

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE INTERCEPTAÇÃO LINEAR NA DETERMINAÇÃO DE TAMANHO DE GRÃO DE UMA LIGA DE MAGNÉSIO AZ61 FORJADA A QUENTE

Autores: Raphael Franklim Oliveira FERREIRA, Eduardo DALMOLIN, Joécio VOJCIECHOVSKI JR., Diego Rodolfo Simões de LIMA

Introdução

Ligas de magnésio têm um grande potencial de aplicabilidade na engenharia, especialmente em aplicações onde a redução de peso é essencial, devido a sua baixa densidade e alta resistência específica. Além disso, ligas de magnésio possuem uma boa usinabilidade, estabilidade dimensional e reciclabilidade (El-Morsy, *et. al.*, 2008).

No entanto, o uso de magnésio e suas ligas é ainda limitado pela sua baixa ductilidade a temperatura ambiente (Chandrasekaran, *et. al.*, 2008). Esta baixa ductilidade é causada por sua estrutura hexagonal compacta, onde o escorregamento de planos é dificultado, sendo os planos basais os preferenciais em temperatura ambiente.

A sensibilidade da temperatura do processo já foi exaustivamente discutida para metais com este arranjo cristalino, sendo conclusivo que, ao se trabalhar a liga acima de 225 °C, planos piramidais são ativados, o que gera um considerável aumento da plasticidade do material (Kainer, 2003). No entanto, alguns trabalhos já realizaram deformações em ligas de magnésio a temperaturas abaixo dos 225 °C, desde que com uma velocidade de deformação bastante baixa e com deformações efetivas pequenas (Swiostek, *et. al.*, 2006; Narayanasamy, *et. al.*, 2000).

Diversos trabalhos sobre deformação de ligas de magnésio têm sido realizados recentemente, em diversas universidades e institutos de pesquisa. Muitas destas pesquisas em deformação de ligas de magnésio têm sido realizadas com os objetivos: proporcionar aumento considerável nas propriedades mecânicas e na deformabilidade do material, através da obtenção de estruturas com tamanhos de grãos finos e ultrafinos.

Miura *et.al* (2010) procederam um forjamento multiaxial (MAF) em corpos de prova de uma liga de magnésio AZ61 em estado bruto de solidificação, em 5 etapas de deformação, com temperaturas decrescentes passo-a-passo, e encontraram que a resistência mecânica aumentou em cada etapa, enquanto que o tamanho de grão foi decrescendo até se encontrar uma microestrutura completa de grãos ultra-refinados.

Na China, Xia *et.al.* (2013) realizaram um forjamento multiaxial (MAF) em corpos de prova de uma liga de magnésio AZ61 em estado bruto de solidificação, com temperaturas constantes, em 6 estágios de forjamento multidirecional, obtendo elevada fração de grãos

recristalizados e refinados, obtendo expressivos ganhos de resistência mecânica ao se comparado com a matéria-prima em estado “como fundido”.

Também na China, Chen *et.al.* (2012) procederam um MAF em corpos de prova em estado bruto de solidificação, com variações de temperatura de forjamento entre os 6 diferentes passes, obtendo resultados de recristalização parcial e refino dos grãos recristalizados, com relativo aumento de dureza e resistência mecânica do material deformado.

Como se pode observar, o forjamento multiaxial (MAF) é um método de conformação já demonstrado eficiente, promovendo recristalização da estrutura bruta de solidificação, refino de grãos e melhoria de propriedades mecânicas das ligas de magnésio testadas.

Para a caracterização dos tamanhos de grão destas ligas, alguns procedimentos de análise são normatizados. O Método das Intercepções Lineares (MIL) é largamente empregado em artigos científicos internacionais (ASTM E112) e consiste em traçar uma linha de tamanho conhecido em uma micrografia e contar a quantidade de grãos que são intersectados por essa linha. Se acaso a micrografia apresentar um sistema com microestrutura orientada e grãos não uniaxiais, é necessário traçar várias linhas em diferentes direções a fim de fazer a compensação devido a não uniformidade dos grãos individuais (GERBASI, 2012). A dimensão da linha dividida pelo número de grãos interceptados caracteriza o tamanho médio do grão presente naquela microestrutura. A fim de se garantir a melhor caracterização de tamanho de grão possível, em cada imagem traçou-se 5 linhas de intercepção.

O objetivo principal deste trabalho é caracterizar os tamanhos de grão de ligas de magnésio AZ61, previamente forjadas multiaxialmente a quente, com variações na quantidade de deformação, e verificar se houve redução do tamanho de grão original da liga estudada.

Material e Métodos

A presente pesquisa se inicia em uma fase precedente a esta, onde corpos de prova de liga de magnésio AZ61 foram forjados a quente, de forma multiaxial. Um conjunto de 6 corpos de prova foram utilizados, nos quais em cada um deles era imposto uma deformação verdadeira uniaxial da ordem de $\varphi = 0,4$, em um determinado sentido (x). Na sequência, as amostras eram giradas e submetidas a novas deformações de ordem $\varphi = 0,4$ no sentido (y). Posteriormente, os corpos de prova foram girados no terceiro eixo (z), para serem novamente forjados com a mesma deformação das etapas anteriores. Procedeu-se novamente a repetição dos forjamentos nas três direções, totalizando 6 etapas de deformação multiaxial, sendo 2 deformações em cada eixo. Em cada etapa, um corpo de prova foi retirado para a caracterização microestrutural, enquanto que os demais foram sendo girados e deformados. Esta amostra retirada era

imediatamente resfriada rapidamente em água, para se manter a morfologia e o tamanho dos grãos da liga deformada.

Para os forjamentos, foi utilizada uma prensa hidráulica, com capacidade de carga máxima de 1000 kN, e velocidade em trabalho de 16,6 mm/s, constante durante todo o processo. Em relação à lubrificação das peças, foi utilizada uma solução à base de grafite coloidal, diluída em água na proporção de uma parte do lubrificante para cinco partes de água que, após aplicado, formou uma fina camada de filme lubrificante em torno da superfície das matrizes.

A temperatura do processo foi de 350 °C. Sendo as ligas de magnésio excelentes condutoras de calor, é vital que o processo se dê tão isotermicamente quanto possível, ou seja, a temperatura da matriz deve ficar o mais próximo possível da temperatura da liga. Caso contrário, o material perde calor para as paredes da matriz, reduzindo drasticamente sua deformabilidade, podendo gerar trincas. Para garantir um processo completamente isotérmico, resistências elétricas foram instaladas nas matrizes inferior e superior da ferramenta, sendo ambas simultaneamente controladas por um dispositivo eletrônico.

Ao fim dos forjamentos, as 6 amostras retiradas do processo (cada uma representando as 6 diferentes etapas de deformação multiaxial) se juntaram a uma amostra da matéria-prima não deformada e todas foram caracterizadas microestruturalmente. Para isso, foi utilizado o procedimento padrão de preparação de amostras, seguindo-se sequência de lixas d'água, polimento com alumina de 1 µm e ataque com ácido fluorídrico com 0,5% de concentração, diluído em álcool. A análise microestrutural foi efetuada em microscópio óptico, de onde se pode aplicar o Método das Intercepções Lineares (MIL).

Resultados e discussão

As imagens das micrografias da liga de magnésio AZ61 multiaxialmente forjadas podem ser observadas na Figura 1.

Após a aplicação do Método das Intercepções Lineares, utilizando-se da média entre 5 linhas por micrografia, foi caracterizado o tamanho de grão de cada amostra. A Tabela 1 apresenta os valores obtidos para cada etapa de forjamento.

É possível notar que há um decréscimo do tamanho de grão a medida em que as etapas do forjamento multiaxial vão sendo impostas aos corpos de prova. Logo na primeira etapa de deformação já se verifica uma acentuada queda do tamanho de grão médio da liga. A tendência de refino de grão continua sendo verificada em todas as demais etapas do processo, tendo a

última etapa resultado em um tamanho de grão quase 50% menor que o grão inicial não deformado, encontrado na matéria-prima.

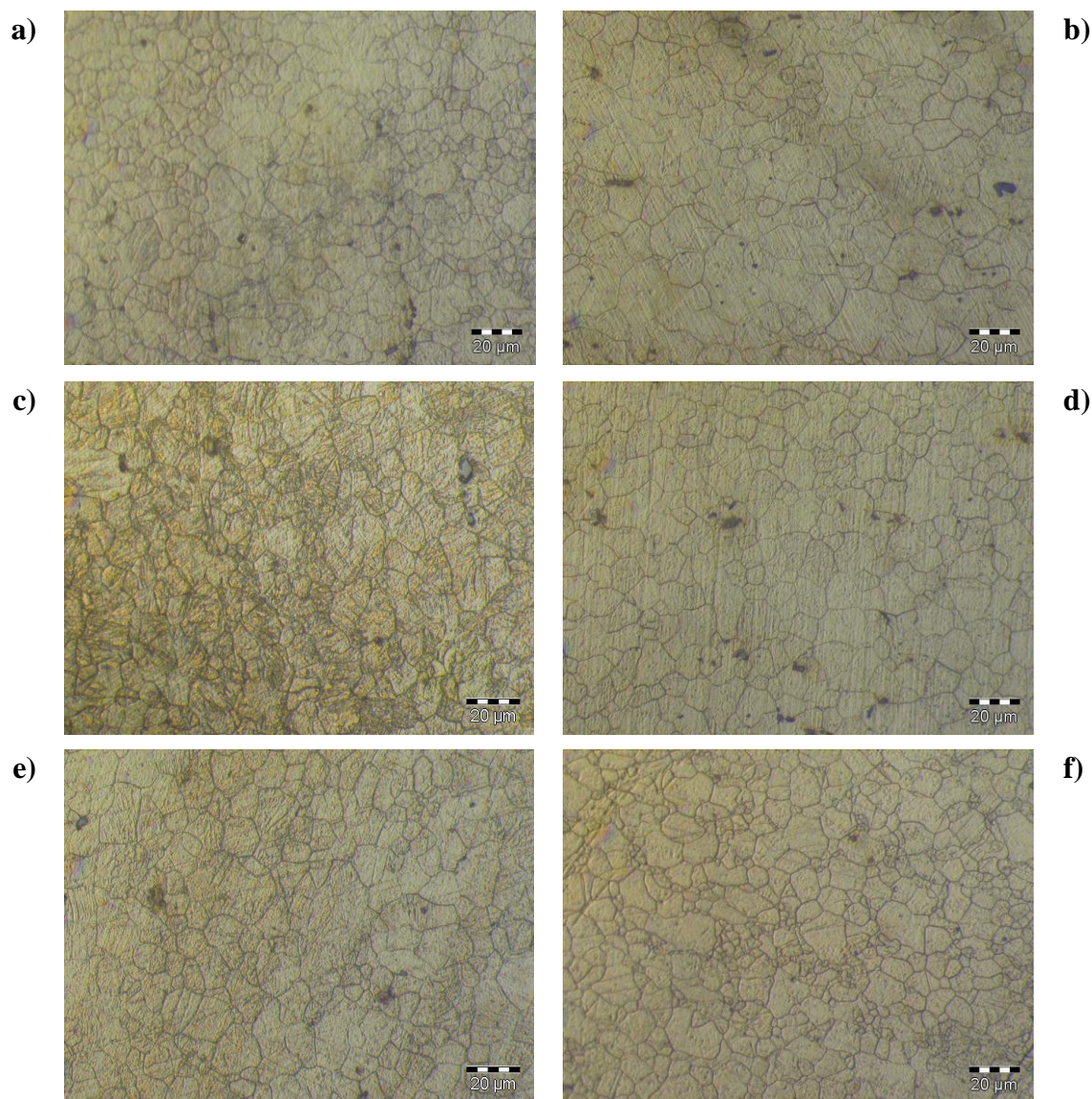


Figura 1: Micrografia das ligas de magnésio AZ61 forjadas. Imagens de a) à f) representam respectivamente as etapas de 1 a 6.

Tabela 1: Tamanho de grão para cada etapa de deformação

| ETAPA | M.P. | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| TAMANHO DE GRÃO (µm) | 16,40 | 12,10 | 11,95 | 11,44 | 10,60 | 10,48 | 8,68 |

Pode se notar que a redução de tamanho de grão não apresenta tendência de estagnação ao fim da sexta etapa de deformação, o que sugere que pode ser possível encontrar grãos com tamanhos médios ainda mais refinados.

Para os próximos trabalhos serão observados outros aspectos desta pesquisa, como variações de quantidade de deformação verdadeira imposta, aumento de número de etapas de deformação e caracterização mecânica das peças forjadas.

Conclusão

Neste estudo, verificou-se que o Método de Interceptação Linear é eficiente para caracterizar tamanho de grão de peças forjadas.

Em relação a evolução dos grãos, percebeu-se a eficácia do forjamento multiaxial para refino de grãos em ligas de magnésio, apresentando resultados consideráveis já na primeira etapa de deformação e não se esgotando no refino da sexta etapa imposta, onde se observou uma redução de tamanho de grão próximo a 50% em relação ao grão da matéria-prima.

Por fim, evidenciou-se a necessidade de avançar na pesquisa sobre o tema, onde alguns comportamentos não são completamente conhecidos.

Referências

- EI-MORSY, A.; ISMAIL, A.; WALY, M.: Microstructural and mechanical properties evolution of magnesium AZ61 alloy processed through a combination of extrusion and thermo mechanical processes. **Materials Science and Engineering A**, 486, 528–533, 2008.
- CHANDRASEKARAN, M.; JOHN, Y.M.; Effect of materials and temperature on the forward extrusion of magnesium alloys. **Materials Science Engineering A**, 381, 308–319, 2008.
- KAINER, K.U.: **Magnesium – Alloys and Technologies**. Willey-VCH. Alemanha, 2003.
- SWIOSTEK, J.; GOKEN, J.; LETZIG, D.; KAINER, K. U.; Hydrostatic extrusion of commercial magnesium alloys at 100 °C and its influence on grain refinement and mechanical properties. **Materials Science and Engineering A**, 424, pg. 223–229, 2006.
- NARAYANASAMYA, R., SATHIYANARAYANANA, S., PONALAGUSAMY, R.; A study on barrelling in magnesium alloy solid cylinders during cold upset forming. **Journal of Materials Processing Technology**, 101, pg. 64-69, 2000.
- MIURA, H.; YU, G.; YANG, X.; SAKAI, T.; Microstructure and mechanical properties of AZ61 Mg alloy prepared by multi directional forging. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 20, 1294-1298, 2010.
- XIA, X., CHEN, M., LU, Y., FAN, F., ZHU, C., HUANG, J., DENG, T., ZHU, S. Microstructure and mechanical properties of isothermal multi-axial forging formed AZ61 Mg alloy forging under the multitemperature processing procedure. **Trans. Nonferrous Met. Soc. China** 23, 3186-3192, 2013.
- CHEN, Q., SHU, D., HU, C., ZHAO, Z., YUAN, B. Grain refinement in an as-cast AZ61 magnesium alloy processed by multi-axial. **Materials Science and Engineering A** 541, 98–104, 2012.
- GERBASI, R. B. Z., *Propriedades ferroicas de soluções sólidas $\text{NaNbO}_3 - \text{BaTiO}_3$* . Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Maringá, 2012.
-