

ESTAMPABILIDADE A QUENTE DA LIGA DE MAGNÉSIO AZ31

André Fabiano Rodrigues Araujo, andrefrarujo@yahoo.com.br¹

Gabriel Martinelli Zapata, gmzapata@fem.unicamp.br¹

Sergio Tonini Button, sergio1@fem.unicamp.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, C.P 6122, CEP 13083-970 – Campinas – SP

Resumo: O objetivo principal deste trabalho é a determinação da estampabilidade a quente de uma chapa espessa da liga de magnésio AZ31B. Para tanto, dessa chapa foram retirados corpos-de-prova que foram submetidos a ensaios de tração em diferentes temperaturas e taxas de deformação e, a partir dos resultados obtidos durante os ensaios, analisaram-se os efeitos da temperatura e da taxa de deformação sobre as propriedades mecânicas sob tração. Além disso, mapas de processamento foram elaborados de forma a se determinar as regiões seguras de deformação a quente, definidas pelo máximo rendimento na dissipação de energia. Esses mapas também foram úteis para se definir as regiões onde podem ocorrer instabilidades durante a deformação da liga AZ31B, que devem ser evitadas no planejamento da estampagem a quente dessa liga de magnésio.

Palavras-chave: Metalurgia física, chapas espessas, mapa de processamento, ensaio de tração a quente.

1. INTRODUÇÃO

As ligas de magnésio apresentam baixa densidade com boa rigidez específica e resistência a tração (Kleiner et al., 2004 e Avedesian, 1999). Além desses aspectos, os benefícios ecológicos trazidos pelo uso destas ligas, como a economia energética, fizeram com que diversas indústrias, dentre elas automobilística, aeronáutica, e de fabricação de veículos de transportes em geral, tivessem maior interesse no uso de ligas de magnésio, que são classificadas como metais estruturais leves (Mordike et al., 2001; Rodriguez et al., 2016). Um estudo de ciclo de vida realizado para um bloco de motor comparando ferro fundido, alumínio e magnésio mostrou que o magnésio tem menores impactos ambientais se comparados com o ferro fundido e o alumínio, com menores emissões de CO₂ equivalente desde a extração de magnésio até o fim de vida do veículo após 200000km de uso (Tharumarajah et al., 2007). Ainda na indústria automobilística, o interesse dos fabricantes nessas ligas está no fato do grande potencial de redução de massa, devido ao fato do magnésio ser o metal estrutural mais leve dentre os todos os metais (Antoniswamy et al., 2015).

Com relação ao consumo, além do que foi mencionado no parágrafo anterior, o uso de ligas de magnésio vem aumentando ao longo dos anos devido a uma série de estudos científicos que permitem o uso dessas ligas numa maior variedade de processos de fabricação (U.S.Geological Survey (2015). Antigamente, as ligas de magnésio eram usadas na forma de fundidos, mas com o desenvolvimento de novos estudos, é possível usar essas ligas em processos de extrusão, laminação e estampagem (Antoniswamy et al., 2015). Além da maior abrangência de aplicação de ligas de magnésio em processos de fabricação, os efeitos ambientais nocivos são reduzidos se comparados com outros materiais (Tharumarajah et al., 2007).

Na última década, vários estudos vêm sendo feitos com o intuito de aprimorar a estampagem a quente a partir do entendimento de como a microestrutura e o processamento termomecânico afetam o comportamento das ligas de magnésio. Dentre essas ligas, destaca-se a AZ31B (Mg – 3%Al – 1%Zn – 0,3%Mn) que foi empregada neste estudo com o objetivo principal de determinar as melhores condições de estampagem a quente dessa liga. A grande contribuição deste estudo em relação aos que vêm sendo realizados, é a determinação da estampabilidade a quente de uma chapa espessa, com 3mm de espessura, diferentemente da quase totalidade de outros estudos que avaliaram chapas mais finas, com cerca de 1mm de espessura.

2. CARACTERÍSTICAS DA LIGA DE MAGNÉSIO AZ31B

A maioria dos componentes oriundos de ligas de Mg são feitos por fundição o que proporciona uma grande flexibilidade de projeto e integração de componentes e consequente redução dos custos de fabricação (Joost et al., 2017). Na indústria automotiva, o processo de fundição de magnésio é bem desenvolvido e empregado na fabricação de componentes veiculares (Luo e Mages, 2013). No entanto, há uma demanda de desenvolvimento de processos primários de conformação, como estampagem, por exemplo, bem como processos secundários que são usados na montagem de subsistemas com ligas de magnésio que sejam mais propícias a esses processos (Joost et al., 2017).

Sabe-se que o magnésio apresenta pouca estampabilidade em temperaturas baixas e nos processos de conformação tipicamente encontrados na indústria automobilística. À temperatura ambiente, as ligas de magnésio têm um comportamento frágil, de forma que não é possível obter-se uma deformação plástica estável (Rodriguez et al., 2016).

Como exemplo de liga desenvolvida para a estampagem, a chapa de liga de magnésio ZEK100 possui um elevado limite de estampabilidade para uma ampla faixa de estados de deformação quando comparada com a liga de magnésio convencional AZ31B na temperatura ambiente e a temperaturas elevadas devido, parcialmente, à quase eliminação da textura, o que é possível em ligas com terras raras. De forma similar, a adição de cálcio nas ligas de magnésio, aumenta

o alongamento à tração e durante a estampagem devido à interação da maclação, da recristalização, e do desenvolvimento de uma textura favorável.

Os efeitos vantajosos da alteração da composição química sobre a textura podem atuar juntamente com outros efeitos do uso de elementos de liga, como a menor razão das tensões decompostas de cisalhamento críticas entre os planos basais e não-basais, o aumento da propensão ao deslizamento cruzado, a modificação do comportamento de maclação, o endurecimento pelo uso de precipitados com novas composições químicas, e a precipitação de partículas não-basais para promoverem o endurecimento preferencialmente nos sistemas de escorregamento basais.

Além da modificação dos componentes da liga e do processo de fabricação das chapas de liga de magnésio, a implementação de novos processos de estampagem que usam taxas de deformação não convencionais e conformação localizada, pode melhorar a estampabilidade de peças com geometrias complexas. Dentre esses processos, destaca-se a estampagem a quente, (Joost et al., 2017).

As ligas de magnésio podem alcançar desempenhos mecânicos similares às ligas de alumínio com tratamentos termomecânicos apropriados. Ainda assim, mesmo com o uso de tais tratamentos, características como baixos limites de escoamento, de deformação e resistência à fratura podem permanecer, pois, estão diretamente relacionados com a composição química e o histórico de produção da liga.

A adição de elementos como alumínio e zinco como elementos de liga junto ao magnésio, formam o sistema Mg-Al-Zn, com ligas que são utilizadas em veículos de transporte terrestre e aéreo. Entre as ligas desse sistema, destacam-se as ligas AZ31, AZ92 e AZ61, usadas no interior de automóveis (reforços de portas, por exemplo), gabinetes de computadores, câmeras fotográficas e em estruturas de aeronaves (Letzig et al., 2008).

2.1. Comportamento Mecânico no Ensaio de Tração

De acordo com Padilha (2005), os escorregamentos causados por forças cisalhantes de planos cristalinos e a formação de maclas na estrutura dão origem à deformação plástica das ligas de magnésio e dependem de variáveis como temperatura, taxa de deformação, propriedades do material a ser deformado, tais como microestrutura, tamanho de grão, concentração das impurezas e textura.

Conforme eleva-se a temperatura, não há a ocorrência dos deslocamentos dos planos basais, e, conseqüentemente, a tensão de escoamento e a anisotropia plástica diminuem, favorecendo o aumento da ductilidade da liga.

Devido ao seu arranjo hexagonal compacto, com razão dos parâmetros da rede cristalina c/a de 1,624, a deformação do magnésio depende principalmente do deslizamento basal $\langle a \rangle$ à temperatura ambiente. Embora a tensão de cisalhamento para o escorregamento basal seja 1/100 da mesma tensão para escorregamentos não basais nos planos prismático e piramidal, o magnésio possui somente dois sistemas basais de escorregamento, valor muito menor que os cinco sistemas independentes necessários para uma deformação homogênea, de acordo com o critério de von Mises.

Dessa forma, para obedecer a esse critério, torna-se necessária a ativação de escorregamentos não basais e de maclas de origem mecânica. Dessa forma, a deformação do magnésio depende de fatores como orientação dos grãos, temperatura de deformação, taxa de deformação, entre outros fatores. (Changjian et al., 2015).

Quando se analisam curvas de tensão-deformação obtidas em ensaios de tração com a liga AZ31B, com variação de temperatura para cada curva, é possível perceber uma diminuição da tensão de escoamento e um aumento de ductilidade conforme se aumenta a temperatura de ensaio. (Yi et al., 2006).

A resistência ao escoamento da liga AZ31B também diminui com a diminuição da taxa de deformação em processos de deformação a quente. Como exemplo, em condições de temperatura ambiente, as ligas AZ31B possuem alongamentos entre 10% e 15%, sob moderadas taxas de deformação. Por outro lado, quando se tem temperaturas acima de 200°C, os valores de alongamento podem superar os 70%. No entanto há um limite para o aumento de temperatura. Valores de aquecimento acima de 400°C há geração de uma acentuada oxidação do material, tornando seu uso impróprio para aplicações mecânicas (Yi et al., 2006).

As ligas de magnésio, dentre elas a AZ31B, possuem baixa ductilidade à temperatura ambiente devido à sua estrutura hexagonal compacta (HCC). No entanto, esta propriedade mecânica pode ser melhorada com a elevação da temperatura (Fuh-Kuo Chen, 2003). Essa dependência da deformação com a temperatura mostra que há transições de diferentes mecanismos para o aumento da mobilidade das discordâncias e outros sistemas de deslizamento, além daqueles que envolvem o escorregamento de planos basais (0001), como o escorregamento de contorno de grãos e a recristalização dinâmica (Guodong et al., 2016).

2.2. Mapas de Processamento

Os mapas de processamento foram concebidos por Prasad (2003), que se basearam no denominado modelo material dinâmico (DMM – do inglês *dynamic material model*), e têm sido usados como uma ferramenta de projeto e otimização de processos de conformação a quente de ligas metálicas.

Esses mapas representam a eficiência de dissipação de energia e a instabilidade do escoamento metálico durante a deformação de uma dada liga metálica, ao variar-se a taxa de deformação, a temperatura e o grau de deformação em ensaios de tração, compressão ou torção.

O método de construção desses mapas baseia-se no modelo de altas deformações plásticas contínuas e pode ser usado para a análise do escoamento em função de mecanismos microestruturais tais como, recristalização dinâmica, recuperação dinâmica, aquecimento adiabático, crescimento anormal de grãos, entre outros, a fim de se determinar as regiões estáveis de escoamento, evitar regiões de escoamento instável e a consequente ocorrência de trincas, e, finalmente, otimizar os parâmetros de processos realizados a quente melhorando, assim, a qualidade do produto final.

Um mapa de processamento é obtido pela sobreposição do mapa de dissipação de energia e do mapa de instabilidade obtidos para uma dada liga metálica para uma faixa de temperaturas e de taxas de deformação, determinadas para uma deformação constante (Wang et al., 2016), de acordo com o procedimento apresentado por Li et al. (2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como mencionado na introdução deste trabalho, estudou-se a estampabilidade a quente de uma chapa da liga de magnésio AZ31B, com 3mm de espessura e com composição química apresentada na Tab.1, tanto a obtida na análise por fluorescência de raios-X quanto a nominal definida pela norma correspondente.

Essa liga foi escolhida pois vem sendo usada em inúmeros projetos de pesquisa e publicações no exterior, tornando seu uso atrativo devido à facilidade de se comparar os resultados aqui obtidos com os de outros trabalhos, mas que utilizam em sua maioria chapas mais finas, com cerca de 1mm de espessura.

Tabela 1 - Comparação entre análise e valores de referência para composição química

Elementos Químicos	Análise - % em Peso	Padrão - % em Peso
Alumínio - Al	4,11%	2,50 – 3,50%
Zinco - Zn	1,36%	0,60 – 1,40%
Manganês - Mn	0,22%	0,20%
Ferro - Fe	0,004%	0,005%
Cobre - Cu	0,0003%	0,05%
Níquel - Ni	0,005%	0,005%
Silício - Si	0,030%	0,100%
Cálcio - Ca	0,0007%	0,0400%
Magnésio - Mg	Balanço	Balanço

Os ensaios de tração isotérmicos foram realizados usando diferentes temperaturas e taxas de deformação, que foram mantidas constantes ao longo de cada ensio. Os corpos-de-prova, com as dimensões indicadas pela norma ASTM-E21-92 (ASTM, 1998) foram obtidos a partir do corte com jato d'água.

Ao todo 30 corpos de prova foram ensaiados de acordo com as dez combinações de temperatura e taxa de deformação apresentadas na Tab, 2.

Tabela 2 - Condições usadas nos ensaios de tração para cada uma das três direções dos corpos-de-prova

Temperatura (°C)	Taxa de Deformação (1/s)		
Ambiente	0,001	-	-
250°C	0,001	0,01	0,1
310°C	0,001	0,01	0,1
370°C	0,001	0,01	0,1

A fim de avaliar a anisotropia da chapa como fornecida, foram fabricados corpos-de-prova orientados em três direções, quais sejam, paralela (DL), perpendicular (DT) e a 45° em relação à direção de laminação.

Com os resultados de tensão versus deformação verdadeiras obtidos nesses ensaios de tração, foram elaborados os mapas de processamento utilizando os procedimentos indicados por Prasad (2003).

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Ensaios de Tração

As Figs. 1 a 3 apresentam as curvas de tensão x deformação verdadeiras obtidas nos ensaios de tração variando-se as temperaturas, as taxas de deformação e a direção de extração do corpo-de-prova.

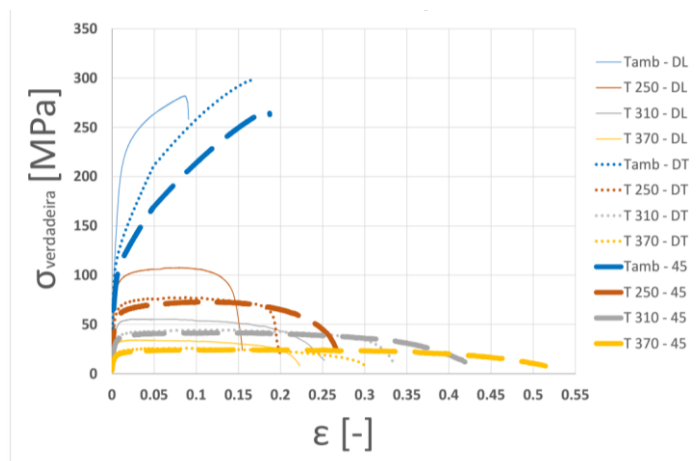


Figura 1. Curvas tensão-deformação sob tração com taxa de deformação de 0,001/s

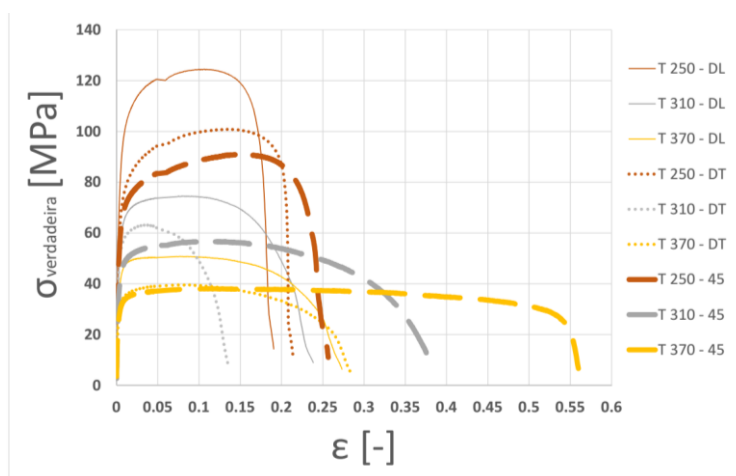


Figura 2. Curvas tensão-deformação sob tração com taxa de deformação de 0,01/s

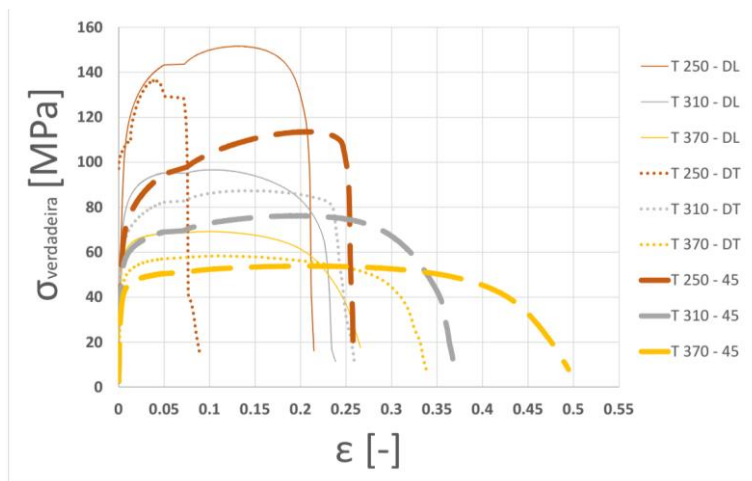


Figura 3. Curvas tensão-deformação sob tração com taxa de deformação de 0,1/s.

Como pode ser observado nessas figuras, maiores taxas de deformação diminuem os valores finais de deformação verdadeira, bem como aumentam significativamente as tensões.

Além disso, para cada taxa de deformação, conforme se aumenta a temperatura de ensaio, as tensões máximas verdadeiras diminuem e a deformação verdadeira final aumenta. Assim, o aumento da temperatura de ensaio de tração, aliado com uma menor taxa de deformação, torna a deformação mais eficiente.

Como discutido na revisão sobre as ligas de magnésio, a deformação plástica dessas ligas ocorre por meio de escorregamentos, resultantes de esforços de cisalhamento, de planos cristalinos e pela formação de maclas, e depende principalmente da temperatura, da taxa de deformação, e das propriedades do material a ser deformado como sua microestrutura, tamanho de grão, concentração de impurezas e presença de texturas mais favoráveis à deformação.

Com o aumento da temperatura, os deslocamentos dos planos não basais são ativados, a tensão de escoamento e a anisotropia plástica diminuem, favorecendo o aumento da ductilidade da liga.

Isso fica bem evidente ao se analisar os gráficos apresentados Figs. 1, 2 e 3, em especial os resultados dos corpos-de-prova retirados a 45° em relação à direção de laminação, pois observa-se que foram os que apresentaram os maiores resultados de deformação na ruptura.

As Figs. 4, 5 e 6 apresentam os mesmos resultados das figuras anteriores, porém agrupados em função da temperatura de ensaio a fim de analisar a influência da taxa de deformação.

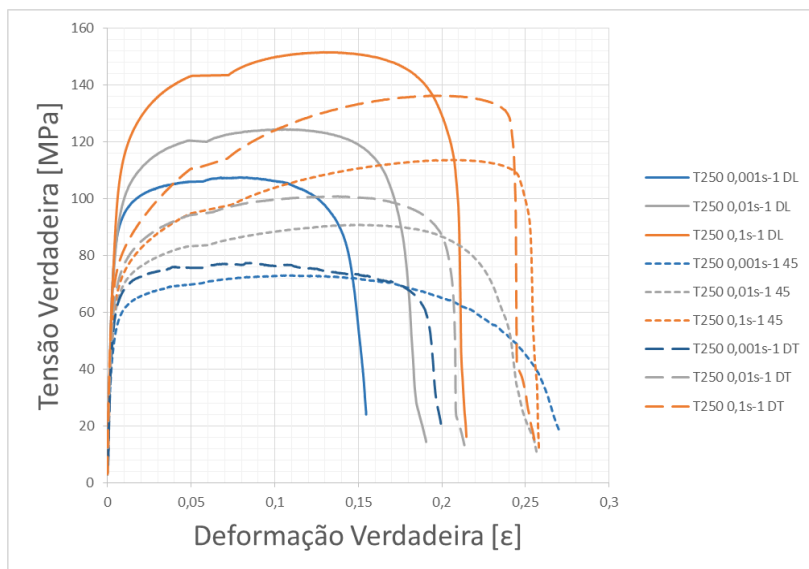


Figura 4. Curvas tensão-deformação sob tração à temperatura de 250°C

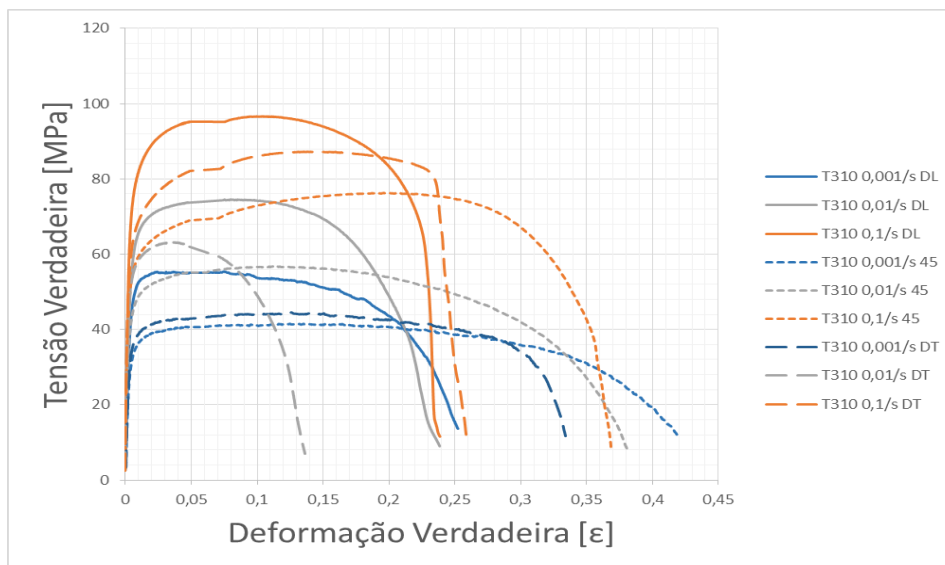


Figura 5. Curvas tensão-deformação sob tração à temperatura de 310°C

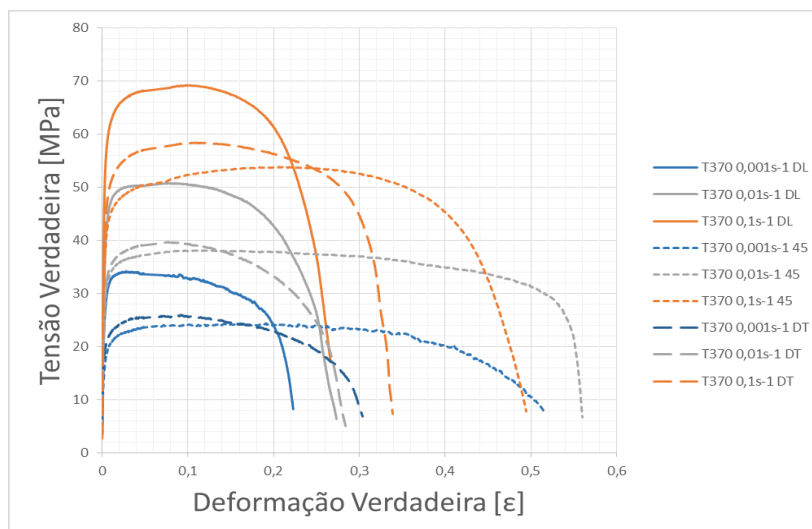


Figura 6. Curvas tensão-deformação sob tração à temperatura de 370°C

Analisando-se as Figs. 7 a 9 que contêm os valores máximos de tensão verdadeira e de deformação até a fratura obtidos em todos os ensaios realizados, pode-se concluir que há uma tendência de diminuição da tensão e de aumento da deformação até a fratura conforme se diminui a taxa de deformação e se aumenta a temperatura.

No caso dos ensaios realizados em temperatura ambiente, que durante os ensaios foi de aproximadamente 24°C, pode-se observar que os corpos de prova se romperam prematuramente, o que provavelmente deve ao fato das ligas de magnésio, dentre elas a liga AZ31B, possuírem baixa ductilidade à temperatura ambiente devido à sua estrutura hexagonal compacta (HCC).

O comportamento mecânico desfavorável das ligas de magnésio é atribuído à tendência de desenvolvimento de texturas similares à dos cristais, com uma alta anisotropia e assimetria. A baixa assimetria associada com a estrutura hexagonal compacta não permite que ocorra um deslizamento favorável ao longo das direções piramidais.

Ao invés disso, o deslizamento ocorre em direções dentro dos planos basais que são incapazes de promover deformações grandes (Imandoust et al., 2016).

No entanto, ainda no caso de ensaio à temperatura ambiente, ao se considerar as diferentes direções que os corpos-de-prova foram cortados, observa-se que o corpo-de-prova cortado a 45° apresentou uma deformação até a fratura maior que nas direções DL e DT, além de apresentar valores menores de tensão verdadeira durante a deformação.

Isso provavelmente se deve a uma melhor orientação dos grãos cristalinos que favoreceu a obtenção de uma maior deformação. O mesmo pode ser observado em ensaios realizados em temperaturas maiores, onde, independentemente da taxa de deformação utilizada, os corpos-de-prova cortados a 45° da direção de laminação apresentaram menores valores de tensão verdadeira.

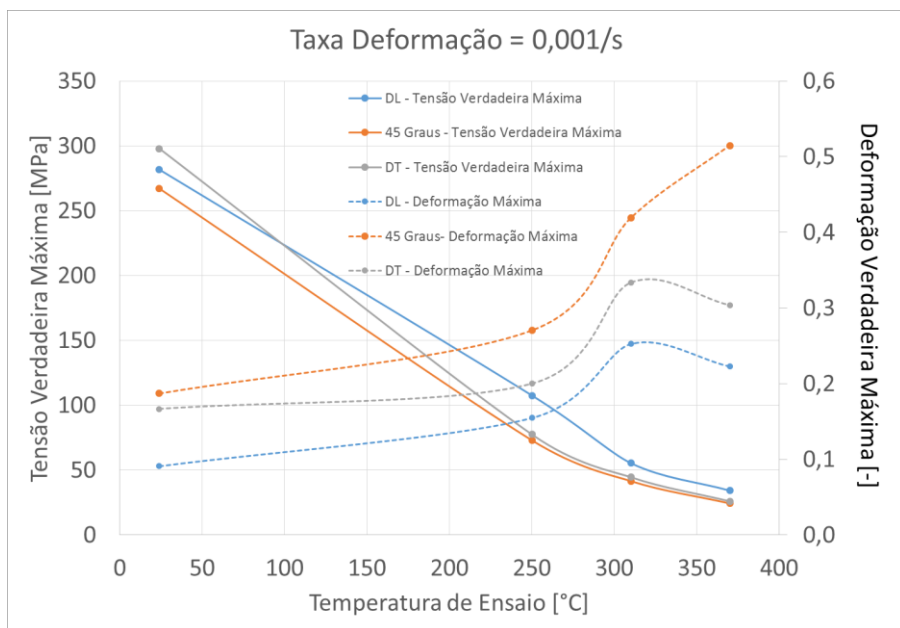


Figura 7. Tensão verdadeira e deformação até a fratura máximas - taxa de deformação de 0,001/s

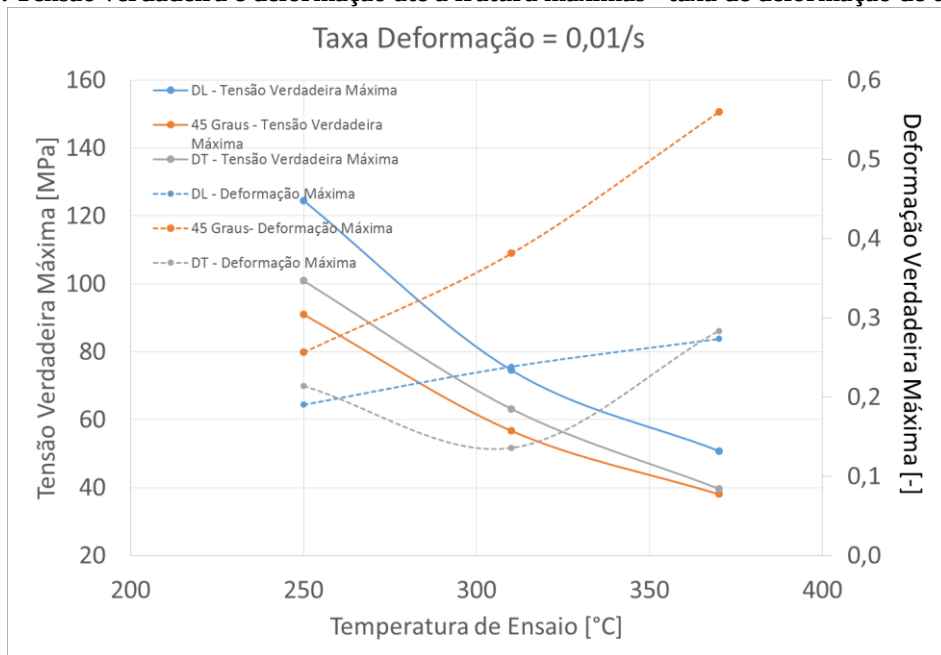


Figura 8. Tensão verdadeira e deformação até a fratura máximas - taxa de deformação de 0,01/s

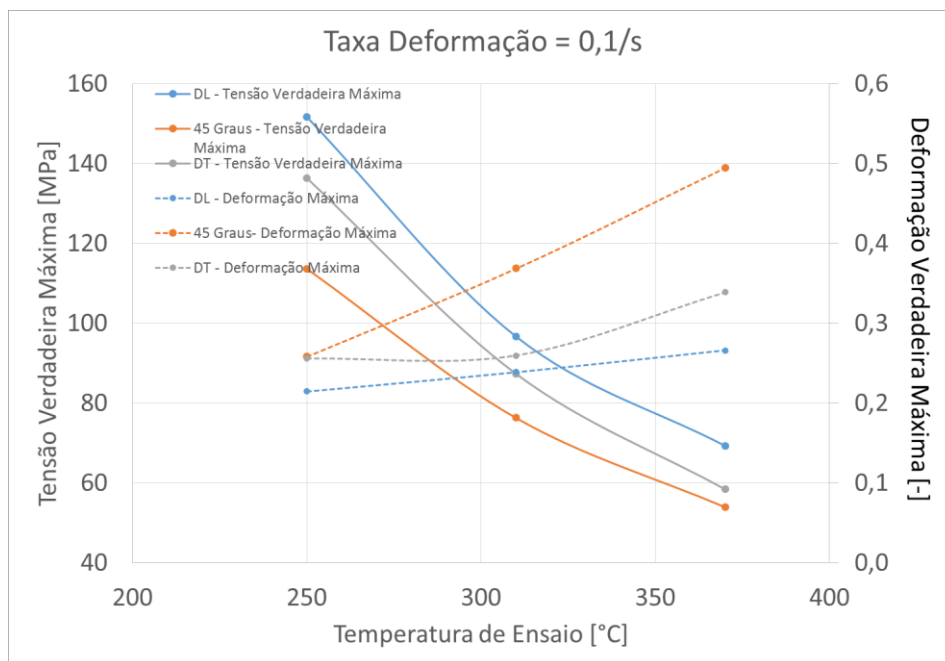


Figura 9. Tensão verdadeira e deformação até a fratura máximas - taxa de deformação de 0,1/s

4.2 Mapas de Processamento

A partir dos resultados de tensão versus deformação verdadeiras obtidos nos ensaios de tração a quente, foram construídos mapas de processamento para os graus de deformação verdadeira (ϵ) iguais 0,1; 0,125; 0,15; 0,2 e 0,24.

Os mapas apresentados mostrados nas Figs. 10 a 14 foram elaborados com os resultados obtidos para os corpos-de-prova cortados a 45° em relação à direção de laminação da chapa, pois foi essa direção que apresentou as maiores deformações até a fratura e as menores tensões verdadeiras, ou seja, a maior ductilidade e consequentemente, a maior estampabilidade a quente entre as direções avaliadas.

Nesses mapas, as isolinhas com valores referem-se à eficiência de dissipação de energia, de modo que valores maiores representam condições de processamento mais eficientes, enquanto as regiões sombreadas em cinza representam as regiões instáveis, ou seja, que apresentam coeficientes de instabilidade negativos segundo Prasad (2003) que podem representar condições inseguras de processamento a quente da liga AZ31B.

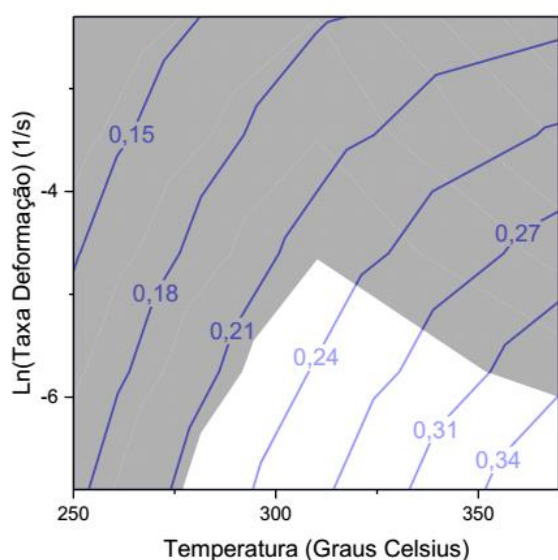


Figura 10. Mapa de processamento para $\epsilon = 0,100$

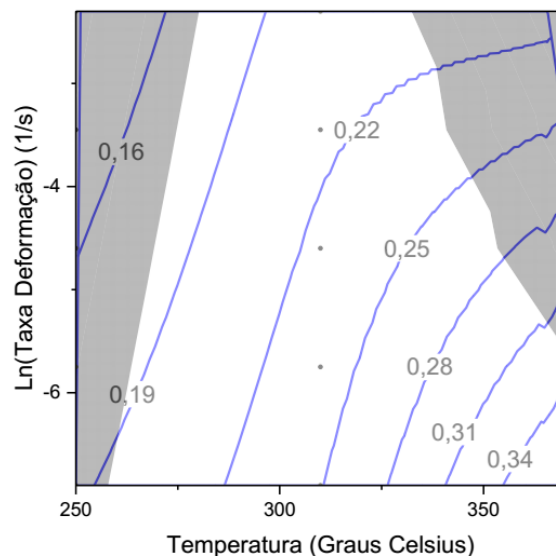


Figura 11. Mapa de processamento para $\epsilon = 0,125$

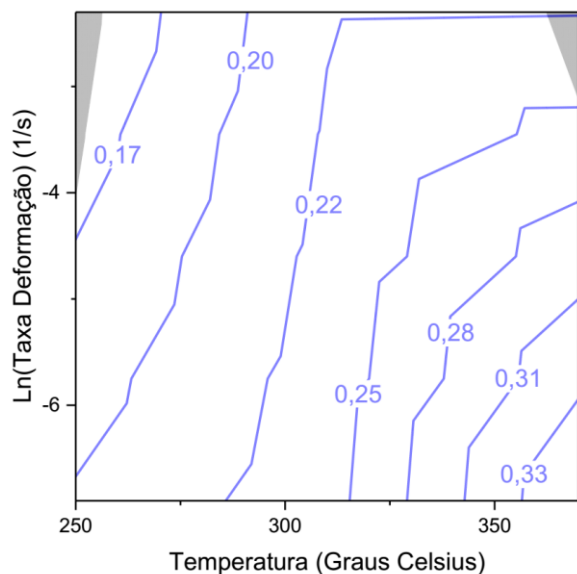


Figura 12. Mapa de processamento para $\varepsilon = 0,150$

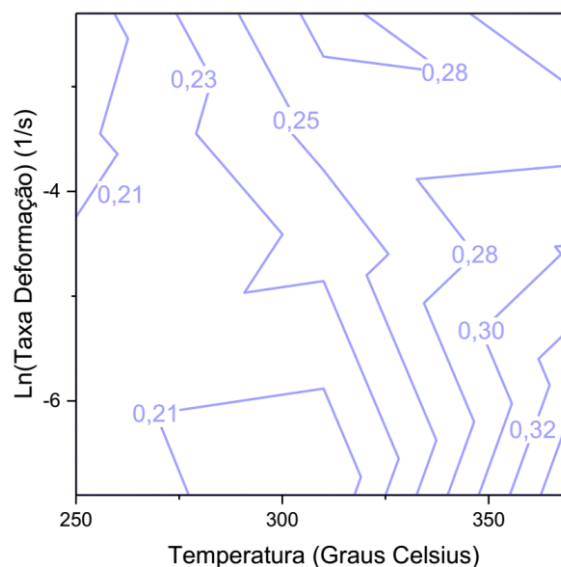


Figura 13. Mapa de processamento para $\varepsilon = 0,200$

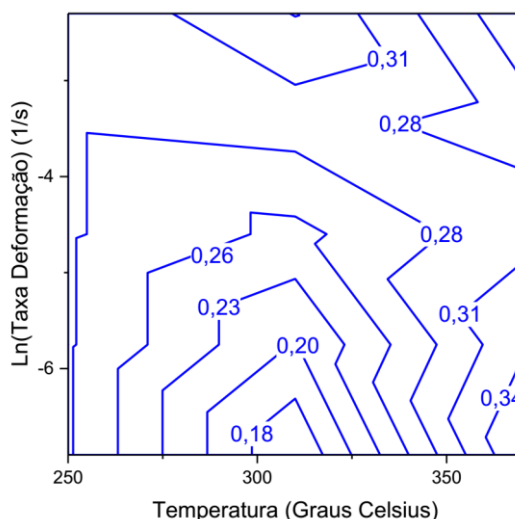


Figura 14. Mapa de processamento para $\varepsilon = 0,240$

Analisando-se esses mapas pode-se observar que ao se aumentar a deformação para a construção de cada mapa, as regiões de instabilidade (área sombreada) vai diminuindo até desaparecer completamente para deformações $\varepsilon > 0,15$, o que indica que em maiores deformações há tempo, calor e energia mecânica suficientes para que a recrystalização dinâmica ocorra, além da diminuição do escorregamento dos planos basais pela ativação de novos sistemas de deslizamento, consequentemente, diminuindo a tensão de escoamento e a anisotropia plástica, favorecendo o aumento da ductilidade da liga, como também foi reportado por Rao et al. (2012).

Além disso, conforme se aumenta a deformação, a elevação da densidade de discordâncias favorece a formação de novos grãos pela recrystalização dinâmica.

Outro aspecto importante de se observar é que não há instabilidade em regiões de baixas taxa de deformação e temperaturas elevadas devido provavelmente à significativa redução da tensão de cisalhamento crítica (CRSS) para os sistemas de escorregamento basal, prismático e piramidal com o aumento da temperatura e diminuição da taxa de deformação como observado por Imandoust et al. (2016).

5. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura, da taxa de deformação e da direção de extração dos corpos-de-prova em ensaios de tração a quente de uma chapa espessa da liga de magnésio AZ31B e determinar a estampabilidade dessa liga pela construção de mapas de processamento.

Analisando-se os resultados obtidos nos ensaios de tração, pode-se concluir que quanto maior a temperatura, maior a ductilidade da liga de magnésio AZ31B.

Com relação à taxa de deformação, o efeito é o oposto, pois menores taxas de deformação favorecem o escoamento do material pelo aumento do tempo de deformação.

No que se refere à direção de extração dos corpos-de-prova, os que foram retirados a 45° em relação à direção de laminação apresentaram os resultados mais favoráveis, com maiores deformações até a fratura e tensões menores.

Além disso, a análise dos mapas de processamento elaborados para os corpos-de-prova retirados a 45°, permitiu concluir que quanto maior a deformação usada para a elaboração de cada um dos mapas, menor foi a região de instabilidade.

Para os mapas relativos às menores deformações as regiões instáveis estão bem definidas. Já nas condições regiões de baixa deformação e alta temperatura (maior que 350°C) não houve instabilidade. A partir da deformação igual a 0,15 a região de instabilidade vai desaparecendo com o aumento da deformação, provavelmente devido ao favorecimento da recristalização dinâmica pela maior energia mecânica acumulada e pelo maior tempo de processo, suficiente para promover a modificação da microestrutura.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro deste estudo pela FAPESP (Processo 2016/15792-8) e ao CNPq pela bolsa de estudos de um dos autores.

7. REFERÊNCIAS

- Antoniswamy, A. R., Taleff, E. M., Hector Jr., L. G., Carter, J. T., 2015, "Plastic Deformation And Ductility Of Magnesium AZ31B-H24 Alloy Sheet", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 631, pp. 1–9.
- ASTM, American Society for Testing Materials, 1998, "ASTM E21–92 - Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials".
- Avedesian, M., Baker, H., 1999, "Magnesium And Magnesium Alloys". ASM Specialty Handbook. ASM International. Wiley-Vch. pp. 194.
- Changjian, G., Baolin, W., Fang, L., Wenwei, T., Zhenyu, H., 2015, "Dynamic Tensile Behavior of AZ31B Magnesium Alloy at Ultra-High Strain Rates". *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 28(2), pp. 593–599.
- Fuh-Kuo C., Tyng-Bin H., 2003, "Formability of Stamping Magnesium-Alloy AZ31 Sheets". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, pp. 643–647.
- Guodong L., Renlong X., Xiaogang S., Chunpeng W., Qing Liu, 2016, "The Mechanism of Twinning Activation and Variant Selection in Magnesium Alloys Dominated by Slip Deformation". *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 687, pp. 352–359.
- Imandoust, A., Barrett, C. D., Al-Samman, T., Inal, K. A., And El Kadiri, H., 2016. "A Review on the Effect of Rare-Earth Elements on Texture Evolution during Processing of Magnesium Alloys". *Journal of Materials Science*, Vol. 52, 1, pp. 1–29.
- Joost, W. J., Krajewski, P. E., 2017. "Towards Magnesium Alloys for High Volume Automotive Applications". *Scripta Materialia*, Vol. 128, pp. 107–112.
- Kleiner, S., Uggowitzer, P., 2004, "Mechanical Anisotropy of Extruded Mg - 6%Al - 1%Zn Alloy". *Materials Science and Engineering A*. V. 379, pp. 258–263.
- Letzig, D., Swiostek, J., Bohlen, J., Beaven P., Kainer, K., 2008, "Wrought Magnesium Alloys for Structural Applications". *Materials Science and Technology*. Vol. 24, pp. 991–996.
- Li, B., Pan, Q.L., Yin, Z.M., 2014, "Characterization of Hot Deformation Behavior of As-Homogenized Al-Cu-Li-Sc-Zr Alloy Using Processing Maps". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 614, pp. 199–206.
- Luo A.A., Magnes, J., 2013, "Magnesium Casting Technology for Structural Applications". *Journal of Magnesium and Alloys*, Vol. 1 (1), pp. 2–22.
- Mordike, B., Ebert, T., 2001, "Magnesium Properties-Applications-Potential". *Materials Science and Engineering A*. Vol. 302, pp. 37–45.
- Padilha, A., Siciliano, F., 2005, "Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão". 3a. Ed., ABM. P 232, 2005.
- Prasad, Y.V.R.K., 2003, "Processing Maps: A Status Report". *Journal of Material Engineering Performance*, Vol. 12 (6) pp. 638–645.
- Rao, K.P., Prasad, Y.V.R.K., Suresh, K., 2012, "Anisotropy Of Flow During Isothermal Forging of Rolled AZ31B Magnesium Alloy Rolled Plate In Three Orthogonal Directions: Correlation With Processing Maps". *Materials Science & Engineering A*, Vol. 558, pp. 30–38.
- Rodriguez, A.K., Ayoub, G.A., Mansoor, B., Benzerga, A.A., 2016, "Effect of Strain Rate and Temperature on Fracture of Magnesium Alloy AZ31B". *Acta Materialia*, Vol. 112, pp.194–208.
- Tharumarajah A., Koltun P., 2007, "Is There An Environmental Advantage of Using Magnesium Components of Light-Weighting Cars?", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, pp. 1007–1013.
- U.S. Geological Survey, 2015, "Mineral Commodity Summaries", <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>, consulta em fevereiro de 2017.

- Wang, J., Zhao, G., Li, M., 2016, “Establishment of Processing Map and Analysis of Microstructure on Multi-Crystalline Tungsten Plastic Deformation Process at Elevated Temperature”. *Materials and Design*, Vol. 103, P.268–277.
- Yi, S., Zaefferer, S., Brokmeier, H., 2006, “Mechanical Behavior and Microstructural Evolution of Magnesium Alloy AZ31 in Tension at Different Temperatures”. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 424, pp. 275-281, 2006.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

HOT FORMABILITY OF THE MAGNESIUM ALLOY AZ31

André Fabiano Rodrigues Araujo, andrefraraujo@yahoo.com.br¹

Gabriel Martinelli Zapata, gmzapata@fem.unicamp.br¹

Sergio Tonini Button, sergio1@fem.unicamp.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, C.P 6122, CEP 13083-970 – Campinas – SP

Abstract: *The main objective of this work was to evaluate the hot formability of a thick plate of AZ31B magnesium alloy. Specimens for hot tensile tests were cut off the plate and tested at many temperatures, strain rates, and the direction of specimens in respect to the rolling direction. Results from the tensile tests were analyzed and then used to plot processing maps to define the safe regions for the hot forming of the alloy where the energy dissipation was more efficient. The processing maps were also useful to find the regions where the metal flow could be unstable and which must be avoided when planning the hot stamping of the AZ31B magnesium alloy.*

Palavras-chave: *Physical metallurgy, thick plates, processing maps, hot tensile test.*