

ESTUDO DA RECRISTALIZAÇÃO DO LATÃO CuZn34 SOB CISALHAMENTO DIRETO E REVERSO¹

Patrícia Alves Silva de Resende Brum²

Elaine Carballo Siqueira Corrêa³

Maria Teresa Paulino Aguiar⁴

Wellington Lopes³

Resumo

O conhecimento do arranjo estrutural e a evolução deste parâmetro auxiliam o estudo de diferentes aspectos da caracterização de materiais metálicos, dentre os quais, a resistência mecânica e à corrosão além de fenômenos associados à transformação de fases. Neste caso, este trabalho apresenta o estudo da cinética de recristalização do latão CuZn34 (liga C26800) pré-deformado em cisalhamento direto de 0,25 (deformação efetiva) e tratado termicamente a 800 °C durante 20 minutos acompanhado por ciclos de cisalhamento cíclico com diferentes valores de deformação efetiva durante o cisalhamento direto (0,20 e 0,30) e reverso (0,45 e 0,55) e tratamentos térmicos (recozimento) conduzidos a 450 °C e a 650 °C durante o intervalo de tempo de 30 minutos. Após a conclusão dos processamentos mecânico e térmico, a fração de grãos recristalizados do latão CuZn34 foi identificada mediante a técnica de contagem por pontos. Os resultados indicaram que a fração de grãos recristalizados do latão CuZn34 foi sensível ao estado inicial do latão (recozido e encruado), à quantidade de deformação plástica em cisalhamento direto e reverso e à temperatura do último tratamento térmico.

Palavras-chave: Latão CuZn34; Recristalização; Cisalhamento.

STUDY OF THE BRASS RECRYSTALLIZATION CuZn34 UNDER DIRECT AND REVERSE SHEAR

Abstract

The knowledge of the structural arrangement and the evolution of this parameter aid the study of various aspects of the characterization of metallic materials, such as the mechanical strength, the corrosion and the phenomena associated to the transformation phases. Considering this case, this work presents the study of recrystallization kinetics of CuZn34 brass (C26800 alloy) prestrained in forward shearing up to 0.25 (effective strain) and heat treated at 800 °C for 20 minutes followed by cyclic shear cycles with different values of effective strain during forward (0.20 and 0.30) and reverse shearing (0.45 and 0.55) and heat treatments (annealing) conducted at 450 °C and 650 °C for a period of 30 minutes. After the conclusion of the mechanical and thermal processing, the fraction of recrystallized grains of brass CuZn34 was identified by the point counting technique. The results indicated that the fraction of recrystallized grains of brass CuZn34 was sensitive to the initial state of the brass (annealed and pre worked), to the amount of plastic deformation in forward and reverse shearing and to the temperature of the final heat treatment (annealing).

Key words: CuZn34 brass; Recrystallization; Shearing.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Aluna de Graduação, CEFET-MG, Engenharia de Materiais, patricia.asrb@gmail.com*

³ *Professor, CEFET-MG, Departamento de Engenharia de Materiais*

⁴ *Professora, UFMG, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção*

1 INTRODUÇÃO

O entendimento do arranjo microestrutural e da sua correlação com o processo, propriedades e o comportamento solicitado do material, é comumente aplicado na inovação da ciência dos materiais. Esses aspectos contribuem para a caracterização de materiais metálicos, como a resistência mecânica que pode estar relacionada ao mecanismo de transformação de fases.

As transformações de fase, conseqüentemente acompanhadas de uma mudança na microestrutura atômica e na textura cristalográfica, podem ser afetadas por processamentos térmicos e mecânicos justificada pela deformação plástica oriunda da aplicação de determinado valor de tensão ou por variação de temperatura.⁽¹⁾ A deformação plástica de um material metálico gera em um aumento de em sua energia livre. A elevação da temperatura a um determinado valor limite pode conduzir à recuperação e recristalização.⁽²⁾

O latão, sendo uma liga metálica de cobre e zinco, possui grãos cujo tamanho médio varia em uma faixa de 10 μm a 1 mm de acordo com a condição inicial do mesmo. Materiais que passaram por algum processamento mecânico apresentam tamanhos de grão em uma faixa mais estreita: de 10 a 100 μm . Cada grão em um agregado policristalino tem orientação cristalográfica diferente da apresentada pelos grãos adjacentes, ou seja, os planos e as direções cristalinas possuem orientação espacial que vão sofrer variações de grão para grão.⁽³⁾

Por ser uma das etapas características dos tratamentos termofísicos, após o material sofrer a recristalização, ficará isento do excesso de defeitos gerados em um eventual processamento anterior, apresentando uma microestrutura típica da temperatura em que o fenômeno é analisado. As alterações microestruturais que ocorrem durante o tratamento térmico de um metal trabalhado a frio podem promover um decaimento da energia armazenada devido à deformação plástica, além de poderem ocorrer de forma dispersa e em momentos não sincronizados. A justificativa para esse aspecto está na distribuição heterogênea dos defeitos cristalinos após a deformação.⁽⁴⁾

A cinética de recristalização irá relacionar a taxa de nucleação com o tempo, sendo dependente também da temperatura. Esta etapa do recozimento é normalmente observada e medida por microscopia eletrônica de transmissão óptica e ensaios de dispersão de difração de elétrons retroespalhados (EBSD - *Electron Back-Scattered Diffraction*).⁽⁵⁾ A técnica do EBSD se adequa melhor à análise da microestrutura, quando relacionada à avaliação de um grão particular ou de um pequeno grupo de grãos, e à mesoestrutura quando relacionada à orientação e contornos de grãos.⁽¹⁾ No caso deste trabalho, a fração de grãos recristalizados foi calculada por meio da contagem dos pontos adaptada da norma ASTM E562.⁽⁶⁾

Neste artigo, será analisado o estudo da cinética de recristalização do latão CuZn34 (liga C26800) em que foi realizada uma pré-deformação efetiva em cisalhamento direto de 0,25 e tratado termicamente a 800°C durante 20 minutos. Em seguida, os corpos de prova obtidos do material inicial passaram por ciclos de ensaios mecânicos de deformação de cisalhamento e tratamentos térmicos de recozimento com posterior resfriamento realizado com as amostras a temperatura ambiente.

Considerando isso, o objetivo deste trabalho é estudar a influência dos procedimentos de deformação na recristalização de corpos de prova de latão CuZn34 em uma seqüência de carregamento monotônico e testes de cisalhamento Bauschinger (direto e reverso).

2 MATERIAL e MÉTODOS

2.1 Material

Neste trabalho foram utilizadas amostras de latão CuZn34 (latão amarelo, liga C26800), no estado como recebido (pré-encruado por laminação a frio) e recozido. A composição química (porcentagem em peso, %) inclui: 65,75 Cu, 34,19 Zn, 0,01Pb e 0,025 Fe. A granulometria inicial deste material foi 19,79 μm no estado como recebido e 135,41 μm no estado recozido.

As amostras usadas para os ensaios de cisalhamento possuíam espessura de 0,5 mm, comprimento de 50 mm, largura total de 15 mm e a largura eficaz (cisalhada) de 3,5 mm.

Os corpos de prova foram submetidos a uma sequência de carregamento mecânico envolvendo os esforços de cisalhamento e condições diferentes de tratamentos térmicos de recozimento a fim de promover a recristalização dos mesmos.

2.2 Ensaio de Cisalhamento e Recozimento

Os ensaios de cisalhamento foram conduzidos com uso de um dispositivo montado à máquina de ensaios universais Instron 5582, utilizando-se extensômetro mecânico (do tipo agulhas) para acompanhar a evolução da deformação cisalhante.

Para identificar a relação entre a deformação, γ , e a tensão, τ , cisalhantes e a deformação efetiva, $\varepsilon_{\text{efet}}$, e a tensão efetiva, σ_{efet} , foi feita a comparação entre os carregamentos de tração e de cisalhamento de modo a registrar as relações expostas nas equações (1) e (2) para o cálculo da deformação e da tensão efetivas, respectivamente:

$$\varepsilon_{\text{efet}} = \gamma / 1,84 \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{efet}} = 1,84 \cdot \tau \quad (2)$$

Todas as amostras foram pré-deformadas em cisalhamento direto de 0,25 de deformação efetiva. Em seguida, fez-se o tratamento térmico de recozimento a 800°C durante 20 minutos. Posteriormente, foi feito o estudo da influência da quantidade de deformação cisalhante direta e reversa, além da temperatura adotada para a execução do tratamento térmico final nas amostras deformadas em cisalhamento.

Deste modo foram escolhidos dois valores de deformação efetiva para o cisalhamento direto: 0,20 e 0,30 e reverso: 0,45 e 0,55, enquanto a temperatura do último tratamento térmico de recozimento variou de 450°C a 650°C, sendo o tempo de encharque constante e igual a 30 minutos.

2.3 Preparação Micrográfica

A análise micrográfica do latão CuZn34 para investigar a fração de grãos recristalizados em função dos diferentes estágios de processamento termomecânico aplicados ao material foi feita de modo convencional compreendendo o lixamento e o polimento mecânicos acompanhados por ataque da superfície das amostras utilizando o reativo químico Dicobre⁽⁷⁾ (65 mL de ácido sulfúrico concentrado, 16 g de dicromato de potássio, 3 g de cloreto de sódio, 800 mL de água destilada,

adicionando o ácido à água lentamente, aguardando o resfriamento do mesmo para só então adicionar os sólidos).

2.4 Método da Contagem dos Pontos

A identificação da fração recristalizada do latão CuZn34 foi feita a partir das fotomicrografias obtidas na caracterização microestrutural com uso do software comercial *Image ProPlus 6.0* e da norma ASTM E562⁽⁶⁾ sobre o método de contagem por pontos. Neste caso, foi utilizada uma malha quadrada elaborada utilizando o software comercial *Corel DRAW X6* (interface do software vista na Figura 1) composta por 10 colunas e 30 linhas, totalizando 300 pontos.

A fração recristalizada foi identificada mediante o cálculo da razão entre o número de pontos que interceptaram a região de grãos recristalizados para o total de pontos. Desta forma tem-se que, equação (3):

$$f = P_{\text{interceptados}} / P_{\text{total}} \quad (3)$$

Neste caso, f é a fração recristalizada, $P_{\text{interceptados}}$ é a quantidade de pontos que interceptou os grãos recristalizados e P_{total} é a quantidade total de pontos, ou seja, 300 pontos.

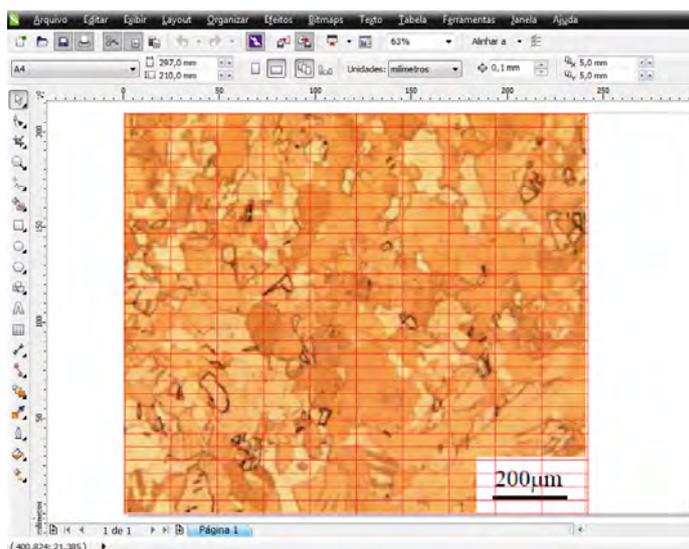


Figura 1. Interface do software *Corel DRAW X6* (imagem da Amostra 7 com a malha 10X30 para o cálculo da fração recristalizada por meio da contagem dos pontos).

3. RESULTADOS

3.1 Cisalhamento Direto Versus Recristalização

Considerando como condição inicial as amostras cisalhadas de modo direto até 0,25 de deformação efetiva acompanhada por recozimento a 800°C durante 20 minutos fez-se uso de dois valores de deformação efetiva para o cisalhamento direto, X igual a 0,20 e 0,30, sendo a temperatura do tratamento térmico de 450°C e o tempo de encharque de 30 minutos para as amostras no estado inicial como recebido (pré-encruado) e recozido. A Figura 2 exibe a evolução da fração de grãos recristalizados para os dois estados iniciais do latão CuZn34 em função da

quantidade de deformação efetiva do cisalhamento direto de acordo, X , com a rota 0,25/800°C 20min/ X /-0,45/450°C 30min.

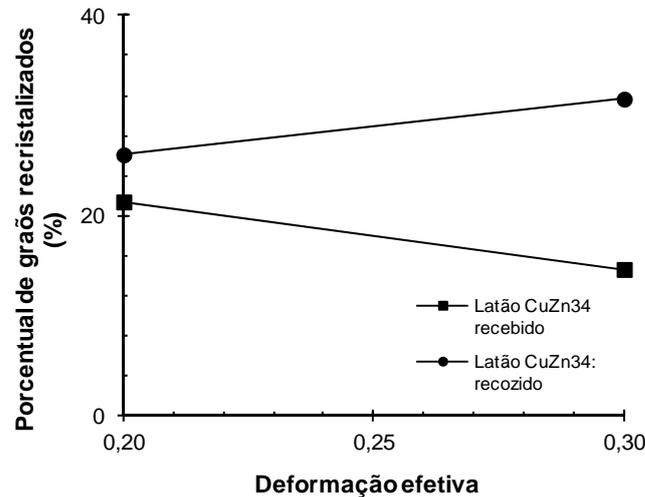


Figura 2. Evolução do porcentual de grãos recristalizados do latão CuZn34 nos estados inicial como recebido e recozido em função da quantidade de deformação efetiva do cisalhamento direto, $X = 0,20$ e $0,30$, da rota 0,25/800°C 20min/ X /-0,45/450°C 30min.

As respectivas fotomicrografias do latão no estado como recebido e recozido são apresentadas nas Figuras 3 e 4, respectivamente, de acordo com o acréscimo da quantidade de deformação em cisalhamento direto, X , da rota 0,25/800°C 20min/ X /-0,45/450°C 30min.

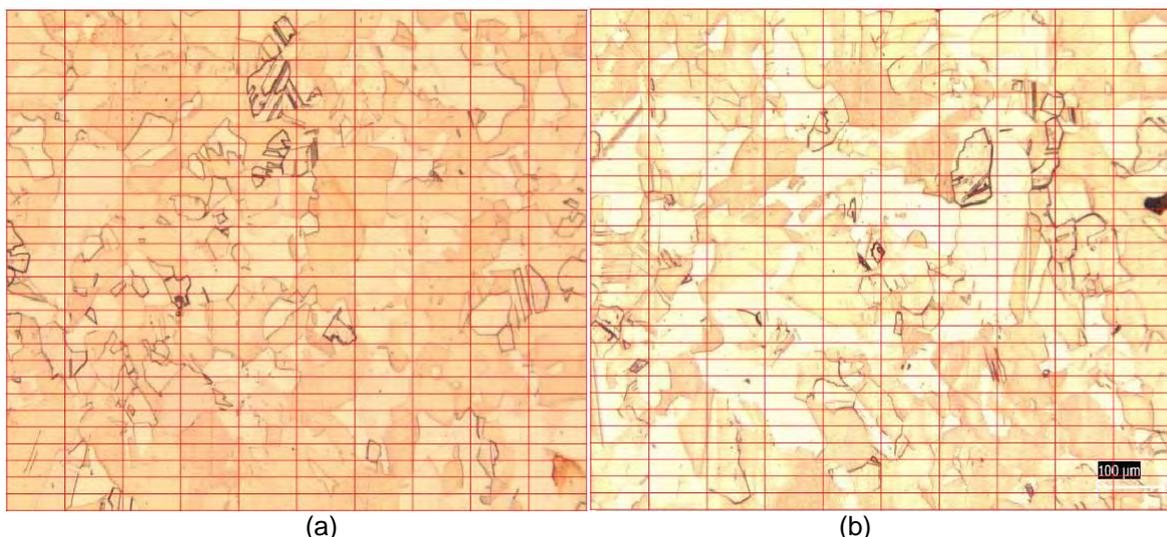


Figura 3. Fotomicrografias do latão CuZn no estado como recebido sob as rotas de carregamento: a) 0,25/800°C 20min/0,20/-0,45/450°C 30min e b) 0,25/800°C 20min/0,30/-0,45/450°C 30min.

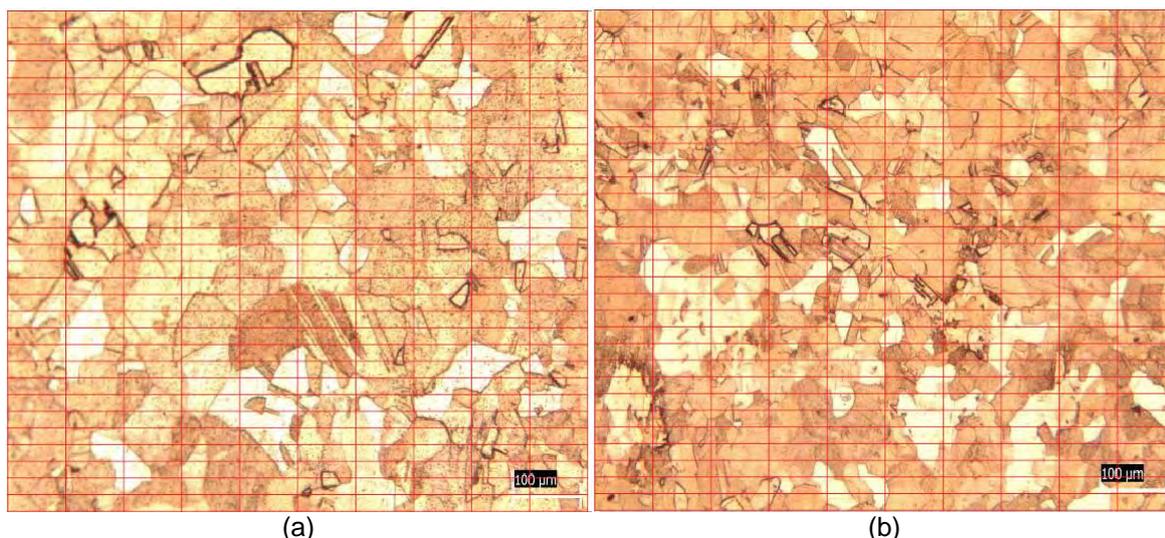


Figura 4. Fotomicrografias do latão CuZn no estado recozido sob as rotas de carregamento: a) 0,25/800°C 20min/0,20/-0,45/450°C 30min e b) 0,25/800°C 20min/0,30/-0,45/450°C 30min.

3.2 Cisalhamento Reverso Versus Recristalização

De modo análogo, ou seja, para a mesma condição inicial, 0,25/800°C 20min, fez-se agora o estudo do efeito da quantidade de deformação efetiva durante o cisalhamento reverso da rota 0,25/800°C 20min/0,30/Y/450°C 30min, sendo Y igual a -0,45 e -0,55. Deste modo, a Figura 5 exibe o gráfico com a evolução do percentual de grãos recristalizados do latão CuZn34 para os dois valores de deformação efetiva em cisalhamento (em módulo).

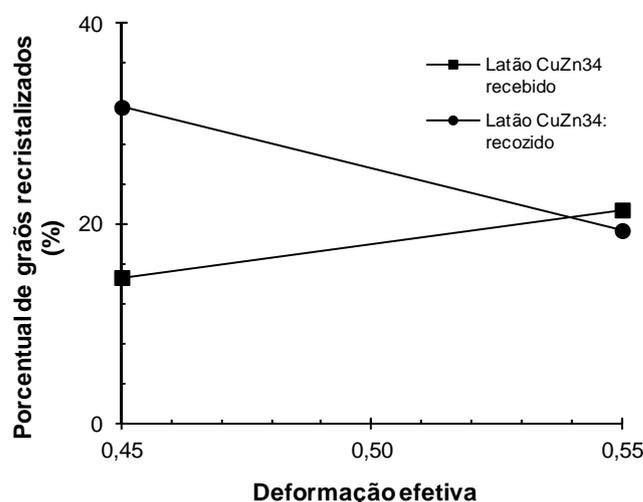


Figura 5. Evolução do percentual de grãos recristalizados do latão CuZn34 nos estados inicial como recebido e recozido em função da quantidade de deformação efetiva do cisalhamento reverso, Y = -0,45 e -0,55, da rota 0,25/800°C 20min/0,30/Y/450°C 30min.

Os arranjos micrográficos exibidos pelo latão CuZn34 a partir da variação da quantidade de deformação efetiva em cisalhamento reverso, Y igual a -0,45 e -0,55, da rota 0,25/800°C 20min/0,30/Y/450°C 30min são apresentados nas Figuras 6 e 7 para os estados como recebido e recozido do latão, respectivamente.

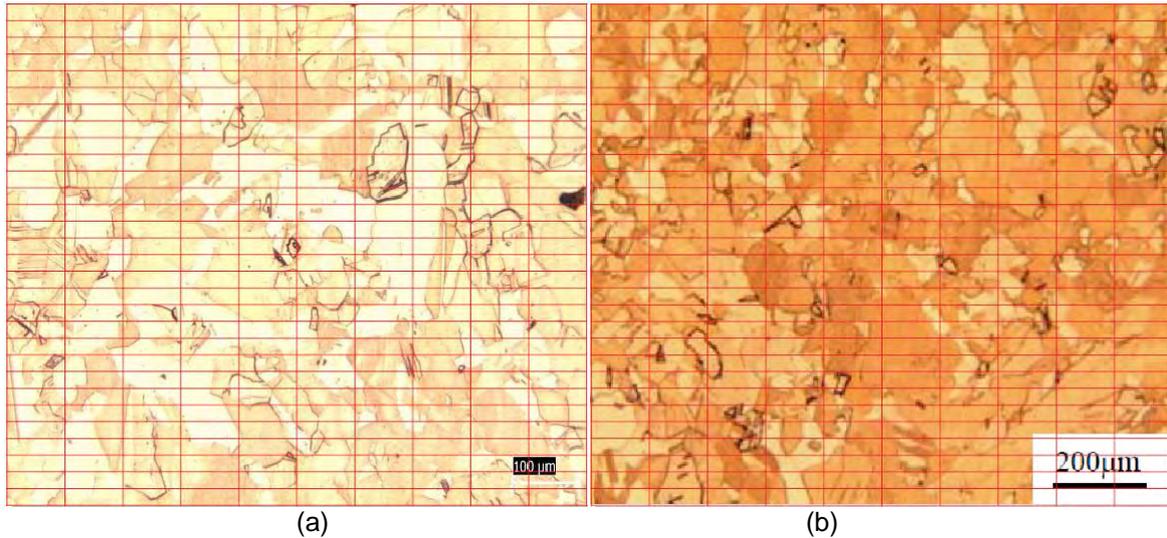


Figura 6. Fotomicrografias do latão CuZn no estado como recebido sob as rotas de carregamento: a) 0,25/800°C 20min/0,30/-0,45/450°C 30min e b) 0,25/800°C 20min/0,30/-0,55/450°C 30min.

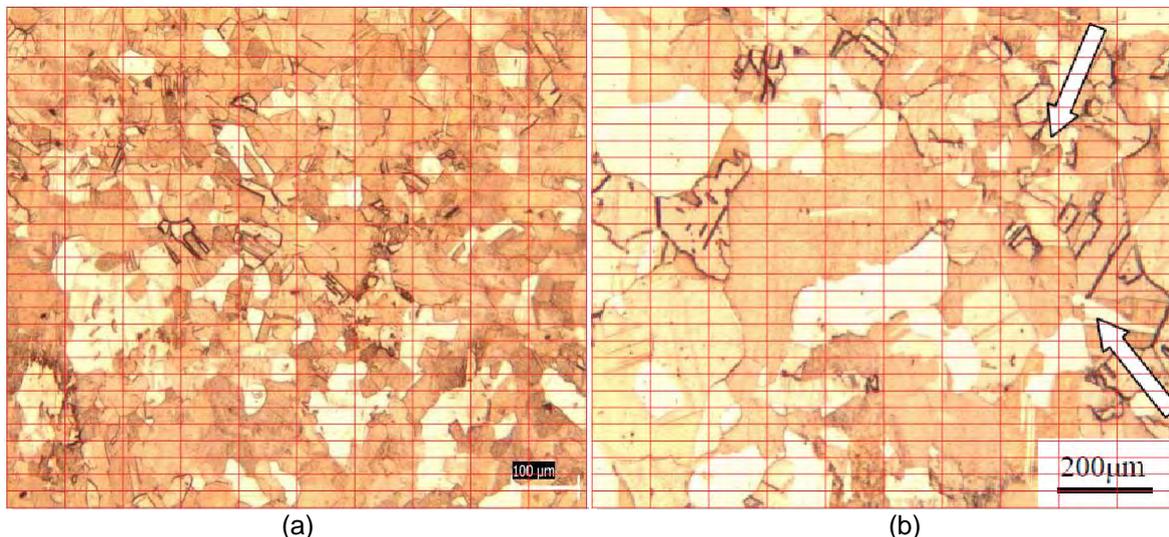


Figura 7. Fotomicrografias do latão CuZn no estado recozido sob as rotas de carregamento: a) 0,25/800°C 20min/0,30/-0,45/450°C 30min e b) 0,25/800°C 20min/0,30/-0,55/450°C 30min.

3.3 Temperatura Recozimento Versus Recristalização

Por fim, fez-se o estudo do efeito da temperatura adotada para o último tratamento térmico de recozimento, T , igual a 450°C e 650°C, da rota 0,25/800°C 20min/0,30/-0,55/ T 30min, no percentual de grãos recristalizados no latão CuZn34. Deste modo, a Figura 8 exibe o gráfico contendo a evolução dos grãos recristalizados em função da temperatura do tratamento térmico enquanto as Figuras 9 e 10 as respectivas fotomicrografias do latão no estado como recebido e recozido, respectivamente.

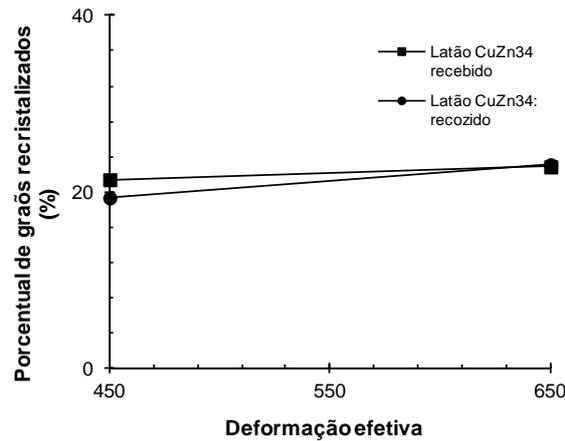


Figura 8. Evolução do percentual de grãos recristalizados do latão CuZn34 nos estados inicial como recebido e recozido em função da temperatura adotada para o último tratamento térmico de recozimento, $T = 450^{\circ}\text{C}$ e 650°C , da rota 0,25/800°C 20min/0,30/-0,55/T 30min.

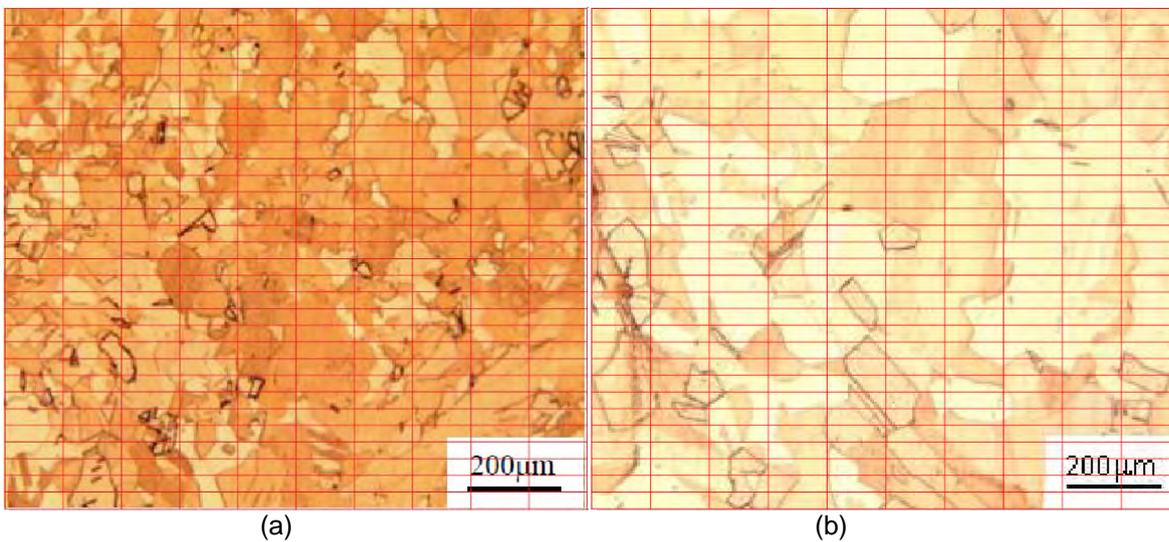


Figura 9. Fotomicrografias do latão CuZn no estado como recebido sob as rotas de carregamento: a) 0,25/800°C 20min/0,30/-0,55/450°C 30min e b) 0,25/800°C 20min/0,30/-0,55/650°C 30min.

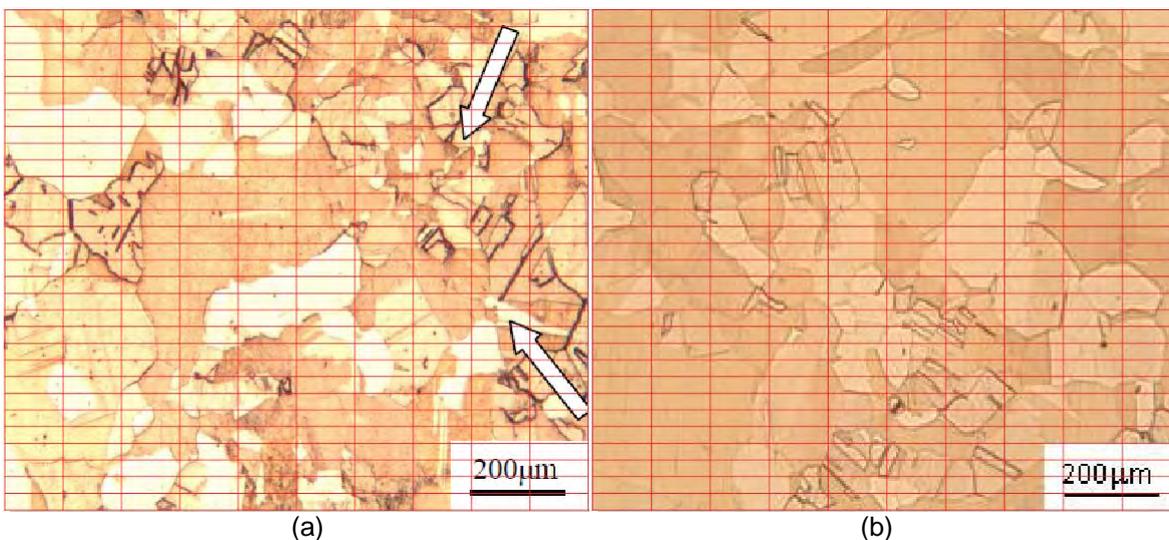


Figura 10. Fotomicrografias do latão CuZn no estado recozido sob as rotas de carregamento: a) 0,25/800°C 20min/0,30/-0,55/450°C 30min e b) 0,25/800°C 20min/0,30/-0,55/650°C 30min.

4 DISCUSSÕES

O efeito da quantidade de deformação efetiva sob cisalhamento direto, **X** igual a 0,20 e 0,30, da rota 0,25/800°C 20min/**X**/-0,45/450°C 30min, figuras 2 até 4, revelam a tendência de aumento de grãos recristalizados com o acréscimo da quantidade de deformação efetiva sob cisalhamento direto para o latão recozido e a redução para o latão como recebido. Estes dados revelam ainda que a energia armazenada pela deformação prévia do latão no estado como recebido não foi suficiente para intensificar a cinética de recristalização do latão para a rota de carregamento adotada neste trabalho.

Comparando-se agora o efeito da quantidade de deformação efetiva sob cisalhamento reverso, **Y**, igual a -0,45 e -0,55, da rota 0,25/800°C 20min/0,30/**Y**/450°C 30min (Figuras 5-7), é possível observar novamente comportamento dissimilar do latão em função do estado inicial. Para o estado como recebido percebe-se o aumento da quantidade de grãos recristalizados com o aumento da deformação em cisalhamento reverso e o oposto para o latão recozido. Neste caso, o latão como recebido somente consegue ultrapassar a quantidade de grãos recristalizados do latão recozido para o maior valor de deformação efetiva em cisalhamento reverso.

Esses resultados indicam que o efeito do estado inicial do latão CuZn34 na cinética de recristalização para as rotas de carregamento adotadas neste trabalho é maior que o exercido pela quantidade de deformação efetiva em cisalhamento direto ou reverso.

As alterações microestruturais oriundas de um metal trabalhado a frio (cisalhamentos direto e reverso) seguido por um tratamento térmico podem promover um decaimento da energia armazenada devido à deformação plástica. A redução de energia é justificada pelos mecanismos de rearranjo cujas modificações principais podem ser enumeradas por: deslocamentos provenientes do rearranjo a fim de configurar-se em um estado de menor energia, diminuição da área superficial total dos grãos, reação entre pontos de inclusão e/ou precipitados a fim de promover melhor solubilização na matriz, absorção de defeitos pontuais ou discordâncias devido ao crescimento de grão, aniquilação de discordâncias e movimentações em sentidos opostos.⁽⁴⁾

Esses resultados confirmam a influência do modo de deformação plástica na cinética de recristalização do latão CuZn34 como observado em trabalho anterior⁽⁸⁾ sendo isso relacionado à provável mudança subestrutural diferenciada decorrente do modo adotado para a deformação plástica do material.

Por fim, as Figuras 8 a 10 analisaram a influência da temperatura adotada para o último tratamento térmico de recozimento, **T**, igual a 450°C e 650°C, da rota 0,25/800°C 20min/0,30/-0,55/**T** 30min, no percentual de grãos recristalizados do latão CuZn34.

Nesta condição notou-se que o estado inicial do latão não influenciou de modo significativo a cinética de recristalização do latão CuZn34. Para ambos os estados inicial foi observada tendência de aumento do percentual de grãos recristalizados com o aumento da temperatura adotada para o tratamento térmico de recozimento, sendo esse efeito ligeiramente maior para o latão no estado como recebido.

Durante o tratamento térmico, o processo de difusão é minimizado, devido à dispersão dos átomos de soluto da liga metálica e à possível formação de precipitados. Esse fator limitante é justificado pela tendência de formação de

aglomerados sólidos próximos às discordâncias ou sítios de nucleação dificultando a movimentação atômica e impedindo o rearranjo, além do potencial termodinâmico disponível inicialmente para a recristalização ser consumido quando os limites de grãos são ultrapassados.⁽¹⁾ Então, comparando a influência térmica (último tratamento térmico de recozimento) com a mecânica (cisalhamentos direto e reverso) justifica-se a observação de menor ocorrência de recristalização no primeiro caso.

5 CONCLUSÕES

A investigação do efeito da quantidade de deformação efetiva sob cisalhamento direto e reverso além da temperatura adotada para o último tratamento térmico de recozimento do latão pré-encruado e recozido na condição em que foi deformado sob cisalhamento direto de 0,25 de deformação efetiva e recozido a 800°C durante 20 minutos revelou:

- a) a tendência de acréscimo de grãos recristalizados com o aumento da quantidade de deformação efetiva sob cisalhamento direto para o latão recozido e o oposto para o latão no estado como recebido;
- b) a tendência de acréscimo de grãos recristalizados com o aumento da quantidade de deformação efetiva sob cisalhamento reverso para o latão como recebido e o oposto para o latão no estado recozido;
- c) quando se alterou a temperatura adotada para a condução do último tratamento térmico de recozimento verificou-se a falta de influência do estado inicial na cinética de recristalização do latão CuZn34, sendo notado o acréscimo da quantidade de grãos recristalizados com o aumento da temperatura do tratamento térmico para ambos os estados iniciais do latão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) necessário à execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 SOUZA, F.M., PLAUT, R.L., LIMA, N.B., FERNANDES, R.C., PADILHA, A.F. Recrystallization and crystallographic texture in AA4006 aluminum alloy sheets produced by twin roll caster and direct chill processes. *REM*, Ouro Preto, v. 65, n.3, p. 363-370, jul./set. 2012.
- 2 RIOS, R.R., PADILHA, A.F. Microstructural path of recrystallization in a commercial Al-Mn-Fe-Si (AA3003) alloy. *Materials Research*, v. 6, n.4, p. 605-613, (2003).
- 3 SOUZA Jr., C. M. de. *Influência da deformação e do tratamento térmico na textura cristalográfica de um aço inoxidável duplex*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, (2008).
- 4 RIOS, P.R., SICILIANO Jr., F., SANDIM, H.R.Z., PLAUT, R.L., PADILHA, A.F. Nucleation and growth during recrystallization. *Materials Research*, v. 8, n.3, p. 225-238, (2005).
- 5 TARASIUK, J., GERBER, PH., BACROIX, B. Estimation of recrystallized volume fraction from EBSD data. *Acta Materialia*, v. 50, p. 1467-1477, (2002).
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E-562: Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count*, 7p, (2002).
- 7 COLPAERT, H. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 652p, (2008).

- 8 LOPES, W, CORRÊA, E.C.S., CAMPOS, H.B., AGUILAR, M.T., CETLIN, P.R. *Effect of the thermo-mechanical processing characteristics on the recrystallization of the CuZn34 brass*. In: 18th Congress of International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering, Rio de Janeiro/RJ, p. 4811-4822, 26 a 30 de Julho de 2010.