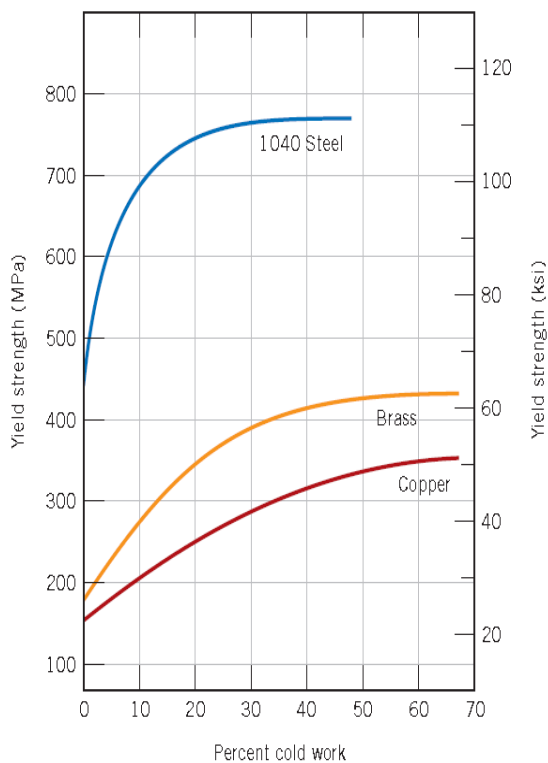


UNIDADE 10 Propriedades Mecânicas II

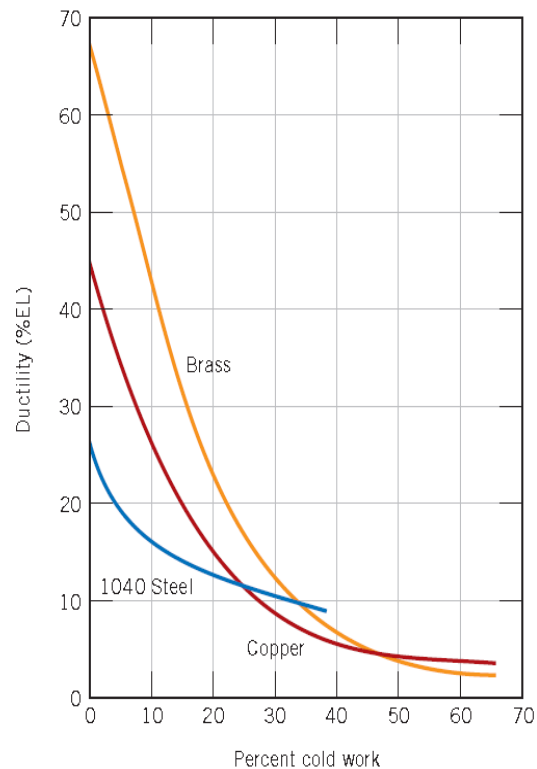
1. Considere duas discordâncias em cunha no mesmo plano de deslizamento e separadas por algumas distâncias interatômicas. O que pode ocorrer se devido a tensões aplicadas ao material essas discordâncias forem forçadas a se aproximar?

2. Considere as figuras dadas 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.

- Determine o grau de deformação, em % de redução de área (*percent cold work*).
- 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*) com o grau de deformação, em % de redução de área, %CW (*cold work*), para aço 1040, latão e cobre trabalhados a frio.

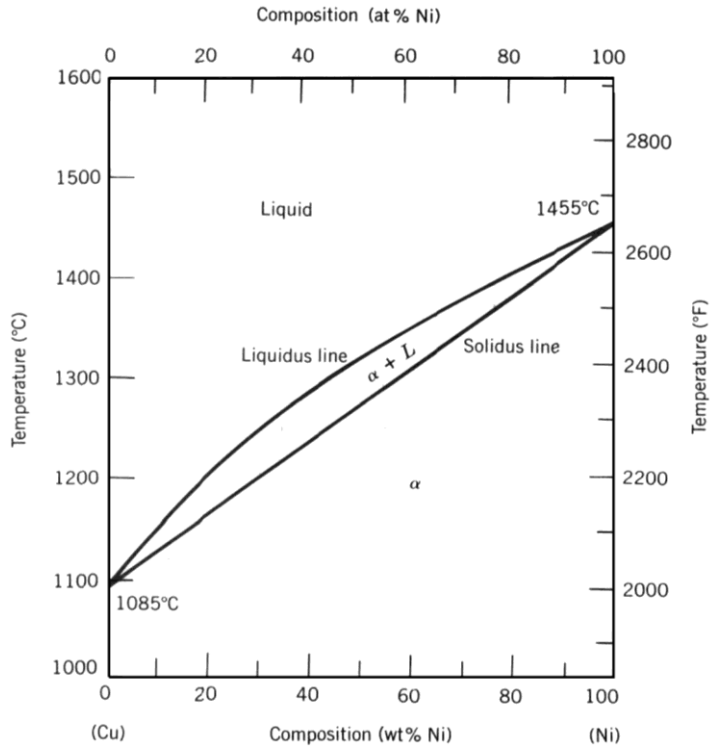


Varição da ductilidade (%EL) com o grau de deformação, em % de redução de área, %CW, para aço 1040, latão e cobre trabalhados a frio.

3. Considere o diagrama Cu-Ni dado ao lado.

É possível endurecer por precipitação uma liga Cu-10%Ni?

Justifique a sua resposta.

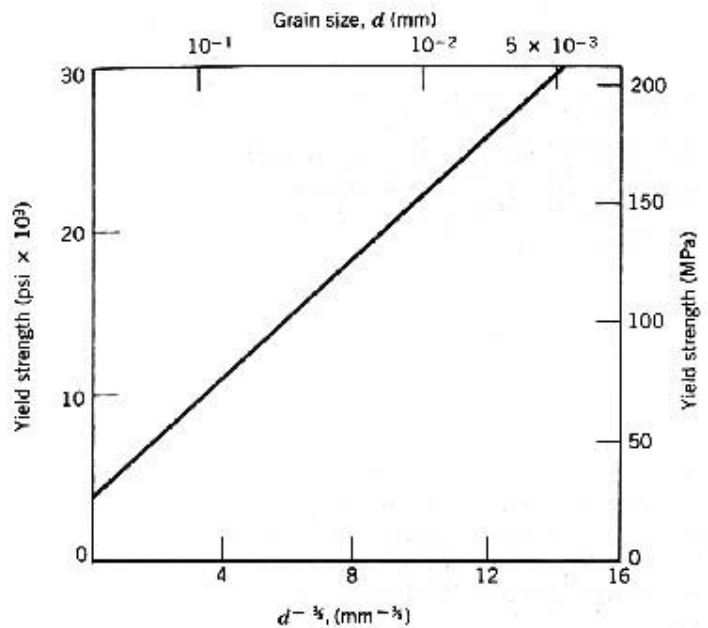


4. Considere a figura dada ao lado [limite de escoamento *yield strength*] x [inverso da raiz quadrada do diâmetro médio de grão $d^{-1/2}$], dada ao lado, válida para uma liga 70 Cu-30 Zn.

- (a) Determine os valores das constantes σ_0 e k_y da relação de Hall-Petch.
- (b) Utilizando a relação de Hall-Petch, calcule o limite de escoamento para essa liga quando o diâmetro médio de grão for igual a $1,0 \times 10^{-3}$ mm.

Dado: relação de Hall-Petch :

$$\sigma_y = \sigma_o + k_y d^{-\frac{1}{2}}$$



Limite de escoamento (“yield strength”) x (diâmetro médio de grão)^{-1/2} para uma liga 70 Cu-30 Zn

5. Dois corpos de prova cilíndricos, não deformados, de uma mesma liga devem ser encruados pela redução de suas áreas de seção transversal, mantendo seus perfis cilíndricos (e, portanto, mantendo suas seções transversais circulares). Para um dos corpos de prova, os raios inicial e final (após deformação) são, respectivamente, 16mm e 11mm. O segundo corpo de prova, que tem um raio inicial de 12mm, deve apresentar a mesma dureza após a deformação que o primeiro corpo de prova. Calcule o raio do segundo corpo de prova após a deformação.

6. Dois corpos de prova, não deformados, de uma mesma liga devem ser submetidos à deformação plástica 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. A dimensão original e aquela depois da deformação para os dois corpos são as seguintes:

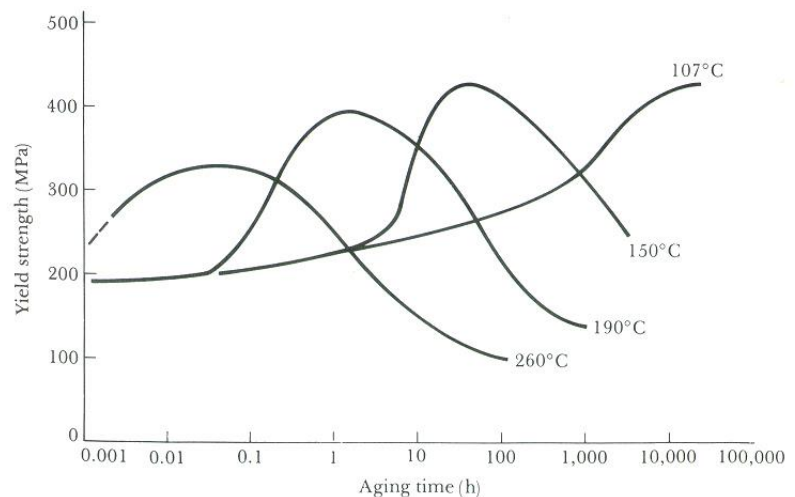
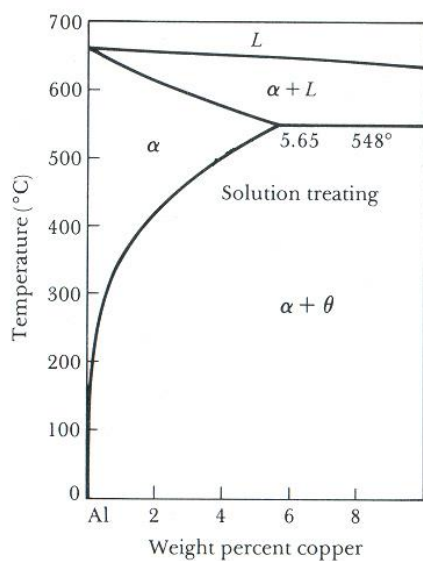
	Circular (raio, mm)	Retangular (mm X mm)
Dimensões originais	15,2	125 x 175
Dimensões após a deformação	11,4	75 x 200

Qual dos corpos de prova será o mais duro após a deformação plástica, e por quê?

7. Um corpo de prova cilíndrico de cobre, que foi trabalhado a frio, possui uma ductilidade (AL%) de 25%. Se o seu raio depois do trabalho a frio é de 10 mm, qual era o seu raio antes da deformação?

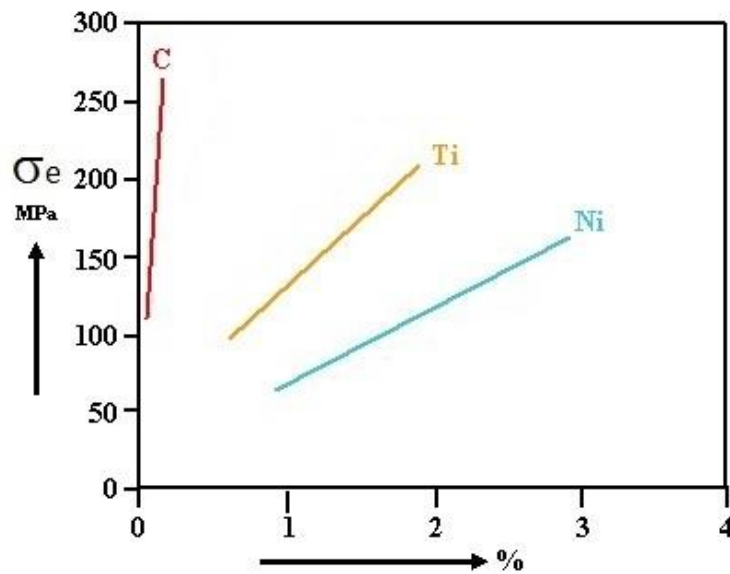
8. O limite de escoamento de uma amostra de metal com diâmetro médio de grão de 5×10^{-2} mm é de 135 MPa. O limite de escoamento desse mesmo metal com diâmetro médio de grão de 8×10^{-3} mm aumenta para 260 MPa. Para qual diâmetro médio de grão o limite de escoamento será de 205 MPa

9. 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 strenght*) 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 (1h), 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 ?



- 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.
- 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 .
- 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 .
- 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.

10. A figura ao lado apresenta a evolução do limite de escoamento (σ_e), determinado por ensaios de tração, para ligas de ferro com três elementos de liga (= solutos : C, Ti e Ni; o solvente da liga é o ferro), em função da porcentagem de cada um desses elementos. Explique esses resultados, levando em conta a tabela abaixo, que apresenta os raios atômicos dos quatro elementos (dados em picômetros = $10^{-12}m$).



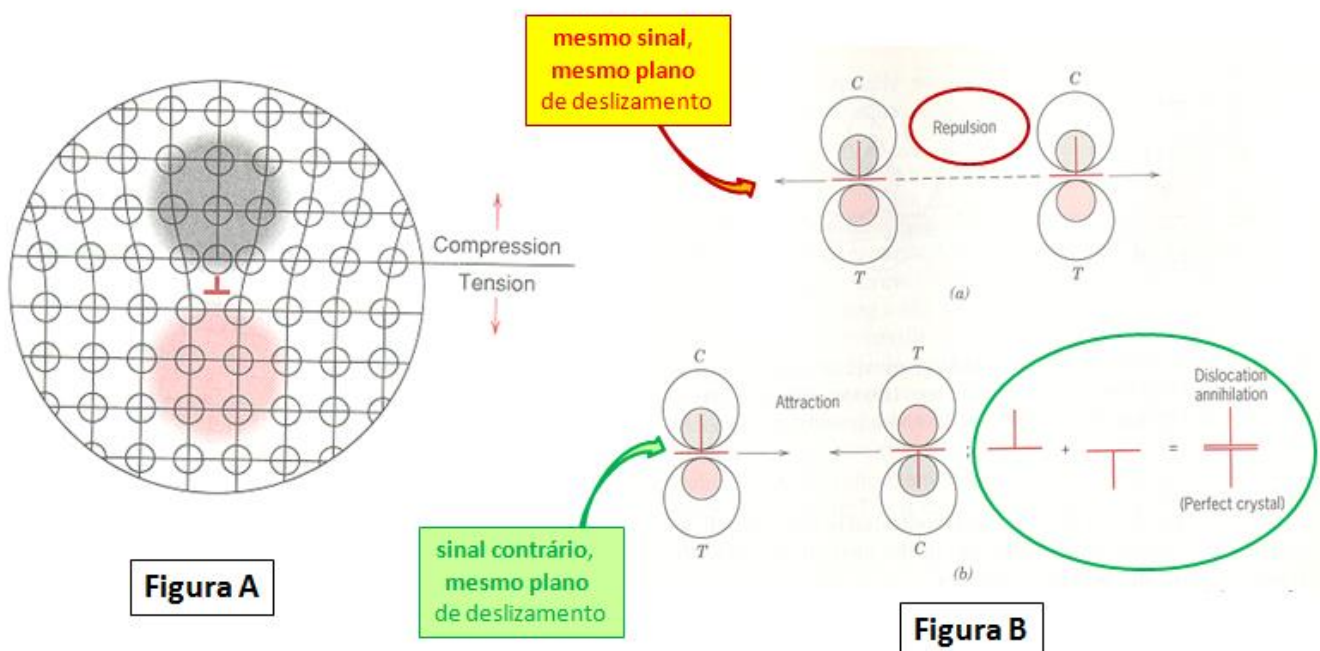
Elemento	Fe	C	Ti	Ni
Raio atômico calculado (pm)	156	67	176	149

GABARITO

UNIDADE 10 Propriedades Mecânicas II

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?

Foi visto na aula teórica que existem zonas ou campos de tensão em torno das discordâncias em cunha, e que essas tensões são de compressão em torno 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 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 exigência 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 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 exigência 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 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.

2. Considere as figuras dadas 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 (*percent cold work*).

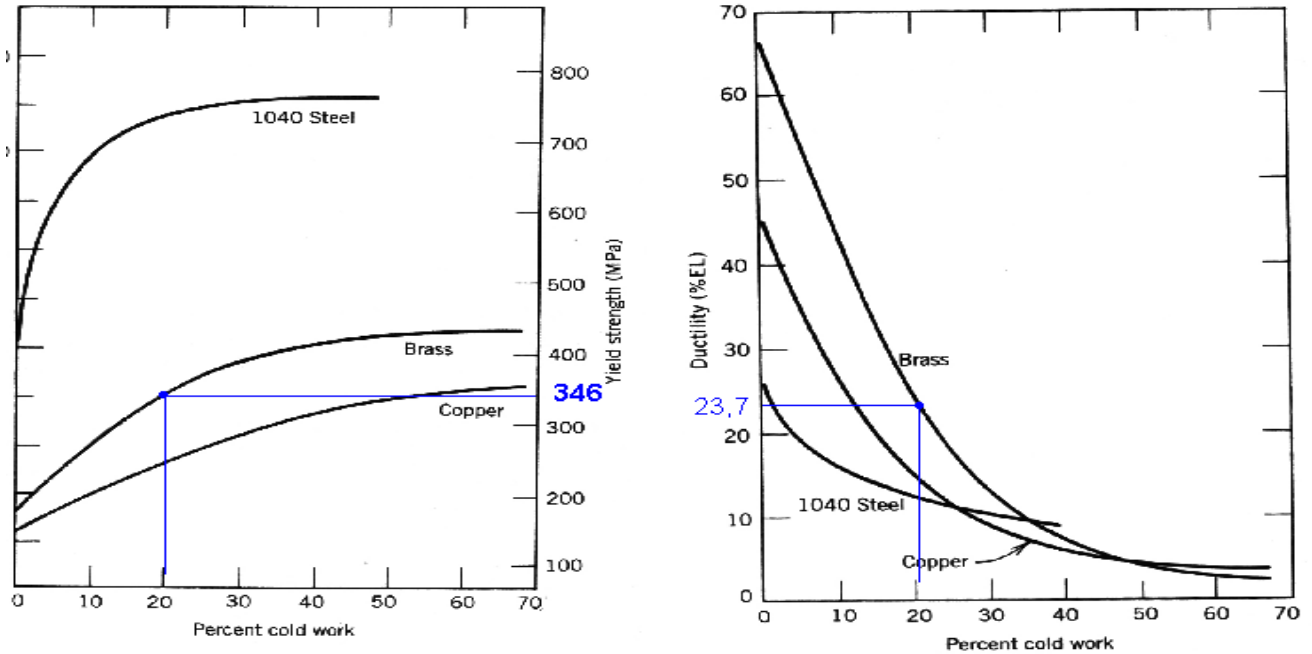
O grau de deformação, em % de redução de área, pode ser calculado através da fórmula:

$$\%CW = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$

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 %**.

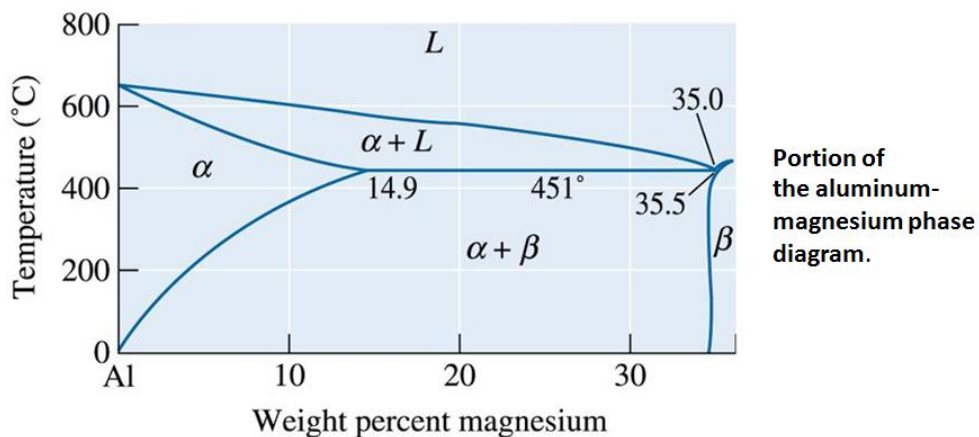
b) Estime, utilizando os gráficos, o limite de escoamento e a ductilidade dessa liga depois da deformação a frio.



Os valores estimados através das figuras são de $\sigma = 346 \text{ MPa}$ e $\%EL = 23,7 \%$.

3. Considere o diagrama Cu-Ni dado ao lado. É possível endurecer por precipitação uma liga Cu-10%Ni? Justifique a sua resposta.

Não, não é possível endurecer por precipitação uma liga Cu-10%Ni, porque **uma condição necessária para endurecimento por precipitação é que haja diminuição de solubilidade sólida com a diminuição de temperatura**. Um exemplo de um sistema onde isso ocorre é o Mg-Al, do qual uma parte do diagrama de fases é apresentada abaixo.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

Ora, o **sistema Cu-Ni** é um **sistema binário isomórfico**, onde o Ni e o Cu **formam soluções sólidas em todas as faixas de concentrações**. Portanto, no sistema Ni-Cu **não ocorre a diminuição de solubilidade sólida** requerida para que aconteça a precipitação de uma fase no interior da matriz metálica.

4. Considere a figura dada ao lado [limite de escoamento *yield strength*] x [inverso da raiz quadrada do diâmetro médio de grão $d^{-1/2}$], dada ao lado, válida para uma liga 70 Cu-30 Zn.

- (a) Determine os valores das constantes σ_0 e k_y da relação de Hall-Petch.
- (b) Utilizando a relação de Hall-Petch, calcule o limite de escoamento para essa liga quando o diâmetro médio de grão for igual a $1,0 \times 10^{-3}$ mm.

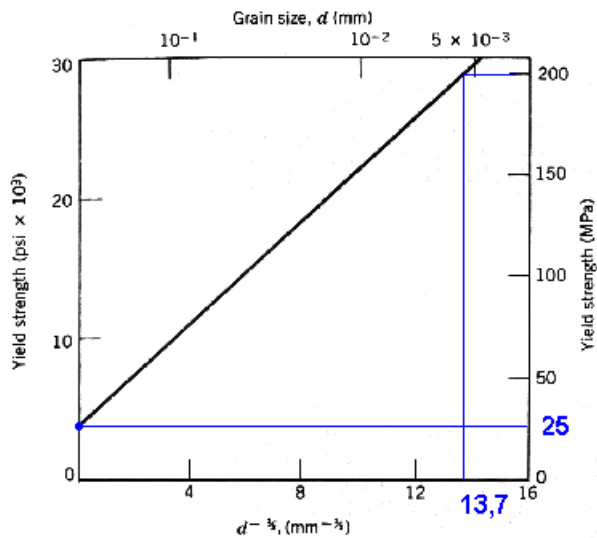
Dado: relação de Hall-Petch :
$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-\frac{1}{2}}$$

4a

A constante σ_0 vale 25 MPa, como mostra a figura.

A contante k_y é a inclinação da curva, e vale :

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



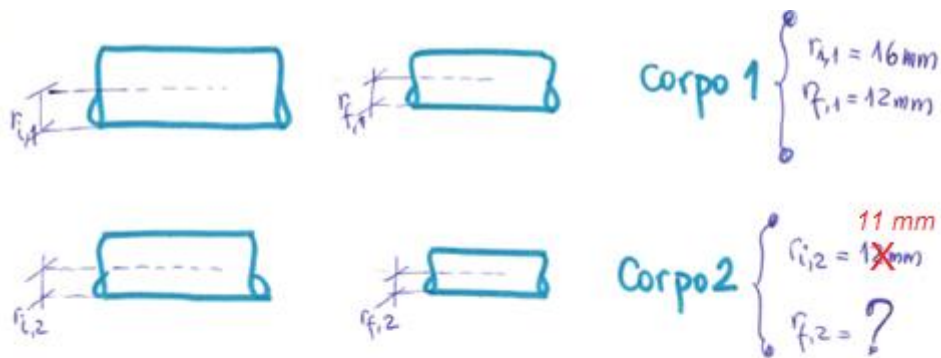
4b

Com as constantes calculadas no item 4a, a equação é a seguinte :

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

Dessa forma, para $d = 1,0 \times 10^{-3}$ mm, temos $\sigma = 430 \text{ MPa}$.

5. Dois corpos de prova cilíndricos, não deformados, de uma mesma liga devem ser encruados pela redução de suas áreas de seção transversal, mantendo seus perfis cilíndricos (e, portanto, mantendo suas seções transversais circulares). Para um dos corpos de prova, os raios inicial e final (após deformação) são, respectivamente, 16mm e 11mm. O segundo corpo de prova, que tem um raio inicial de 12mm, deve apresentar a mesma dureza após a deformação que o primeiro corpo de prova. Calcule o raio do segundo corpo de prova após a deformação.



⊗ Se os dois corpos são feitos do mesmo material, se forem submetidos ao mesmo "cold work" (deformação à frio) deverão ter a mesma dureza final.

⊗ Assim:

$$\text{Corpo 1 : } \% \text{ CW} = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$

$$= \left(\frac{\pi \cdot 16^2 - \pi \cdot 11^2}{\pi \cdot 16^2} \right) \times 100 = \underline{\underline{52,7\%}}$$

A_0 e A_f = áreas de seção

transversal!
= circulos

Corpo 2 :

$$\% \text{ CW} = 52,7 = \left(\frac{\pi \cdot 12^2 - \pi \cdot r_f^2}{\pi \cdot 12^2} \right) \times 100$$

$$144 \times 0,527 = 144 - r_f^2$$

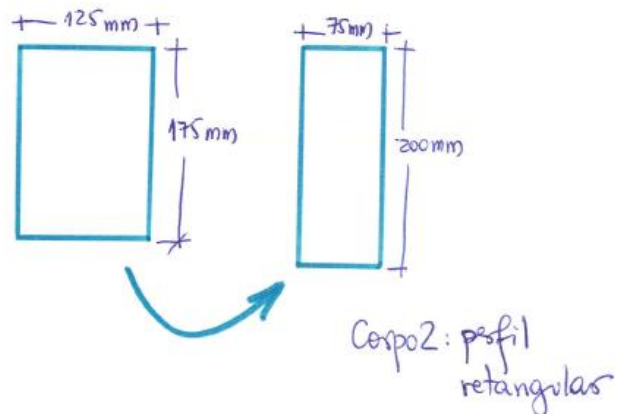
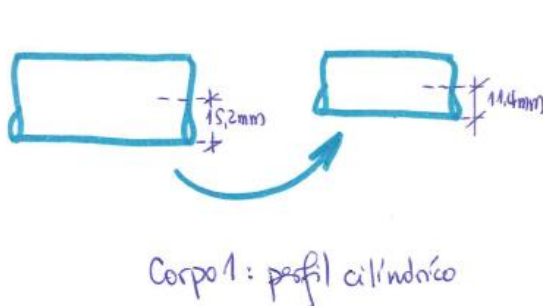
$$r_f^2 = 144 (1 - 0,527)$$

$$\therefore r_f = 8,25 \text{ mm}$$

6. Dois corpos de prova, não deformados, de uma mesma liga devem ser submetidos à deformação plástica 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. As dimensões original e depois da deformação dos dois corpos são as seguintes:

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

Qual dos corpos de prova será o mais duro após a deformação plástica, e por quê?



$$\textcircled{*} \% CW = \frac{\pi \cdot 15,2^2 - \pi \cdot 11,4^2}{\pi \cdot 15,2^2} \times 100$$

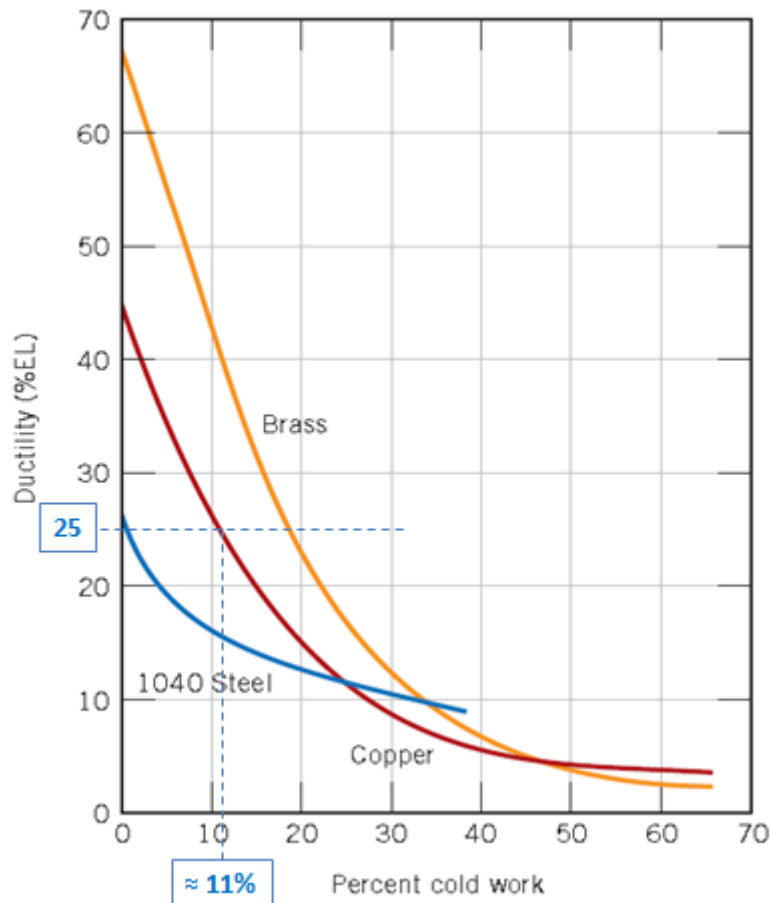
$$\textcircled{*} \% CW = \frac{(125 \times 175) - (75 \times 200)}{(125 \times 175)} \times 100$$

$$\therefore \% CW = 43,8\%$$

$$\therefore \% CW = 31,4\%$$

este será o mais duro, porque sofreu maior deformação plástica (\equiv maior valor de % CW)

7. Um corpo de prova cilíndrico de cobre, que foi trabalhado a frio, possui uma ductilidade (AL%) de 25%. Se o seu raio depois do trabalho a frio é de 10 mm, qual era o seu raio antes da deformação?



Utilizando o gráfico dado na questão 2 desta lista, sabendo que a % de alongamento é de 25%, chegamos a um valor da % de trabalho a frio (%CW) de **aproximadamente 11%**.

Chamaremos o raio antes da deformação de r_0 .

Dessa forma:

$$\%CW = 11 = \frac{\pi r_0^2 - \pi \times 10^2}{\pi r_0^2} \times 100$$

$$0,11 = \frac{r_0^2 - 100}{r_0^2}$$

$$r_0^2 = \frac{100}{0,89}$$

$$r_0 = 10,6 \text{ mm}$$

8. O limite de escoamento de uma amostra de metal com diâmetro médio de grão de 5×10^{-2} mm é de 135 MPa. O limite de escoamento desse mesmo metal com diâmetro médio de grão de 8×10^{-3} mm aumenta para 260 MPa. Para qual diâmetro médio de grão o limite de escoamento será de 205 MPa?

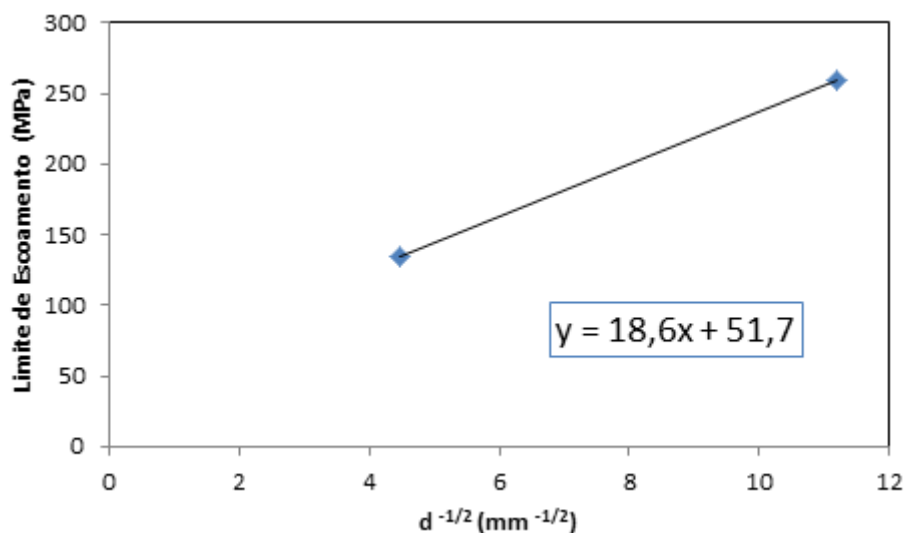
A resolução desse exercício faz uso da relação de Hall-Petch:

$$\sigma_e = \sigma_0 + k_e d^{-1/2}$$

onde σ_e é o limite de escoamento, σ_0 e k_e são constantes específicas para cada material e d é o diâmetro médio de grão.

Para a resolução do problema, a primeira etapa é fazer um gráfico de $d^{-1/2}$ versus limite de escoamento, para poder determinar os valores das constantes σ_0 e k_e .

d (mm)	0,05	0,008
$d^{-1/2}$ (mm ^{-1/2})	4,472	11,180
σ (MPa)	135	260



Os valores determinados para as constantes são os seguintes :

$$\sigma_0 = 51,7 \text{ e } k_e = 18,6 .$$

Dessa forma, utilizando a relação de Hall-Petch:

$$\sigma_e = 205 = 51,7 + 18,6 d^{-1/2}$$

$$205 - 51,7 = \frac{18,6}{\sqrt{d}}$$

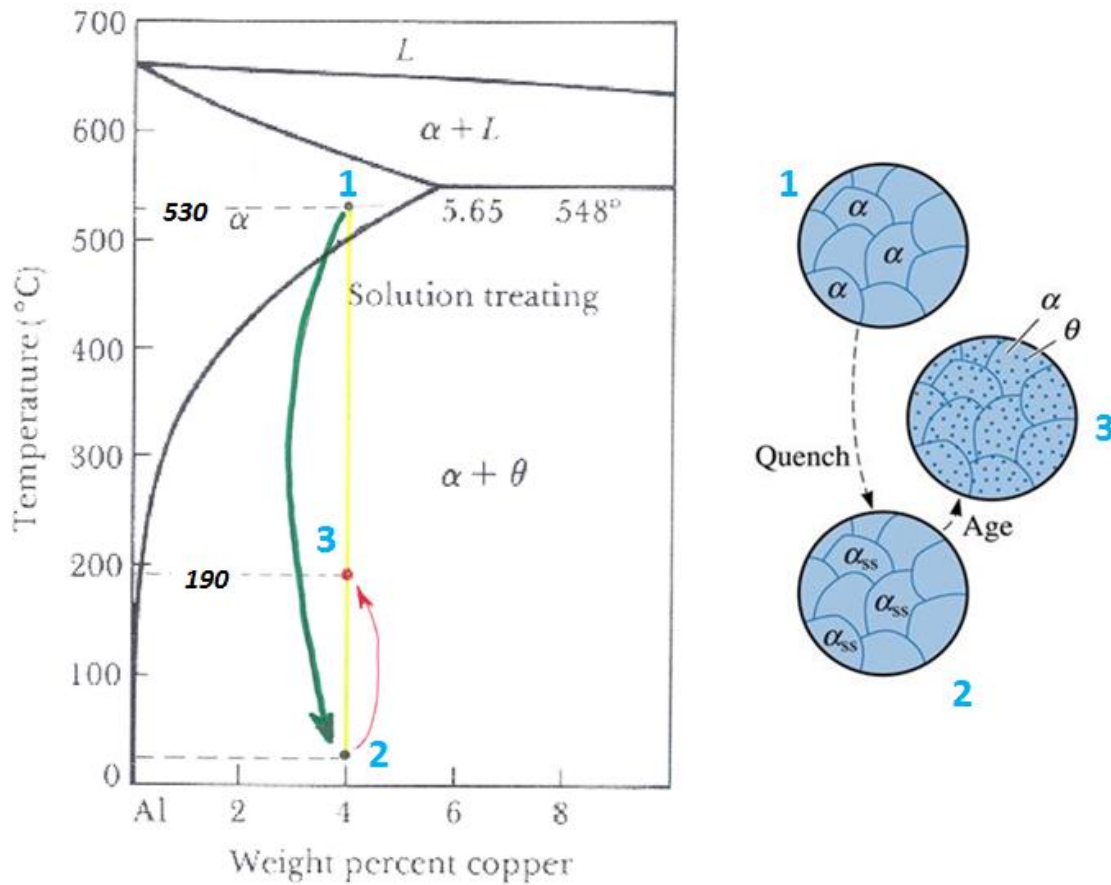
$$\sqrt{d} = \frac{18,6}{205 - 51,7} = 0,121$$

$$d = 1,47 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

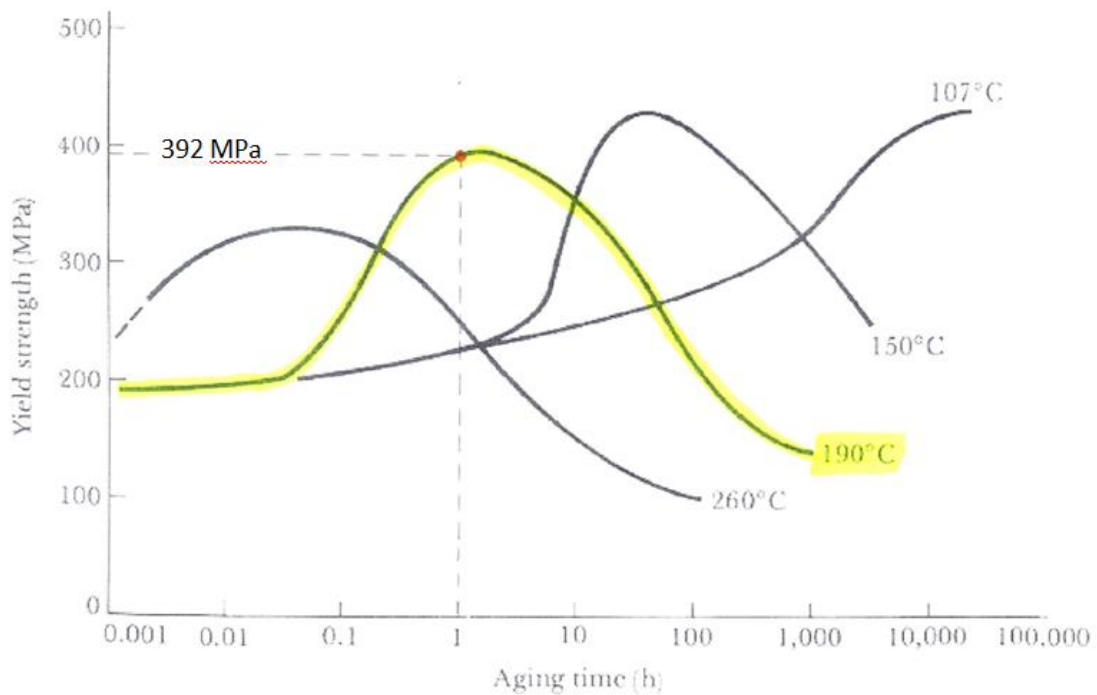
9. Você trabalha numa empresa que produz peças de uma liga de Al-4%Cu. Essas peças são recebidas de um fornecedor no estado solubilizado – ou seja, elas foram aquecidas por um tempo suficientemente longo a 530°C , de modo a apresentarem uma única fase (*veja o diagrama de fases dado a seguir*), sendo 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 strenght*) 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 (1h), 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 ?

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 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 1h, teríamos um limite de escoamento de aproximadamente 392 MPa, o que atende às especificações necessárias.

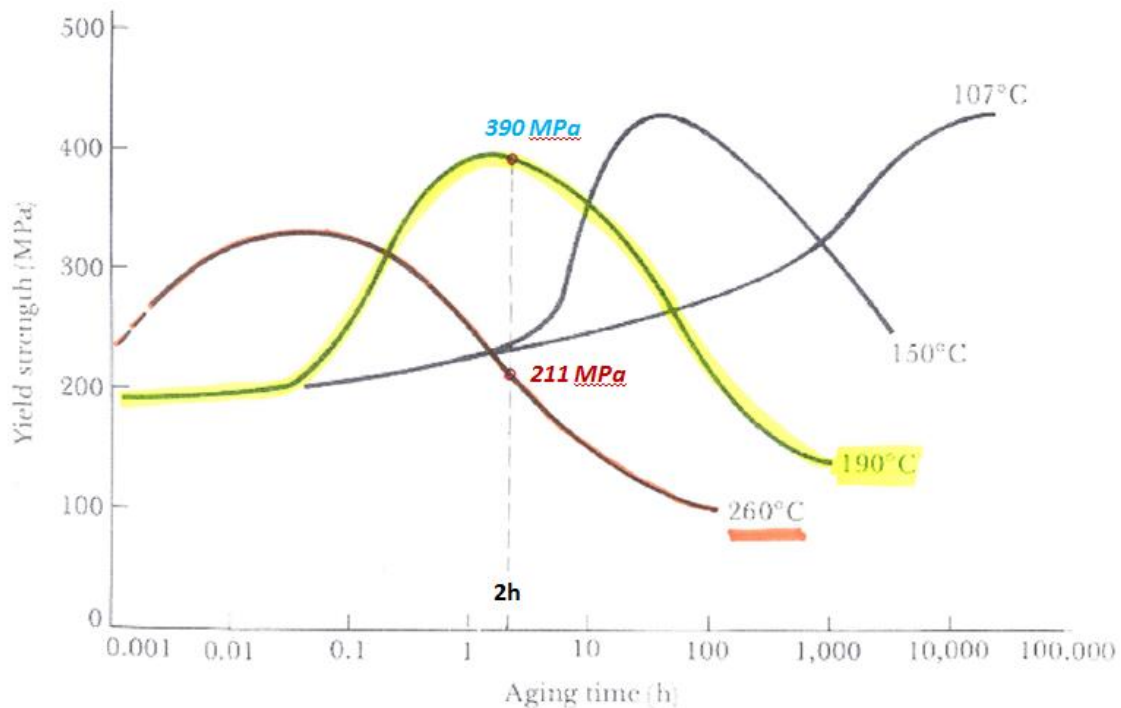


Vamos agora examinar o que realmente aconteceu...

- 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 1h. O tempo maior de envelhecimento, nesse caso, não foi suficiente para levar a um crescimento excessivo dos precipitados da fase θ → os precipitados ainda estão com tamanhos pequenos 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.



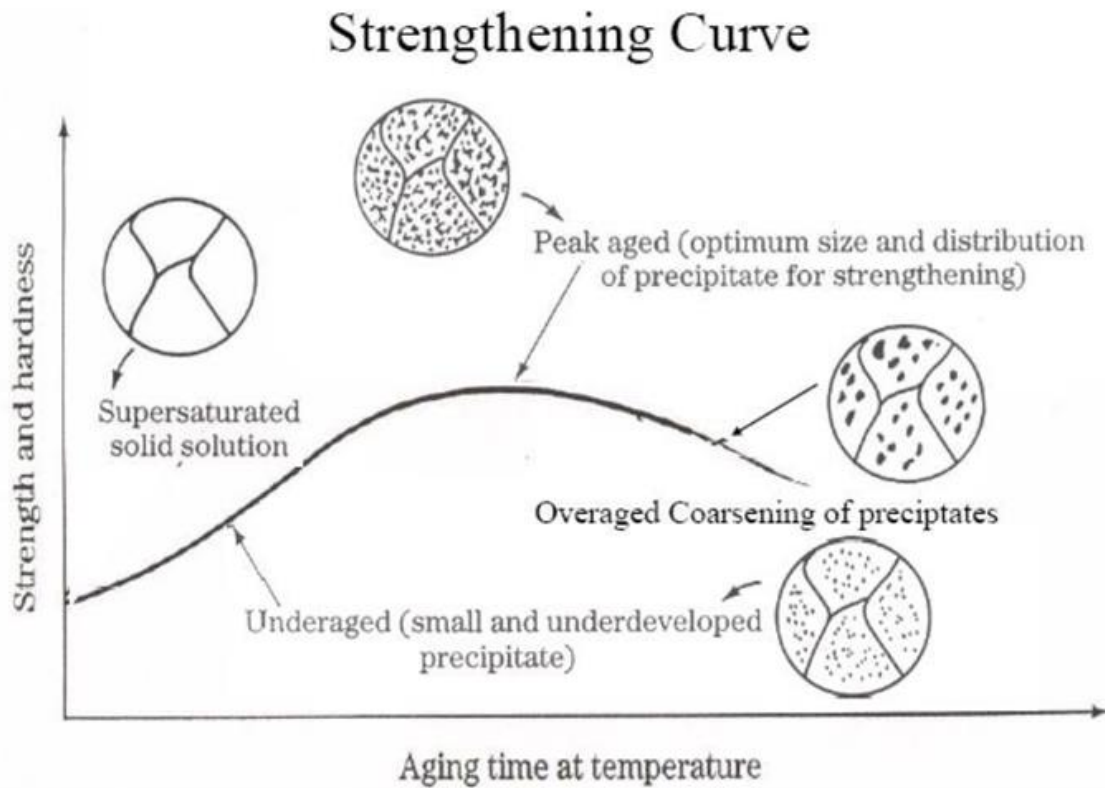
- O **lote B**, que deveria ter sido envelhecido por uma hora a **190°C**, foi envelhecido por **duas horas** a **260°C**.

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 2h, não pode ser aprovado, pois não atende a especificação.

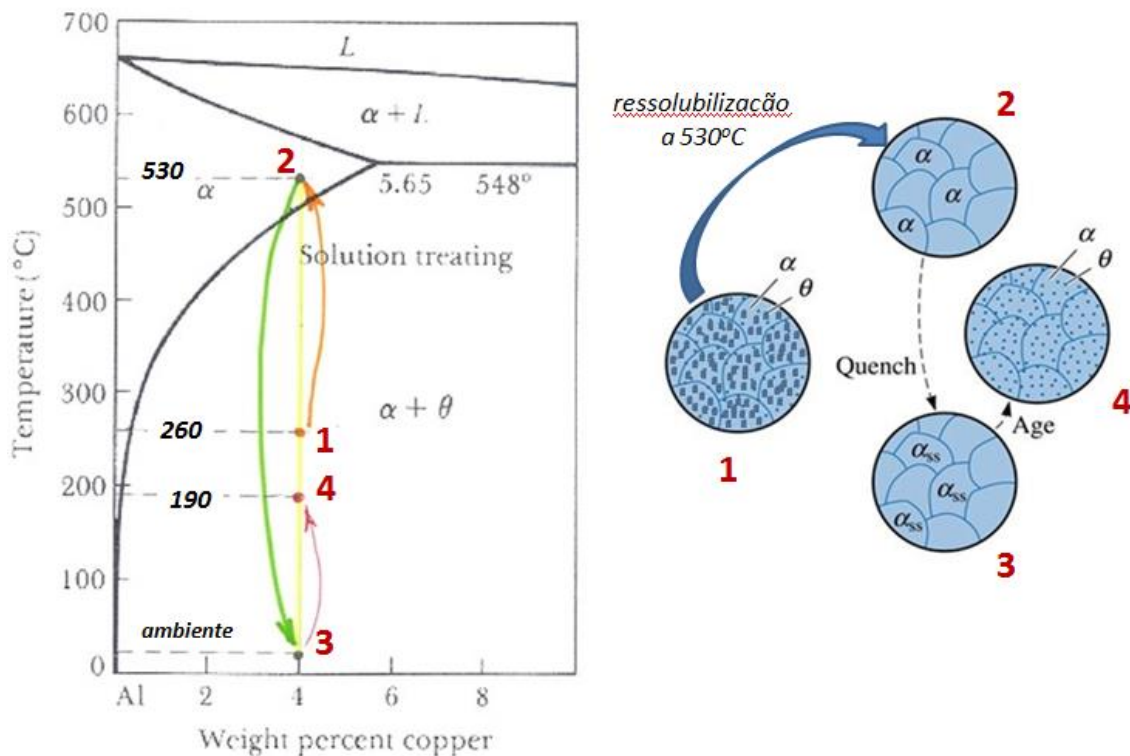
O que aconteceu nesse tratamento térmico? Os cristais da fase θ cresceram demais, e a sua presença não tem nenhum efeito prático no sentido de dificultar movimentação de discordâncias, e, conseqüentemente, de aumentar o limite de escoamento. A presença de cristais tão grandes pode inclusive ter um efeito indesejável, diminuindo o

limite de escoamento em relação ao valor observado para o material não envelhecido termicamente (...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?

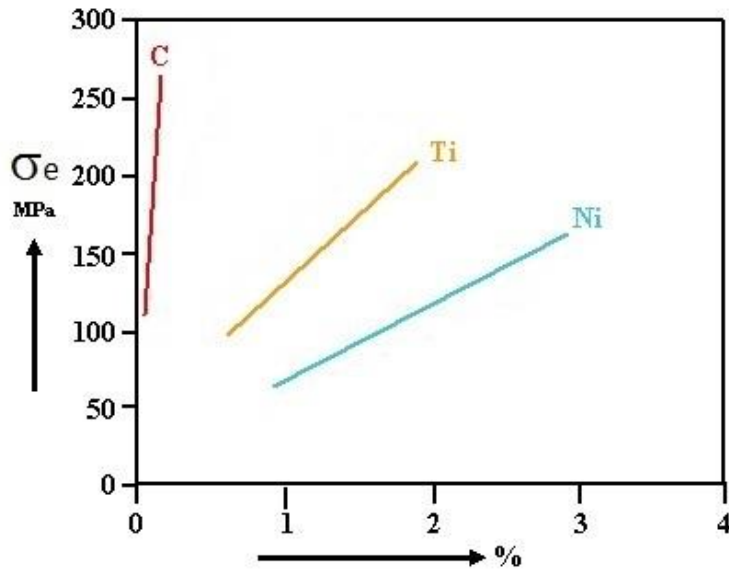
Uma solução para poder utilizar esse lote de peças passa por um tratamento térmico que leve à dissolução da fase θ – isso envolve certamente um custo, mas evitaria a perda desse lote. Uma opção seria a de mandar de volta o lote ao fornecedor, pedindo que fizesse um novo tratamento de solubilização – 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 por cristais de 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.

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

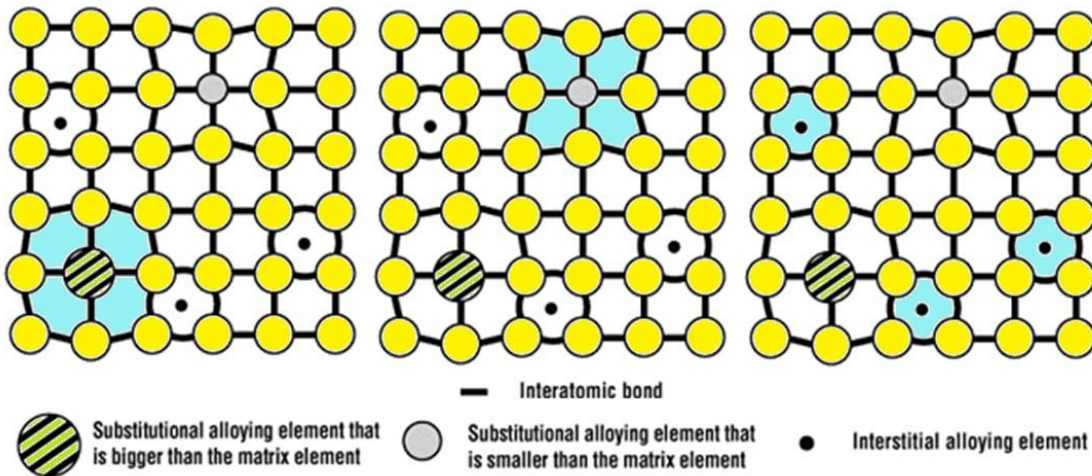
10. A figura ao lado apresenta a evolução do limite de escoamento (σ_e), determinado por ensaios de tração, para ligas de ferro com três elementos de liga (= solutos : C, Ti e Ni; o solvente da liga é o ferro), em função da porcentagem de cada um desses elementos. Explique esses resultados, levando em conta a tabela abaixo, que apresenta os raios atômicos dos quatro elementos (dados em picômetros = 10^{-12} m).

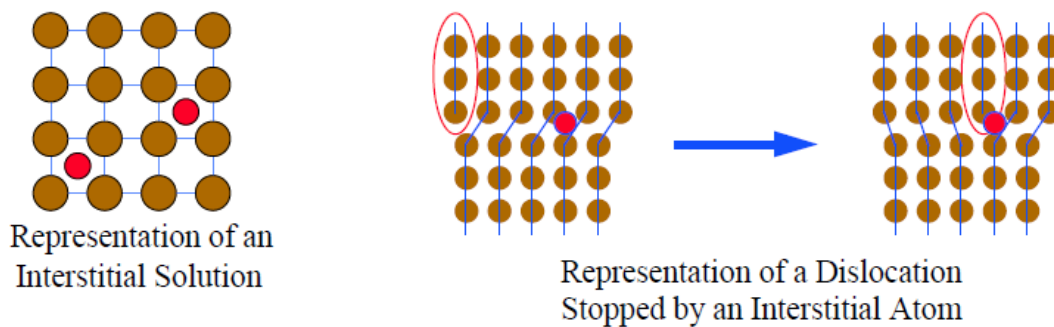
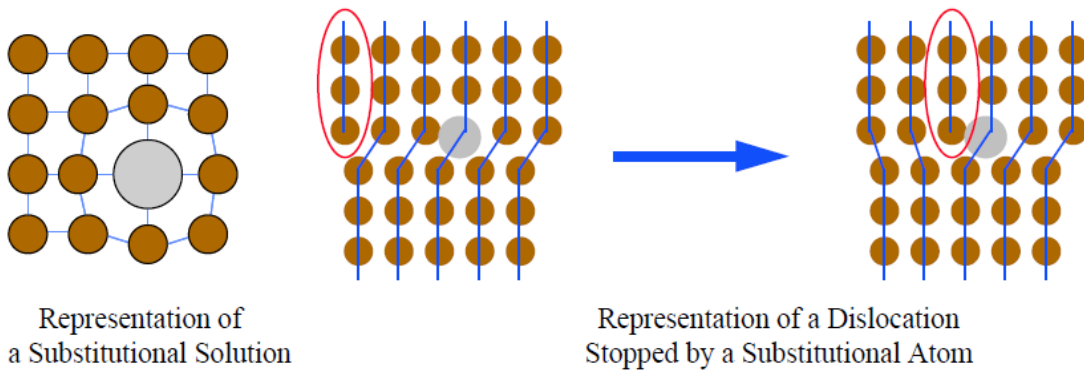


Elemento	Fe	C	Ti	Ni
Raio atômico calculado (pm)	156	67	176	149

A intensidade do endurecimento em soluções sólidas depende de dois fatores.

1. Uma grande diferença de tamanho entre os átomos do metal de base (solvente) e os átomos adicionados (soluto) aumenta o efeito do endurecimento. Uma grande diferença de tamanho cria distorções elásticas na estrutura cristalina (em azul na figura abaixo) e dificulta o movimento das discordâncias (ver figuras a seguir).





- 2 Quanto maior a quantidade de elementos de liga adicionados, aumenta o efeito do endurecimento, como pode ser visto na figura do enunciado do problema: uma liga Fe-1%Ni é mecanicamente menos resistente do que uma liga Fe-2%Ni. Entretanto, se o soluto for adicionado em excesso, o limite de solubilidade (caso exista um limite de solubilidade para a liga em questão) pode ser ultrapassado, havendo a precipitação de uma segunda fase – nesse caso, o endurecimento poderá ser conseguido por meio de um outro mecanismo, chamado endurecimento por precipitação ou endurecimento por dispersão.

No caso dos sistemas propostos no exercício, o raio atômico do Ni é um pouco menor do que o do Fe, e o raio atômico do Ti é um pouco maior do que o do Fe. Níquel e titânio entram na rede cristalina do ferro, portanto, como elementos de liga **SUBSTITUCIONAIS**. Como a diferença entre os raios é maior no caso do titânio, isso poderia explicar o seu maior efeito de endurecimento quando adicionado ao ferro.

O raio atômico do carbono é muito menor do que o do ferro → ele é um elemento de liga **INTERSTICIAL**. Como essa diferença entre os raios iônicos é muito grande, há uma distorção considerável na rede cristalina do ferro nos pontos onde o carbono se encontra, o que dificulta bastante a movimentação das discordâncias. Isso explicaria o grande efeito da adição de carbono no aumento da resistência mecânica do ferro.

EM RESUMO, se nenhum outro mecanismo de endurecimento estiver em jogo – ou seja, considerando apenas o efeito da solução sólida, pode-se dizer que:

- quando os raios atômicos dos elementos de liga forem **MAIORES** do que aquele do metal de base, a solução é **substitucional**, e quanto **maiores** forem os raios atômicos dos elementos de liga, **maior** será o seu efeito de endurecimento quando adicionados;
- quando os raios atômicos dos elementos de liga forem **menores** do que aquele do metal de base, a solução é **substitucional** se a diferença entre os raios atômicos não

*for muito grande, e a solução é **intersticial** se a diferença for significativa (por exemplo, acima de 10%). Nesse caso, quanto **menores** forem os raios atômicos dos elementos de liga, **maior** será o seu efeito de endurecimento quando adicionados.*