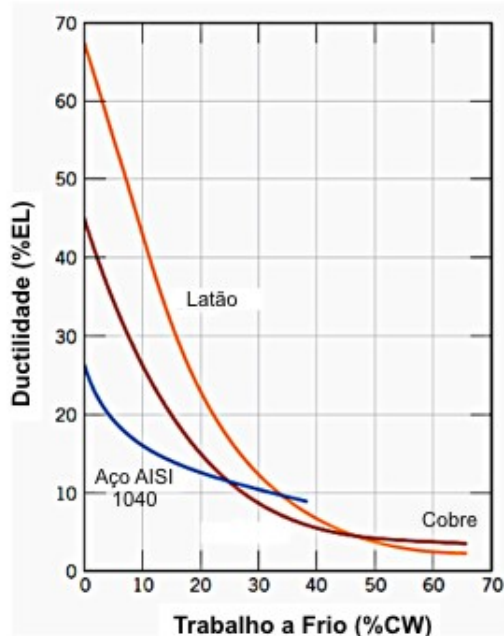
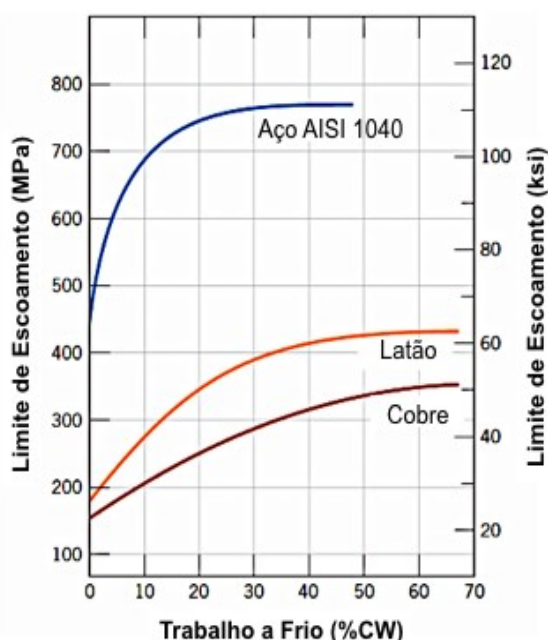


1. Considere duas discordâncias em cunha no mesmo plano de deslizamento e separadas por algumas distâncias interatômicas. O que pode ocorrer se devido a tensões aplicadas ao material essas discordâncias forem forçadas a se aproximar?
2. Considere os gráficos apresentados a seguir. Uma barra cilíndrica de latão de diâmetro inicial igual a 30,0 mm sofreu uma deformação plástica a frio, sendo o diâmetro final depois da deformação igual a 26,8 mm.
 - a) Determine o grau de deformação, em % de redução de área da seção transversal (%CW).
 - b) Estime, utilizando os gráficos, o limite de escoamento e a ductilidade dessa liga depois da deformação a frio.



Varição do Limite de Escoamento (*Yield Strength*) em função do grau de deformação (% de redução de área da seção transversal, %CW), para aço 1040, latão e cobre trabalhados a frio.

Varição da ductilidade (%EL) em função do grau de deformação (% de redução de área da seção transversal, %CW), para aço 1040, latão e cobre trabalhados a frio.

3. Dois corpos de prova, não deformados, de uma mesma liga devem ser submetidos a um processo de deformação plástica a frio com a consequente redução de suas áreas de seção transversal. Um dos corpos possui seção transversal cilíndrica, enquanto o outro possui seção transversal retangular. Durante a deformação, ambas as seções transversais permanecem, respectivamente, circular e retangular. Sabendo que as dimensões original e depois da deformação dos dois corpos de prova são as especificadas na tabela abaixo, determine qual deles terá sofrido maior aumento no limite de escoamento após a deformação plástica.

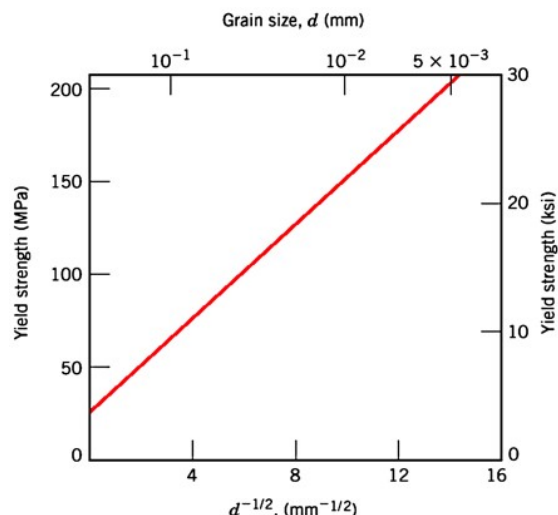
	Circular (raio, mm)	Retangular (mm x mm)
Dimensões originais	15,2	125 x 175
Dimensões após a deformação	11,4	75 x 200

4. O gráfico ao lado, mostra o comportamento do Limite de Escoamento (*Yield Strength*) em função do inverso da raiz quadrada do diâmetro médio de grão ($d^{-1/2}$) válido para uma liga metálica policristalina de composição 70% Cu - 30% Zn. Utilizando o gráfico e lembrando da relação de Hall-Petch,

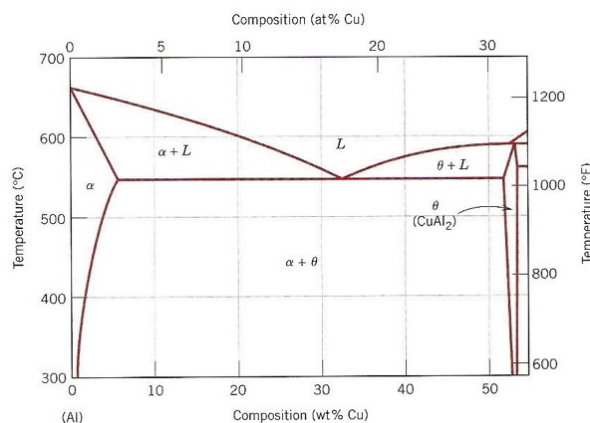
$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

determine:

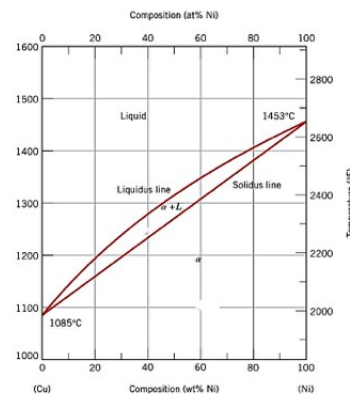
- Os valores dos parâmetros σ_0 e k_y .
- O limite de escoamento para essa liga quando seu diâmetro médio de grão for igual a $1,0 \times 10^{-3}$ mm.



5. Considerando o diagrama de fases do sistema Al-Cu apresentado ao lado, especifique a composição de liga Al-Cu com potencial para levar ao maior aumento do limite de escoamento da liga, como resultado de um processo de endurecimento por precipitação. Justifique sua resposta.

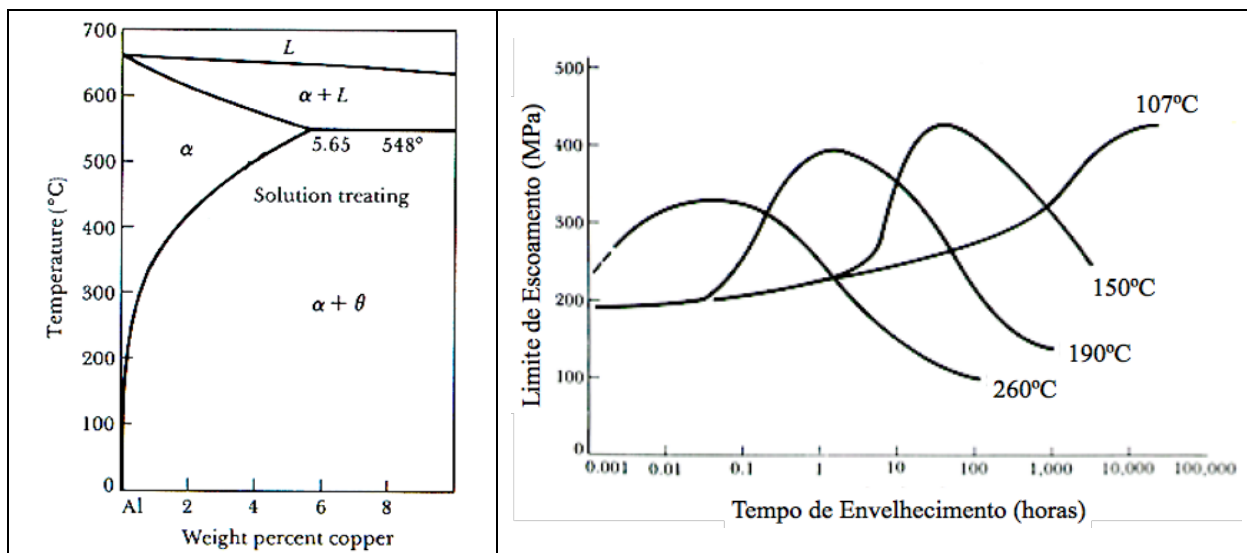


6. Tomando como base o diagrama de fases do sistema Cu-Ni apresentado ao lado, explique se é possível endurecer por precipitação uma liga Cu-10%Ni.

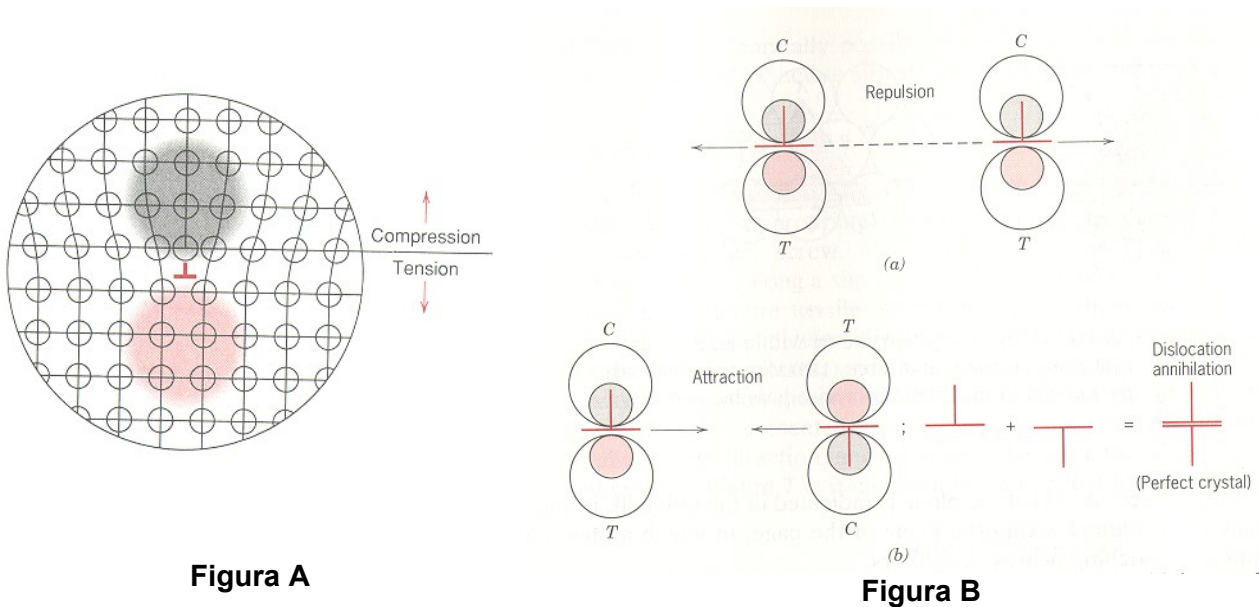


7. Você trabalha numa empresa que produz peças de uma liga de Al - 4%Cu. Essas peças são recebidas de um fornecedor no estado solubilizado – ou seja, elas foram aquecidas por um tempo suficientemente longo a 530°C, de modo a apresentarem uma única fase (veja o diagrama de fases dado a seguir), sendo rapidamente resfriadas até a temperatura ambiente depois desse aquecimento, mantendo na temperatura ambiente uma microestrutura com única fase (que está supersaturada nessa condição). Dentro da sua empresa, as peças passam por um processo de endurecimento por precipitação. Esse processo envolve um tratamento térmico, e o parâmetro de controle de qualidade para aprovação das peças é o limite de escoamento (*yield strength*) que elas apresentam depois desse tratamento térmico – o valor do limite de escoamento deve ser de, no mínimo, 300 MPa. Sua empresa possui três fornos nos

quais são feitos os tratamentos térmicos, podendo, dessa forma, trabalhar com diferentes temperaturas de tratamento. Num determinado dia, os fornos 1 e 2 operavam na mesma temperatura, 190°C, enquanto o outro forno, o forno 3, estava a 260°C. Dois lotes de peças deveriam ser tratados nesse dia (chamaremos esses lotes de lotes A e B), entrando o lote A no forno 1 e o lote B no forno 2, sendo que para os dois lotes o tempo de tratamento térmico deveria ser de uma hora. No entanto, naquele dia houve um treinamento de simulação de incêndio, do qual todos deveriam participar, e foi cometido um engano na escala de programação, sendo o lote B colocado por engano no forno 3. Além disso, o treinamento foi mais longo que o previsto, e os operadores só puderam retornar ao trabalho com uma hora de atraso. Logo que reassumiram seus postos, os operadores comunicaram ao engenheiro responsável – que por acaso é você – o que havia ocorrido: a temperatura de tratamento do lote B foi diferente da especificada (260°C ao invés de 190°C), e o tempo de tratamento para ambos os lotes, ao invés do tempo especificado (uma hora), foi de duas horas. Tendo por base os dois gráficos a seguir (diagrama de fases do sistema Al-Cu e curvas de envelhecimento da liga Al-4%Cu), qual dos procedimentos sugeridos abaixo deveria ser executado para aproveitar os dois lotes de peças.



- Não fazer nada com nenhum dos dois lotes, pois ambos, apesar do tratamento térmico feito por engano – o lote A foi aquecido por duas horas ao invés de uma hora, e o lote B foi tratado a 260°C ao invés de 190°C – continuam a atender a especificação.
- Não fazer nada com o lote B, pois ele atende a especificação; aquecer o lote A a 530°C por um tempo suficiente para solubilizar a fase θ precipitada; esfriar rapidamente até a temperatura ambiente e, a seguir, aquecer esse lote por uma hora a 190°C para precipitar a fase θ .
- Aquecer ambos os lotes a 530°C por um tempo suficiente para solubilizar a fase θ precipitada; esfriar lentamente até temperatura que permita a manipulação (algo em torno de 100°C) e, a seguir, aquecer ambos os lotes por uma hora a 190°C para precipitar a fase θ .
- Não fazer nada com o lote A, pois ele atende a especificação; aquecer o lote B a 530°C por um tempo suficiente para solubilizar a fase θ precipitada; esfriar rapidamente até a temperatura ambiente e, a seguir, aquecer esse lote por uma hora a 190°C para precipitar a fase θ .
- Não é possível fazer nada com nenhum dos dois lotes – ambos estão perdidos.

Exercício 1**Figura A****Figura B**

Foi visto na aula teórica que existem zonas ou campos de tensão em torno das linhas das discordâncias em cunha, e que essas tensões são de compressão na região correspondente ao da extremidade do plano extra da discordância, e de tração na região oposta (Figura A). Essas zonas de tensão em torno das discordâncias podem interagir entre si, quando as discordâncias estão suficientemente próximas umas das outras (Figura B).

Quando **duas discordâncias em cunha de mesmo sinal**, distantes entre si de algumas distâncias interatômicas e localizadas no mesmo plano de deslizamento são forçadas a se aproximar pelo efeito de uma solicitação externa (por exemplo, por uma tensão externa aplicada), as zonas de tração e de compressão estão do mesmo lado das discordâncias. Esses campos de tensões que existem em torno de cada discordância individual tendem a se repelir mutuamente, e, dessa forma, forçar a separação dessas duas discordâncias. Essa seria uma situação que dificultaria a mobilidade dessas duas discordâncias, dificultando também a deformação plástica local do material que as contém.

Quando **duas discordâncias em cunha de sinais contrários**, distantes entre si de algumas distâncias interatômicas e localizadas no mesmo plano de deslizamento são forçadas a se aproximar pelo efeito de uma solicitação externa (por exemplo, por uma tensão externa aplicada), as zonas de tração e de compressão estão em lados opostos das discordâncias. Esses campos de tensões que existem em torno de cada discordância individual tendem a se atrair mutuamente, e, dessa forma, aproximar essas duas discordâncias. Essa seria uma situação que facilitaria a mobilidade dessas duas discordâncias, facilitando também a deformação plástica local do material que as contém.

O caso analisado neste exercício - discordâncias em cunha no mesmo plano de deslizamento - é bastante simples. Na verdade, as situações reais são bem mais complexas, porque existem interações entre discordâncias em cunha, em hélice e mistas, movimentando-se nos mais diversos planos e orientações de deslizamento. As interações entre todas essas discordâncias, com todos os campos de tensões a elas associadas, são fundamentais para o desenvolvimento das propriedades mecânicas dos metais e de suas ligas.

Exercício 2

2a

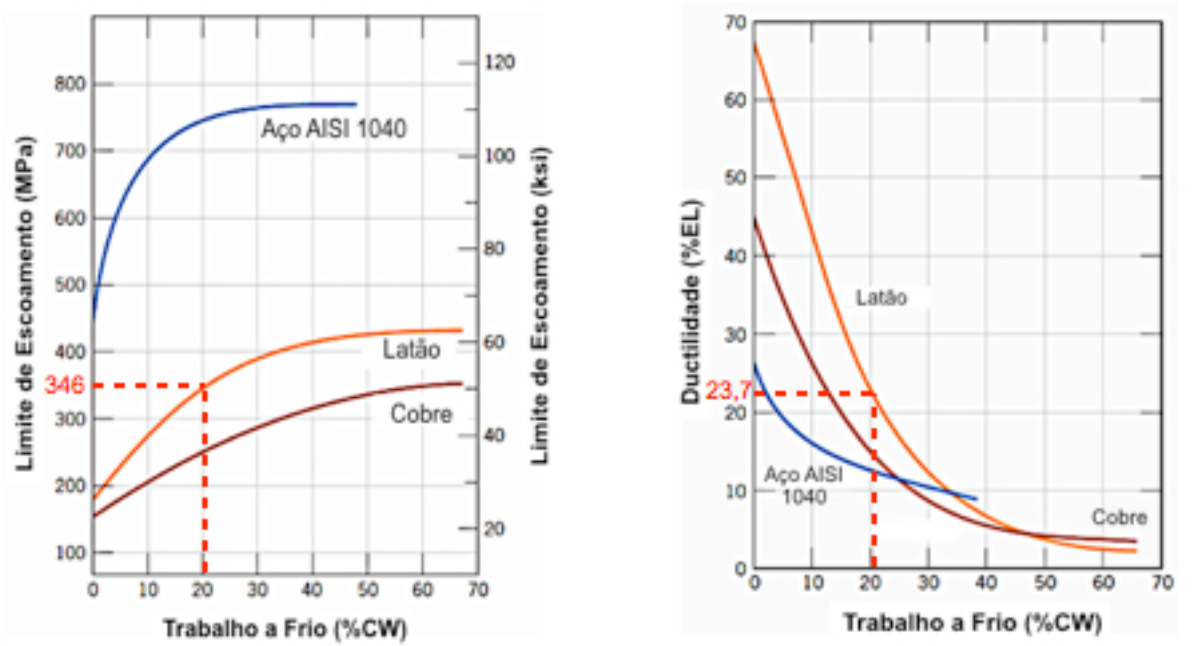
O grau de deformação, em %CW, pode ser calculado através da fórmula:

$$\% CW = [(A_0 - A_f) / A_0] \times 100$$

onde A_0 é a área da seção transversal antes da deformação a frio, e A_f é a área da seção transversal depois da deformação a frio.

Para as condições do exercício, $\% CW = 20,2$.

2b



Os valores estimados utilizando os gráficos são **Limite de Escoamento = 346 MPa** e **Ductilidade = 23,7 %**.

Exercício 3

O grau de deformação, em % de redução de área da seção transversal (%CW), pode ser calculado utilizando a relação:

$$\% CW = [(A_0 - A_f) / A_0] \times 100$$

onde A_0 é a área da seção transversal antes da deformação a frio, e A_f é a área da seção transversal depois da deformação a frio.

Para o corpo de seção transversal cilíndrica:

$$\%CW_{cil} = [(15,2^2 - 11,4^2) / 15,2^2] \times 100 = 43,8\%$$

Para o corpo de seção transversal retangular:

$$\%CW_{ret} = [(125 \times 175) - (75 \times 200) / (125 \times 175)] \times 100 = 31,4\%$$

Como $\%CW_{cil} > \%CW_{ret}$, espera-se que o corpo cilíndrico tenha sofrido maior aumento em seu limite de escoamento.

Exercício 4

4a

Considerando o gráfico e a relação de Hall- Petch,

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

concluimos que o parâmetro σ_0 corresponde ao ponto onde a reta intercepta o eixo das ordenadas. Portanto,

$$\sigma_0 = 25 \text{ MPa}$$

O parâmetro k_y , por sua vez, corresponde ao coeficiente angular da reta. Assim,

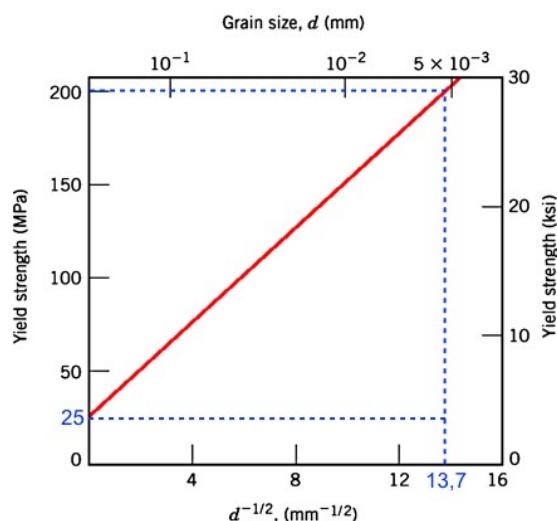
$$k_y = (200 - 25) / 13,7 \text{ ou } k_y = 12,8 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$$

4b

Substituindo os valores numéricos, dos parâmetros determinados no item 4a, na relação de Hall-Petch,

$$\sigma_y = 25 + 12,8 d^{-1/2}$$

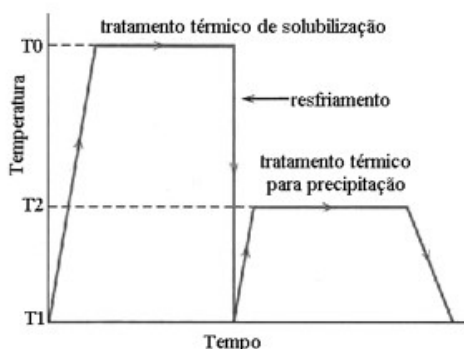
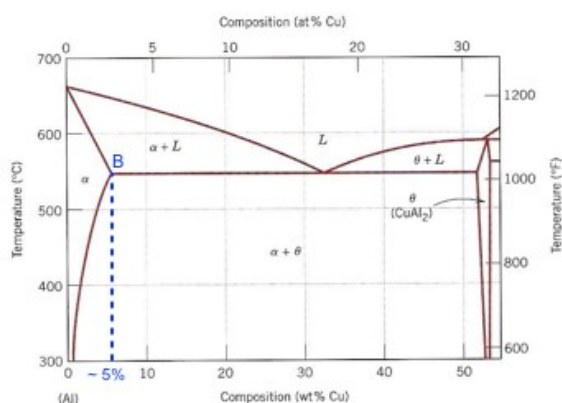
Portanto para $d = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mm}$, resulta $\sigma_y = 430 \text{ MPa}$.



Exercício 5

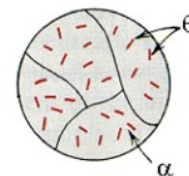
O endurecimento por precipitação é tanto mais efetivo quanto maior e mais homogênea for a densidade de precipitados e, também, quanto mais próximos forem os tamanhos dos precipitados aos dos precipitados coerentes. Note que, para a solução sólida α , no diagrama de fases do sistema Al-Cu, a maior concentração possível de cobre (soluto) no alumínio (solvente) está em torno de 5% (ponto B na figura).

No tratamento de endurecimento por precipitação, após a solubilização realizada a uma temperatura T_0 (na região



monofásica α), submete-se o corpo de prova, por meio de um resfriamento rápido, a uma temperatura T_1 suficientemente baixa (e necessariamente dentro da região bifásica $\alpha + \theta$) de modo a obtermos uma solução sólida supersaturada. Nessa solução sólida supersaturada, campos de tensão se estabelecem ao redor dos átomos de cobre, que se encontram homoganeamente distribuídos no alumínio. Quando o corpo de prova é levado a uma temperatura intermediária T_2 (também na região bifásica $\alpha + \theta$) para o tratamento de precipitação (ou envelhecimento), as regiões que estavam tensionadas ao redor dos átomos de cobre

na temperatura T_1 se tornam regiões potencialmente favoráveis para a nucleação heterogênea dos precipitados de CuAl_2 (fase θ) na matriz α . Dessa forma, o aumento da concentração de cobre na liga favorece a homogeneidade e o aumento da densidade de precipitados de CuAl_2 na matriz α , ou seja, favorece a obtenção de melhores resultados por meio do tratamento de endurecimento por precipitação.



Naturalmente, maiores teores de cobre também levam à formação de precipitados de maiores tamanhos. O teor de cobre, no entanto, não deve ultrapassar o limite máximo de solubilidade sólida, pois nesse caso não seria possível solubilizar completamente a liga e restariam precipitados grosseiros (excessivamente grandes), que afetariam de forma negativa as propriedades mecânicas da liga.

Concluimos, então, que a composição de liga Al-Cu com potencial para levar ao maior aumento do limite de escoamento da liga, como resultado de um processo de endurecimento por precipitação, seria de cerca de 5%.

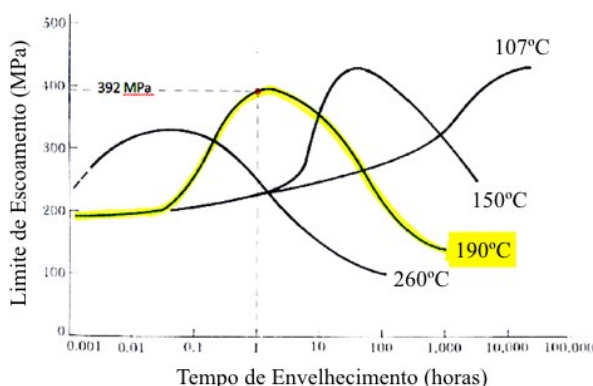
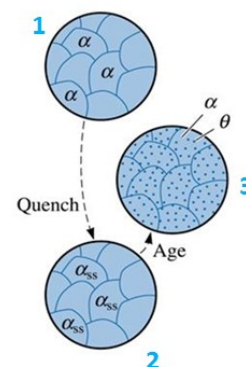
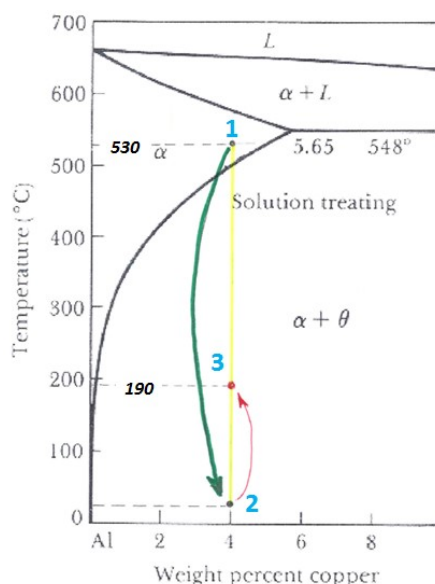
Exercício 6

O sistema Cu-Ni é isomorfo, ou seja, possui solubilidade sólida ilimitada. Portanto, a condição necessária para tratamentos de endurecimento por precipitação, que é a diminuição da solubilidade sólida com a diminuição da temperatura, não é obedecida por esse sistema, que não pode, então, ser endurecido por precipitação.

Exercício 7

Vamos começar analisando a situação a partir do diagrama de fases e das curvas de envelhecimento.

Você recebeu as peças com uma microestrutura que pode ser representada como na figura abaixo. No estado solubilizado (530°C , ponto 1 no diagrama de fases), o material apresenta apenas a fase α , estável. Quando o material é resfriado rapidamente de 530°C até a temperatura ambiente (“quench”, ponto 2), o sistema apresenta apenas a fase α , mas agora ela não está em equilíbrio – ela está supersaturada. O tratamento de precipitação (também chamado de envelhecimento), que deveria ser realizado (segundo o enunciado do problema) a 190°C (ponto 3) irá levar à precipitação da fase θ na forma de precipitados finamente dispersos na matriz



de α , como mostrado na figura.

Considerando agora as curvas de envelhecimento da liga Al-4%Cu, para a temperatura de envelhecimento de 190°C , com o tempo de envelhecimento de uma hora, teríamos um limite de escoamento de aproximadamente 392 MPa, o que atende às especificações necessárias.

Vamos agora examinar o que realmente aconteceu...

- O lote A, que deveria ter sido envelhecido por uma hora a 190°C, foi envelhecido por duas horas nessa mesma temperatura.

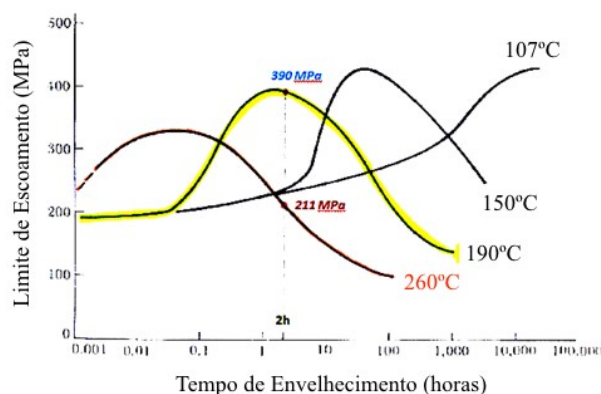
Vamos observar a curva de envelhecimento a 190°C. O limite de escoamento para o tratamento que efetivamente ocorreu é de aproximadamente 390 MPa, muito pouco diferente daquele que seria obtido com o tratamento de uma hora. O tempo maior de envelhecimento, nesse caso, não foi suficiente para levar a um crescimento excessivo dos precipitados da fase θ , ou seja, os precipitados ainda estão com tamanhos aceitáveis e são eficientes para dificultar/bloquear a movimentação das discordâncias e, portanto, sua existência leva a um considerável aumento do limite de escoamento.

CONCLUSÃO: o lote A pode ser aprovado, pois atende a especificação.

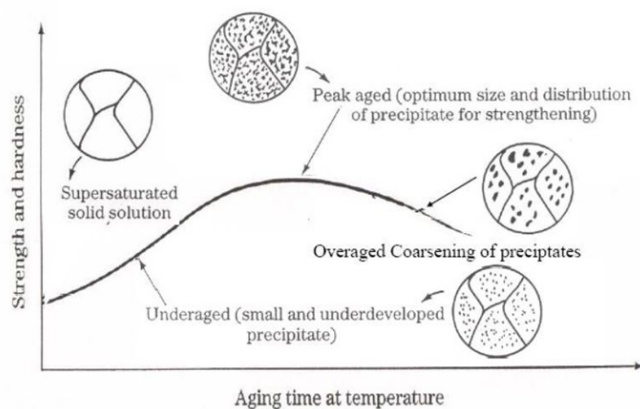
- O lote B, que deveria ter sido envelhecido por uma hora a 190°C, foi envelhecido por duas horas a 260°C.

Vamos observar a curva de envelhecimento a 260°C. Agora temos um problema, porque o limite de escoamento não atinge o especificado, ficando em torno de 210 MPa (quando o especificado é no mínimo de 300 MPa).

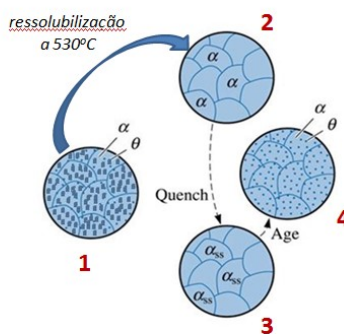
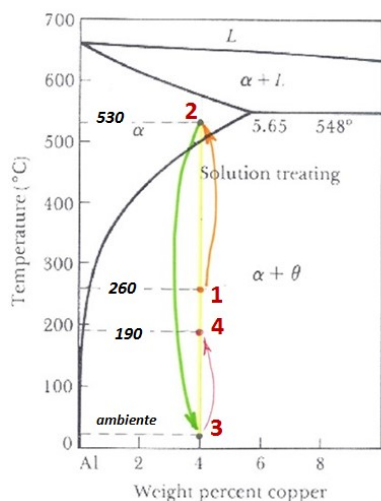
CONCLUSÃO: o lote B, na forma em que se apresenta ao final do tratamento térmico a 260°C por duas horas, não pode ser aprovado, pois não atende a especificação.



Strengthening Curve



O que aconteceu nesse tratamento térmico? Os cristais da fase θ cresceram demais, e a sua presença não tem efeito prático significativo no sentido de dificultar a movimentação de discordâncias e, conseqüentemente, de aumentar o limite de escoamento. A presença de precipitados grandes pode inclusive ter um efeito indesejável, diminuindo o limite de escoamento em relação ao valor observado para o material não tratado por endurecimento por precipitação (e esse é o caso do sistema que estamos analisando agora).



Existe um procedimento que permita utilizar esse lote de peças? Se existe, qual seria?

Uma solução para poder utilizar esse lote de peças passa por um tratamento térmico que levasse à *ressolubilização* da fase θ – isso envolve certamente um custo, mas evitaria a perda desse lote. Uma opção seria a de mandar de volta o lote ao fornecedor, pedindo que fizesse um novo tratamento de solubilização – por exemplo, à mesma temperatura na qual as peças foram originalmente

tratadas (530°C), seguido de resfriamento rápido à temperatura ambiente. Após esse tratamento, as peças voltariam a ter uma microestrutura constituída apenas pela fase α supersaturada. Dessa forma, elas poderiam ser novamente envelhecidas a 190°C pelo tempo correto de uma hora, atendendo a especificação.

Agora, analisando as alternativas propostas pelo problema, concluímos que o procedimento proposto na alternativa d) é o correto.

a) Não fazer nada com nenhum dos dois lotes, pois ambos, apesar do tratamento térmico feito por engano – o lote A foi aquecido por duas horas ao invés de uma hora, e o lote B foi tratado a 260°C ao invés de 190°C – continuam a atender a especificação.

Falso, o lote B não atende a especificação.

b) Não fazer nada com o lote B, pois ele atende a especificação; aquecer o lote A a 530°C por um tempo suficiente para solubilizar a fase θ precipitada; esfriar rapidamente até a temperatura ambiente e, a seguir, aquecer esse lote por uma hora a 190°C para precipitar a fase θ .

Falso, o lote B não atende a especificação.

c) Aquecer ambos os lotes a 530°C por um tempo suficiente para solubilizar a fase θ precipitada; esfriar lentamente até temperatura que permita a manipulação (algo em torno de 100°C) e, a seguir, aquecer ambos os lotes por uma hora a 190°C para precipitar a fase θ .

Falso. Não é necessário reaquecer os dois lotes para solubilizá-los. Além disso, o tratamento proposto para a sequência do aquecimento para a ressolubilização não é adequado, pois um esfriamento lento depois do aquecimento a 530°C já levaria à formação de cristais de θ muito grandes, inviabilizando qualquer tratamento de envelhecimento posterior.

d) Não fazer nada com o lote A, pois ele atende a especificação; aquecer o lote B a 530°C por um tempo suficiente para solubilizar a fase θ precipitada; esfriar rapidamente até a temperatura ambiente e, a seguir, aquecer esse lote por uma hora a 190°C para precipitar a fase θ .

e) Não é possível fazer nada com nenhum dos dois lotes – ambos estão perdidos.

Falso. O lote A pode ser aproveitado tal qual está, e o lote B pode ser recuperado.