
4.0	0.129	9.0	0.124
4.5	0.157	10.0	0.151
5.0	0.189	13.5	0.262
6.0	0.272	16.5	0.369
9.0	0.518	20.0	0.502
11.0	0.669	24.5	0.653
13.5	0.813	30.0	0.799
16.5	0.921	36.5	0.912
		40.5	0.950





EJERCICIOS

3. Se puede determinar el valor de k en la ecuación 8.2-12, para un conjunto de datos cinéticos, observando que:

cuando $kt = 1$,

¿Cuáles son los valores de las constantes de velocidad con los datos del problema 2 ?

4. Cuando los mecanismos que controlan determinada transformación son independientes de la temperatura, se puede definir una energía empírica de activación Q del proceso, ya que

Determine la energía empírica de activación para los datos del problema 2.

5. La precipitación de carburos en ciertos aceros puede aumentar su resistencia. A continuación se ven datos que relacionan el tiempo para alcanzar la resistencia máxima y el tiempo de tratamiento isotérmico. De acuerdo con los datos, determine la energía de activación para el proceso de precipitación. Compare sus resultados con la energía de activación para la difusión de carbono en hierro CC. Explique porqué no son sorprendentes los parecidos entre las dos energías de activación.





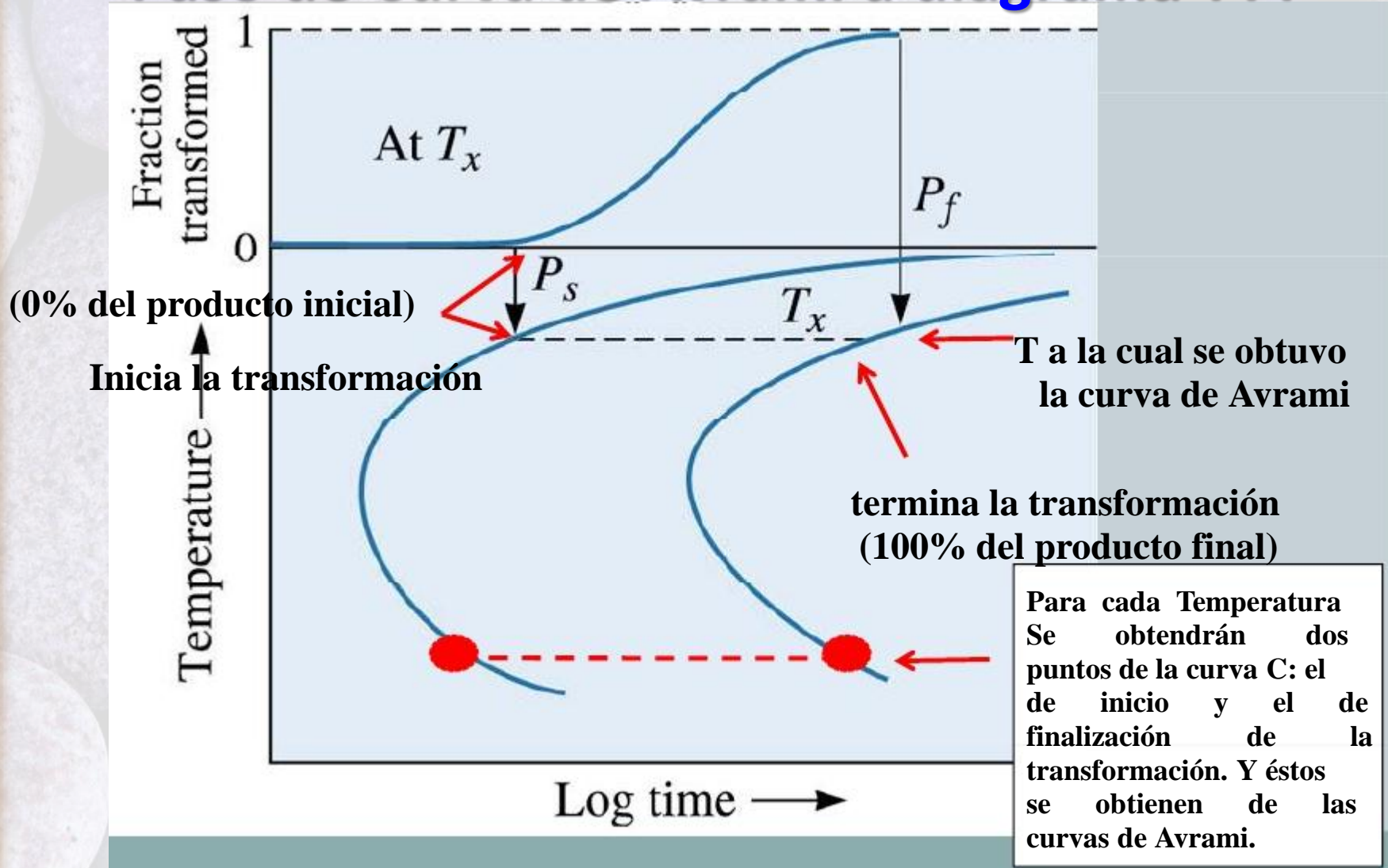
DIAGRAMAS TIEMPO TEMPERATURA TRANSFORMACIÓN

Los diagramas TTT (temperatura, tiempo, transformación) y en particular la curva “C” se obtiene a partir del conjunto de curvas de Avrami para una transformación a diferentes temperaturas, tomando los puntos de la curva de Avrami (f vs t) a diferentes temperaturas y trasladándolos a un diagrama T vs t (diagrama TTT), tal como se muestra en la siguiente figura:





Paso de Curva de Avrami a diagrama TTT





**Diagramas TTT o tiempo
temperatura-transformación:**

Son unas representaciones gráficas de T vs t en los que se muestra como afecta la velocidad de enfriamiento (pendiente de la curva T vs t) sobre la transformación en estado sólido de que se produce y por lo tanto microestructura final.

Estos diagramas permiten determinar la microestructura, a partir de conocer el ciclo térmico al que se someten.

Los diagramas TTT están compuestos por dos tipos de curvas:

- (1) Unas en forma de “C”, que se obtienen tal como se indicó anteriormente y se asocian a procesos de transformación sólido-sólido DIFUSIVOS y
- (2) Unas líneas horizontales, , los cuales se asocian a transformaciones sólido-sólido ADIFUSIVAS o ATÉRMICAS, como es el caso de la transformación martensítica.



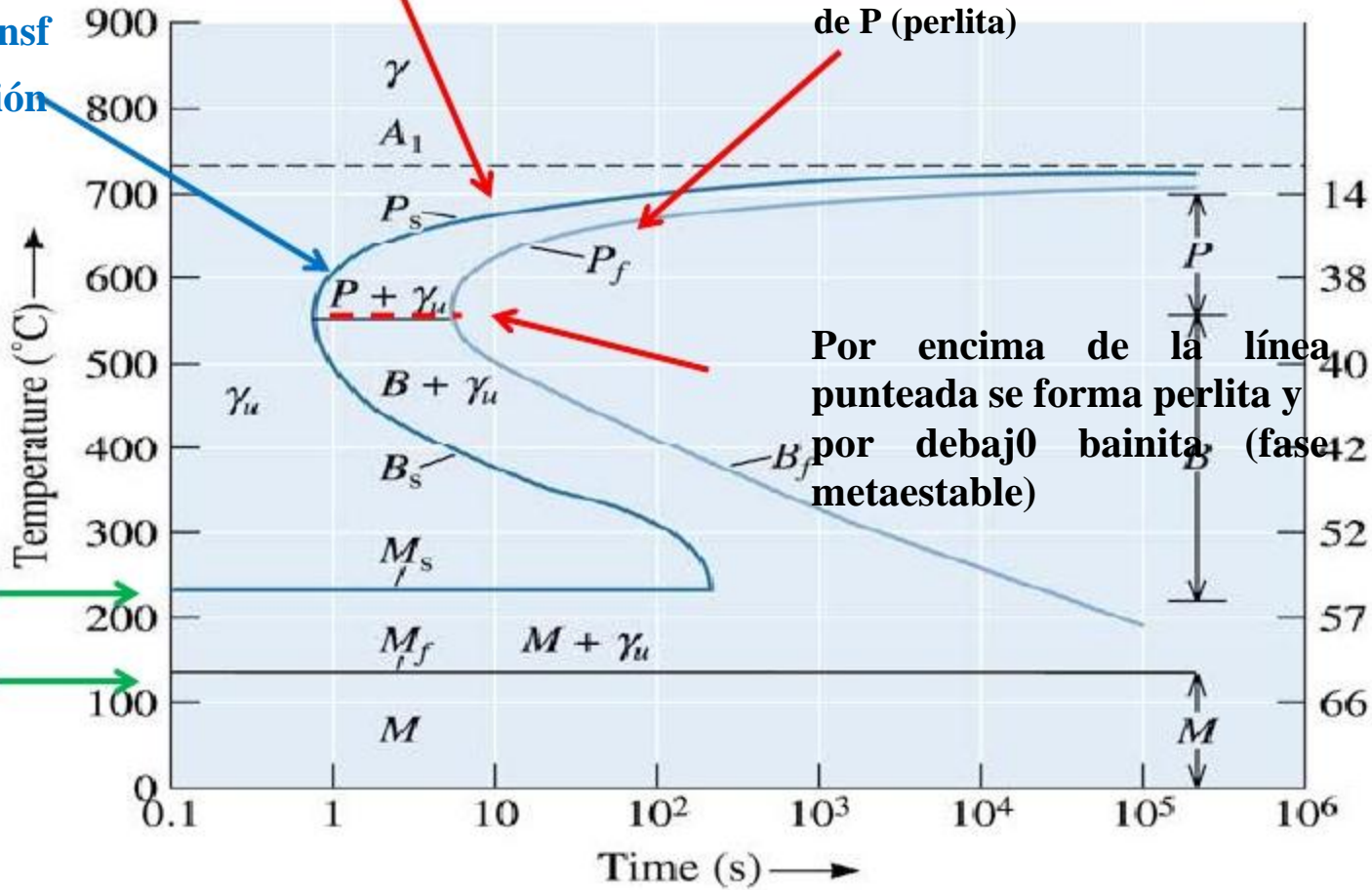


Diagrama TTT (ejemplo)

“Curvas
“C” → transf
con difusión

Curva de inicio de la formación de P (perlita)

Curva de final de la formación de P (perlita)



Por encima de la línea punteada se forma perlita y por debajo bainita (fase metaestable)

Las horizontales → transf
difusión (a sin
difusión)





Los gráficos utilizados están contenidos en:

Donald R. Askeland – Pradeep P. Phulé, “The Science and Engineering of Materials”, 5th ed, 2006 Thomson Editorial

