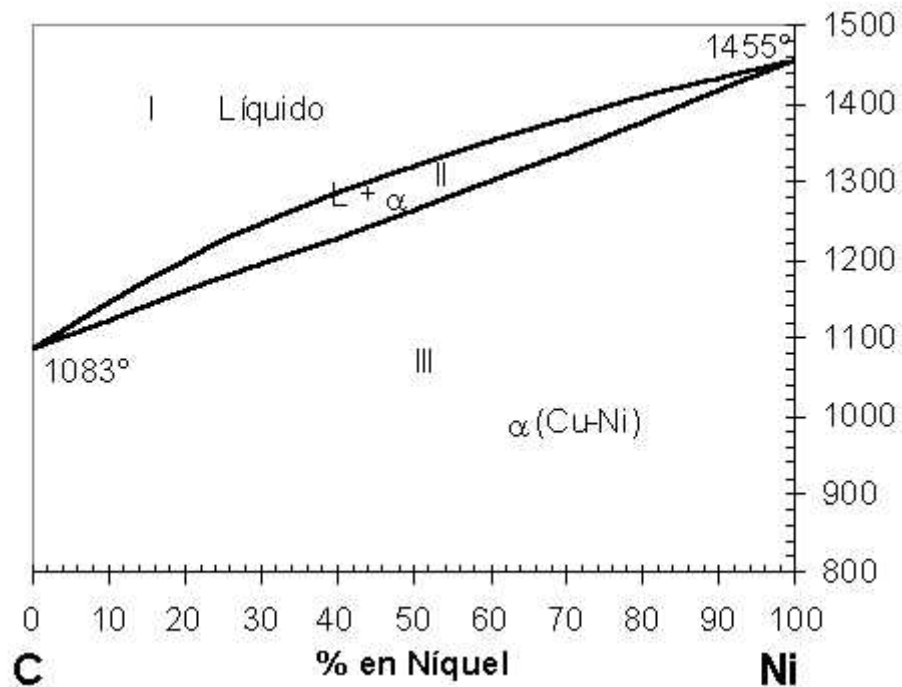


## EJERCICIOS – DIAGRAMA DE FASES

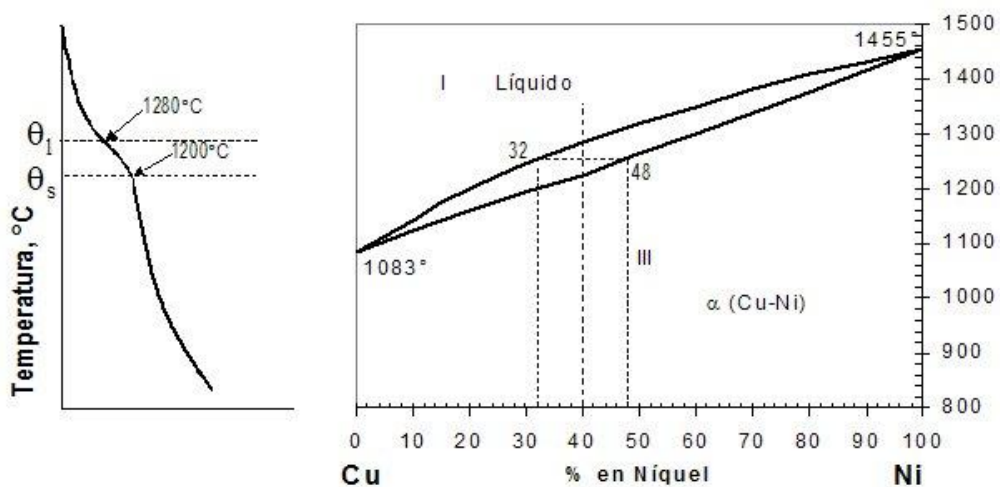
1. Con el diagrama de equilibrio Cu - Ni. Determinar para una aleación con el 40 % de Ni:



- Curva de enfriamiento, intervalo de solidificación, fases presentes en cada una de las regiones que atraviesa.
- Relación de fases y pesos de las mismas a 1250° C para una aleación de 600 kg.

**Solución:**

- Por encima de 1280°C toda la aleación está en estado líquido (1 fase).  
Entre 1280° y 1200°C (intervalo de solidificación) coexisten las fases líquida y solución sólida  $\alpha$  (2 fases).  
Por debajo de 1200°C toda la aleación ha solidificado en forma de solución sólida  $\alpha$  (1 fase).  
La curva de enfriamiento aparece representada junto al diagrama.



- Aplicando la regla de la palanca:

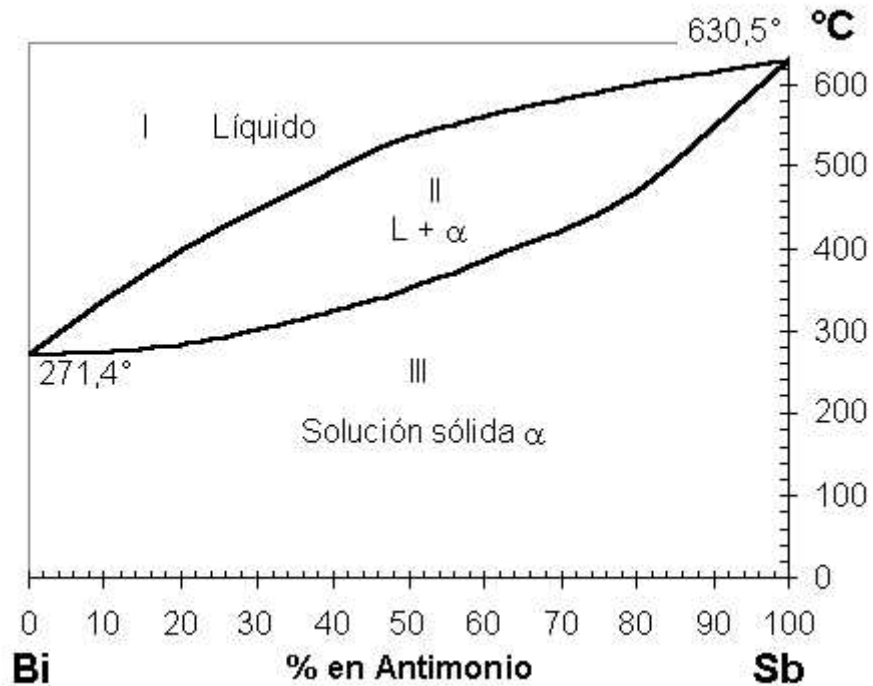
$$\frac{m_L}{m_S} = \frac{48 - 40}{40 - 32} = \frac{8}{8} = 1 \quad (\text{Relación de fases})$$

$$m_L + m_S = 600$$

$$\text{luego : } m_L = 300 \text{ Kg}$$

$$m_S = 300 \text{ Kg}$$

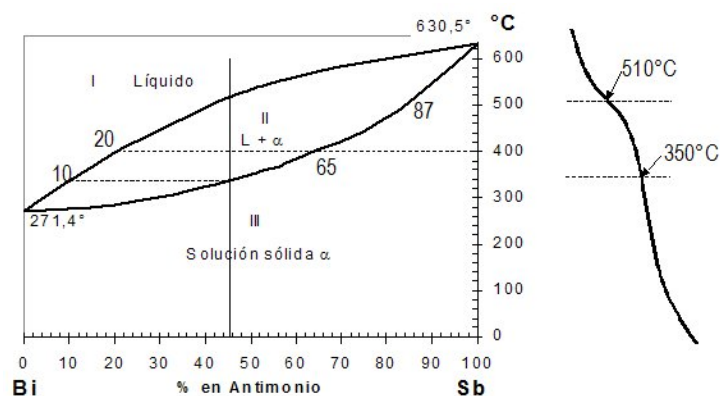
2. Haciendo uso del diagrama Bi - Sb. Calcular para una aleación con 45 % de Sb:



- Transformaciones que experimenta al enfriarse lentamente desde el estado líquido hasta la temperatura ambiente.
- Dibújese la curva de enfriamiento.
- \* Si el enfriamiento no se verifica en condiciones de equilibrio, ¿cuál será la máxima diferencia de concentración entre el centro de un grano y su periferia?
- ¿A qué temperatura habrá un 50 % de aleación en estado líquido?
- Porcentaje de las fases a 400°C.

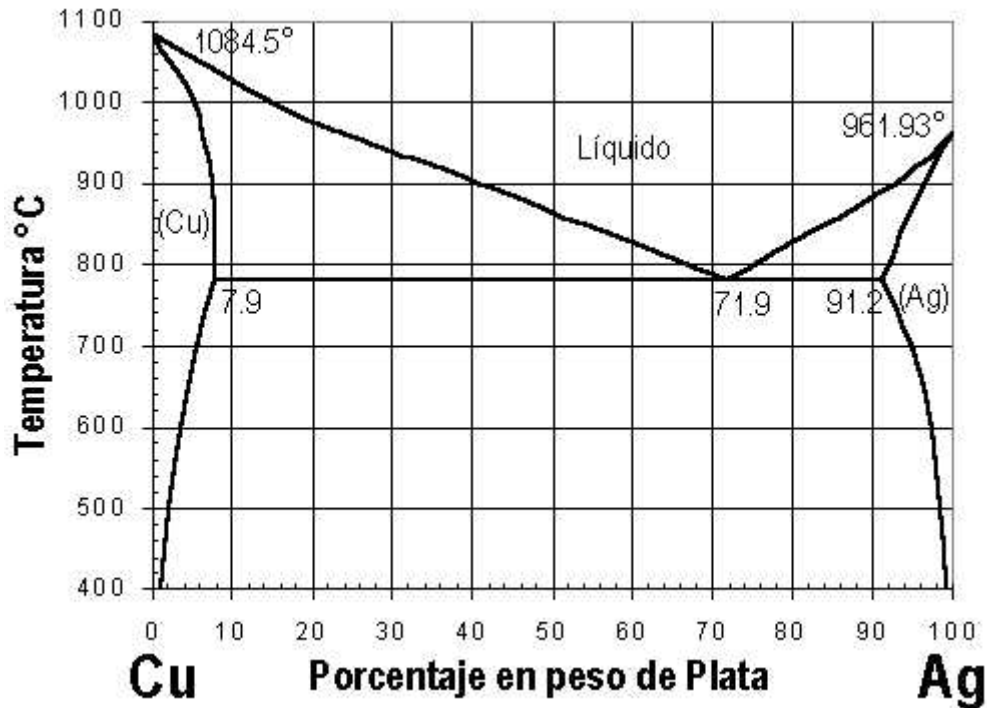
**Solución:**

- Por encima de 510°C se encuentra en estado líquido (1 fase); por debajo de 350°C todo es solución sólida  $\alpha$  (1 fase); entre 510° y 350°C coexisten líquido y solución sólida  $\alpha$  (2 fases).
- La curva de enfriamiento aparece representada junto al diagrama.



- c) Al formarse un grano no homogéneo, la concentración de Sb varía desde el 87.5 % (primera solidificación) hasta el 10 % (final de la solidificación) para la concentración considerada.
- d) Cuando esto ocurre Líquido/Sólido = 1, es decir, los segmentos a y b deben de ser iguales. Esto ocurre a 415°C. (Solución gráfica).
- e) Líquido + Solución sólida a = 100 Líquido (45 - 20) = a (65- 45), luego: Líquido = 44.4 %  
a = 55.6 %

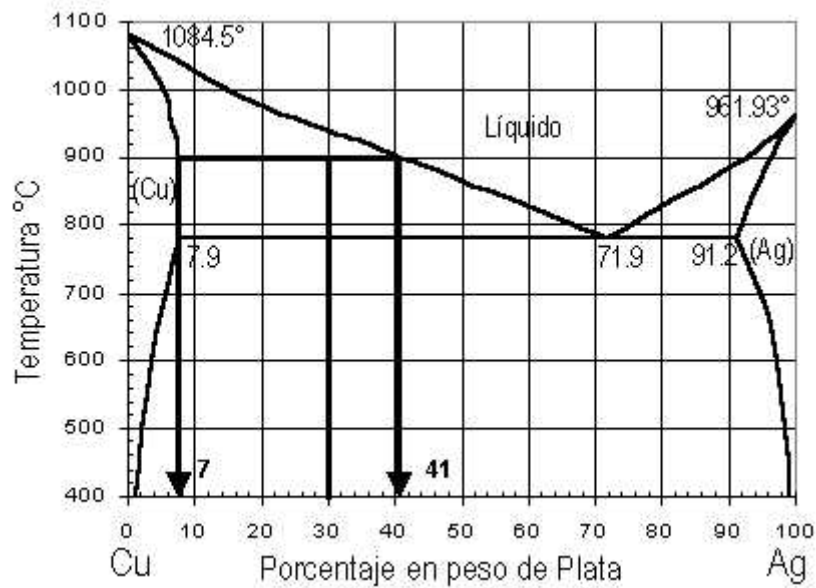
3. Sobre el diagrama de fases Cu-Ag, representado en la figura siguiente, determinar:



- a) El rango de aleaciones que sufrirán total o parcialmente, la transformación eutéctica.
- b) Para una aleación con el 30% de Ag, calcule las composiciones y proporción de fases presentes a 900°C y a 500°C.
- c) Para esa misma aleación, represente gráficamente la estructura que presenta a 500°C.

**Solución:**

- a) *Sufren transformación eutéctica todas las aleaciones que, durante el enfriamiento, cortan a la isoterma eutéctica a 780°C. Así pues, sufren la transformación eutéctica todas las aleaciones desde 7.9% Ag hasta 91.2% Ag.*
- b) *La aleación con el 30% Ag es una aleación hipoeutéctica. Analizaremos el equilibrio de fases a cada temperatura por separado.*

**A 900°C:**

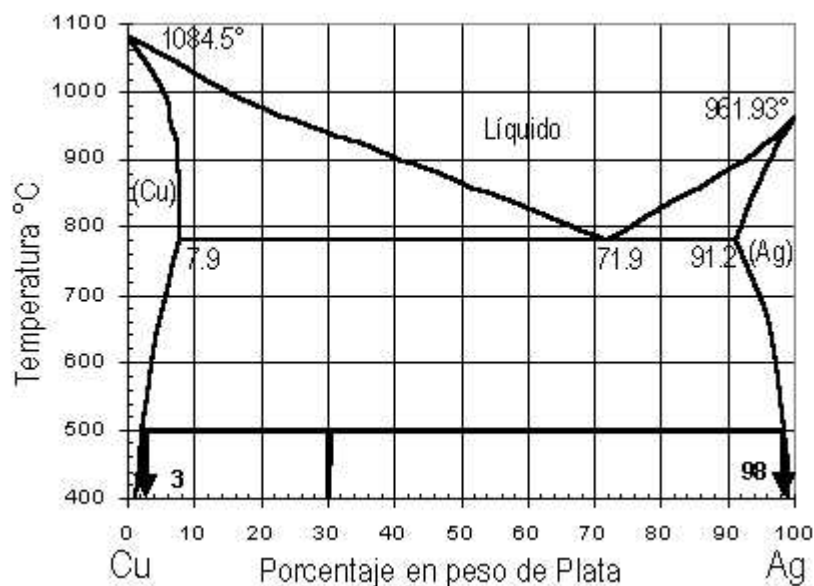
La aleación se encuentra en una zona bifásica de  $L + \alpha$ . Los puntos de corte de la isoterma de 900°C con las líneas del diagrama que separan a esta zona de las respectivas zonas monofásicas: a por la izquierda y L por la derecha, nos dan la composición de cada fase.

A partir de los valores de composición pueden calcularse las proporciones de cada fase, aplicando la regla de la palanca:

Fases:	$\alpha$	L
Composición:	7% Ag	47% Ag
Proporción:	$(41-30)/(41-7) = 32.35 \%$	$(30-7)/(41-7) = 67.65 \%$

**A 500°C:**

La aleación ya es sólida, y se encuentra en la zona bifásica de  $\alpha + \beta$ . Los puntos de corte de la isoterma de 500°C con las líneas del diagrama que separan a esta zona de las respectivas zonas monofásicas: a por la izquierda y b por la derecha, nos dan la composición de cada fase. A partir de los valores de composición pueden calcularse las proporciones de cada fase, aplicando la regla de la palanca:



Fases:	$\alpha$	$\beta$
Composición:	3% Ag	98% Ag
Proporción:	$(71.9-30)/(71.9-3) = 60.81 \%$	$(30-3)/(71.9-30) = 39.19 \%$

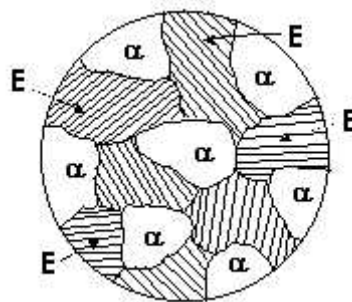
c) Los cálculos efectuados a 500°C nos indican la cantidad exacta de cada fase y su composición, pero no indican cómo se distribuyen dichas fases. Por ser una aleación que sufre la transformación eutéctica, con composición hipoeutéctica, sabemos que la estructura estará formada por:

- granos de  $\alpha$  proeutéctica, que solidifican en el seno del líquido durante el enfriamiento de la aleación, entre los 940 y los 780°C
- granos de mezcla eutéctica, correspondientes a la solidificación del último líquido, de composición eutéctica, a 780°C, que rodean a los granos de  $\alpha$ .

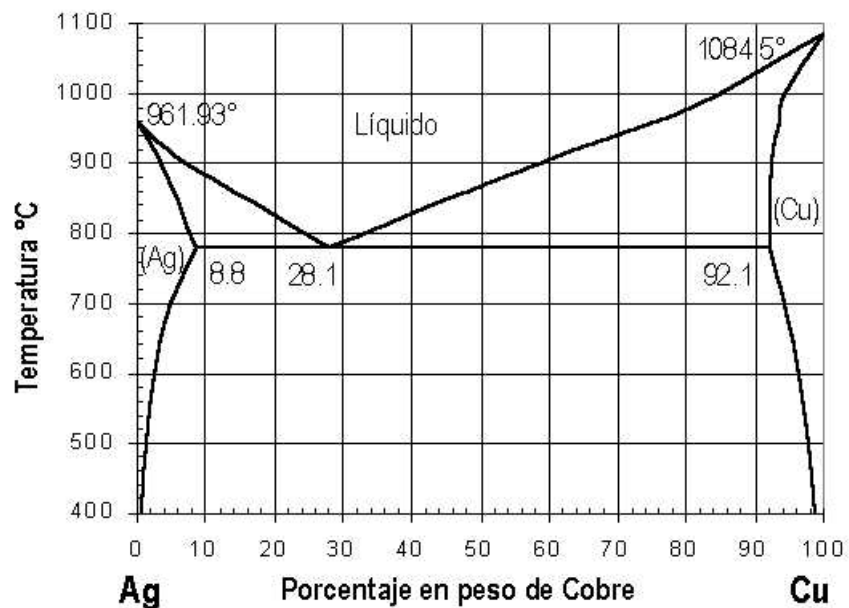
Puede estimarse con buena aproximación la cantidad relativa de cada tipo de grano:  $\alpha$  o eutéctico E, aplicando la regla de la palanca entre la línea de solvus por la izquierda, que da la composición de  $\alpha$ , y la composición eutéctica: 71.9% Ag. En este caso se tendrá:

Constituyentes:	$\alpha$	E
Proporción:	$(71.9-30)/(71.9-3) = 60.81 \%$	$(30-3)/(71.9-30) = 39.19 \%$

con una estructura similar a la mostrada en la figura adjunta.



4. El diagrama de equilibrio de la figura corresponde al sistema Ag-Cu. Indicar utilizando el diagrama:



- a) Relación de fases en la mezcla eutéctica, a la temperatura de transformación eutéctica.  
 b) Para una aleación con un 20% de Cu, calcular el porcentaje de fases a 400°C.  
 c) Para esta misma aleación del 20% de Cu, calcular el porcentaje de constituyentes a 400°C.  
 d) Transformaciones que experimenta una aleación con un 6% de Cu desde 1000°C hasta temperatura ambiente.

**Solución:**

- a) A la temperatura de transformación eutéctica, el eutéctico está conformado por:

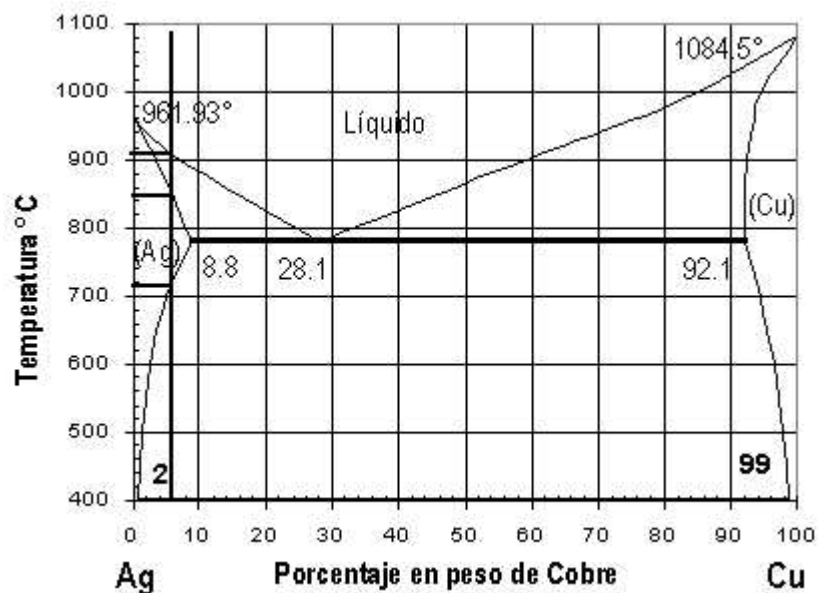
Fases:	$\alpha$	$\beta$
Composición:	8,8% Cu	22,1 % Cu
Proporción:	$(92,1-28.5)/(92,1-8.8) = 76.35 \%$	$(28.5-8.8)/(92,1-8.8) = 23.65 \%$

con lo que la relación entre las fases será:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{76,35}{23,65} = 3,23$$

- b) A 400°C, la composición y proporción de las fases estimada es:

Fases:	$\alpha$	$\beta$
Composición:	2% Cu	99 % Cu
Proporción:	$(99-20)/(99-2) = 81.4 \%$	$(20-2)/(99-2) = 18.6 \%$



- c) A 400°C, el porcentaje de los constituyentes viene dado por:

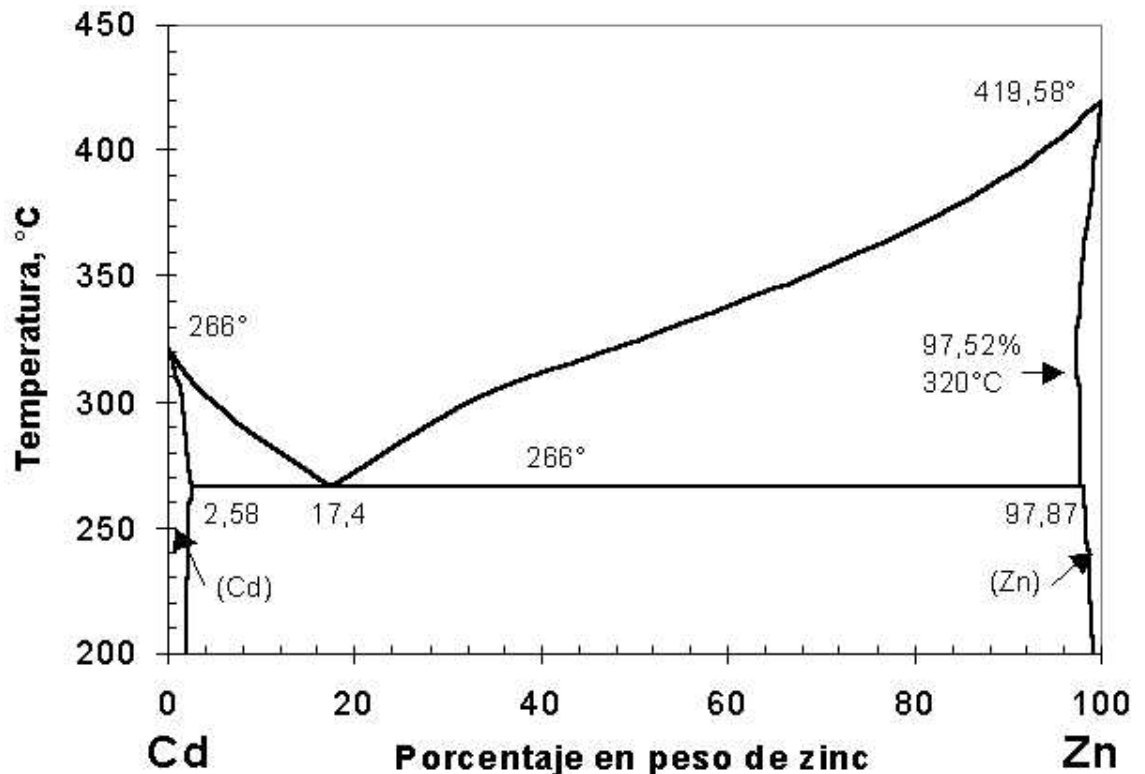
Constituyentes:	Granos $\alpha$	Granos eutécticos
Composición:	2% Cu	28.5% Cu
Proporción:	$(28.5-20)/(28.5-2) = 32.1 \%$	$(20-2)/(28.5-2) = 67.9 \%$

- d) A la vista del diagrama de equilibrio, y de manera aproximada, las transformaciones que suceden en la aleación con un 6% de Cu son las siguientes:

- De los 1000°C a los 910°C, la aleación se encuentra en estado líquido.
- A los 910°C inicia la solidificación que completa alrededor de los 850°C, por lo que en este intervalo coexisten fase a sólida y fase en estado líquido.
- A partir de los 850°C y hasta aproximadamente los 720°C, el material no sufre transformación y se encuentra en estado sólido como fase  $\alpha$ .
- Es a partir de los 720°C cuando cruza la línea de solubilidad parcial y por lo tanto inicia la formación de un precipitado, principalmente ubicado en borde de grano, rico en cobre,

concretamente de fase b. Por lo tanto y desde los 720°C hasta la temperatura ambiente tendremos granos de fase a con precipitados de fase b.

5. El diagrama de equilibrio de la figura corresponde al sistema Cd-Zn. A partir del mismo, obtener:



- Porcentaje de la mezcla eutéctica a 200°C.
- Para una aleación con un 50% de Zn, calcular el porcentaje de fases a 200°C.
- Para una aleación del 60% de Zn, calcular el porcentaje de constituyentes a 300°C.
- Para una aleación de cadmio con el 8% de Zn, transformaciones que experimenta al enfriarse desde los 400°C.

**Solución:**

- a) La mezcla eutéctica, que tiene una composición de un 17,4% de Zn, esta compuesta, en los 200°C, por fase a con una composición de aproximadamente el 1,95% de Zn y una fase b con una composición aproximada del 99,1% de Zn. La proporción de fases en el eutéctico será:

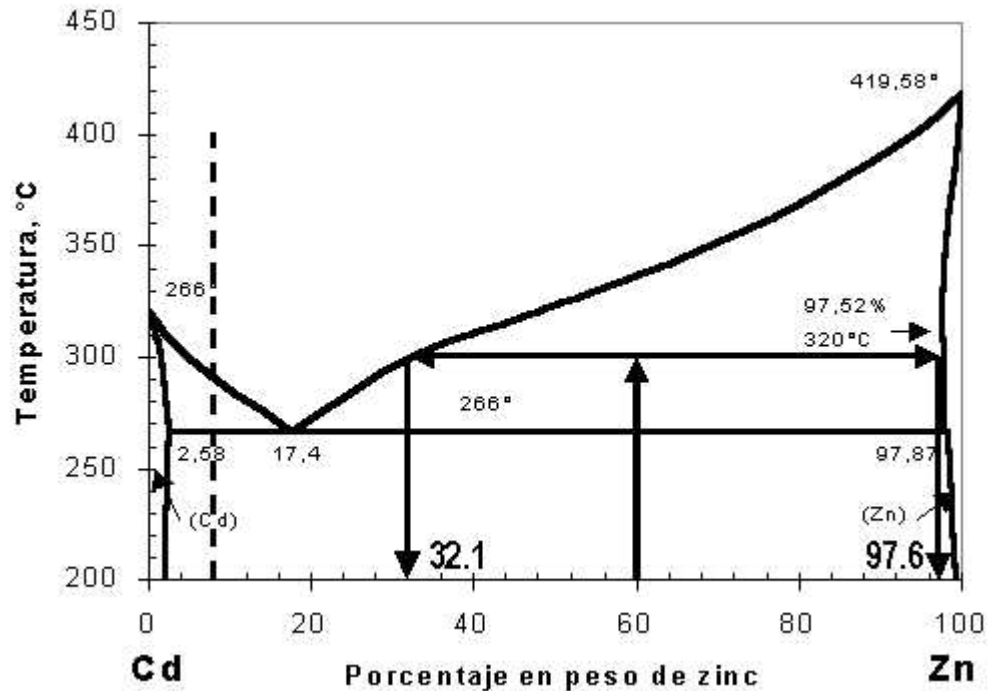
Fases:	$\alpha$	$\beta$
Composición:	1,95% Zn	99,1 % Zn
Proporción:	$(99.1-17.4)/(99.1-1.95) = 84.1\%$	$(17.4-1.95)/(99.1-1.95) = 15.9\%$

- b) A 200°C, una aleación con un 50% de Zn presenta dos fases, cuya proporción será

Fases:	$\alpha$	$\beta$
Composición:	1,95% Zn	99,1 % Zn
Proporción:	$(99.1-50.0)/(99.1-1.95) = 50.54\%$	$(50.0-1.95)/(99.1-1.95) = 49.46\%$

- c) A 300°C, una aleación con un 60% de Zn, presenta una fase en estado líquido y la fase b sólida, cuyas proporciones serán:

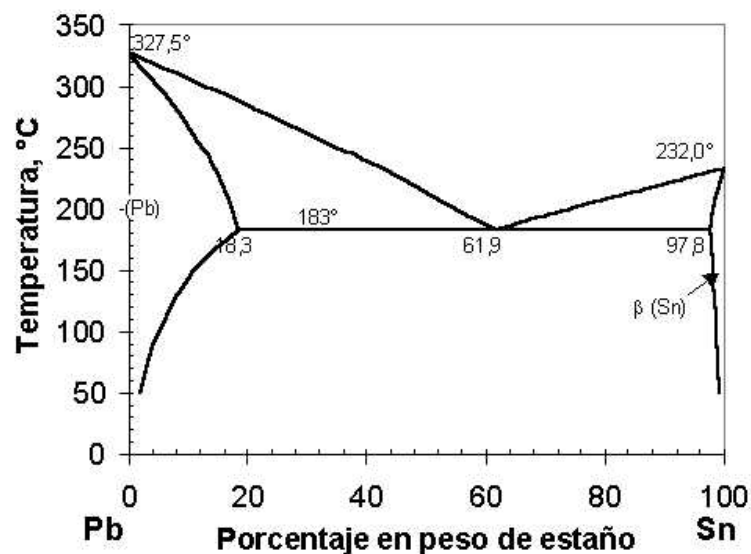
Fases:	$\alpha$	$\beta$
Composición:	32,1% Zn	97,6 % Zn
Proporción:	$(97.6-60.0)/(97.6-32.1) = 57.40\%$	$(60.0-32.1)/(97.6-32.1) = 42.60\%$



d) A la vista del diagrama de equilibrio, y de manera aproximada, las transformaciones que suceden en la aleación de cadmio con el 8% de Zn, son las siguientes:

- De los 400°C a los 288°C, la aleación se encuentra en estado líquido.
- A los 288°C inicia la solidificación que completa a los 266°C, temperatura de transformación eutéctica. Durante este intervalo coexisten fase a sólida rica en cadmio y fase en estado líquido.
- A los 266°C tiene lugar la transformación eutéctica del líquido restante.
- A partir de los 266°C no presenta más transformaciones, por lo que la estructura del sólido será de fase a proeutéctica junto a granos eutécticos procedentes de la transformación del último líquido.

6. Para la aleación plomo-estaño, del 30% en peso de plomo, cuyo diagrama de equilibrio se representa en la figura siguiente, calcular a 100°C:



a) La cantidad relativa de cada fase presente.



b) La cantidad de cada tipo de grano presente en la microestructura.

**Solución:**

a) Las fases presentes serán  $\alpha$  y  $\beta$ , y su proporción, utilizando la regla de la palanca, será:

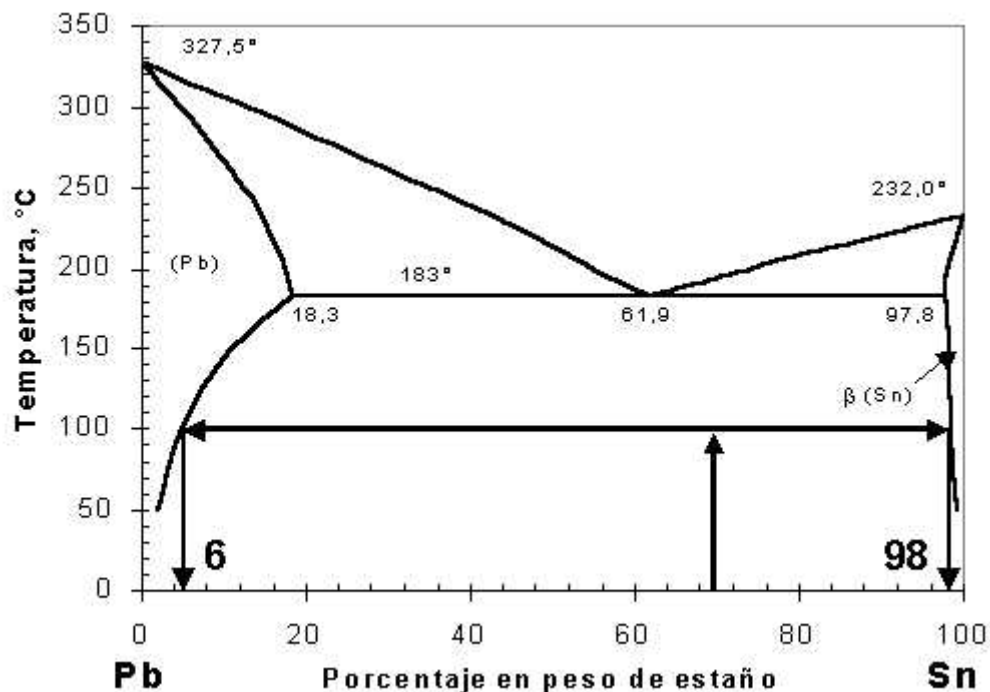
$$\% \alpha = \frac{98-70}{98-6} = 30.43\%$$

$$\% \beta = \frac{70-6}{98-6} = 69.57\%$$

b) La cantidad de componentes vendrá dada, granos  $\beta$  y eutécticos, por:

$$\% \beta = \frac{70 - 61.9}{98 - 61.9} = 22.44\%$$

$$\% \text{ Eutéctico} = \frac{98 - 70}{98 - 61.9} = 77.56\%$$

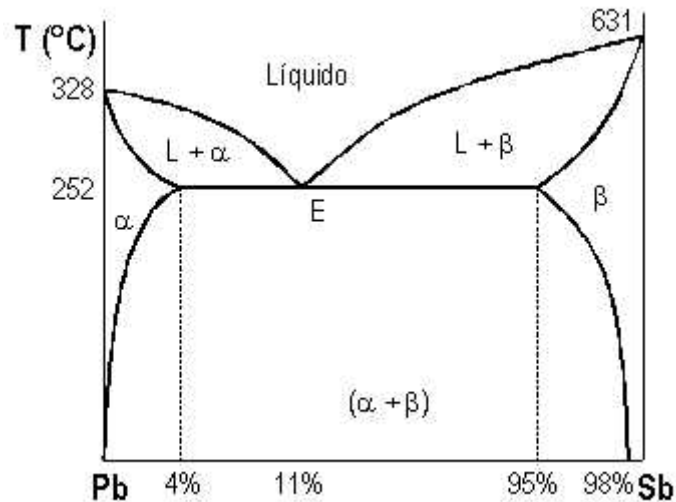


7. Construir el diagrama de fases del sistema Plomo-Antimonio y completar las fases presentes en el mismo.

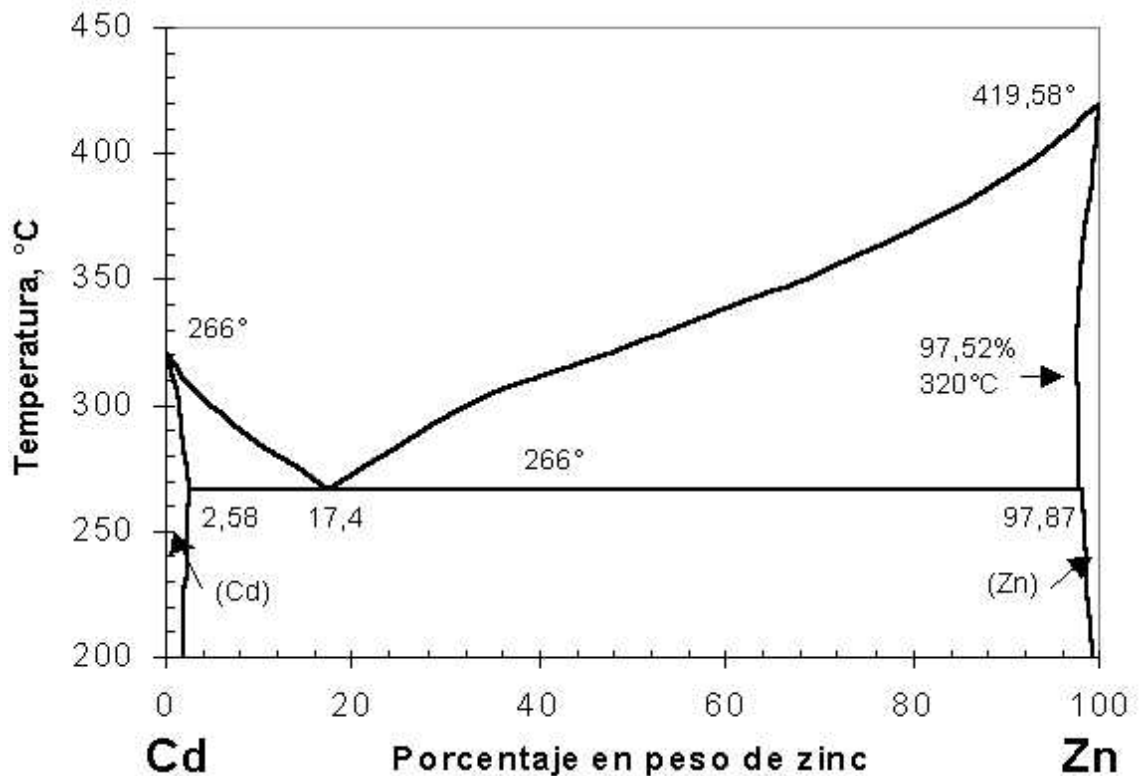
- Temperatura de fusión del plomo = 328°C
- Temperatura de fusión del antimonio = 631°C
- Composición eutéctica, 11 % de antimonio.
- Solubilidad del antimonio en plomo:
  - máxima de 4% a 252°C
  - nula a 25°C
- Solubilidad del plomo en antimonio:
  - máxima de 5% a 252°C
  - 2% a 25°C

**Solución:**

La construcción del diagrama de fases puede observarse en la figura donde cabe señalar la presencia del eutéctico con el porcentaje del 11% cuya temperatura de transformación es de 252°C. En el mismo diagrama se han representado las diferentes zonas con sus fases correspondientes, principalmente, las zonas de líquido, líquido + fase  $\alpha$ , líquido más fase  $\beta$ , zona monofásica  $\alpha$ , zona monofásica  $\beta$ , y zona bifásica  $\alpha + \beta$ , que se divide en dos zonas, una hipoeutéctica ( $E + \alpha$ ) y otra hipereutéctica ( $E + \beta$ ).



8. Para la aleación Cd-Zn, del 70% en peso de zinc, cuyo diagrama de equilibrio se representa en la figura, calcular a 200°C:



- La cantidad de cada fase presente.
- La cantidad de cada tipo de grano presente en la microestructura. Hacer una representación gráfica de ella a temperatura ambiente.

- c) Para la aleación indicada, dibujar el registro de enfriamiento, indicando las fases presentes en cada intervalo.

**Solución:**

- a) Las fases presentes, a 200°C, serán  $\alpha$  y  $\beta$ , y su proporción, utilizando la regla de la palanca, será:

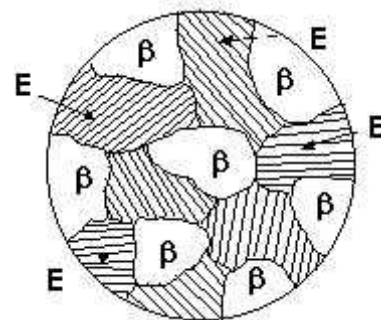
$$\% \alpha = \frac{99 - 70}{99 - 2} = 29.9\%$$

$$\% \beta = \frac{70 - 2}{99 - 2} = 70.10\%$$

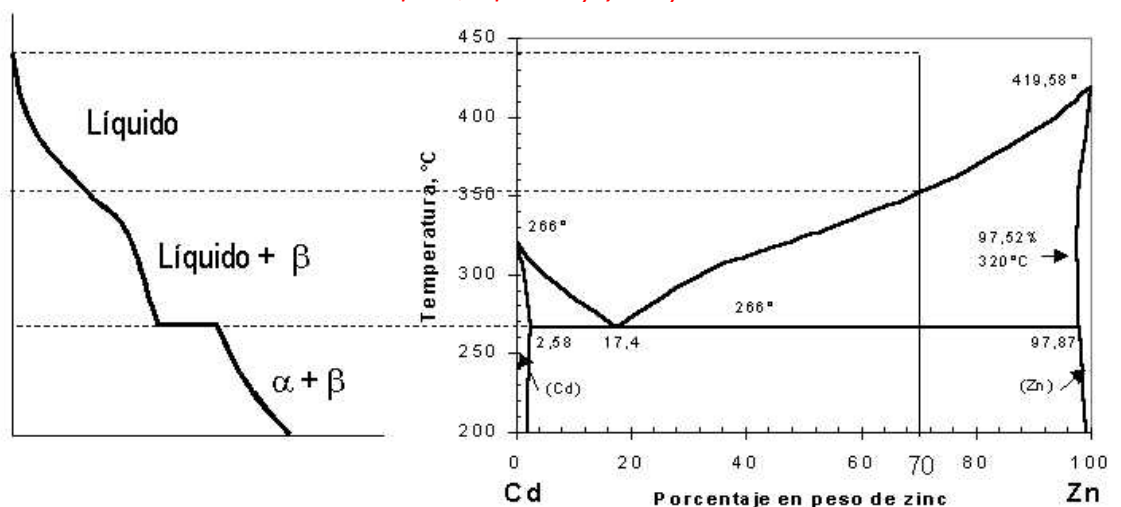
- b) La cantidad de cada tipo de grano presente en la microestructura, granos  $\beta$  ricos en Zn y eutécticos, vendrá dada por:

$$\% \beta = \frac{70 - 17.4}{99 - 17.4} = 64.46\%$$

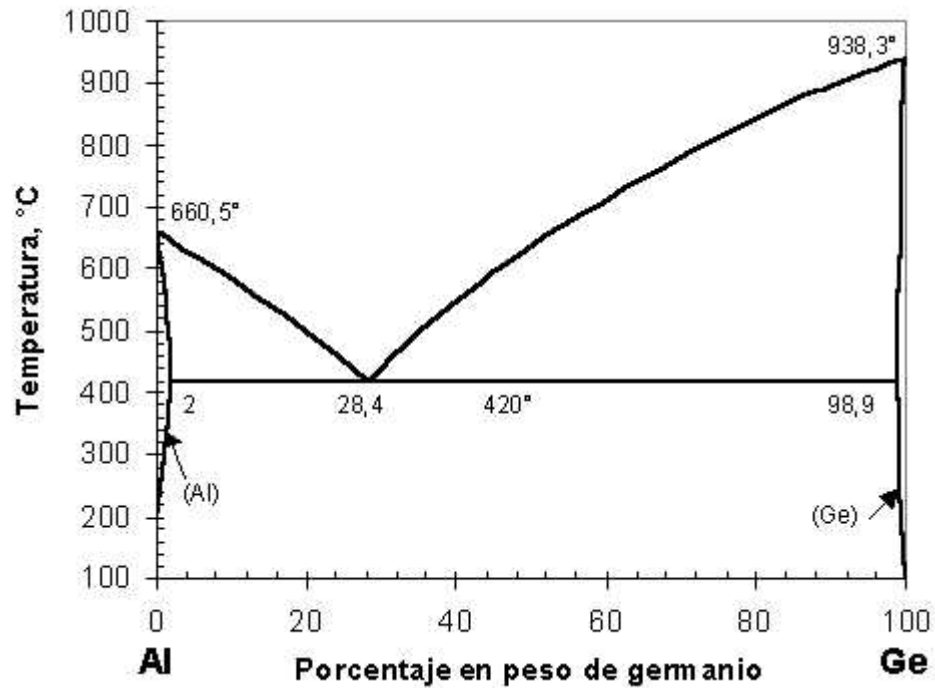
$$\% \text{Eutéctico} = \frac{99 - 70}{99 - 17.4} = 35.54\%$$



- c) El registro de enfriamiento, se representa junto al diagrama de equilibrio, indicándose las fases presentes en cada intervalo: Fase líquida, líquido +  $\beta$  y  $\alpha$  +  $\beta$ .

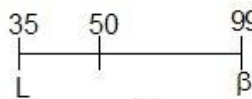


9. Para una aleación Al-Ge, con el 50% atómico de Ge, cuyo diagrama de equilibrio se representa en la figura, Obtener:
- El porcentaje de fases presentes a 500 y 300°C.
  - Representar gráficamente la microestructura de la aleación a esas temperaturas de 500 y 300°C.



**Solución:**

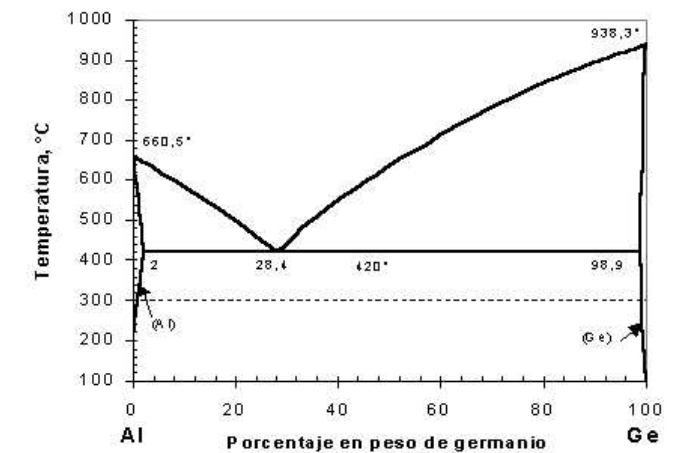
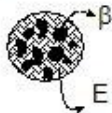
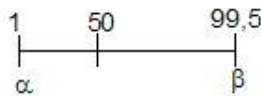
El porcentaje de fases a  $500^{\circ}\text{C}$  será:



$$\%L = \frac{99 - 50}{99 - 35} \times 100 = 76,6\% \text{ líquido}$$

$$\%\beta = \frac{50 - 35}{99 - 35} \times 100 = 23,4\% \text{ s.s. } \beta$$

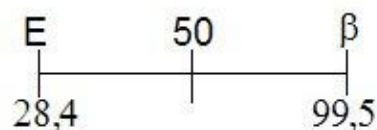
a  $300^{\circ}\text{C}$ , el porcentaje de fases será



$$\%\alpha = \frac{99,5 - 50}{99,5 - 1} \times 100 = 50,3\% \text{ de s.s. } \alpha$$

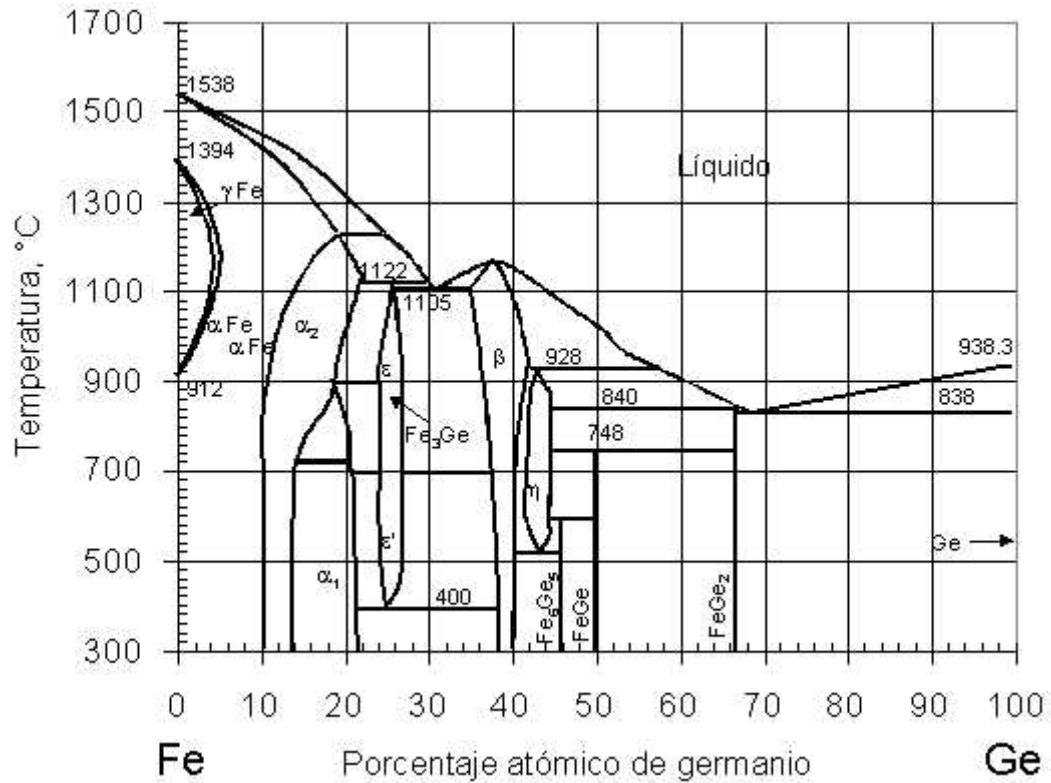
$$\%\beta = \frac{50 - 1}{99,5 - 1} \times 100 = 49,7\% \text{ de s.s. } \beta$$

Los constituyentes serán  $\beta + E$



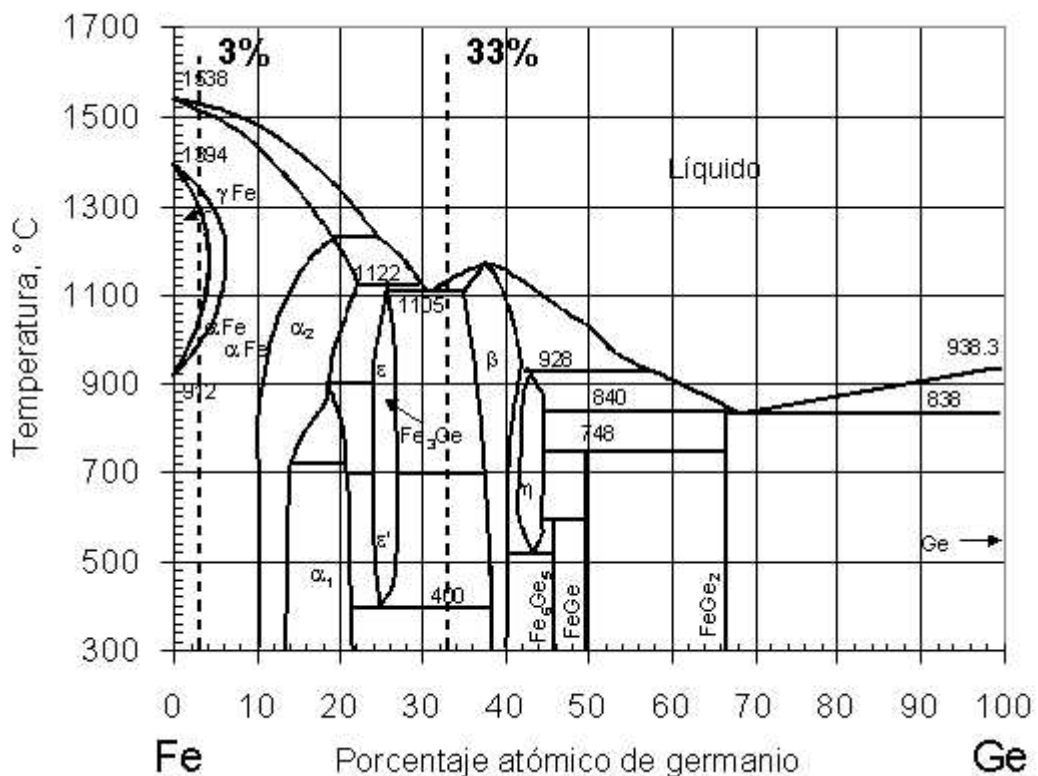
$$\%E = \frac{99,5 - 50}{99,5 - 28,4} \times 100 = 69,7\%$$

10. (Opcional) Con el diagrama de fases de la aleación Fe-Ge, representada en la figura siguiente:

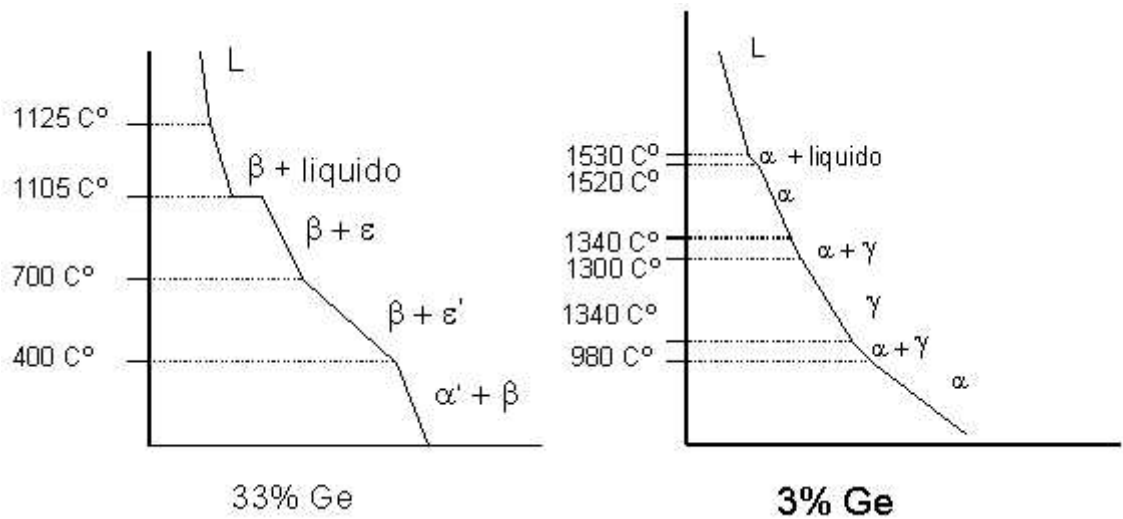


- Trazar las curvas de enfriamiento, hasta los 300°C, de la aleación con un contenido atómico del 3% en Ge y del 33% en Ge, indicando las diferentes fases en cada zona.
- Composiciones y temperaturas eutécticas.

**Solución:**



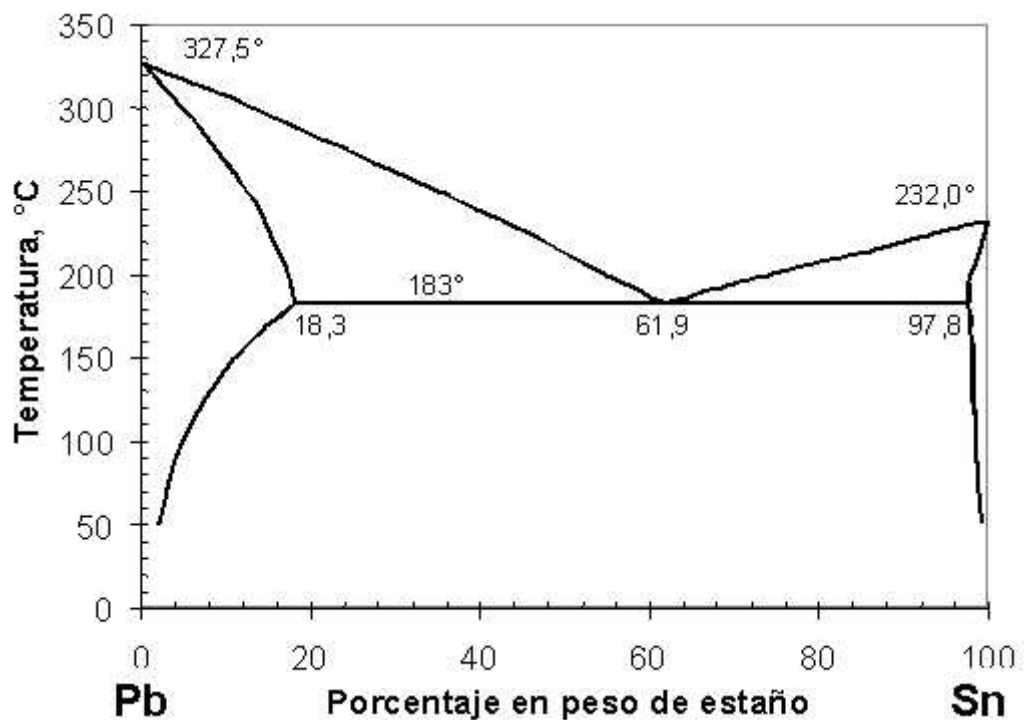
- a) En el diagrama se representa las composiciones cuyas curvas de enfriamiento se especifican a continuación:



- b) En el diagrama se aprecian dos eutécticos con las siguientes temperaturas y composiciones:

	Temperatura	Composición
Eutéctico 1:	1105° C	31% Ge
Eutéctico 2:	838° C	69% Ge

11. El diagrama de equilibrio de la figura corresponde al sistema Sn-Pb. Indicar utilizando el diagrama:

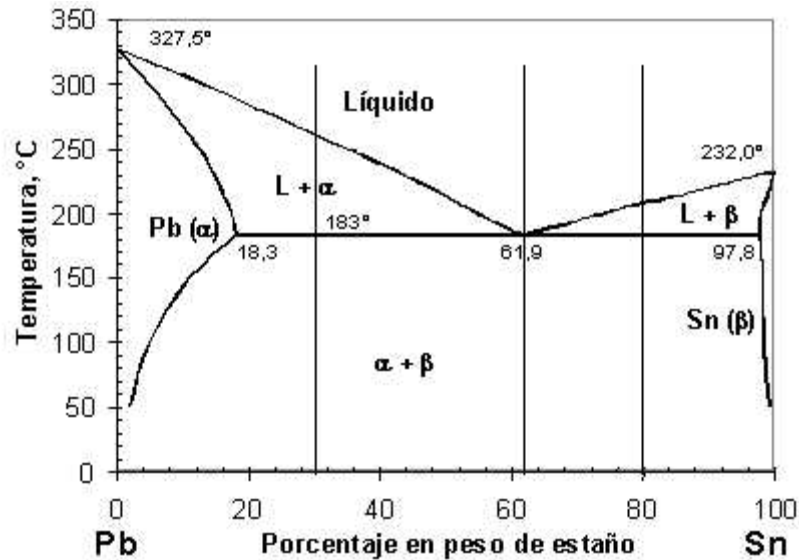


- Las fases presentes en cada una de las distintas zonas.
- Las fases, y su composición, que presenta una aleación del 25% de estaño a 200°C.
- La proporción en peso de los constituyentes, granos, presentes en una aleación del 40% en peso de estaño, a 150°C.

- d) Transformaciones que experimenta una aleación, durante su enfriamiento desde el estado líquido, con las composiciones del 30%, del 61.9% y del 80% de estaño en peso, respectivamente.

**Solución:**

- a) En la gráfica se indican las diferentes fases presentes: líquido, fase alfa rica plomo y fase beta rica en estaño.



- b) Para la aleación con el 25% de estaño a 200°C tenemos las fases siguientes:



que porcentualmente serán:

$$\text{fase sólida de Pb } (\alpha) = (56-25)/(56-18) = 81.58\%$$

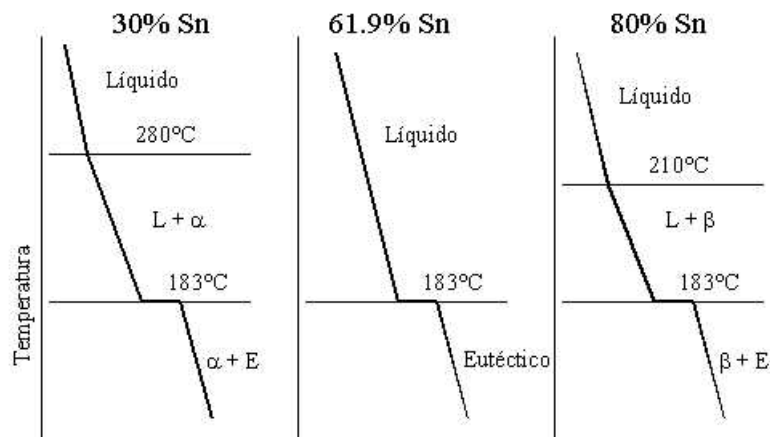
$$\text{fase líquida } 56\% \text{ Sn} = (25-18)/(56-18) = 18.42\%$$

- c) La proporción de los constituyentes, para una aleación del 40% de estaño a 150°C será:

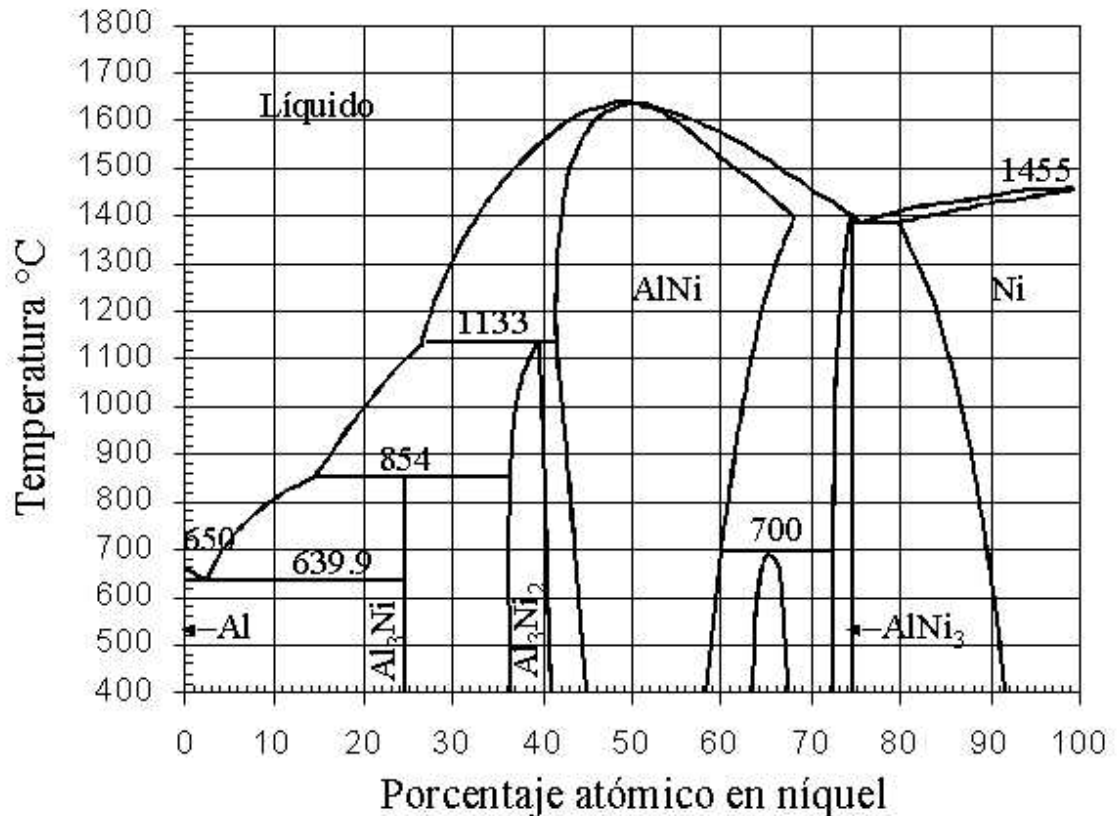
$$\text{Sólido } \alpha (11\% \text{ Sn}) = (61.9 - 40) / (61.9 - 11) = 43.03\%$$

$$\text{Sólido eutéctico } (61.9\% \text{ Sn}) = (40 - 11) / (61.9 - 11) = 56.97\%$$

- d) Las transformaciones serán las indicadas en las gráficas siguientes:



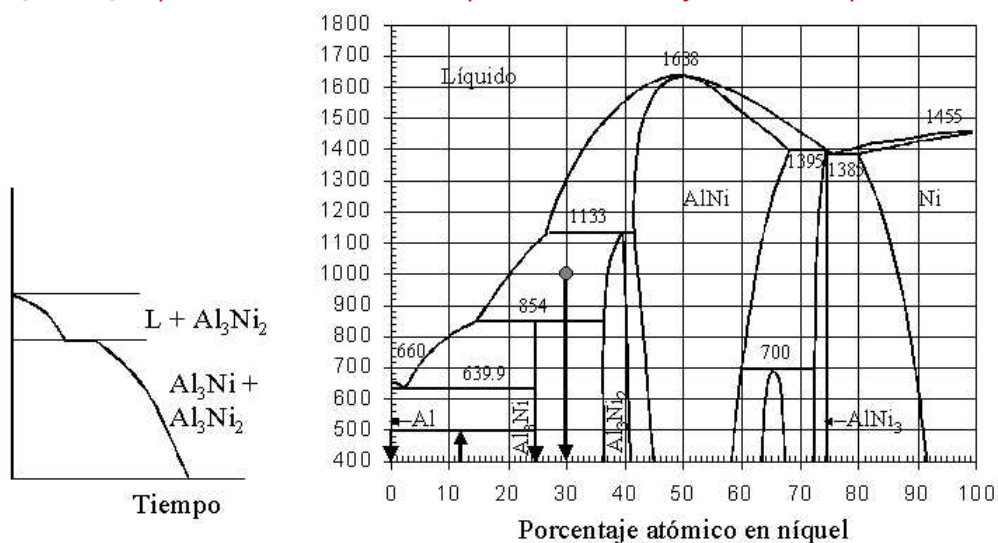
12. (Opcional) Con el diagrama de fases de aluminio-níquel, representado en la figura:



- Trazar la curva de enfriamiento desde 1000°C hasta 400°C de la aleación con un contenido en átomos del 30% de níquel, indicando las diferentes fases presentes en cada zona.
- Indicar las composiciones y temperaturas eutécticas.
- El porcentaje de fases presente a 500°C de una aleación del 12% en átomos de níquel.
- Dibujar la microestructura que se observaría a esta temperatura para esta última aleación.

**Solución:**

- La curva de enfriamiento se representa en la figura siguiente, obteniéndose la transformación  $\alpha$   $Al_3Ni + Al_3Ni_2$  por desdoblamiento del líquido en estas dos fases a la temperatura de 854 °C.



- El diagrama presenta dos puntos eutécticos: el primero corresponde al 3% de níquel y tiene lugar a una temperatura de 639,9°C. El segundo corresponde al 73% de níquel y tiene lugar su transformación a los 1385°C.



- c) A los 500°C existen, para un 12% atómico de níquel, dos fases: la primera Al prácticamente puro y la segunda el intermetálico Al<sub>3</sub>Ni, cuyas proporciones serán:

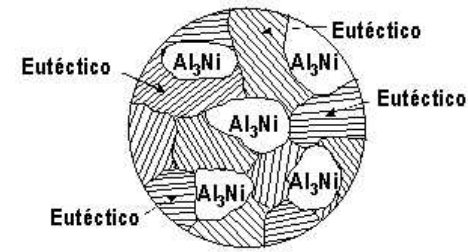
$$\% \text{Al} = \frac{25 - 12}{25} \times 100 = 52 \% \text{ atómico de aluminio}$$

$$\% \text{Al}_3\text{Ni} = \frac{12}{25} \times 100 = 48 \% \text{ atómico}$$

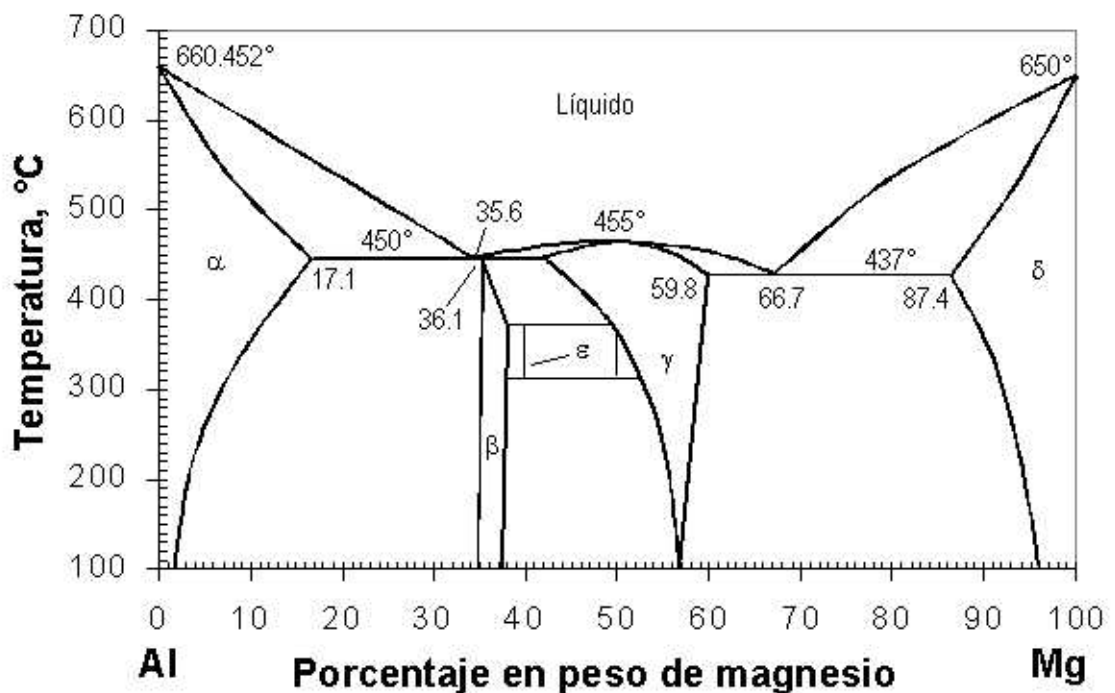
- d) Para esta última aleación y a la temperatura de 500°C, la microestructura estará formada por dos tipos de granos, el primero proeutéctico de Al<sub>3</sub>Ni que ha iniciado su formación a los 854°C y el eutéctico, con una composición del 3% atómico de níquel. La microestructura se representa en la figura que corresponde a los porcentajes atómicos siguientes:

$$\% \text{Al}_3\text{Ni} = \frac{12 - 3}{25 - 3} \times 100 = 41 \%$$

$$\% \text{Eutéctico} = \frac{25 - 12}{25 - 3} \times 100 = 59 \%$$



13. (Opcional) Calcular el porcentaje de fases presentes, a 200°C, para dos aleaciones de Al-Mg con contenidos de:



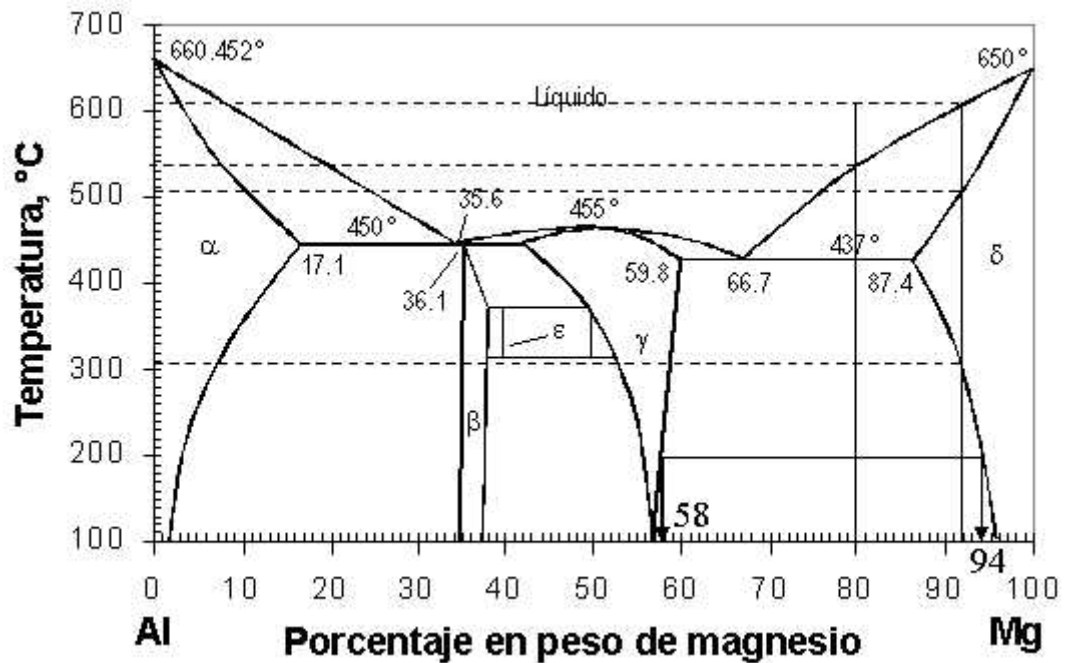
- 80% en peso de magnesio,  $\gamma$ ,
- 92% en peso de magnesio.
- Dibujar las microestructuras que se obtendrían en las anteriores aleaciones, para la mencionada temperatura de 200°C.

**Solución:**

- a) A los 200°C existen, para un 80% en peso de magnesio, dos fases: la primera, fase  $\gamma$  con un 58% Mg y la segunda, fase  $\delta$ , con un 94% Mg, cuyas proporciones serán:

$$\% \gamma = \frac{94 - 80}{94 - 58} \times 100 = 38,89 \%$$

$$\% \delta = \frac{80 - 58}{94 - 58} \times 100 = 61,11 \%$$

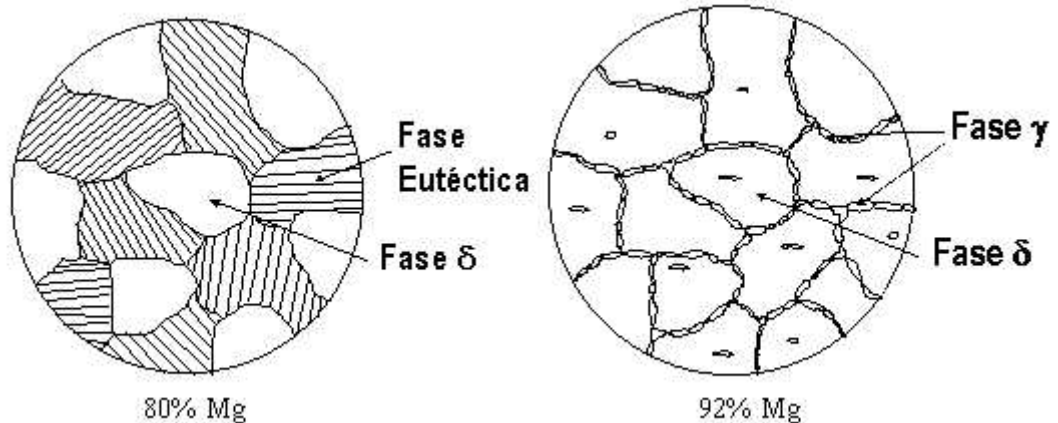


- b) A los 200°C existen, para un 92% en peso de magnesio, seguimos teniendo las dos mismas fases: la primera, fase  $\gamma$ , con un 58% Mg y la segunda, fase  $\delta$ , con un 94% Mg, cuyas proporciones serán:

$$\% \gamma = \frac{94 - 92}{94 - 58} \times 100 = 5,56 \%$$

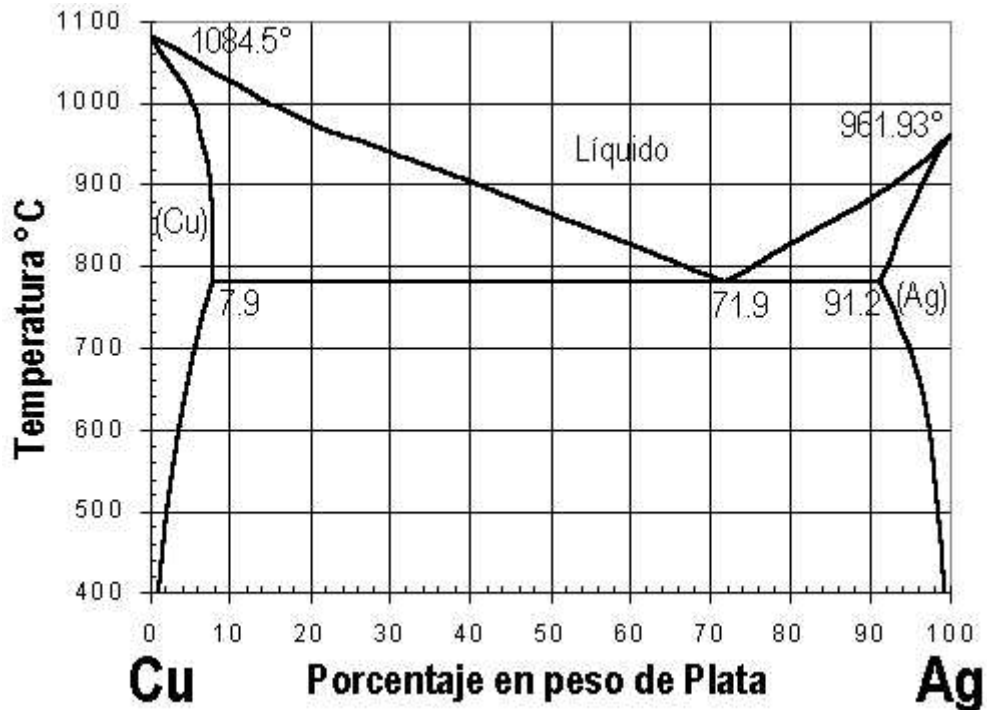
$$\% \delta = \frac{92 - 58}{94 - 58} \times 100 = 94,44 \%$$

- c) Para estas aleaciones y a la temperatura de 200°C tendremos las siguientes microestructuras. Para el 80% de Mg y a partir de los 535°C se iniciará la solidificación de granos  $\delta$  proeutéticos, finalizando la transformación eutéctica a los 437°C, por lo que su microestructura será de granos  $\delta$  rodeados de granos eutécticos.



Para el 92% Mg, llega a transformar completamente a fase  $\delta$ , entre los 508 y los 308°C, precipitando fase  $\gamma$  en borde de grano, principalmente, a partir de los 308°C aproximadamente.

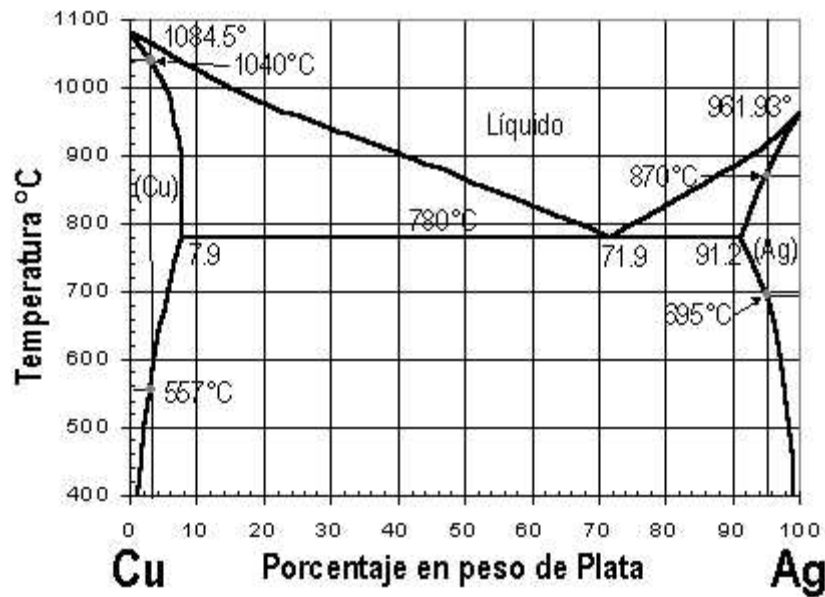
14. Sobre el diagrama de fases Cu-Ag, representado en la figura siguiente, determinar:



- El rango de aleaciones en base cobre que pueden ser endurecidas mediante envejecimiento.
- El rango de temperaturas de homogeneización para una aleación de Cu con un 3% de Ag.
- El rango de temperaturas de envejecimiento para la aleación de cobre anterior.
- El rango de aleaciones en base Ag que pueden ser endurecidas mediante envejecimiento, indicando para una aleación de Ag con un 5% de Cu el rango de temperaturas de homogeneización y envejecimiento.

**Solución:**

- Para ser endurecibles por precipitación o envejecimiento, es requisito necesario que la aleación corte a la curva de solvus, que separa la zona monofásica  $a$  de la zona bifásica  $a + b$ .  
Para las aleaciones en base cobre (el cobre hace de solvente y la plata es el soluto o aleante), estas condiciones se dan para las aleaciones con contenido en plata **desde aproximadamente 0.2% Ag hasta el 7.9% Ag**.  
Por debajo de 0.2%, la plata permanece disuelta en la red de cobre y la estructura es siempre monofásica  $a$ .
- Tal como se representa en el diagrama, el rango de temperaturas de homogeneización estará, para una aleación con un 3% de Ag, **entre los 1040°C y los 557°C**.



Si tomamos un intervalo de seguridad tanto por encima como por debajo, ya que temperaturas muy elevadas pueden originar inicios de fusión o en todo caso engrosamientos exagerados del tamaño de grano. Por el contrario, temperaturas bajas, cercanas a la mínima de solubilidad, permitirá poco la difusión y por lo tanto requerirá largos tiempos para su homogeneización. Todo ello lleva a que la temperatura industrial de homogeneización para estas aleaciones pueda estar entre los 700 y 900°C.

- c) El rango de temperaturas de envejecimiento estaría **entre la temperatura ambiente hasta los 557°C**. También en este caso limitamos las temperaturas elevadas que podrían propiciar recristalizaciones de la microestructura derivadas de la acritud inducida por el enfriamiento brusco durante el temple. Es por ello que las temperaturas idóneas de envejecimiento se considerarán, industrialmente, entre los 150 y 350°C.
- d) En la otra rama del diagrama, aleaciones en base plata (la plata hace de solvente y el cobre es el soluto o aleante), estas condiciones se dan para las aleaciones con contenido en cobre **desde aproximadamente 0.2% Cu hasta el 8.8% Cu**.

Para una aleación con un 5% de Cu, las temperaturas de homogeneización estarán **entre los 695°C hasta los 870°C**. Las temperaturas de envejecimiento deben ser **entre la temperatura ambiente hasta los 695°C**, centrándose principalmente, en el campo industrial, entre los 175 y los 400°C.