

## DIAGRAMA Fe - C

### □ Importancia del hierro en la metalurgia

- ✓ *Afinidad química*
- ✓ *Capacidad de solubilidad de otros elementos*
- ✓ *Propiedad alotrópica en estado sólido*
- ✓ *Capacidad para variar sustancialmente la estructura metalográfica*
- ✓ *Capacidad de variar significativamente las propiedades mecánicas*

# DIAGRAMA Fe - C

## ❑ Formas de modificar las aleaciones ferrosas

✓ *Adicción de elementos químicos*

✓ *Tratamientos térmicos*

✓ *Tratamientos termoquímicos*

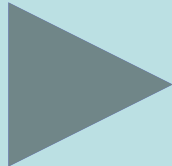
✓ *Metalizado y recubrimientos*



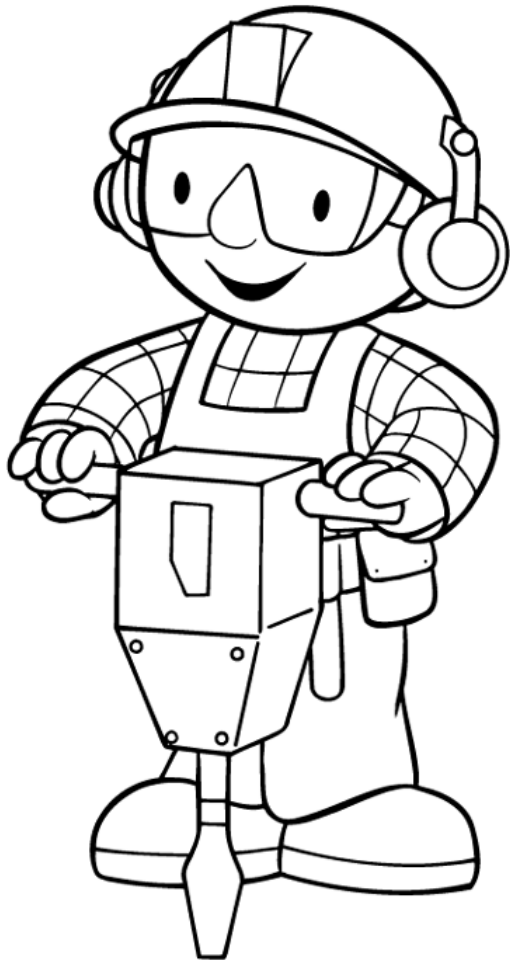
✓ *Deformación plástica*



## ✓ *Metalizado y recubrimientos*



# Endurecimiento por deformación plástica



Demolition Hammer ERB 050(bajaryoutube.com).flv

# DIAGRAMA Fe - C

## ❑ Clasificación

✓ *Composición química* 

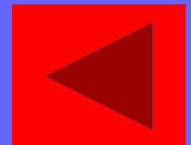
✓ *Microestructura* 

✓ *Usos y aplicaciones* 

✓ *Condiciones de trabajo* 

✓ *Procesos de obtención* 

- ✓ **Aceros al carbono**
- ✓ **Aceros al cromo**
- ✓ **Aceros al cromo níquel**
- ✓ **Aceros al cromo níquel molibdeno**
- ✓ **Aceros al manganeso**
- ✓ **Aceros al cromo vanadio**



- ✓ **Aceros al carbono hipoeutectoides**
- ✓ **Aceros al carbono eutectoides**
- ✓ **Aceros al carbono hipereutectoides**
- ✓ **Aceros inoxidables ferríticos**
- ✓ **Aceros inoxidables austeníticos**
- ✓ **Aceros inoxidables martensíticos**

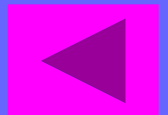


- ✓ Aceros estructurales
- ✓ Aceros para calderería
- ✓ Aceros de herramientas
- ✓ Aceros para matricería
- ✓ Aceros para resortes
- ✓ Aceros para uso naval



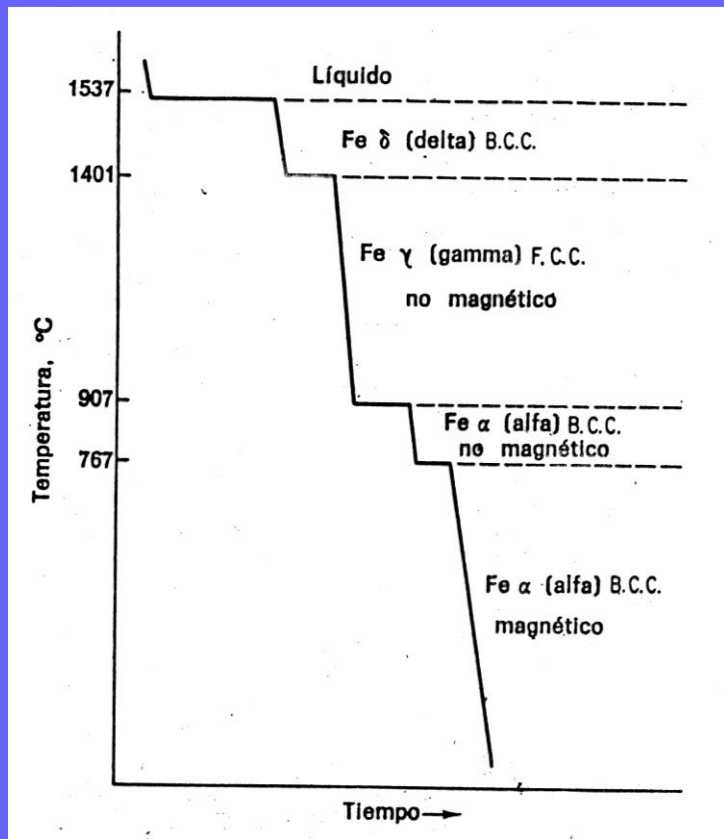


- ✓ **Acero para trabajo en caliente**
- ✓ **Acero para trabajos criogénicos**
- ✓ **Acero para trabajo en atmósferas salinas**
- ✓ **Aceros resistentes a productos químicos**
- ✓ **Aceros resistentes al desgaste**



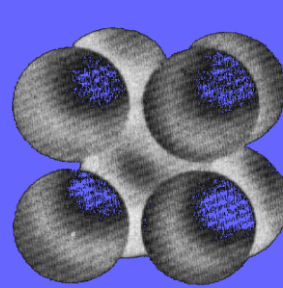
- ✓ **Aceros obtenidos en horno eléctrico**
- ✓ **Aceros siemens Martin**
- ✓ **Aceros fabricados en convertidor Bessemer**



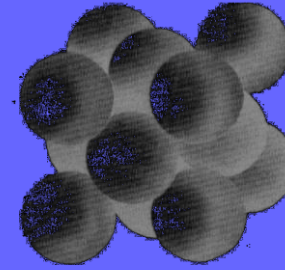


Curva de enfriamiento  
del hierro puro

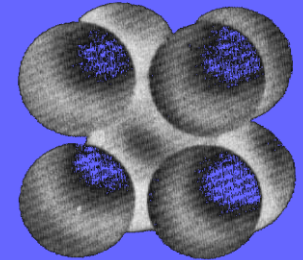
## DIAGRAMA Fe - C



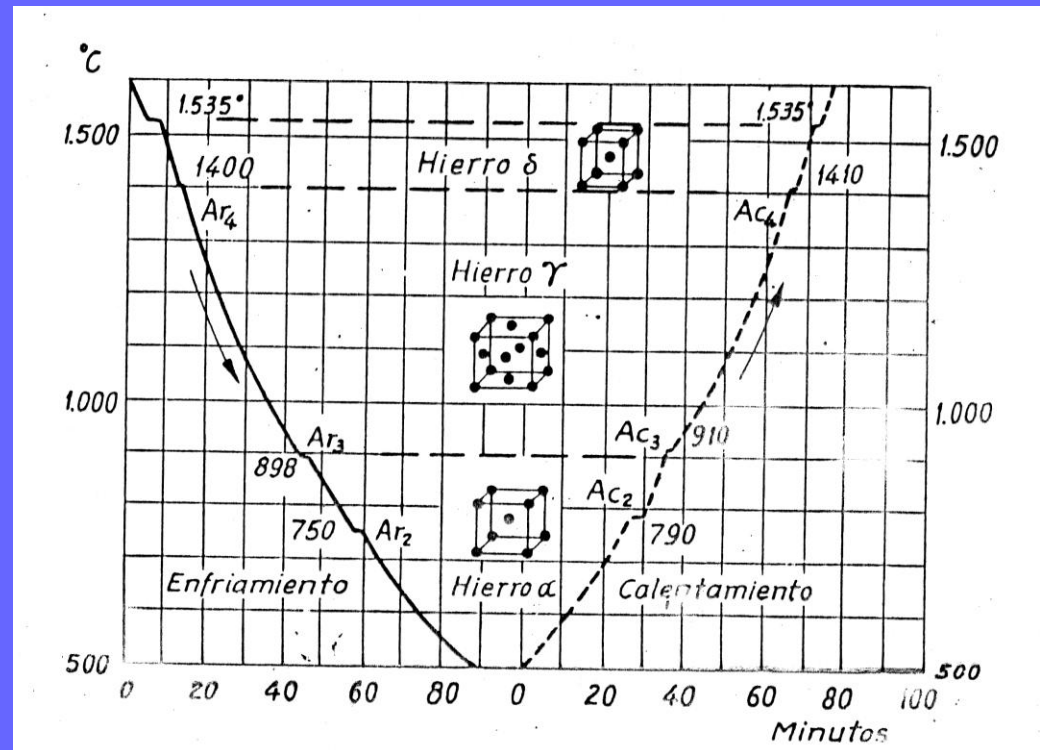
Fe  $\delta$



Fe  $\gamma$



Fe  $\alpha$



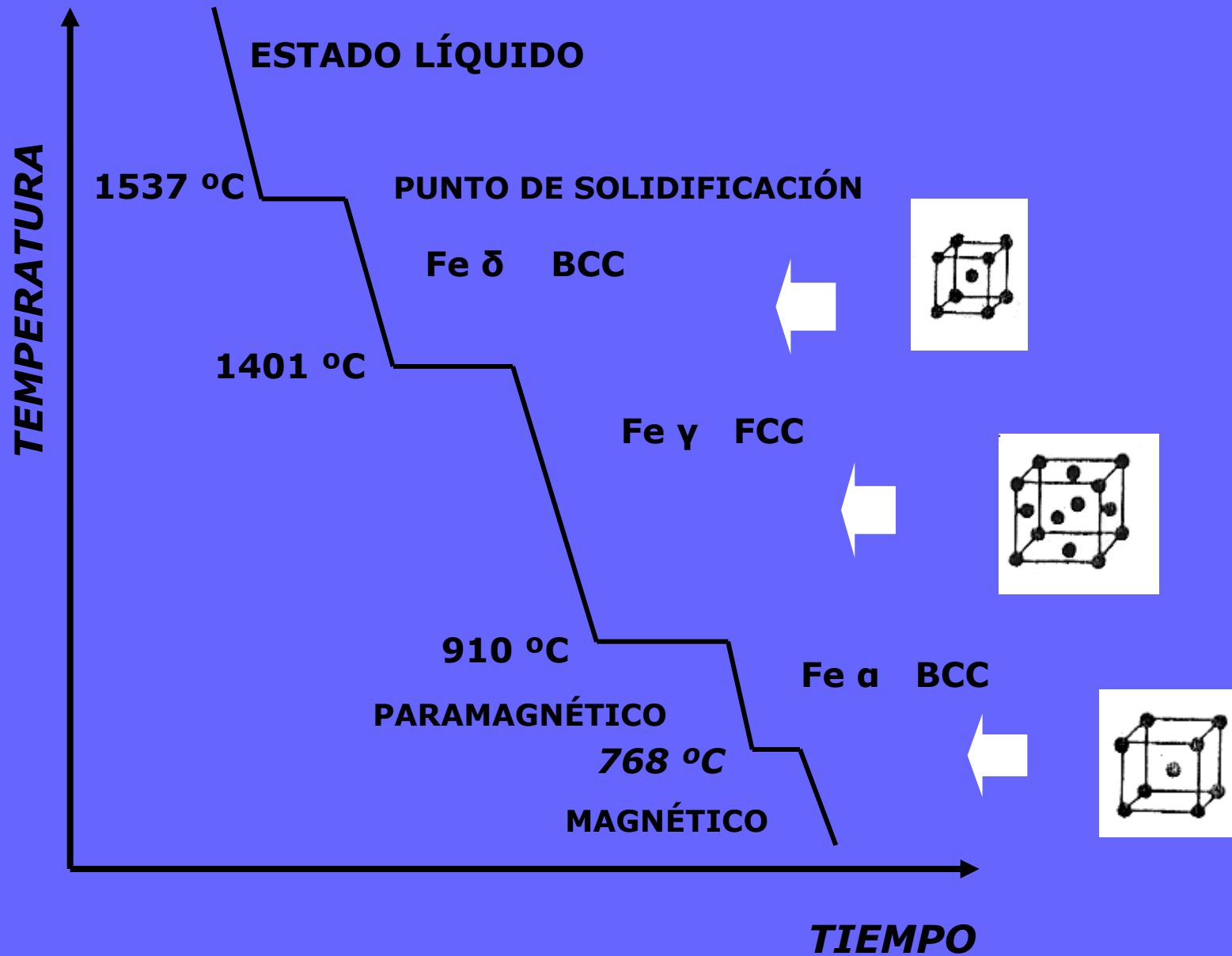
Curva de enfriamiento y calentamiento  
del hierro puro y cambios alotrópicos

## ❑ DEFINICIÓN

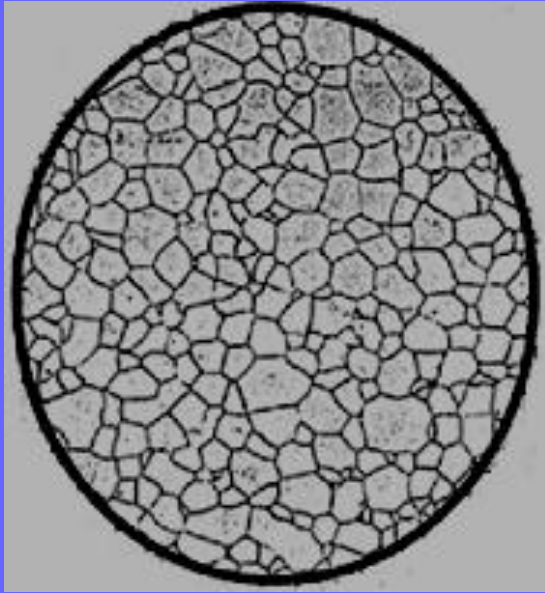
**POLIMORFISMO** ES LA PROPIEDAD QUE PRESENTAN MUCHOS MATERIALES DE POSEER VARIAS ESTRUCTURAS CRISTALINAS EN ESTADO SÓLIDO

SI ESTOS CAMBIOS SON REVERSIBLES, LA TRANSFORMACIÓN POLIMÓRFICA SE DENOMINA **ALOTROPÍA**

15 METALES PRESENTAN ESTA PROPIEDAD Y EL **Fe** ES EL MÁS CONOCIDO Y DE MAYOR DIFUSIÓN INDUSTRIAL



# DIAGRAMA Fe - C



***Vista  
metalográfica***

## ❑ ***PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HIERRO***

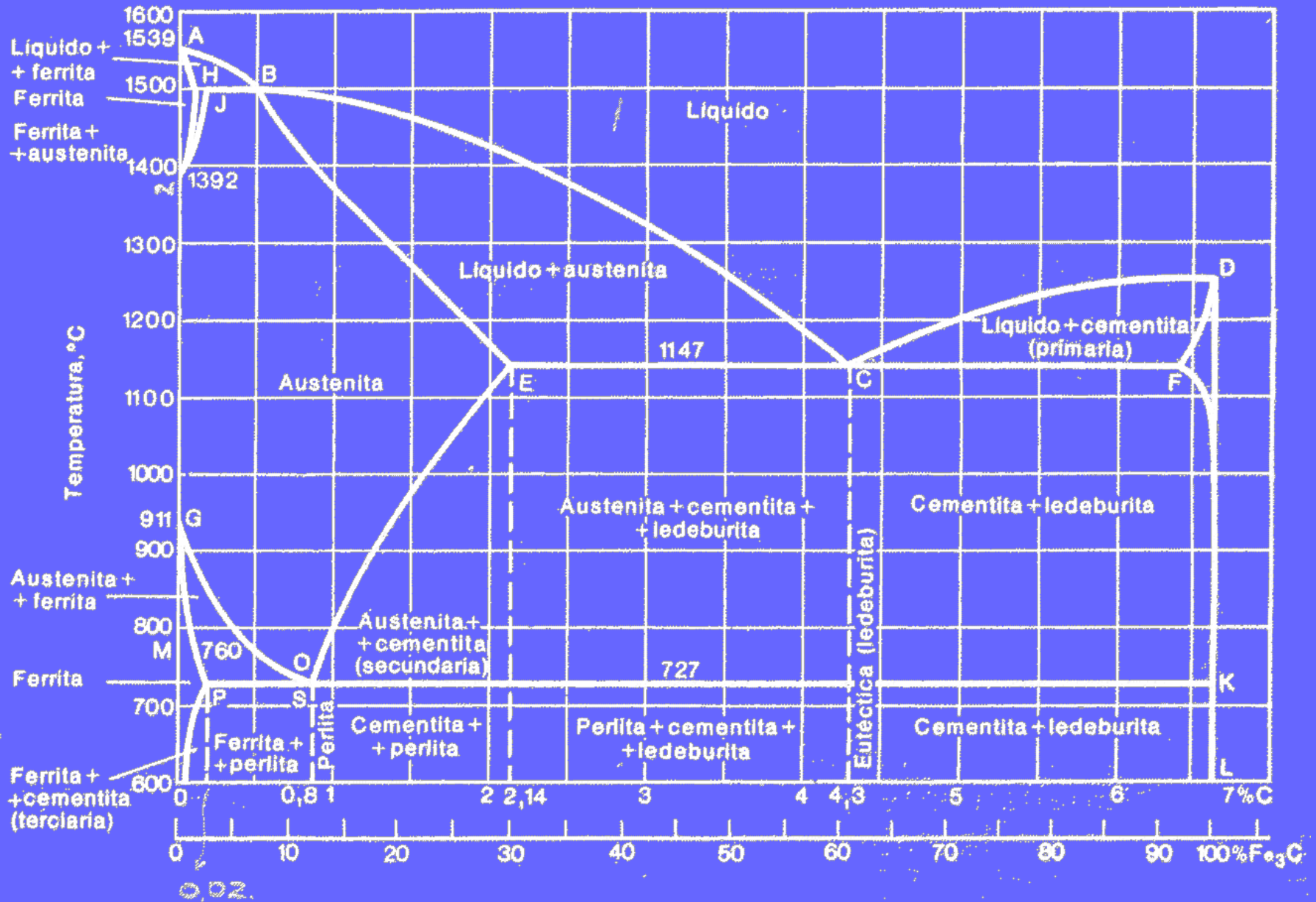
- ✓ Resistencia a la tracción 28 kg/mm<sup>2</sup>
- ✓ Elongación en 2 pulg. 40%
- ✓ Dureza Rockwell HR<sub>B</sub> 30

## DIAGRAMA Fe - C

- ❑ *La adición de elementos de aleación influye en las temperaturas de las variaciones alotrópicas del hierro de los cuales el más importante es el carbono*

- ❑ *En la práctica industrial se consideran dos tipos de diagramas Fe - C el llamado metaestable Fe - Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) y el estable Fe - grafito*

# DIAGRAMA Fe - C





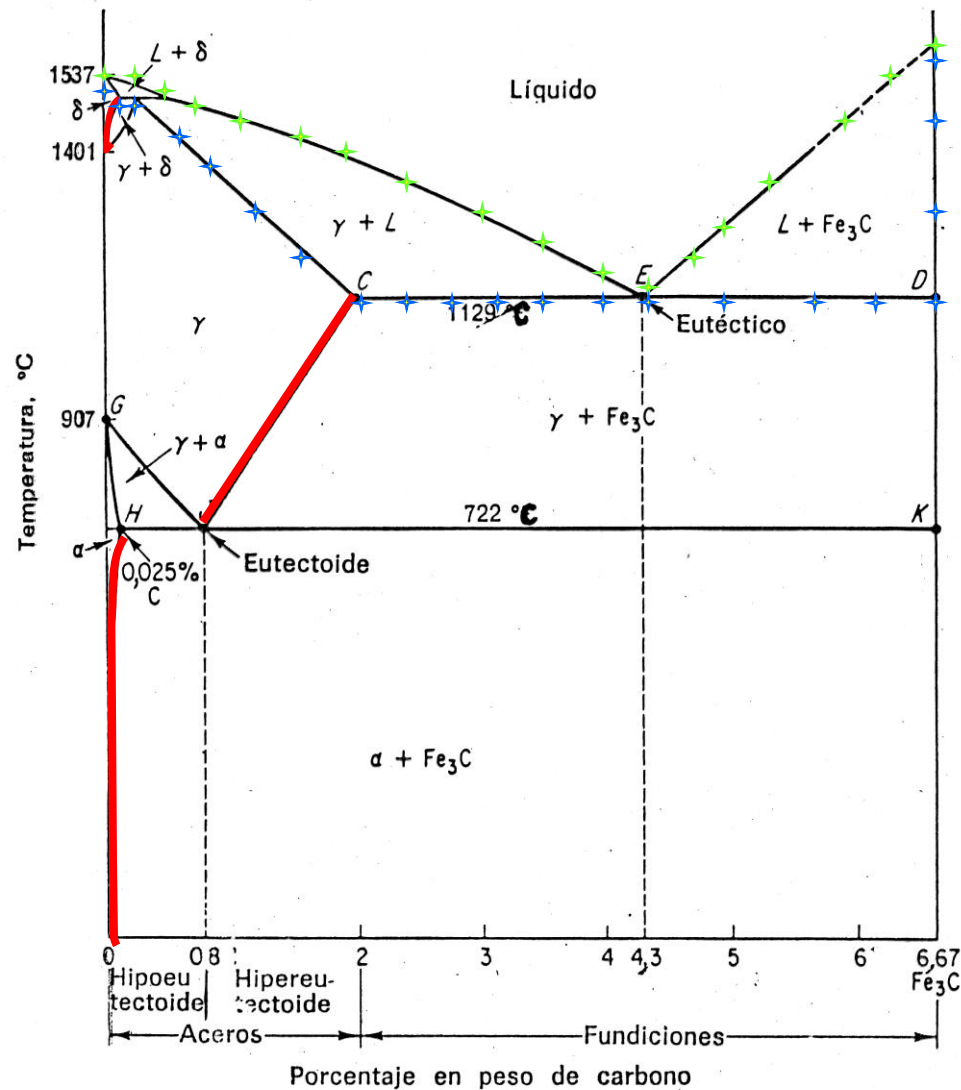
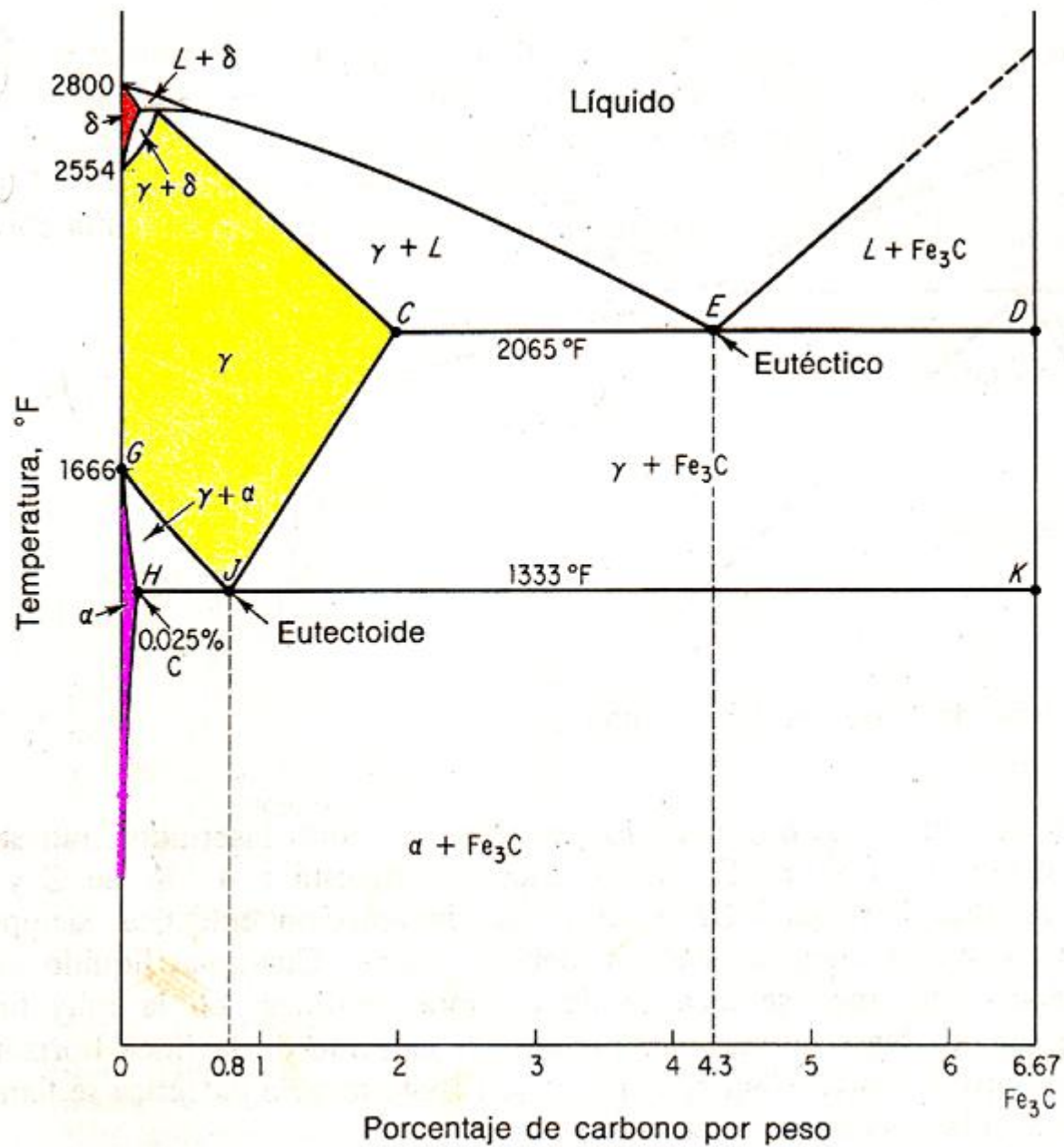


Diagrama de equilibrio hierro-carbono.

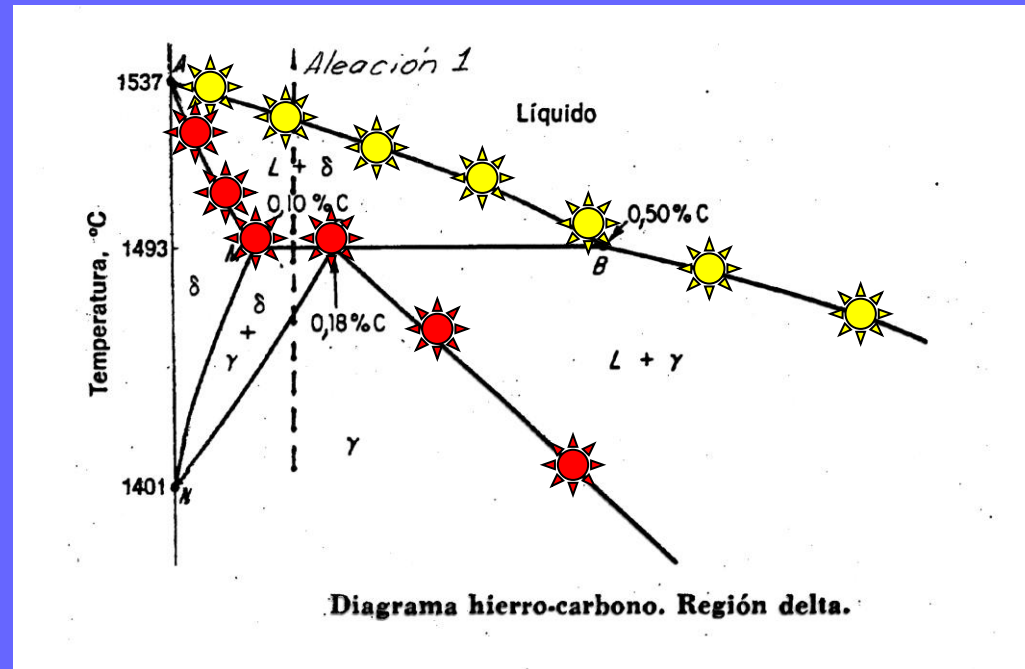


► **Zona  $\delta$**

► **Zona  $\gamma$**

► **Zona  $\alpha$**

# Zona $\delta$ , reacción peritectica



☀ Línea de líquidus

☀ Línea de sólidos

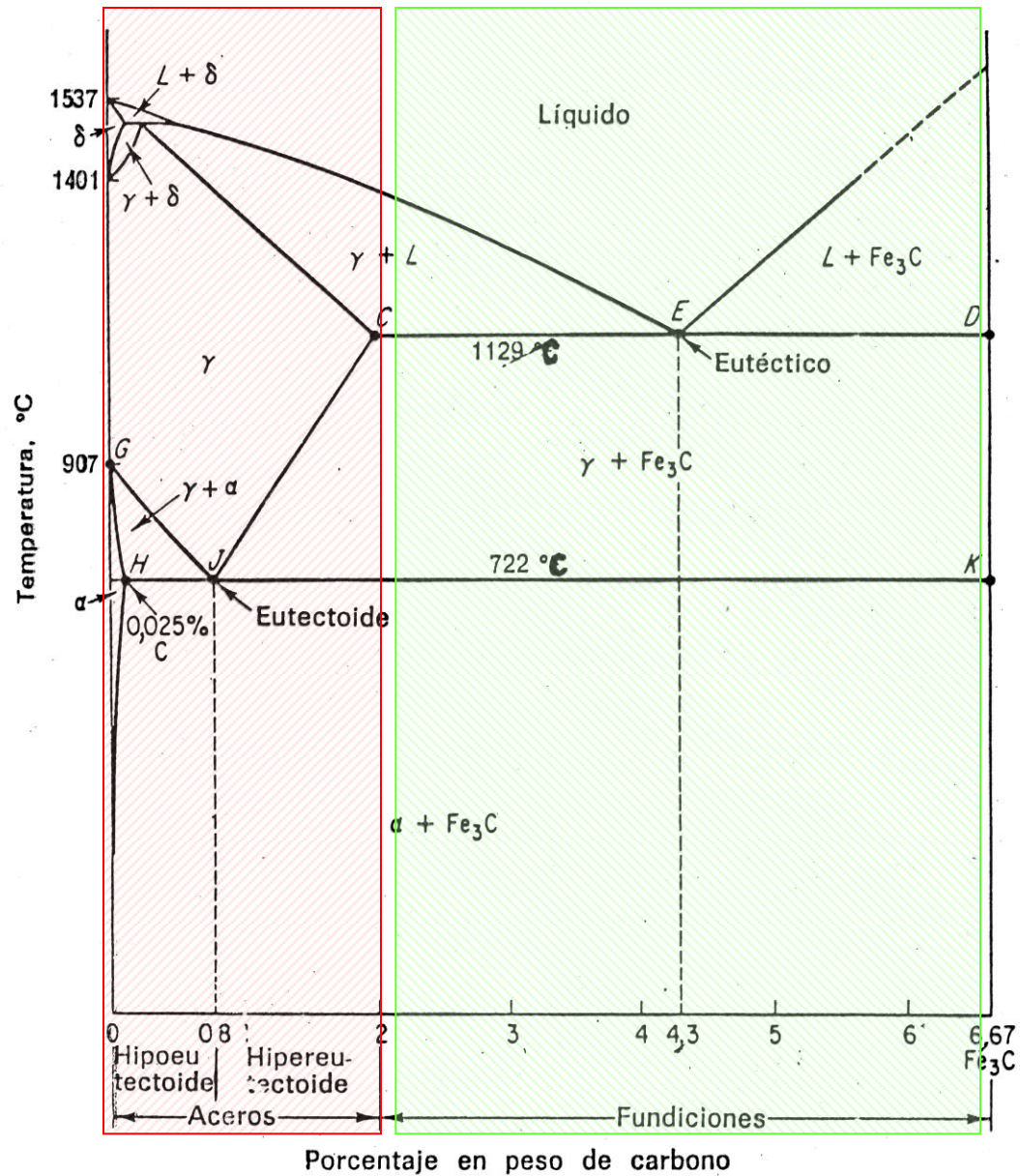


Diagrama de equilibrio Fe - C

# DIAGRAMA DE FLUJO



# DEFINICIONES

❑ ***Aceros son aleaciones de Fe y C cuyo porcentaje de este elemento es inferior al 2%***

❑ ***Los aceros pueden ser:***

✓ ***Hipoeutectoides, donde el porcentaje de carbono es inferior al 0,8%***

✓ ***Eutectoides, donde el porcentaje de carbono es de 0,8%***

✓ ***Hipereutectoides, donde el porcentaje de carbono es superior al 0,8%***

# DEFINICIONES

❑ **Fundiciones son aleaciones de Fe y C cuyo porcentaje varía entre 2,0 y 6,67 %**

❑ **Las fundiciones pueden ser:**

- ✓ **Hipoeutecticas, donde el porcentaje de carbono varía entre 2% y 4,3%**
- ✓ **Eutecticas, donde el porcentaje de carbono es de 4,3%**
- ✓ **Hipereutecticas, donde el porcentaje de carbono varia entre 4,3% y 6,67%**



# DIAGRAMA Fe - C

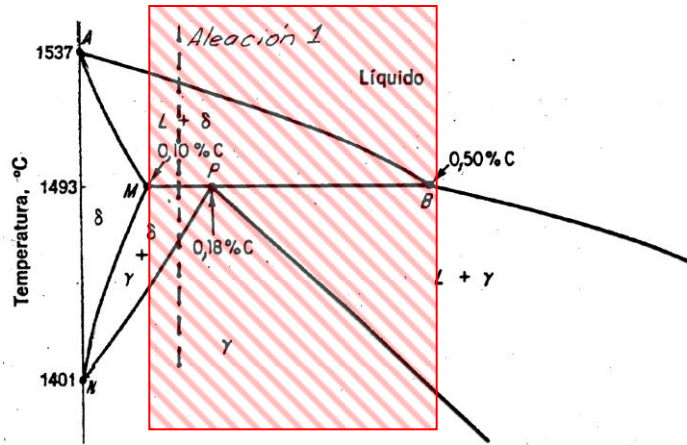


Diagrama hierro-carbono. Región delta.

## Aleación 1

- \* Temperatura de transformación 1493 °C
- \* Composición de la aleación %C 0.14 resto Fe

$\delta$  **0.10** **0.14** **0.50** L

$T_M \uparrow$	Fases	Comp.	Cant.
	$\delta$	0.10 %C	$\frac{0.36}{0.40} \times 100 = 90 \%$
	L	0.50 %C	$\frac{0.04}{0.40} \times 100 = 10 \%$

$\delta$  **0.10** **0.14** **0.18**  $\gamma$

$T_M \downarrow$	Fases	Comp.	Cant.
	$\delta$	0.10 %C	$\frac{0.04}{0.08} \times 100 = 50 \%$
	$\gamma$	0.18 %C	$\frac{0.04}{0.08} \times 100 = 50 \%$
	L + $\delta$		$\rightarrow \gamma$
	10 % + 40%		$\rightarrow 50 \%$

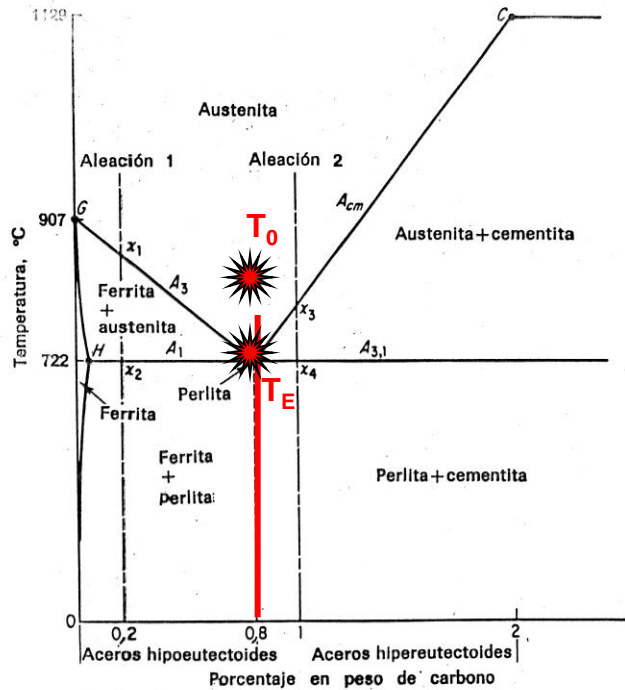
## Reacción Peritética

Líquido + Sólido  $\rightarrow$  Sólido

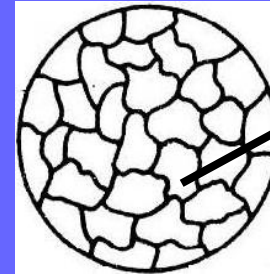
L +  $\delta$   $\rightarrow$   $\gamma$



# Acero eutectoide 0,8% C

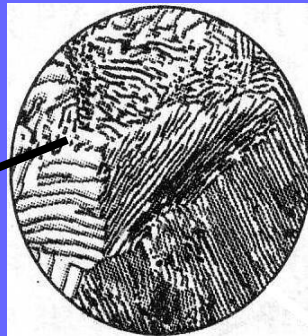
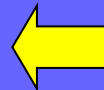
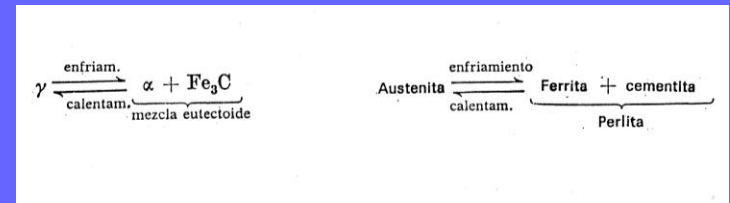
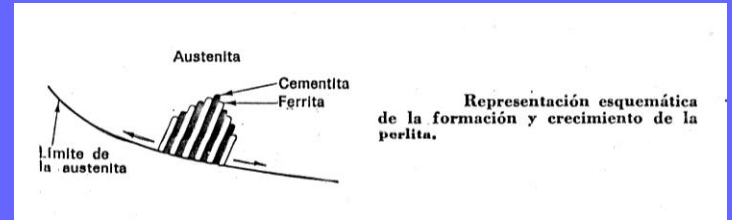


Temperatura  $T_0$



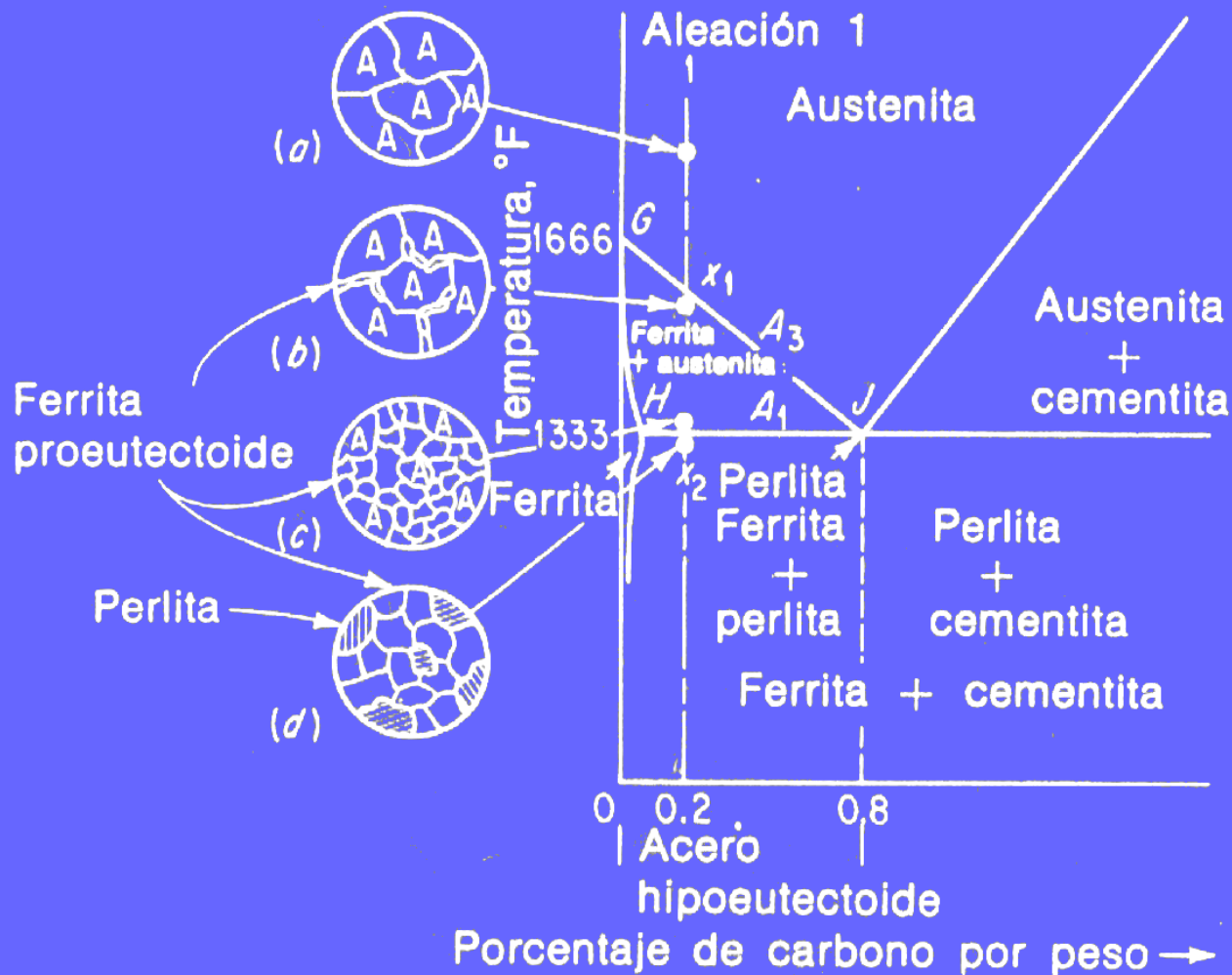
Austenita

Temperatura  $T_E$

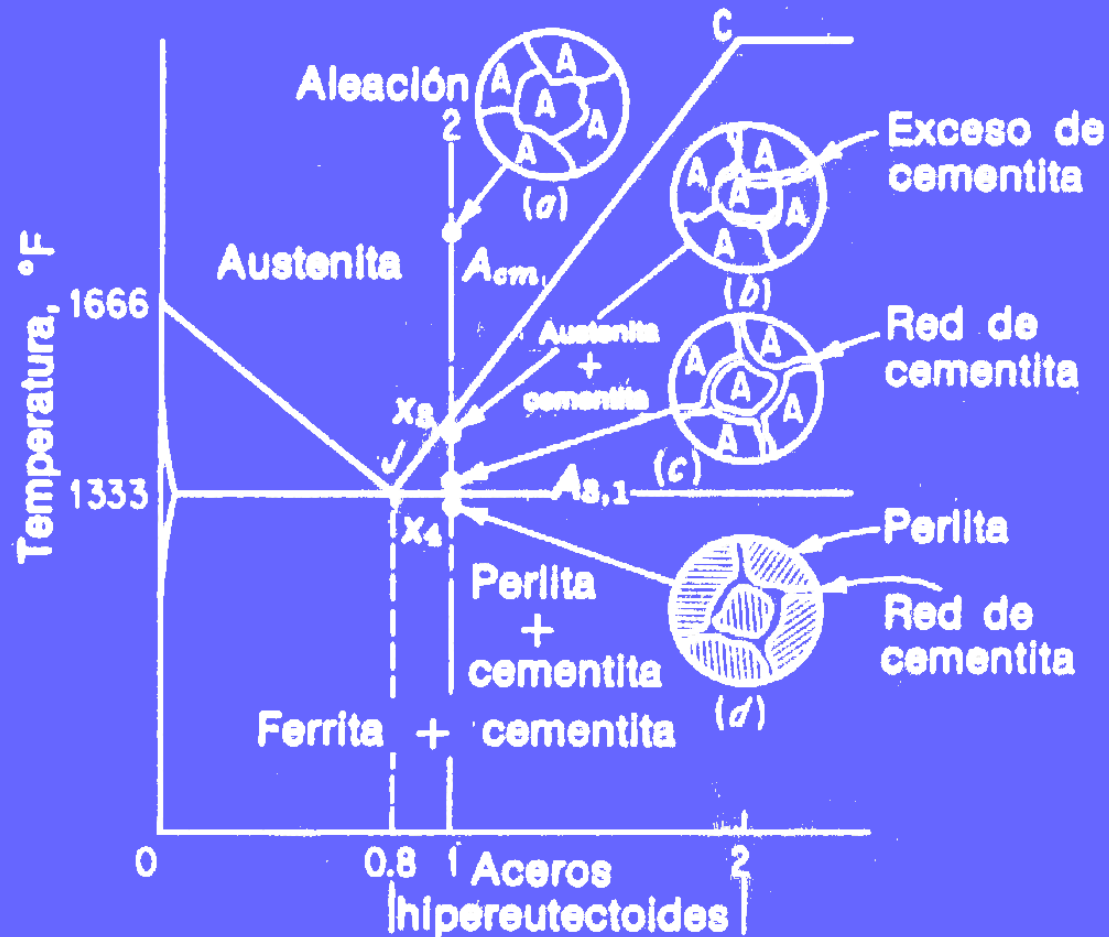


Perlita

# Enfriamiento de acero hipoeutectoide



## *Enfriamiento de acero hipereutectoide*



# ***Definición de estructuras***

## ***Austenita***

- ✓ ***Solución sólida intersticial de carbono en hierro gamma***
- ✓ ***Máxima solubilidad de carbono 2% a 1129°C***
- ✓ ***Resistencia a la tracción 105 kg/mm<sup>2</sup>***
- ✓ ***Alargamiento 10% medido en 2"***
- ✓ ***Dureza 40 HR<sub>c</sub>***
- ✓ ***Normalmente no aparece a temperatura ambiente con excepción de aceros de alta aleación. Ejemplo aceros inoxidables y aceros al carbono de alto contenido, templados***

# ***Definición de estructuras***

## ***Ferrita***

- ✓ ***Solución sólida intersticial de carbono en hierro alfa***
- ✓ ***Máxima solubilidad 0.025% C a 722°C***
- ✓ ***Solubilidad a temperatura ambiente 0,008% C***
- ✓ ***Es la más blanda y plástica de todas las fases***
- ✓ ***Resistencia a la tracción 28 kg/mm<sup>2</sup>***
- ✓ ***Alargamiento 40% medido en 2"***
- ✓ ***Dureza entre 50 – 60 HR<sub>B</sub>***

# ***Definición de estructuras***

## ***Cementita***

- ✓ ***Compuesto químico intersticial***
- ✓ ***Carburo de hierro. Responde a la fórmula  $\text{Fe}_3\text{C}$  con 6,67% de Carbono***
- ✓ ***Alta dureza y gran fragilidad***
- ✓ ***Resistencia a la tracción pequeña***
- ✓ ***Elevada resistencia a la compresión***
- ✓ ***Plasticidad nula***

# ***Definición de estructuras***

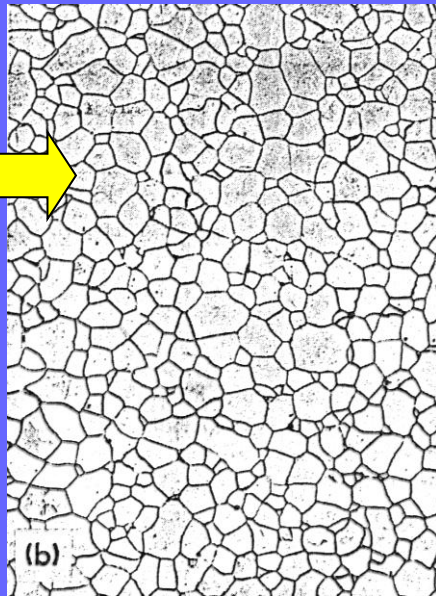
## ***Perlita***

- ✓ ***Mezcla eutectoide de tipo laminar, compuesta por ferrita y cementita. Se obtiene a los 722°C producto de la reacción eutectoide y su porcentaje de carbono es de 0,8%***
- ✓ ***Resistencia a la tracción 84 kg/mm<sup>2</sup>***
- ✓ ***Alargamiento 20% medido en 2"***
- ✓ ***Dureza 20 HR<sub>C</sub>***

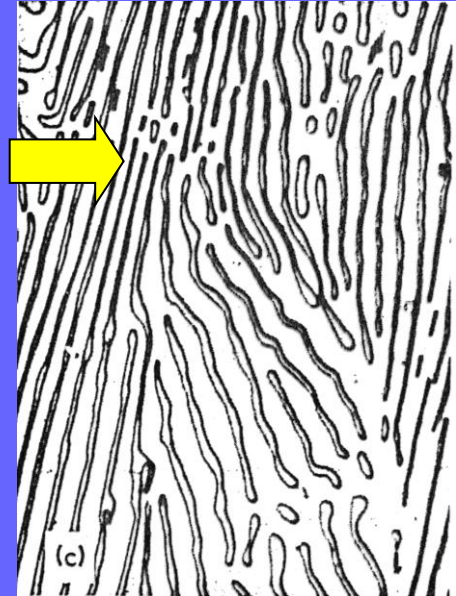


# *Estructuras metalográficas*

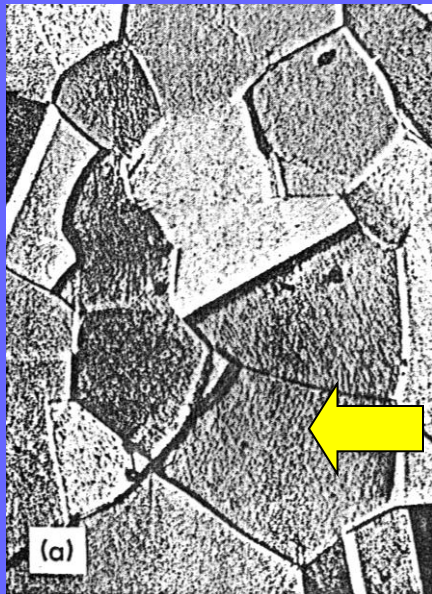
*Ferrita 100X*



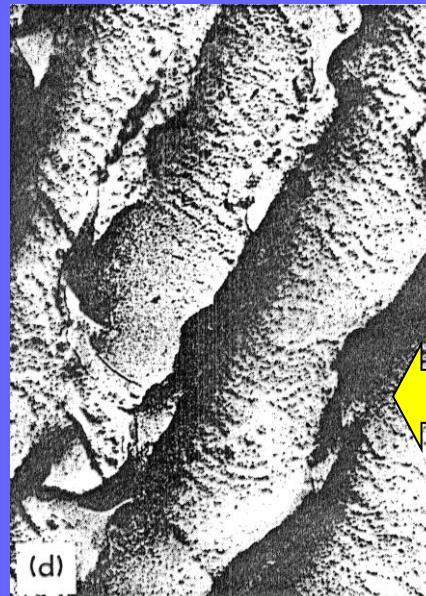
*Perlita 2500X*



*Austenita 500 X*



*Perlita 17000X*



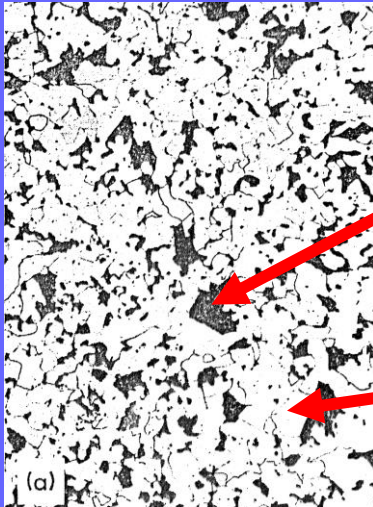


# *Aceros hipoeutectoides*

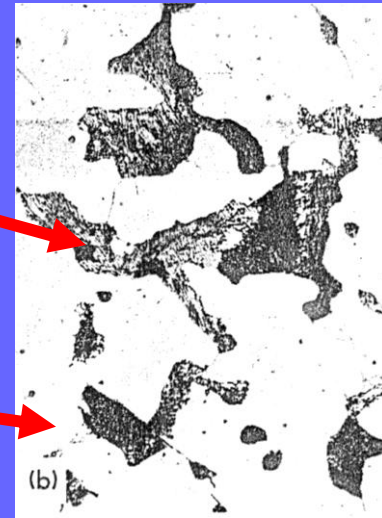
**Carbono 0,2%**

*Perlita*

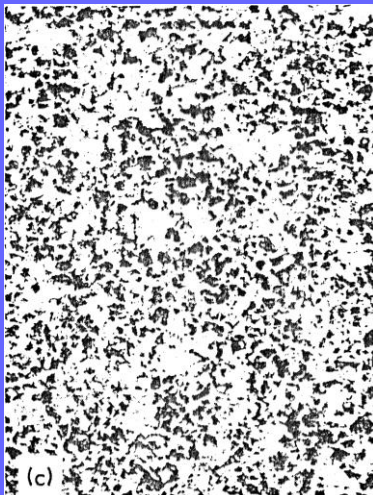
*Ferrita*



**100X**

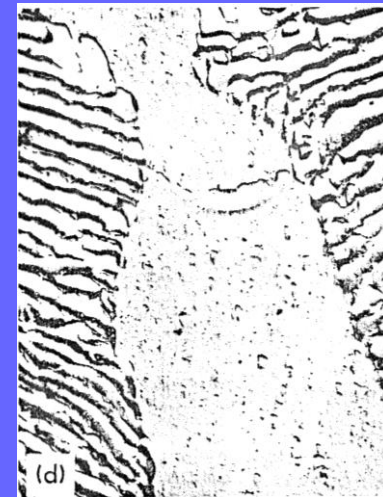


**500X**



**100X**

**Carbono 0,4%**



**3000X**

***Acero eutectoide 0,8% C***



***500 X***

***Perlita***

***Acero hipereutectoide 1% C***



***Perlita***

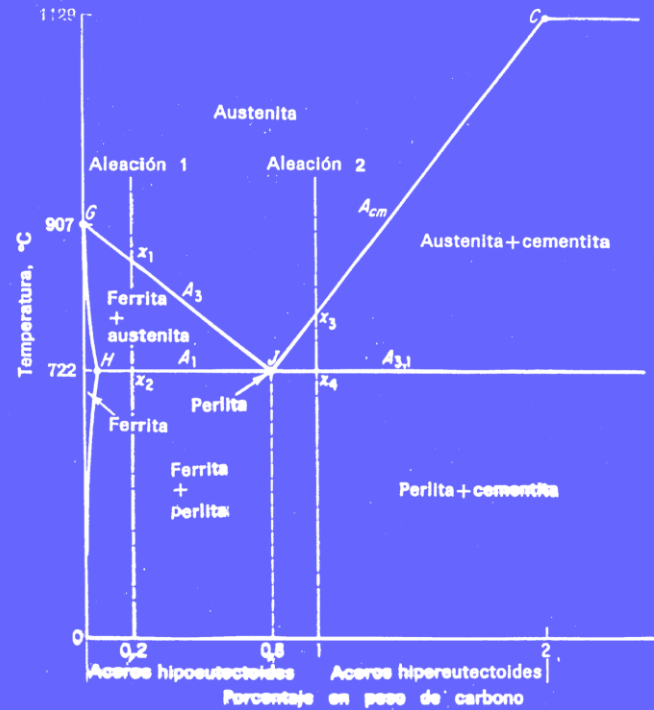
***300 X***

***Cementita***

# DIAGRAMA Fe – C

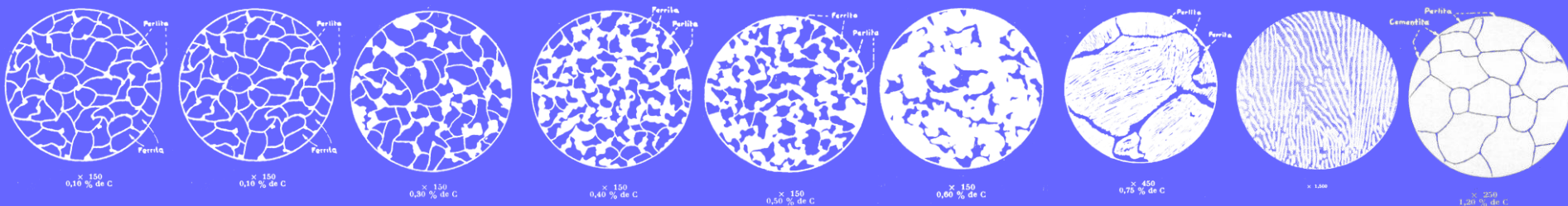
## Resistencia kg/mm<sup>2</sup>

# Durezza HB



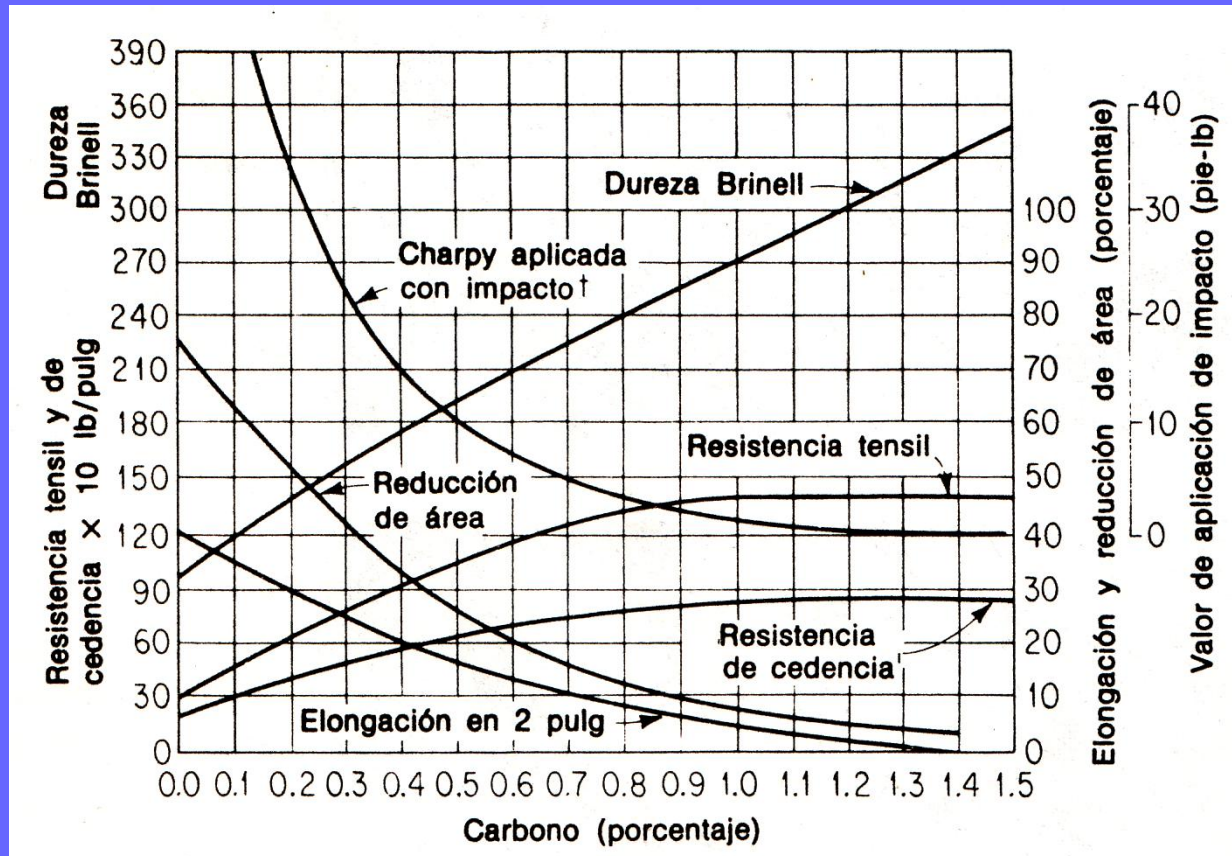
35.2	41.5	47.1	52.7	60.1	67.5	74.1	80.8	71.1
------	------	------	------	------	------	------	------	------

102      115      130      145      167      190      205      220      200





# Propiedades mecánicas

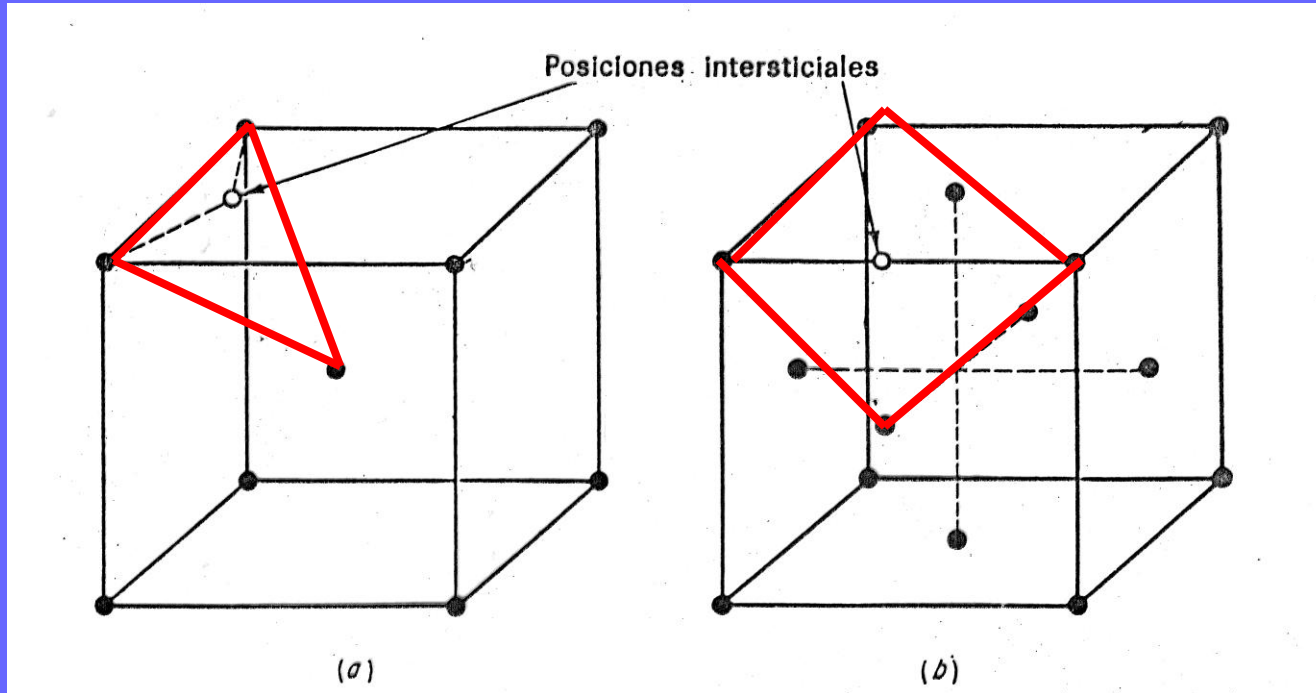


**Influencia del porcentaje de carbono sobre la resistencia, dureza, ductilidad, plasticidad, tenacidad, fragilidad de los aceros**

# ***Solubilidad del carbono en el hierro***

- ✓ ***La austenita que es fcc con cuatro átomos por celdilla unitaria es más compacta que la ferrita***
- ✓ ***La ferrita es bcc y contiene dos átomos por celdilla elemental***
- ✓ ***El pasaje de austenita a ferrita va acompañado de una expansión de la red***
- ✓ ***Si suponemos los átomos esféricos y partimos de los parámetros de red, la austenita tiene 25% de espacios vacíos y la ferrita 32%***
- ✓ ***No obstante la austenita disuelve hasta 2% de carbono mientras la ferrita lo hace hasta 0,025%***

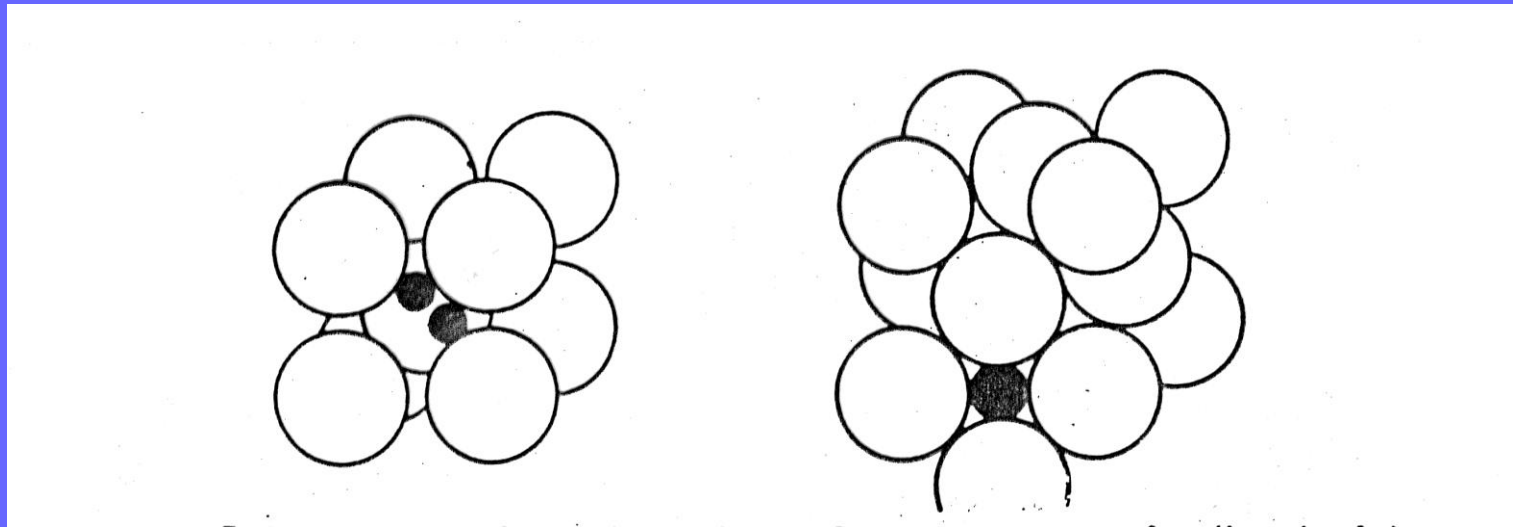
## Explicación



**Representación esquemática de las posiciones intersticiales en las estructuras BCC y FCC**

**a) Máximo espacio vacío en la red BCC**

**b) Máximo espacio vacío en la red FCC**



***Intersticios en las redes BCC (izquierda) y FCC (derecha)***

- ✓ ***En la BCC se aprecian dos de las cuatro posiciones posibles en esa cara. Espacio máximo  $0,36 \text{ \AA}$  ( $10^{-8}$ ) cm***
- ✓ ***En la FCC se aprecia una de las cuatro posiciones en esa cara. Espacio máximo  $0,52 \text{ \AA}$  ( $10^{-8}$ ) cm***
- ✓ ***Diámetro del átomo de carbono  $0,7 \text{ \AA}$  ( $10^{-8}$ ) cm, el cual deforma la red por ser mayor***

# **CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS**

- ❑ ***Para la clasificación se utilizan varios métodos según los institutos de referencia tomando en consideración según el caso: la composición química, el proceso de elaboración, el uso, etc***
  
- ✓ ***Entre los institutos de referencia podemos citar:  
SAE – Sociedad de ingenieros de USA - Society of Automotive Engineers  
AISI – Instituto americano del hierro y el acero  
American Iron and Steel Institute***
  
- ✓ ***Existen múltiples normas de de diversas instituciones mundiales: UNIT, IRAM, ABNT, COPANT, ASTM, ASME, DIN, UNE, UNI, AFNOR, BS, GOST, JIS, MERCOSUR, ISO, CE, Etc.***



- ✓ ***SAE – Utiliza un sistema basado en la composición química tomando como referencia un sistema numérico de 4 o 5 dígitos que tienden a considerar el tipo de acero y la composición de los elementos más importante***
- ✓ ***AISI – utiliza el mismo sistema numérico precedido de una letra que considera el método de fabricación del acero***
- ✓ ***El método de fabricación puede ser: convertidor Bessemer, de hogar abierto, de horno abierto, de horno eléctrico, de crisol, proceso Siemens Martin, etc***
- ✓ ***El uso o aplicación puede ser: Aceros de construcción, de herramientas, de matricería, para calderas, elásticos, alta temperatura, etc.***

## ***Designación SAE***

***XXXX***

✓ ***El primer dígito corresponde al tipo de acero:***

***1 - Aceros al carbono***

***2 - Aceros al níquel***

***3 - Aceros al cromo - níquel***

✓ ***El segundo dígito corresponde al porcentaje aproximado del elemento más importante de aleación***

✓ ***Los últimos dos dígitos indican en centésimas el porcentaje de carbono***

✓ ***Ejemplo SAE 2520***

☐ ***Acero al níquel***

☐ ***Aproximadamente 5% de níquel***

☐ ***0,20 % de carbono***

- 10xx Aceros al carbono obtenidos en horno Martín Siemens y en convertidor Bessemer ácido
- 11xx Aceros al carbono, altos en azufre y bajos en fósforo, obtenidos en horno Martín Siemens y en convertidor Bessemer ácido
- 12xx Aceros al carbono, altos en azufre y en fósforo, obtenidos en horno Martin Siemens
- 13xx Manganeso, 1,60 a 1,90 %
- 23xx Níquel, 3,50 %
- 25xx Níquel, 5 %
- 31xx Níquel, 1,25 % ; cromo, 0,60 %
- 32xx Níquel, 1,75 % ; cromo, 1,00 %
- 33xx Níquel, 3,50 % ; cromo, 1,50 %
- 40xx Molibdeno, 0,25 %
- 41xx Cromo, 1,00 % ; molibdeno, 0,20 %
- 43xx Cromo-níquel-molibdeno
- 46xx Níquel, 1,75 % ; molibdeno, 0,25 %
- 48xx Níquel, 3,50 % ; molibdeno, 0,25 %
- 51xx Cromo, 0,80 %
- 52xx Cromo, 1,50 %
- 61xx Cromo-vanadio
- 86xx Níquel, 0,55 % ; cromo, 0,50 % ; molibdeno, 0,20 %
- 87xx Níquel, 0,55 % ; cromo, 0,50 % ; molibdeno, 0,25 %
- 92xx Manganeso, 0,80 % ; silicio, 2,00 %
- 93xx Níquel, 3,25 % ; cromo, 1,20 % ; molibdeno, 0,12 %
- 98xx Níquel, 1,00 % ; cromo, 0,80 % ; molibdeno, 0,25 %

Especificaciones de algunos de los aceros normales más representativos

AISI No*	% C	% Mn	% P max	% S max	SAE No
Aceros ordinarios al carbono					
C1010	0,08—0,13	0,30—0,60	0,04	0,05	1010
C1015	0,13—0,18	0,30—0,60	0,04	0,05	1015
C1020	0,18—0,23	0,30—0,60	0,04	0,05	1020
C1025	0,22—0,28	0,30—0,60	0,04	0,05	1025
C1030	0,28—0,34	0,60—0,90	0,04	0,05	1030
C1035	0,32—0,38	0,60—0,90	0,04	0,05	1035
C1040	0,37—0,44	0,60—0,90	0,04	0,05	1040
C1045	0,43—0,50	0,60—0,90	0,04	0,05	1045
C1050	0,48—0,55	0,60—0,90	0,04	0,05	1050
C1055	0,50—0,60	0,60—0,90	0,04	0,05	1055
C1060	0,55—0,65	0,60—0,90	0,04	0,05	1060
C1065	0,60—0,70	0,60—0,90	0,04	0,05	1065
C1070	0,65—0,75	0,60—0,90	0,04	0,05	1070
C1074	0,70—0,80	0,50—0,80	0,04	0,05	1074
C1080	0,75—0,88	0,60—0,90	0,04	0,05	1080
C1085	0,80—0,93	0,70—1,00	0,04	0,05	1085
C1090	0,85—0,98	0,60—0,90	0,04	0,05	1090
C1095	0,90—1,03	0,30—0,50	0,04	0,05	1095
Aceros al carbono de fácil mecanización					
B1112	0,13 máx	0,70—1,00	0,07—0,12	0,16—0,23	1112
B1113	0,13 máx	0,70—1,00	0,07—0,12	0,24—0,33	1113
C1110	0,08—0,13	0,30—0,60	0,04	0,08—0,13	
C1113	0,10—0,16	1,00—1,30	0,04	0,24—0,33	
C1115	0,13—0,18	0,60—0,90	0,04	0,08—0,13	1115
C1120	0,18—0,23	0,70—1,00	0,04	0,08—0,13	1120
C1137	0,32—0,39	1,35—1,65	0,04	0,08—0,13	1137
C1141	0,37—0,45	1,35—1,65	0,04	0,08—0,13	1141
C1212	0,13 máx	0,70—1,00	0,07—0,12	0,16—0,23	1112
C1213	0,13 máx	0,70—1,00	0,07—0,12	0,24—0,33	1113
C12L14†	0,15 máx	0,80—1,20	0,04—0,09	0,25—0,35	12L14

\* Símbolos literales utilizados en las normas AISI: B = acero al carbono obtenido en convertidor Bessemer ácido; C = acero al carbono obtenido en horno Martín Siemens básico.

† Plomo, 0,15 a 0,35 %.

# Especificaciones de algunos de los aceros aleados más representativos

AISI No.	% C	% Mn	% Ni	% Cr	% Mo	% V	SAE No.	Tipo
1330	0,28-0,33	1,60-1,90	...	...	...	...	1330	} Aceros al Mn
1340	0,38-0,43	1,60-1,90	...	...	...	...	1340	
2317	0,15-0,20	0,40-0,60	3,25-3,75	...	...	...	2315	} Aceros de 3 % Ni
2330	0,28-0,33	0,60-0,80	3,25-3,75	...	...	...	2330	
E2512*	0,09-0,14	0,45-0,60	4,75-5,25	...	...	...	...	} Aceros de 5 % Ni
2515	0,12-0,17	0,40-0,60	4,75-5,25	...	...	...	2515	
3115	0,13-0,18	0,40-0,60	1,10-1,40	0,55-0,75	...	...	3115	} Aceros Cr-Ni
3130	0,28-0,33	0,60-0,80	1,10-1,40	0,55-0,75	...	...	3130	
3140	0,38-0,43	0,70-0,90	1,10-1,40	0,55-0,75	...	...	3140	
E3310	0,08-0,13	0,45-0,60	3,65-3,75	1,40-1,75	...	...	3310	
4023	0,20-0,25	0,70-0,90	...	...	0,20-0,30	...	4023	} Aceros al Mo
4032	0,30-0,35	0,70-0,90	...	...	0,20-0,30	...	4032	
4042	0,40-0,45	0,70-0,90	...	...	0,20-0,30	...	4012	
4118	0,18-0,23	0,20-0,90	...	0,40-0,60	0,08-0,15	...	4118	} Aceros Cr-Mo
4130	0,28-0,33	0,40-0,60	...	0,80-1,10	0,15-0,25	...	4130	
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	...	0,80-1,10	0,15-0,25	...	4140	
4150	0,48-0,53	0,75-1,00	...	0,80-1,10	0,15-0,25	...	4150	
4320	0,17-0,22	0,45-0,60	1,65-2,00	0,40-0,60	0,20-0,30	...	4320	} Aceros Cr-Ni-Mo
4340	0,38-0,43	0,60-0,80	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30	...	4340	
4620	0,17-0,22	0,45-0,60	1,65-2,00	...	0,20-0,30	...	4620	} Aceros Mn-Mo
4640	0,38-0,43	0,60-0,80	1,65-2,00	...	0,20-0,30	...	4640	
4820	0,18-0,23	0,50-0,70	3,25-3,75	...	0,20-0,30	...	4820	
5120	0,17-0,22	0,70-0,90	...	0,70-0,90	...	...	5120	} Aceros al Cr
5130	0,28-0,33	0,70-0,90	...	0,80-1,10	...	...	5130	
5140	0,38-0,43	0,70-0,90	...	0,70-0,90	...	...	5140	
5150	0,48-0,53	0,70-0,90	...	0,70-0,90	...	...	5150	
E52100*	0,95-1,10	0,25-0,45	...	1,30-1,60	...	...	52100	
6120	0,17-0,22	0,70-0,90	...	0,70-0,90	...	0,10	6120	} Aceros Cr-V
6150	0,48-0,53	0,70-0,90	...	0,80-1,10	...	0,15	6150	
8620	0,17-0,24	0,60-0,95	0,35-0,75	0,35-0,65	0,15-0,25	...	8620	} Aceros Cr-Ni-Mo de baja aleación
8630	0,27-0,34	0,60-0,95	0,35-0,75	0,35-0,65	0,15-0,25	...	8630	
8640	0,37-0,45	0,70-1,05	0,35-0,75	0,35-0,65	0,15-0,25	...	8640	
8720	0,17-0,24	0,60-0,95	0,35-0,75	0,35-0,65	0,20-0,30	...	8720	
8740	0,37-0,45	0,70-1,05	0,35-0,75	0,35-0,65	0,20-0,30	...	8740	
E9310*	0,08-0,13	0,45-0,65	3,00-3,50	1,00-1,40	0,08-0,15	...	9310	
9840	0,38-0,43	0,70-0,90	0,85-1,15	0,70-0,90	0,20-0,30	...	9840	
9850	0,48-0,53	0,07-0,90	0,85-1,15	0,70-0,30	0,20-0,30	...	9850	

\* E = Acero obtenido en horno eléctrico básico. Todos los demás se obtienen normalmente en horno Martin Siemens básico.