

DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE LIGAS DE MAGNÉSIO E ALUMÍNIO PARA APLICAÇÕES DE *CRASHWORTHINESS*

N. Peixinho¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho



RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de ensaios de tracção de uma liga de magnésio AZ31B-H24 e de uma liga de alumínio 6111-T4 a diferentes taxas de deformação. Estes materiais são potenciais candidatos para utilização em componentes de automóveis e elementos de absorção de energia de impacto devido à sua baixa densidade e boa relação entre resistência, rigidez e densidade. Para estas aplicações é necessário o conhecimento do comportamento dos materiais a taxas de deformação relevantes bem como equações constitutivas adequadas para utilização em cálculos analíticos e numéricos. As propriedades mecânicas das ligas em estudo foram determinadas recorrendo a uma máquina de ensaios de tracção servo-hidráulica e a uma barra de Hopkinson desenvolvida para ensaio de tracção de provetes de chapa. Os resultados dos ensaios foram utilizados para comparar as propriedades estáticas e dinâmicas das ligas estudadas e para validar uma equação constitutiva que descreve o comportamento dos materiais a diferentes taxas de deformação. Foi examinada a equação de Cowper-Symonds e obtidos parâmetros para os dois materiais em estudo.

1- INTRODUÇÃO

As melhorias necessárias em matéria de eficiência de combustível e redução de emissões de CO₂ na indústria automóvel têm resultado num interesse renovado em ligas leves de alumínio e magnésio. Esta tendência irá aumentar ainda mais devido a uma legislação mais rigorosa de emissões e percepção do público. As ligas de alumínio têm sido cada vez mais utilizadas: entre 1995 e 2000 a sua utilização em componentes para automóveis aumentou mais de 80% [1]. Reduções de peso de até 40% foram relatadas como possíveis em estruturas de alumínio do tipo spaceframe [1]. As ligas de magnésio são dos materiais estruturais

de menor densidade e, como tal, têm grande potencial para utilização na indústria automóvel. A utilização de ligas de magnésio em componentes de automóveis tem um crescimento previsto de 3 kg por carro em 2005 para 20 kg em 2010 e 50 kg em 2015, à medida que a legislação sobre emissões de CO₂ e a pressão para redução de peso se tornam mais importantes [2].

Para a introdução de ligas leves em componentes para resistência ao impacto o comportamento dinâmico dos materiais utilizados deve ser considerado. Além disso, elevadas taxas de deformação também estão presentes em alguns processos de fabrico, como conformação

electromagnética [3]. Assim, é aconselhável o conhecimento das propriedades dos materiais a diferentes taxas de deformação e o desenvolvimento de equações constitutivas capaz de fornecer uma descrição fiável desse comportamento. Uma das equações mais frequentes é a de Cowper-Symonds e suas variações [4, 5], sendo extensivamente utilizada na indústria automóvel para a simulação numérica de absorção de energia de impacto, existindo no entanto uma carência na literatura sobre os parâmetros constitutivos desta equação para ligas de magnésio e alumínio.

O alumínio é geralmente considerado como tendo sensibilidade baixa à taxa de deformação, particularmente para as ligas de maior resistência. Vários estudos têm sido conduzidos que apresentam propriedades dinâmicas de materiais com diferentes ligas, tratamento térmico e/ou condições de processamento [6,7,8]. Para as ligas de magnésio uma maior sensibilidade à taxa de deformação está presente, sendo dependente do processamento e da liga utilizada. Li et al. [9] apresentaram resultados de ensaios de compressão da liga de magnésio AZ31B a diferentes taxas de deformação e temperaturas. Valle e Ruano [10] analisaram a influência do tamanho de grão sobre a sensibilidade à taxa de deformação de uma liga de magnésio AZ31 e concluíram que esta aumenta fortemente para quando o tamanho de grão é reduzido para valores inferiores a 15 μm . A sensibilidade da taxa de deformação de ligas de magnésio deve ser considerada na simulação numérica de eventos de impacto, a fim de obter uma boa correlação com resultados experimentais, conforme apresentado na referência [11] para ensaios de *denting* de painéis de magnésio e alumínio.

2- MATERIAIS, E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Os materiais analisados neste estudo foram: liga de magnésio AZ31B-H24 (espessura da chapa de 0,9 mm) e liga de

alumínio 6111-T4 (espessura de 1,09 mm). As propriedades mecânicas em ensaio quase-estático foram obtidas seguindo a norma EN 10002-1 e utilizando uma máquina universal de ensaios de tracção (DARTEC, 600 KN), incluindo a obtenção da tensão de cedência convencional a offset de 0,2% ($R_{p0.2}$), resistência à tracção (UTS-Ultimate Tensile Strength) e alongamento à ruptura para um comprimento inicial de referência igual a 80mm. Estes resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas

	$R_{p0.2}$ [MPa]	UTS [MPa]	Along., %
AA6111-T4	149.2	240.1	23.2
AZ31B-H24	197.4	261.2	7.7

Os provetes utilizados nos ensaios de tracção foram cortadas com alinhamento na direcção de laminagem. As técnicas experimentais utilizadas para os ensaios quase-estáticos e dinâmicos de tracção foram as seguintes:

- Máquina de ensaios servo-hidráulica (DARTEC, capacidade de 600kN), utilizada para velocidades de carregamento mais baixas (0.1 mm/s), aqui referido como ensaio quase-estático, e para ensaios a uma velocidade intermédia de 90 mm/s. Nos ensaios quase-estáticos os valores de força e deformação foram determinados utilizando uma célula de carga (DARTEC, M1000 RD) e um extensómetro clip-gauge, modelo SANDNER EXA 100-10, com um comprimento de referência de 100 mm. O alongamento à rotura foi medido utilizando um comprimento de referência de 80 milímetros. Os testes a velocidade de carregamento intermédia (90 mm/s) utilizaram provetes de menores dimensões, com um comprimento paralelo de 40 mm e comprimento de referência de 20mm. Esta geometria foi utilizada a fim de obter maiores taxas de deformação (aproximadamente 2.25 /s). Esta taxa de deformação nominal foi calculada

dividindo a velocidade linear da máquina de ensaio pelo comprimento paralelo do provete. Os testes a velocidade de carregamento intermédia utilizaram extensómetros colados ao provete na zona central de modo a obter leituras de deformação na fase inicial do ensaio de tracção (figura 1). Foram também colados extensómetros na zona elástica do provete que foram usados para confirmar as medições de força nos ensaios a velocidade intermédia, evitando oscilações observadas no sinal da célula de carga da máquina de ensaio. As leituras dos extensómetros foram gravadas utilizando um equipamento de aquisição de dados de extensometria HBM Spyder-8 e posteriormente analisadas num computador pessoal.

- Barra de Hopkinson, utilizada para a obtenção de taxas de deformação de aproximadamente 1000 /s (Figura 2) em provetes obtidos a partir de chapa. Neste equipamento um projectil tubular é disparado de uma câmara de pressão na direcção de um batente sendo deste modo gerada uma onda de tensão na barra incidente que se propaga na direcção do provete. Parte da onda incidente é transmitida para o provete e propaga-se através da barra transmissora. Outra parte da onda de tensão é reflectida na barra de incidente como uma onda de compressão. As ondas reflectida e transmitida são medidas com extensómetros colocados nas barras incidente e de transmissão. Os sinais de saída dos circuitos de Wheatstone foram amplificadas utilizando um aplicador dinâmico Fylde FE-527-SGA. As leituras foram gravadas utilizando um osciloscópio digital modelo Yokogawa DL1540L e posteriormente analisadas em computador pessoal. Das leituras dos extensómetros foram obtidas as curvas tensão-deformação seguindo o procedimento indicado na referência [12]. Além disso, a deformação local foi medida usando extensómetros colocados no corpo principal do provete. Esta medição foi útil para confirmar os resultados obtidos com o procedimento barra de Hopkinson, na fase inicial dos testes

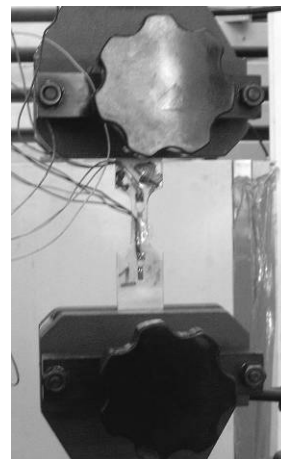
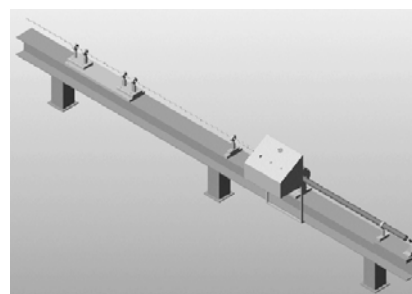
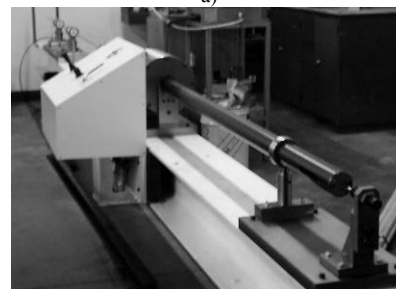


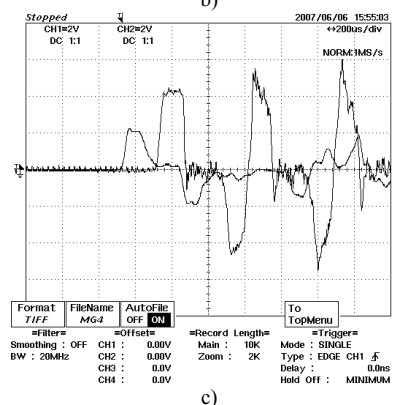
Fig. 1 - Provete utilizado em ensaios com taxa de deformação de 2.25 /s



a)



b)



c)

Fig. 2 - a) Barra de Hopkinson – representação esquemática; b) Imagem da barra de Hopkinson; c) Exemplo de ondas incidente, reflectida e transmitida para um dos testes na liga AZ31-B.

3- RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os valores de $R_{p0.2}$ e de UTS em ensaios de tracção quase-estáticos e dinâmicos são apresentados na Figura 3

para as ligas de magnésio e alumínio testadas. Para a liga AZ31B os valores da resistência revelam uma variação moderada, mas relevante, com taxa de deformação crescente, o que era esperado considerando-se resultados conhecidos para outras ligas de magnésio. O maior aumento nos valores da resistência é observado no teste com a barra de Hopkinson em que as taxas de deformação são uma ordem de magnitude maior. Na liga de alumínio a mudança das propriedades do material é menor, o que é esperado para este tipo de material.

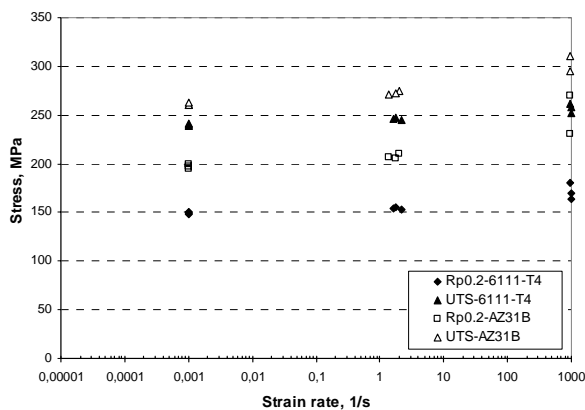


Fig. 3- Variação das propriedades de resistência com a taxa de deformação

A avaliação de ductilidade para os ensaios dinâmicos deve ser considerada criticamente pois diferentes tamanhos de provetes foram utilizados para carregamento quase-estático e dinâmico. Considerando essa limitação, observou-se através de Microscopia Electrónica de Varrimento (MEV) que a superfície de fractura em ambos os materiais não apresenta indicações de degradação da ductilidade com o aumento da velocidade de carregamento. Estes resultados são apresentados nas figuras 4 e 5, onde se observa que não há variação em relação à morfologia típica de fractura dúctil.

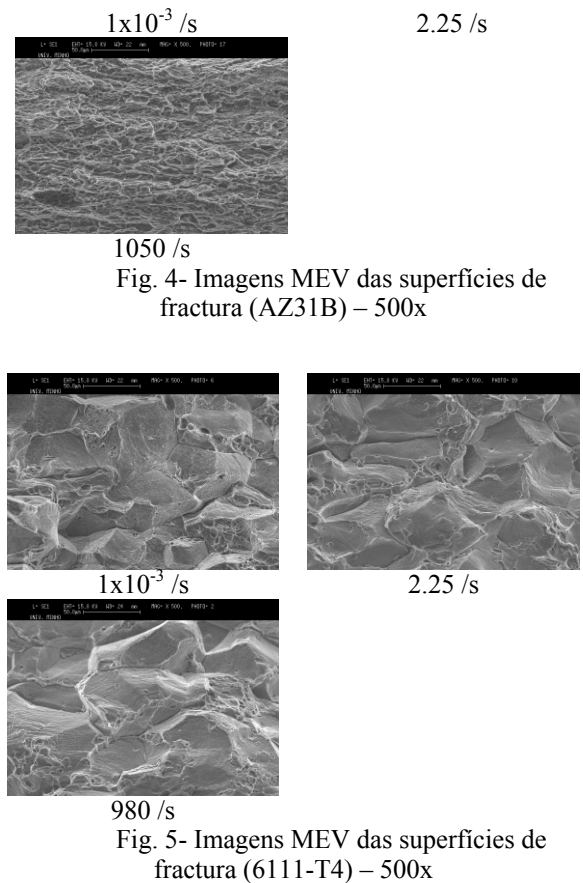
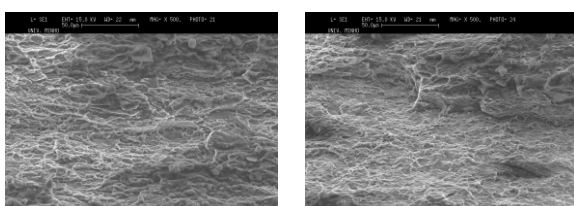


Fig. 5- Imagens MEV das superfícies de fractura (6111-T4) - 500x

4- EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS

As grandes velocidades que ocorrem em estruturas durante o processo de deformação associado a carregamento de impacto ocasionam uma reacção diferente do material de acordo com a variação da deformação ao longo do tempo. Contrariamente aos efeitos de inércia, o efeito da velocidade de deformação faz-se sentir de forma pronunciada mesmo a baixas velocidades de impacto e como tal deve ser levado em consideração. Diferentes modelos podem ser utilizados para esse efeito, sendo uma das leis mais simples e mais utilizada em cálculos analíticos e numéricos atribuída a Cowper e Symmonds [4], expressa por:

$$\frac{\sigma_{dyn}}{\sigma_{stat}} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

onde σ_{dyn} e σ_{stat} são a tensão de cedência uniaxial dinâmica e estática, respectivamente; $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação uniaxial; D e p são constantes do material. Os coeficientes obtidos para a equação (1)

são apresentados nas tabelas 2 e 3, bem como a gama aplicável de taxa de deformação, tensão de referência e factor de correlação com resultados (R^2)

Tabela 2. Parâmetros Cowper-Symonds **A6111-T4**

	$\dot{\epsilon}$ [s]	D [s]	p	R^2
$R_{p0.2}$	0.001-1020	415401.2	3.57	0.97
UTS	0.001-1020	24106691	4.35	0.90

Tabela 3. Parâmetros Cowper-Symonds – **AZ31B**

	$\dot{\epsilon}$ [s]	D [s]	p	R^2
$R_{p0.2}$	0.001-1050	24124.9	3.09	0.96
UTS	0.001-1050	231191.1	3.56	0.91

Da análise dos resultados pode-se concluir que é possível obter os coeficientes de Cowper-Symonds com excelente correlação. No entanto, estes coeficientes assumem valores diferentes para tensões de referência diferentes. Por exemplo, para a tensão de rotura e tensão de cedência observam-se diferentes sensibilidades à taxa de deformação, que resultam em coeficientes diferentes na equação de Cowper-Symonds. Esta é uma desvantagem intrínseca do uso da equação de Cowper-Symonds. Neste caso, o principal risco com o uso de equação (1) é que, por exemplo, os coeficientes obtidos a partir de $R_{p0.2}$ podem produzir uma previsão errónea de resultados para tensões mais elevadas. Esta característica pode ter um efeito importante na simulação numérica do comportamento ao impacto de estruturas, como observado na referência [5].

5- DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Analisando as propriedades mecânicas obtidas neste estudo e a comparação entre as ligas de magnésio AZ31B e de alumínio 6111-T4 verifica-se que estes materiais são promissores para aplicação em componentes de absorção de energia de impacto. No entanto, algumas características devem ser submetidas a

uma investigação mais detalhada, nomeadamente, as limitações de processamento das ligas de magnésio, considerando a sua menor ductilidade. A possibilidade de rotura localizada pode também ser prejudicial para a absorção de energia de impacto através da compressão de estruturas tubulares.

Os coeficientes de Cowper-Symonds obtidos permitem ajustar os dados experimentais com excelente correlação. No entanto, estes coeficientes e a equação constitutiva associada devem ser validados através da sua utilização em simulação numérica e comparação com resultados experimentais. A questão da variação dos coeficientes com a tensão de referência deve ser cuidadosamente avaliada, eventualmente abordando a necessidade de uma equação constitutiva mais complexa.

6- CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou resultados de ensaios de tracção de duas ligas leves a diferentes taxas de deformação, no intervalo 0.001-1000/s. As propriedades mecânicas foram determinadas a partir de ensaios de tracção utilizando amostras de chapa e diferentes técnicas experimentais: máquina de ensaios de tracção servo-hidráulica e barra de Hopkinson. Os resultados dos testes foram utilizados para comparar diferentes propriedades mecânicas dos materiais testados. Os resultados também foram utilizados na obtenção de parâmetros para a equação constitutiva Cowper-Symonds.

Os resultados obtidos destacaram propriedades relevantes para aplicações de resistência ao choque, nomeadamente, a sensibilidade à taxa de deformação. A liga de magnésio apresentou uma maior variação de propriedades mecânicas como a taxa de deformação. Ambos os materiais não apresentaram um desvio em relação à morfologia habitual de fractura dúctil quando ensaiados a taxas de deformação mais elevadas, obtidas na barra de Hopkinson.

Agradecimentos

O autor agradece à Alcoa pelo fornecimento da liga de alumínio ensaiada. Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através do projecto PTDC/EME-PME/65009/2006.

7- REFERÊNCIAS

- [1] Miller, W.; Zhuang, L.; Bottema, J.; Wittebrood, A.; De Smet, P.; Haszler, A., Recent developments in aluminium alloys for the automotive industry, *J. Mater. Sci. Eng.*, A280, pp. 37-49, 2000.
- [2] Bjornstad, P., apresentação de Tonsberg Magnesium Group, 2006.
- [3] Imbert, J.; Winkler, S.; Worswick, M.; Golovaschenko, S., Formability and damage in electromagnetically formed AA5754 and AA6111, in *Proceedings of the first international conference on high speed forming*, Dortmund, Germany, pp. 202-210, 2004.
- [4] Jones, N., *Structural Impact*, Cambridge University Press, 1997.
- [5] Peixinho, N.; Pinho, A., Study of viscoplasticity models for the impact behaviour of high-strength steels, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 2, pp. 114-123, 2007.
- [6] Tanaka, K.; Nojima, T., Strain rate change tests of aluminium alloys under high strain rate, in *Proceedings of the 19th Japan congress on materials research*, Tokyo, Japan, pp. 48-51, 1975.
- [7] Lindholm, U.; Bessey, R.; Smith, G., Effect of strain rate on yield strength, tensile strength and elongation of three aluminium alloys, *J. Mater.*, 6(1), pp. 119-133, 1971.
- [8] Oosterkamp, L.; Djapic; Ivankovic, A.; Venizelos, G., High strain rate properties of selected aluminium alloys, *J. Mater. Sci. Eng.*, A278, pp. 225-235, 2000.
- [9] Li, L.; Zhou, J.; Duszczek, J., Determination of a constitutive relationship for AZ31B magnesium alloy and validation through comparison between simulated and real extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 172, pp. 372-380, 2006.
- [10] Valle, J.; Ruano, O., Influence of the grain size on the strain rate sensitivity in an Mg-Al-Zn alloy at moderate temperatures, *Scripta Materialia*, 55, pp. 775-778, 2006.
- [11] Peixinho, N.; Pinho, A., Dent resistance of aluminium and magnesium alloys, *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 220, pp. 1191-1198, 2006.
- [12] Kang, W.; Cho, H.; Huh, H.; Chung, D.; Modified Johnson-Cook Model for Vehicle Body Crashworthiness Simulation, *Int. J. Vehicle Design*, Vol. 21, (4/5), pp. 424-435, 1999.