

# Diagrama Hierro–Carbono

## Tecnología de Materiales

Ing. Darío Fernando Guamán Lozada MSc.

Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Chimborazo

11 de junio de 2025

# Contenido

- 1 Introducción al Sistema Hierro–Carbono
- 2 Estructura y Lectura del Diagrama Fe–C
- 3 Fases Alotrópicas del Hierro Puro
- 4 Fases que No Son Alotrópicas
- 5 Microestructuras Comunes
- 6 Transformaciones Importantes del Diagrama Fe–C
- 7 Regla de la Palanca
- 8 Aplicaciones en Tratamientos Térmicos
- 9 Resumen General y Jerarquía de Fases
- 10 Cierre y Preguntas

# ¿Por qué estudiar el sistema hierro-carbono?

- El hierro es el metal más utilizado en la industria.
- Al agregarle carbono, se obtienen materiales con propiedades ajustables.
- Se crean aleaciones como:
  - **Aceros** ( 2.11 % C)
  - **Fundiciones** (> 2.11 % C)
- El **diagrama hierro-carbono** nos permite predecir qué estructuras se forman y cómo varían sus propiedades.

# Importancia del sistema Fe-C en la ingeniería

- Presente en:
  - Construcción
  - Automotriz
  - Herramientas y maquinaria
- Permite:
  - Modificar dureza, ductilidad, tenacidad
  - Realizar tratamientos térmicos



## ¿Qué es una aleación?

- Es la **combinación de un metal con otros elementos** (metálicos o no).
- Las aleaciones pueden ser:
  - **Sustitucionales**: átomos del soluto reemplazan a los del disolvente.
  - **Intersticiales**: átomos pequeños (como el C) se alojan en los espacios del metal.
- En el acero, el carbono se disuelve en el hierro formando una aleación sólida.

## Clasificación general: Aceros vs Fundiciones

Tipo	Contenido de C	Ejemplos
Aceros	0.02 % – 2.11 %	Estructurales, herramientas
Fundiciones	2.11 % – 6.67 %	Bloques de motor, tuberías

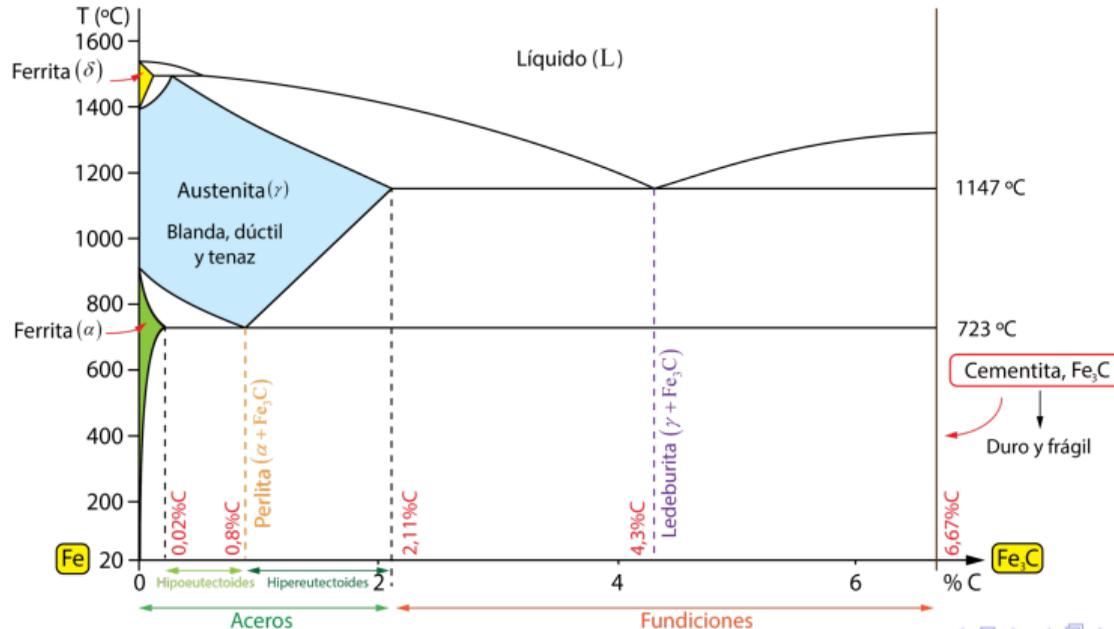
- Las propiedades cambian radicalmente con el contenido de carbono.
- Por eso es importante analizar el **diagrama de equilibrio Fe–C**.

# Objetivos del estudio del sistema Fe–C

- 1 Conocer las **fases que se forman** en aleaciones Fe–C según temperatura y composición.
- 2 Interpretar el **diagrama de fases** para entender el comportamiento térmico del material.
- 3 Aplicar este conocimiento a **tratamientos térmicos** y selección de materiales.

# Ejes del diagrama Fe-C

- **Eje horizontal (X):** Porcentaje de carbono (de 0 a 6.67%)
- **Eje vertical (Y):** Temperatura (hasta 1600°C aprox.)
- Cada punto del diagrama representa una aleación con cierta composición y temperatura.



# Regiones del diagrama Fe–C

- Regiones de **fase única**: ferrita ( $\alpha$ ), austenita ( $\gamma$ ), cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )
- Regiones de **mezcla de fases**:  $\alpha + \gamma$ ,  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$
- Zona **líquida** y zonas **líquido + sólido**

## Zonas críticas: aceros y fundiciones

- La mayoría de aceros comerciales tienen entre **0.02 % y 2.11 % de carbono**.
- A **4.3 % de C** ocurre la **reacción eutéctica** (líquido  $\rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ ).
- Estas zonas son clave para tratamientos térmicos y diseño de materiales.

## Líneas importantes del diagrama Fe–C

- **Línea Liquidus:** sobre ella, todo está en estado líquido.
- **Línea Solidus:** bajo ella, todo está en estado sólido.
- **Línea eutectoide** (727°C, 0.8 % C):  $\gamma \rightarrow$  perlita.
- **Línea eutéctica** (1147°C, 4.3 % C): líquido  $\rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ .
- **Línea peritética** (1495°C, 0.17 % C): líquido +  $\alpha \rightarrow \gamma$ .

# ¿Qué es una fase alotrópica?

- Una misma sustancia puede tener diferentes formas de ordenamiento atómico según la temperatura o presión.
- A esto se lo llama **alotropía**.
- El hierro es un ejemplo clásico:
  - Cambia de estructura cristalina con la temperatura.
  - Estas formas se conocen como **fases alotrópicas**.

## Comparación entre las fases alotrópicas

Fase	Símbolo	Red	Rango de T (°C)
Ferrita	$\alpha$	BCC	hasta 912
Austenita	$\gamma$	FCC	912 – 1394
Ferrita delta	$\delta$	BCC	1394 – 1538

## ¿Qué no es una fase alotrópica?

- No todas las fases del sistema hierro-carbono son formas del hierro puro.
- Algunas son **compuestos químicos** o **estados físicos distintos**.
- En esta sección analizamos:
  - Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )
  - Hierro líquido

# Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )

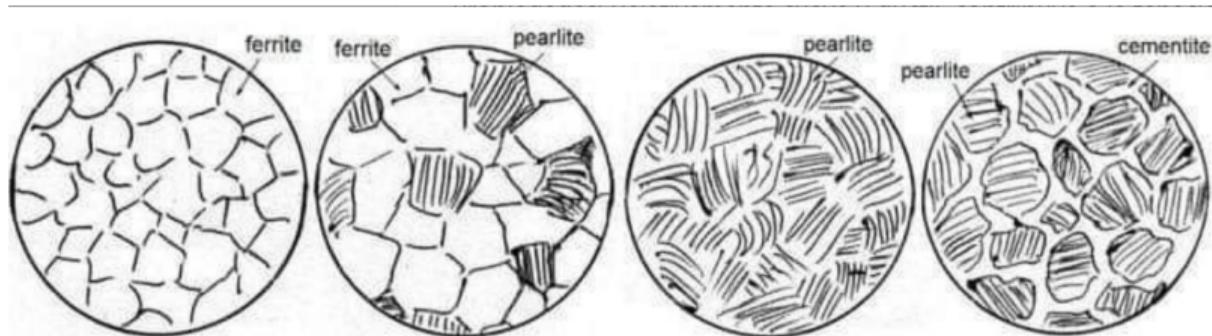
- Es un **carburo de hierro** con composición exacta: 6.67% C.
- Muy dura, frágil y estable a temperatura ambiente.
- Aparece:
  - En aceros hipoeutectoides (como parte de la perlita).
  - En fundiciones.

# Hierro líquido

- Es el **estado fundido del hierro** por encima de los 1538°C.
- No tiene estructura cristalina: los átomos están desordenados.
- Es esencial en:
  - Procesos de fundición de aceros y hierro gris.
  - Fabricación de piezas grandes con moldes.

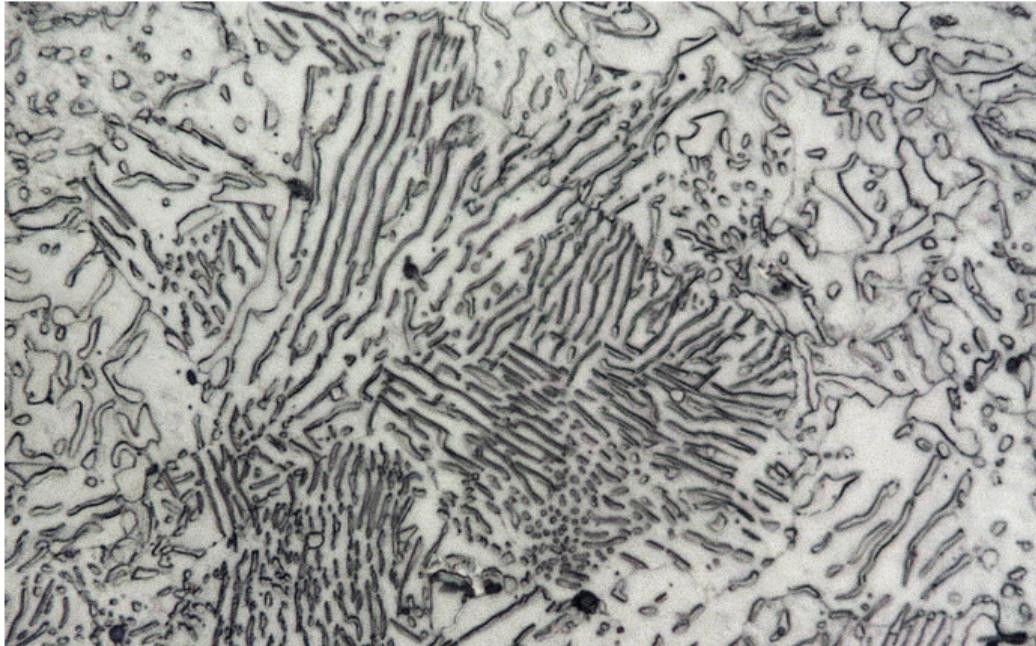
## ¿Qué es una microestructura?

- Es el **patrón interno de fases y compuestos** dentro del material metálico.
- Se forma al enfriar desde altas temperaturas según la velocidad de enfriamiento.
- Las microestructuras afectan las propiedades: dureza, tenacidad, ductilidad.



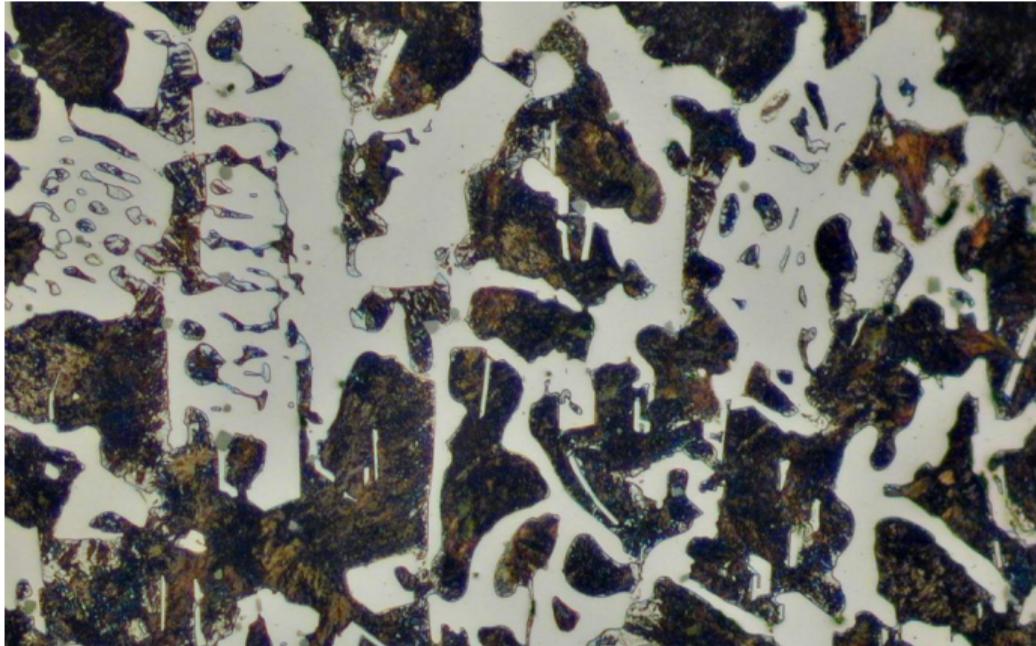
# Perlita

- Mezcla **laminar alternada** de ferrita ( $\alpha$ ) y cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).
- Se forma por transformación **eutectoide** a  $727^\circ\text{C}$ .
- Presente en aceros con  $0.8\% \text{ C}$  o en forma parcial en otros aceros.



# Ledeburita

- Mezcla eutéctica de austenita ( $\gamma$ ) y cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).
- Se forma en fundiciones con **4.3 % de C** a  $1147^\circ\text{C}$ .
- Es muy dura y frágil, típica de hierros fundidos.



# Bainita

- Mezcla de ferrita + cementita con una morfología **acicular o delgada**.
- Se forma por enfriamiento moderado desde la austenita.
- Propiedades intermedias entre perlita y martensita.



# Martensita

- Se forma al enfriar **rápidamente** (temple) la austenita.
- Estructura con **carbono atrapado** en solución sólida sobresaturada.
- Es la fase más **dura y frágil**.

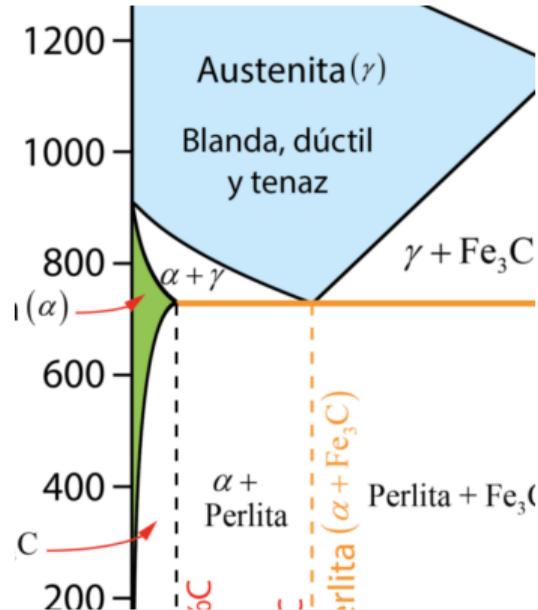


# Transformaciones de fase en el diagrama Fe–C

- Son puntos o líneas clave donde ocurren **cambios de fase**.
- Determinan cómo se forman las microestructuras:
  - Eutectoide
  - Eutéctica
  - Peritética
- Conocerlas permite controlar el tratamiento térmico y la composición.

# Transformación Eutectoide

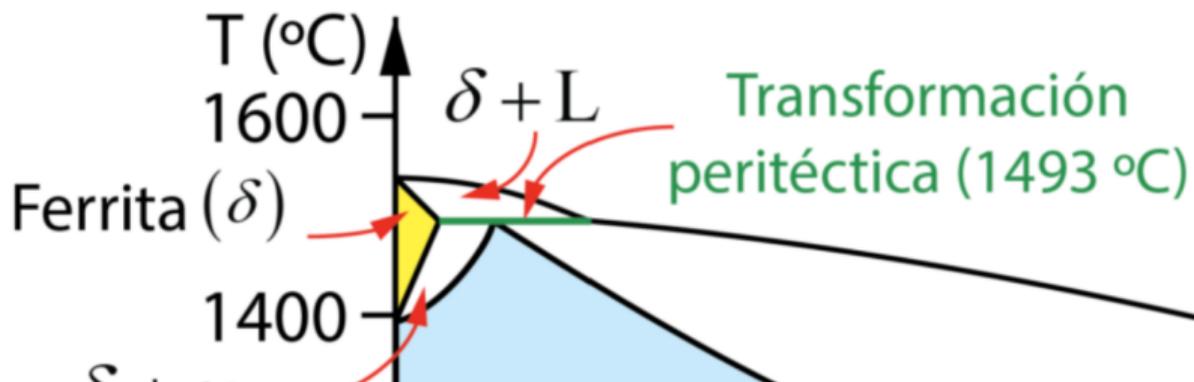
- Ocurre a **727°C** con **0.8% C**.
- Una sola fase (austenita  $\gamma$ ) se convierte en dos: **perlita = ferrita ( $\alpha$ ) + cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )**.
- Es típica de aceros.





# Transformación Peritéctica

- Se presenta a **1495°C** con **0.17% C**.
- El **líquido + ferrita ( $\alpha$ )** se transforma en **austenita ( $\gamma$ )**.
- Poco común, pero importante en procesos de solidificación.

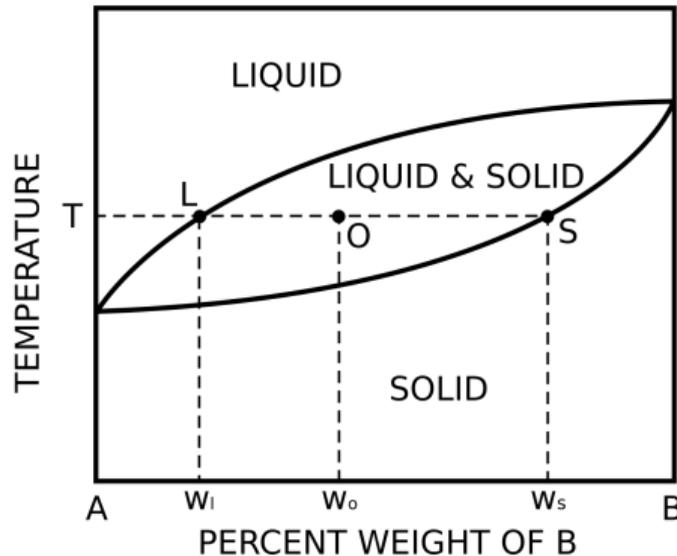


## Resumen de las transformaciones

Nombre	Condiciones	Fase inicial	Fases finales
Eutectoide	0.8 % C, 727°C	$\gamma$	$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$
Eutéctica	4.3 % C, 1147°C	líquido	$\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$
Peritéctica	0.17 % C, 1495°C	líquido + $\alpha$	$\gamma$

## ¿Qué es la regla de la palanca?

- Es una herramienta para calcular la **proporción de fases** presentes en una aleación dentro de una **región de dos fases**.
- Se basa en una analogía con una **palanca o balanza**.
- Sirve cuando el material se encuentra en equilibrio entre dos fases.



## Fórmulas de la regla de la palanca

- Supón una aleación con composición  $C_0$ , dentro de una región de dos fases:

$$C_A \longleftarrow C_0 \longrightarrow C_B$$

- Porcentaje en masa de cada fase:

$$\% \text{ Fase A} = \frac{C_B - C_0}{C_B - C_A} \times 100$$

$$\% \text{ Fase B} = \frac{C_0 - C_A}{C_B - C_A} \times 100$$

## Ejemplo 1: acero con 0.4 % C a 727°C

- Se encuentra en la región: **ferrita + perlita**.
- Límites:
  - $C_{\alpha} = 0.022\%$
  - $C_{eutectoide} = 0.8\%$
- Aplicando la regla:

$$\% \text{ perlita} = \frac{0,4 - 0,022}{0,8 - 0,022} \times 100 \approx 48,8\%$$

$$\% \text{ ferrita} = \frac{0,8 - 0,4}{0,8 - 0,022} \times 100 \approx 51,2\%$$

## Ejemplo 2: acero con 1.2 % C a 727°C

- Se encuentra en la región: **perlita + cementita**.
- Límites:
  - $C_{eutectoide} = 0.8\%$
  - $C_{Fe_3C} = 6.67\%$
- Aplicando la regla:

$$\% \text{ perlita} = \frac{6,67 - 1,2}{6,67 - 0,8} \times 100 \approx 85,6\%$$

$$\% \text{ cementita} = \frac{1,2 - 0,8}{6,67 - 0,8} \times 100 \approx 14,4\%$$

## ¿Por qué estudiar el diagrama Fe–C?

- Permite aplicar **tratamientos térmicos controlados**.
- Estos tratamientos modifican la **microestructura** y por tanto las **propiedades** del material.
- Aplicaciones:
  - Herramientas de corte
  - Ejes, resortes, engranajes
  - Piezas estructurales

## Relación entre tratamiento y fases

- **Martensita** se forma al templar la **austenita**.
- **Perlita** se obtiene por enfriamiento lento de austenita.
- **Bainita** aparece con enfriamiento intermedio.
- **Ferrita** y **cementita** resultan de transformaciones difusionales.

- Consiste en calentar hasta obtener **austenita** y luego enfriar rápidamente.
- Resultado: **martensita** (muy dura y frágil).
- Requiere revenido posterior para mejorar tenacidad.

- Calentamiento controlado de un acero templado.
- Reduce tensiones internas y mejora la **tenacidad**.
- Equilibrio entre **dureza y resistencia al impacto**.

- Calentamiento y enfriamiento lento.
- Permite **ablandar** el acero, restaurar la estructura o eliminar tensiones.
- Se usa después del trabajo en frío o en piezas deformadas.

- Similar al recocido, pero con enfriamiento al aire.
- Genera una estructura más fina y resistente.
- Se aplica en piezas que deben tener **resistencia uniforme**.

## Comparativa de propiedades mecánicas

<b>Tratamiento</b>	<b>Dureza</b>	<b>Tenacidad</b>
Temple (martensita)	Alta	Muy baja
Revenido	Media–alta	Alta
Normalizado	Media	Media
Recocido	Baja	Alta

## Estructura jerárquica de fases

- **Sistema Hierro – Carbono**

- Fases alotrópicas del hierro puro:  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$
- Compuestos: Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )
- Microestructuras:
  - Perlita
  - Ledeburita
  - Bainita
  - Martensita
- Otros: Hierro líquido

## Comparativa de propiedades

Fase o microestructura	Dureza	Tenacidad	Comentario
Ferrita ( $\alpha$ )	Baja	Alta	Suave y dúctil
Austenita ( $\gamma$ )	Media	Alta	Estable a alta $T^\circ$
Cementita ( $Fe_3C$ )	Muy alta	Muy baja	Muy frágil
Perlita	Media	Media	Capas de $\alpha + Fe_3C$
Bainita	Alta	Media	Fina y fuerte
Martensita	Muy alta	Muy baja	Templada
Ledeburita	Muy alta	Baja	Fundiciones

### ¿Qué aprendimos hoy?

- Interpretar el diagrama hierro-carbono.
- Reconocer fases puras, compuestos y microestructuras.
- Aplicar la regla de la palanca.
- Relacionar las transformaciones con tratamientos térmicos.
- Comprender la importancia práctica del equilibrio Fe-C.