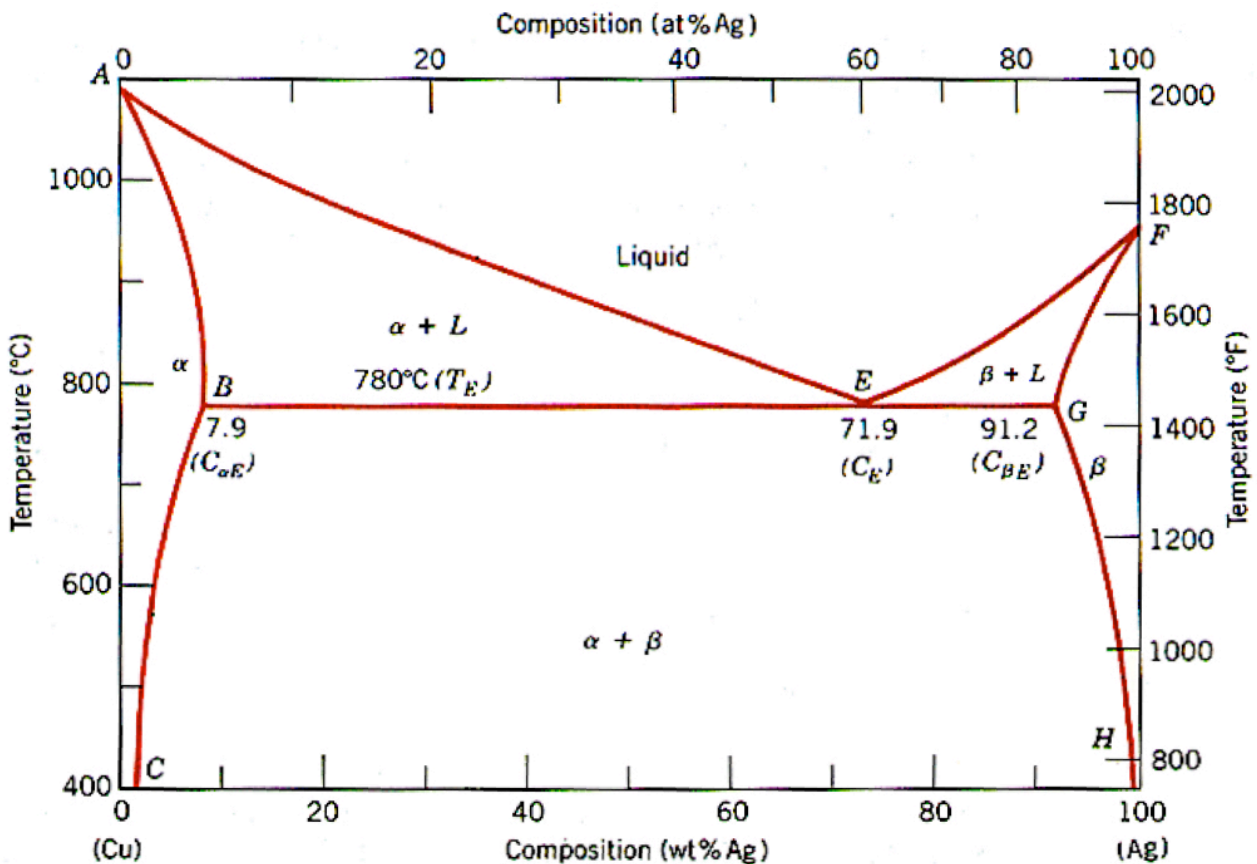
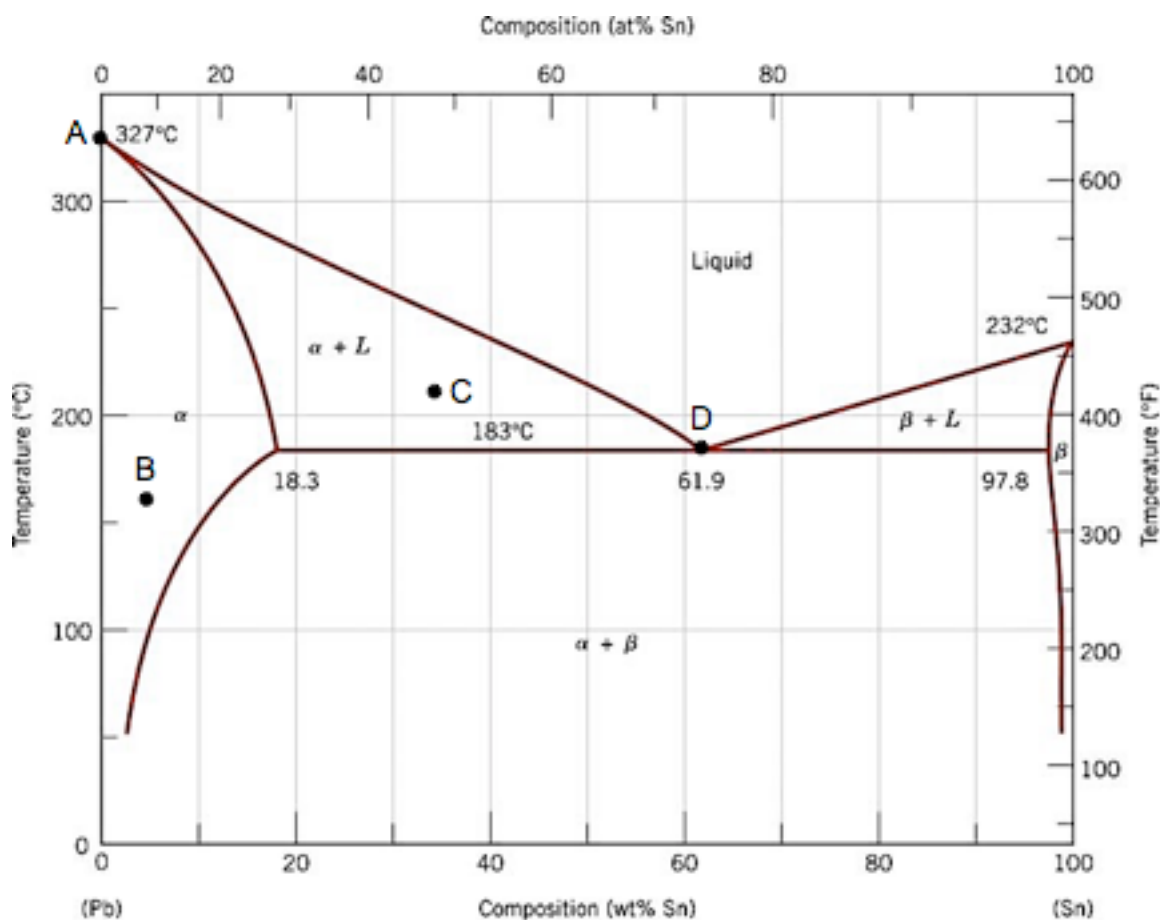


- Considere o diagrama de fases do sistema cobre-prata (determinado a pressão constante) apresentado abaixo. Uma liga com composição 71,9 % Ag (% mássica) mantida inicialmente a 900°C é resfriada lentamente até 700°C.
 - Faça esboços das microestruturas que seriam observadas a 900°C e a 700°C, indicando em cada esboço quais seriam as fases presentes.
 - Determine aproximadamente a composição de cada uma das fases presentes a 700°C (em % mássicas).
 - Considerando que a massa inicial da liga era de 1,0 kg, calcule a quantidade de cada uma das fases presentes a 700°C.

- Considere, novamente, o diagrama de fases do sistema cobre-prata apresentado abaixo. Uma liga com composição 40% Ag (% mássica) mantida inicialmente a 1000°C é resfriada lentamente até 800°C, e a seguir resfriada novamente, também de forma lenta, agora até 700°C.
 - Faça esboços das microestruturas que seriam observadas a 1000°C, a 800°C e a 700°C, indicando em cada esboço quais seriam as fases presentes.
 - Determine aproximadamente a composição de cada uma das fases presentes a 800°C e a 700°C (% mássicas).
 - Considerando que a massa inicial da liga era de 1,0 kg, calcule a quantidade de cada uma das fases presentes a 800°C e a 700°C.

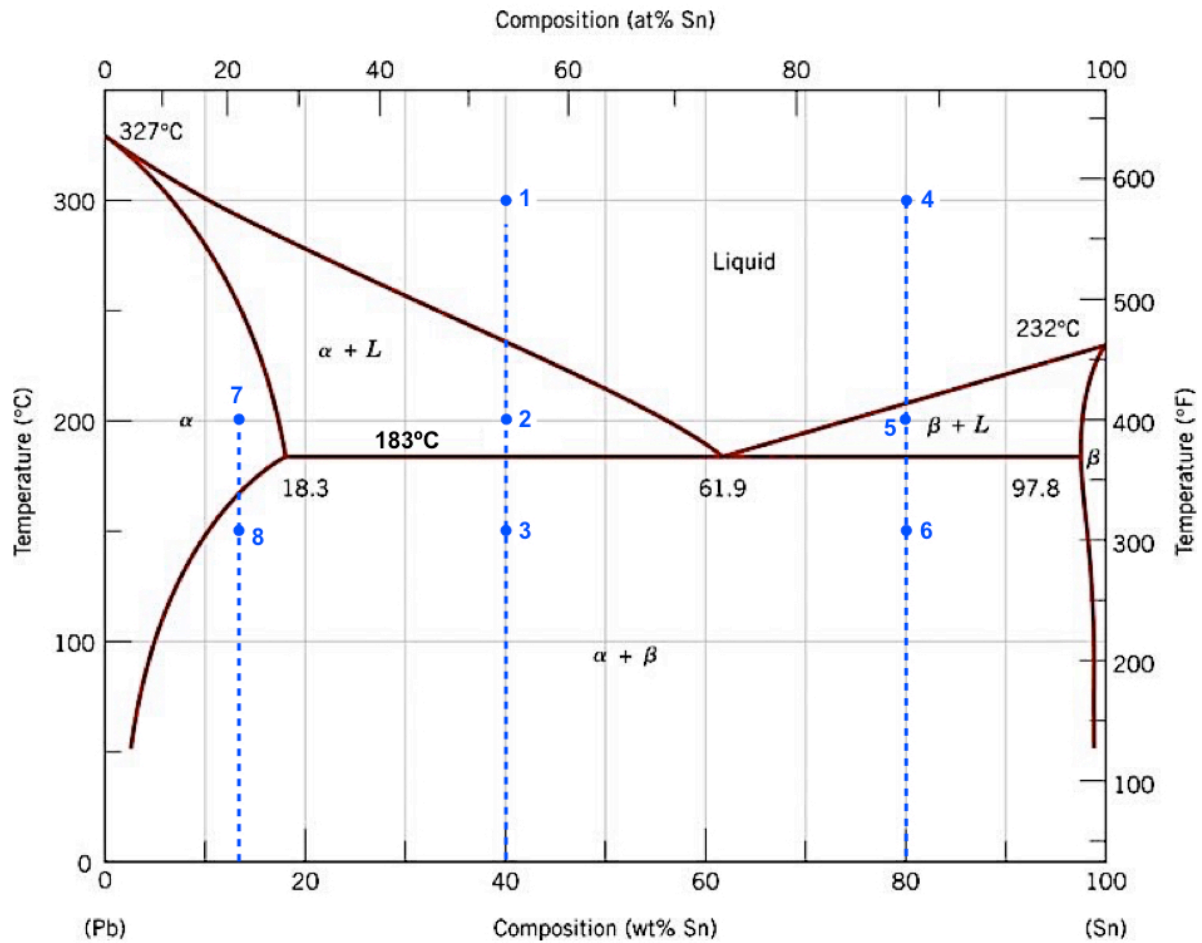


3. Considere o diagrama de fases do sistema chumbo-estanho (determinado a pressão constante) reproduzido em seguida. Analise as afirmativas e as designe com falso (F) ou verdadeiro (V).



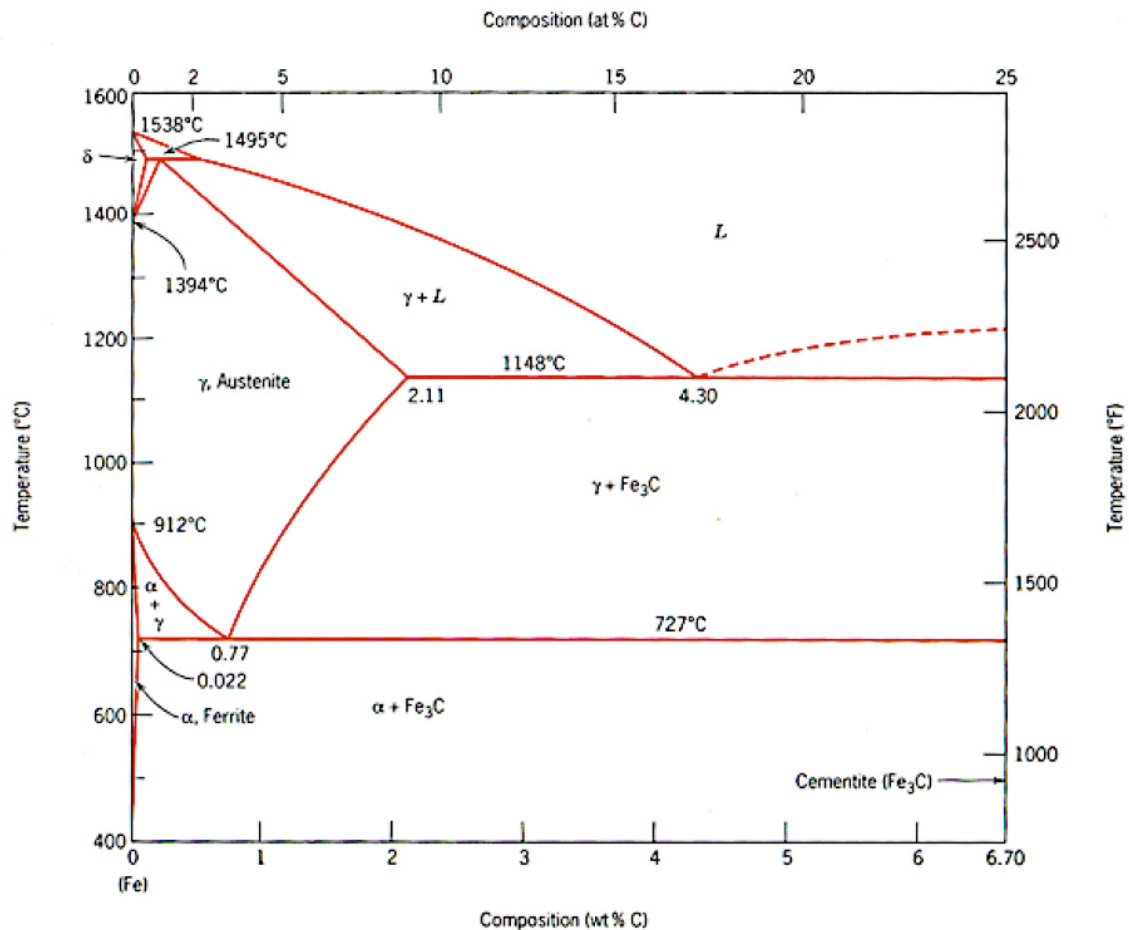
- O ponto **A** representa o ponto de fusão do Sn. ()
- O ponto **B** está no campo α , que corresponde à solução sólida de estanho no chumbo. ()
- O ponto **C** está localizado no campo $\alpha + L$, onde a fase sólida α coexiste com a fase líquida. ()
- O ponto **D** representa o ponto eutético. ()
- O ponto D pertence ao patamar eutético onde coexistem em equilíbrio três fases, duas sólidas, a α e a β , e uma líquida. ()
- A solubilidade máxima do estanho no chumbo no estado sólido é 2,2% em peso. ()
- A solubilidade máxima do chumbo no estanho no estado sólido é 18,3% em peso. ()
- A fração mássica de fase alfa (α) em uma liga contendo 40% em peso de Sn em equilíbrio a 150 °C é 0,66. ()
- A fração volumétrica de fase alfa (α) em uma liga contendo 40% de Sn em equilíbrio a 150 °C é 0,66. ()
- Uma liga contendo 18% em peso de Sn em equilíbrio a 150 °C apresenta duas fases. ()
- Uma liga contendo 61,9% em peso de Pb apresenta a 150 °C uma microestrutura completamente eutética. ()
- Em equilíbrio a 150 °C, a fase alfa (α) de uma liga contendo 20% em peso de Sn tem a mesma composição química da fase alfa (α) de uma liga contendo 80% em peso de Sn. ()
- Uma liga equiatômica de Pb-Sn está totalmente líquida a 225 °C. ()
- Não é possível determinar o volume relativo das fases, com auxílio apenas do diagrama de fases. ()

4. Considere o diagrama de fases do sistema Pb-Sn dado na figura a seguir.



- Qual a composição e a temperatura do sistema representado no **ponto 1** do diagrama? Quantas e quais são as fases presentes? Faça esboços das microestruturas.
- Indique no diagrama o ponto que representa uma liga de composição **70% atômica de Sn a 250°C**. Faça esboços das microestruturas.
- Indique no diagrama o ponto que representa uma liga de composição **30% atômica de Sn a 250°C**. Faça esboço das microestruturas.
- Descreva o que ocorre quando se resfria uma liga de composição e temperatura iniciais indicadas pelo **ponto 1** até o estado indicado pelo **ponto 3**, passando pelo **ponto 2**; suponha que o processo seja realizado em condições de equilíbrio termodinâmico. Para cada um dos **pontos 1, 2 e 3**:
 Faça esboços das microestruturas presentes na liga.
 Especifique quais são as fases presentes.
 Determine aproximadamente a composição de cada uma das fases presentes (% em massa).
 Determine aproximadamente as frações relativas, em massa, das fases presentes.
- Repita o solicitado no item d), para um resfriamento realizado em equilíbrio termodinâmico do estado inicial indicado pelo **ponto 4**, passando pelo **ponto 5**, até o estado final indicado pelo **ponto 6**.
- Repita o solicitado no item d), para um resfriamento realizado em equilíbrio termodinâmico do estado inicial indicado pelo **ponto 7** até o estado final indicado pelo **ponto 8**.
- Identifique a temperatura do patamar eutético e especifique a composição das fases (% em massa) nele presentes.

5. Considere o diagrama Fe-C apresentado abaixo. Um aço com 0,6 %C (% mássica) é aquecido a 1200 °C, sendo em seguida resfriado lentamente, em condições que podem ser consideradas como sendo de equilíbrio termodinâmico. Pergunta-se:
- Qual é a temperatura de início de formação da ferrita ao longo do resfriamento?
 - A 725 °C, quais são as fases presentes nesse aço, as suas composições e as suas proporções relativas?
 - A 725 °C, qual a proporção relativa nesse aço: (1) da microestrutura perlítica, (2) da ferrita primária (ou pró-eutetóide) e (3) da ferrita perlítica.



6. Considere o diagrama Fe-C apresentado no Exercício 5. Esquematize as microestruturas que são observadas a 1000°C, 750°C e 550°C em dois aços com composições de: a) 1,0%C e b) 0,5%C.
7. Considere o diagrama Fe -C dado no Exercício 5. Uma liga com 3,0 %C (% mássica) é fundida a 1400°C, sendo a seguir resfriada lentamente, em condições que podem ser consideradas como sendo de equilíbrio termodinâmico. Pergunta-se:
- Qual é a temperatura de início da solidificação dessa liga?
 - Qual é a fase sólida que se origina na temperatura definida no item a)?
 - Qual é a temperatura na qual termina a solidificação dessa liga?
 - A 1149°C, quais são as fases presentes, as suas composições e as suas proporções relativas?
 - A 1148°C, quais são as fases presentes, as suas composições e as suas proporções relativas?
 - A 725°C, quais são os constituintes dessa liga, as suas composições e as suas proporções relativas?

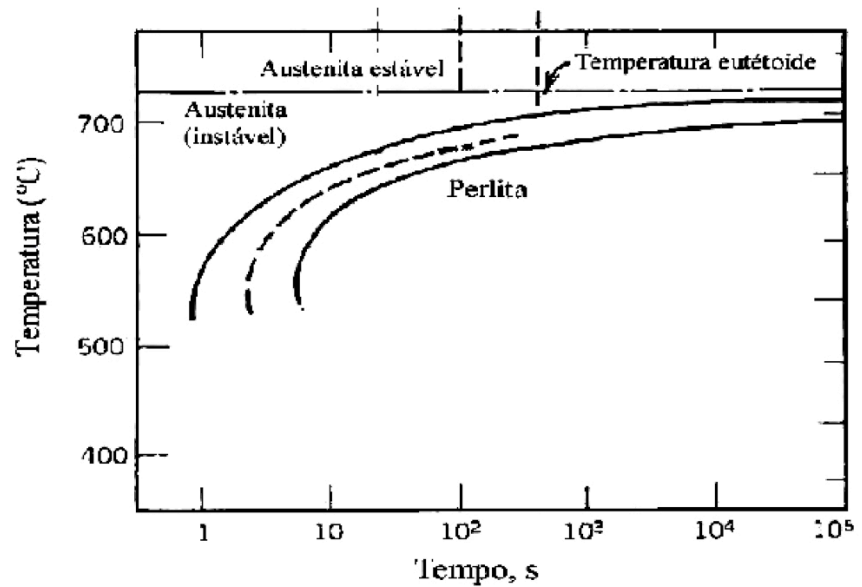
8. Considere um aço de composição eutetóide, que foi resfriado de 780 °C até 675 °C em menos de meio segundo, sendo em seguida mantido nessa temperatura. É dado abaixo o diagrama T T T para o aço.

a) Qual é a fase estável a 780 °C? (caso necessite, consulte o diagrama de fases Fe-C do Exercício 5).

b) Qual o tempo estimado para que 50% da fase estável a 780 °C se transforme em perlita após o resfriamento?

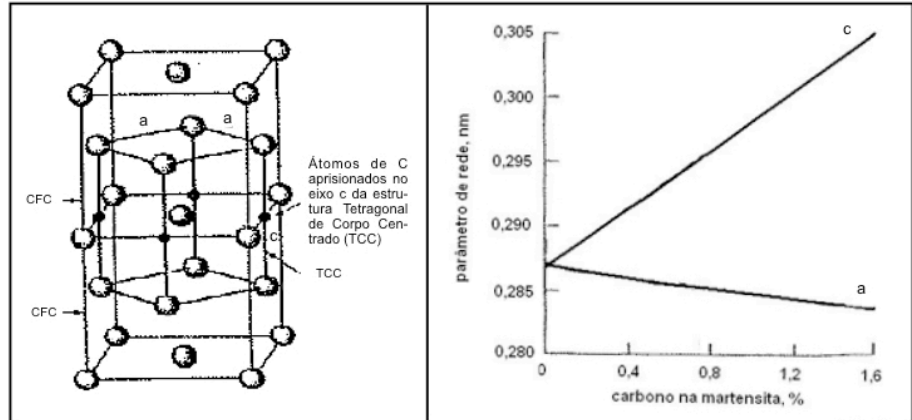
c) Qual o tempo estimado para que 100% da fase estável a 780°C se transforme em perlita após o resfriamento?

d) Se o resfriamento fosse feito até 550 °C, os tempos estimados para 50% e 100% da transformação em perlita seriam maiores ou menores do que os obtidos nos itens (b) e (c)?



9. O rápido resfriamento da austenita produz martensita, endurecendo o aço. Em aços contendo menos de 0,2 % de carbono, a austenita (CFC) apresenta a transformação em martensita supersaturada CCC.

Entretanto em maiores concentrações de carbono origina a estrutura tetragonal de corpo centrado, que ocorre com mudanças dos parâmetros de rede *a* e *c*. Para obter um aço com propriedades especiais contendo 25% de ferrita e 75% de martensita, sendo



que a martensita contém 0,60% de carbono, determine:

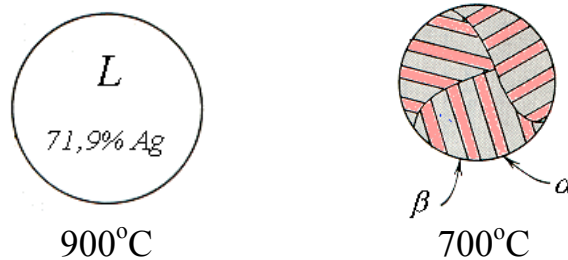
a) A temperatura de solubilização do aço.

b) O conteúdo em carbono do aço obtido.

Exercício 1

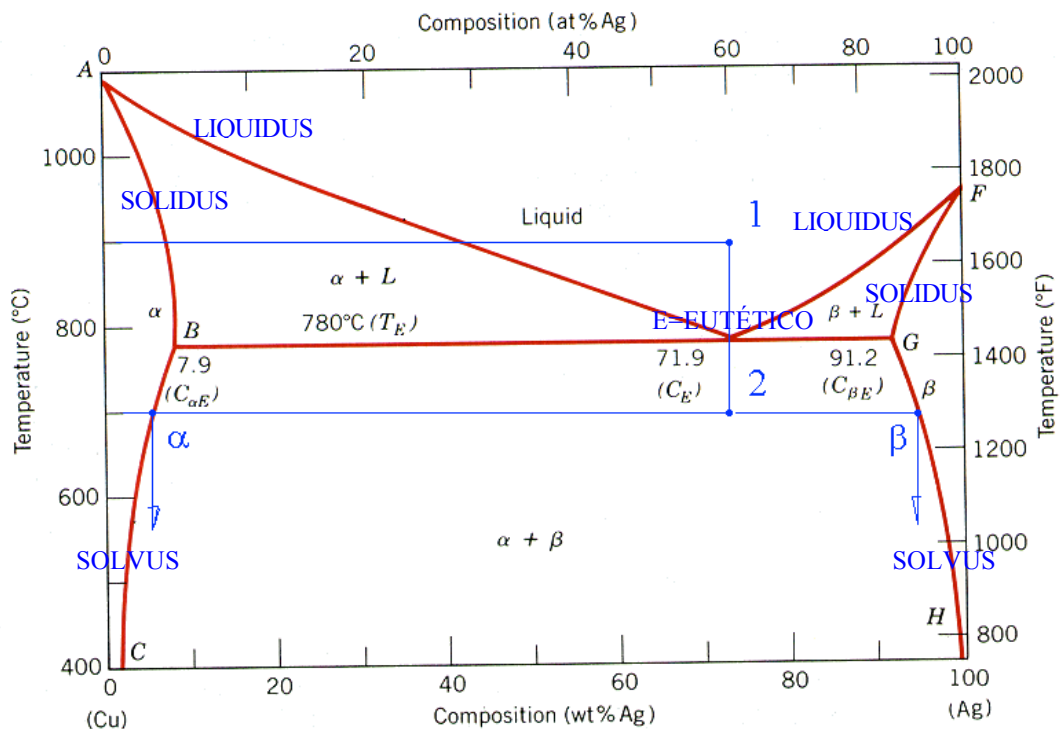
1a

Os esboços das microestruturas que seriam observadas a 900°C e a 700°C são apresentados abaixo. A 900°C seria observada somente uma única fase, líquida. A 700°C seria observada uma microestrutura na qual as fases α e β apareceriam como lamelas alternadas, pois a composição é a composição do eutético, e o resfriamento foi lento (em condições que poderiam ser consideradas próximas do equilíbrio).



1b

A determinação pode ser feita através do diagrama de fases, conforme mostra a figura abaixo. Partimos do ponto **1**, indicado na figura. Com o resfriamento, chega-se até o ponto **2**. As composições são obtidas a partir das linhas *solvus* das fases α e β , indicadas pelos pontos α e β (marcados em azul na figura) e são, respectivamente, 5,9% Ag para a fase α e 95,1% Ag para a fase β (% mássica)



1c

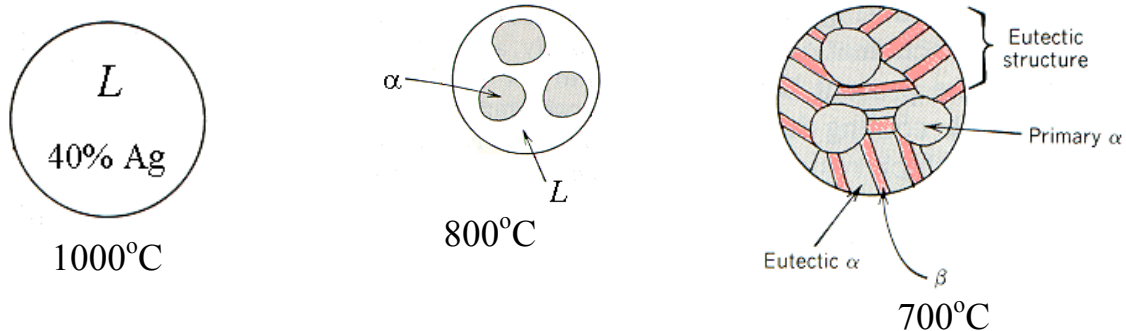
As quantidades relativas de cada uma das fases podem ser calculadas pela regra da alavanca.

<p>Fase α</p> $\% \alpha = 100 \times (95,1 - 71,9) / (95,1 - 5,9)$ $\% \alpha = 26,0 \%$	<p>Fase β</p> $\% \beta = (71,9 - 5,9) / (95,1 - 5,9)$ $\% \beta = 74,0 \%$
---	--

Exercício 2

2a

Os esboços das microestruturas que seriam observadas a 1000°C, a 800°C e a 700°C são apresentados abaixo. A 1000°C seria observada somente uma única fase, líquida. A 800°C seria observada a presença de precipitados de fase α (chamados de precipitados de fase α primária) em meio à fase líquida. A 700°C seria observada uma microestrutura na qual apareceriam regiões de fase α primária e regiões onde as fases α e β apareceriam como lamelas alternadas, regiões essas originárias do eutético. Essas microestruturas seriam observadas em condições em que o resfriamento tenha sido lento (em condições que poderiam ser consideradas próximas do equilíbrio).



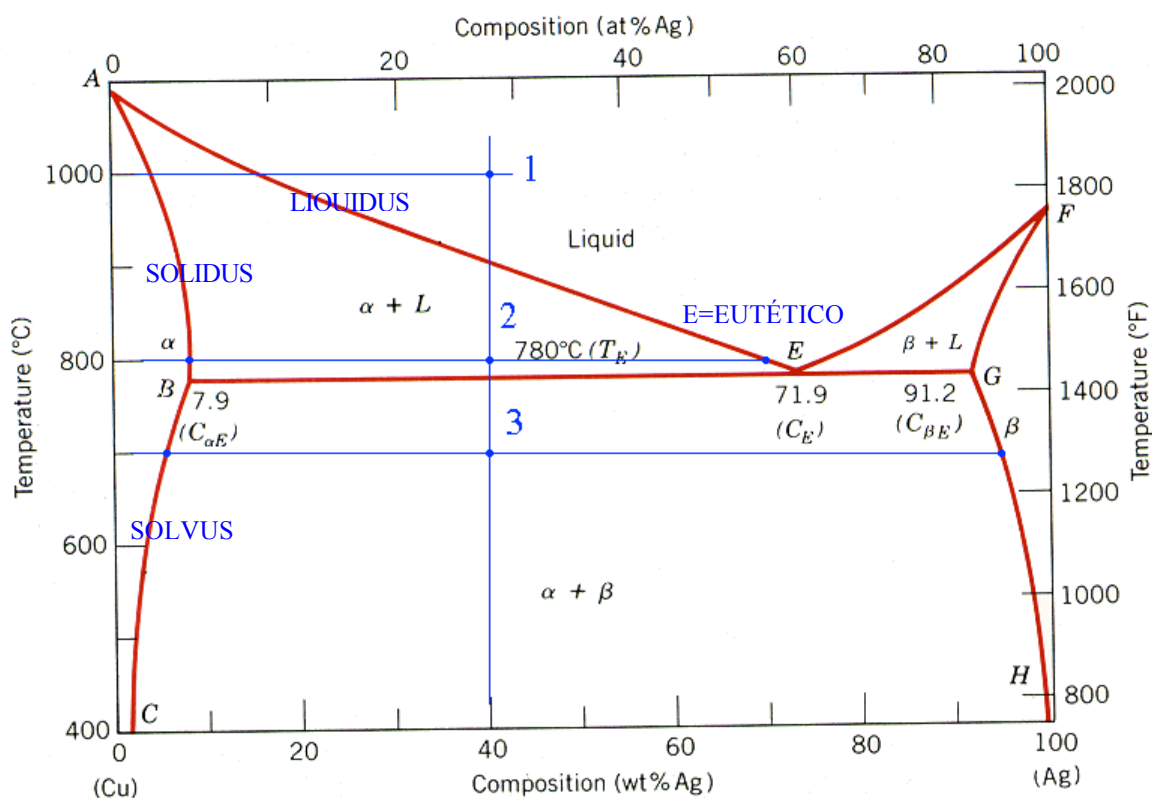
2b

A determinação pode ser feita através do diagrama de fases, conforme a figura a seguir, partindo do ponto **1**. Com a primeira etapa de resfriamento, chega-se até o ponto **2**. Com o resfriamento final, chegamos ao ponto **3**. As composições são obtidas a partir das linhas *solvus* da fase α e da linha de *liquidus* (para 800°C), e a partir das linhas *solvus* das fases α e β .

As composições pedidas em % **mássicas** são:

a **800°C**: 7,9 % Ag para a fase α e 68,7% Ag para a fase líquida;

a **700°C**: 5,9 % Ag para a fase α e 95,1 % Ag para a fase β .


2c

As quantidades relativas de cada uma das fases podem ser calculadas pela regra da alavanca.

Temperatura = 800°C

Fase α

$$\% \alpha = (68,7 - 40,0) / (68,7 - 7,9)$$

$$\% \alpha_{800} = 47,2 \%$$

Fase líquida

$$\% \text{Liq} = (40,0 - 7,9) / (68,7 - 7,9)$$

$$\% \text{Liq} = 52,8 \%$$

Temperatura = 700°C

Fase α

$$\% \alpha = (95,1 - 40,0) / (95,1 - 5,9)$$

$$\% \alpha_{700} = 61,8 \%$$

Fase β

$$\% \beta = (40,0 - 5,9) / (95,1 - 5,9)$$

$$\% \beta_{700} = 38,2 \%$$

Exercício 3

- O ponto **A** representa o ponto de fusão do Sn. (**F**)
- O ponto **B** está no campo α, que corresponde à solução sólida de estanho no chumbo. (**V**)
- O ponto **C** está localizado no campo α + L, onde a fase sólida α coexiste com a fase líquida. (**V**)
- O ponto **D** representa o ponto eutético. (**V**)
- O ponto **D** pertence ao patamar eutético onde coexistem em equilíbrio três fases, duas sólidas, a α e a β, e uma líquida. (**V**)
- A solubilidade máxima do estanho no chumbo no estado sólido é 2,2% em peso. (**F**)
- A solubilidade máxima do chumbo no estanho no estado sólido é 18,3% em peso. (**F**)
- A fração mássica de fase alfa (α) em uma liga contendo 40% em peso de Sn em equilíbrio a 150 °C é 0,66. (**V**)

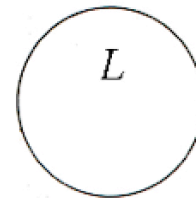
- i) A fração volumétrica de fase alfa (α) em uma liga contendo 40% de Sn em equilíbrio a 150 °C é 0,66. (**F**)
- j) Uma liga contendo 18% em peso de Sn em equilíbrio a 150 °C apresenta duas fases. (**V**)
- k) Uma liga contendo 61,9% em peso de Pb apresenta a 150 °C uma microestrutura completamente eutética. (**F**)
- l) Em equilíbrio a 150 °C, a fase alfa (α) de uma liga contendo 20% em peso de Sn tem a mesma composição química da fase alfa (α) de uma liga contendo 80% em peso de Sn. (**V**)
- m) Uma liga equiatômica de Pb-Sn está totalmente líquida a 225 °C. (**F**)
- n) Não é possível determinar o volume relativo das fases, com auxílio apenas do diagrama de fases. (**V**)

Exercício 4

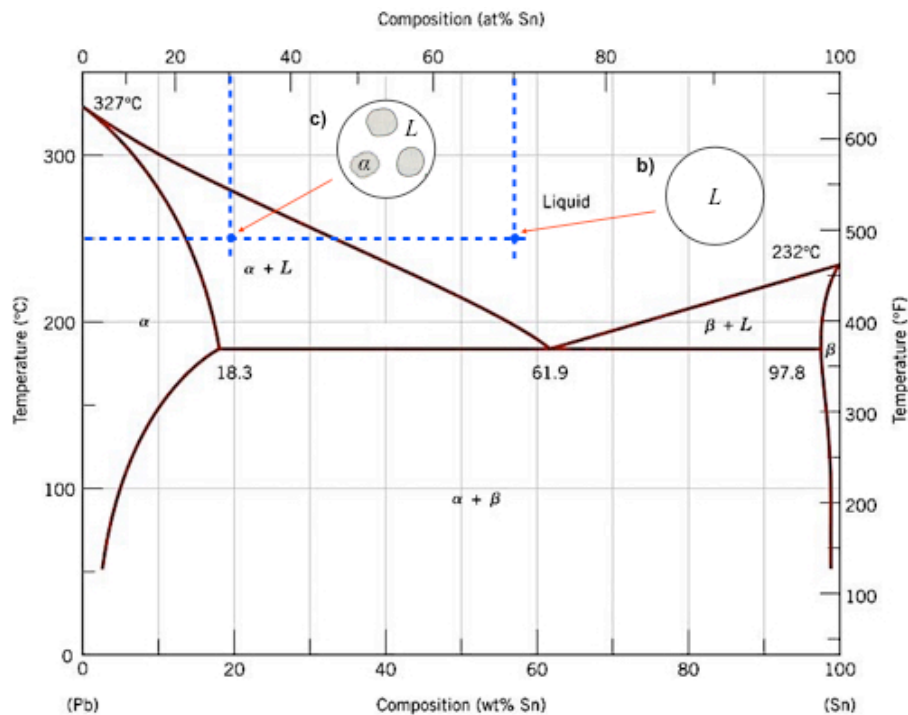
4a

A temperatura e a composição do sistema representado Há somente uma fase presente, a fase líquida.
no **ponto 1** são :

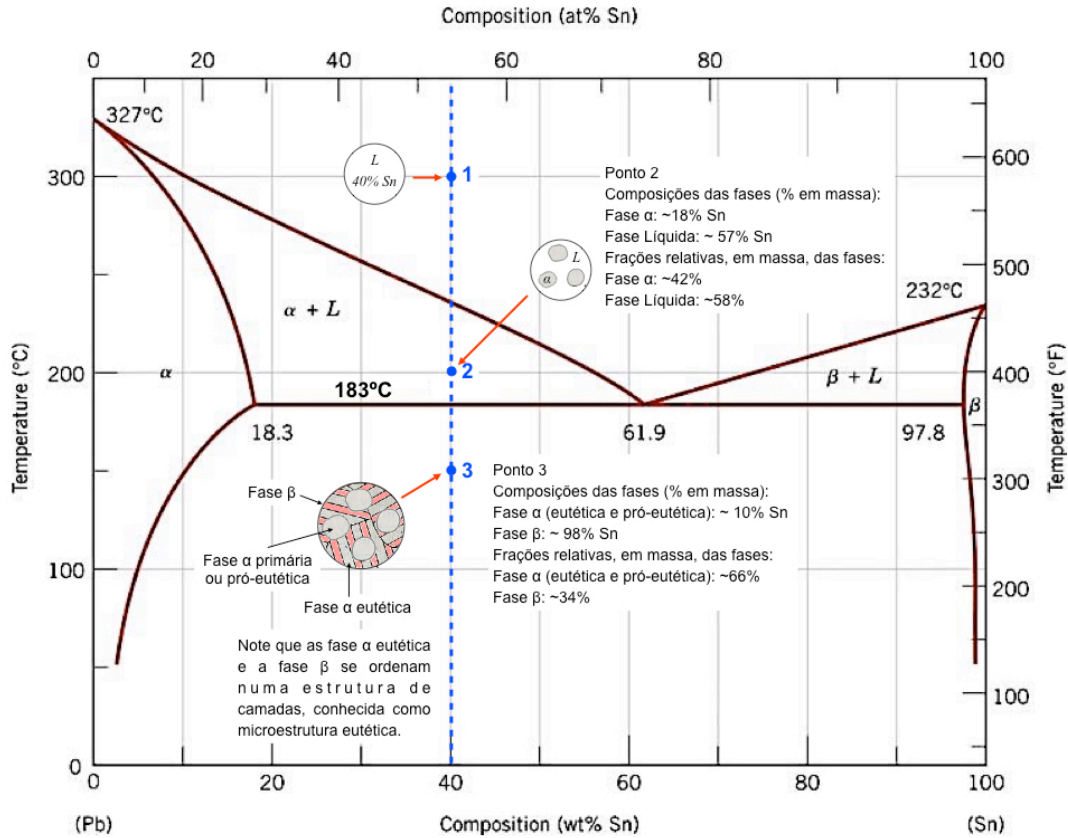
- $T_1 = 300^\circ\text{C}$
- Composição 40% Sn (% mássica)
- Composição 55% Sn (% atômica)



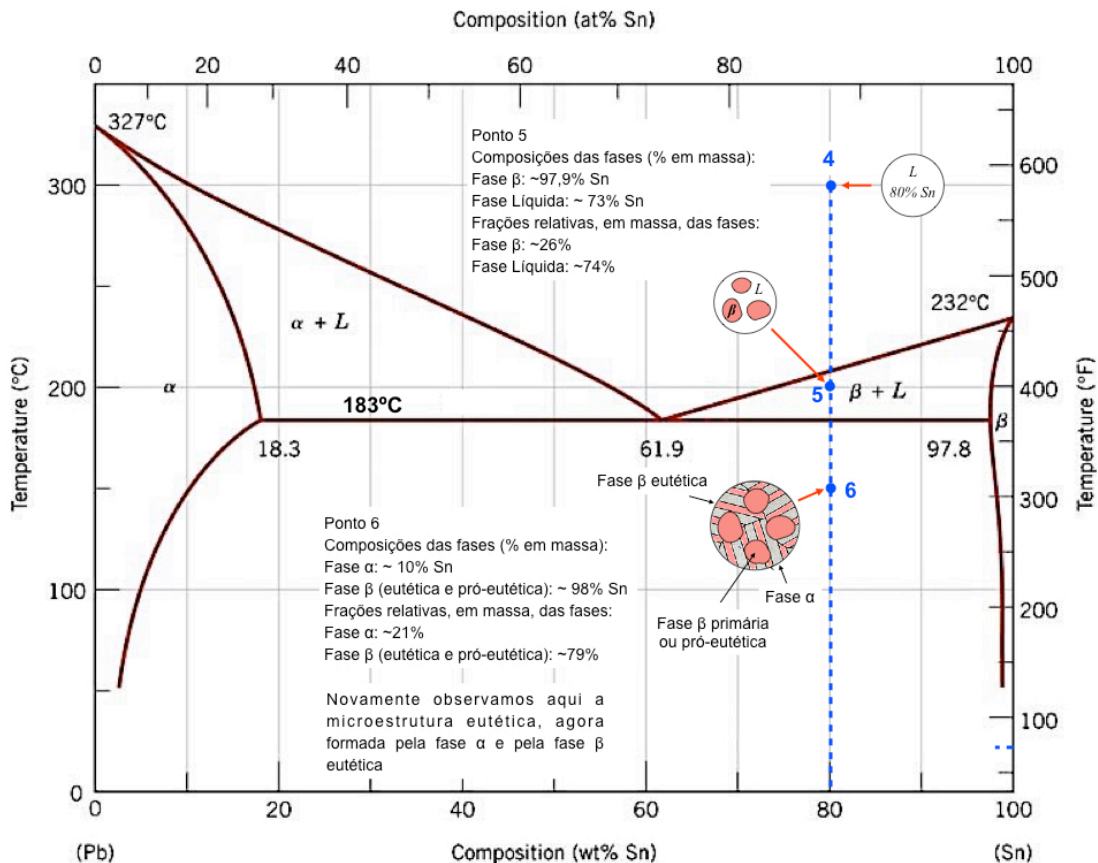
4b e c



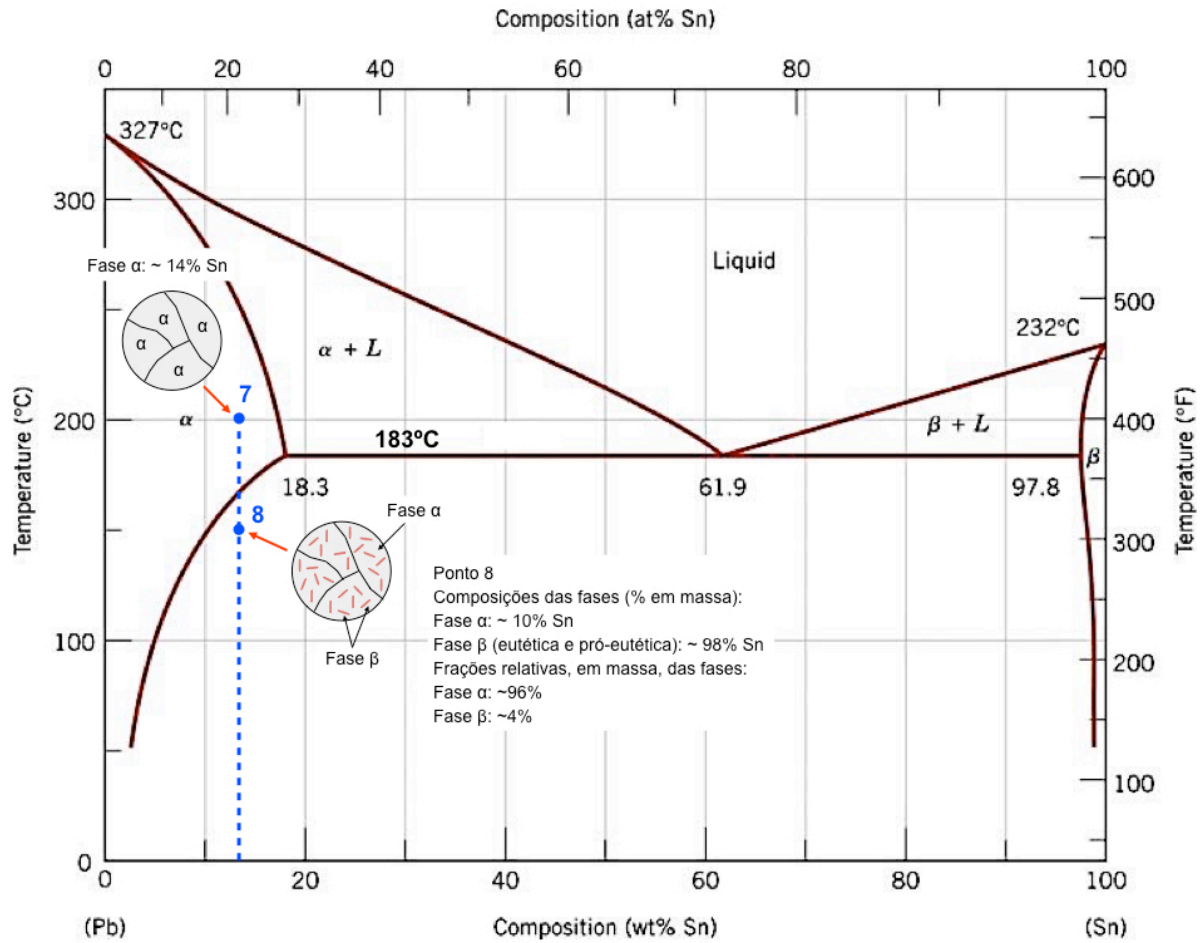
4d



4e



4f



4g

O patamar eutético se encontra na temperatura de 183°C. As fases presentes na liga, em qualquer posição do patamar eutético, e suas respectivas composições (% em massa) são:

Fase líquida: 61,9% Sn

Fase α : 18,3% Sn

Fase β : 97,8% Sn

É possível determinar as frações relativas das fases presentes na liga para estados correspondentes a pontos pertencentes ao patamar eutético?

Exercício 5

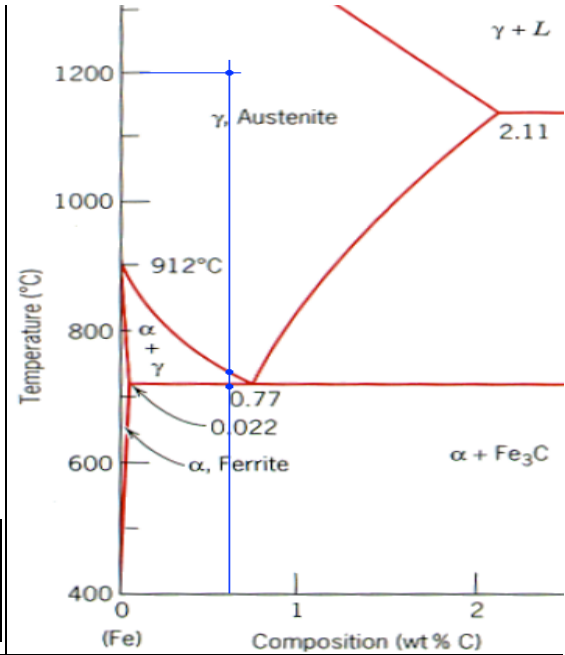
5a

A temperatura na qual começa a se formar a ferrita é definida pela intersecção de uma linha vertical passando pela composição do aço (0,6%C) com a linha que define o domínio ($\alpha + \gamma$) do diagrama. Essa temperatura é de aproximadamente 750 °C.

5b

As fases presentes no aço 0,6 %C a 725 °C (temperatura ligeiramente abaixo da temperatura da reação eutetóide) são a **ferrita (α)** (que tanto pode ser primária, quanto presente na perlita, microconstituente eutetóide, mistura íntima de ferrita e cementita), e a **cementita** (presente integralmente na perlita).

Fase	Composição (%C)	Proporção relativa (%)
α	0,022	$(6,70-0,600)/(6,70-0,022) = 0,913 \rightarrow \mathbf{91,3\%}$
Fe_3C	6,70	$(0,6-0,022)/(6,70-0,022) = 0,0866 \rightarrow \mathbf{8,7\%}$



5c

A proporção relativa da microestrutura perlítica, composta por ferrita e por cementita, pode ser determinada a partir da regra da alavanca, pois corresponde à proporção relativa da austenita presente no aço numa temperatura ligeiramente acima à do patamar eutetóide ($T \sim 728^\circ C$).

	Composição (%C)	Proporção relativa (%)
(1) austenita ($\sim 728^\circ C$) \rightarrow perlita ($725^\circ C$)	0,77	$(0,60-0,022)/(0,77-0,022) = 0,7727 \rightarrow \mathbf{77,3\%}$
(2) ferrita primária (fora da perlita) não é afetada pela reação eutetóide	0,022	$(0,77-0,60)/(0,77-0,022) = 0,2272 \rightarrow \mathbf{22,7\%}$

Do item 5b) sabemos que a fração total de ferrita na liga a 725°C é 91,3%. Do item 5c) - cálculo (2) sabemos que a fração de ferrita primária na liga é 22,7%. Assim, a fração de ferrita na perlita pode ser obtida a partir da diferença entre esses dois valores:

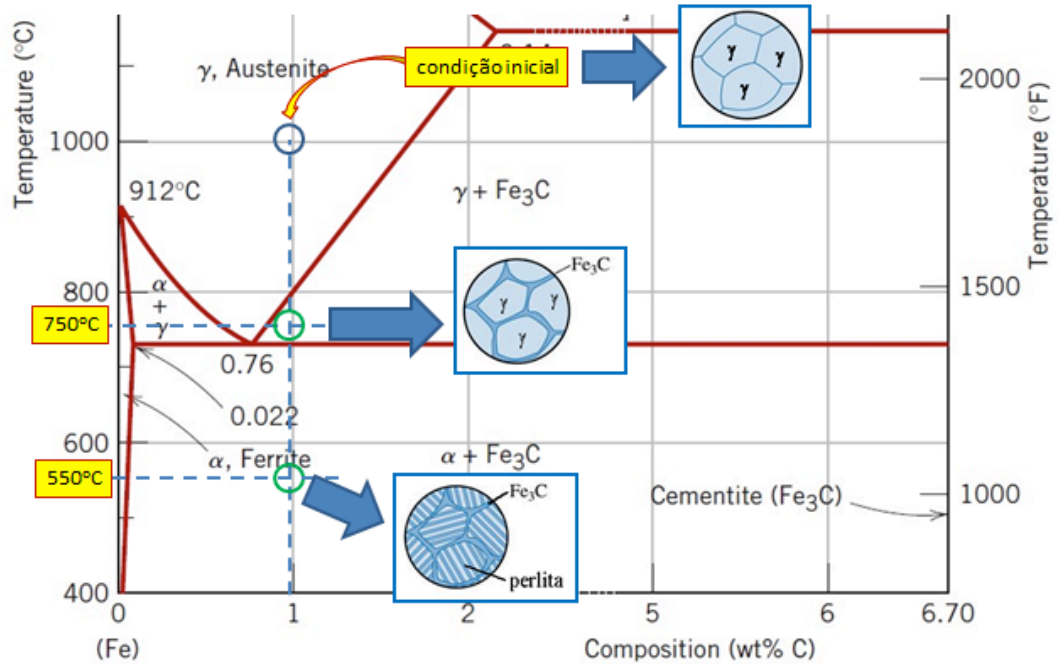
$$\text{ferrita na perlita} = 91,3 - 22,7 = \mathbf{68,6\%}$$

Exercício 6

6a

As fases presentes no aço com composição 1,0% C são apresentadas na figura ao lado.

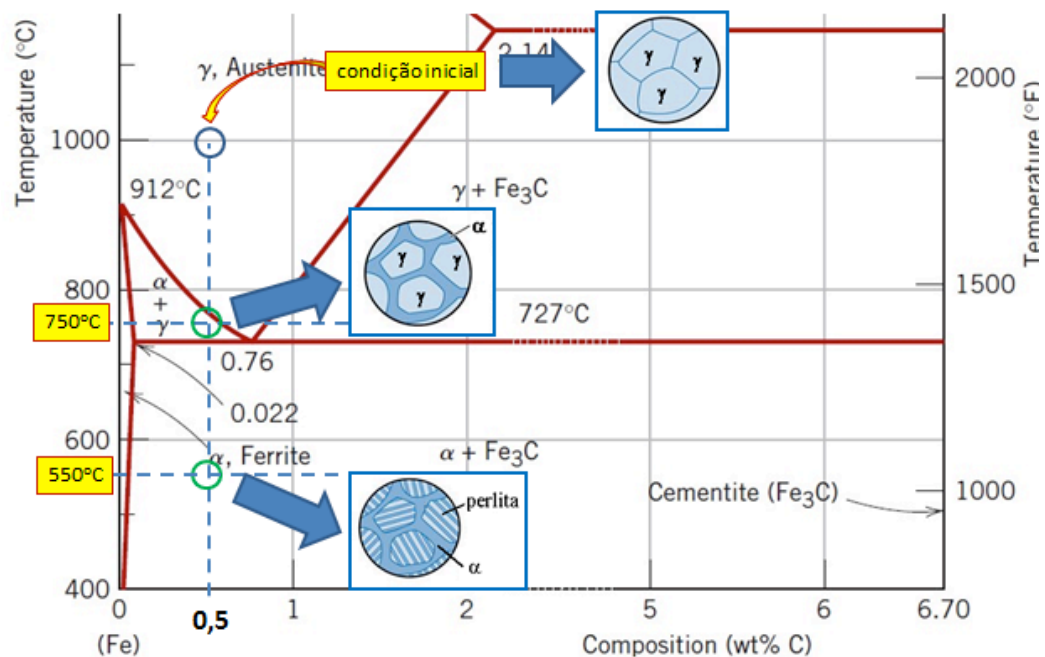
- A 1000°C existe apenas a austenita (fase γ).
- A 750°C existe cementita (Fe_3C) proeutetóide e austenita; note que a cementita se forma nos contornos de grão da austenita.
- A 550°C existe cementita pró-eutetóide, e a austenita que existia acima do patamar eutetóide deu origem à microestrutura perlítica, que consiste em camadas intercaladas das fases ferrita (fase α) e cementita (Fe_3C).



6b

As fases presentes no aço com composição 0,5% C são apresentadas na figura ao lado.

- A 1000°C existe apenas a austenita (fase γ);
- A 750°C existe ferrita (fase α) proeutetóide e austenita; note que a ferrita se forma nos contornos de grão da austenita.
- A 550°C existe ferrita pró-eutetóide, e a austenita que existia acima do patamar eutetóide deu origem à microestrutura perlítica [camadas intercaladas das fases ferrita (fase α) e cementita (Fe_3C)].

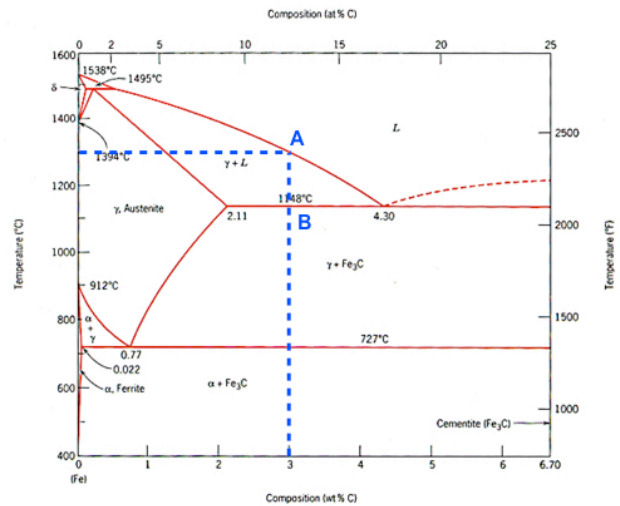


Exercício 7

7a A temperatura de início da solidificação da liga é determinada pela intersecção da vertical a 3,0% com a curva *liquidus*. Essa temperatura está especificada no diagrama pelo ponto A e corresponde a 1300°C.

7b A fase sólida que nucleia a 1300°C é a austenita (ferro- γ com carbono intersticial).

7c A temperatura final de solidificação da liga é 1148°C. Ela é determinada pela intersecção da vertical a 3,0% com a curva *solidus* (ponto B no diagrama), que nesse diagrama corresponde à isoterma que define o patamar eutético.



7d As fases presentes na liga a 1149°C são a austenita (ferro- γ com carbono intersticial) e uma fase líquida. As composições de cada fase, e as respectivas proporções relativas calculadas pela regra da alavanca são dadas abaixo.

Fase	Composição (% mássica de C)	Proporção Relativa das Fases
Austenita	2,11	$(4,30 - 3,0) / (4,30 - 2,11) = 0,591 = 59,1\%$
Líquida	4,30	$(3,0 - 2,11) / 4,30 - 2,11) = 0,406 = 40,6\%$

7e Na temperatura de 1148°C (patamar eutético) três fases estão presentes na liga, duas sólidas, a austenita (2,11 %C) e a cementita ((6,70 %C) e uma líquida (4,30% C). No patamar eutético a regra da alavanca não pode ser aplicada e as frações relativas das fases presentes é indeterminada.

7f As fases presentes na liga a 725°C são a ferrita (ferro- α com carbono intersticial) e a cementita (Fe_3C). As composições de cada fase, e as respectivas proporções relativas calculadas pela regra da alavanca são dadas abaixo.

Fase	Composição (% mássica de C)	Proporção Relativa das Fases
Ferrita	0,022	$(6,70 - 3,0) / (6,70 - 0,022) = 0,554 = 55,4\%$
Cementita	6,70	$(3,0 - 0,022) / (6,70 - 0,022) = 0,446 = 44,6\%$

Note que os 44,6% de cementita encontram-se parte no microconstituente eutetóide (perlita) e parte fora dele (cementita pró-eutetóide). Podemos determinar a fração relativa da cementita pró-eutetóide na liga a 725°C, utilizando a regra da alavanca a 728°C.

Fase	Composição (% mássica de C)	Proporção Relativa das Fases
Cementita	6,70	$(3,0 - 0,77) / (6,70 - 0,77) = 0,376 = 37,6\%$

Dessa forma, a fração relativa da cementita presente na perlita é:

$$0,446 - 0,376 = 0,070 = 7,0\%$$

Também, como durante a reação eutetóide a fase austenita dá origem ao microconstituente perlítico. Podemos determinar a fração mássica da liga que é constituída pela perlita a 725°C, utilizando a regra da alavanca a 728°C.

	Composição (% mássica de C)	Proporção Relativa das Fases
Austenita perlita	0,77 (austenita)	$(6,70 - 3,0) / (6,70 - 0,77) = 0,624 = 62,4\%$

Observe que a fração mássica da liga que é constituída pela perlita a 725°C pode também ser obtida pela soma: $0,554 + 0,070 = 0,624 = 62,4\%$.

Exercício 8

8a

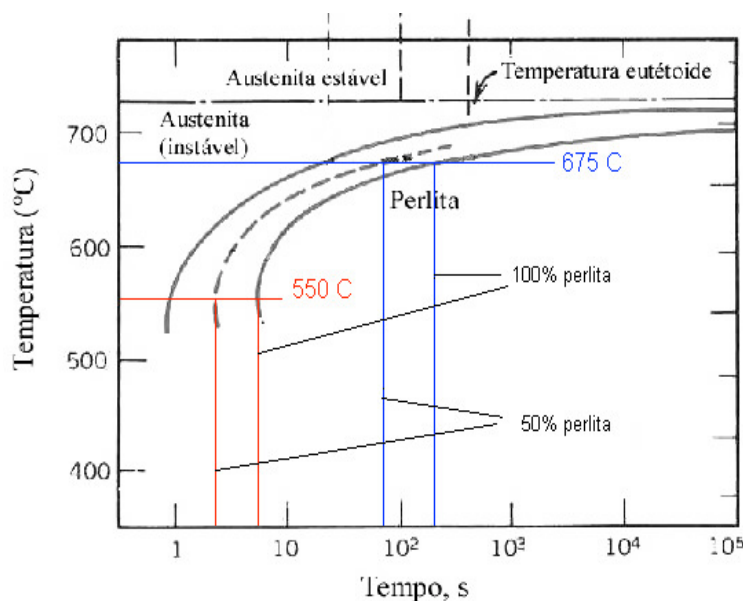
A fase estável a 780°C é a austenita.

8b

O tempo estimado para que **50%** da austenita se transforme em perlita após o resfriamento rápida a **675°C** pode ser obtido utilizando o diagrama TTT. A leitura do diagrama embora simples, não é muito precisa, devido ao fato da escala de tempo ser logarítmica e não apresentar valores intermediários. **O tempo estimado é inferior a 100 s (~ 80 s).**

8c

O tempo estimado para que **100%** da austenita se transforme em perlita após o resfriamento rápida a 675 °C também pode ser obtido utilizando o diagrama TTT. Esse tempo seria **superior a 100 segundos, provavelmente 200 - 300 segundos.**



8d

Os tempos para a transformação de **50%** e **100%** da austenita em perlita após o resfriamento rápida a **550 °C** seriam inferiores àqueles após resfriamento até 675°C.

Por meio de um artifício é possível obter uma leitura mais exata da escala log. Os intervalos são lineares em log (0, 1, 2, 3..), pela leitura em log e cálculo de 10^{leitura} , se obtém valor mais próximo.

Por exemplo, a **550 °C**:

50%: $0 + (0,6 \text{ cm} / 1,5 \text{ cm}) = 0,4$, portanto $10^{0,4} = 2,5 \text{ s}$

100%: $0 + 1,2 / 1,5 = 0,8$; $10^{0,8} = 6,3 \text{ s}$

A **675 °C**:

50 %: $1 + (1,3 \text{ cm} / 1,5 \text{ cm}) = 1,87$, portanto $10^{1,87} = 74,1 \text{ s}$

100%: $2 + 0,5 / 1,5 = 2,333$; $10^{2,333} = 215,3 \text{ s}$

Exercício 9**9a**

Como a martensita (que se origina da austenita) possui 0,60% de carbono, a temperatura de solubilização do aço pode ser determinada usando o diagrama de fases Fe-C mostrado ao lado e vale aproximadamente 758°C.

9b

Para estimar o conteúdo em carbono no aço obtido, utilizaremos a regra da alavanca para a isoterma a 758°C e o fato de que a fração de ferrita no aço é 25%.

$$0,25 = (0,60 - x) / (0,60 - 0,02)$$

Portanto, $x = 0,46\%$ de carbono.

