

• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Análise da Influência do Fenómeno do Fecho de Fenda na Propagação de Fendas por Fadiga na Liga de Alumínio AA7050-T6**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

**Autor**

**Tiago Pedro Alves Serra Nunes**

**Orientadores**

**Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa**

**Professor Doutor Luis Filipe Pires Borrego**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogal** Professor Doutor José António Martins Ferreira  
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa  
Professor Associado da Universidade de Coimbra

**Coimbra, julho, 2015**



Happiness does not come from doing easy work, but from the afterglow of satisfaction that comes after the achievement of a difficult task that demanded our best.

Theodore Isaac Rubin

Aos meus pais e à Paula.



## Agradecimentos

A concretização desta Dissertação de Mestrado foi apenas possível através de um trabalho conjunto, e não individual. Expresso aqui, então, o meu agradecimento às pessoas que, de alguma forma, deram o seu maior ou menor contributo.

Ao Professor José Domingos, pela paciência e disponibilidade para a orientação desta dissertação, mesmo quando os obstáculos se apresentavam.

Ao Professor Luis Borrego, pela disponibilização de todo o processo de cálculo necessário ao tratamento dos dados obtidos.

Ao Professor Joel Alexandre, pela prontidão no esclarecimento de dúvidas respeitantes aos ensaios.

Ao Eng. Christof Pereira, pelo precioso auxílio, através do fornecimento de uma grande quantidade de informação importantíssima para a realização da dissertação.

À minha família e amigos, pelo apoio constante ao longo de todo o semestre, perante as dificuldades.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia e ao Programa Operacional Temático Fatores de Competitividade (COMPETE), participado pelo fundo comunitário Europeu FEDER (Projeto PTDC/EMS-PRO/3148/2012; COMPETE: FCOMP-01-0124-FEDER-029112)





## Resumo

As ligas de alumínio são utilizadas numa vasta gama de aplicações, destacando-se a indústria aeronáutica. O estudo das solicitações aplicadas aos componentes fabricados nestes materiais é, por isso, extremamente importante.

Esta dissertação teve como objetivos principais a análise da propagação de fendas por fadiga, na liga de alumínio AA7050-T6, quando sujeita a diferentes tipos de carregamento, além do estudo da influência do fenómeno do fecho de fenda na evolução dessa mesma propagação. Para tal, efetuaram-se ensaios em provetes MT com vista à obtenção das curvas de propagação, tendo sido posteriormente analisadas e comparadas, a fim de compreender o efeito do fecho de fenda aquando da aplicação de sobrecargas e da variação da razão de tensões. Nesta análise, o parâmetro de fecho de fenda,  $U$ , foi relacionado com a gama do fator de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , para os vários tipos de ensaios.

Foi possível concluir, após a realização dos ensaios e o tratamento dos dados subsequentes, que a velocidade de propagação aumenta diretamente com a razão de tensões, além de se verificar que as sobrecargas únicas fazem retardar o crescimento de fenda, para razões de tensões mais elevadas do ciclo de base. Já a aplicação de sobrecargas periódicas, no presente trabalho, levou a dados inconclusivos.

**Palavras-chave:** Ligas de Alumínio, Fadiga, Propagação de Fendas, Fecho de Fenda.





## Abstract

Aluminum alloys are used in various applications, in which the aeronautical industry is the most significant. The study of the loads applied on the components incorporating this kind of materials is, therefore, extremely important.

This dissertation has, by primary objectives, the analysis of the fatigue crack growth on the AA7050-T6 aluminum alloy, when it is loaded in different ways, as well as the study of the influence crack closure has in this very growth. For that being, tests were performed on MT specimens, which allowed the obtainment of the propagation curves, later analyzed and compared, so that the effect of crack closure, during the application of overloads and the variation of the middle tension, can be understood. This was achieved by the relating the crack closure parameter,  $U$ , with the stress intensity factor range,  $DK$ , for all the executed tests.

After the tests and the processing of its data, it was confirmed that an increasing of the middle-tension leads to the quickening of the fatigue crack growth. Also, the single overloads could produce a greater retardation of the crack growth, during a based cycle, for lower middle-tensions. Finally, the periodic overload tests were considered inconclusive.

**Keywords:** Aluminum Alloys, Fatigue, Crack Growth, Crack Closure.



## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas .....	xv
Simbologia .....	xv
Siglas .....	xvi
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Motivação .....	2
1.3. Objetivos .....	2
1.4. Estrutura da Dissertação .....	3
2. Revisão Bibliográfica .....	5
2.1. Processo de Fadiga .....	5
2.1.1. Solicitações de Fadiga .....	5
2.2. Fator de Intensidade de Tensões .....	7
2.3. Curva da/dN - $\Delta K$ .....	8
2.4. Fecho de Fenda .....	10
2.4.1. Efeito da Tensão Média .....	12
2.4.2. Efeito da História de Carga .....	13
2.5. Estado da Arte .....	16
3. Material e Procedimentos .....	21
3.1. Provetes .....	21
3.1.1. Propriedades e Composição da Liga AA7050-T6 .....	21
3.1.2. Preparação dos Provetes .....	22
3.2. Procedimento Experimental .....	23
3.2.1. Execução dos Testes de Fadiga .....	23
3.2.2. Medição do Fecho de Fenda .....	25
4. Resultados Experimentais e Discussão .....	29
4.1. Ensaaios a Amplitude Constante .....	29
4.1.1. Curvas de Propagação a-N .....	30
4.1.2. Curvas de Propagação da/dN- $\Delta K$ .....	31
4.1.3. Fecho de Fenda .....	32
4.2. Ensaaios com Sobrecargas Únicas .....	33
4.2.1. Curvas de Propagação a-N .....	34
4.2.2. Curvas de Propagação da/dN- $\Delta K$ .....	34
4.2.3. Curvas da/dN - a-a <sub>OL</sub> .....	35
4.2.4. Fecho de Fenda .....	37
4.3. Ensaaios com Sobrecargas Periódicas .....	38
4.3.1. Curvas de Propagação a-N .....	39
4.3.1. Curvas de Propagação da/dN- $\Delta K$ .....	39

4.3.2. Fecho de Fenda.....	41
5. Conclusões .....	43
6. Referências Bibliográficas .....	45
ANEXOS.....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Parâmetros de solicitações de fadiga [Branco et al, 2005] .....	6
Figura 2.2 - Modos de deformação de fendas por fadiga .....	7
Figura 2.3 - Esquema representativo da curva da/dN- $\Delta K$ [Borrego, 2001] .....	9
Figura 2.4 - Evolução do deslocamento da abertura da fenda com o valor de K, juntamente com a definição de $\Delta K_{ef}$ [Branco et al, 2005].....	10
Figura 2.5 - Mecanismos de fecho de fenda: (a) Fecho induzido por plasticidade, (b) Fecho induzido por óxidos e (c) Fecho induzido por rugosidade [Suresh & Ritchie, 1981] .....	12
Figura 2.6 - Efeito da Razão de Tensões na propagação de fenda [Branco et al, 2005] .....	13
Figura 2.7 - Comportamento transitório do crescimento da fenda aquando da aplicação de uma sobrecarga única [Skorupa. 1998] .....	14
Figura 2.8 - Efeito de sobrecargas periódicas na propagação de fendas na liga 2024-T3 [Ohrloff et al, 1988].....	15
Figura 2.9 - Curvas da-dN-DK com aplicação de sobrecargas periódicas [Borrego, 2001].....	15
Figura 2.10 - Curvas da-dN- $\Delta K$ para o estudo do efeito da tensão média [Borrego, 2001] .....	17
Figura 2.11 - Gráfico U- $\Delta K$ para o estudo do efeito da tensão média [Borrego, 2001].....	17
Figura 2.12 - Curvas experimentais carga-deslocamento com respetivos valores da carga de abertura [Antunes et al, 2010] .....	18
Figura 2.13 - Curvas de Propagação de Provete sujeitos a sobrecargas únicas [Nowell & De Matos, 2010] .....	19
Figura 2.14 - Curvas de propagação de fadiga teóricas e experimentais [Vasco-Olmo et al, 2013].....	19
Figura 3.1 - Representação geométrica dos provetes MT [ASTM, 2011] .....	21
Figura 3.2 - Montagem do provete na máquina.....	24
Figura 3.3 - Montagem pormenorizada do provete .....	25
Figura 3.4 - Montagem do extensómetro no provete.....	26
Figura 3.5 - Curvas de carga-deslocamento para $\Delta P$ constante e $R=-0.25$ [Borrego, 2001].....	26
Figura 3.6 - Obtenção da carga de abertura através do Método da Maximização do Coeficiente de Correlação [Borrego, 2001] .....	27
Figura 4.1 - Curvas a-N - Estudo do efeito da tensão média.....	30
Figura 4.2 - Curvas da-dN- $\Delta K$ - Estudo do efeito da tensão média .....	31
Figura 4.3 - Gráfico U- $\Delta K$ - Estudo do efeito da tensão média .....	32

Figura 4.4 - Curvas a-N – Estudo do efeito de sobrecargas únicas.....	34
Figura 4.5 - Curvas da/dN- $\Delta K$ - Estudo do efeito de sobrecargas únicas.....	35
Figura 4.6 - Gráfico da/dN - a-a <sub>OL</sub> - MT08 - Estudo do efeito das sobrecargas únicas.....	36
Figura 4.7 - Gráfico da/dN - a-a <sub>OL</sub> – MT12 - Estudo do efeito das sobrecargas únicas.....	36
Figura 4.8 - Curvas U- $\Delta K$ - Estudo do efeito das sobrecargas únicas.....	37
Figura 4.9 - Curvas a-N - Estudo do efeito de sobrecargas periódicas.....	39
Figura 4.10 - Curvas da/dN - Estudo do efeito de sobrecargas periódicas.....	40
Figura 4.11 - Gráfico U- $\Delta K$ - Estudo do efeito das sobrecargas periódicas.....	41

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição Química da Liga AA7050-T6.....	22
Tabela 3.2 - Propriedades da Liga AA7050-T6 .....	22
Tabela 4.1 – Plano de ensaios - Estudo do efeito da tensão média .....	29
Tabela 4.2 – Plano de ensaios - Estudo do efeito de sobrecargas únicas .....	33
Tabela 4.3 – Plano de ensaios - Estudo do efeito de sobrecargas periódicas .....	38





---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

- $A$  - Constante da lei de Forman  
 $a$  - Comprimento de fenda  
 $a_{OL}$  - Comprimento de fenda após sobrecarga  
 $a_c$  - Dimensão crítica das falhas do material  
 $C$  - Constante da lei de Paris  
 $C_0$  - Constante da lei de Paris modificada  
 $da/dN$  - Velocidade de propagação de fenda  
 $K$  - Fator de intensidade de tensões  
 $K_c$  - Fator de intensidade de tensões crítico  
 $K_{máx}$  - Fator de intensidade de tensões máximo  
 $K_{mín}$  - Fator de intensidade de tensões mínimo  
 $K_{op}$  - Fator de intensidade de tensões de abertura  
 $m$  - Expoente da lei de Paris  
 $m_0$  - Expoente da lei de Paris modificada  
 $N_{AC}$  - Número de ciclos a amplitude constante  
 $n_{BL}$  - Número de ciclos entre sobrecargas sucessivas  
 $P_{op}$  - Carga de abertura  
 $R$  - Razão de tensões  
 $U$  - Parâmetro de fecho de fenda  
 $Y$  - Fator geométrico adimensional  
 $\Delta a_{OL}$  - Incremento de fenda afetado pela sobrecarga  
 $\Delta K$  - Gama do fator de intensidade de tensões  
 $\Delta K_{ef}$  - Gama efetiva do fator de intensidade de tensões  
 $\Delta K_{lf}$  - Limiar de propagação de fadiga  
 $\Delta\sigma$  - Gama de tensões  
 $\sigma$  - Tensão axial

$\sigma_a$  - Amplitude de tensão

$\sigma_C$  - Tensão de cedência

$\sigma_m$  - Tensão média de fadiga

$\sigma_{m\acute{a}x}$  - Tensão máxima do ciclo de fadiga

$\sigma_{m\acute{i}n}$  - Tensão mínima do ciclo de fadiga

## **Siglas**

ASTM - American Society for Testing and Materials

CID - Correlação de Imagem Digital

CNC - Controlo Numérico Computorizado

CT - Compact-Tension

DEM - Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FEPA - Federation of the European Producers of Abrasives

ISEC - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

LED - Light Emitting Diode

MFLE - Mecânica da Fratura Linear Elástica

MT - Middle-Tension





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

As ligas de alumínio são tidas em conta num amplo espectro de aplicações, sendo constantemente utilizados em novas áreas, dada a baixa densidade aliada a uma boa resistência, denotando ainda boa condutividade térmica e excelente maquinabilidade. São, portanto, argumentos que fazem destas ligas boas opções a ter em conta para aplicações no campo aeronáutico e aeroespacial, entre muitas outras de grande exigência, como a indústria dos moldes. A liga 7050-T6 (Hokotol) apresenta uma boa combinação das propriedades mencionadas, para além de ter uma grande uniformidade das propriedades mecânicas ao longo da espessura. Esta combinação de propriedades torna esta liga numa válida alternativa para os propósitos supracitados.

Em geral, as solicitações a que os referidos componentes estão sujeitos nem sempre são simples nem brandas para com o material que os constitui. Muitas vezes, os carregamentos são complexos e as condições de serviço bastante severas. Além disso, as variações geométricas que os mesmos contêm, como entalhes e furos, constituem focos de concentração de tensões altamente desfavoráveis, as quais reduzem bastante o tempo durante o qual cumprirão a sua função satisfatoriamente. Portanto, faz todo o sentido considerar que esses mesmos elementos estarão sujeitos à fadiga, um processo que influencia o seu desempenho ao longo do tempo.

Sendo representativo de cerca de oitenta a noventa por cento dos casos de falha em componentes mecânicos, torna-se imperativo estudar o processo de fadiga, investigando métodos que permitam melhorar o comportamento dos materiais quando sujeitos a estas condições, o que diminuirá não só os custos materiais como também, nalguns casos, humanos. A presença das referidas variações dimensionais desencadeia efeitos de concentrações de tensões naquelas zonas, o que confere ainda mais importância aos estudos que visem retardar ou mesmo prevenir as falhas por fadiga. A análise da tolerância do material à fadiga toma, então, todos esses fatores em conta, para que não haja discrepâncias em relação ao esperado.

## 1.2. Motivação

A constante evolução tecnológica leva a que se necessite de uma crescente quantidade de informação sobre os materiais, de modo a poder aferir se os mesmos são adequados a determinadas aplicações. No caso da fadiga, que representa uma grande parte das falhas em componentes mecânicos, a previsão da vida dos materiais em ciclos é uma necessidade no mundo atual, a fim de reduzir custos materiais e humanos. Assim, estes devem ser solicitados mecanicamente em laboratório, analisando o seu comportamento, fazendo depois transposição da informação para componentes reais e prever o seu comportamento quando empregues nas aplicações físicas.

Cingindo a análise às ligas de alumínio, que constituem uma parte substancial dos materiais utilizados na atualidade, é relevante ter o conhecimento de como estas se comportam quando sujeitas a diferentes tipos de carregamento, como sobrecargas e variações de tensões, pois as solicitações reais são uma conjugação destas. Deste modo, encontrou-se na liga 7050-T6 uma boa oportunidade de investigação, dada a falta de estudos sobre o fenómeno do fecho de fenda nesta liga, aplicando vários tipos de solicitações para estudar a sua correlação com a velocidade de propagação de fenda.

## 1.3. Objetivos

A presente dissertação visa estudar e caracterizar o comportamento da liga AA7050-T6 à fadiga, através da análise da propagação de fendas no mesmo material. Para tal, são realizados ensaios de fadiga uniaxial, de acordo com a norma ASTM E647, com os parâmetros de fadiga a assumirem diferentes valores. Assim, no âmbito da presente dissertação, fez-se variar a tensão média, sendo depois realizados ensaios com sobrecargas, únicas e periódicas. Após o tratamento dos resultados obtidos nos testes de fadiga, pretende-se analisar a influência da tensão média e da aplicação das referidas sobrecargas na velocidade de propagação de fenda. Procura-se também determinar o fecho de fenda, recorrendo ao Método da Maximização do Coeficiente de Correlação, averiguando a sua influência nos resultados.

## 1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em seis diferentes capítulos. O primeiro, de carácter introdutório, tem como finalidade apresentar o estudo realizado e o que o motivou, bem como os seus objetivos.

No segundo capítulo é feita uma revisão científica, percorrendo todos os conceitos tratados no âmbito da dissertação, acerca da propagação de fendas por fadiga e do fenómeno do fecho de fenda, revendo os efeitos da tensão média e das sequências de carga. É também efetuada uma revisão do estado da arte, no sentido de recolher informação que sirva de referência ao estudo que é feito neste trabalho.

O terceiro capítulo apresenta e descreve todo o material utilizado para a concretização dos ensaios, além do procedimento adotado durante os mesmos.

No quarto capítulo são expostos os resultados obtidos, em três secções distintas: a primeira diz respeito ao estudo do efeito da tensão média, sendo as duas seguintes correspondentes aos ensaios com aplicação de sobrecargas únicas e periódicas, respetivamente.

As conclusões retiradas da dissertação apresentam-se no quinto capítulo, enquanto as referências bibliográficas citadas ao longo do texto se encontram no sexto capítulo.

Nos anexos são fornecidas as folhas de cálculo utilizadas para tratamento dos dados obtidos na dissertação.





## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Processo de Fadiga

A ASTM define a fadiga como sendo “um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou em vários pontos, e que pode culminar em fendas ou numa fratura completa após um número suficiente de variações de carga” [ASTM, 1972]

Este processo é uma junção de três fases distintas: iniciação, propagação e rotura. Caracteriza-se pela nucleação de fendas, as quais têm um crescimento microscópico, numa primeira instância, para depois se dar a sua propagação por meio de um crescimento macroscópico levando eventualmente à rotura final. A transição entre o período de iniciação e o de propagação é definida como sendo o instante em que as microfendas começam a surgir. Aí, utilizam-se os conhecidos conceitos da MFLE. Em componentes entalhados, a etapa dominante do processo de fadiga é a propagação de fenda, já que a iniciação é bastante facilitada pela concentração de tensões. Por outro lado, a existência de defeitos no material, resultantes do processo de fabrico, podendo ser a soldadura, a fundição, a maquinação, reduz significativamente a fase de iniciação da fenda.

#### 2.1.1. Solicitações de Fadiga

O processo amplamente estudado da fadiga tem origem em cargas dinâmicas, o que significa que as mesmas variam ao longo do tempo, podendo seguir ciclos com amplitude de tensão constante ou variável.

Os ciclos a amplitude constante caracterizam-se por fazer variar a tensão aplicada entre dois valores,  $\sigma_{máx}$  e  $\sigma_{mín}$ , os quais correspondem às tensões máxima e mínima induzidas no corpo solicitado. Outros parâmetros importantes são a tensão média, a amplitude de tensão, a gama de tensão e a razão de tensões. A figura 2.1 representa estas quantidades, num gráfico  $\sigma-t$ .

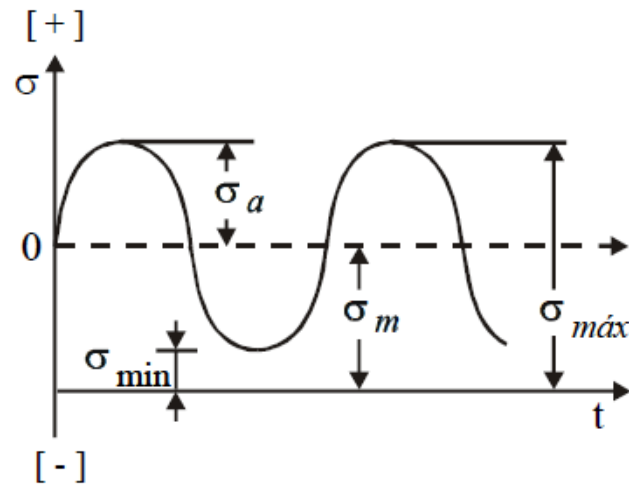


Figura 2.1 – Representação esquemática de um ciclo de fadiga [Branco et al, 2005]

As quantidades esquematizadas na figura são dadas pelas expressões:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{máx} - \sigma_{min} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{máx}} \quad (2.4)$$

Em que  $\sigma_{máx}$ ,  $\sigma_{min}$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_a$ ,  $\Delta\sigma$  e  $R$  representam, respetivamente, a tensão máxima, tensão mínima, tensão média, amplitude de tensão, gama de tensões e razão de tensões. Os ciclos a amplitude constante classificam-se em função do seu valor de  $R$ . Se esta quantidade tiver valor nulo, diz-se que o ciclo é pulsante. Se tiver valor -1, o ciclo é alternado puro. Já no caso de ser maior que zero, o ciclo considera-se ondulatório. Os ciclos de amplitude variável dividem-se em ciclos aleatórios ou de amplitude variável por blocos. Se no primeiro não existe qualquer relação da tensão aplicada com o tempo, o

segundo consiste numa sucessão de vários intervalos de tempo, dentro de cada qual a tensão aplicada está limitada por dois valores, um máximo e um mínimo.

## 2.2. Fator de Intensidade de Tensões

A MFLE é tida como a ferramenta mais apropriada na descrição do processo de propagação das fendas existentes num dado material, na qual o conhecimento do fator de intensidade de tensões se reveste de especial importância. Este parâmetro tem como objetivo a definição do campo de tensões nas proximidades da extremidade de uma fenda. Este fator  $K$  é função do produto apresentado em (2.5)

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

$Y$  é um fator geométrico, adimensional,  $a$  representa a dimensão característica da fenda e  $\sigma$  a tensão aplicada remotamente. Este fator exerce o controlo sobre a propagação de uma determinada fenda presente num sólido quando solicitado à fadiga. Para que a rotura não aconteça, é necessário que o referido fator  $K$  não ultrapasse o seu valor crítico, denominado  $K_C$ , o qual é uma propriedade intrínseca do material, correspondendo ao valor crítico de  $a$ ,  $a_c$ , e à tensão crítica,  $\sigma_C$ , sendo determinado experimentalmente e influenciado pela espessura da peça e pela temperatura à qual o material que a constitui está sujeito. As fendas podem deformar-se segundo um de três modos elementares de deformação, representados na figura 2.2 como modos I, II e III.

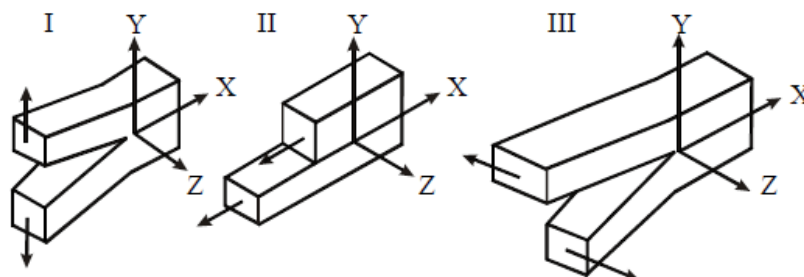


Figura 2.2 - Modos de deformação de fendas por fadiga [Borrego, 2001]

Apesar de as deformações das fendas poderem ser uma combinação de vários destes modos, aquele que se afigura como o mais importante em estudos no âmbito da Mecânica da Fratura é o primeiro, sendo a análise feita nesta dissertação concentrada nesse modo.

### 2.3. Curva $da/dN - \Delta K$

O crescimento das fendas originadas por solicitações cíclicas é um problema que deve ser cuidadosamente estudado, de forma a prevenir as roturas por fadiga de forma efetiva. Um dos auxílios mais preciosos nesse estudo é a relação entre a velocidade de propagação da fenda,  $da/dN$ , e a gama do fator de intensidade de tensões,  $\Delta K$ . Enquanto que uma representa a taxa de crescimento da fenda com o número de ciclos de carga a que o corpo está sujeito, a outra não é mais que a diferença entre os valores máximo e mínimo de  $K$  (2.6) durante um ciclo de carga.

$$\Delta K = K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n} \quad (2.6)$$

Os dois valores de  $K$  são correspondentes às tensões máxima e mínima verificadas durante o ciclo de carga a amplitude constante, conforme a definição do fator de intensidade de tensões (2.7).

$$K_{m\acute{a}x} = Y\sigma_{m\acute{a}x}\sqrt{\pi a} \quad (2.7a)$$

$$K_{m\acute{i}n} = Y\sigma_{m\acute{i}n}\sqrt{\pi a} \quad (2.7b)$$

O crescimento da fenda de fadiga com a gama do fator de intensidade de tensões, a amplitude constante, pode ser representado através de uma curva  $da/dN-\Delta K$  como a que é representada na figura 2.3.

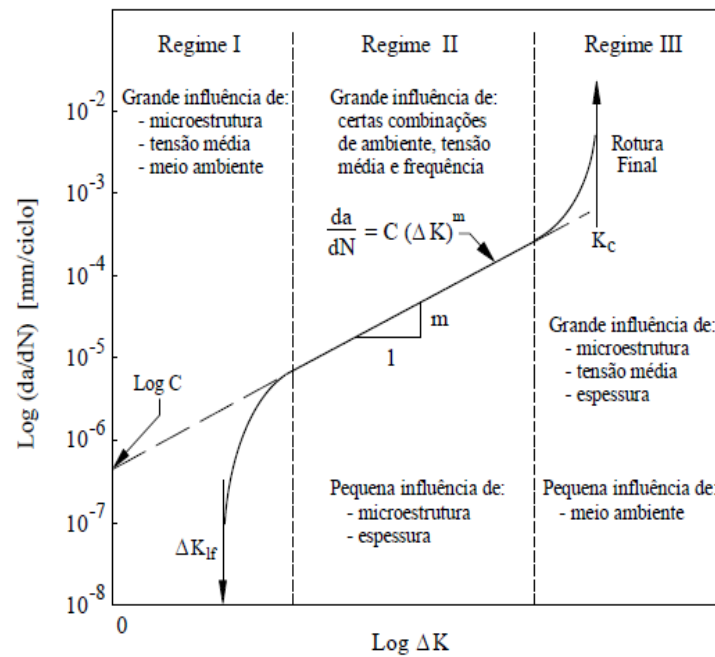


Figura 2.3 - Esquema representativo da curva  $da/dN-\Delta K$  [Borrego, 2001]

A curva é caracterizada por três regimes de propagação da fenda. Um primeiro, onde o limite inferior é um valor de  $\Delta K$  que dá início à propagação propriamente dita, denominado limiar de propagação de fadiga,  $\Delta K_{If}$ . No segundo regime, a propagação segue uma tendência aproximadamente constante, regida por leis de propagação como a de Paris [Paris & Erdogan, 1963], colocando a velocidade de propagação em função da gama do fator de intensidade de tensões (2.8).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.8)$$

$C$  e  $m$  são constantes dependentes do material, obtidas a partir de ensaios de propagação de fendas. No terceiro regime, a propagação é bastante mais célere, em que  $K_{máx}$  se aproxima rapidamente do seu valor crítico,  $K_c$ .

A lei de Paris (2.8) apenas traduz o comportamento da fenda no regime II de propagação. Para caracterizá-lo no primeiro regime, recorre-se à lei de Paris Modificada (2.9), enquanto no terceiro regime a ferramenta utilizada é a lei de Forman (2.10).

$$\frac{da}{dN} = C_0(\Delta K - \Delta K_0)^{m_0} \quad (2.9)$$

$$\frac{da}{dN} = \frac{A(\Delta K)^m}{(1 - R)K_c - \Delta K} \quad (2.10)$$

## 2.4. Fecho de Fenda

A propagação de fendas por fadiga, geralmente, é influenciada não só pela tensão média, como também pelo chamado fenómeno do fecho de fenda. O mecanismo atualmente mais aceite para a explicação deste é o concebido por Elber [1971]. A teoria desenvolvida pelo referido autor baseia-se no facto de que, aquando da propagação, a fenda cria, à sua frente, uma zona plástica. O avanço da fenda no interior desta região sofre um retardamento por parte de tensões residuais de compressão, decorrentes da formação da mesma zona plastificada. Estas levarão a que as faces da fenda entrem em contacto para valores de  $K$  superiores a  $K_{min}$ . A carga correspondente ao momento em que a fenda abre é dada como  $P_{op}$ , a qual gera o correspondente fator de intensidade de tensões,  $K_{op}$ . É a diferença entre este novo valor de  $K$  e  $K_{max}$  que representa a gama efetiva do fator de intensidade de tensões,  $\Delta K_{ef}$ , representada na figura 2.4.

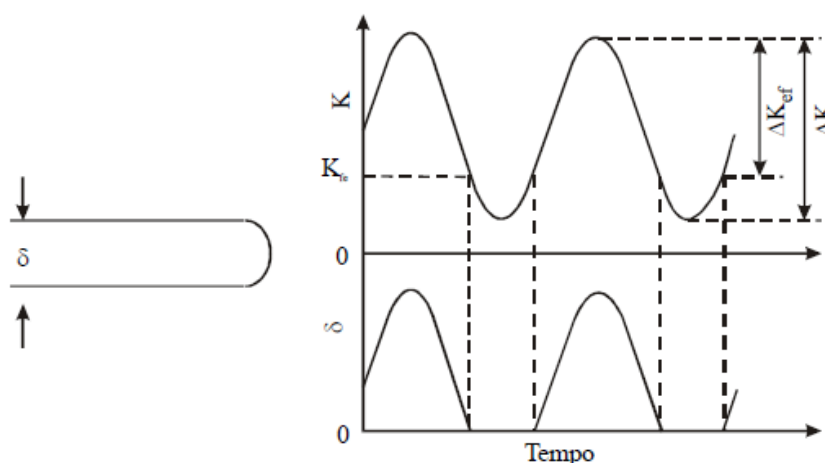


Figura 2.4 - Evolução do deslocamento da abertura da fenda com o valor de  $K$ , juntamente com a definição de  $\Delta K_{ef}$  [Branco et al, 2005]

Como esta nova gama  $\Delta K_{ef}$  será sempre inferior à gama nominal,  $\Delta K$ , desde que exista fecho de fenda, isso leva a velocidades de propagação inferiores. Elber postula ainda que, fora desta gama, ou seja, quando a fenda está fechada, não ocorre propagação.

O parâmetro  $U$  pode ser entendido como a fração efetiva da gama do fator de intensidade de tensões, sendo a sua expressão dada por 2.11 [Elber, 1971]. O significado desta quantidade entende-se como sendo a fração do ciclo durante a qual a fenda permanece aberta.

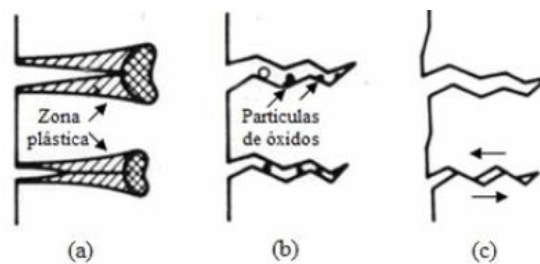
$$U = \frac{K_{m\acute{a}x} - K_{ab}}{K_{m\acute{a}x} - K_{min}} \quad (2.11)$$

Por outro lado, e tendo em conta a definição do parâmetro  $U$ , a gama efetiva do fator de intensidade de tensões pode agora ser definida com base em (2.12).

$$\Delta K_{ef} = U\Delta K \quad (2.11)$$

Assim, a curva de propagação efetiva de fenda é obtida através de  $\Delta K_{ef}$ , sendo representadas em curvas  $da/dN-\Delta K_{ef}$ , como forma de incluir o fenómeno do fecho de fenda no estudo da propagação das fendas no material.

Além do fecho de fenda induzido pela zona plastificada, existem ainda dois outros mecanismos globalmente aceites para explicação do fecho de fenda [Suresh & Ritchie, 1981]: por óxidos e por rugosidade. Se o primeiro é causado por partículas decorrentes de processos corrosivos, ou de fadiga a alta temperatura, as quais levam ao constrangimento do contacto das duas superfícies da fenda, o segundo é devido ao facto de as superfícies da fenda não serem polidas, causando contacto prematuro entre as mesmas, devido às irregularidades presentes. Os três mecanismos são representados na figura 2.5.



**Figura 2.5 - Mecanismos de fecho de fenda: (a) Fecho induzido por plasticidade, (b) Fecho induzido por óxidos e (c) Fecho induzido por rugosidade [Suresh & Ritchie, 1981]**

O fecho de fenda induzido pela zona plástica tem uma influência mais acentuada para valores de  $\Delta K$  mais elevados, ao passo que o fecho de fenda devido às rugosidades e aos óxidos tende a assumir maior protagonismo quando os valores da gama do fator de intensidade de tensões são mais baixos, pois a fenda ainda não tem uma propagação muito acentuada, o que leva ao contacto mais frequente das faces da fenda. Isso, por conseguinte, levará a que as rugosidades e os óxidos façam fechar a fenda maioritariamente para esses valores de  $\Delta K$ .

#### **2.4.1. Efeito da Tensão Média**

A propagação de uma fenda por fadiga é influenciada não só pelo material, como também pelo tipo de solicitações e do meio ambiente. Um aumento da tensão média de fadiga levará inevitavelmente a propagações mais rápidas, conforme esquematizado na figura 2.6. Isto quer dizer que para razões de tensões incrementalmente maiores corresponderão limiares de propagação mais reduzidos, bem como valores críticos de  $\Delta K$  mais baixos. Esta influência sente-se maioritariamente no primeiro e terceiro regimes de propagação. Porém, em certas ligas de alumínio, incluindo a liga AA7050-T6 estudada no âmbito desta dissertação, essa ação estende-se ao regime II, já que alterações promovidas ao nível da tensão média levam a mudanças no valor dos parâmetros da lei de propagação de Paris, ou seja, na constante  $C$  e no expoente  $m$ .



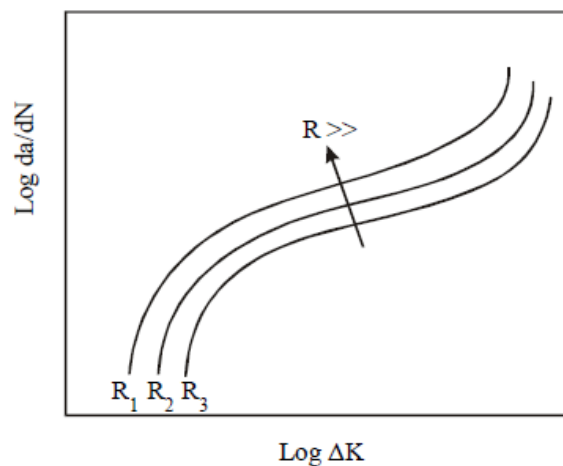


Figura 2.6 - Efeito da Razão de Tensões na propagação de fenda [Branco et al, 2005]

#### 2.4.2. Efeito da História de Carga

Do ponto de vista real, as solicitações a que os componentes mecânicos estão sujeitos são quase sempre de amplitude variável, contrapondo os dados anteriores para amplitudes constantes. A inclusão de sobrecargas únicas e periódicas são partes integrantes das solicitações a que, normalmente, os componentes estão sujeitos, implicando necessariamente acelerações e desacelerações na propagação das fendas existentes no material que os constitui. Importa, então, definir cada uma destas variações de carga. As sobrecargas únicas não são mais que a aplicação individual de uma carga superior à carga máxima do ciclo de base. Esta variação de amplitude traz efeitos no comprimento da fenda e na velocidade de propagação, esquematizados na figura 2.7, para a sua aplicação em ciclos de carga com amplitude constante.

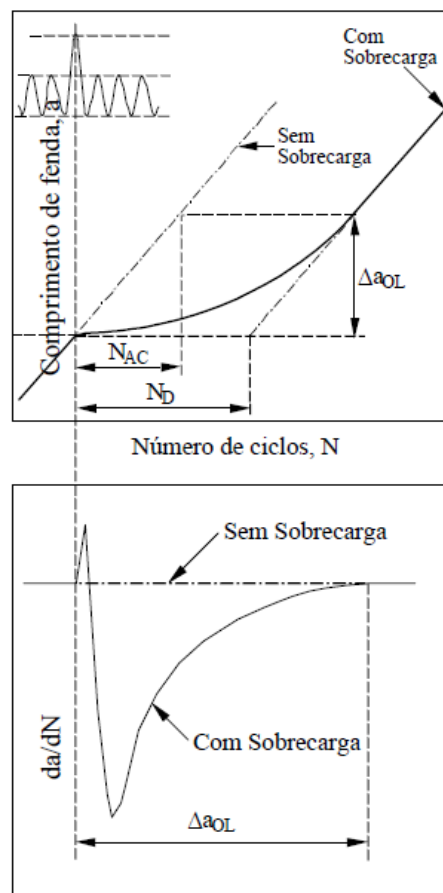


Figura 2.7 - Comportamento transitório do crescimento da fenda aquando da aplicação de uma sobrecarga única [Skorupa. 1998]

$N_D$  representa o número de ciclos de atraso,  $\Delta a_{OL}$  o incremento de fenda afetado pela sobrecarga e  $N_{AC}$  indica o número de ciclos de amplitude constante que seriam necessários para chegar ao comprimento  $\Delta a_{OL}$ .

A aplicação da sobrecarga faz aumentar a zona plastificada na frente da fenda, na qual se geram tensões residuais de compressão, criando uma resistência à propagação, promovida pelo ciclo de base, a qual se vê obrigada a abrandar. A essa diminuição da velocidade, até um valor mínimo, no segundo gráfico da figura 2.7, dá-se o nome de *delay retardation*. Depois desse intervalo de tempo, a velocidade de propagação tende a adquirir a tendência constante que tinha anteriormente á aplicação da sobrecarga, correspondente ao  $\Delta K$  do ciclo de base. Isso acontece quando a fenda se propaga para além da zona plástica gerada pela aplicação da sobrecarga.

Quando o material é sujeito a sobrecargas periódicas, a propagação de fenda não tem um comportamento tão previsível como anteriormente, pois a interação entre

sobrecargas sucessivas pode traduzir-se numa aceleração ou retardamento da velocidade de propagação. Isso dependerá, essencialmente, do intervalo definido entre sobrecargas consecutivas,  $n_{BL}$ . Na figura 2.8 são apresentados resultados de ensaios realizados para aferição da influência de sobrecargas periódicas com 10, 100 e 1000 ciclos de intervalo.

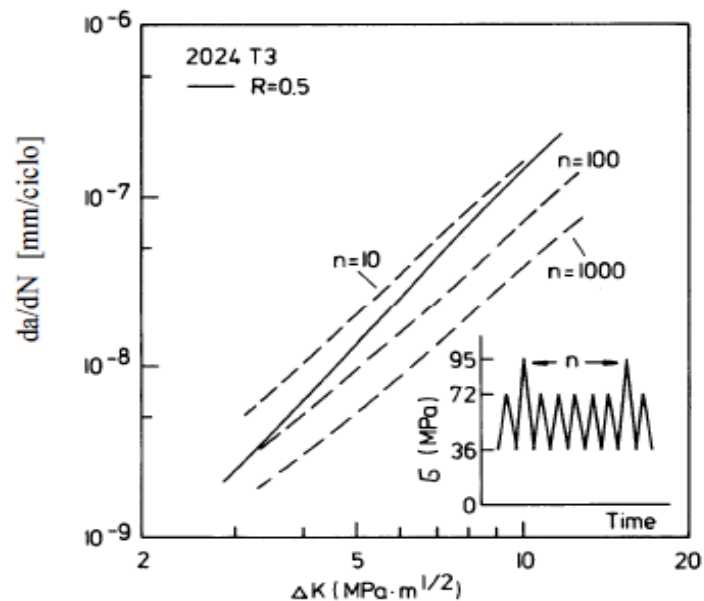


Figura 2.8 - Efeito de sobrecargas periódicas na propagação de fendas na liga 2024-T3 [Ohrloff et al, 1988]

O efeito da aplicação de sobrecargas periódicas foi também amplamente estudado por Borrego [2001], onde se efetuam ensaios na liga 6082-T6, com valores de  $n_{BL}$  de 10, 100, 1000 e 10000 ciclos, tendo obtido os dados apresentados na figura 2.9

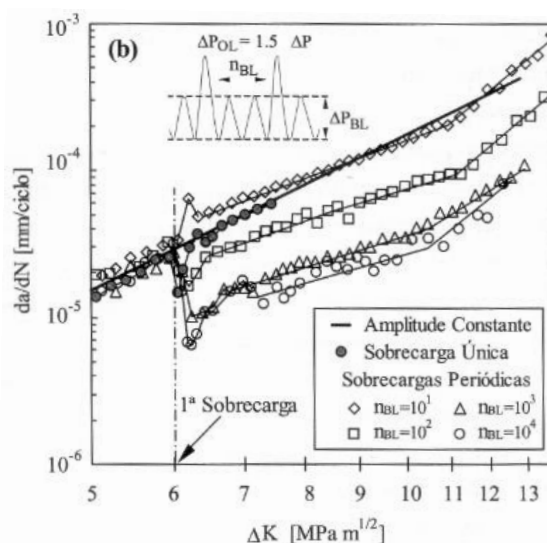


Figura 2.9 - Curvas da-dN-DK com aplicação de sobrecargas periódicas [Borrego, 2001]

Estes dados dizem respeito a ligas das séries 2000 e 6000, e ambas levam à conclusão de que, quanto maior for  $n_{BL}$ , maior será o efeito de retardamento da velocidade de propagação de fenda nas mesmas. Mais tarde será feita a comparação entre estes resultados e os desta dissertação.

## 2.5. Estado da Arte

No panorama científico, têm sido desenvolvidos, ao longo do tempo, estudos semelhantes àquele que é realizado nesta dissertação. A consulta desses trabalhos é necessária não só para que os dados aqui obtidos experimentalmente possam ter um termo de comparação, como também será útil para averiguar se serão pioneiros ou se a informação é corroborada por artigos anteriores.

Na área de estudo da propagação de fendas, vários têm sido os avanços, para que se tenha um conhecimento global dos materiais e do seu comportamento em serviço, nas mais variadas aplicações. Num trabalho em que a propagação de fendas é estudada segundo a influência dos mesmos parâmetros, Borrego [2001] apresenta as curvas de propagação para várias razões de tensões (-0.25, 0.05, 0.25 e 0.4) a amplitude constante, as quais constituem um bom indicador para o comportamento das ligas de alumínio quando sujeitas a diferentes carregamentos. Aqui, o estudo incide sobre a liga de alumínio 6082-T6, a qual apresenta propriedades bastante semelhantes à liga 7050-T6 tratada no âmbito desta dissertação, o que aumenta o interesse em comparar a informação aqui adquirida com a que é apresentada no estudo referido. As curvas são, então, apresentadas na figura 2.10.

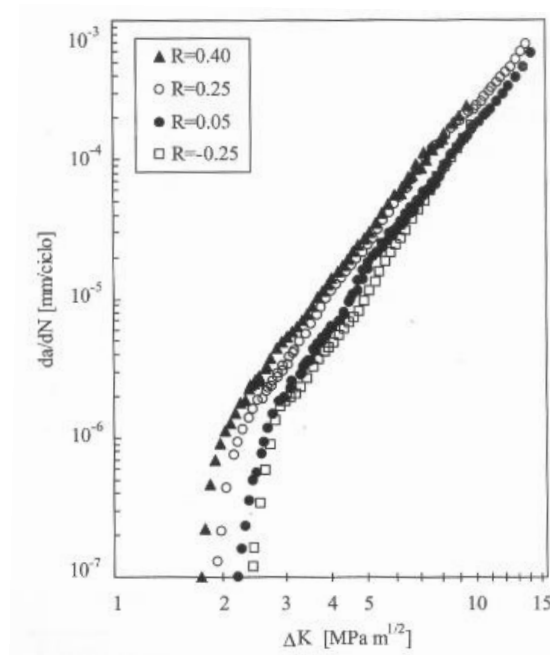


Figura 2.10 - Curvas  $da/dN$ - $\Delta K$  para o estudo do efeito da tensão média [Borrego, 2001]

Da análise do gráfico é possível reter que a tensão média efetivamente faz deslocar as curvas  $da/dN$ - $\Delta K$  para a esquerda, efeito já referenciado em 2.4.1.

No mesmo trabalho é também apresentado o estudo da influência do fenómeno do fecho de fenda, registando a evolução de  $U$  com  $\Delta K$ , para várias razões de tensões, como apresentado na figura.

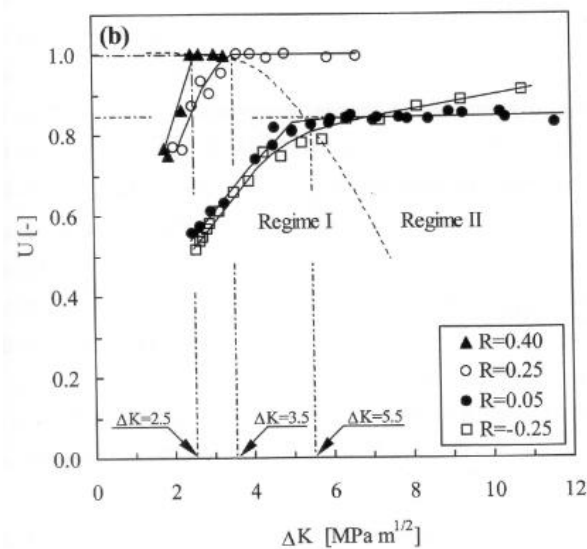
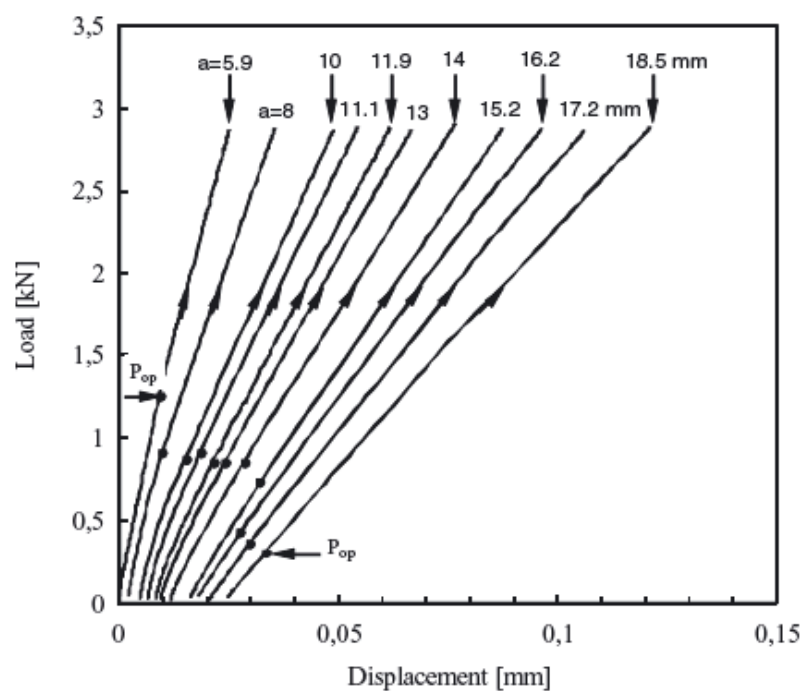


Figura 2.11 - Gráfico  $U$ - $\Delta K$  para o estudo do efeito da tensão média [Borrego, 2001]

Compreende-se aqui a demonstração de que, para razões de tensões superiores, o fecho de fenda tem um efeito menos acentuado, pelo facto de a fenda permanecer aberta durante uma parte significativa do ciclo de carga.

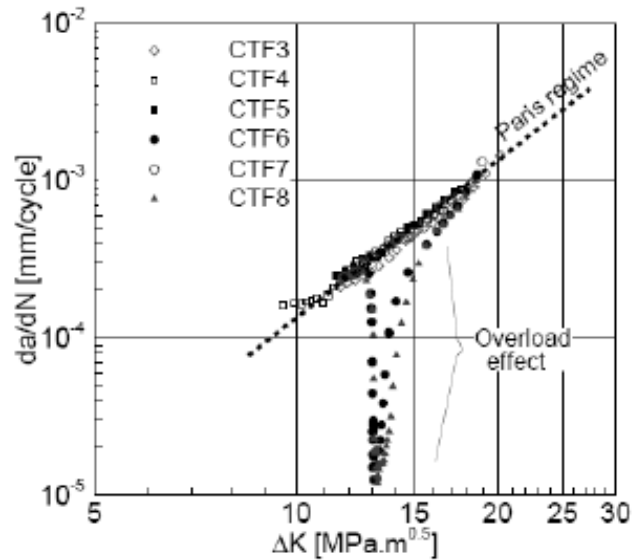
Num patamar cronológico mais próximo, o cruzamento de dados numéricos e experimentais na análise do fecho de fenda induzido por plasticidade tem sido usado consistentemente, sendo exemplo o de Antunes et al [2010], onde a determinação da carga de abertura, por meio do Método da Maximização do Coeficiente de Correlação, obteve dados muito interessantes, dado tratar-se de uma liga de alumínio do grupo 6000, com propriedades bastante semelhantes àquela que é tratada tanto no caso em estudo como a estudada no trabalho referido anteriormente. São apresentadas, de seguida, as curvas experimentais carga-deslocamento obtidas neste trabalho, para aplicações de amplitude constante, com a carga a variar entre 2850 N e 50 N.



**Figura 2.12 - Curvas experimentais carga-deslocamento com respetivos valores da carga de abertura [Antunes et al, 2010]**

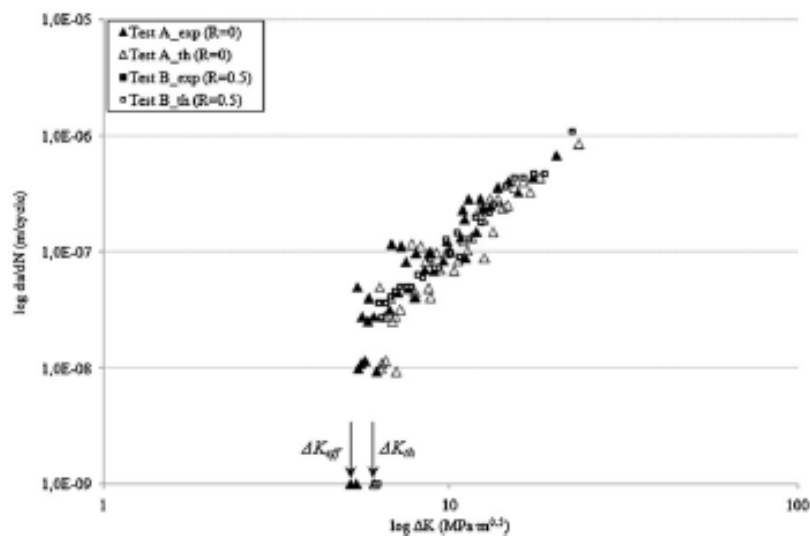
O estudo do efeito de sobrecargas por correlação de imagem digital (CID) usada em diversos trabalhos [Yusof et al, 2013], [Nowell & De Matos, 2010], técnica essa que tem originado dados de grande qualidade no estudo da propagação de fendas em ligas

de alumínio. No segundo destes, foram obtidas curvas de propagação através de técnicas CID, para o estudo em provetes CT, com aplicação de sobrecargas únicas.



**Figura 2.13 - Curvas de Propagação de Provetes sujeitos a sobrecargas únicas [Nowell & De Matos, 2010]**

Utilizando a mesma técnica, mas no estudo dos campos de deslocamento na vizinhança de fendas de fadiga [Vasco-Olmo et al, 2013], a obtenção de curvas de propagação de fadiga apresenta resultados que constituem um bom termo de comparação para o trabalho desenvolvido nesta dissertação, na figura 2.14. Aqui, são obtidas curvas  $da/dN$ - $\Delta K$  teóricas e experimentais, para razões de tensões de 0.5 e 0.



**Figura 2.14 – Curvas de propagação de fadiga teóricas e experimentais [Vasco-Olmo et al, 2013]**

Várias técnicas inovadoras têm sido aplicadas nesta área, como a difração de raios X por radiação de sincrotrão [Lopez-Crespo et al, 2014], para a medição dos campos de deformações na frente da fenda, em aços bainíticos. As malhagens das zonas próximas ao entalhe de provetes MT pelo método dos elementos finitos são também bastante usadas em trabalhos recentes [Antunes et al, 2015], constituindo uma solução bastante útil na previsão do fecho de fenda induzido plasticamente desde há bastante tempo.



### 3. MATERIAL E PROCEDIMENTOS

#### 3.1. Provetes

De modo a permitir o estudo da propagação de fendas na liga, devem ser utilizadas amostras da mesma. Com efeito, foram produzidos provetes do tipo MT, a partir de placas com espessura de 30 mm. Os provetes foram obtidos das placas através de maquinação em CNC, nas oficinas do ISEC, de modo a ficarem com as dimensões representadas na figura 3.1, em concordância com a norma ASTM [2011]. O entalhe central foi produzido através de electroerosão, tendo os furos sido incorporados para acoplamento do extensómetro de pinos, para medição do fecho de fenda.

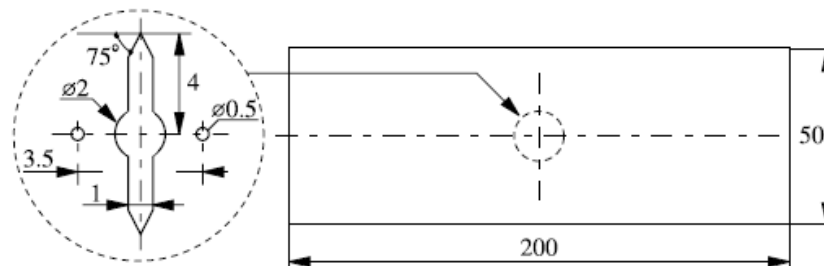


Figura 3.1 - Representação geométrica dos provetes MT [ASTM, 2011]

Foi utilizado este tipo de provetes já que possibilitam a observação do crescimento da fenda para ambos os lados do entalhe central, o que é de especial importância na aquisição dos dados necessários à obtenção das curvas de propagação que se pretendem, no estudo em questão.

##### 3.1.1. Propriedades e Composição da Liga AA7050-T6

Os provetes são fabricados na liga de Alumínio AA7050-T6. Este material caracteriza-se por ter uma baixa densidade (aproximadamente um terço da do aço) e excelente maquinabilidade, além de possuir uma grande uniformidade de propriedades ao

longo da espessura. A resistência à fluência também é muito satisfatória, bem como a soldabilidade. Porém, a resistência à corrosão é um handicap deste material, embora tal propriedade não seja determinante para o caso em estudo.

A liga recebeu um tratamento térmico T6, que corresponde a um tratamento de solubilização e envelhecimento. Na tabela 3.1 apresenta-se a composição química desta liga, sendo algumas das suas propriedades mais importantes especificadas na tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Composição Química da Liga AA7050-T6

LIGA	ELEMENTOS QUÍMICOS								
	Si [% máx]	Fe [% máx]	Cu [% máx]	Mn [% máx]	Mg [% máx]	Cr [% máx]	Zn [% máx]	Ti [% máx]	Zr [% máx]
AA7050-T6	0.30	0.35	2.6	0.1	2.6	0.05	7.6	0.06	0.25

Tabela 3.2 - Propriedades da Liga AA7050-T6

LIGA	TENSÃO DE CEDÊNCIA [MPa]	TENSÃO DE ROTURA [MPa]	ALONGAMENTO À ROTURA [%]	DUREZA BRINELL [HBS]	MASSA VOLÚMICA [kg/m <sup>3</sup> ]	MÓDULO DE YOUNG [GPa]
AA7050-T6	532	757	7,8	180	2830	70.3

### 3.1.2. Preparação dos Provetes

De modo a poder acoplar o provete na máquina de ensaios de fadiga, possibilitando uma correta aquisição de informação, é necessário que os provetes sofram algumas operações de preparação. Com efeito, procedeu-se ao polimento da zona central do provete, sempre na direção transversal à da propagação da fenda, de forma a que o correto visionamento da mesma fosse mais facilitado. As lixas utilizadas para o processo foram, segundo a designação da FEPA, as P500, P1000 e P2000, por esta ordem. De seguida, utilizaram-se pastas de diamante de 6 e de 3 micrómetros, o que diminui ainda

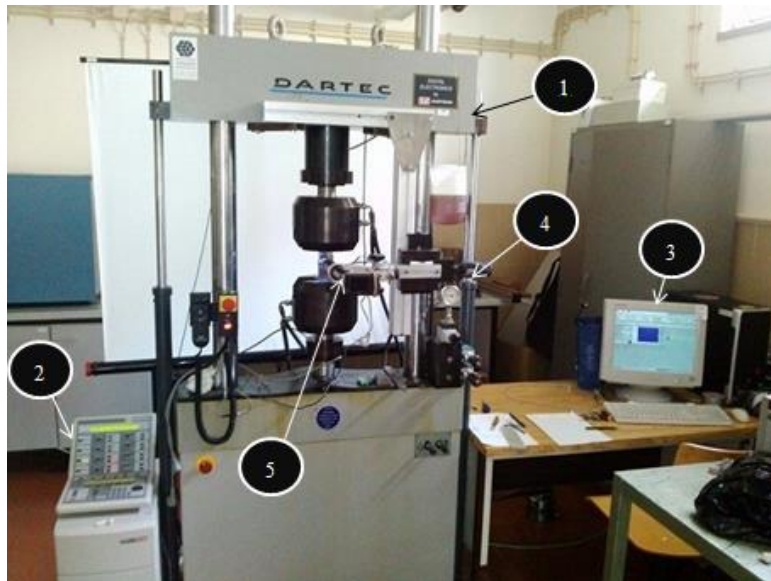
mais a rugosidade da superfície do provete. Por fim, pintou-se longitudinalmente a zona central do provete com uma caneta de acetato azul, para que a fenda pudesse ser mais visível, aumentando o contraste da fenda com a superfície do provete.

## **3.2. Procedimento Experimental**

### **3.2.1. Execução dos Testes de Fadiga**

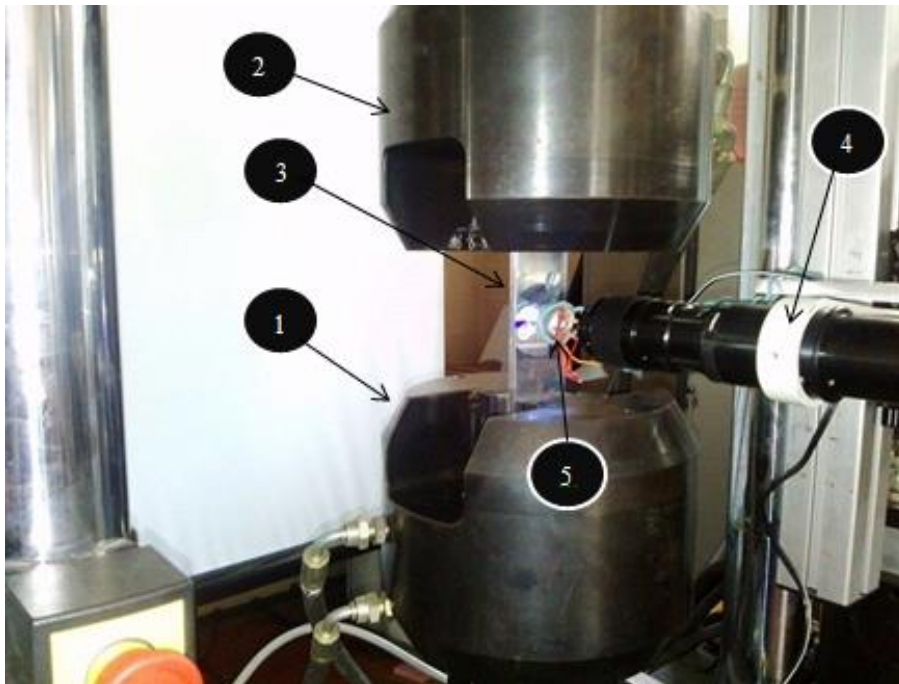
Os ensaios de fadiga que se pretendem realizar na liga AA7050-T6 visam sujeitá-la, por meio de carregamentos com diversos valores, à fadiga uniaxial. Para tal, é necessário um equipamento que permita aplicar e controlar as cargas sobre o material. A máquina servo-hidráulica *Dartec*, com capacidade de carga de 100 kN, foi a escolhida para proporcionar as condições necessárias aos ensaios, já que se caracteriza por um fácil manuseamento e uma boa adaptabilidade aos provetes selecionados, além de todas as cargas a aplicar se situarem na gama do equipamento.

Esta máquina utiliza um circuito hidráulico para aplicação da carga durante o ciclo de fadiga. O sistema de controlo digital *FastTrack 8800* permite três tipos de controlo: o de posição, o de carga e o de extensão. O software do fabricante Instron, presente no computador da figura 3.2, permite uma interface melhor e de mais fácil utilização, no controlo dos parâmetros de carga e de aquisição de dados. Os ensaios foram todos realizados no Laboratório de Construções Mecânicas do DEMUC, sendo a montagem experimental representada na figura 3.2.



**Figura 3.2 - Montagem do provete na máquina - Legenda: 1 - Máquina Servo-Hidráulica de Ensaio de Fadiga; 2 - Sistema de Controlo Digital; 3 - Computador; 4 - Mesa Micrométrica; 5 - Câmara Fotográfica Digital**

A montagem do provete nas amarras da máquina é exibida de modo mais pormenorizado na figura 3.3, na qual é igualmente mostrado o sistema de medição da fenda, composto por uma câmara fotográfica digital, de marca *Sony*, acoplada a uma lupa telescópica (do fabricante *MEIJI Techno*), bem como uma lâmpada LED e uma mesa micrométrica *Parker*, a qual permite ajustar a posição do aparelho de visualização nas direções horizontal e vertical, através de um micrómetro digital Mitutoyo e de um parafuso micrométrico, respetivamente. A utilização conjunta destes instrumentos visa conseguir uma boa monitorização do crescimento da fenda, tanto pela qualidade da imagem obtida, como da ampliação, resultantes da lupa e da própria câmara, que permite uma imagem 28 vezes ampliada em relação à imagem real.



**Figura 3.3 - Montagem pormenorizada do provete - Legenda: 1 - Amarra de Baixo; 2 - Amarra de Cima; 3 - Provete; 4 - Lupa Telescópica; 5 - Lâmpada LED**

O processo de cálculo da velocidade de propagação é o descrito na norma ASTM E647, ajustando um polinómio de segundo grau aos 5 pontos mais próximos de cada ponta da curva a-N.

### **3.2.2. Medição do Fecho de Fenda**

A medição do fecho de fenda exige o cálculo da gama efetiva, para a qual é necessário saber o ponto de abertura da fenda, de modo a poder estimar esse parâmetro.

Assim, para a medição do fecho de fenda, adotou-se o Método da Maximização do Coeficiente de Correlação, tendo este sido anteriormente utilizado em várias publicações [Borrego, 2001] [Borrego et al, 2003]. Este método tem como objetivo o cálculo da carga de abertura,  $P_{op}$ . O comportamento carga/deslocamento é monitorizado através da aquisição dos valores respeitantes às duas quantidades: sendo o valor de carga obtido a partir da célula de carga da máquina de ensaios, tendo o valor do deslocamento origem no sinal proveniente do extensómetro acoplado no provete. A montagem deste dispositivo é representada na figura 3.4

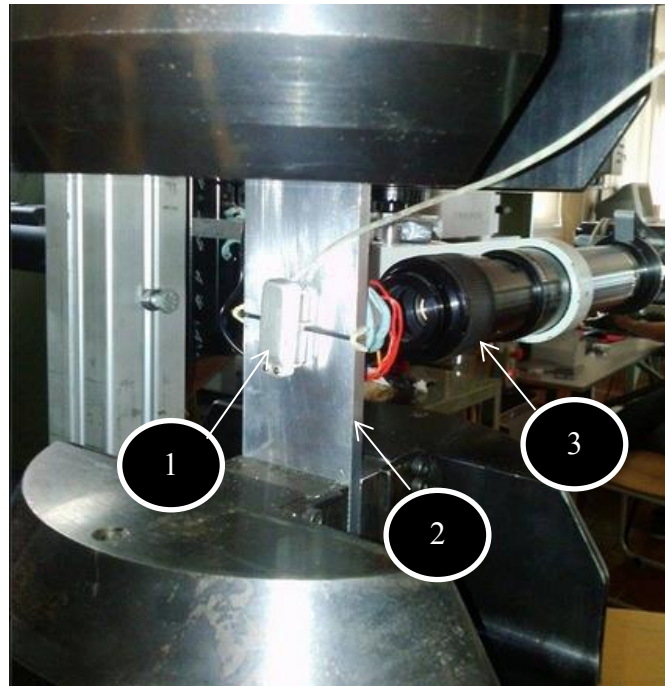


Figura 3.4 - Montagem do extensômetro no provete - Legenda: 1 - Extensômetro; 2 - Provete; 3 - Lupa Telescópica

O método consiste na utilização das curvas carga-deslocamento, semelhantes às da figura 3.5, referente ao estudo apresentado por Borrego [2001] ajustando-lhes retas, pelo método dos mínimos quadrados, através do qual é calculado o coeficiente de correlação linear.

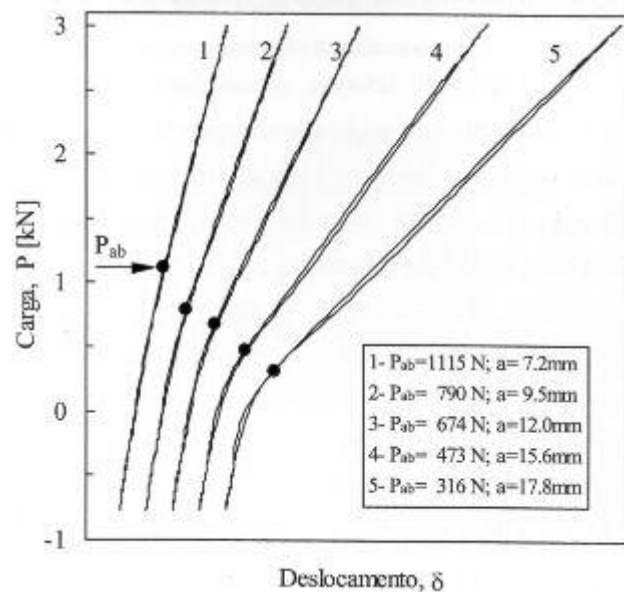
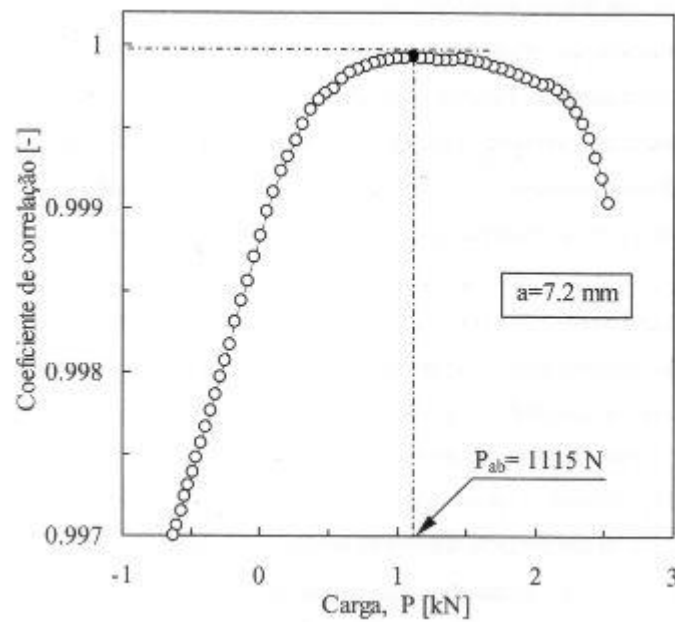


Figura 3.5 - Curvas de carga-deslocamento para  $\Delta P$  constante e  $R=-0.25$  [Borrego, 2001]

O processo é iterativo e o coeficiente vai sendo calculado sempre com base nos pontos anteriores da curva, até que seja calculado para todo o conjunto de dados. O ponto máximo deste coeficiente, num gráfico coeficiente de correlação-carga ( $R$ - $P$ ), como o que é representado na figura 3.6, irá ser associado à carga de abertura, que corresponde ao valor pretendido.



**Figura 3.6 - Obtenção da carga de abertura através do Método da Maximização do Coeficiente de Correlação [Borrego, 2001]**

A determinação da carga de abertura para cada uma das curvas experimentais  $P$ - $\delta$  servirá para calcular o parâmetro de fecho de fenda,  $U$ , podendo assim quantificar a influência do fenómeno do fecho de fenda na propagação de fenda propriamente dita, aferindo se o dito fenómeno causa o retardamento do crescimento da fenda ou se, devido ao facto de a fenda permanecer aberta, o parâmetro  $U$  adquire valores muito próximos da unidade e a sua influência é insignificante.





## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os dados obtidos experimentalmente, sendo que em cada secção é feita uma discussão dos mesmos, de forma a que possam ser compreendidos, além de comparados com resultados de trabalhos anteriores. Os ensaios foram feitos primeiro a amplitude de carga constante, com várias razões de tensões. Depois, procedeu-se à realização de testes com sobrecargas, as quais foram aplicadas de forma única, numa primeira fase, sendo periódicas numa segunda fase. Apresentam-se, então, os dados para todos os ensaios realizados, com as respetivas discussões de resultados.

### 4.1. Ensaios a Amplitude Constante

A fim de estudar o efeito da tensão média na velocidade de propagação de fenda, na liga AA7050-T6, fizeram-se sucessivos ensaios, com o procedimento já referido em 3.2.1. São aqui apresentados os dados referentes a quatro provetes ensaiados, sendo que as condições de carga são apresentadas na tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Plano de ensaios - Estudo do efeito da tensão média**

PROVETE	R	$P_{\text{máx}}$ [N]	$P_{\text{min}}$ [N]	f [Hz]
MT01	0.05	14000	700	20
MT02	0.05	9000	450	20
MT03	0.3	9000	2700	20
MT04	0.5	13000	6500	35

#### 4.1.1. Curvas de Propagação a-N

De forma a poder quantificar o efeito da tensão média, pode ser efetuada a comparação das curvas  $a-N$  para os vários ensaios realizados. Após a conclusão dos ensaios, realizados nos quatro provetes, os dados referentes ao provete MT01 foram apenas considerados como assessorios aos do provete MT02, já que o estudo da propagação de fenda no primeiro teve início em valores demasiado elevados do fator de intensidade de tensões, pelo que houve a necessidade de fazer um novo ensaio, com a mesma razão de tensões, a começar com valores de  $\Delta K$  inferiores, de modo a poder ter uma curva de referência completa que servisse de base de comparação com as curvas correspondentes a razões de tensões diferentes. Assim, para MT02, MT03 e MT04, as curvas  $a-N$  obtidas são apresentadas na figura 4.1.

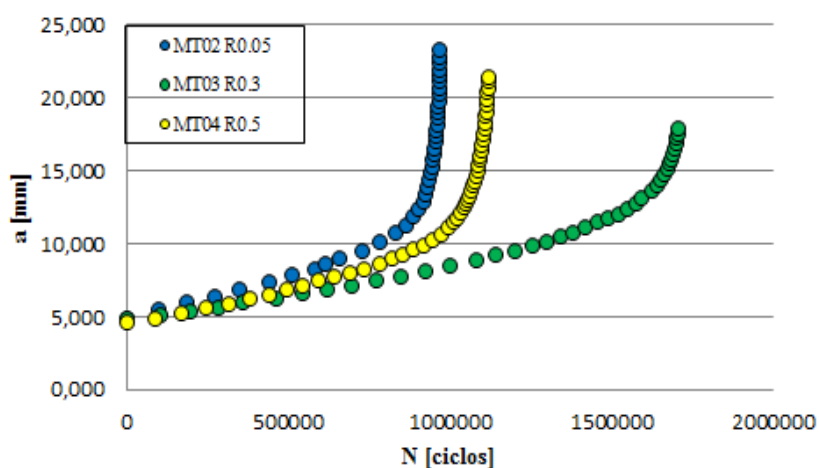


Figura 4.1 - Curvas a-N - Estudo do efeito da tensão média

Após a análise ao gráfico, observa-se que a curva referente ao provete MT04, cuja razão de tensões é superior à de MT03 e de MT02, está colocada entre estas. Isso deve-se ao facto de os valores de carga serem superiores, o que origina a uma propagação mais rápida com o número de ciclos, embora isto não permita inferir qual o efeito da tensão média. É a partir das curvas  $da/dN-\Delta K$ , obtidas de seguida, pelo procedimento descrito na norma, que se podem tomar as devidas conclusões sobre o efeito da tensão média na velocidade de propagação.

#### 4.1.2. Curvas de Propagação da/dN- $\Delta K$

As curvas de propagação obtidas para estes provetes são representadas no gráfico comparativo apresentado na figura 4.2, numa escala bi-logarítmica.

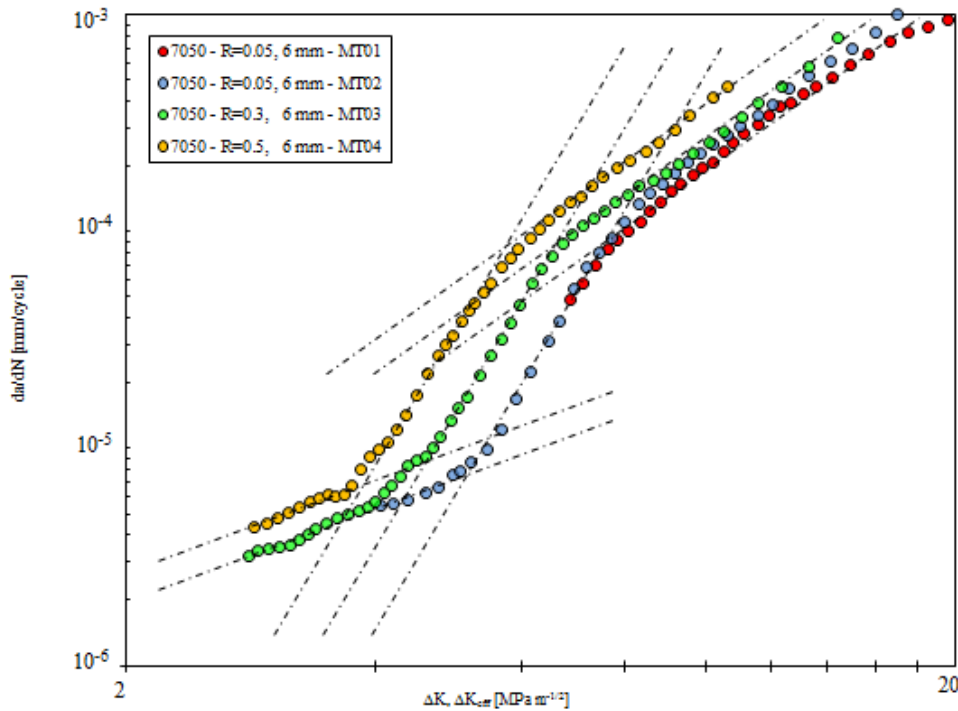


Figura 4.2 – Curvas da-dN- $\Delta K$  - Estudo do efeito da tensão média

Estabelecendo uma análise comparativa entre as curvas correspondentes a MT02, MT03 e MT04, já que o provete MT01 se exclui desta análise, e sendo a razão de tensões crescente, é seguro afirmar que, aumentado o valor deste parâmetro, em ciclos de amplitude constante, as curvas são deslocadas para cima, fazendo com que as taxas de propagação de fenda sejam mais rápidas. Além disso, são facilmente distinguidos três regimes de propagação, onde os declives podem ser aproximados por linhas retas paralelas, como se observa na mesma figura.

Os três regimes de propagação verificados devem-se essencialmente aos mecanismos de fecho de fenda. Para valores de  $\Delta K$  mais baixos, o fecho de fenda induzido por rugosidade e por óxidos tem um maior peso no retardamento da velocidade de propagação. Quando a fenda vai crescendo, estes deixam de ter tanta influência, passando a

ser a zona plástica na frente da fenda a principal causa do fecho de fenda. Isso leva, então, ao aumento da velocidade de propagação para valores de  $\Delta K$  mais elevados.

Comparando os dados com os apresentados em trabalhos anteriores, em que é feito o estudo do efeito da tensão média, é verificável que as tendências seguidas são bastante similares, podendo ser dito que os dados obtidos nesta liga são corroborados por Borrego [2001] e Vasco-Olmo et al [2013].

#### 4.1.3. Fecho de Fenda

A fim de explicar o comportamento da fenda fazendo variar a tensão média, foi medido o parâmetro de fecho de fenda,  $U$ , relacionando-o com a gama do fator de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , por meio de um gráfico  $U$ - $\Delta K$ . Assim, para os provetes de MT01 a MT04, os resultados obtidos são apresentados na figura 4.3.

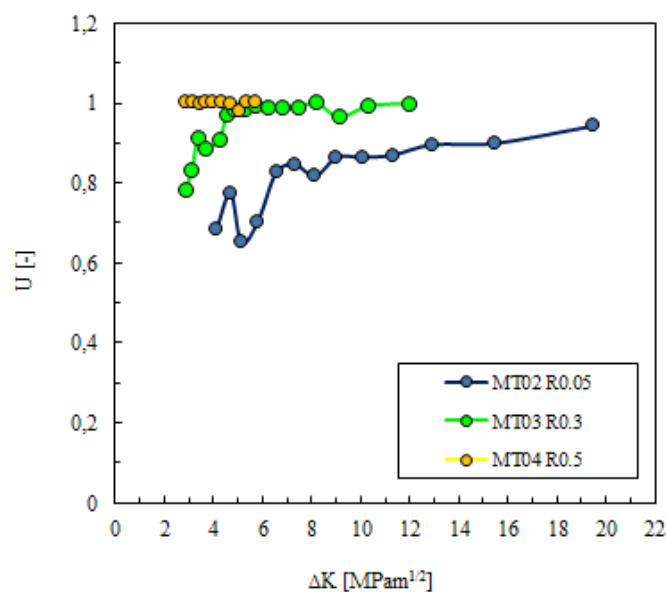


Figura 4.3 - Gráfico  $U$ - $\Delta K$  - Estudo do efeito da tensão média

A partir da representação gráfica anterior, deduz-se que, para os dados referentes ao provete MT02, em que a razão de tensões é de 0.05, o fenómeno do fecho de fenda tem mais influência no retardamento do crescimento de fenda, o que se conclui a partir da observação de que, para estes, o parâmetro  $U$  adquire valores mais baixos, o que

significa que a fenda está fechada durante uma parte significativa do ciclo de carga, sendo que, para valores de  $\Delta K$  superiores,  $U$  assume valores mais próximos da unidade (entre 0.8 e 0.9). Nos provetes MT03 e MT04 observam-se valores superiores do parâmetro  $U$  em toda a gama de valores de  $\Delta K$  analisados. Para a razão de tensões de 0.5, a fenda está aberta na quase totalidade do ciclo de carga, levando a que a propagação de fenda não sofra o efeito deste fenómeno. No provete MT03, o parâmetro  $U$  começa por assumir valores mais baixos, próximos de 0.8, estabilizando em valores próximos de 1, com o aumento de  $\Delta K$ , deixando o fecho de fenda de ter influência.

Analisando estes dados, à luz do que foi verificado por Borrego [2001], comprova-se a tendência de o fecho de fenda ter uma influência mais acentuada para razões de tensões inferiores. Pode então inferir-se que os dados obtidos nesta secção são confirmados pelo mesmo estudo.

## 4.2. Ensaios com Sobrecargas Únicas

Analogamente ao que foi executado anteriormente, na secção 4.1, apresenta-se na tabela 4.2 a referência dos provetes nos quais foram realizados ensaios com aplicação de sobrecargas únicas durante um ciclo de base, com os respetivos dados de carregamento. Apresentam-se também os dados dos ensaios realizados a amplitude de carga constante, cuja razão de tensões é idêntica, para efeitos de comparação. Para estudar o efeito das sobrecargas únicas, utilizaram-se valores da razão de tensões  $R=0.05$  e  $R=0.3$ , realizando ensaios de amplitude constante e aplicação de sobrecargas únicas com o dobro da carga máxima.

**Tabela 4.2 – Plano de ensaios - Estudo do efeito de sobrecargas únicas**

PROVETE	R	$P_{\text{máx}}$ [N]	$P_{\text{min}}$ [N]	OV [N]
MT02	0.05	9000	450	-
MT03	0.3	9000	2700	-
MT08	0.05	9000	450	18000
MT12	0.3	9000	2700	18000

Para aferir o efeito destas sobrecargas, foi medido o crescimento da fenda com o número de ciclos, além das curvas  $da/dN-\Delta K$ .

#### 4.2.1. Curvas de Propagação $a-N$

Procedendo ao cálculo das curvas de propagação  $a-N$ , pelo mesmo processo efetuado em 4.1.1, foram obtidos os dados da figura 4.4

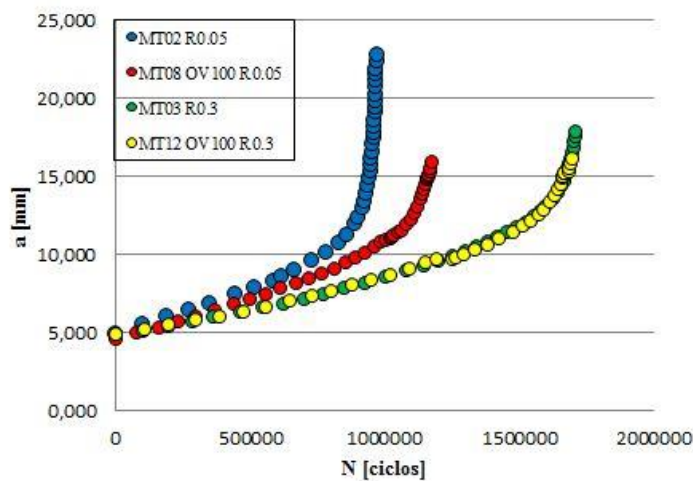


Figura 4.4 - Curvas  $a-N$  – Estudo do efeito de sobrecargas únicas

As curvas  $a-N$  resultantes destes ensaios permitem afirmar que, para a razão de tensões de 0.05, a propagação de fenda sofre um retardamento com a aplicação de sobrecargas únicas, algo que não acontece para  $R=0.3$ , onde as duas curvas referentes a MT03 e a MT12 são coincidentes.

#### 4.2.2. Curvas de Propagação $da/dN-\Delta K$

À semelhança do que foi realizado em 4.1.2, procedeu-se à obtenção das curvas de propagação  $da/dN-\Delta K$  para os ensaios realizados com sobrecargas únicas, sendo estas apresentadas na figura 4.5.

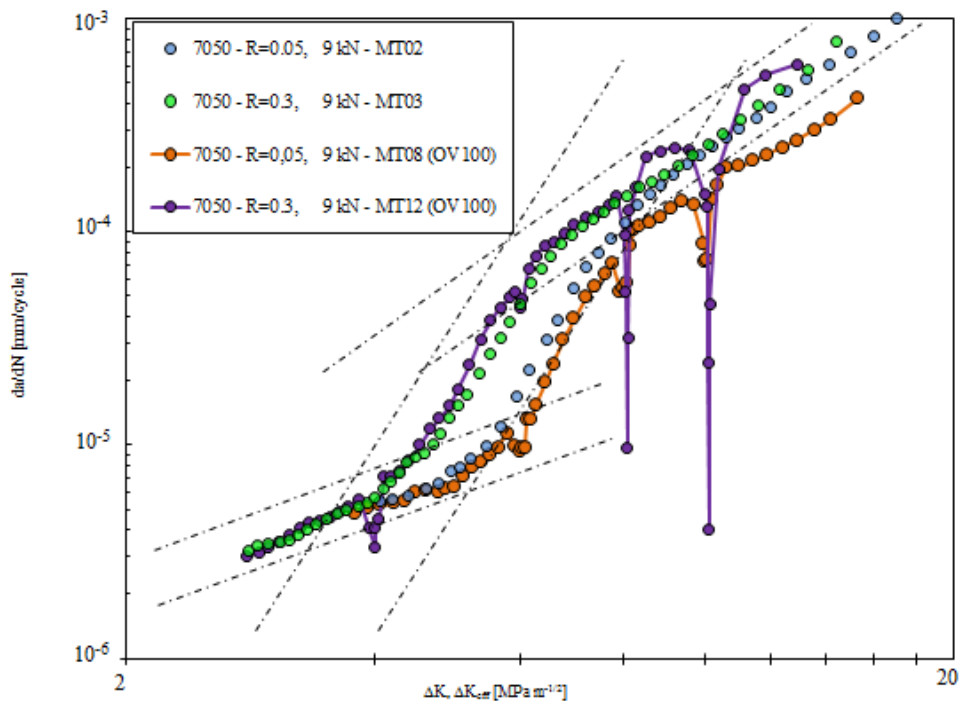


Figura 4.5 - Curvas  $da/dN$ - $\Delta K$  - Estudo do efeito de sobrecargas únicas

A partir da análise deste, é possível afirmar que, para a razão de tensões de 0.3, o efeito das sobrecargas únicas no sentido de retardar o crescimento de fenda é bastante mais significativo do que no caso em que a razão de tensões tem o valor de 0.05. Isso verifica-se analisando os pontos onde são aplicadas sobrecargas, nos quais a velocidade de propagação decresce, assumindo depois a tendência que vinha tendo, nos pontos anteriores à aplicação da sobrecarga. Esse retardamento, como se verifica comparando o andamento dos pares de curvas MT02-MT08 e MT03-MT12, é bastante mais significativo no segundo par, permitindo inferir que o efeito das sobrecargas únicas se faz sentir com maior relevo para razões de tensões superiores.

#### 4.2.3. Curvas $da/dN$ – $a-a_{OL}$

No sentido de perceber melhor o comportamento transitório aquando da aplicação das sobrecargas únicas na liga, determinou-se a evolução da velocidade de propagação com o comprimento de fenda após a sobrecarga, à semelhança do que foi descrito na figura 2.7, na secção 2.4.

Utilizaram-se os valores do comprimento de fenda medidos antes, durante e após a aplicação das sobrecargas, nos provetes MT08 e MT12, comparando os mesmos, respectivamente, com os dos provetes MT02 e MT03, com razões de tensões correspondentes de 0.05 e 0.3. Depois de calculados para os valores já referidos do comprimento de fenda, obtêm-se os gráficos  $da/dN - a-a_{OL}$ , aqui representados para os provetes MT08 e MT12 nas figuras 4.6 e 4.7, respetivamente.

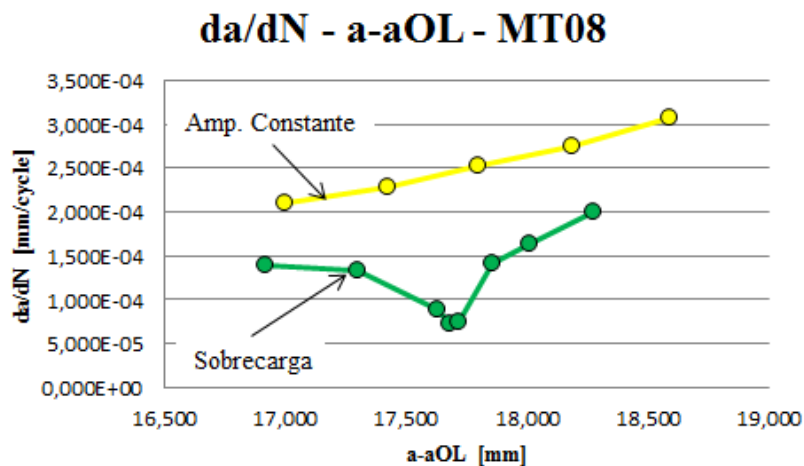


Figura 4.6 - Gráfico  $da/dN - a-a_{OL}$  - MT08 - Estudo do efeito das sobrecargas únicas

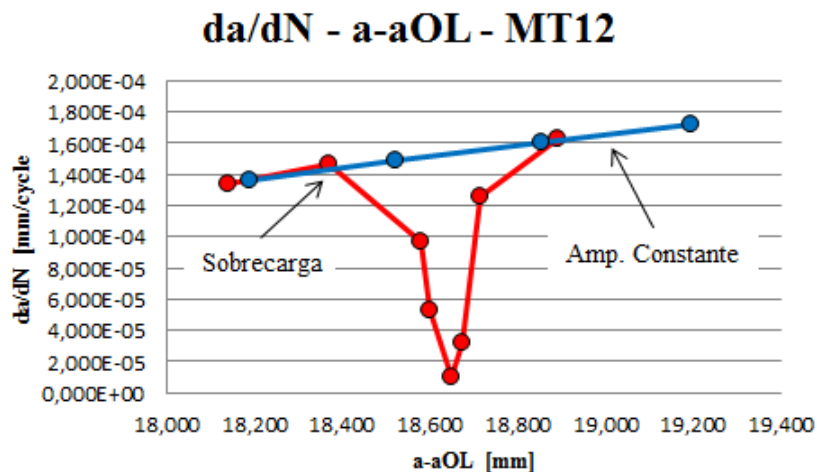


Figura 4.7 - Gráfico  $da/dN - a-a_{OL}$  - MT12 - Estudo do efeito das sobrecargas únicas

A análise dos dois gráficos permite inferir que, logo após a aplicação de uma sobrecarga única, o fecho de fenda induzido por plasticidade leva a um retardamento imediato do crescimento de fenda, seguido de um aumento no sentido de retomar a tendência que a velocidade de propagação levava nos momentos anteriores à sobrecarga.



Além disso, da análise aos valores dos dois gráficos depreende-se que, para os dados de MT12, onde a razão de tensões é mais elevada, a sobrecarga leva a um retardamento maior que aquele que é verificado para os de MT08, conforme tinha sido verificado nas curvas de propagação  $da/dN-\Delta K$  correspondentes aos mesmos provetes.

No caso de MT12, o retardamento da velocidade de propagação faz baixar  $da/dN$  até cerca de dezasseis vezes, no pico inferior do gráfico. Esse retardamento dá-se entre os valores de  $a$  de 18,5 mm e 19,2 mm. Assim, o comprimento de fenda afectado pela sobrecarga,  $\Delta a_{OL}$ , é de 0,7 mm.

Em MT08 o retardamento não se sente com tanto impacto, atingindo uma velocidade apenas três vezes inferior à que tinha antes da sobrecarga, entre os comprimentos de fenda de 17,3 mm e 17,9 mm. Isto perfaz um  $\Delta a_{OL}$  de 0,6 mm.

#### 4.2.4. Fecho de Fenda

Fazendo a medição do fecho de fenda, utilizando o processo idêntico ao adotado em 4.1.3, foi possível obter as curvas  $U-\Delta K$  apresentadas na figura 4.8.

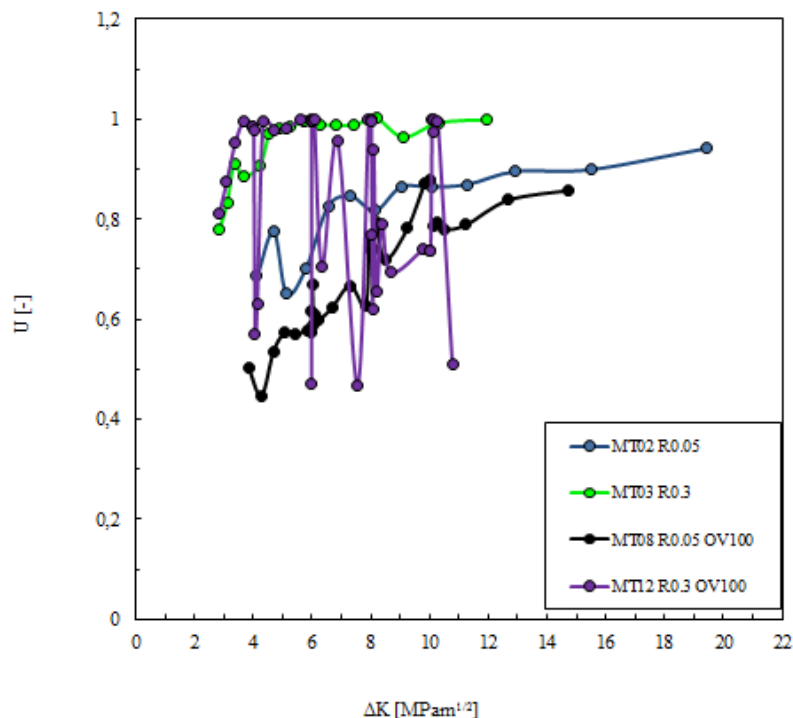


Figura 4.8 - Curvas  $U-\Delta K$  - Estudo do efeito das sobrecargas únicas

Conforme é corroborado pelas curvas de propagação, o fecho de fenda apresenta variações significativas nos pontos onde são aplicadas sobrecargas. No caso dos dados de MT12, quando comparado o seu gráfico com o de MT03, as sobrecargas fazem diminuir bastante o parâmetro  $U$ , onde o fenômeno do fecho assume grande importância, atingindo mesmo valores entre 0,6 e 0,5. Já restringindo a comparação entre MT02 e MT08, observa-se que os valores do parâmetro  $U$  têm valores ligeiramente menores no caso de MT08. Porém, as diminuições da velocidade de propagação, provocadas pelas sobrecargas, não são tão significativas.

Assim, pela análise dos dados obtidos, conclui-se que o fecho de fenda teve mais influência, para o maior valor da razão de tensões, no retardamento do crescimento de fenda.

### 4.3. Ensaios com Sobrecargas Periódicas

De modo a poder ser feito um estudo do efeito da aplicação de sobrecargas periódicas, foram efetuados ensaios com a aplicação de sobrecargas aplicadas de modo intermitente ao longo do espectro de solicitação do provete.

Para o efeito, foram realizados ensaios em três provetes, com razão de tensões do ciclo de base idêntica, assumindo o valor de 0.05. Foram realizados ensaios em três provetes, MT13, MT14 e MT15, nos quais as sobrecargas têm intervalos de aplicação de 1000, 10000 e 100 ciclos, respectivamente. Na tabela 4.3 são indicados os provetes ensaiados com os respectivos dados de carregamento.

**Tabela 4.3 – Plano de ensaios - Estudo do efeito de sobrecargas periódicas**

PROVETE	R	$P_{\text{máx}}$ [N]	$P_{\text{min}}$ [N]	OV [N]	$n_{\text{BL}}$ [ciclos]
MT02	0.05	9000	450	-	-
MT13	0.05	9000	450	13500	1000
MT14	0.05	9000	450	13500	10000
MT15	0.05	9000	450	13500	100

Prontamente, os dados obtidos para estes provetes são comparados com o provete com correspondente tensão média, a amplitude constante.

### 4.3.1. Curvas de Propagação a-N

À semelhança do que foi realizado nas secções anteriores, são apresentadas as curvas de propagação  $a-N$  referentes aos ensaios realizados com sobrecargas periódicas, na figura 4.9

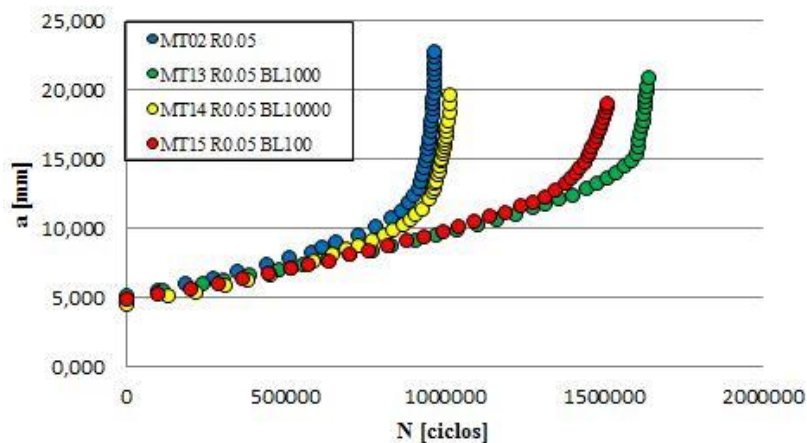


Figura 4.9 - Curvas a-N - Estudo do efeito de sobrecargas periódicas

A análise às curvas permite inferir que, para um  $n_{BL}$  de 10000, as sobrecargas periódicas não exercem uma influência muito relevante na propagação de fenda. O mesmo não se pode afirmar acerca dos dados referentes a valores de  $n_{BL}$  de 100 e de  $n_{BL}$  de 1000. Porém, não é possível diferenciar qual o efeito no crescimento de fenda das sobrecargas periódicas com  $n_{BL}$  de 100 e de  $n_{BL}$  de 1000. Para tal, utilizar-se-ão as curvas de propagação  $da/dN-\Delta K$ .

### 4.3.1. Curvas de Propagação $da/dN-\Delta K$

Apresentam-se, na figura 4.10, as curvas de propagação  $da-dN-\Delta K$  para os provetes ensaiados com aplicação de sobrecargas periódicas.

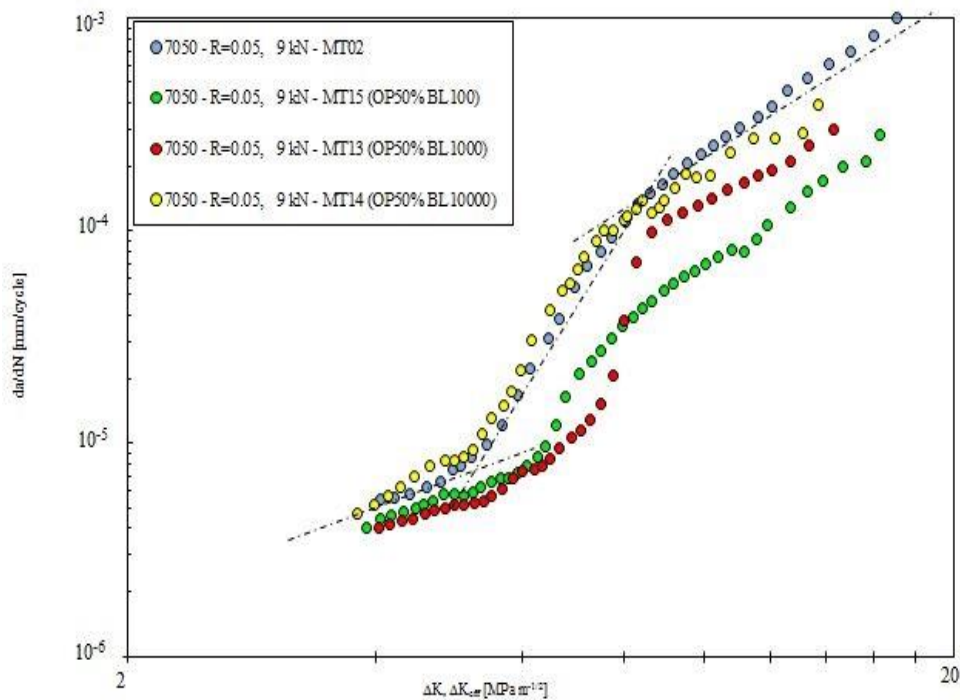


Figura 4.10 - Curvas da/dN - Estudo do efeito de sobrecargas periódicas

Pela análise dos dados obtidos, não é possível tirar conclusões totalmente válidas, devido à incoerência dos valores referentes aos provetes MT13 e MT14. A tendência seguida pela velocidade de propagação de fenda destes dois provetes não é constante com o aumento de  $\Delta K$ . Para valores de  $\Delta K$  inferiores a  $8 \text{ MPa.m}^{1/2}$ , estas estão numa posição contrária à que assumem para valores superiores a esse. Se a análise se cingir ao intervalo de valores de  $\Delta K$  entre 8 e 20, é permitido concluir que, para esta liga, uma redução de  $n_{BL}$  conduz a um maior retardamento do crescimento de fenda.

Quando comparados com os dados apresentados por Ohrloff et al [1988] e Borrego [2001], igualmente em ligas de alumínio, os aqui obtidos são opostos. Esses estudos indicam que, para valores superiores do número de ciclos entre sobrecargas sucessivas, a curva desloca-se mais para baixo, levando a propagações mais lentas. Ora, neste estudo, para a liga 7050-T6, foi verificada a relação inversa: aumentando  $n_{BL}$ , a propagação torna-se mais célere.

### 4.3.2. Fecho de Fenda

A fim de se perceber a influência do fenómeno do fecho de fenda, foi medido o parâmetro  $U$ , para os vários provetes, durante a realização dos ensaios aos mesmos, sendo depois representado o gráfico  $U-\Delta K$  para todos eles, comparando-os posteriormente ao do provete MT02, cuja razão de tensões é idêntica à do ciclo de base destes provetes. Essa representação gráfica é, então, apresentada na figura 4.11

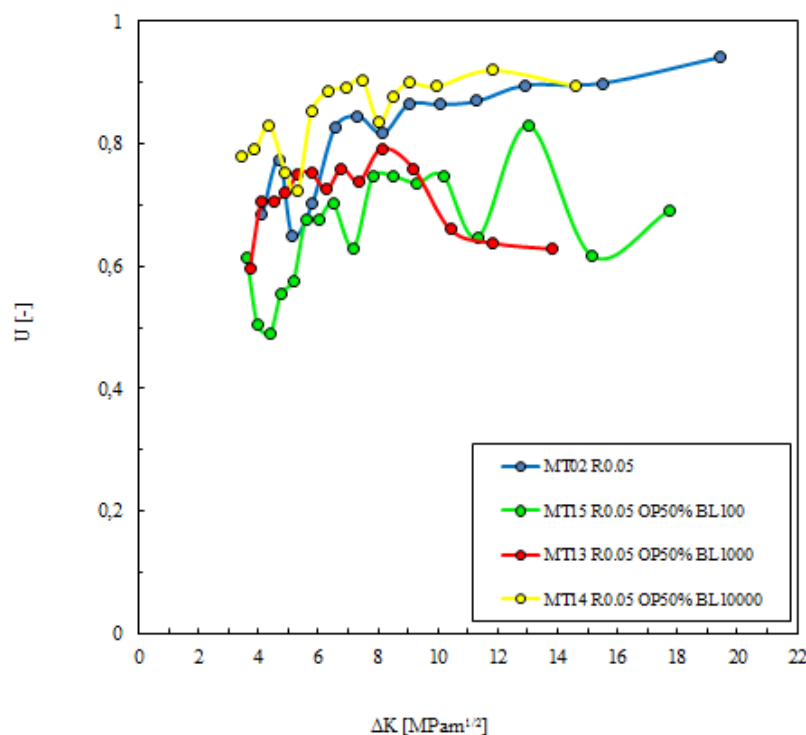


Figura 4.11 - Gráfico  $U-\Delta K$  - Estudo do efeito das sobrecargas periódicas

Depreende-se, após a análise do gráfico, que o fecho de fenda não exerce grande influência para um  $n_{BL}$  de 10000 ciclos, conforme verificado anteriormente na análise às curvas de propagação. É, no entanto, possível verificar que, para o provete MT13, cujos dados foram considerados inconclusivos, o parâmetro de fecho de fenda assume uma tendência bastante irregular, decrescendo bastante para valores de  $\Delta K$  mais elevados, o que é coerente com o aumento de velocidade de propagação observada nessa gama de valores de  $\Delta K$ .

Para o provete MT15, com um  $n_{BL}$  de 100, ocorre o fenómeno inverso, com o fecho de fenda a ter uma influência maior, até valores de  $\Delta K$  próximos de 10. Aumentando a gama do fator de intensidade de tensões a partir desse ponto, há uma flutuação nos valores de  $U$ , embora sempre superiores aos verificados para MT13.

## 5. CONCLUSÕES

Após a realização de todo o procedimento explicitado, foi possível tecer algumas conclusões bastante importantes na caracterização à fadiga desta liga de alumínio. Pode, então, afirmar-se que:

- Mantendo a amplitude de tensão constante, quanto maior for a razão de tensões, maior é a velocidade de propagação da fenda.
- O fecho de fenda tem uma influência mais significativa quando as razões de tensões assumem valores inferiores, devido ao facto de a carga de abertura ser superior, o que leva a que a fenda esteja fechada durante grande parte do ciclo de carga.
- A aplicação de sobrecargas únicas, durante um ciclo de base, faz retardar o crescimento de fenda para razões de tensões mais elevadas. Embora isso também aconteça para razões de tensões mais reduzidas, o seu efeito não é tão significativo.
- Os ensaios realizados com sobrecargas periódicas revelaram que a tendência da velocidade de propagação não é coerente em toda a gama de valores analisados de  $\Delta K$ . Porém, para valores mais elevados desta, quanto menor o intervalo entre sobrecargas, maior o retardamento da velocidade de propagação.

Concluída a dissertação, resta deixar algumas sugestões de trabalhos futuros, no seguimento do que foi aqui realizado:

- Utilizar o mesmo procedimento da norma ASTM E647 para a execução de ensaios de propagação de fendas utilizando ciclos de fadiga com blocos de carga, nesta liga, a fim de estudar o seu efeito.
- Recorrer ao Método do Desvio da Complacência, em detrimento do da Maximização do Coeficiente de Correlação, para determinação da carga de abertura de fenda.



---

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antunes, F. V., Branco, R., Costa, J. D., & Rodrigues, D. M. (2010). Plasticity induced crack closure in Middle-Crack Tension specimen: Numerical versus experimental. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials Structures*, 33, 673–686.
- Antunes, F. V., Camas, D., Correia, L., & Branco, R. (2015). Finite element meshes for optimal modelling of plasticity induced crack closure. *Engineering Fracture Mechanics*, 142, 184–200.
- ASTM E647-11 (2011). “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates”. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 591-630.
- ASTM E206-72 (1972). “Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue Testing and Statistical Analysis of Data”, ASTM Standards, USA
- Borrego, L. F. P. (2001), “Propagação de Fendas de Fadiga a Amplitude de Carga Variável em Ligas de Alumínio AlMgSi”, Coimbra.
- Borrego, L. F., J.M. Ferreira, J.M. Pinho da Cruz, J.M. Costa (2003), “Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure”, *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 1379-1397.
- Branco, C.M., Ferreira, J.M., Costa, J.D., Ribeiro, A.S. (2005), “Projeto de Órgãos de Máquinas”, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Elber, W. (1971) "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, American Society for Testing and Materials (Philadelphia) pp. 230-242.
- Lopez-Crespo, P., Steuwer, a., Buslaps, T., Tai, Y. H., Lopez-Moreno, a., Yates, J. R., & Withers, P. J. (2014). “Measuring overload effects during fatigue crack growth in bainitic steel by synchrotron X-ray diffraction”, *International Journal of Fatigue*, 71, 11–16
- Nowell, D., & De Matos, P. F. P. (2010), “Application of digital image correlation to the investigation of crack closure following overloads” *Procedia Engineering*, 2(1), 1035–1043.
- Ohrloff N., Gysler A., Lutjering G. (1988), “Fatigue Crack Propagation Behaviour under Variable Amplitude Loading”. *Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading*, (Ed. Petit J., Davidson D. L., Suresh S., Rabbe P.), Elsevier, pp. 24-34.

Paris, P. e Erdogan F. (1963), “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, *Journal of Basic Eng.*, ASME, pp. 528-534.

Skorupa, M. (1998), “Load Interaction Effects during Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading – A Literature Review, Part I: Qualitative Interpretation”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 22, pp 905-926

Suresh, S., Ritchie, R. O. (1984), “Near-threshold Fatigue Crack Propagation: A Perspective on the Role of Crack Closure”, *Fatigue Crack Growth Threshold Concepts*, AIME, pp. 227-261.

Vasco-Olmo, J. M., Díaz, F. a., García-Collado, a., & Dorado-Vicente, R. (2013). “Experimental evaluation of crack shielding during fatigue crack growth using digital image correlation”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 38(2), 223–237

Yusof, F., Lopez-Crespo, P., & Withers, P. J. (2013). “Effect of overload on crack closure in thick and thin specimens via digital image correlation” *International Journal of Fatigue*, 56, 17–24

## **ANEXOS**

Como anexos desta dissertação, para sustentação dos resultados apresentados, são colocadas as folhas de cálculo do Microsoft Excel utilizadas para tratamento dos dados. Perante o risco de estas ficarem mal formatadas e com má qualidade, na eventualidade de serem apresentadas no interior da versão impressa, as folhas foram colocadas em formato digital no CD entregue com a mesma.