

Caracterização de uma liga de magnésio processada via laminação assimétrica

Characterization of a magnesium alloy processed by asymmetric rolling

DOI:10.34117/bjdv7n12-298

Recebimento dos originais: 12/11/2021

Aceitação para publicação: 09/12/2021

Jéssica Vicente Luiz

Departamento de Engenharia Metalúrgica
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca
Angra dos Reis - RJ - Brasil

Rayander Martins Pimenta

Departamento de Engenharia Metalúrgica
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca
Angra dos Reis - RJ - Brasil

Luciano Pessanha Moreira

Programa de Pós-Graduação Engenharia Metalúrgica
Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda
Universidade Federal Fluminense - Volta Redonda - RJ - Brasil

José Adilson de Castro

Programa de Pós-Graduação Engenharia Metalúrgica
Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda
Universidade Federal Fluminense - Volta Redonda - RJ - Brasil

António B Pereira

Centro de Tecnologia Mecânica e Automação
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade de Aveiro, 3810-193 - Aveiro - Portugal

Darlene Souza da Silva Almeida

Departamento de Engenharia Metalúrgica
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca
Angra dos Reis - RJ - Brasil

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da assimetria durante o processo de laminação com reduções de 10% e 20% na espessura empregada à liga de magnésio AZ31, do ponto de vista microestrutural e propriedade mecânica. Diversos estudos têm sido realizados nas ligas de magnésio visando adquirir melhores propriedades mecânicas, sobretudo conformabilidade, pois esta é uma das principais limitações encontradas na liga. Neste trabalho são apresentados os resultados microestruturais e mecânicos para amostras processadas por laminação simétrica e assimétrica nas reduções de 10% e 20% nas temperaturas ambiente, 100 °C, 200 °C, 300 °C e 400 °C. Foi observado que todas as amostras submetidas ao processo de laminação assimétrica apresentaram um valor maior de dureza em relação àquelas laminadas simetricamente. Também,

observou-se que as amostras laminadas a 400°C apresentaram grãos refinados, podendo ser um indício de que tenha ocorrido a recristalização. Uma vez que este efeito também pôde ser observado a 300 °C, porém exclusivamente para a amostra laminada assimetricamente, este resultado pode estar relacionado ao processo assimétrico promover uma maior deformação no material.

Palavras-chave: Deformação plástica severa, Laminação assimétrica, Liga AZ31, Magnésio.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the influence of asymmetry during rolling with reductions of 10% and 20% in the thickness used in magnesium alloy AZ31, from the microstructural and mechanical properties point of view. Several studies have been carried out on magnesium alloys that have acquired better mechanical properties, especially formability, because this is one of the main limitations found in the alloy. This work presents the microstructural and mechanical results for samples processed by symmetric and asymmetric rolling at reductions of 10% and 20% in temperature, 100 °C, 200 °C, 300 °C and 400 °C. It was observed that all samples submitted to the asymmetric rolling process presented a higher hardness value compared to those symmetrically rolling. Also, it was observed that the samples rolled at 400 °C refined grains, which may be an indication that recrystallization has occurred. Since this effect could also be observed at 300 °C, but exclusively for the asymmetrically rolling sample, this result may be related to the asymmetric process promoting greater deformation in the material.

Keywords: Severe plastic deformation, Asymmetric rolling, Alloy AZ31, Magnesium.

1 INTRODUÇÃO

O magnésio é um metal leve com densidade de 1,74 g.cm⁻³, sendo mais leve que o aço e o alumínio que são materiais comumente utilizados na engenharia. Possui número atômico igual a 12, estrutura cristalina hexagonal compacta (HC) e ponto de fusão próximo de 650 °C [1-2]. As ligas de magnésio apresentam grande potencial para substituição de outros materiais tecnológicos, devido a leveza, mas têm como principal limitação baixa conformabilidade. A liga AZ31 abordada neste artigo tem como principais elementos de liga o zinco e o alumínio que atuam na melhoria da resistência mecânica e resistência à corrosão [3].

Nas ligas de estrutura hexagonal a deformação plástica é extremamente dependente da temperatura, do grau de deformação, da velocidade e da textura cristalográfica inicial apresentada, pois, apresentam poucos sistemas de deslizamento, fazendo com que o sistema dominante de deformação em baixas temperaturas seja a maclação [4,5,6].

Os Processos de Deformação Plástica Severa (DPS) têm sido aplicados aos metais com o objetivo principal de alcançar melhorias de propriedades mecânicas por meio do refinamento de grão. Trata-se de processos de conformação que induzem elevados níveis de deformação plástica a um sólido, sendo capazes de gerar significativo refino dos grãos, em geral, sem que ocorra alterações significativas de dimensões [7].

Data-se que as primeiras utilizações das técnicas de DPS são de 1991 por Valiev, sendo observados significativo refino de grão e aumento da resistência mecânica em diversas ligas. Os processos de deformação plástica severa, tais como o Equal Channel Angular Pressing (ECAP), High Pressure Torsion (HPT), e Asymmetric Rolling (AR) têm sido cada vez mais alvo de investigações ao longo dos anos [7-8-9]. Dentre esses processos, a laminação assimétrica, no inglês Asymmetric Rolling (AR), se destaca pelo potencial de produção em escala industrial e capacidade de processar produtos planos. A laminação assimétrica é realizada por meio da associação entre a aplicação da compressão direta e o cisalhamento que age sobre o material deformado. A técnica pode ser empregada de duas maneiras, sendo elas, a utilização de cilindros com diâmetros iguais e velocidades de rotação distintas ou cilindros com diâmetros diferentes possuindo a mesma velocidade de rotação. Em ambos os casos as velocidades periféricas nas superfícies superior e inferior são diferentes, gerando considerável cisalhamento ao longo da espessura do material laminado [10-11].

Kim et al. [10] aplicaram a técnica de laminação assimétrica em ligas de magnésio AZ31 com redução de 70% de espessura após um único passe com a relação de velocidade dos cilindros de um terço. Inicialmente, as amostras apresentavam diâmetro de grãos na faixa de 30-60 μm , obtendo após o processamento grãos com diâmetro médio de 1,4 μm . O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência da assimetria empregada durante o processo de laminação sob o ponto de vista microestrutural e das propriedades mecânicas da liga de magnésio AZ31.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho, foram caracterizadas vinte amostras da liga de magnésio AZ31 previamente laminadas com redução de espessura de 10% e 20% a partir de uma espessura inicial de 4 mm, em cinco diferentes temperaturas. Destas, dez amostras foram submetidas à laminação assimétrica com redução de 10% e 20%, sendo aplicada velocidade de 15 rpm no cilindro superior e 10 rpm no cilindro inferior. Dez amostras foram laminadas simetricamente, das quais cinco com redução de 10% e velocidade dos cilindros de 10,8 rpm e as outras com redução de 20% e velocidade dos cilindros de 11,7 rpm. As velocidades de rotação dos cilindros para os processos de laminação simétricos foram determinadas de modo que a taxa de deformação fosse igual àquela imposta pelos processos realizados de forma assimétrica. O modelo analítico proposto por Halloumi et. al.[12], Equação 1, foi utilizado para calcular a taxa de deformação equivalente de von Mises para a laminação assimétrica, enquanto a taxa de deformação para a laminação simétrica foi calculada por meio da Equação 2.

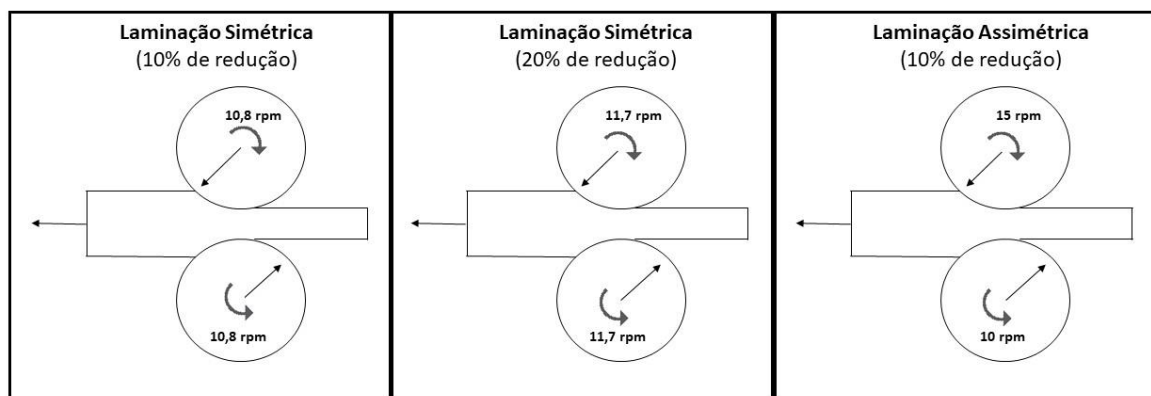
$$\dot{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \dot{\epsilon}_{xx} \sqrt{1 + \frac{a^2}{4}} \quad \text{Equação 1}$$

$$\dot{\epsilon} = v \left[\frac{2}{D(h_1 - h_2)} \right] \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad \text{Equação 2}$$

sendo $\dot{\epsilon}_{xx}$ a taxa de deformação linear na direção de laminação, a o parâmetro que inclui o grau de assimetria imposto, v a velocidade radial dos cilindros, D é o diâmetro dos cilindros e h_1 e h_2 são as espessuras inicial e final, respectivamente.

As temperaturas utilizadas nos processos de laminação assimétrica e simétrica foram temperatura ambiente, 100 °C, 200 °C, 300 °C e 400 °C. A Figura 1 apresenta a diferença entre os processos de laminação assimétrica e laminação simétrica.

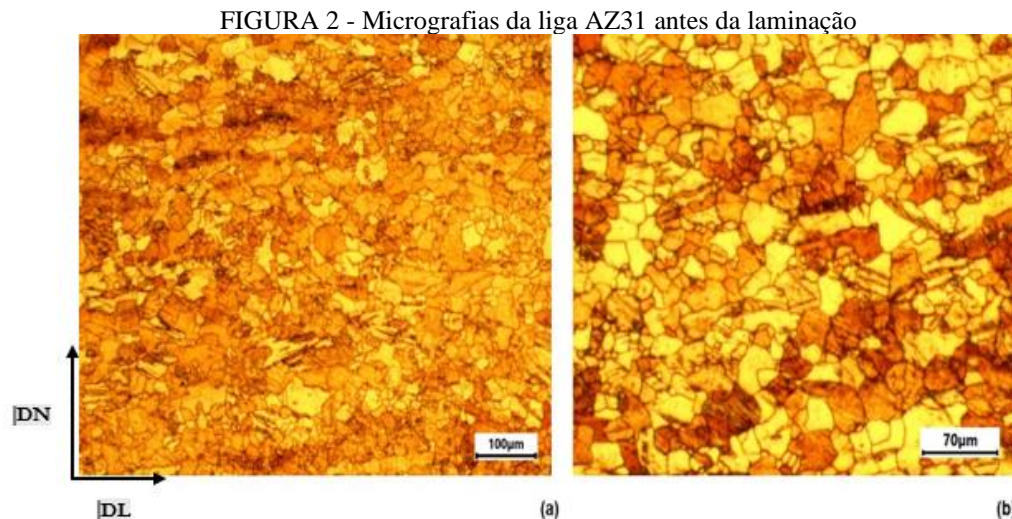
FIGURA 1 - Esquema representativo dos processos de laminação simétrica e assimétrica empregados [13]



As amostras foram cortadas com discos abrasivos em uma cortadora metalográfica (modelo CM40), embutidas a frio em resina epóxi, lixadas manualmente com o auxílio de lixas de SiC e polidas com solução de sílica coloidal. Para o ataque químico foi utilizada uma solução de ácido pícrico, com imersão das amostras por 50 segundos para posteriormente serem analisadas em um microscópio ótico Olympus e Nikon LV150 com aumento de 100 X. A caracterização mecânica foi realizada por meio do ensaio de dureza, sendo utilizado o método de microdureza Vickers (HV), que é realizado por meio identador piramidal de diamante [14]. Os ensaios foram executados em um microdurômetro da marca Mitutoyo e em cada amostra, dez medidas de dureza foram tomadas na superfície DL x DN (Direção de Laminação x Direção Normal) à meia espessura,

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da laminação simétrica e assimétrica cujos efeitos sobre o material são aqui discutidos, o material estava na forma de chapas com 4 mm de espessura, cuja microestrutura está apresentada na Figura 2. Percebe-se a presença de muitos grãos equiaxiais, mas existe uma distribuição de tamanhos de grãos heterogênea. Não se tem informações dos processamentos termomecânicos utilizados na produção do material.



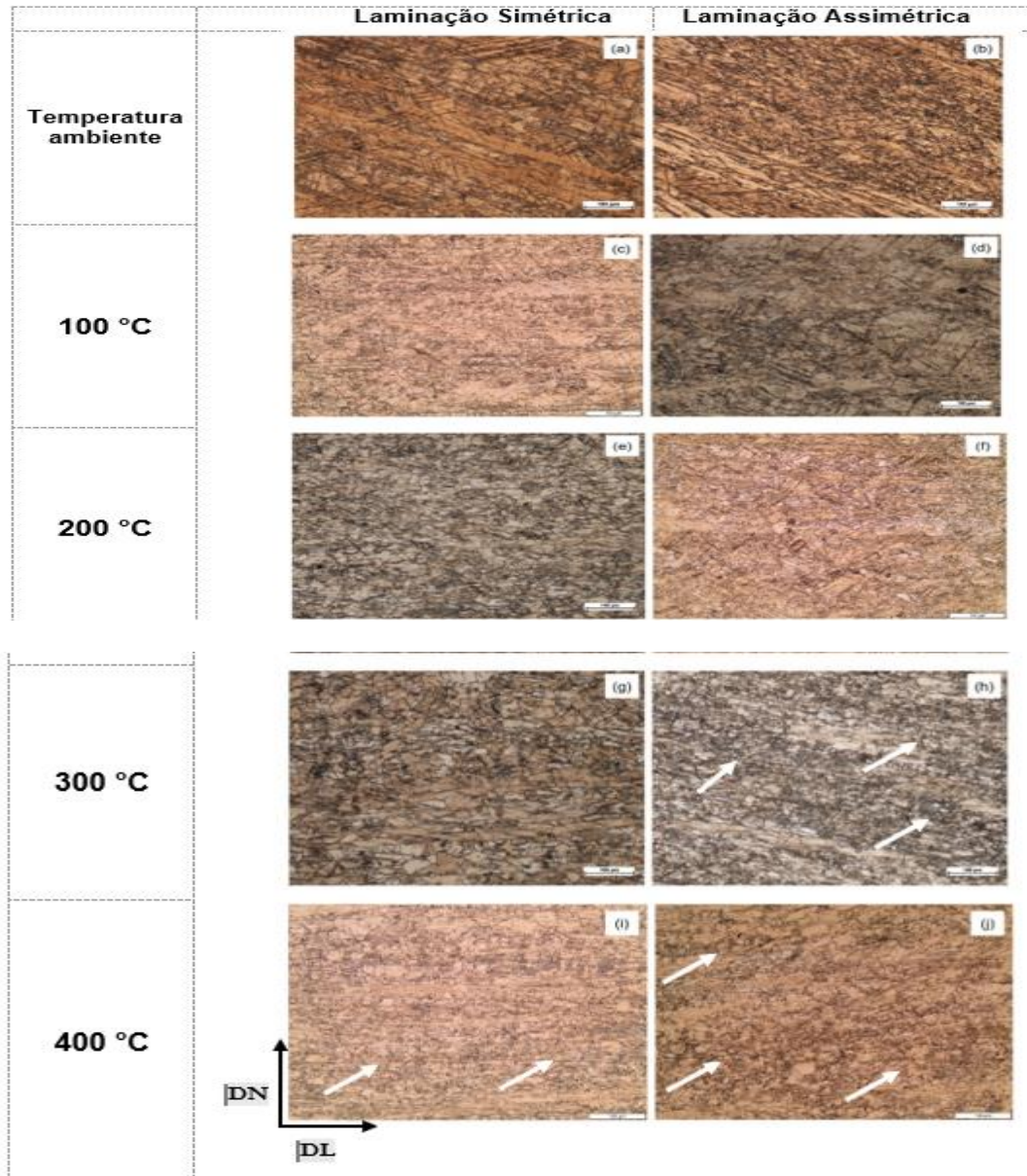
As micrografias obtidas a meia espessura das amostras reduzidas em 10% estão apresentadas na Figura 3. Observam-se maclas indicadas em todas as condições de ensaios realizadas para a laminação simétrica e assimétrica. Mas, para as temperaturas ambiente, 100 °C e 200 °C é perceptível uma maior quantidade destes defeitos cristalográficos, indicando que a maclação possa ter sido o mecanismo dominante nestas temperaturas.

Nas micrografias das amostras laminadas a 300 °C e 400 °C apresentadas na Figura 3 as maclas continuam sendo perceptíveis, porém em menor quantidade que nas amostras laminadas a baixas temperaturas. Em temperaturas elevadas, a tensão de cisalhamento crítica para a ativação dos planos não basais, como os piramidais e prismáticos diminuem, podendo ocorrer a ativação destes planos para a deformação plástica [15].

As setas indicadas na Figura 3 estão mostrando regiões de possíveis grãos recristalizados. Nas micrografias de laminação simétrica foram observados indícios da ocorrência da recristalização apenas na temperatura de 400 °C, tendo grãos equiaxiais refinados. No caso das amostras laminadas assimetricamente, indícios da ocorrência de recristalização foram observados nas amostras laminadas a 300 °C e 400 °C. A menor temperatura da possível recristalização observada para a laminação assimétrica, pode estar relacionada ao fato de que as

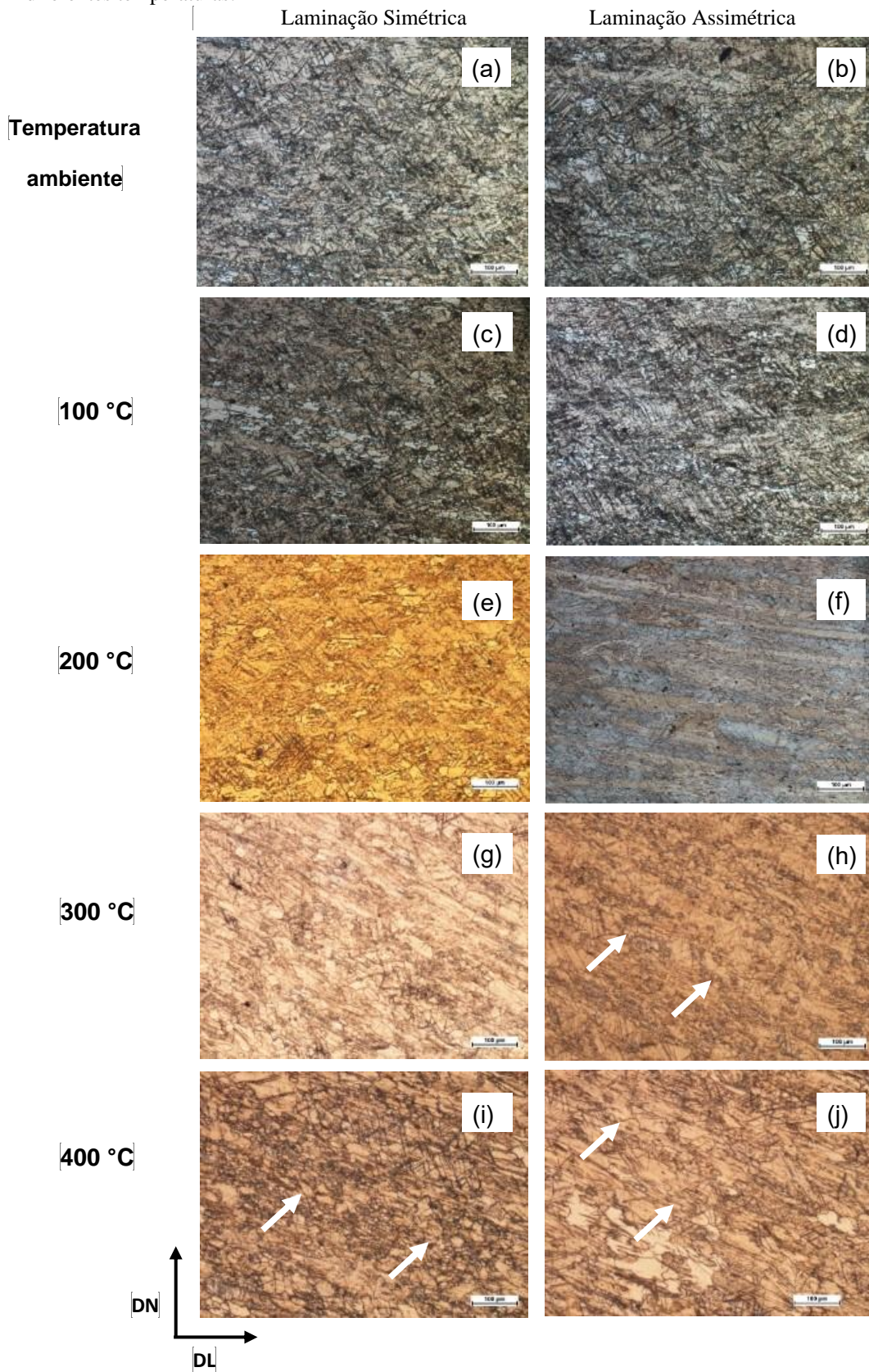
técnicas que induzem maior quantidade de deformação no material com o auxílio de temperatura podem resultar em uma microestrutura de granulação fina consistindo principalmente de grãos cristalitos favorecendo a recristalização em menores temperaturas [16-17-18-19]. De acordo com PADILHA (2005), o principal potencial termodinâmico para que a migração de contornos de alto ângulo aconteça, ou seja, a recristalização ocorra, é a energia armazenada durante a deformação.

FIGURA 3 - Micrografias das amostras laminadas em condições simétrica e assimétrica com redução de 10% em diferentes temperaturas.



A Figura 4 apresenta as micrografias das amostras laminadas simetricamente e assimetricamente com reduções de 20%.

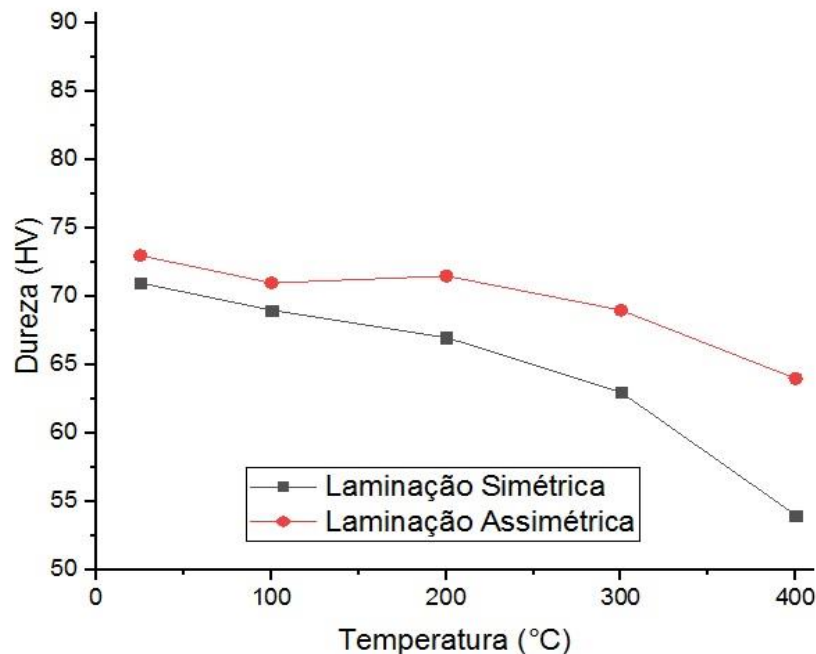
FIGURA 4 - Micrografias das amostras laminadas em condições simétrica e assimétrica com redução de 20% em diferentes temperaturas.



Nota-se que, como na técnica empregando a redução de 10%, é possível observar (Figura 4) a presença de maclas para todas as condições. No entanto, o número destas é significativamente reduzido a partir de 300 °C, assim como já havia sido observado para as amostras reduzidas em 10% (Figura 3).

Quanto a indícios de recristalização, nota-se também a mesma tendência observada para as amostras reduzidas em 10%. Para a laminação simétrica nota-se que recristalização pode ter ocorrido na temperatura de 400 °C, devido aos grãos equiaxiais e de menores tamanhos indicados pelas setas na Figura 4 (i). Já para a laminação assimétrica, nota-se que possa ter ocorrido já a partir da temperatura de 300°C. Os resultados do ensaio de dureza analisado por meio da microdureza Vickers (HV) para as amostras com redução de 10% foram plotados no gráfico mostrado na Figura 5.

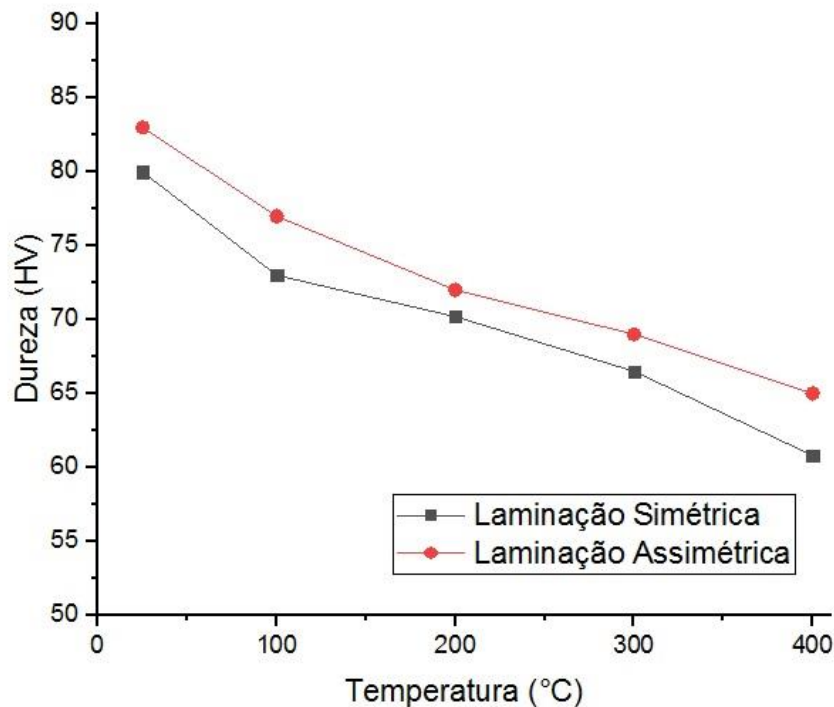
FIGURA 5 – Dureza Vickers para amostras laminadas simetricamente e assimetricamente com 10% de redução



O material pré-laminado apresentava um valor de dureza próximo a 60 HV. Observando o gráfico nota-se que após os processos de laminação simétrico e assimétrico em temperatura ambiente, ocorreu um aumento da dureza para aproximadamente 71 e 73 HV, este efeito pode estar relacionado ao encruamento das amostras após a laminação nesta temperatura. Com o aumento da temperatura nos processos, observa-se um decaimento da dureza passando de 71 HV para 59 HV em 400 °C na laminação simétrica e de 73 HV para 64 HV na laminação assimétrica.

A Figura 6 apresenta o gráfico da Microdureza Vickers (HV) para as amostras laminadas simetricamente e assimetricamente com reduções de 20% de espessura.

FIGURA 6 – Dureza Vickers para amostras laminadas simetricamente e assimetricamente com 20% de redução



Com base no gráfico apresentado na Figura 6 nota-se que a dureza aumenta em relação ao material pré-laminado (60 HV) para 80 HV para o simétrico e 83 HV para o assimétrico nos processos realizados a temperatura ambiente. Conforme os processos vão sendo realizados com temperatura maiores torna-se possível analisar um decaimento da dureza, chegando em 400 °C a aproximadamente 61 HV para o simétrico e 65 HV para o assimétrico.

Em todos os processos realizados de laminação assimétrica com reduções de 10% e 20%, vale ressaltar que todas essas amostras apresentaram maior valor de dureza que os ensaios realizados no processo de laminação simétrica. Este aumento da dureza no processo de laminação assimétrica poder ser observado em estudo já realizado [20], onde o efeito pode estar atrelado ao maior nível de encruamento que é induzido no material durante o processo assimétrico [16-17]. Pois, segundo PADILHA (2005), as heterogeneidades de deformação são regiões que contém grande quantidade de defeitos cristalinos e distorções na rede cristalográfica. Essas regiões, contém “núcleos de recristalização em potencial” que são formados na deformação plástica. Na liga AZ31, por exemplo, a recristalização começará nas interseções das maclas ou junto a elas.

4 CONCLUSÃO

Para a técnica de laminação simétrica nas reduções de espessura estudadas, observou-se características microestruturais que podem indicar a ocorrência de recristalização na temperatura

de 400°C. Mas, quando analisados os resultados obtidos para a laminação assimétrica nas duas reduções, 10% e 20%, há indícios que a recristalização tenha ocorrido já a partir da temperatura de 300°C. Deste modo, acredita-se que a recristalização tenha ocorrido em menores temperaturas no processo de laminação assimétrica do que no simétrico, por causa do elevado nível de deformação e encruamento imposto no material, acarretando em novos núcleos de recristalização. Os resultados do ensaio de dureza mostraram que as amostras submetidas ao processo de laminação assimétrica apresentaram valores mais elevados de dureza em comparação com as amostras laminadas simetricamente em todas as condições analisadas. Também, sendo justificado pelo elevado nível de deformação imposto no processo assimétrico. Graus de deformação elevados aumentam a quantidade de núcleos pré-existentes no material, bem como o potencial termodinâmico para a recristalização.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEFET-RJ pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Friedrich, H.E., Mordike B.L., Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [2] Gupta, M., Sharon N. M. L., Magnesium, Magnesium Alloys, and magnesium Composites: A John Wiley e Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2011.
- [3] ASM Internacional Handbook Committee. ASM specialty Handbook: Magnesium and magnesium alloys. Materials Park, Ohio. USA, 1999.
- [4] PADILHA, A. F.; SICILIANO Jr., F. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. São Paulo: ABM. 3ª edição, 232 p, 2005.
- [5] COELHO, R. S.; KOSTKA, A.; PINTO, H.; RIEKEHR, S.; KOC, M.; PYZALLA, A. R. Microstructure and mechanical properties of magnesium alloy AZ31B laser beam welds, *Materials Science and Engineering A*, vol. 485, pp. 20–30, 2008.
- [6] LOU, X.Y.; LI, M.; BOGER, R.K.; AGNEW, S.R.; WAGONER, R.H. Hardening evolution of AZ31B Mg sheet, *International Journal of Plasticity*, v. 23, p. 44–86, 2007.
- [7] VALIEV, R.Z., Y. Estrin, Z Horita, T.G. Langdon, M.J. Zehetbauer, e Y.T. Zhu. “Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation.” *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* 58. p 33-39, 2006.
- [8] ESTRIN, Y., e A. Vinogradov. “Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science.” *Acta Materialia* (Elsevier Ltd.). v. 61, p 782-817, 2013.
- [9] RAMAIANE, S, A., MEDEIROS, Neil. Determinação das curvas de carga do polipropileno deformado via técnica de prensagem em canais equiangulares. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba. v. 6, n. 3, p. 12075-12089, 2020.
- [10] KIM W. J. et al. Microstructure and mechanical properties of Mg–Al–Zn alloy sheets severely deformed by asymmetrical rolling. *Scripta Materialia*, v. 56, p. 309–312, 2007.
- [11] YU, H. et al. Asymmetric Cryorolling for Fabrication of Nanostructural Aluminum Alloys, *Scientific Reports*, v. 2, p. 1-5, 2012.
- [12] HALLOUMI, A, C., DESRAYAUD, B., BACROIX, E., RAUCH, F., Montheillet, A simple analytical model of asymmetric rolling, *Arch. Metall. Mater.* v. 57, p.425–435, 2012.
- [13] YU, H. LIANG., LU, C., TIEU, A. KIET., LI, H. JUN., Godbole, A. & Zhang, S. Hong. Special rolling techniques for improvement of mechanical properties of ultrafine-grained metal sheets: a review. *Advanced Engineering Materials*. v. 18, n. 5, p. 754-759, 2016.
- [14] X. Liu, J.J. Jonas, L.X. Li, B.W. Zhu, Flow softening, twinning and dynamic recrystallization in AZ31 magnesium, *Mater. Sci. Eng. A*. v. 583, p. 242-253, 2013.

- [15] GONTARSKI, T. L.; CASALI, R. M.; MIKOWSKI, A.. Dureza vickers - definição, normatização e perspectivas de pesquisa: uma revisão / vickers hardness - definition, standardization and research perspectives: a review. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, p. 15736-15754, 2021.
- [16] Humphreys FJ, Hatherly M. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Volume Único. 2º Edição. Oxford: Editora Pergamon, (2004).
- [17] Zhu, Y.T., Wang, Z.L., Langdon, T.G. Nanostructured materials-processing, structures, properties and applications – Preface, *Journal of Materials Science*. v. 42, p.1401-1402, 2007.
- [18] YU, H. et al. Asymmetric Cryorolling for Fabrication of Nanostructural Aluminum Alloys, *Scientific Reports*, v. 2, p. 1-5, 2012.
- [19] SAITO, Y. et al. Deformation and Recrystallization Behavior of Ferritic Stainless Steel in High Speed Hot Rolling. *Tetsu-to-Hagane*, v. 72, p. 799-806, 1986.
- [20] Shore, D, P., Van Houtte, D., Roose, A., Van Bael., Multiscale modelling of asymmetric rolling with an anisotropic constitutive law, *Comptes Rendus Mécanique*. v. 346, p. 724–742, 2018.