

COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA DE MAGNÉSIO AZ31B SOB CARREGAMENTO MULTIAXIAL

MECHANICAL BEHAVIOUR OF MAGNESIUM ALLOY AZ31B UNDER MULTIAXIAL LOADING

H. Videira¹, V. Anes¹, R. Cláudio², M Freitas¹, L. Reis^{1*}

¹ ICEMS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal.

² ESTS, Instituto Politécnico de Setúbal, Campus do IPS, Estefanilha, 2910-761 Setúbal, Portugal

*luis.g.reis@ist.utl.pt



RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo teórico, experimental e numérico, na avaliação do comportamento mecânico de uma liga de magnésio, AZ31B-F, na presença de um entalhe. Para tal realizaram-se ensaios experimentais em laboratório, com carregamentos biaxiais proporcionais e não proporcionais, de modo a avaliar a iniciação e propagação duma fenda. Esta avaliação focou-se na análise e caracterização do crescimento da fenda na presença do entalhe, assim como no estudo da microestrutura desta liga. Também se procedeu ao estudo da velocidade de propagação da fenda em função do número de ciclos. O estudo numérico permitiu avaliar o fator de concentração de tensões, a sensibilidade junto do entalhe e comparar o ângulo de iniciação da fenda com modelos de plano crítico, sob fadiga multiaxial. Para os carregamentos realizados, verificou-se uma redução significativa da vida à fadiga do material, quando comparada com e sem a presença do entalhe.

ABSTRACT

This paper presents a theoretical, experimental and numerical study of the AZ31B-F magnesium alloy's mechanical behaviour in the presence of a notch. Several experimental tests were performed in the lab with biaxial loadings, proportional and non-proportional ones, to evaluate the crack propagation along the notch. This work was focused on the analysis and characterization of crack growth as well as on the study of the magnesium alloy microstructure. An analysis of the crack growth rate was undertaken. Further, a numerical study to evaluate the stress concentration factor and sensitivity along the notch boundary was performed. The estimations for the crack initiation plane were correlated with the experimental results under proportional and non-proportional loading conditions. For the loadings carried out, there was a significant fatigue life reduction in the specimens with notch comparatively to the results achieved for the smooth ones.

1. INTRODUÇÃO

Geralmente, os componentes mecânicos estão sujeitos a carregamentos complexos, podendo estes ser uniaxiais, multiaxiais ou mesmo uma combinação entre os dois regimes de carregamento. As falhas mecânicas nestes

componentes podem ser causadas por propagação de fendas com origem na fadiga dos materiais. Estas iniciam-se e propagam-se em certas regiões do componente mecânico onde o dano por fadiga é maior. Este tipo de

falhas ocorre devido a opções de projecto relacionadas com a distribuição da quantidade de material no componente mecânico e devido também ao tipo de carregamentos mecânicos a que este é sujeito. Deste modo é crucial proceder a estudos laboratoriais de modo a se poder concluir a respeito da capacidade dos materiais resistirem aos carregamentos cíclicos a que são sujeitos sob um determinado estado de tensão aplicado. Devido a constrangimentos relacionados com o tamanho da peça real, de produção e recursos financeiros é usual determinar as propriedades mecânicas dos materiais em provetes (amostras do material a testar) sendo então necessário extrapolar essas propriedades para as estruturas ou componentes mecânicos com o tamanho reais. Para tal tem de se verificar determinadas condições laboratoriais de modo a permitir uma correta correlação entre os dados experimentais no provete e uma estimativa para a peça real. Normalmente garante-se a mesma gama de fator de intensidade de tensões e o mesmo rácio entre a tensão mínima e máxima, ΔK e R, respetivamente; de modo a obterem-se resultados fidedignos das solicitações mecânicas a que a estrutura ou componente mecânico será sujeito em condições operacionais. Atualmente, é de grande interesse industrial caracterizar experimentalmente o comportamento mecânico de ligas de magnésio. As ligas de magnésio pertencem à categoria de ligas leves possuindo um grande potencial, principalmente por serem um material estrutural mais leve do que o alumínio. Estas ligas têm uma resistência específica bastante elevada devido à sua baixa densidade e boas propriedades mecânicas (mas inferiores às do alumínio), além disso as ligas de magnésio apresentam boa maquinabilidade, o qual é um fator importante na indústria. O uso generalizado de ligas de magnésio teria um impacto bastante positivo no meio ambiente uma vez que apresentam boas capacidades de reciclagem e promovem a redução das emissões de CO₂ através de uma redução de consumo de combustíveis fósseis. Esta redução é alcançada através da redução do peso das estruturas, conseguida pela substituição das ligas de aço e alumínio pelas ligas de magnésio. Na realidade este é um dos

principais motivos pela qual as ligas de magnésio despertam tanto interesse nas indústrias automóvel e aeronáutica. Outra característica das ligas de magnésio reside no facto destas apresentarem uma estrutura cristalina hexagonal compacta (HC) o que lhes confere um comportamento mecânico bastante diferente do encontrado nas ligas de alumínio e nos aços de liga. Devido à sua complexidade, o comportamento mecânico destas ligas continua em estudo na comunidade científica estando ainda longe de estar totalmente compreendido. No passado, a sua baixa resistência à corrosão, alto custo de extracção e alto custo de produção colocaram as ligas de magnésio em segundo plano como matéria-prima na indústria. Devido a este facto não são amplamente utilizadas nos dias de hoje. No entanto os problemas de corrosão foram suplantados com a introdução de novos elementos de liga, mas a redução de custos só ocorrerá se houver uma procura generalizada por parte da indústria. O magnésio é um material muito abundante na crosta terrestre. Na realidade, este constitui cerca de dois 2% da crosta do planeta Terra sendo o terceiro elemento mais abundante dissolvido na água dos oceanos. A produção de magnésio é feita através da electrólise do cloreto de magnésio obtido através da salmoura ou com origem na água do mar. A água do mar contém aproximadamente 0.13% de magnésio, ou seja, cerca de 1.1 kg por metro cúbico de água. Deste modo, o magnésio pode ser considerado como um recurso natural quase inesgotável devido a sua abundância. Neste sentido a indústria automóvel e aeronáutica mostram, nos dias de hoje, um grande interesse por este material devido à sua abundância mas também devido à sua baixa densidade. Como reflexo deste interesse, este material tornou-se uma alternativa a outros mais pesados de modo a que os produtos da indústria dos transportes cumpram com directivas da União Europeia e dos EUA relativamente às emissões de CO₂. Como consequência do interesse por parte da indústria em geral nas ligas de magnésio, investigadores de toda a parte do mundo têm realizado esforços para entender e modelar o comportamento mecânico das ligas de magnésio com o objectivo de ajudar a sua reintrodução e aplicação na indústria. Por

exemplo, *Kang et al.* estudaram o efeito do refinamento de grão da liga de magnésio. *Al Bin Mousa et al.* estudaram o comportamento mecânico da liga de magnésio extrudida, AZ31B. Neste estudo os autores caracterizaram o comportamento mecânico da liga sob carregamentos uniaxiais, axiais e de torção pura, assim como carregamentos multiaxiais. *Yang et al.* estudaram a influência da orientação do provete nas propriedades da liga de magnésio AZ31B na forma de chapa laminada. *Zeng et al.* estudaram a influência da frequência de carregamento no comportamento da propagação da fenda por fadiga em ligas de magnésio extrudidas AZ60 e AZ80. *Morita et al.* estudaram as superfícies de fratura e fissuras por fadiga da liga de magnésio policristalina AZ31B. Neste trabalho a propagação da fenda por fadiga foi realizada no centro de uma placa com um rácio de tensões igual a $R=0.1$, tendo sido os ensaios realizados a uma frequência de 10 Hz e à temperatura ambiente. *Tsushida* estudou a liga de magnésio AZ31B em flexão rotativa com um rácio $R=-1$. Concluíram que a deformação cíclica “twinning” depende do tamanho de grão e influência a vida a fadiga da liga AZ31B. *Nan et al.* também realizaram testes de fadiga em flexão rotativa usando a mesma liga de magnésio extrudida, AZ31B-F. Neste estudo os autores concluíram que as fendas com origem no processo de fadiga iniciam-se numa fase precoce da vida à fadiga. Analisaram também o comportamento de iniciação e propagação da fenda, concluindo que a microestrutura da liga de magnésio influencia o mecanismo de abertura de fenda. No contexto do crescimento da fenda, *Moreno et al.* realizou um conjunto de testes num aço de baixo carbono para detectar e medir a iniciação e crescimento da fenda em provetes com um entalhe. O entalhe foi realizado por um dispositivo de perfuração, com 150 μm de diâmetro na superfície do provete com o objectivo de fixar o local de iniciação da fissura. Os provetes foram testados sob condições de controlo de carga numa máquina de servo - hidráulica sob carregamentos biaxiais de tensão-torção. *Fatemi et Shamsaei*, estudaram a iniciação e o crescimento da fenda por fadiga sob tensões multiaxiais em aços ao carbono de médio teor, nomeadamente o AISI

1045, AISI 1050, o aço inoxidável 304L e aço Incomel 718. *Anes et al.* realizaram uma avaliação do crescimento da fenda na liga de magnésio AZ31B-F sob condições de carregamento multiaxiais. Estes introduziram uma nova metodologia baseada no mapeamento de fatores de concentração de tensões para determinar a direcção do plano de iniciação de fissura. Este método foi desenvolvido de modo a ter em conta a influência do tipo de carregamento na direcção do plano de iniciação da fissura. Para este efeito, foi considerado um micro entalhe virtual baseado no MEF onde é determinado os valores de concentração de tensões. O método admite resultados aceitáveis para estimar o plano de iniciação da fenda (plano crítico). Neste artigo é apresentado um trabalho inovador sobre o comportamento mecânico da liga de magnésio AZ31B-F em regime de elevado número de ciclos, sob condições de carregamento proporcional e não proporcional. O foco do trabalho centrou-se no estudo do processo de iniciação da fissura por fadiga sob os diferentes tipos de carregamento já referidos e na medição do crescimento de fenda com o número de ciclos. Os resultados experimentais da direcção do plano de iniciação de fissura foram correlacionados com as estimativas obtidas com os modelos teóricos.

2. MATERIAL E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

O material considerado neste estudo foi a liga de magnésio comercial AZ31B-F tendo sido adquirido na forma de varão extrudido com 24 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento. A composição química é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição química da liga de magnésio AZ31B-F.

AZ31B Composição química (% em massa)			
Al	Z	Mn	Fe
3.1	1.05	0.54	0.0035
Ni	Cu	Ca	Si
0.0007	0.0008	0.04	0.1

A percentagem de magnésio encontra-se equilibrada. Em termos de composição química o que caracteriza esta liga é a presença de 3% de alumínio e 1 % de zinco. A fim de determinar as propriedades monotónicas e cíclicas da liga de magnésio, foram realizados testes de tensão-compressão em controlo de carga. Na Tabela 2.2 apresentam-se os resultados obtidos para as propriedades elásticas, monotónicas e cíclicas. A Fig. 2.1 apresenta a geometria e as dimensões do provete utilizado nos ensaios tensão vs torção.

Tabela 2.2 – Propriedades monotónicas e cíclicas da liga de magnésio AZ31B-F.

Propriedades elásticas	
Módulo de Young [GPa]	44
Módulo de corte [GPa]	15
Coefficiente de Poisson	0.35
Propriedades monotónicas e cíclicas	
Resistência à rotura (MPa)	290
Tensão de cedência monotónica (MPa)	211
Tensão de cedência cíclica (MPa)	95
Alongamento (%)	14
Coefficiente de resistência cíclica (MPa)	576
Expoente de encruamento	0.17
Coefficiente de resistência à fadiga (MPa)	450
Expoente de resistência à fadiga	-0.12
Coefficiente de ductilidade à fadiga	0.26
Expoente de ductilidade à fadiga	-0.71

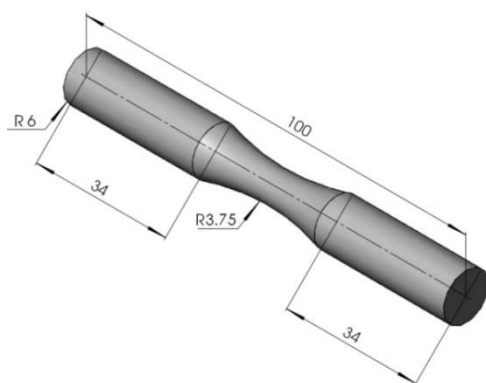


Fig. 2.1 – Provete utilizado nos ensaios tensão vs torção (mm).

Os testes de fadiga para medição do crescimento de fenda de fadiga foram realizados numa máquina servo-hidráulica, Instron modelo 8800, com um $R=-1$ (tensão vs torção) e uma frequência de 5-6 Hz à temperatura ambiente. A medição do crescimento de fenda foi realizada com o auxílio de um

microscópio digital USB de modo a adquirir imagens do entalhe à superfície do provete durante o ensaio de fadiga. A Fig. 2.2 apresenta os equipamentos utilizados nos ensaios monotónicos e de fadiga.

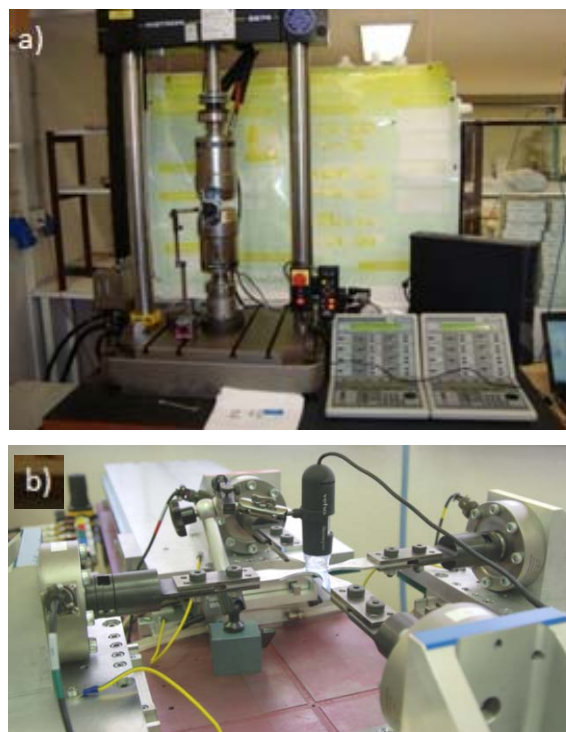


Fig. 2.2 – Máquinas de fadiga biaxial: a) tensão vs torção (fora do plano); e b) tensão vs tensão (no plano).

A Fig. 2.3 representa a geometria do entalhe realizado na modelação por elementos finitos.

Nos provetes foi realizado o mesmo tipo de entalhe. Foram utilizados carregamentos proporcionais e não proporcionais, ver Figura 2.4. A linha azul representa uma tensão normal sinusoidal e a linha vermelha representa a uma tensão de corte sinusoidal. A linha verde representa o percurso de carga, i.e. a história de carregamento.

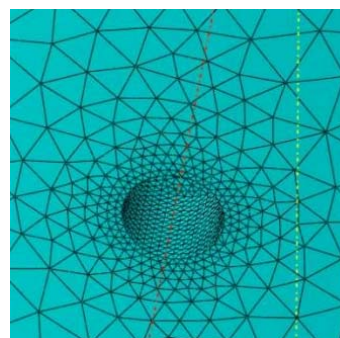


Fig. 2.3 - Geometria do entalhe.

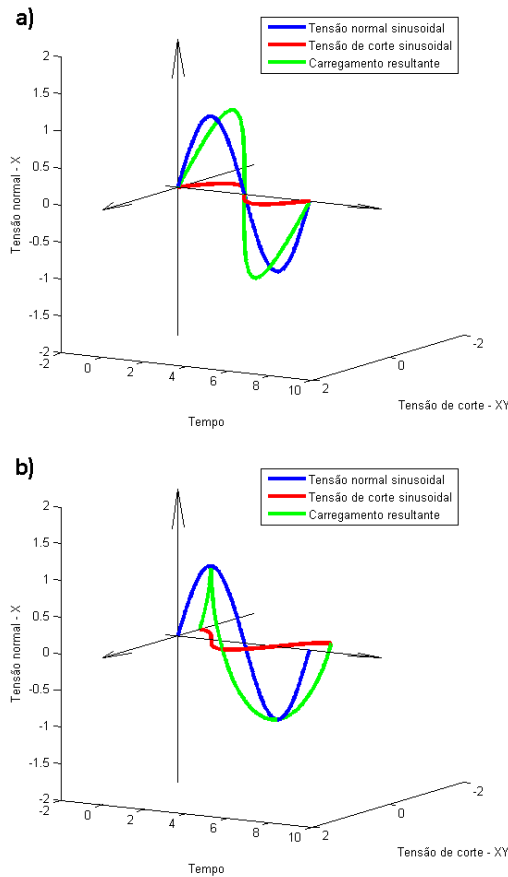


Fig. 2.4 – Carregamento: a) Proporcional; e b) Não Proporcional.

3. ANÁLISE TEÓRICA

O crescimento da fenda pode ser descrito pela Eq. (1). Esta equação é conhecida como lei de Paris,

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

onde C e m são constantes do material, sendo dependentes da tensão média, frequência, temperatura e humidade do meio ambiente.

3.1. Modelos de plano crítico

Desde os anos 50 do século passado que várias abordagens foram desenvolvidas no sentido de estimar a iniciação da fenda e respectiva direcção. Algumas dessas abordagens, modelos de plano crítico, têm sido desenvolvidas e aplicadas a situações de fadiga multiaxial de modo estimar a vida e os planos de iniciação de fissura por fadiga. Todas as teorias baseadas na metodologia de plano crítico identificam

um plano onde o parâmetro de dano é máximo sendo este o plano estimado para a iniciação e crescimento de fissura.

Modelo de Findley

O critério de Findley tem em conta a influência da tensão normal no plano de tensão de corte máximo. Este modelo prevê que o plano de iniciação de fissura por fadiga têm uma orientação θ com o parâmetro de dano dado por:

$$\max_{\theta} \left(\frac{\Delta \tau_a}{2} + K \sigma_{n,\max} \right) \quad (2)$$

onde τ_a é a amplitude de corte máxima no plano θ , $\sigma_{n,\max}$ é a tensão normal máxima naquele plano, sendo K uma constante do material.

3.1.1. Modelo de Brown-Miller

De acordo com o critério de Brown-Miller, o modelo de plano crítico é identificado como o plano onde a amplitude da deformação de corte tem o seu valor máximo:

$$\max_{\theta} \left(\frac{\Delta \sigma_{\max}}{2} + S \Delta \varepsilon_n \right) \quad (3)$$

onde $\Delta \gamma$ é a gama de deformação de corte no plano θ . $\Delta \varepsilon$ é a gama de extensão normal no mesmo plano θ e S é um parâmetro do material que depende do valor da gama de extensão.

3.1.2. Modelo de Fatemi-Socie

O modelo de *Fatemi* e *Socie* prevê que a orientação do plano crítico, θ , ocorre no plano com o máximo parâmetro dano definido do seguinte modo:

$$\frac{\Delta \gamma_{\max}}{2} \left(1 + K \frac{\sigma_{n,\max}}{S_y} \right) \quad (4)$$

onde σ_{ced} representa tensão normal máxima do material no plano, S_y é a tensão de cedência do material, K é uma constante típica de cada material e $\frac{\Delta \gamma_{\max}}{2}$ representa a amplitude máxima da extensão de corte.

3.1.3. Modelo de Smith-Watson-Topper

O modelo de Smith, Watson e Topper (SWT), estima o plano de iniciação de fissura por fadiga, plano θ , através da tensão normal máxima e extensão principal máxima:

$$\max_{\theta} \left(\sigma_n \frac{\Delta \varepsilon_1}{2} \right) \quad (5)$$

onde σ_n é a tensão normal no plano θ , $\Delta \varepsilon_1$ é a gama de deformação normal naquele plano.

3.1.4. Modelo de Liu

O modelo de Liu, é um modelo de plano crítico em que o parâmetro de dano é um parâmetro energético, i.e., utiliza tensões e extensões. Este modelo tem em conta dois modos de falha:

- 1) Modo de falha por tensão, ΔW_I , onde tensões e extensões axiais têm um papel preponderante no processo de dano.
- 2) Modo de falha por corte, ΔW_{II} , onde as tensões e extensões de corte têm um papel fundamental no processo de dano por fadiga. Em cada plano, o parâmetro de dano ΔW_I é determinado através do valor máximo do trabalho axial adicionado do trabalho de corte no mesmo plano:

$$\Delta W_I = (\Delta \sigma_n \Delta \varepsilon_n)_{\max} + (\Delta \tau \Delta \gamma) \quad (6)$$

Segundo este modelo, a estimativa do plano crítico θ , é dada pelo plano que tenha o maior valor de ΔW_I . Em relação a ΔW_{II} , em cada plano θ , o trabalho de corte é maximizado e o trabalho axial é adicionado ao plano, a estimativa do plano crítico θ , é dada pelo maior valor de ΔW_{II} :

$$\Delta W_{II} = (\Delta \sigma_n \Delta \varepsilon_n) + (\Delta \tau \Delta \gamma)_{\max} \quad (7)$$

onde $\Delta \tau$ e $\Delta \gamma$ são a gama da tensão de corte e a gama da deformação de corte, respectivamente. $\Delta \sigma_n$ e $\Delta \varepsilon_n$ são a gama da tensão normal e a gama da deformação normal, respectivamente.

3.2. Fator de Intensidade de Tensões

O fator de intensidade de tensões adoptado neste estudo foi o proposto por *Tanaka*, onde se assume que o crescimento da fenda por fadiga ocorre quando o somatório dos valores absolutos na ponta da fenda atinge um valor crítico, dado por:

$$\Delta K_{eff} = \left[(E \Delta \varepsilon_n)^2 + (G \Delta \gamma_{\max})^2 \right]^{1/2} \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

onde E é o modulo de Young, $\Delta \varepsilon_n$ é a gama de deformação normal máxima no plano de corte máximo, $\Delta \gamma_{\max}$ é a gama da deformação de corte máxima, G é o módulo de corte, e a é o comprimento de fenda.

3.3. Metodologia Kt

A metodologia Kt foi proposta por *Anes et al.* onde se faz uso de um entalhe virtual para identificar o plano de iniciação de fissura. Esta é uma metodologia numérica que visa captar o efeito do tipo e história de carregamento de modo a estimar o estado de tensão na presença de uma microfissura. É um método numérico onde é utilizado um programa de elementos finitos. O método é aplicável a qualquer tipo de estrutura. No entanto, para correlacionar as estimativas com os resultados experimentais de laboratório modela-se em elementos finitos um provete igual ao experimental adicionando um micro entalhe na forma de uma calote esférica. A geometria do micro entalhe foi desenhada de modo a não influenciar a localização dos pontos com Kt máximo. Assim, na interface entre a calote esférica e a superfície exterior do provete irá ocorrer tensões máximas resultantes do tipo de carregamento. Para identificação do plano de iniciação de fissura, ou seja, o plano crítico, este deve passar pelos pontos com Kt máximo. Este método de estimativa da orientação do plano crítico permite ter em conta o comportamento elástico-plástico do material, tal como curvas tensão-extensão ou modelos de plasticidade.

A definição de K_I e K_{Is} é a seguinte:

$$K_I = \frac{\sigma_{local}}{\sigma_{no\ min\ al}} \quad (9)$$

$$K_{ts} = \frac{\tau_{local}}{\tau_{no\ minal}} \quad (10)$$

onde σ e τ são a tensão normal e a tensão de corte, respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais apresentam-se nas secções que se seguem, nomeadamente testes metalográficos, estimativas e resultados experimentais dos planos críticos e os resultados da taxa de crescimento de fenda com o número de ciclos.

4.1. Análise metalográfica e fratógráica

As superfícies das diversas amostras foram analisadas por microscopia ótica, Microscópio Eletrónico de Varrimento (MEV) e através de Espetroscopia Dispersiva de Energias (EDE), respetivamente.

As Fig.(s) 4.1 e 4.2 mostram as macrografias realizadas na liga de magnésio na direcção longitudinal e transversal, respectivamente. O tamanho de grão tem aproximadamente 40 μm , no sentido transversal. A EDE mostra que os pontos negros da Fig. 4.1 e Fig. 4.2 são partículas de manganês.

A Fig. 4.3 apresenta a morfologia da superfície de fratura, realizada através do MEV, para os dois tipos de carregamento. Como se pode verificar a morfologia é distinta para cada tipo de carregamento. Carregamentos proporcionais criaram marcas radiais e carregamentos não proporcionais criaram uma textura do tipo aleatória, como se pode ver nas Fig.(s) 4.3 a) e b), respectivamente. As superfícies de fratura apresentam uma morfologia distinta, entre os dois tipos de carregamentos estudados, devido ao facto das trajectórias de carregamento serem diferentes.

As Fig.(s) 4.4 e 4.5 mostram as macrografias da superfície de fratura para o caso de carga não proporcional e proporcional, respectivamente. Estes re-

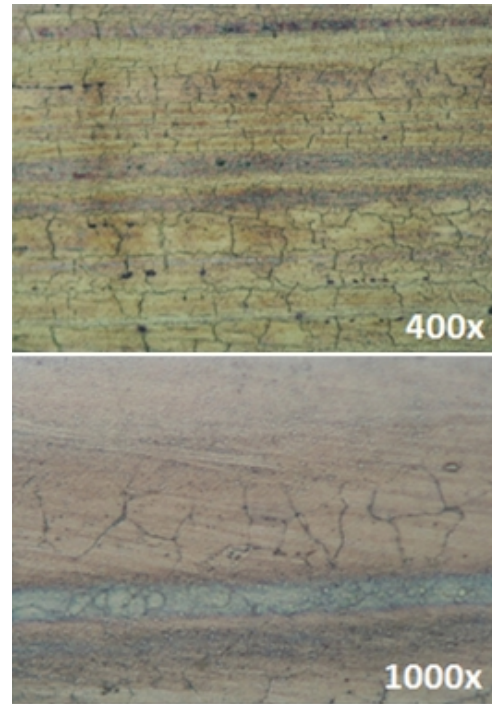


Fig. 4.1 – Macrografia do provete na direcção longitudinal.

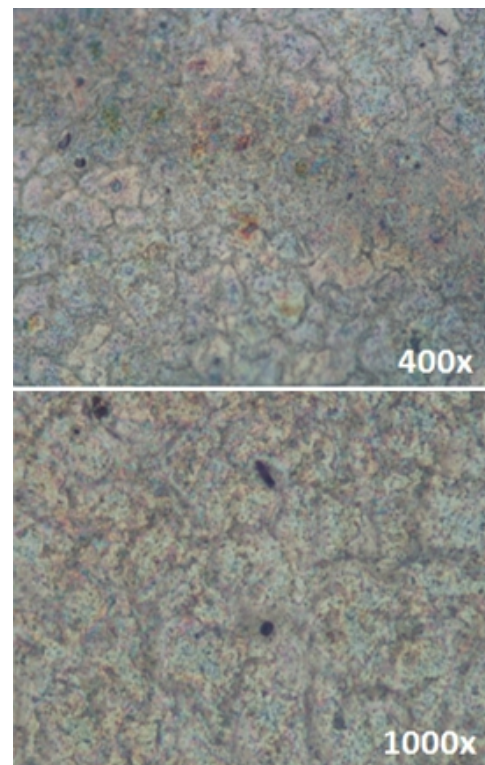


Fig. 4.2 – Macrografia do provete na direcção transversal.

sultados foram obtidos com um microscópio ótico com o qual foram identificados os planos de iniciação de fissura experimentais e a respectiva variação com o nível de carga aplicada.

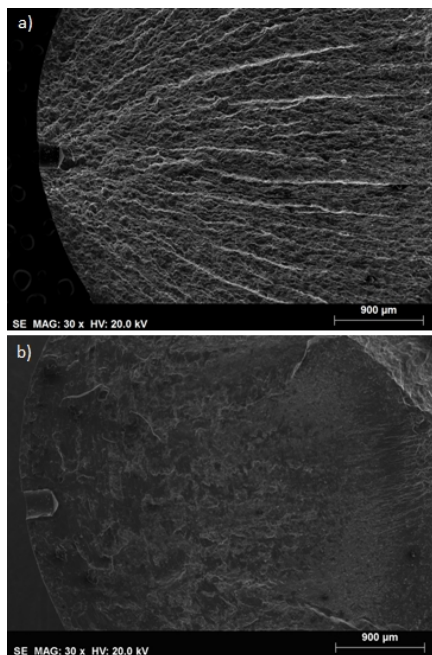


Fig. 4.3 – Fotografias do MEV da superfície de fratura: a) Carregamento proporcional; e b) Carregamento não proporcional.

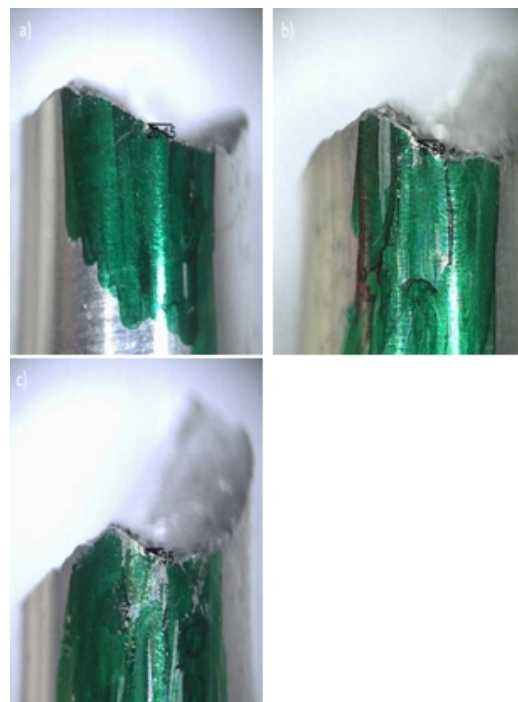


Fig. 4.5 – Carregamento não proporcional: a) 77MPa; b) 95MPa; e d) 105MPa.

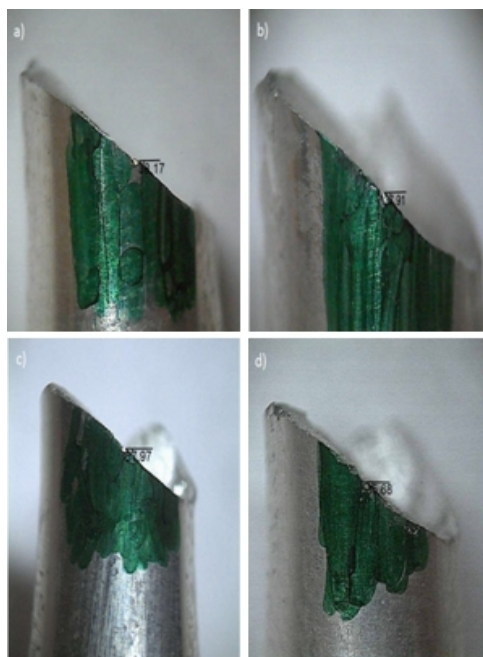


Fig. 4.4 – Carregamento proporcional: a) 77MPa; b) 85MPa; c) 105MPa; e d) 110MPa.

Os resultados para a dureza e ultra microdureza no sentido longitudinal e transversal do provete são diferentes, podendo ser consultados na Tabela 4.1.

A diferença entre os resultados longitudinais e transversais é uma consequência direta do processo de extrusão da liga de magnésio (varão).

Tabela 4.1 – Resultados de dureza e ultra microdureza.

Dureza Vickers [Valor médio - HV]	
Longitudinal [Matriz]	Transversal [Matriz]
86	70
Ultra microdureza [Valor médio - HBerkovic]	
Longitudinal [Matriz]	Transversal [Partícula]
44	491

Os resultados experimentais relativos ao plano de iniciação de fissura obtidos perto do entalhe foram comparados com as estimativas dos modelos do plano crítico, nomeadamente Findley, Brown-Miller, Fatemi-Socie, Smith-Watson-Topper e Liu. O plano crítico nestes modelos é aquele onde é obtido o maior valor do parâmetro de dano, sendo a procura desse plano realizada entre -90° e $+90^\circ$. Nas Tabelas 4.2 e 4.3 é apresentado os resultados da estimativa da orientação do plano crítico para os diferentes modelos e os ângulos de iniciação de fissura medidos experimentalmente. Os resultados de plano crítico segundo a metodologia K_t e K_{ts} podem ser vistos na Tabela 4.2 e na Fig. 4.6.

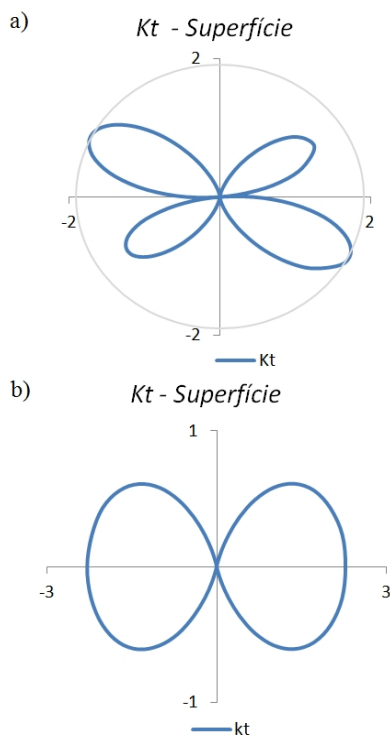
Na Fig. 4.6, são apresentados os resultados da metodologia K_t ; para os carregamentos estudados, proporcional e não proporcional.

Tabela 4.2 – Resumo dos resultados dos modelos teóricos adoptados.

Modelo	Proporcional	NãoProporcional
Findley	-13°	0°
Brown-Miller	5°/45°	0°
Fatemi-Socie	-13°/63°	0°
SWT	25°	0°
Liu I	23°	0°
Liu II	-21°/69°	0°
Liu I e Liu II	-10°/58°	0°
Metodolog. Kt	-36°	0°

Tabela 4.3 – Resumo dos ângulos de fratura dos provetes.

Tensão Aplicada	Proporcional	Não Proporcional
77MPa	-38°	-20°
85MPa	-38°	-
95MPa	-	-17°
100MPa	-	-
105MPa	-38°	-18°
110MPa	-36°	-

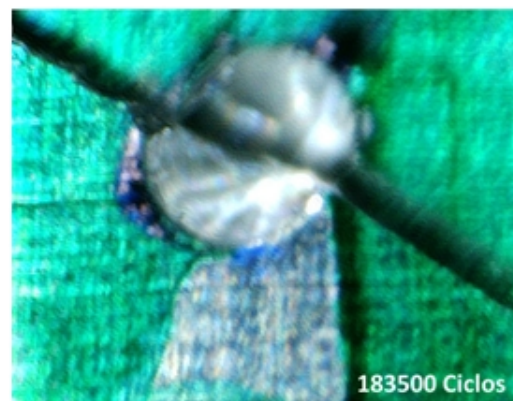
**Fig. 4.6** – Resultados para a metodologia kt: a) Proporcional; e b) Não proporcional.

Para fazer a leitura dos resultados apresentados na Fig. 4.6 deve-se considerar o seguinte procedimento: Para inspeccionar o valor de Kt no plano +45°, por exemplo, faz-se passar uma recta desde a origem do

gráfico até cruzar a linha azul com uma inclinação de +45°. O valor do Kt nessa direção é dado pelo comprimento do segmento de recta que vai desde a origem até a intercepção com a linha azul. De todos os planos, aquele que tiver maior Kt é aquele onde o método Kt estima que a fissura irá iniciar. Assim, olhando para a Fig. 4.6 b) conclui-se directamente que o plano com maior Kt tem a direção 0°. De todas as abordagens teóricas, no que diz respeito ao carregamento proporcional, o mais próximo dos resultados experimentais foi a metodologia Kt. Relativamente ao carregamento não proporcional, todos eles são idênticos.

4.2. Observações com o microscópio digital USB

Com um microscópio digital USB foi possível filmar a evolução do crescimento da fenda, como mostra a Fig. 4.7, e mais tarde transformar o vídeo em imagens usando um código realizado em MATLAB®. O crescimento e o comprimento da fenda foram analisados e medidos também através de um código feito em MATLAB®. É possível ver na Fig. 4.7 o instante correspondente à ruptura do provete e respectiva fenda em consequência de um carregamento proporcional com uma tensão equivalente de von Mises de 77 MPa.

**Fig. 4.7** – Imagem do instante de ruptura do provete junto ao entalhe.

Os provetes foram pintados com uma caneta de cor verde (acetato) a fim de aumentar o contraste entre o exterior do

proвете e o interior da fenda, e deste modo distinguir melhor a fenda e respetivo crescimento desta.

4.3. Análise da taxa de crescimento da fenda

Os resultados da taxa de crescimento da fenda, tanto para o carregamento proporcional como para o não proporcional, estão representados nas Fig.(s) 4.8 e 4.9.

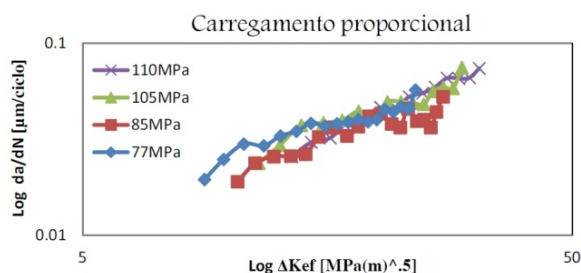


Fig. 4.8. – Taxa de crescimento da fenda para carregamento proporcional.

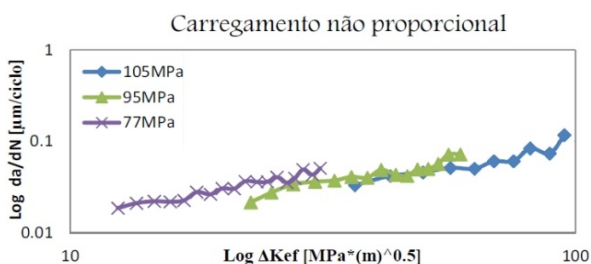


Fig. 4.9 – Taxa de crescimento da fenda para carregamento não proporcional.

A comparação entre as fases de iniciação e propagação da fenda, bem como o efeito do entalhe na vida da amostra é apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Comparação entre as fases de iniciação e propagação da fenda na vida do provete.

Tensão aplicada	Carregamento	Fase iniciação [%]	Fase propagação [%]
77MPa	PP	34%	66%
77MPa	N-PP	25%	75%
105MPa	PP	14%	86%
105MPa	N-PP	9%	91%

Pode-se constatar pelas Fig.(s) 4.8 e 4.9 que estas apresentam um declive diferente quer se trate do carregamento proporcional ou não proporcional. Além disso, o tipo de

carregamento tem uma influência acentuada na nucleação da fenda no provete com entalhe. De referir, que o entalhe e o carregamento têm uma influência significativa no comportamento mecânico da liga de magnésio AZ31B-F, i.e., nassima redução da vida do provete.

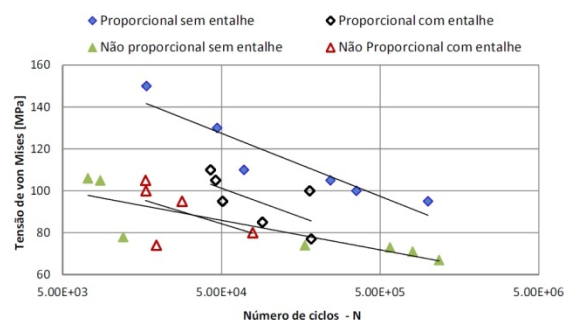


Fig. 4.10 – Resumo do estudo realizado para a liga de magnésio AZ31B-F para carregamento proporcional e não proporcional referente à tensão aplicada versus número de ciclos.

A Fig. 4.10 apresenta o resumo dos carregamentos estudados. Aqui são apresentadas as curvas S-N para os casos com entalhe e sem entalhe. Comparando os resultados verifica-se que as curvas S-N dos provetes com entalhe estão mais abaixo em relação às que não têm entalhe, indicando que a presença do entalhe reduz a vida à fadiga do material. Nos resultados sem entalhe verifica-se uma diferença entre o dano do carregamento proporcional e não proporcional. No entanto, nos resultados com entalhe essa diferença não é visível.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo teórico, experimental e numérico sobre o comportamento mecânico da liga de magnésio AZ31B-F sujeita a carregamentos biaxiais cíclicos na presença de um entalhe. Foram realizados testes experimentais a fim de correlacionar as estimativas de plano crítico com os resultados experimentais. Para além disso foram realizadas análises metalográficas, fratográficas e medições da taxa de crescimento da fissura. Os estudos numéricos permitiram estimar o plano de iniciação de fissura usando a metodologia Kt através da determinação da variação da

tensão ao longo da fronteira entre o entalhe e a superfície do provete. Concluiu-se que a morfologia das superfícies de fratura para os vários carregamentos estudados é diferente, nomeadamente através da presença mais acentuada de marcas radiais nalguns deles. Os resultados mostram que o tipo de carregamento e o entalhe têm uma influência significativa, assim como o caminho percorrido ao longo do carregamento, sobre o comportamento e a resistência à fadiga da liga de magnésio AZ31B-F. A utilização de um ambiente numérico, como os softwares comerciais Ansys ou Abaqus, permitiu verificar que o método Kt é uma ferramenta muito versátil para estimar a direcção do plano de iniciação de fissura em componentes mecânicos.

REFERÊNCIAS

- Anes, V., Reis, L., Li, B., & Freitas, M. (2014). Crack path evaluation on HC and BCC microstructures under multiaxial cyclic loading. *International Journal of Fatigue*, 58, 102-113.
- Al Bin Mousa, J. Jahed, H. and Lambert, S. "Cyclic axial and cyclic torsional behaviour of extruded alloy". *International Journal of fatigue*. 2011, Vol. 33, pp. 1403-1416.
- Al Bin Mousa, J. Jahed, H. and Lambert, S. "Cyclic behaviour of wrought magnesium alloy under multiaxial load". *International Journal Fatigue*. 2011, Vol. 33, pp. 1127-1139.
- Aghion, E., Bronfin, B. and Eliezer, D. The role of the magnesium industry in protecting the environment. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001, Vol. 117, pp. 381-385.
- Blawert, T., Hort, N. and Kainer, C. "Automotive Applications of Magnesium and its Alloys". *Trans Indian Inst Met*. 2004, Vol. 57 (4), pp. 397-408.
- Horst, Friedrich and Barry, Mordike. "Magnesium Technology - Metallurgy, Design Data and Applications". New York: Springer, 2006. p. 677. ISBN - 10 3-540-20599-3.
- Kulekci, M. "Magnesium and its alloys in automotive industry". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008, Vol. 39(9), pp. 851-865.
- Kang, S., Lee, Y. and J., Lee. "Effect of grain refinement of magnesium alloy AZ31 by severe plastic deformation on material characteristics". *Journal of Materials Processing Technology*. 2008, Vol. 201, pp. 436-440.
- Kramer, Deborah. *Minerals Yearbook - Magnesium Compounds*. U. S. Geological Survey, U. S. Department of Interior, 2010.
- Morita, S., Ohno, N., Tamai, F., & Kawakami, Y. (2010). Fatigue Crack Propagation Behavior of Textured Polycrystalline Magnesium Alloys. *Materials transactions*, 51(9), 1543-1546.
- Mordike, B. and Ebert, T. *Magnesium Properties - applications - potencial*. *Materials Science and Engineering*. A302, 2001, pp. 37-45.
- Moreno, B. Zapatero, J. Crespo, P. "Nuceación y crecimiento de grietas pequeñas en fatiga biaxial". *Anales de Mecânica de la Fractura*. 28, 2011, Vol. 1, pp. 389-394.
- Nan, Z. Y., Ishihara, S., McEvily, A. J., Shibata, H., & Komano, K. (2007). On the sharp bend of the curve and the crack propagation behavior of extruded magnesium alloy. *Scripta materialia*, 56(8), 649-652.
- Polmear, I. J. "Light Alloys - Metallurgy of the Light Metals". London: Arnold, 1995. ISBN: 0-340-63207-0.
- Shamsaei, N. and Fatemi, A. "Small Fatigue Crack Growth under Multiaxial Stresses". *International Journal of Fatigue*. 2013.
- Socie, D. and Marquis, G. *Multiaxial fatigue*. USA : SAE International, 2000. p. 484. ISBN: 0-7680-0453-5.
- Tsushida, M., "Relationship between Fatigue Strength and Grain Size in AZ31 Magnesium alloys". *Material Transactions*. 2008, Vol. 49 (5), pp. 1157-1161.
- Tanaka, K., "Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis". *Engineering Fracture Mechanics*, 1974, Vol. 6, pp 493-507.
- Lv, F., Yang, F., Duan, Q. Q., Yang, Y. S., Wu, S. D., Li, S. X., & Zhang, Z. F. (2011). Fatigue properties of rolled magnesium alloy (AZ31) sheet: Influence of specimen orientation. *International Journal of Fatigue*, 33(5), 672-682.
- Zeng, R., Han, E. and Ke, W. "A critical discussion on influence of loading frequency on fatigue crack propagation behaviour for extruded Mg-Al-Zn alloys". *International Journal of Fatigue*. 2012, Vol. 36, pp. 40-46.