

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SOLUBILIZAÇÃO, LAMINAÇÃO EM TEMPERATURA CRIOGÊNICA E ENVELHECIMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO 2024

Marcello Van Moorsel¹, Júlio César Dutra²

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário FEI

² Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário FEI

marcello.moorsel@gmail.com¹, jdutra@fei.edu.br²

Resumo: O estudo da evolução da dureza em uma liga Al 2024 foi realizado por duas diferentes rotas de processamento: solubilização seguida de laminação e envelhecimento (artificial e natural) e solubilização seguida de criolaminação e envelhecimento (artificial e natural). As amostras criolaminadas apresentaram durezas ligeiramente maiores do que as laminadas convencionalmente e o tratamento de envelhecimento artificial resultou no máximo de dureza em menor tempo quando comparado ao envelhecimento natural.

1. Introdução

No intuito de se desenvolver ligas de alumínio com propriedades mecânicas aprimoradas, diversas técnicas envolvendo deformação plástica severa têm sido estudadas. Esses processos visam produzir nanoestrutura homogênea (grãos menores que 1 μm), o que confere ao material maior resistência e ductilidade.

A criolaminação é um processo de laminação a frio cuja temperatura (-196 °C) é mantida por nitrogênio líquido e que gera uma microestrutura ultrafina no material utilizando cargas relativamente baixas [1]. Tem como benefícios a possibilidade de produção em larga escala e a não geração de poluição ambiental [2].

Durante a laminação em temperatura criogênica ocorre a supressão da recuperação dinâmica no material e a formação e acúmulo de discordâncias, facilitadas pela tensão aplicada em baixa temperatura. A densidade de discordâncias atinge um patamar estável alto, o que aumenta o número de sítios de nucleação durante o recozimento posterior e resulta em uma microestrutura de grãos ultrafinos [1] [2].

Os estudos envolvendo a combinação desse processo com os tratamentos térmicos de solubilização e precipitação nas ligas de alumínio têm resultado em altos valores de resistência e dureza sem que a ductilidade fosse severamente comprometida [3]. Porém, a maior parte desses estudos envolve ligas de alumínio das séries 6XXX e 7XXX. O presente projeto estudou a aplicação da laminação em temperatura criogênica na liga Al 2024, que apresenta valores superiores de resistência à fadiga, módulo de elasticidade, alongamento, limite de escoamento, resiliência, dureza e maior razão resistência sobre peso.

Nota-se que há um grande número de variáveis que influenciam as propriedades mecânicas finais do material no processo de criolaminação, como o tempo de submersão da chapa em nitrogênio líquido antes de

cada passe no laminador [4] (Figura 1), o número de passes [2], a quantidade de solutos em solução sólida antes da laminação [1]. Esses fatores foram temas de estudo de outros trabalhos, os quais foram utilizados para a otimização da metodologia do presente projeto.

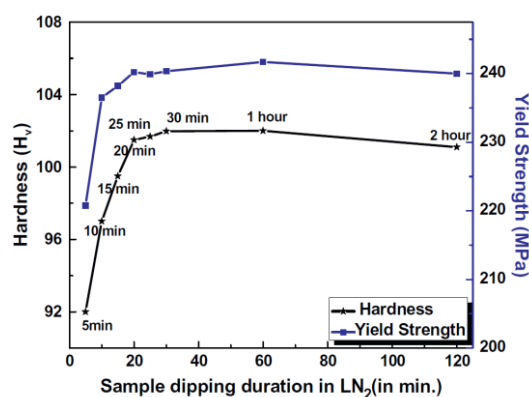


Figura 1- Propriedades mecânicas de ligas Al 6063 criolaminadas por tempo de submersão em nitrogênio líquido. [4]

2. Metodologia

A partir de uma única chapa de alumínio 2024 de 1,6 mm de espessura, 12 chapas de dimensões 150 mm de comprimento, 50 mm de largura foram seccionadas por jato d'água. Foram estudados quatro grupos de amostras, ilustradas na Figura 2: solubilizadas, temperadas, laminadas e envelhecidas naturalmente (Grupo 1); solubilizadas, temperadas, laminadas e envelhecidas artificialmente (Grupo 2); solubilizadas, temperadas, criolaminadas e envelhecidas naturalmente (Grupo 3); e, finalmente, solubilizadas, temperadas, criolaminadas e envelhecidas artificialmente (Grupo 4). Cada Grupo contou com 3 amostras, totalizando em 12 amostras estudadas.

Todas as amostras foram solubilizadas numa temperatura de 520 °C por 1 h, resfriadas rapidamente em água e tiveram uma redução de 20% na espessura, tanto na laminação convencional quanto na criolaminação. As amostras dos Grupos 3 e 4 ficaram mergulhadas por 30 minutos em nitrogênio líquido antes de cada passe no laminador.

Nos grupos cuja precipitação foi artificial (Grupos 2 e 4), as amostras foram cortadas em pedaços menores após o encruamento. Essas novas amostras, de dimensões 10 mm de comprimento, 50 mm de largura e 1,28 mm de espessura, foram levadas aos fornos para o

tratamento de precipitação, o qual ocorreu nas temperaturas de 150 °C, 175 °C e 200 °C. O tempo entre a retirada das peças do forno e o ensaio de dureza foi o menor possível, de forma a evitar o envelhecimento natural.

Para se mensurar a evolução da dureza nos processos cumulativos, foram realizados ensaios de dureza Vickers com uma carga de 5 kgf (49 N) durante 15 s em todas as amostras de todos os grupos estudados. Cada amostra foi ensaiada pelo menos três vezes para controle estatístico dos valores de dureza lidos.

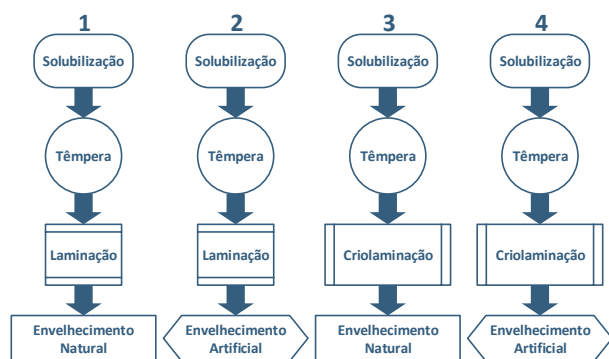


Figura 2- Esquema do processamento realizado.

3. Resultados

Os resultados obtidos nos quatro grupos de processamento estão reunidos nas Figuras 3 e 4 a seguir. A combinação entre solubilização, têmpera, laminação convencional e envelhecimento natural resultou no menor endurecimento do material, enquanto a combinação dos tratamentos de solubilização, têmpera, criolaminação e envelhecimento artificial a 200 °C resultou no maior endurecimento da liga.

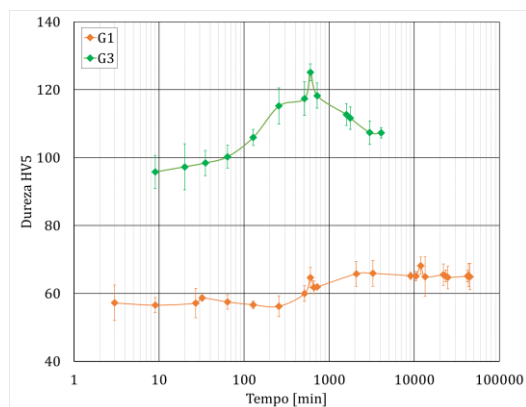


Figura 3- Evolução das durezas nos Grupos 1 e 3.

Comparando-se os resultados para as amostras envelhecidas naturalmente (Grupos 1 e 3), observa-se que as amostras criolaminadas apresentam uma dureza máxima em torno de 83,5% maior do que as laminadas em temperatura ambiente. Já para as amostras envelhecidas artificialmente (Grupos 2 e 4), constatou-se que as amostras criolaminadas apresentaram maior dureza do que as laminadas de maneira convencional.

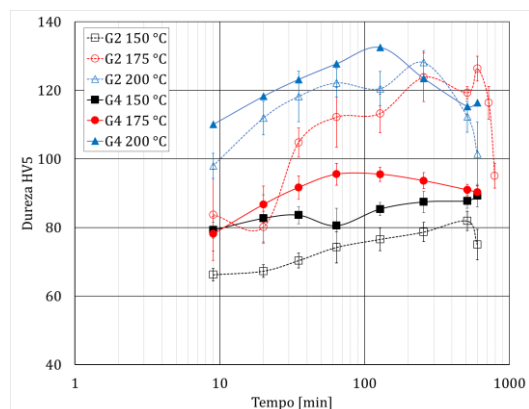


Figura 4- Evolução das durezas nos Grupos 2 e 4.

4. Conclusões

De forma geral, o processamento envolvendo criolaminação resulta em valores de durezas superiores ao processamento convencional e em tempos mais curtos, o que evidencia o aumento da concentração e acúmulo de discordâncias no material.

As maiores durezas observadas foram obtidas nas amostras cujo envelhecimento ocorreu a 200 °C (132,5 HV5 no Grupo 4 e 128,1 HV5 no Grupo 2), cuja diferença entre os máximos encontrados foi de apenas 3,4%. Porém, apesar de se esperar que a temperatura do tratamento de precipitação artificial favoreça a difusão e, portanto, o ganho de dureza, observou-se que o ganho mais expressivo ocorreu para as amostras envelhecidas naturalmente.

5. Referências

- [1] Panigrahi, S. K., & Jayaganthan, R. (2011). *Influence of solutes and second phase particles on work hardening behavior of Al 6063 alloy processed by cryorolling*. Materials Science And Engineering A, pp. 3174-3160.
- [2] Yu, H.-l., Tieu, A. K., Lu, C., Liu, X.-h., Godbole, A., & Kong, C. (2013). *Mechanical properties of Al-Mg-Si alloy sheets produced using asymmetric cryorolling and ageing treatment*. Materials Science And Engineering A, pp. 212-218.
- [3] Niranjani, V. L., Kumar, K. C., & Sarma, V. S. (2009). *Development of high strength Al-Mg-Si AA6061 alloy through cold rolling and ageing*. Materials Science And Engineering A, pp. 169-174.
- [4] Panigrahi, S. K., & Jayaganthan, R. (2010). *Development of ultrafine-grained Al 6063 alloy by cryorolling with the optimized initial heat treatment conditions*. Materials And Design, pp. 2172-2180.

Agradecimentos

Ao Centro Universitário FEI pelo financiamento do projeto de iniciação científica PBIC 078/17 e ao laboratório de materiais, pelo seus técnicos e equipamentos para a realização do estudo.

¹ Aluno de IC do Centro Universitário FEI, R.A. 12.217.176/2. Projeto com vigência de 06/17 a 05/18.

² Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Universitário FEI.