



João Pedro Antunes Pimenta

# Análise de propagação de fendas de fadiga nas ligas de alumínio 7050-T7451 e 2050-T8

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica  
na Especialidade de Produção e Projecto

Julho/2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA





FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Análise da propagação de fendas de fadiga nas ligas de alumínio 7050-T7451 e 2050-T8**

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

### **Analysis of fatigue crack propagation in AA 7050-T7451 and AA 2050-T8**

**Autor**

**João Pedro Antunes Pimenta**

**Orientadores**

**Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes**

**Professor Mestre Joel Alexandre da Silva de Jesus**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa  
Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra

Professor Doutor Luís Filipe Pires Borrego  
Professor Coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Mestre Joel Alexandre da Silva de Jesus  
Investigador da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Julho, 2018**



Aos meus pais.



## Agradecimentos

A realização da presente dissertação apenas foi possível devido ao contributo das mais variadas pessoas às quais deixo o meu profundo obrigado.

Ao Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes por estar sempre disponível para me esclarecer dúvidas, pelo apoio, orientação e pela oportunidade de realização deste estudo.

Ao Mestre Joel Alexandre da Silva de Jesus por estar sempre presente, pela incansável ajuda e orientação pelo tempo e dedicação dispensados ao longo deste trabalho.

Ao Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa pelo tempo disponível para esclarecimento de duvidas e por toda a ajuda disponibilizada ao longo desta dissertação.

Aos meus pais pelo apoio e enorme esforço que fizeram para me proporcionarem o percurso académico, permitindo-me alcançar este objetivo.

Ao meu grupo de amigos que estiveram sempre ao meu lado ao longo deste percurso árduo pela paciência, ajuda, amizade e pelos grandes momentos que me proporcionaram foram sem duvida uma peça essencial e que levo para sempre guardada comigo.

Ao senhor Fernando Bernardes pelo fabrico dos provetes C(T).

À empresa Constellium pela disponibilização dos provetes M(T).

À Professora Doutora Marta Oliveira pela disponibilização do template.

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/1356/2014; COMPETE: T449508144-00019113).







## Resumo

Com o passar dos anos o alumínio tem vindo a ser uma das ligas não ferrosas mais usadas mundialmente sendo muito utilizado nas áreas das indústrias aeronáutica e automóvel devido ao fato da sua massa específica ser relativamente baixa e por aliar boas propriedades mecânicas apresentando a grande vantagem de redução de peso dos componentes fabricados com estas ligas. As ligas de alumínio apresentam elevada condutividade térmica e não é magnético, apresenta elevada resistência à oxidação e quando aliado a outros elementos é bastante resistente à corrosão em ambientes agressivos. O estudo da fadiga é muito importante em componentes sujeitos a esforços dinâmicos pois a falha por fadiga é o modo mais frequente de ruína em componentes sujeitos a cargas cíclicas.

Na presente dissertação estudou-se a propagação de fendas por fadiga para as ligas de alumínio 2050-T8 e 7050-T7451 sendo os provetes de cada uma destas ligas obtidos segundo as direções L-T e S-T do lingote. Através da realização de ensaios com amplitude de carga constante, obtiveram-se as curvas  $da/dN-\Delta K$ . Este estudo contemplou também a aplicação de sobrecargas, obtenção de perfis de dureza e uma análise metalográfica para cada um dos ensaios bem como uma análise das superfícies de fratura, determinação dos valores de fecho de fenda e estudar o efeito da geometria dos provetes.

Com a realização deste estudo foi possível concluir que as séries dos provetes obtidos segundo a direção L-T apresentam uma resistência à propagação de fenda superior aos provetes das séries obtidos segundo a direção S-T, o que pode ser explicado pelo facto de a fenda ter que atravessar os grãos microestruturais ao longo de todo o seu percurso. Foi também possível concluir que apesar destas ligas apresentarem elementos de liga diferentes, a maior influência na propagação de fenda está associada à direção segundo a qual os provetes são obtidos, e não tanto os elementos de liga. Por outro lado, a aplicação de sobrecargas conduz a um retardamento da fenda devido ao aumento de fecho de fenda induzido por plasticidade.

**Palavras-chave:** Propagação de fendas por fadiga, sobrecarga, fecho de fenda, AA 2050-T8, AA 7050-T7451



## Abstract

Over the years, aluminium has been one of the most used non-ferrous alloys worldwide and is widely used in aeronautics and in the automotive industry, due to the fact its specific mass is relatively low and because it combines good mechanical properties with the advantage of weight reduction of components made from these alloys. Aluminium presents high thermal conductivity and it is not magnetic, presents high resistance to oxidation and when combined with other elements it is very resistant to corrosion in aggressive environments. The study of fatigue is very important in components subjected to dynamic stresses because fatigue failure is the most frequent mode of ruin in components subjected to cyclic loads.

In the present dissertation the propagation of fatigue cracks for the aluminum alloys 2050-T8 and 7050-T7451 was studied, the specimens of each of these alloys being obtained according to the L-T and S-T directions of the ingot. By performing constant load amplitude tests, the curves of  $da/dN-\Delta K$  were obtained. This study also included the application of overloads, the obtaining of hardness profiles and a metallographic analysis for each one of the tests as well as an analysis of the fracture surfaces, determination of the values of the crack closure and study the effect of the specimens' geometry.

With this study it was possible to conclude that the series of the test specimens obtained according to the direction L-T have a fatigue strength crack propagation higher than the test specimens of the series obtained according to the S-T direction, which can be explained by the fact that the crack has to cross the microstructural grains throughout its entire course. Furthermore, although the aluminium alloys show different alloying elements, the greatest influence on crack propagation is associated with the direction in which the specimens are obtained, and not so much the alloying elements. On the other hand, the application of overloads leads to a crack retardation due to the increase of crack closure induced by plasticity.

**Keywords** Fatigue crack growth rate, overload, crack closure, AA 2050-T8, AA 7050-T7451.



## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação e Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	3
2. Revisão bibliográfica.....	5
2.1. Ligas de alumínio.....	5
2.2. Alumínio 7050-T7451 .....	6
2.3. Alumínio 2050-T8 .....	7
2.4. Propagação de fendas por fadiga nas ligas de alumínio .....	7
2.5. Propagação de fendas por fadiga .....	8
2.6. Fator de intensidade de tensões .....	10
2.7. Curvas da/dn- $\Delta K$ .....	10
2.8. Fecho de fenda .....	12
2.9. Sobrecargas .....	14
2.10. Constellium .....	16
3. Procedimento experimental.....	17
3.1. Materiais utilizados.....	17
3.2. Geometria dos provetes .....	18
3.3. Preparação dos provetes.....	20
3.4. Ensaios de propagação de fendas por fadiga nos provetes M(T).....	20
3.5. Ensaios de propagação de fendas por fadiga nos provetes C(T) .....	22
3.6. Medição e determinação do fecho de fenda.....	23
3.7. Aplicação de sobrecargas apenas nos provetes M(T).....	26
3.8. Ensaios de microdureza .....	27
3.9. Análise metalográfica .....	27
3.10. Análise da superfície de fratura.....	28
4. Análise de resultados .....	29
4.1. Análise de microdureza .....	29
4.2. Análise metalográfica .....	30
4.3. Propagação da fenda por fadiga nos provetes M(T).....	32
4.4. Propagação de fendas por fadiga nos provetes C(T) .....	36
4.5. Fecho de fenda .....	39
4.6. Sobrecargas .....	43
4.6.1. Curvas da/dN após sobrecarga .....	43
4.6.2. Sobrecargas – curvas $a_{sc-a}$ .....	44
4.7. Fecho de fenda para sobrecargas .....	46

4.8. Análise das superfícies de fratura.....	49
5. Conclusões .....	51
5.1. Sugestões para trabalhos futuros .....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
APÊNDICE A .....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Definição dos grupos A e B na propagação de fenda nas ligas de alumínio [6].	8
Figura 2 - Modos de fratura	10
Figura 3 - Crescimento de uma curva $da/dN-\Delta K$	11
Figura 4 - Sem fecho (a) Fecho induzido por (b) plasticidade, (c) óxidos, (d) rugosidade.	13
Figura 5 - Esquema representativo do fecho parcial de fenda [12].	14
Figura 6 - Velocidade de propagação da fenda em função do comprimento de fenda quando aplicada uma sobrecarga [14].	15
Figura 7 - Orientação dos provetes M(T) no lingote [21].	18
Figura 8 - Geometria dos provetes M(T) (medidas em milímetros) [23].	19
Figura 9 - Geometria dos provetes C(T) (medidas em milímetros) [24].	19
Figura 10 - a) Montagem do conjunto e seus componentes b) visualização da fenda através da luneta	21
Figura 11 - Montagem do conjunto utilizado para os provetes C(T)	22
Figura 12 - Montagem do extensómetro	23
Figura 13 - Gráfico carga-deslocamento para a série 2050L	24
Figura 14 - Gráfico carga-deslocamento para carga de amplitude constante	25
Figura 15 - Determinação da carga $P_{ab}$ através do Método da Maximização do Coeficiente de Correlação	25
Figura 16 - Determinação da carga $P_{fe}$ através do Método da Maximização do Coeficiente de Correlação	26
Figura 17 - Amostra dos provetes com a fenda propagada	27
Figura 18 - Amostras envolvidas em resina retiradas dos recipientes	27
Figura 19 - Microscópio eletrónico por varrimento Philips XL 30	28
Figura 20 - Medições de dureza	30
Figura 21 - Perfil de propagação da série 2050L	31
Figura 22 - Perfil de propagação da série 7050L	31
Figura 23 - Perfil de propagação da série 2050T	32
Figura 24 - Perfil de propagação da série 7050T	32
Figura 25 - Curvas $da/dN - \Delta K$ para a liga de alumínio 2050	33
Figura 26 - Curvas $da/dN - \Delta K$ para a liga de alumínio 7050	34

Figura 27 - Curva da/dN- $\Delta K$ para as ligas de alumínio 2050 e 7050 segundo a direção S-T .....	35
Figura 28 - Curva da/dN- $\Delta K$ para as ligas de alumínio 2050 e 7050 segundo a direção T-L .....	36
Figura 29 - Curva da/dN- $\Delta K$ para as séries 2050L para os provetes M(T) e C(T).....	37
Figura 30 - Curva da/dN- $\Delta K$ para as séries 7050L para os provetes M(T) e C(T).....	37
Figura 31 - Imagem ampliada da propagação de fenda em ambas as séries T-L nos provetes C(T).....	38
Figura 32 - Curva da/dN- $\Delta K$ para as séries 7050T para os provetes M(T) e C(T).....	39
Figura 33 - Gráfico U- $\Delta K$ durante a carga e descarga para a liga 2050L .....	41
Figura 34 - Gráfico U- $\Delta K$ durante a carga e descarga para a liga 2050T .....	41
Figura 35 - Gráfico U- $\Delta K$ durante a carga e descarga para a liga 7050L .....	42
Figura 36 - Gráfico U- $\Delta K$ durante a carga e descarga para a liga 7050T .....	42
Figura 37 - Curva da/dN- $\Delta K$ para sobrecarga nas séries 7050L e 2050L .....	44
Figura 38 - Curva a- $a_{sc}$ vs N para a série 7050L .....	45
Figura 39 - Curva a- $a_{sc}$ vs N para a série 2050L .....	45
Figura 40 - Gráfico U- $\Delta K$ durante a carga para sobrecargas para a liga 2050L .....	47
Figura 41 - Gráfico U- $\Delta K$ durante a carga para sobrecargas para a liga 7050L .....	48
Figura 42 - Determinação da carga $P_{fe}$ através do Método da Maximização do Coeficiente de Correlação .....	49
Figura 43 - Superfície de fratura da série 2050L sem sobrecarga.....	50
Figura 44 - Superfície de fratura da série 7050L sem sobrecarga.....	50



---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação das várias séries das ligas de alumínio .....	5
Tabela 2 - Parâmetro do tratamento térmico T7451 [4]. .....	6
Tabela 3 - Propriedades mecânicas da liga AA 2050-T8 [19]. .....	17
Tabela 4 - Propriedades químicas da liga AA 2050 T8 [19]. .....	17
Tabela 5 - Propriedades mecânicas da liga AA 7050-T7451 [20]. .....	18
Tabela 6 - Propriedades químicas da liga AA 7050-T7451 [20]. .....	18
Tabela 7 - Medições de dureza na superfície dos provetes .....	29
Tabela 8 - Constantes C e m para cada uma das séries .....	33
Tabela 9 - Médias do fator U .....	40



---

## SIMBOLOGIA

- $a$  – Comprimento de fenda num dado instante
- $a_{sc}$  – Comprimento de fenda aquando da sobrecarga
- $C, m$  – Constantes da lei de Paris
- $da/dN$  – Velocidade de propagação da fenda
- $K$  – Fator de intensidade de tensões
- $K_{ab}$  – Limiar de abertura da fenda
- $K_{IC}$  – Tenacidade à fratura
- $K$  – Fator de intensidade de tensões máximo
- $K_{min}$  – Fator de intensidade de tensões mínimo
- $N$  – Número de ciclos
- $P_{ab}$  – Carga de abertura de fenda
- $P_{fe}$  – Carga de fecho de fenda
- $R$  – Razão de tensões num ciclo de carregamento
- $U$  – Parâmetro normalizado da razão de carga
- $Y$  – Parâmetro geométrico
- $\Delta K$  – Gama do fator de intensidade de tensões
- $\Delta K_{ef}$  – Gama efetiva do fator de intensidade de tensões
- $\Delta K_{th}$  – Limiar de propagação de fendas por fadiga
- $\Delta P$  – Gama de carga
- $\sigma$  – Tensão aplicada



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação e Enquadramento

A fadiga é responsável por 80 a 90% das falhas que ocorrem em componentes mecânicos e compreende três fases principais, a nucleação, propagação e a rotura, sendo por isso importante compreender bem este fenómeno físico complexo de carácter estatístico. Este fenómeno é caracterizado por degradação progressiva das propriedades mecânicas do material, ou seja, um crescimento de uma ou mais fendas que levam à rotura final [1]. Sabe-se que as falhas por fadiga são promovidas por vários fatores, tais como o processo de fabrico, intensidade, tipo e duração das solicitações e carregamentos dinâmicos, a microestrutura dos materiais, as condições ambientais e a geometria. De referir que a existência de concentração de tensões auxilia na origem do aparecimento do fenómeno de fadiga.

As ligas de alumínio tem vindo a ter grande utilização, sendo uma das ligas não ferrosas mais usadas mundialmente apresentando alta resistência, boa tenacidade à fratura e resistência à corrosão sob tensão. Como, além disso tem uma massa específica relativamente baixa muito utilizada tanto na industria automóvel como na aeronáutica [2]. A Constellium é uma empresa que se dedica ao fabrico de ligas de alumínio. Esta empresa tem por objetivo desenvolver novas ligas com propriedades melhoradas, o que se consegue alterando a composição química e o tratamento térmico.

A motivação da seguinte dissertação surge do fornecimento de materiais pela Constellium para estudar o efeito da orientação dos provetes e para estudar a validade da abordagem da  $da/dN - \Delta K$ , ou seja, como a direção segundo a qual os provetes foram obtidos (L-T/S-T) influencia as curvas da  $da/dN - \Delta K$ . Assim, ao longo desta dissertação vai ser estudada a propagação de fendas por fadiga com recurso às curvas da  $da/dN - \Delta K$ , sendo estas utilizadas para determinar a vida útil em que  $da/dN$  é a velocidade de propagação por ciclo de carga e  $\Delta K$  é a gama do fator de intensidade de tensão. Também se pretende estudar o efeito das sobrecargas e o fenómeno do fecho de fenda.

As sobrecargas consistem em aplicar uma força máxima superior à que vai sendo aplicada no provete, e observar o efeito que esta provoca e o número de ciclos que ocorrem até a curva voltar a estabilizar. O fecho de fenda consiste no contacto entre as faces da fenda também durante um ciclo de carregamento onde é possível observar mudanças nos campos de tensão e de deformação na extremidade da fenda, em que estas alterações afetam claramente a velocidade de propagação da fenda.

## 1.2. Objetivos

O objetivo geral desta dissertação consiste no estudo do fenómeno de propagação de fendas em ligas de alumínio 7050-T7451 e 2050-T8 (materiais fornecidos pela Constellium) em que T7451 e T8 correspondem aos respetivos tratamentos térmicos das ligas sendo que para cada uma destas ligas se estuda a propagação da fenda tanto na direção T-L como na direção S-T.

Os objetivos específicos da seguinte dissertação são:

- Fazer ensaios de propagação de fenda a amplitude de carga constante em provetes M(T), medindo o número de ciclos de carga e o comprimento de fenda;
- Obter as curvas da/dN- $\Delta K$  para os ensaios anteriormente referidos;
- Aplicação de sobrecargas (1ª sobrecarga = 50% e 2ª sobrecarga = 100%) nas condições anteriormente referidas;
- Estudar o efeito das sobrecargas para cada um dos ensaios realizados;
- Caracterizar os materiais através de medições dos perfis de dureza e de análise metalográfica;
- Análise das superfícies de fratura utilizando Microscopia Eletrónica de Varrimento, procurando identificar os mecanismos de propagação;
- Estimar o fecho de fenda para cada um dos casos anteriores;
- Estudar efeito da geometria dos provetes nas curvas da/dN- $\Delta K$  (C(T) vs M(T));

### 1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação apresenta-se dividida em cinco capítulos, incluindo o presente capítulo introdutório. A estrutura encontra-se organizada da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** Este capítulo é designado por revisão bibliográfica onde se inserem alguns conceitos essenciais para a perceção dos seguintes capítulos.
- **Capítulo 3:** Aqui é feita a descrição de todos os procedimentos experimentais com o auxílio de fotografias
- **Capítulo 4:** Seguidamente apresentam-se os resultados do capítulo anterior e o respetivo tratamento dos dados
- **Capítulo 5:** Por fim, neste último capítulo são apresentadas as conclusões finais retiradas desta dissertação e são feitas propostas para trabalhos futuros.





## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Ligas de alumínio

As ligas de alumínio estão divididas em dois grupos, as de trabalho mecânico e as de fundição [1].

Estes dois tipos de ligas designam-se por quatro dígitos, onde o primeiro dígito corresponde ao principal elemento de liga (Ex. AA 2050). Na tabela 1 [1] é possível observar a designação das várias séries das ligas de alumínio.

**Tabela 1** - Identificação das várias séries das ligas de alumínio

Designação da série	Elemento principal (Liga de trabalho mecânico)	Elemento principal (Liga de fundição)
1xxx	Al (pureza mínima de 99%)	Al (pureza mínima de 99%)
2xxx	Cu	Cu
3xxx	Mn	Si + Cu ou Mg
4xxx	Si	Si
5xxx	Mg	Mg
6xxx	Mg e Si	Mg e Si
7xxx	Zn	Zn
8xxx	Outros elementos	Li
9xxx	Ainda não conhecida	Outros elementos

As ligas de alumínio da série 1000, 3000, 4000 e 5000 são ligas que não são suscetíveis a tratamento térmico, ou seja a sua resistência é devida ao endurecimento devido à solução sólida de certos elementos de liga e também é devida ao facto de durante a laminação ocorrer encruamento por deformação [3].

As ligas de alumínio da série 2000, 6000, 7000 e 8000 são classificadas como tratáveis termicamente. Estas ligas têm uma dureza elevada devido ao endurecimento induzido pelos tratamentos de solubilização, têmpera e envelhecimento.

## 2.2. Alumínio 7050-T7451

Tendo sido já referidas algumas das boas características dos alumínios em 1.1, inicia-se este capítulo com uma descrição dos materiais utilizados nesta dissertação. Os alumínios são muito utilizados nas áreas das indústrias aeronáutica e automóvel, pois aliam boas propriedades mecânicas e apresentam uma grande vantagem que é a redução do peso, algo que é muito importante nestas áreas.

As ligas de alumínio apresentam elevada condutividade térmica e não é magnético, apresenta elevada resistência à oxidação e quando aliado a outros elementos é bastante resistente à corrosão em ambientes agressivos.

A liga de alumínio 7050 é reforçada por zinco, cobre e magnésio. Na designação da liga AA 7050-T7451, os parâmetros do tratamento térmico T7451 estão descritos na tabela 2 [4].

**Tabela 2** - Parâmetro do tratamento térmico T7451 [4].

Tratamento térmico	Solubilização	Envelhecimento	Tempo
T7451	470 – 480°C	1º) 115 – 125°C	3 a 6 horas
		2º) 160 – 170°C	24 a 30 horas

Aliando as propriedades deste alumínio com este tratamento térmico, este material apresenta elevada resistência, boa tenacidade à fratura e boa resistência à corrosão, o que torna esta liga também muito boa para aplicações na indústria aeronáutica

### 2.3. Alumínio 2050-T8

A liga de alumínio AA 2050-T8 é bastante utilizada na indústria aeronáutica devido ao facto de ter uma tensão limite elástica elevada. Esta propriedade é conseguida através da adição de  $Al_2Cu$ .

Na designação do alumínio AA 2050-T8, T8 representa o tratamento térmico a que esta liga está sujeita, apesar deste alumínio já apresentar boas propriedades, este tratamento é caracterizado por uma solubilização e trabalho a frio para um devido encruamento à qual se segue um envelhecimento artificial.

### 2.4. Propagação de fendas por fadiga nas ligas de alumínio

Segundo Suresh [5] a microestrutura dos materiais influencia apenas um pouco a velocidade de crescimento da fenda correspondente ao regime II onde ocorre a propagação.

Como já foi referido em 2.1, as ligas de alumínio que apresentam tratamento térmico são as ligas da série 2000, 6000, 7000 e 8000 e para estas ligas, no ano de 20001 Bergner et al [6], descobriram a velocidade de propagação aquando da aplicação de diferentes tratamentos térmicos incluindo o envelhecimento natural (T3, T351 e T4) e artificial (T6, T651, T851, T851 e T87). Na figura 1 [6] são apresentadas as curvas de Paris obtidas experimentalmente através de  $da/dN$ . Com base na figura 1 é possível perceber que estes autores classificam as ligas de alumínio em dois grupos. O grupo A inclui todas as ligas com envelhecimento artificial e é possível observar pela figura 1 que este grupo é caracterizado por apresentar uma velocidade de propagação muito próxima para todas as séries quando  $\Delta K_o=10 \text{ MPa m}^{1/2}$ . O grupo B é constituído pelas ligas com envelhecimento artificial e é caracterizado por apresentar velocidades de propagação muito diferentes para  $\Delta K_o=10 \text{ MPa m}^{1/2}$ , é possível observar também pela figura 1 que a velocidade de propagação das ligas do grupo B são sempre inferiores às do grupo A.

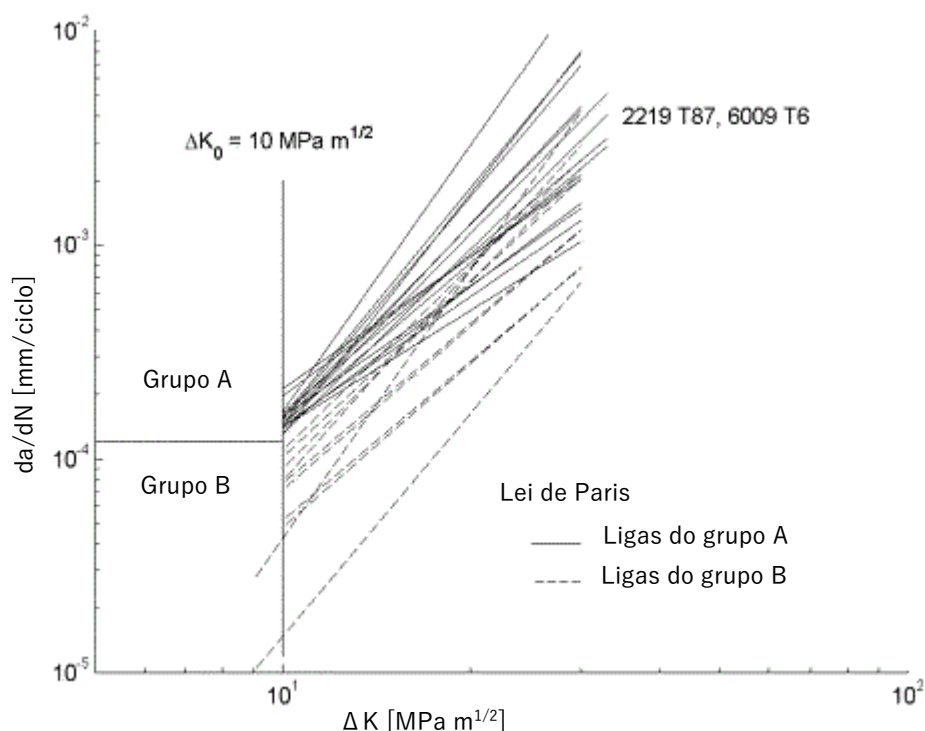


Figura 1 - Definição dos grupos A e B na propagação de fenda nas ligas de alumínio [6].

## 2.5. Propagação de fendas por fadiga

Quando se pretende projetar um componente mecânico por mais que se tente que este não apresente falhas é notório que tal não é fácil. Na verdade, existem vários tipos de falhas que podem acontecer, e que dependem do tipo de carregamento, do nível de carga, das condições ambientais e das características do próprio material. Estas falhas são devidas ao facto de o componente mecânico não suportar a solicitação que lhe é aplicada.

As falhas podem depender do tempo ou ser totalmente independentes dele. Quando estas dependem do tempo, tal deve-se ao facto do material perder propriedades devido ao envelhecimento ou desgaste, resultantes da utilização do material e da ação do meio ambiente onde o material esteve. As falhas devido à fluência, à fadiga, corrosão sob tensão e ao desgaste são modos de ruína dependentes do tempo. Por outro lado, quando as falhas são independentes do tempo de uso, a flambagem, a fratura frágil e dúctil são exemplos deste tipo de falha.

Como já foi referido no capítulo anterior a fadiga é responsável por 80 a 90% dos fenómenos de falha em componentes mecânicos. A fadiga é um fenómeno de

enfraquecimento progressivo de um material quando este é submetido a cargas dinâmicas ou repetidas que pode dar origem à rotura após um indefinido número de ciclos de carregamento, e compreende três fases principais [1].

No processo de fadiga a primeira dessas fases é a iniciação da fenda, que ocorre normalmente em zonas onde existam pequenos defeitos, o que leva a uma concentração de tensões mais elevada. A iniciação vem seguida de uma propagação até chegar a uma dimensão crítica conduzindo à rotura do componente, visto que este não suporta as tensões cíclicas operadas.

Neste processo de iniciação de fenda existem vários fatores com grande influência entre os quais se destacam a dureza, o meio ambiente, o menor constrangimento à deformação plástica, a concentração de tensões e o acabamento superficial.

A dureza do material influencia o fenómeno de fadiga pois quanto maior a dureza do material maior será a sua resistência à fadiga, aumentando a vida do componente à fadiga. O aumento da dureza pode ser obtido através de processos de deformação plástica a frio ou por um processo termoquímico denominado de cementação. Este processo de cementação consiste em introduzir carbono na superfície do material pelo mecanismo de difusão atómica com o objetivo de aumentar a dureza superficial do material depois de este estar devidamente temperado.

Já foi estudado em unidades curriculares anteriores que devido à presença de concentração de tensões resultantes de entalhes, cordões de soldadura ou furos, a resistência do componente é altamente afetada. A resistência à fadiga de um determinado componente diminui com o aumento do valor do fator de concentração de tensões. Posto isto, pode-se aumentar a resistência de um componente à fadiga tendo o cuidado de fazer componentes que evitem estes tipos de zonas.

Por último, em relação ao acabamento superficial, as superfícies rugosas podem criar pontos de concentração de tensões que podem originar a formação de fendas. A resistência de um componente à fadiga é tanto maior quanto menor for a rugosidade da superfície de um componente, sendo importante obter componentes com bom acabamento superficial para aumentar a resistência à fadiga do mesmo.

## 2.6. Fator de intensidade de tensões

O fator de intensidade de tensões é utilizado para caracterizar a propagação da fenda, este parâmetro  $K$  é conhecido como o fator de intensidade de tensões que é induzida pelo entalhe ou pela própria fenda, e foi apresentado por Irwin [7] que tanto pode depender da geometria do provete, da carga bem como do comprimento da própria fenda.  $K$  pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}, \quad (1)$$

$Y$  é um fator geométrico que depende da geometria do provete e da fenda e  $\sigma$  é a tensão aplicada.

A deformação de uma fenda pode ser representada pelos 3 modos representados na figura 2.

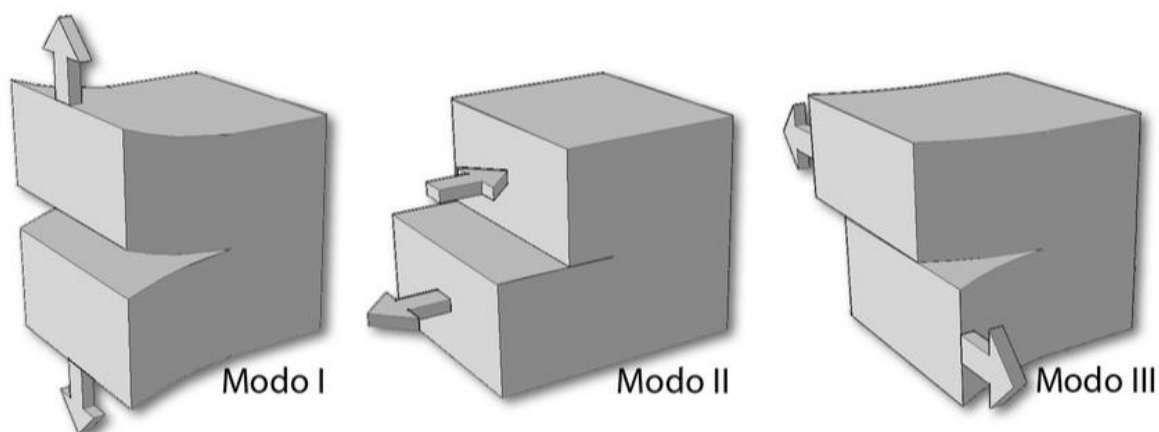


Figura 2 - Modos de fratura

Os estudos referentes à propagação de fendas por fadiga neste trabalho são realizados no modo I pois este é o modo mais influente.

## 2.7. Curvas da/dN- $\Delta K$

Na análise de propagação de fendas por fadiga as curvas da/dN- $\Delta K$  assumem particular importância pois ajudam a determinar a vida útil do componente. Como já foi referido anteriormente da/dN corresponde à velocidade de propagação de fenda por ciclo de carga e  $\Delta K$  corresponde à gama do fator de intensidade de tensões. A vida de um componente

pode ser definida como o número de ciclos necessários para iniciar e propagar a fenda até à rotura do componente. Antes destas curvas recolhiam-se dados com os quais se realizavam gráficos de crescimento de fenda por número de ciclos. Porém, estes resultados apenas poderiam ser utilizados para determinada geometria do provete. Posto isto era necessário um método que pudesse ser utilizado para diferentes condições de carregamento e diferentes geometrias de provete.

Em 1963, Paris e Erdogan [8] descobriram que relacionando a velocidade de propagação de fenda por ciclo de carga com a gama do fator de intensidade de tensões, obtinham-se resultados que poderiam ser aplicados a qualquer geometria a partir do momento que a formulação  $\Delta K$  fosse conhecida.

Esta gama do fator de intensidade de tensões corresponde à diferença entre a tensão no carregamento máximo e mínimo de  $K$  durante um ciclo de carga.

$$\Delta K = K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n} \quad (2)$$

Nas curvas  $da/dN$ -  $\Delta K$  é possível observar os 3 regimes de propagação, Regime junto ao limiar(I), Propagação estável(II) e Propagação Instável(III).

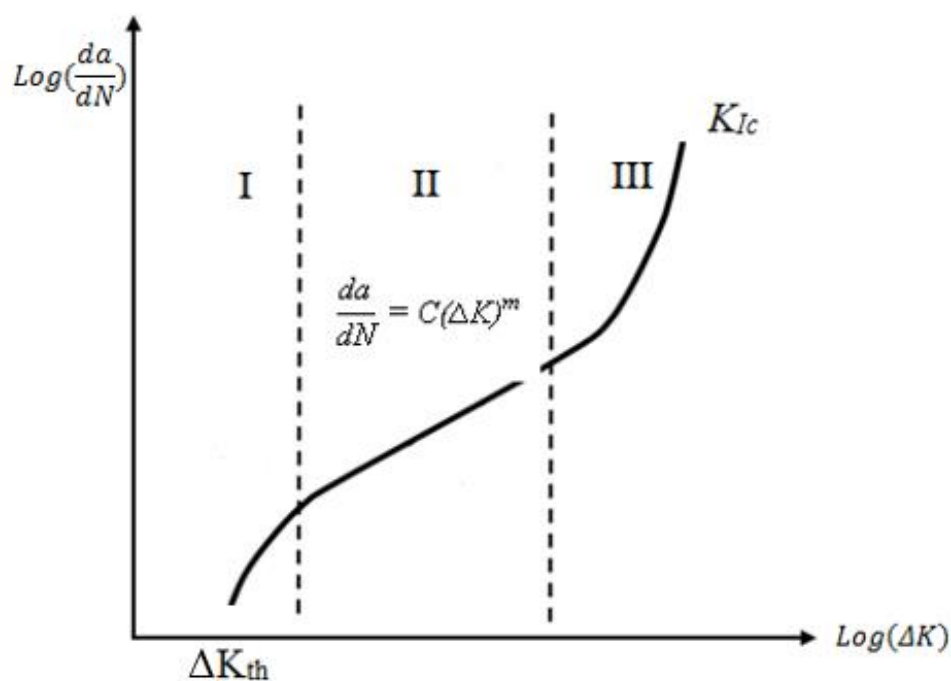


Figura 3 - Crescimento de uma curva  $da/dN$ - $\Delta K$

Regime I: Neste regime o  $\Delta K_{th}$  (limiar de propagação de fendas por fadiga) é o valor abaixo do qual não ocorre propagação. Neste regime a propagação de fenda dá-se a uma velocidade baixa devido à existência de barreiras macroestruturais.

Regime II: Este é o regime em que a curva assume um declive aproximadamente constante, ou seja, a derivada da mesma é constante, existindo uma linearidade entre a velocidade de propagação por ciclo de carga e a gama do fator de intensidade de tensões em escalas bi-logaritmicas. A equação da Lei de Paris é apresentada na seguinte fórmula.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (3)$$

Onde C e m são constantes que se obtêm experimentalmente e que dependem do material.

É essencial o devido conhecimento sobre esta lei e os seus limites pois se esta lei for aplicada fora dos limites da fase de propagação do material é provável que ocorram erros.

Regime III: Neste regime, como é possível observar, a curva cresce, a propagação ocorre rapidamente até ocorrer a fratura à medida que o fator de intensidade de tensões vai aumentando até o valor crítico da tenacidade do material ( $K_{IC}$ ) ser atingido pelo fator de intensidade máximo de tensões  $K_{m\acute{a}x}$ .

A velocidade a que a fenda se propaga depende muito da razão de tensões R:

$$R = \frac{K_{min}}{K_{m\acute{a}x}}, \quad (4)$$

## 2.8. Fecho de fenda

Quando se trata do estudo de propagação de fendas por fadiga, o fenómeno do fecho de fenda tem um papel de extrema importância. Com o objetivo de explicar a propagação de fendas por fadiga, aplicando carga variável, o fenómeno do fecho de fenda tem sido estudado para os materiais de engenharia. O conceito de fecho de fenda foi introduzido por Elber [9]. Este fenómeno é caracterizado pelo contato entre as superfícies da



fenda, que vai provocar a sua abertura antes de se chegar à carga mínima. Isso protege a fenda, ao reduzir a variação do fator de intensidade de tensões na extremidade da fenda, o que vai provocar uma redução da velocidade de propagação da fenda levando a um aumento da vida à fadiga.

No caso de existir fecho de fenda o  $\Delta K$  efetivo é dado pela seguinte equação:

$$\Delta K_{ef} = K_{m\acute{a}x} - K_{ab}, \quad (5)$$

$K_{ab}$  é o valor de  $K$  necessário para abrir a fenda.

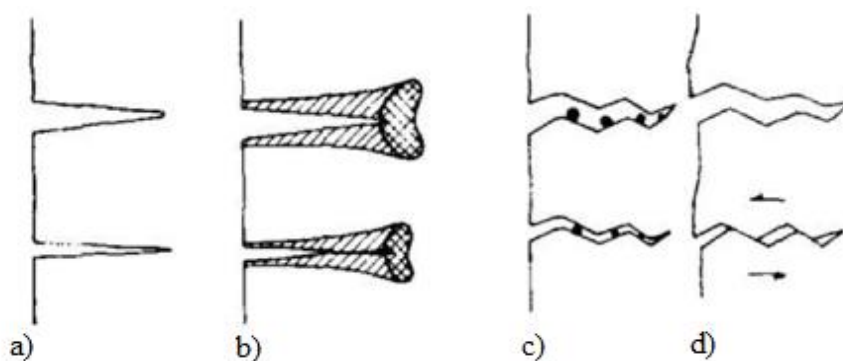
Para quantificar o fecho de fenda, é útil utilizar uma relação entre o  $\Delta K_{eff}$  e o valor de  $\Delta K$  correspondente ao ponto onde se pretende quantificar o fecho:

$$\Delta K_{ef} = U \Delta K, \quad (6)$$

O parâmetro  $U$  é um parâmetro normalizado de razão de carga. É obtido experimentalmente e pode ser dado pela seguinte expressão:

$$U = \frac{K_{m\acute{a}x} - K_{ab}}{K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n}}, \quad (7)$$

Existem parâmetros que influenciam o fecho de fenda tais como o estado de tensão, a velocidade de propagação de fenda e o próprio comprimento da fenda. A rugosidade da superfície da fenda e a sua oxidação são também mecanismos responsáveis pelo fecho de fenda [10][11]. Na figura 4 [11] estão representados os vários mecanismos de fecho de fenda.



**Figura 4** - Sem fecho (a) Fecho induzido por (b) plasticidade, (c) óxidos, (d) rugosidade

O fecho de fenda induzido por rugosidade é geralmente dominante no regime I das curvas  $da/dN-\Delta K$ , isto é, para velocidades relativamente baixas [5].

O fecho de fenda induzido por plasticidade é dominante no regime II da lei de Paris. Neste mecanismo, talvez o que mais ocorre nos materiais metálicos pois não são apenas as zonas da frente da fenda as responsáveis pelo comportamento à fadiga do material, as zonas que foram deformadas anteriormente também são responsáveis por este comportamento o que leva a um contato prematuro entre as superfícies de fratura. Por último também ocorre o fenómeno de fecho parcial de fenda, quando após a aplicação da sobrecarga, antes de as faces da extremidade da fenda se tocarem, as faces anteriores à extremidade já sofreram um encosto parcial uma na outra, devido ao facto de após a aplicação da sobrecarga estas duas faces adquirirem uma forma de lomba, o fecho parcial de fenda tem uma influência nula ou praticamente nula no fenómeno do fecho de fenda, na figura 5 [12] está representado o fenómeno de fecho parcial de fenda.

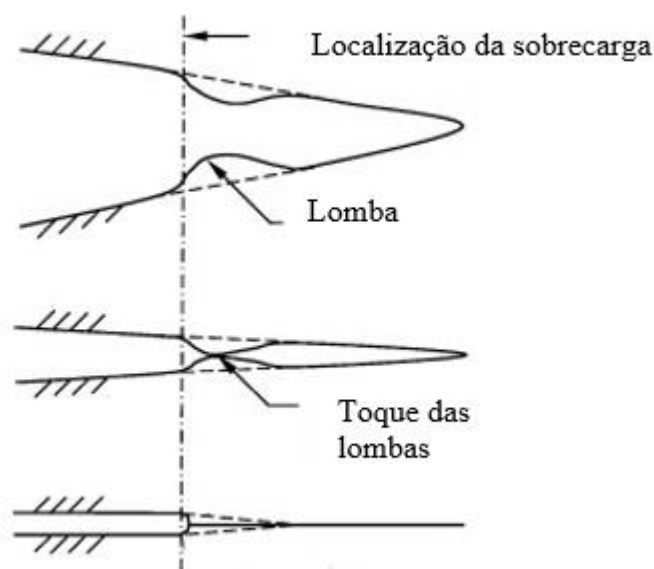
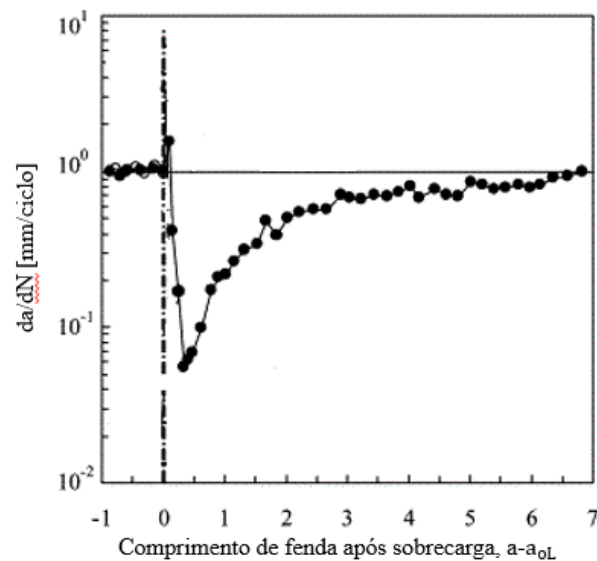


Figura 5 - Esquema representativo do fecho parcial de fenda [12].

## 2.9. Sobrecargas

Em componentes mecânicos é normal por vezes, quando estes estão em funcionamento, sofrerem cargas de amplitude variável em vez de cargas de amplitude constante. As cargas de amplitude variável mais usuais são as sobrecargas e não é incomum que esta sobrecarga seja aplicada intencionalmente com o objetivo de retirar benefícios no comportamento do componente à fadiga [13].



**Figura 6** - Velocidade de propagação da fenda em função do comprimento de fenda quando aplicada uma sobrecarga [14].

Através da análise dos gráficos que relacionam a velocidade de propagação por ciclo de carga com o comprimento da fenda após sobrecarga, figura 6 [14] é possível observar que imediatamente após a aplicação da sobrecarga a fenda sofre um aumento de velocidade muito breve, sofrendo logo após este breve período um decaimento progressivo na velocidade de propagação até atingir um valor mínimo. Após atingido este, valor a velocidade vai aumentando progressivamente até ser obtida a velocidade que se verificava em amplitude de carga constante.

Existem alguns mecanismos que podem ajudar a perceber os fenômenos de atraso e de aumento da velocidade de propagação da fenda que se observam após a aplicação de sobrecargas. Os mecanismos são o arredondamento da extremidade da fenda, tensões residuais de compressão, endurecimento do material na extremidade da fenda e fecho de fenda induzido por plasticidade tendo este já sido explicado anteriormente.

De acordo com Christensen (1959) ao ser aplicada uma sobrecarga é provocada uma deformação que faz com que a extremidade de fenda obtenha uma forma arredondada que vai ter um comportamento idêntico a, por exemplo, um entalhe o que vai diminuir os valores de  $K$  em relação à fenda aguçada. Este fenômeno vai retardar a velocidade de propagação da fenda, aumentando a vida [15].

Em 1962 Schive e Broek defenderam que devido à deformação plástica, aquando a aplicação de uma sobrecarga, surjam tensões residuais imediatamente após a extremidade da fenda, o que vai provocar um endurecimento do material, o que por sua vez ao ser aumentada a dureza do material a velocidade de propagação da fenda vai diminuir [16].

Em 1973 Jones sugere que após a aplicação de uma sobrecarga a deformação plástica causada por esta iria provocar um endurecimento do material na zona imediatamente à frente da extremidade da fenda. Este fenómeno aumenta a resistência do material naquela zona o que retarda a propagação da fenda enquanto a fenda não ultrapassar essa zona [17].

## **2.10. Constellium**

A Constellium é uma empresa produtora mundial de produtos fabricados à base de varias ligas de alumínio, com sede em Amesterdão, Holanda. A empresa produz para a indústria aeroespacial, aeronáutica, automóvel e militar.

A Constellium na área da indústria aeroespacial substitui os compósitos, material normalmente utilizado, por alumínio. Nestes produtos fabricados encontram-se automóveis e placas de alumínio [18].

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo vai ser abordado todo o procedimento experimental realizado, desde o material utilizado, à preparação dos provetes, incluindo a realização dos vários ensaios e análises pretendidas.

#### 3.1. Materiais utilizados

Para esta dissertação foram estudados dois tipos de liga de alumínio, a liga AA 2050-T8 e a liga AA 7050-T7451.

Tendo já sido caracterizados os materiais utilizados no capítulo da revisão bibliográfica, neste subcapítulo vão ser apresentadas as propriedades mecânicas e químicas de cada um dos materiais utilizados.

Nas tabelas 3 e 4 [19] encontram-se as propriedades mecânicas e químicas da liga AA 2050-T8 respetivamente.

**Tabela 3** - Propriedades mecânicas da liga AA 2050-T8 [19].

Densidade	Módulo de elasticidade	Tensão de cedência	Tensão de rotura
2,75 g/cm <sup>3</sup>	72 GPa	441 MPa	490 Mpa

**Tabela 4** - Propriedades químicas da liga AA 2050 T8 [19].

	Al	Cu	Li	Mg	Mn	Ag	Zr	Si	Fe	Zn
Mín.	Bal.	3,20	0,7	0,2	0,2	0,2	0,06	--	--	--
Máx.		3,90	1,30	0,6	0,5	0,7	0,14	0,08	0,1	0,25

Na tabela 5[20] e 6 [21] encontram-se as propriedades mecânicas e químicas da liga AA 7050 T7451 respetivamente.

**Tabela 5** - Propriedades mecânicas da liga AA 7050-T7451 [20].

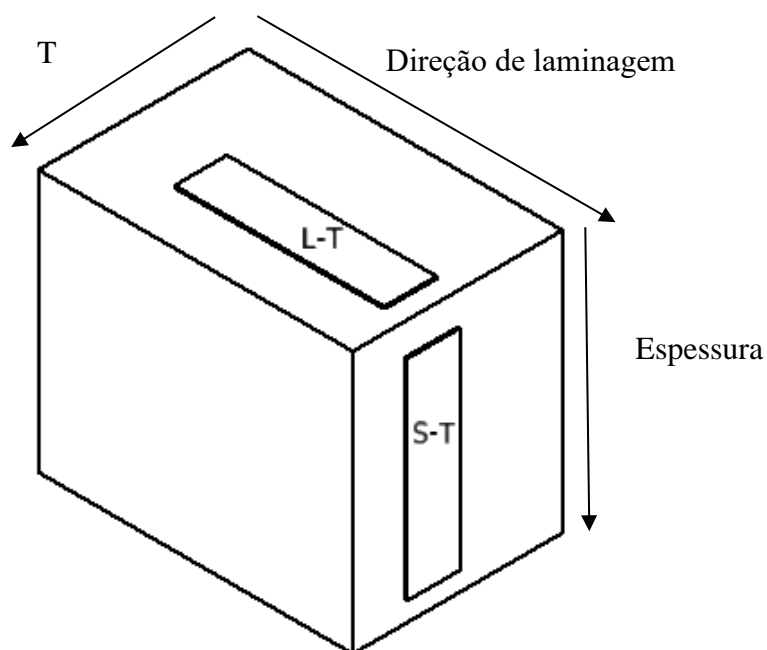
Densidade	Módulo de elasticidade	Tensão de cedência	Tensão de rotura
2,75 g/cm <sup>3</sup>	71,7 GPa	469 MPa	524 Mpa

**Tabela 6** - Propriedades químicas da liga AA 7050-T7451 [21].

Al	Cu	Cr	Mg	Mn	Ti	Si	Fe	Zn
Bal.	2,17	<0,01	2	0,01	0,04	0,04	0,06	6,67

### 3.2. Geometria dos provetes

Os provetes foram obtidos segundo duas direções (direção L-T e S-T) do lingote. Na figura 7 [22] encontra-se um esquema da obtenção dos provetes.



**Figura 7** - Orientação dos provetes M(T) no lingote [22].

Duas geometrias diferentes foram usadas para a realização dos ensaios de propagação de fendas por fadiga. Sendo estas duas geometrias M(T) e C(T), com espessura de 2 mm produzida segundo a norma ASTM E647 – 15e1 [23].

Os provetes M(T) foram fornecidos pela empresa Constellium já com as medidas pretendidas bem como o entalhe e os 2 furos para a colocação do extensómetro. Na figura 8 [24] está representado um esquema destes mesmos provetes.

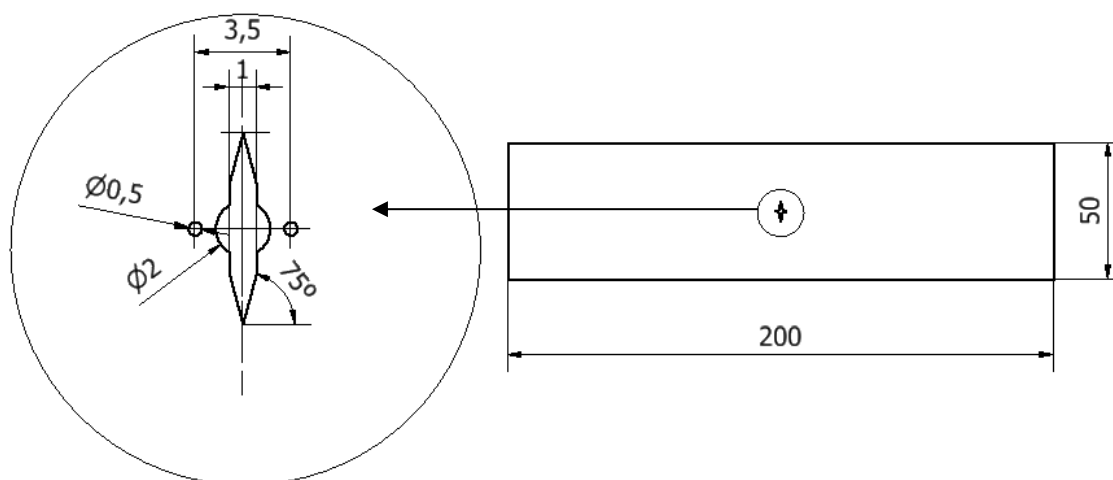


Figura 8 - Geometria dos provetes M(T) (medidas em milímetros) [24].

Em relação aos provetes C(T) estes foram obtidos com as metades partidas dos ensaios de propagação de fenda efetuados previamente nos provetes M(T), sua preparação, tal como o corte nas medidas pretendidas, e obtenção dos furos para amarrar o provete à máquina, bem como a preparação do entalhe, foram realizadas nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica. Na figura 9 [25] está representado esquematicamente este provete.

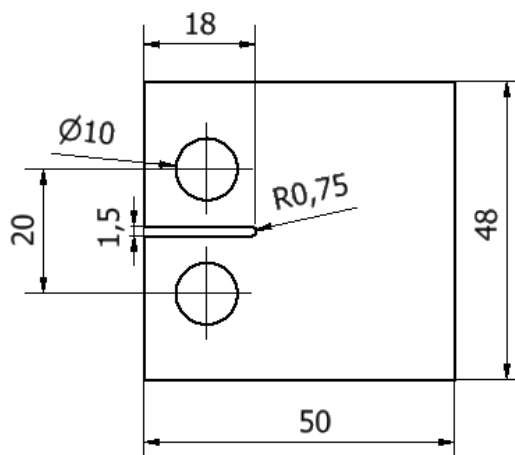


Figura 9 - Geometria dos provetes C(T) (medidas em milímetros) [25].

Como é possível perceber, visto que há duas direções de obtenção do provete para cada liga (T-L e S-T), para facilitar a interpretação do seguinte trabalho a designação “L” e “T” correspondem à obtenção do provete segundo direção T-L e direção S-T, respetivamente. Por exemplo, a série 2050L corresponde à liga AA 2050 obtida segundo a direção T-L.

### **3.3. Preparação dos provetes**

Antes da realização dos ensaios experimentais é necessário preparar os provetes de modo a remover as marcas provenientes da maquinagem o que facilita a observação do avanço da fenda.

Todos os provetes ensaiados foram submetidos a operações de polimento. Primeiro utilizaram-se lixas de carboneto de silício com granulometria decrescente P300, P600, P1000, P2500 e seguidamente realizou-se a operação de polimento com pasta de diamante de granulometria composta pela seguinte ordem 6 $\mu$ m, 3 $\mu$ m e 1  $\mu$ m. Durante esta operação foi também utilizado um lubrificante adequado de modo a reduzir o poder de fricção. Os provetes eram apenas polidos numa das faces, face esta que servia para a visualização da propagação da fenda. Entre as operações de polimento com as lixas de carboneto de silício e com os discos de polir o provete era sempre lavado com água para remover quaisquer partículas resultantes desse mesmo processo. No final deste conjunto de operações o provete era lavado com sabão e, por último, álcool etílico sendo posteriormente seco com um secador de forma a remover os abrasivos e a evitar a oxidação do mesmo.

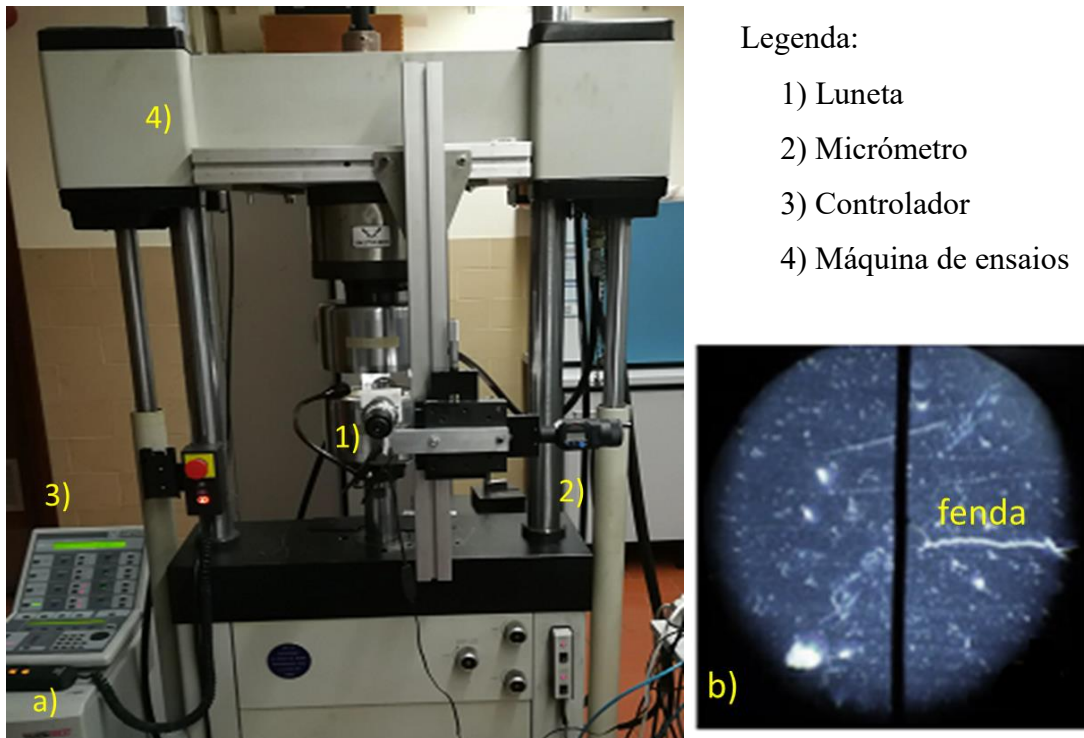
### **3.4. Ensaios de propagação de fendas por fadiga nos provetes M(T)**

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma máquina servo hidráulica INSTRON com capacidade de carga máxima de 100 kN. Os ensaios foram realizados em controlo de carga e à temperatura ambiente. Este processo foi todo controlado através de um software designado por SAX que permitiu definir a onda de carregamento neste caso sinusoidal.



Na figura 10 a) apresenta-se a montagem do conjunto dos equipamentos utilizados entre os quais se destacam a luneta, o controlador e o micrómetro enquanto que na figura 10 b) é possível observar a fenda através da luneta

Para a visualização da fenda é utilizada uma luneta que amplia até 45x com a precisão de 10 $\mu$ m fixada num apoio móvel; é, também, utilizado um micrómetro que auxilia na medição do comprimento da fenda.



**Figura 10** - a) Montagem do conjunto e seus componentes b) visualização da fenda através da luneta

De maneira a calcular a velocidade de propagação da fenda ( $da/dN$ ) foi utilizada a recomendação da norma ASTM E647-00 [23] fazendo uso do método polinomial incremental de cinco pontos para calcular  $da/dN$ . Os ensaios foram realizados no Modo I.

Na realização destes ensaios era necessário colocar o provete devidamente na máquina de ensaios de modo a garantir que não tinha qualquer tipo de inclinação e que ao fechar as amarras da máquina este não sofria torção. Posto isto, a máquina era devidamente calibrada e iniciava-se o ensaio nas condições referidas anteriormente com um  $R=0$ , com um  $\Delta K=5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  e uma frequência de 12 Hz. Assim que a fenda iniciava a sua propagação deixava-se que esta propagasse um pouco dos dois lados do entalhe e de seguida retirava-se a primeira medição, a partir desta, era realizada sempre uma medição sempre que a fenda propagava 0,2mm. Quando esta propagava 1mm, ou seja, de 5 em 5 medições, era colocado

o extensómetro mecânico para medir a carga e o deslocamento e repetia-se sempre este processo até o provete partir.

### 3.5. Ensaios de propagação de fendas por fadiga nos provetes C(T)

Os ensaios de propagação de fenda foram realizados numa máquina de ensaios elétrica INSTRON ELECTROPLUS E10000 com capacidade de carga dinâmica de 10kN. Este processo foi controlado por computador através do software INSTRON WaveMatrix, específico para a geração de cargas dinâmica e aquisição de dados. Através deste software era possível limitar o número de ciclos com controlo de carga, deslocamento ou deformação.

Na figura 11 é apresentada a montagem do conjunto utilizado.

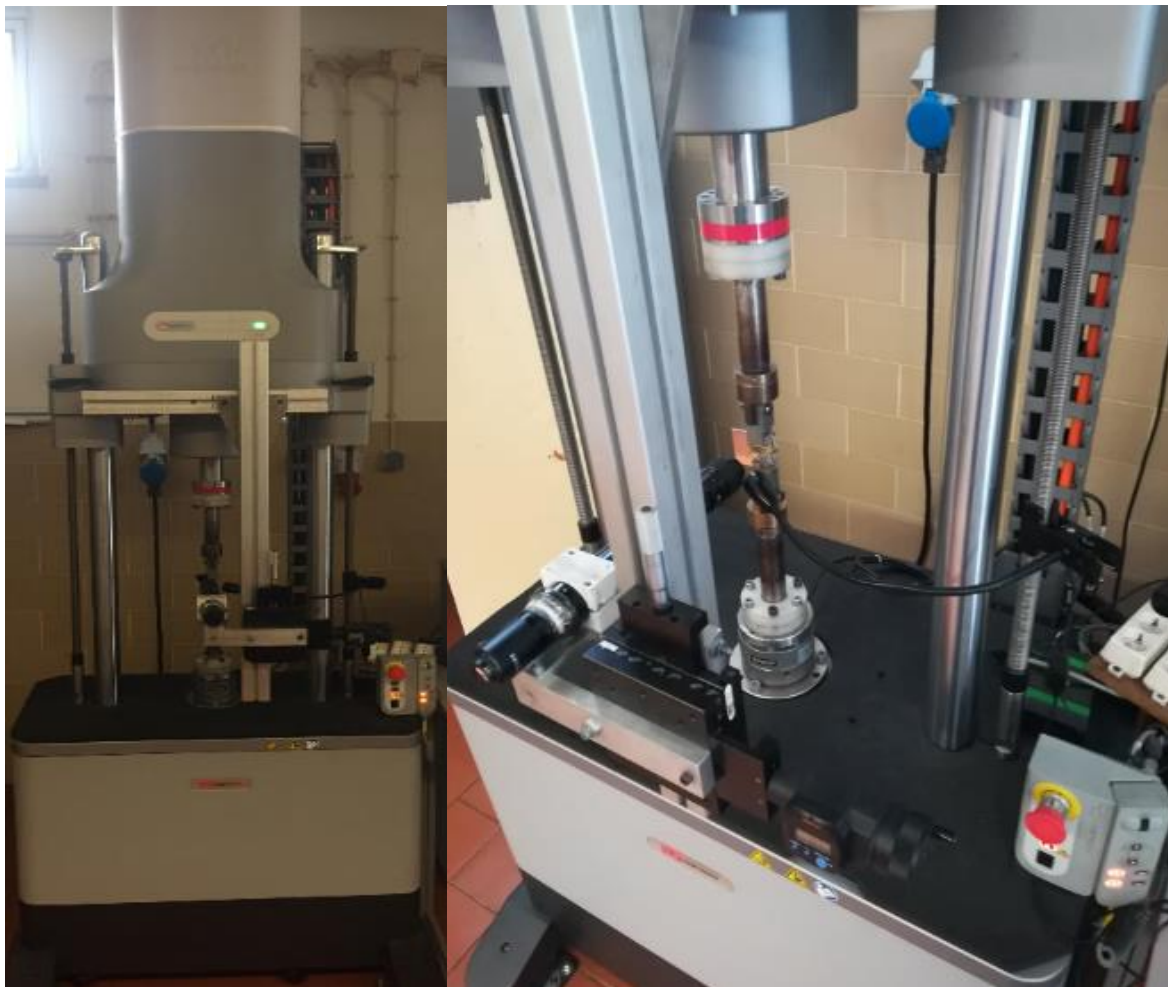


Figura 11 - Montagem do conjunto utilizado para os provetes C(T)

Estes ensaios tal como para os provetes M(T) foram também realizados em modo I segundo a norma ASTM E647-00 [23] fazendo uso do método polinomial incremental de cinco pontos para determinar  $da/dN$ . Para a realização destes ensaios era necessário colocar o provete devidamente na máquina e definir no programa os valores da carga média e da amplitude. Os ensaios eram iniciados com uma frequência de 15Hz com um  $R=0$ ,  $\Delta K=5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  e esperava-se que a fenda propagasse um bocado, a partir daí eram iniciadas as medições de 0,2 em 0,2mm.

### 3.6. Medição e determinação do fecho de fenda

De modo a determinar o fecho de fenda foi necessário a obter as curvas carga-deslocamento para os provetes M(T). Tal como foi referido anteriormente entre intervalos de propagação de fenda de 1mm era colocado um extensómetro mecânico de pinos da marca SANDNER com deslocamento de  $\pm 0,625\text{mm}$ , em que este era fixo no provete através dos 2 furos de 0,5mm de diâmetro que o provete continha. Na figura 12 está representada a montagem do extensómetro mecânico para a obtenção do gráfico carga-deslocamento com o objetivo de estimar o valor de fecho de fenda.

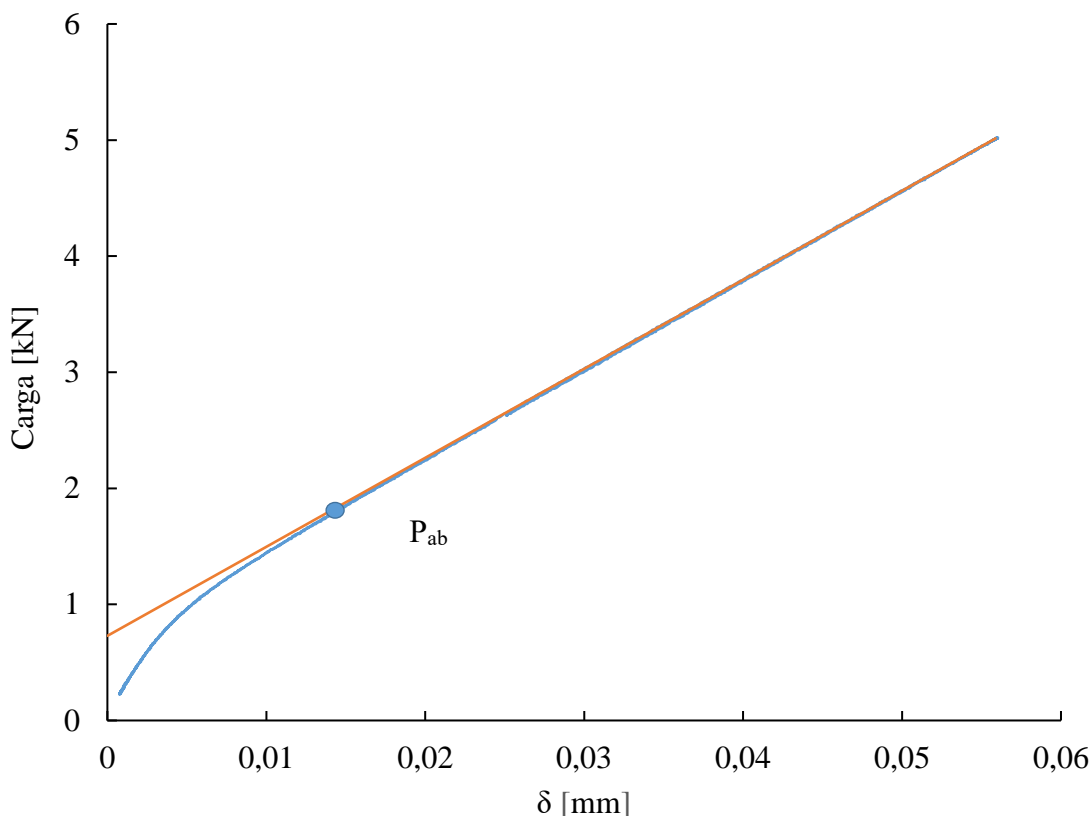
Extensómetro



Figura 12 - Montagem do extensómetro

Após a obtenção destes gráficos, a partir da inclinação da que curva corresponde à rigidez do provete é possível detetar se existe fecho de fenda, pois quando este existe, na carga em que a fenda abre ou fecha, há alteração da rigidez do provete. Na figura 13 é apresentado um gráfico carga-deslocamento onde é possível observar uma inflexão. Esta

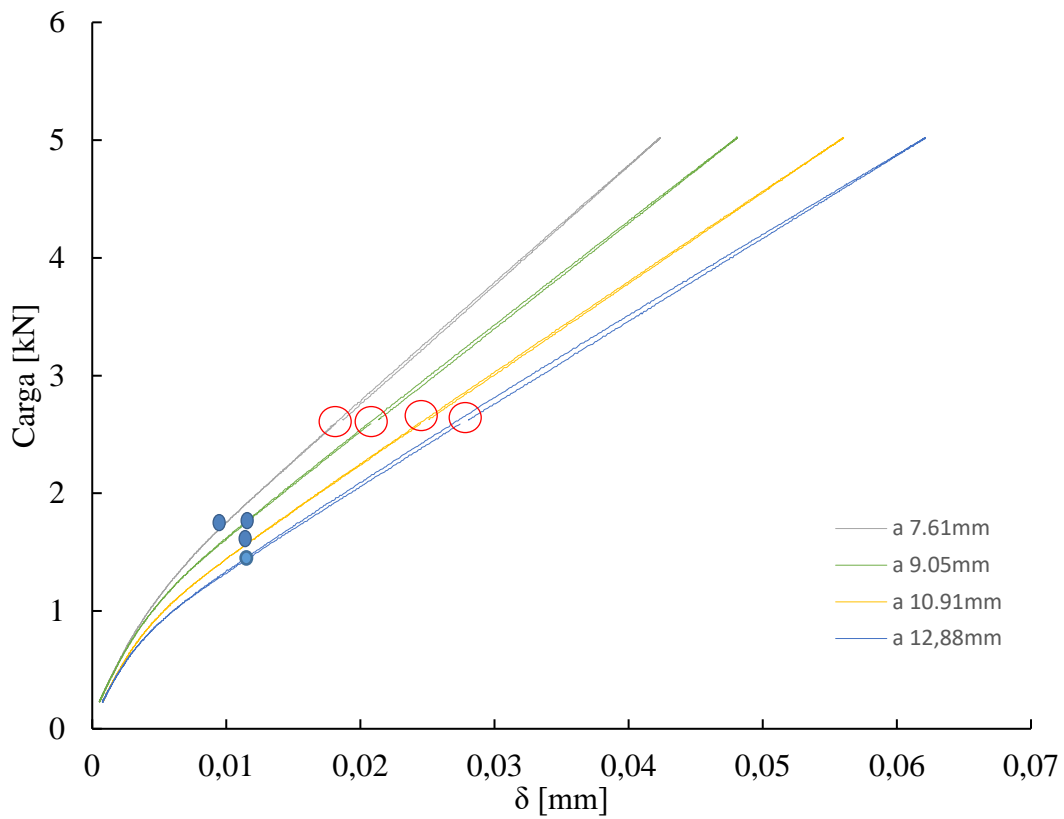
inflexão encontra-se representada por um ponto a azul que representa a carga de abertura, ou seja, onde ocorre a alteração da rigidez do provete.



**Figura 13** - Gráfico carga-deslocamento para a série 2050L

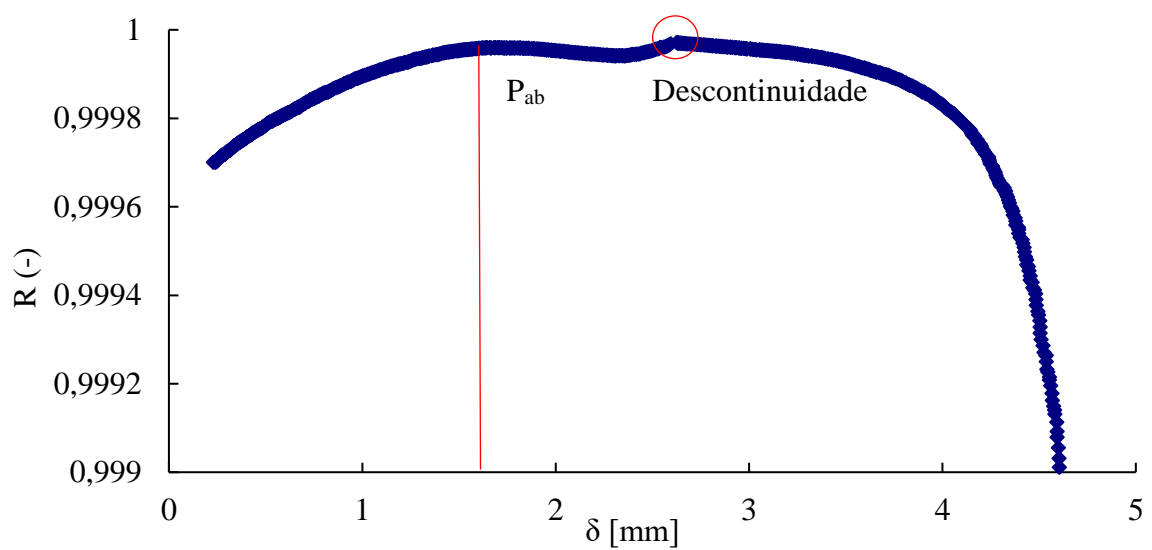
Se existir fecho, os dados obtidos têm que ser sujeitos a um tratamento para identificar a carga exata em que este ocorre.

É importante salientar o facto de que após terem sido tratados os dados relativamente ao fecho de fenda, que se verificavam descontinuidades nos gráficos de fecho de fenda e de carga-deslocamento figura 14, tal fenómeno deveu-se ao facto de a máquina de ensaios estar programada para começar o ciclo de carga não na carga mínima mas sim na carga média, pelo que esta fez a segunda metade do ciclo de carga após a descarga, pelo que é fácil perceber que não se tem o ciclo de carga totalmente seguido, ou seja, os dados estão a ser tratados com a junção da primeira metade e da segunda metade do ciclo de carga, daí a ocorrência destas descontinuidades. Para a descarga não surgiu este problema pois parte da carga máximo até à carga mínima. Na figura 14, a vermelho apresentam-se as descontinuidades e a azul as cargas de abertura.



**Figura 14** - Gráfico carga-deslocamento para carga de amplitude constante

De seguida na figura 15 e 16 são apresentados dois gráficos que representam o fecho de fenda na carga e na descarga, ambos para a liga 2050L.



**Figura 15** - Determinação da carga  $P_{ab}$  através do Método da Maximização do Coeficiente de Correlação

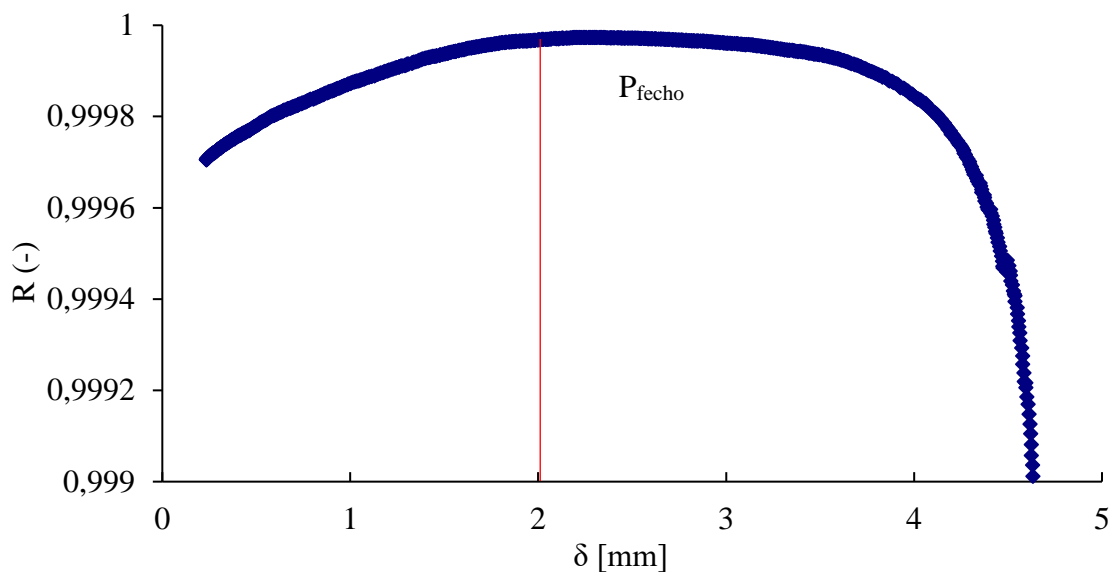


Figura 16 - Determinação da carga Pfe através do Método da Maximização do Coeficiente de Correlação

Através dos gráficos é de percepção fácil qual deles corresponde à carga e qual corresponde à descarga pois o gráfico da carga apresenta a descontinuidade referida acima e uma carga de abertura inferior à carga de fecho, como já foi verificado na figura 14. É importante referir que o fecho de fenda apenas foi medido para os provetes M(T).

O fecho de fenda é obtido através do método da maximização do coeficiente de correlação [26].

### 3.7. Aplicação de sobrecargas apenas nos provetes M(T)

Para estudar o efeito da sobrecarga foram utilizados provetes (1 de cada) obtidos segundo a direção T-L (2050L e 7050L), pois eram estes que se previam que apresentassem uma melhor performance nos ensaios de propagação de fenda.

Foram realizadas sobrecargas de 50% e 100% quando a fenda atingia os valores de  $\Delta K=9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  e  $\Delta K=12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  respetivamente. Ambas as sobrecargas tinham a duração de 1 ciclo.

Nestes ensaios após a primeira sobrecarga e a segunda em todas as medições posteriores era medido o fecho de fenda até a curva estabilizar.

### 3.8. Ensaios de microdureza

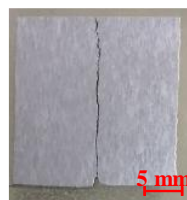
Foram realizados ensaios de dureza nos quatro materiais estudados. O objetivo foi identificar e quantificar diferenças entre os diferentes materiais.

Para cada um dos provetes foram realizadas 10 medições distanciadas de 0,5 mm, em linha reta numa zona próxima do entalhe por onde se iria dar a propagação da fenda. Os ensaios foram realizados numa máquina de dureza Vickers da marca Struers Duranim aplicando uma carga de 200 gramas com um indentador durante 15 segundos segundo a norma ASTM E384-11e1.

### 3.9. Análise metalográfica

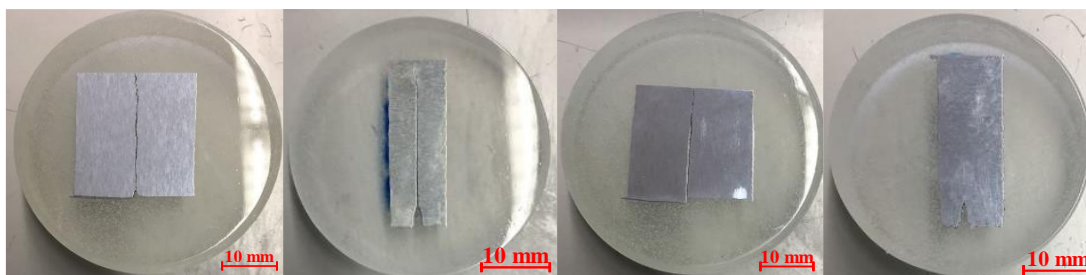
Depois de realizados os ensaios de propagação nos provetes M(T), os provetes ensaiados de cada tipo de provete, foram cortados de maneira a serem preparados para observar a propagação da fenda como se ilustra na figura 17.

Para os provetes C(T) não foi realizada esta análise por se considerar que a análise realizada para os provetes é M(T) é suficiente pois não é expetável que a morfologia de propagação mude com o tipo de provete.



**Figura 17** - Amostra dos provetes com a fenda propagada

De seguida, as amostras cortadas são colocadas em resina de modo a facilitar a sua preparação. Passados aproximadamente trinta minutos a resina seca e as amostras estão prontas a ser retiradas. Na figura 18 é possível observar as amostras envolvidas em resina.



**Figura 18** - Amostras envolvidas em resina retiradas dos recipientes

De seguida, é realizada uma operação de polimento idêntica à operação de polimento para os provetes M(T), não sendo neste caso necessário passar o pano para polimento de 6 $\mu$ m. Nestas amostras é extremamente necessário um perfeito polimento de modo a fazer um ataque químico sem qualquer risco na superfície da amostra.

Após esta operação, a microestrutura é revelada através de ataque químico por banho de imersão durante 1,25 minutos com uma solução de 99ml de água destilada e 1ml de ácido fluorídrico. Todas estas operações foram levadas a cabo segundo a norma ASTM E3-11.

Este ataque químico é feito com o objetivo de perceber se a fenda atravessou ou contornou os grãos; é também realizado para perceber as diferenças entre o material ter sido obtido segundo a direção T-L ou S-T de modo a contribuir para a explicação dos resultados obtidos.

### **3.10. Análise da superfície de fratura**

As superfícies dos provetes que foram alvo de sobrecargas foram utilizadas para determinar o modo de propagação de fenda. Antes de se iniciar esta análise, foi realizada uma limpeza da superfície das amostras através de ultrassons enquanto estas estavam imersas em álcool etílico, sendo de seguida analisadas por Microscopia Eletrónica de Varrimento (MEV) através de um microscópio Philips XL 30 como mostra a figura 19. Este microscópio tem uma aceleração de feixe máxima de 30 kV e uma resolução máxima de 3 nm. As imagens obtidas por MEV foram captadas após a aplicação de sobrecarga e quando a fenda propagava a velocidade de  $\Delta P$  constante, para analisar a diferença de comportamento quando a curva está estabilizada e quando é aplicada a sobrecarga.



**Figura 19** - Microscópio eletrônico por varrimento Philips XL 30



## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 3, bem como a discussão dos mesmos.

### 4.1. Análise de microdureza

A tabela 7 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de microdureza, bem como o seu tratamento estatístico. As durezas medidas variaram entre 171 e 199 HV. A série 2050T apresenta a maior dureza média (191,5 HV) havendo uma diferença de 3,4 % relativamente à 2050L (185 HV).

Em relação à série 7050T esta é a que apresenta menor dureza média (175,7 HV) e relativamente à liga 7050L(181HV) existe uma diferença de 2,93%. As duas ligas obtidas segundo a direção S-T (2050T e 7050T) apresentam uma diferença de dureza de 8,25%, enquanto as ligas obtidas segundo a direção T-L (2050L e 7050L) apresentam uma diferença de 2,16% embora o desvio padrão apresente certa incerteza expressiva.

**Tabela 7** - Medições de dureza na superfície dos provetes

Material	2050T	2050L	7050T	7050L
Dureza (Hv)	193	183	179	182
	191	192	175	171
	195	182	171	185
	190	185	175	181
	190	177	175	178
	182	190	181	182
	181	188	181	183
	196	192	175	188
	198	187	171	184
	199	174	174	176
Média	191,5	185	175,7	181
Desvio padrão	5,82	5,78	3,41	4,63

Posto isto tendo em conta que as diferenças de durezas são inferiores a 3,5%, pode concluir-se que a variação dos elementos de liga não tem uma influência significativa

nos resultados que se irão obter. É importante referir que para as séries 2050T e 7050T a diferença de 8,25% poderá ter um impacto significativo na propagação da fenda por fadiga.

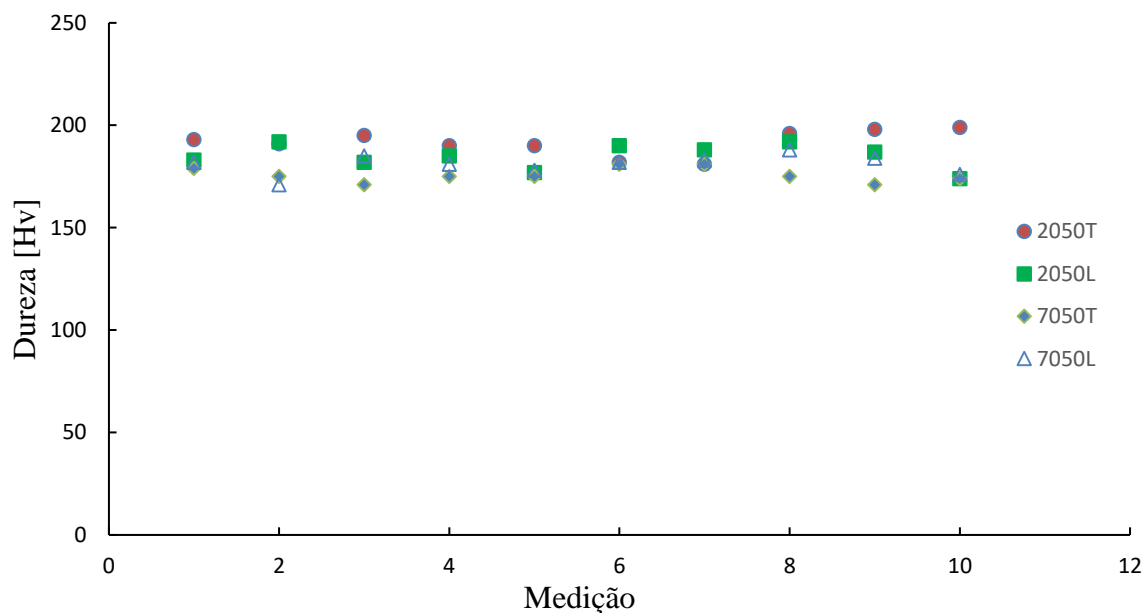


Figura 20 - Medições de dureza

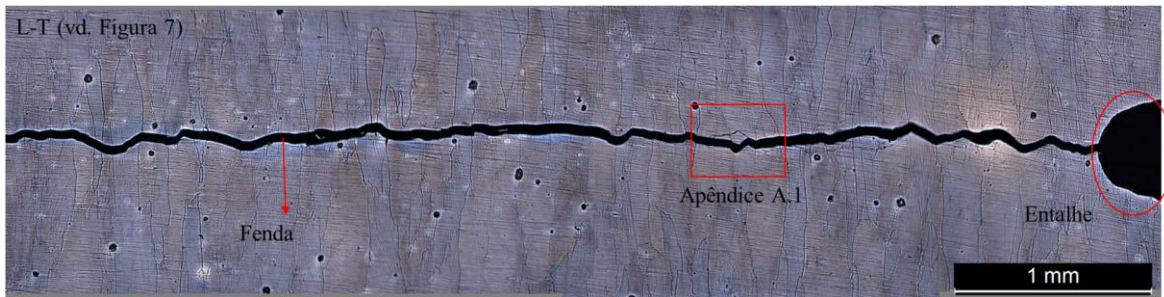
As durezas encontram-se praticamente todas nos mesmos intervalos, figura 20 que apresenta a variação da dureza consoante cada uma das medições, com variações constantes, mas como já foi referido é possível observar que as ligas obtidas segundo a direção S-T são as que apresentam durezas mais desfasadas umas das outras.

## 4.2. Análise metalográfica

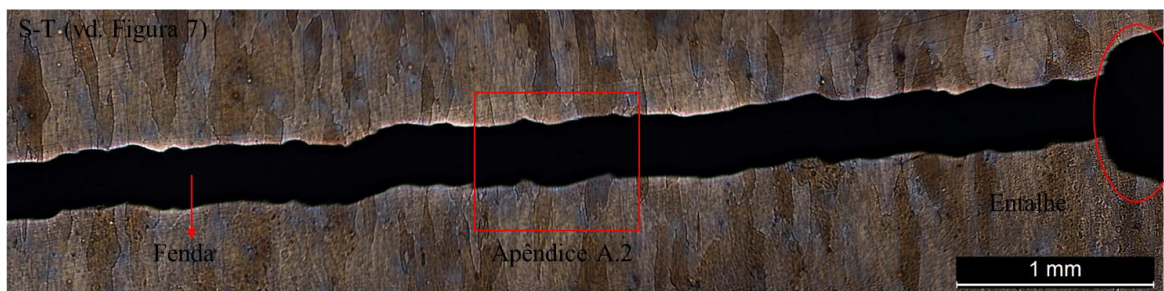
Apesar da análise metalográfica do perfil de propagação ter sido realizada posteriormente aos ensaios de propagação, é pertinente mostrar os seus resultados antes de revelar os resultados destes ensaios de modo a ter um termo de justificação para quando os mesmos forem apresentados. De seguida são representados os resultados desta análise para as ligas cujas séries foram obtidas segundo a direção T-L, primeiramente para a liga AA 2050 e de seguida para a liga AA 7050.

Através das imagens apresentadas, figuras 21 e 22 (vd. Figura 7) é possível observar o entalhe, os grãos microestruturais e a sua direção assim como a fenda após propagação. O grão microestrutural tem a direção perpendicular à propagação da fenda

devido ao facto destes provetes terem sido obtidos segundo a direção T-L. É possível observar que a fenda atravessa os grãos microestruturais, ou seja, é de esperar que a fenda demore mais tempo a propagar, logo a vida destas ligas terá uma maior resistência à fadiga levando a um aumento da vida.



**Figura 21** - Perfil de propagação da série 2050L



**Figura 22** - Perfil de propagação da série 7050L

As figuras compostas pelo quadrado vermelho encontram-se no apêndice A.1 e A.2 respetivamente caso seja necessária uma melhor visibilidade.

Tendo sido apresentados os resultados da análise metalográfica para as ligas obtidas segundo a direção T-L, de seguida são apresentados os resultados para as ligas obtidas segundo a direção S-T, primeiramente para a liga AA 2050 e de seguida para a liga AA 7050.

Nas imagens 23 e 24 (vd. Figura 7) é possível observar novamente o entalhe, os grãos microestruturais e a fenda após propagação. Neste caso não é perfeitamente perceptível, mas os grãos estão “esticados” no sentido do papel, para melhor visualização ver apêndice A.3 e A.4 respetivamente, ou seja, a fenda não vai atravessar tantos grãos como nos casos anteriores, chegando mesmo a contornar alguns. Posto isto, é de esperar que para estes casos a fenda propague mais rápido, levando a uma resistência à propagação de fenda por fadiga menor para estas configurações, o que irá resultar numa vida menor.

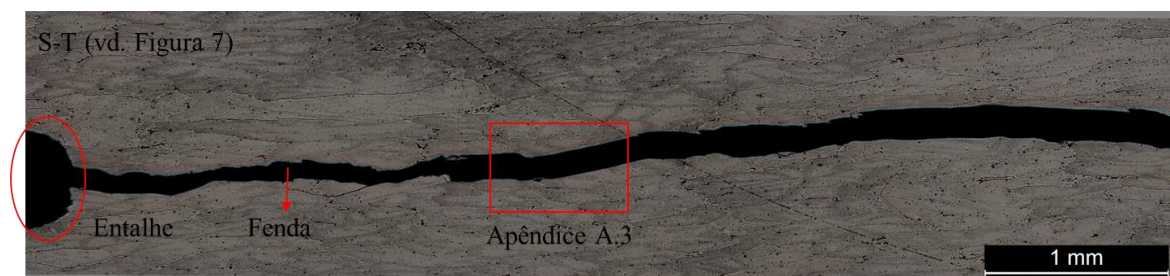


Figura 23 - Perfil de propagação da série 2050T.

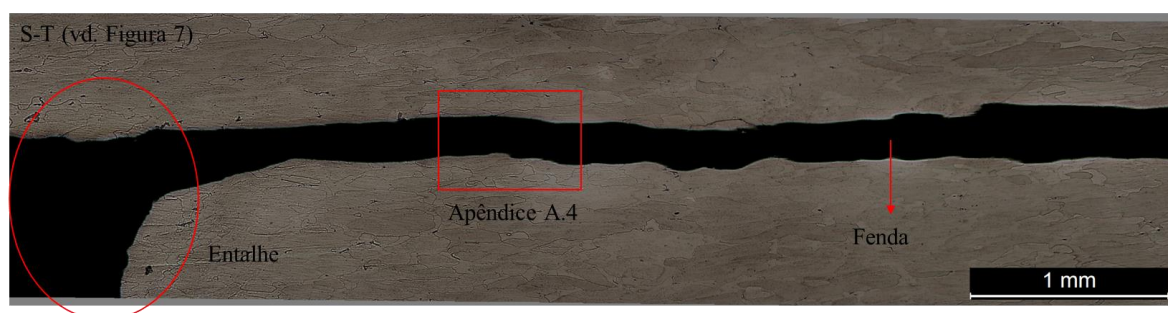


Figura 24 - Perfil de propagação da série 7050T.

### 4.3. Propagação da fenda por fadiga nos provetes M(T)

De seguida, nas figuras 25 e 26 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente. Optou-se por fazer uma análise comparativa em que para o mesmo material era possível observar a influência da direção segundo a qual o provete foi obtido e uma análise em que para a mesma direção se observava a influência da diferença dos elementos de liga.

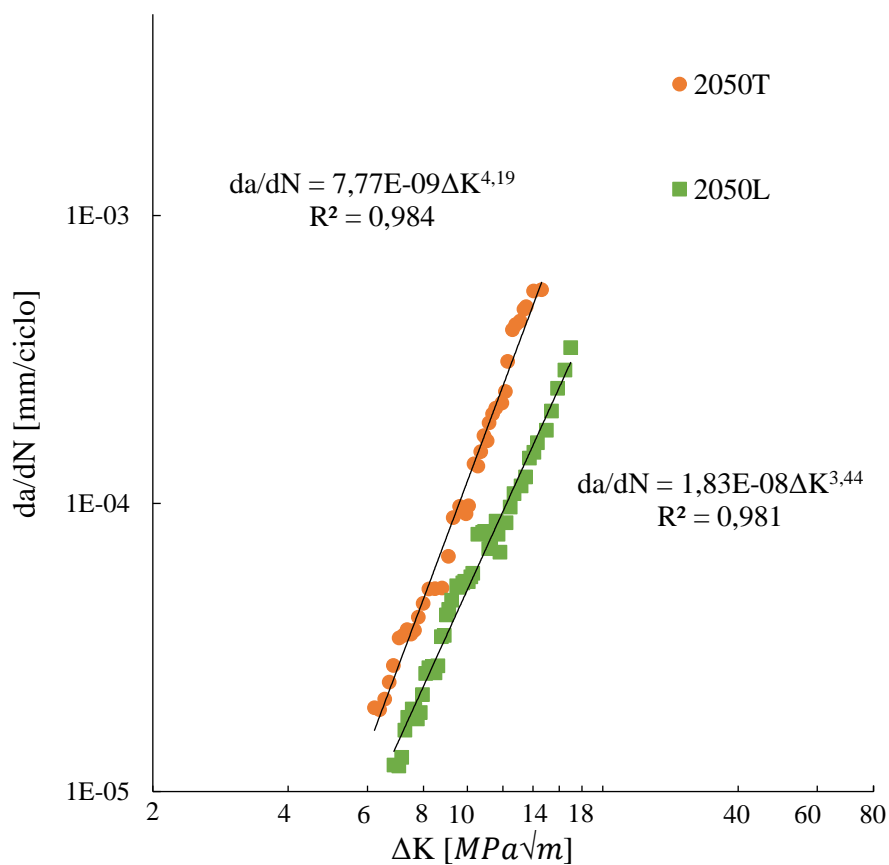
Em ambas as figuras (25 e 26) observa-se a velocidade de propagação da fenda para as ligas de alumínio 2050 e 7050 em função da gama do fator de intensidade de tensões. A velocidade de propagação aumenta à medida que  $\Delta K$  aumenta. Para as séries 2050T (figura 25) e 7050T (figura 26) tendo em conta o mesmo valor de  $\Delta K$  a fenda propaga a uma velocidade maior que para as séries 2050L e 7050L respetivamente. Analisando a tabela 8 que mostra os valores das constantes C e m para cada uma das séries, verifica-se que as séries 2050L e 7050L apresentam um declive (inclinação) menor e conseqüentemente um maior C

em relação às séries 2050T e 7050T, ou seja, a vida das séries 2050L e 7050L é superior à das séries 2050T e 7050T, respetivamente.

A série 2050T em relação à série 2050L tem uma vida ligeiramente menor, contrastando com a série 7050T que em relação à série 7050L tem uma vida bastante menor.

**Tabela 8** - Constantes C e m para cada uma das séries

Séries	2050T	2050L	7050T	7050L
C	7,77E-09	1,83E-08	1,02E-07	2,59E-07
m	4,19	3,44	3,23	2,59



**Figura 25** - Curvas da/dN - ΔK para a liga de alumínio 2050

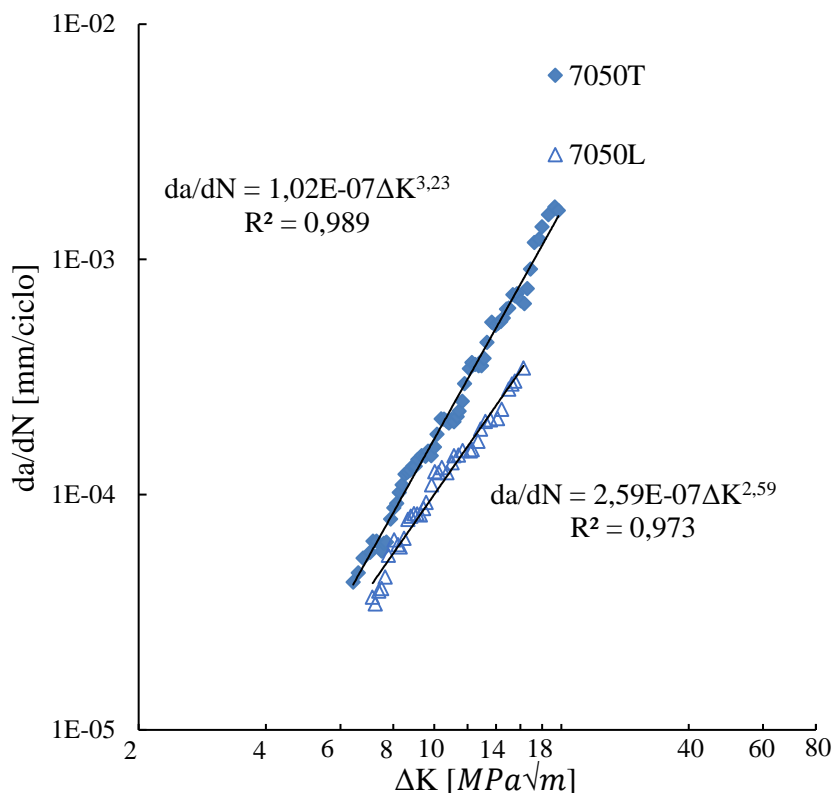


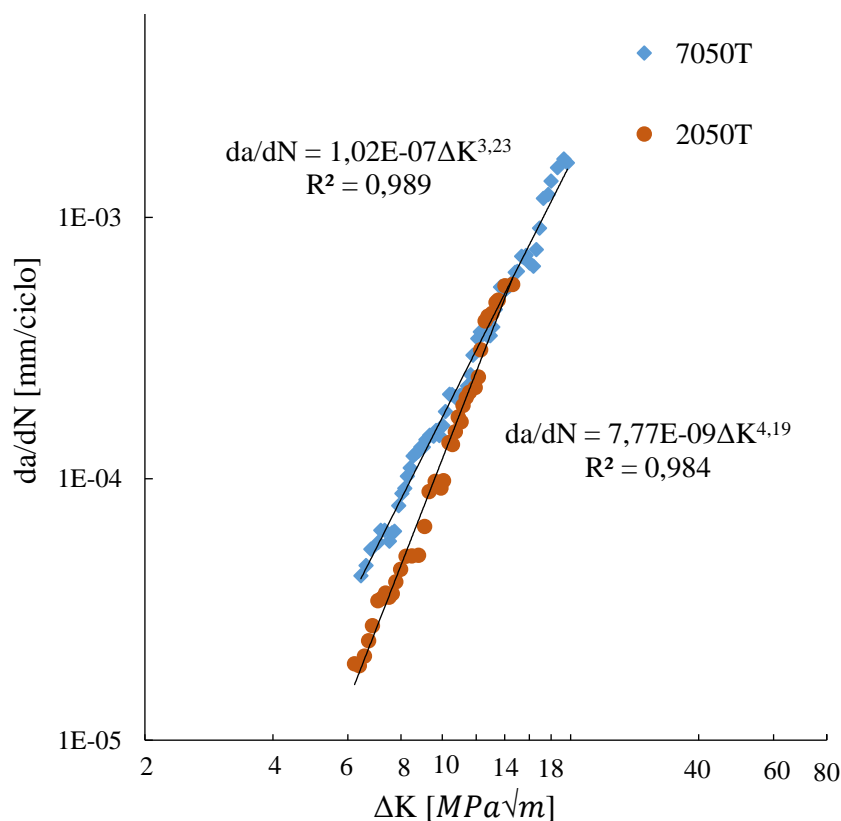
Figura 26 - Curvas da/dN - ΔK para a liga de alumínio 7050

De acordo com o que foi dito em 4.2, este comportamento era o esperado pois nos provetes obtidos segundo direção T-L (figuras 25 e 26). A fenda tem que atravessar os vários grãos microestruturais, o que vai fazer com que esta demore mais tempo a propagar do que no caso das ligas obtidas segundo a direção S-T, em que a fenda contorna alguns dos grãos tendo um percurso mais vantajoso, logo propagando mais rápido. Esta propagação mais acelerada vai resultar, como já foi referido anteriormente, numa redução da resistência da propagação da fenda por fadiga, logo a vida dos provetes obtidos segundo a direção S-T será menor.

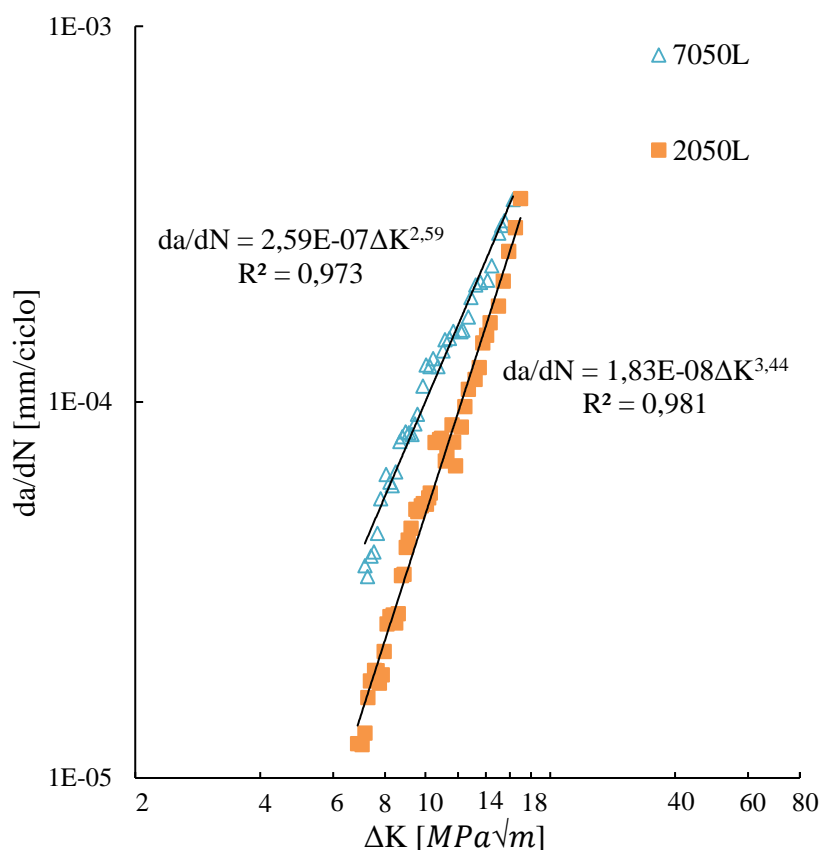
Nas figuras 27 e 28 comparam-se para as 2 ligas os resultados obtidos com os provetes obtidos segundo a mesma direção, S-T e T-L, respetivamente. É possível observar novamente a velocidade de propagação da fenda para as ligas 2050 e 7050 em função da gama do fator de intensidade de tensões. As diferenças obtidas são mais significativas quando se varia a direção segundo a qual os provetes são obtidos do que quando se alteram os elementos de liga, tendo o material sido obtido segundo a mesma direção.

Na figura 27 as ligas 7050 e 2050 foram obtidas segundo a direção S-T e nota-se que para um  $\Delta K$  mais baixo (até  $10 \text{MPa}\sqrt{m}$ ) a liga 7050 propaga a uma velocidade superior à liga 2050. Quando a fenda já vai com um comprimento considerável, ou seja, um  $\Delta K$  elevado, a frente da fenda está tão plastificada que as duas ligas apresentam comportamento semelhante. Apesar da série 2050T apresentar uma inclinação maior, e consequentemente um menor C em relação à série 7050T, a série 2050T apresenta maior vida pois como se estão a comparar dois tipos de liga diferentes as constantes C e m também variam consoante o material.

As ligas 7050 e 2050 representadas na figura 28 foram obtidas segundo a direção T-L. É possível notar que a série 7050L para o mesmo valor de  $\Delta K$  em relação à série 2050L apresenta velocidades de propagação superiores o que vai conduzir a uma menor vida. Tal como na figura 27, a liga 2050 apresenta uma inclinação maior e, consequentemente, um menor C em relação à liga 7050, mas como já foi referido estão a ser comparados dois tipos de liga diferentes, logo as constantes C e m também variam consoante o material.



**Figura 27** - Curva  $da/dN$ - $\Delta K$  para as ligas de alumínio 2050 e 7050 segundo a direção S-T



**Figura 28** - Curva da/dN-ΔK para as ligas de alumínio 2050 e 7050 segundo a direção T-L

Posto isto, com esta análise das curvas da/dN–ΔK ficou provado novamente que as séries obtidas segundo a direção T-L apresentam uma vida maior e com estas duas últimas figuras foi possível concluir que a liga 2050 apresenta uma vida superior à liga 7050 pelo que é preferível utilizar para aplicações, onde a resistência à propagação seja um fator principal, a liga 2050.

#### 4.4. Propagação de fendas por fadiga nos provetes C(T)

Com o objetivo de estudar o efeito da geometria foram realizados novamente ensaios de propagação de fenda por fadiga neste caso para os provetes C(T).

A comparação entre as séries 2050L e 7050L entre provetes M(T) e C(T) estão representadas nas figuras 29 e 30, respetivamente, onde são apresentadas as curvas da/dN-ΔK. É possível verificar que a dispersão de pontos é de tal modo acentuada que não é possível traçar uma reta que traduza devidamente o comportamento do material.



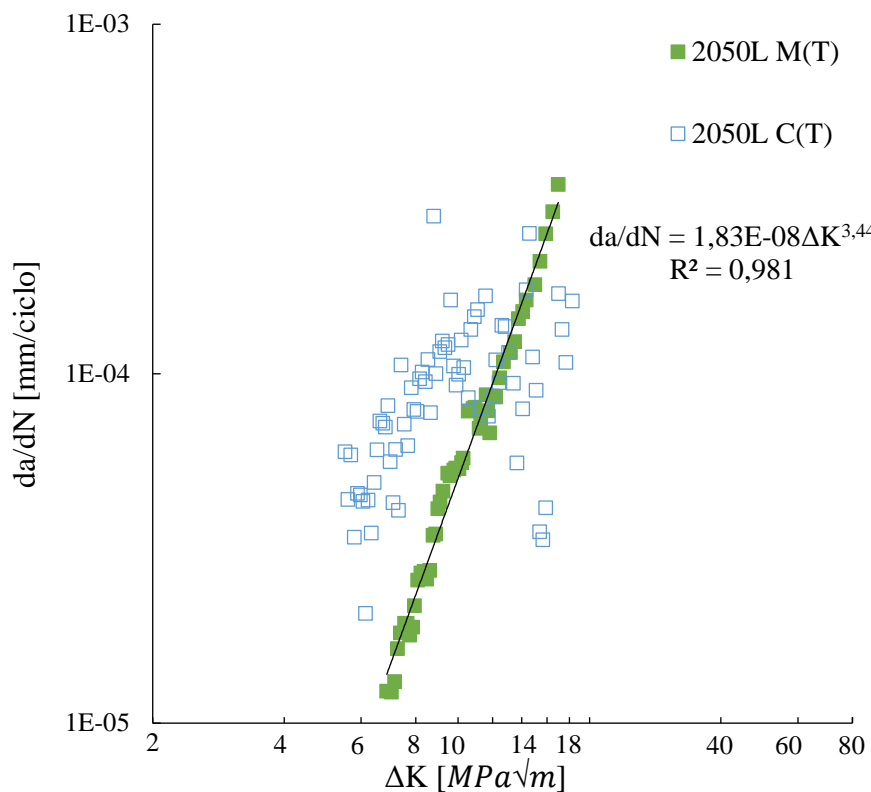


Figura 29 - Curva  $da/dN$ - $\Delta K$  para as séries 2050L para os provetes M(T) e C(T)

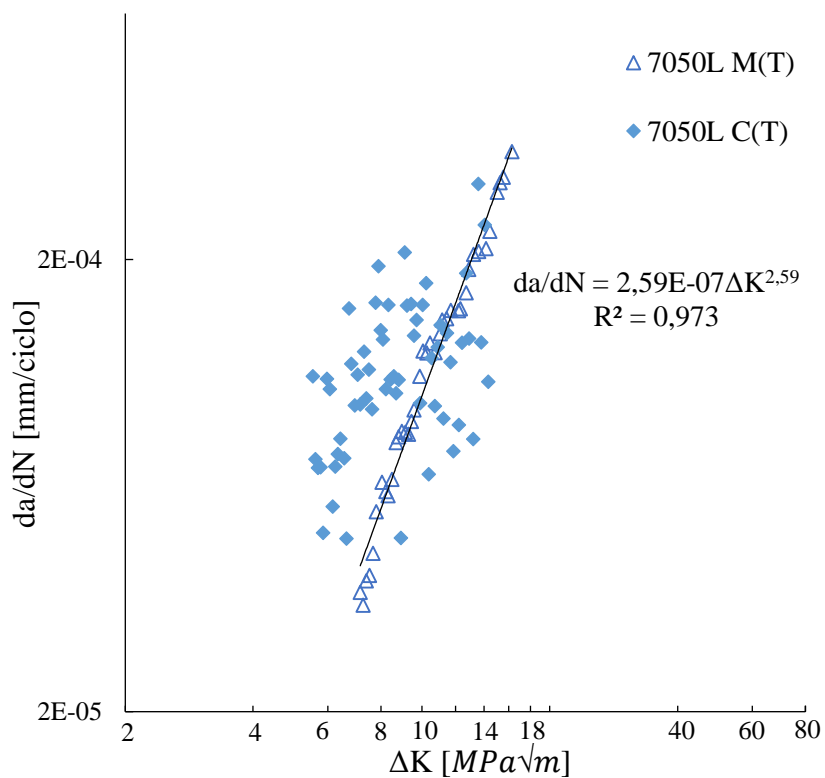
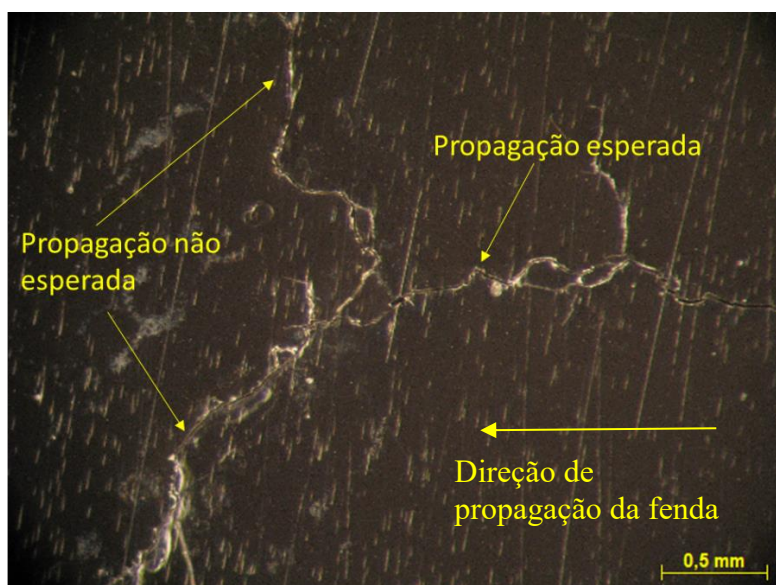


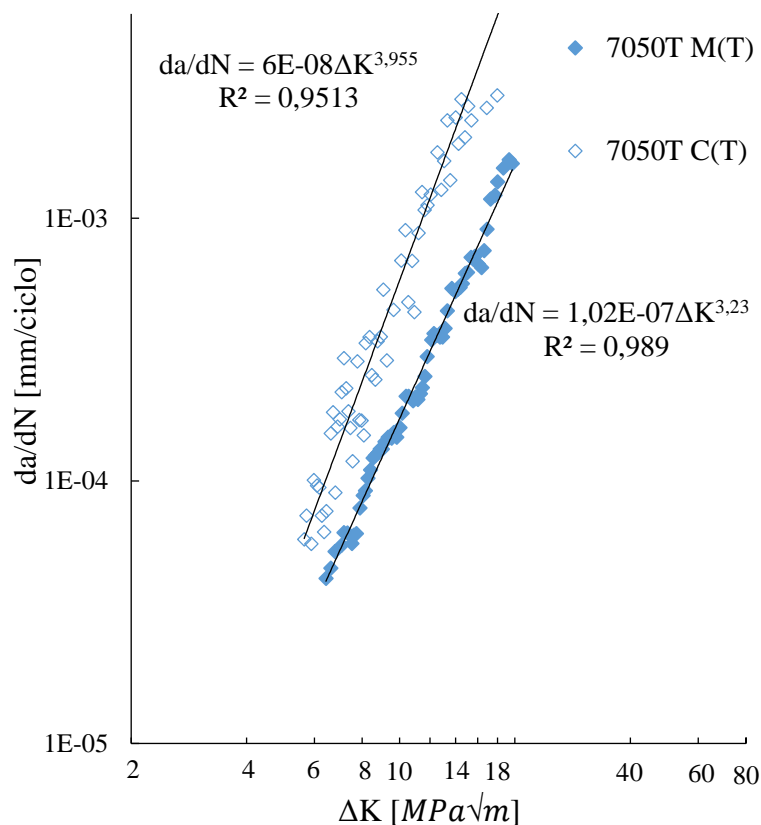
Figura 30 - Curva  $da/dN$ - $\Delta K$  para as séries 7050L para os provetes M(T) e C(T)

É importante referir que para estes ensaios realizados nos provetes obtidos segundo a direção T-L a fenda teve uma propagação que não era esperada. Quando estava próxima de  $\Delta K=14\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  em ambos os provetes a fenda teve o comportamento demonstrado na figura 31. Este comportamento poderá ser devido ao fato de os grãos microestruturais para as séries obtidas segundo a direção T-L estarem laminados perpendicularmente à direção de propagação da fenda, logo a fenda terá tendido a atravessar todos os grãos microestruturais e, neste caso, poderá ter contornado o grão, tendo resultado neste comportamento. Isto parece demonstrar que os provetes M(T) apresentam melhor performance quando sujeitos a solicitações no estado plano de tensão (baixas espessuras) para materiais dúcteis.



**Figura 31** - Imagem ampliada da propagação de fenda em ambas as séries T-L nos provetes C(T)

Estes ensaios também foram realizados para a série 7050T, na figura 32 encontra-se representada a curva da/dN- $\Delta K$  para a séries7050T para provete M(T) e C(T). Neste caso o ensaio correu dentro do esperado pois a fenda não tinha que fazer grande desvio para contornar o grão, como mostrado em 4.2. Mais uma vez fica provado que para os provetes C(T) a fenda propaga a velocidades superiores que para os M(T) o que não era de esperar dado que ambas geometrias estas contempladas na norma ASTM anteriormente referida.



**Figura 32** - Curva  $da/dN$ - $\Delta K$  para as séries 7050T para os provetes M(T) e C(T)

Apesar da propagação inesperada para as séries obtidas segundo a direção T-L, à medida que se foram realizando os ensaios para os provetes C(T) deu novamente para perceber que a fenda demorava mais a propagar para estas séries, o que comprova mais uma vez que as séries obtidas segundo a direção T-L apresentam maior resistência à propagação de fenda independentemente da geometria do provete, tal como a série 2050L que apresentava maior resistência à propagação de fenda que a série 7050L, voltando novamente a ser evidenciado que a liga 2050 apresenta maior resistência que a liga 7050 também independentemente da geometria.

#### 4.5. Fecho de fenda

Neste subcapítulo vai ser abordada a influência do fecho de fenda. Da figura 33 à 36 são apresentados os gráficos que relacionam o fator de razão  $U$  com o fator de intensidade de tensões tanto para a carga como para a descarga em relação às 4 séries estudadas. As linhas a tracejado representam a média do fator  $U$ , tanto para a carga como para a descarga. É

possível concluir que no Regime II o fecho é constante, tanto na carga, como para a descarga, e que os valores de U são sempre superiores na carga. À medida que  $\Delta K$  se vai aproximando do regime 3, o fator U começa a aproximar-se de 1 o que significa que começa a deixar de haver fecho de fenda. Este comportamento já seria de esperar pois como a fenda propagou bastante, e apresenta um comprimento significativo, as extremidades da fenda estão plastificadas de tal modo que nem chegam a tocar-se. Apesar de para todos os gráficos (figuras 33 à 36) serem apresentadas as médias do fator U na carga e na descarga, as comparações vão ser feitas considerando os valores de U para a carga pois é o ciclo de carga que contribui para a abertura da fenda. De seguida é apresentada na tabela 9 um resumo dos resultados das figuras 33 à 36 em que é possível visualizar os valores médios do fator U para a carga e descarga.

**Tabela 9 - Médias do fator U**

	Figura 33	Figura 34	Figura 35	Figura 36
U (carga)	0,69	0,74	0,73	0,78
U (descarga)	0,62	0,67	0,66	0,64

Comparando a figura 33 e 34, ou seja, a série 2050L e 2050T, respetivamente, é possível observar que a série 2050T apresenta um fator U ligeiramente superior ao da série 2050L. Sendo este valor superior significa que a série 2050T expõe um valor de carga de abertura de fenda inferior à série 2050L resultando num valor de fecho de fenda menor. Um valor de fecho de fenda menor conduz a uma vida menor, o que comprova mais uma vez (já tinha sido verificado em 4.3) que a série 2050L apresenta uma vida superior à série 2050T.

A série 7050L (figura 35) apresenta um valor médio U de 0,73 enquanto a série 7050T (figura 36) tem um valor médio U de 0,78. Logo esta última série vai ter uma carga de abertura de fenda superior, resultando num fecho de fenda inferior, levando a uma vida inferior à vida da série 7050L, indo também de encontro com o que foi verificado em 4.3.

Fazendo uma comparação entre as 2 ligas (figura 33 e 34 com a figura 35 e 36) é possível concluir que a liga 2050 (figura 33 e 34) apresenta valores médios de U ligeiramente inferiores, portanto é a que apresenta maior vida, algo que também já tinha sido visto em 4.1 e 4.3 em que esta liga apresentava uma dureza ligeiramente superior à liga 7050.

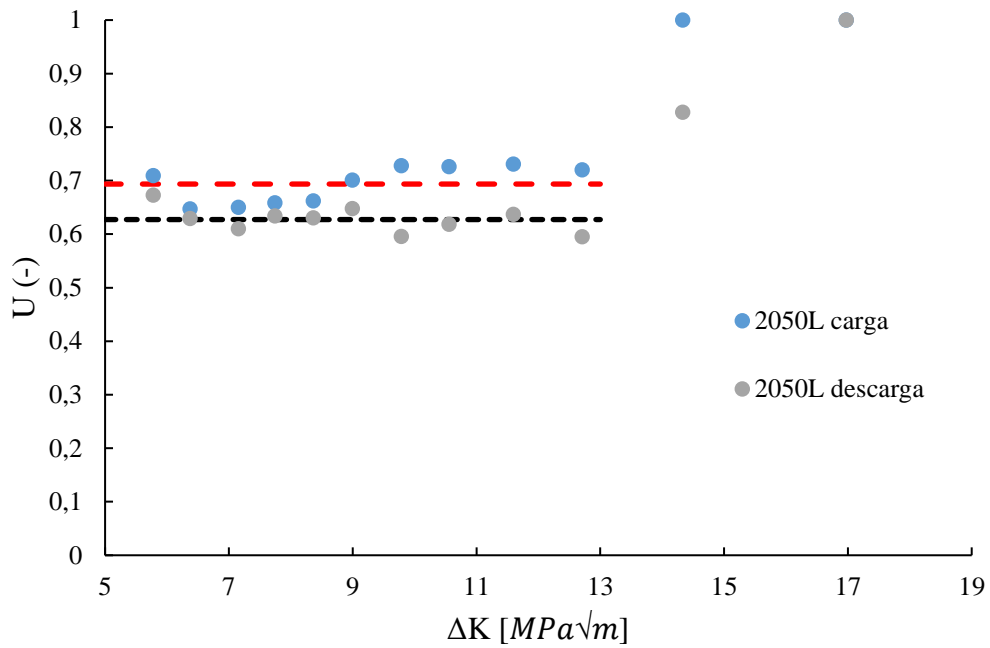


Figura 33 - Gráfico U- $\Delta K$  durante a carga e descarga para a liga 2050L

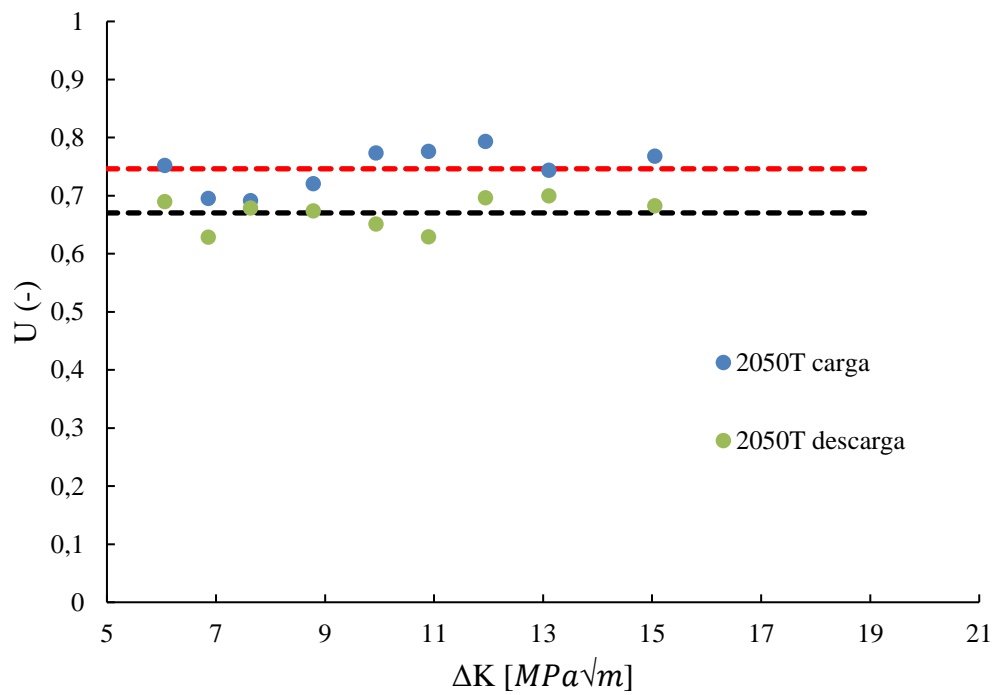


Figura 34 - Gráfico U- $\Delta K$  durante a carga e descarga para a liga 2050T

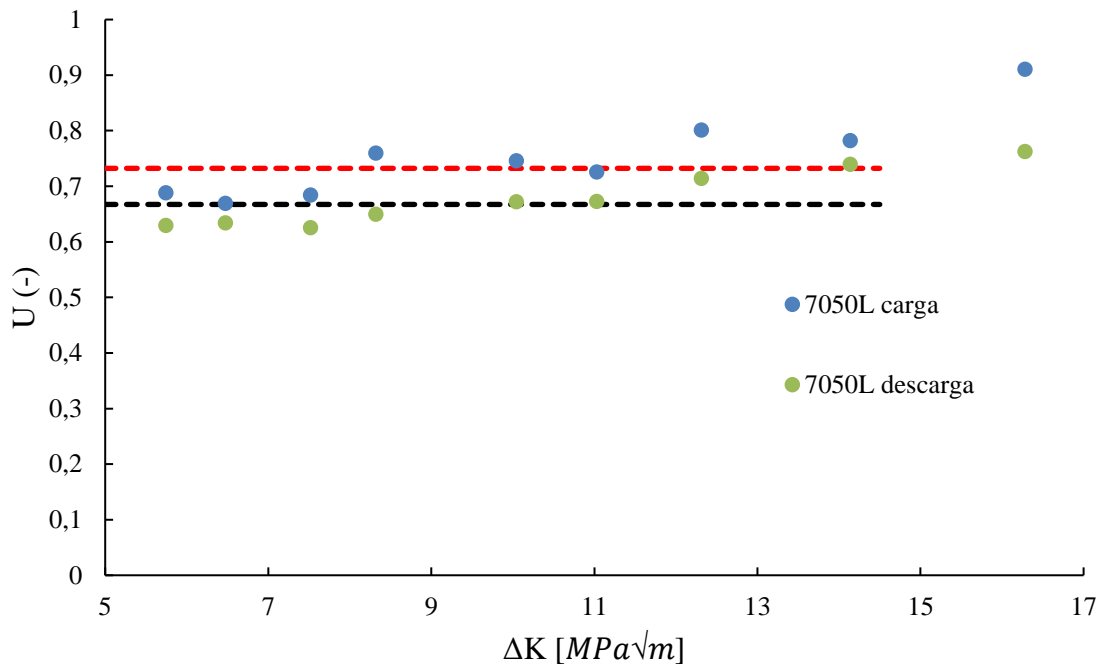


Figura 35 - Gráfico U- $\Delta K$  durante a carga e descarga para a liga 7050L

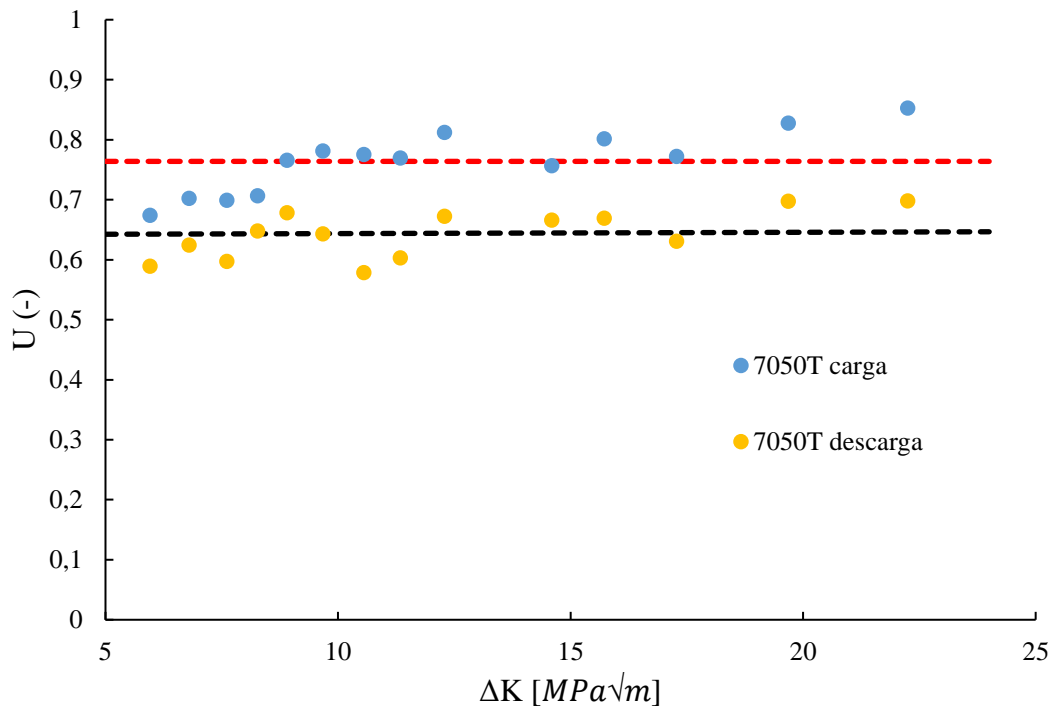


Figura 36 - Gráfico U- $\Delta K$  durante a carga e descarga para a liga 7050T

## 4.6. Sobrecargas

Nesta secção vão ser abordadas as sobrecargas. Para estudar a influência das mesmas, foram realizados dois tipos de tratamento de dados através de curvas da/dN -  $\Delta K$  e a-a<sub>sc</sub> vs N.

### 4.6.1. Curvas da/dN após sobrecarga

Na figura 37 são apresentadas as curvas da/dN -  $\Delta K$  para sobrecargas para as séries 7050L e 2050L. É possível observar o impacto da sobrecarga que como seria de esperar resultou num retardamento da velocidade de propagação da fenda levando a um maior tempo de vida. Na figura 37 é possível observar que a primeira sobrecarga de 50% foi aplicada com um  $\Delta K=9 \text{ MPa}\sqrt{m}$  e em ambas as séries resultou num pequeno decaimento da velocidade de propagação da fenda tendo voltado muito pouco tempo depois à velocidade normal de  $\Delta P$  constante, enquanto que para a segunda sobrecarga de 100%, esta foi aplicada com um  $\Delta K=12 \text{ MPa}\sqrt{m}$  onde nas duas figuras é possível observar um grande decaimento da velocidade de propagação e de seguida um crescimento progressivo até voltar à velocidade de  $\Delta P$  constante. Este efeito pode ter sido originado devido às tensões residuais, encruamento do material ou aumento do fecho de fenda. Para a série 2050L, após a aplicação da segunda sobrecarga, a velocidade sofreu um decaimento de 34,6%, enquanto que para a série 7050L, após ter sido aplicada a segunda sobrecarga, a velocidade sofreu um decaimento de 43,6%.

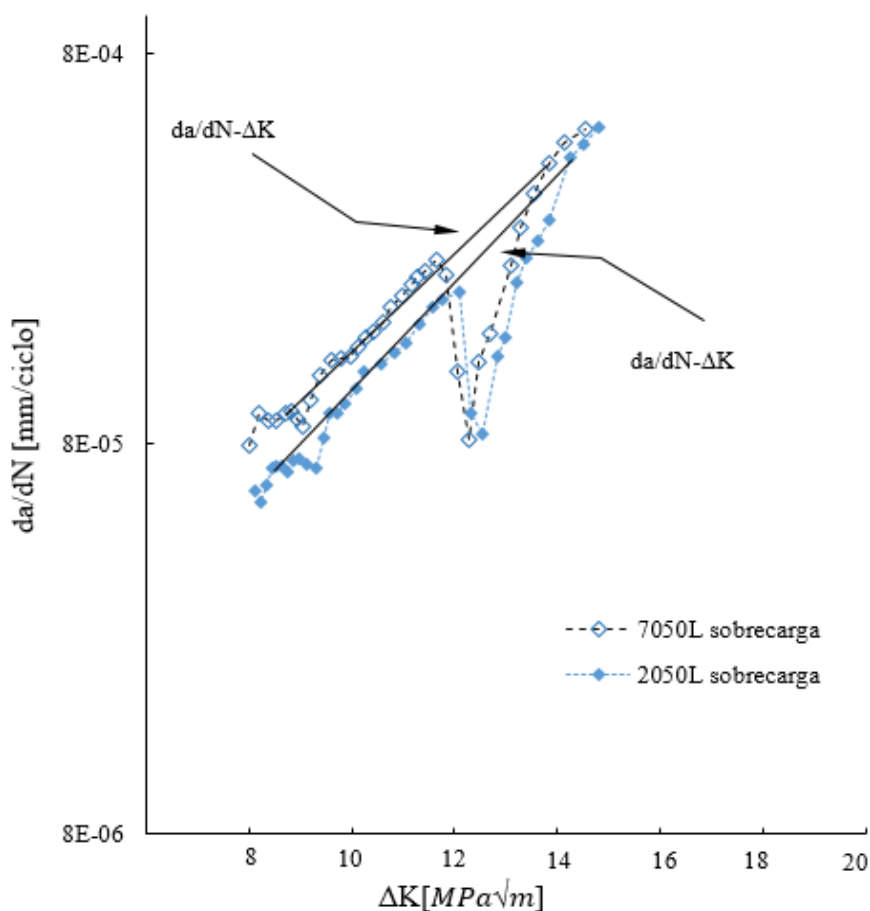


Figura 37 - Curva da/dN-ΔK para sobrecarga nas séries 7050L e 2050L

#### 4.6.2. Sobrecargas – curvas a<sub>sc</sub>-a

De seguida é apresentado nas figuras 38 e 39 as curvas a-a<sub>sc</sub> (comprimento da fenda menos comprimento da fenda aquando da aplicação da sobrecarga) vs N também para as séries 7050L e 2050L. É possível observar o local onde foram aplicadas as sobrecargas e a demora da curva até à estabilização da mesma

Observando as figuras 38 e 39 é de fácil percepção que o que foi concluído em 4.5.1 se mantém após a visualização destas curvas, a primeira sobrecarga surte um efeito praticamente nulo, enquanto que na segunda depara-se com um grande decaimento de velocidade. Com estas curvas a-a<sub>sc</sub> vs N é possível observar o número de ciclos que a curva demorou a retomar a velocidade de ΔP constante. Através da figura 38 conclui-se que para a série 7050L após a aplicação da primeira sobrecarga a curva estabilizou praticamente logo de seguida, já para a segunda sobrecarga demorou 12959 ciclos para voltar à velocidade de propagação de ΔP constante, enquanto que para a série 2050L, figura 37, acontece o mesmo



para a primeira sobrecarga enquanto que para a segunda a curva demora 17853 ciclos a atingir a velocidade de propagação de  $\Delta P$  constante o que comprova que o fenómeno das sobrecargas é importante para aumentar a resistência à fadiga, prolongando a vida do componente mecânico. Posto isto é possível concluir que a série 2050L apresenta melhor comportamento à propagação de fenda aquando da aplicação de uma sobrecarga. Tal como referido em 4.5.1 este efeito pode ter sido originado devido às tensões residuais, encruamento do material ou aumento do fecho de fenda.

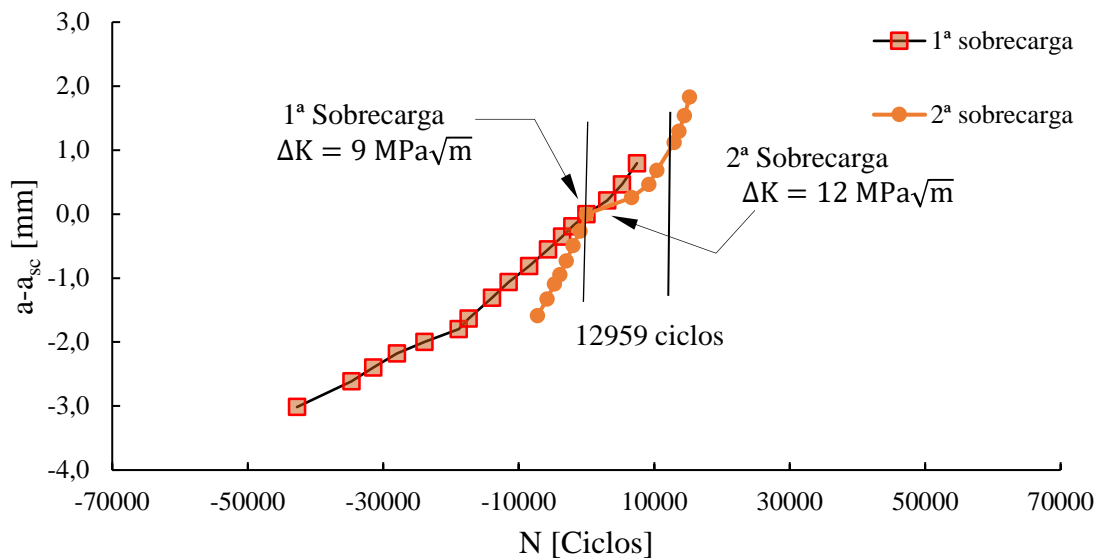


Figura 38 - Curva  $a-a_{sc}$  vs  $N$  para a série 7050L

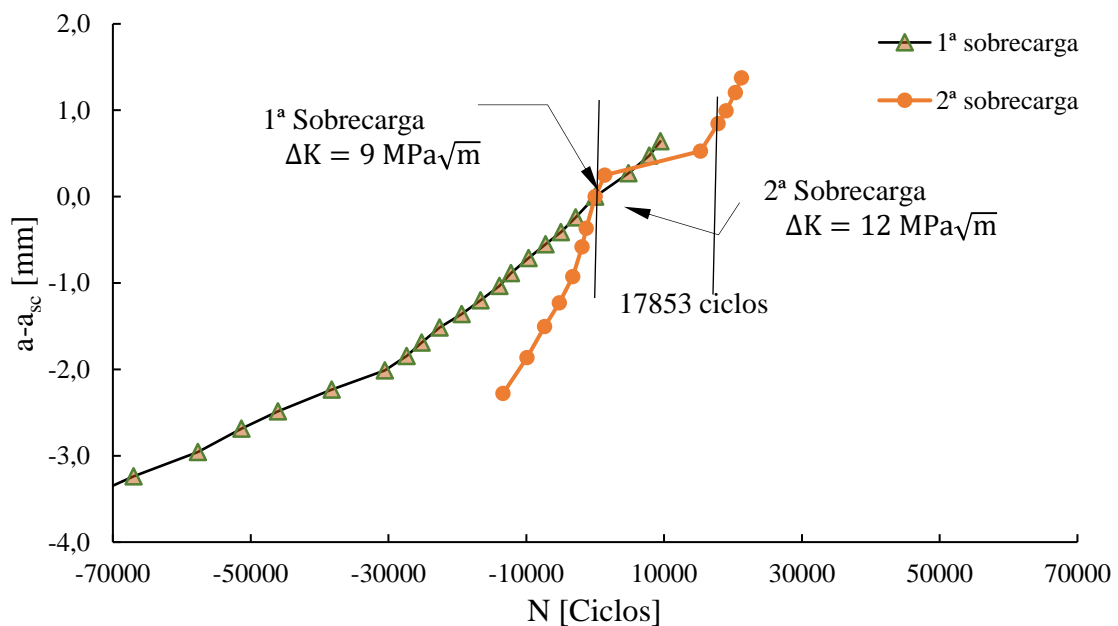


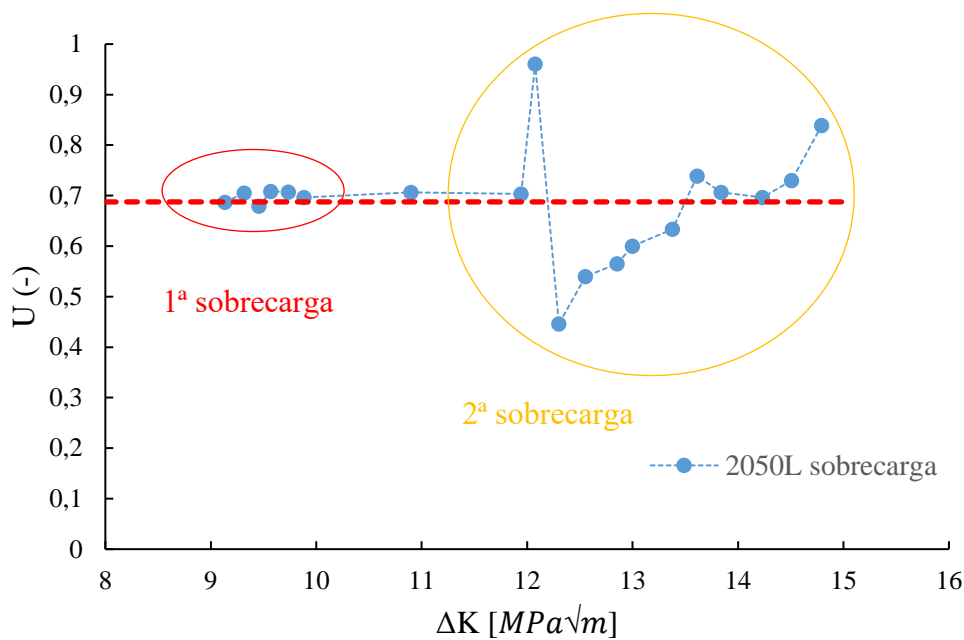
Figura 39 - Curva  $a-a_{sc}$  vs  $N$  para a série 2050L

## 4.7. Fecho de fenda para sobrecargas

Neste subcapítulo são apresentadas as curvas  $U - \Delta K$  para as sobrecargas apenas durante o ciclo de carga. Na figura 40 é apresentado o gráfico para a série 2050L, de referir que para esta série, todos os pontos após a aplicação de cada uma das sobrecargas foram medidos com recurso a extensómetro, daí ser possível analisar o fecho de fenda para todos estes pontos.

Na figura 40 observa-se a relação do fator  $U$  em função de  $\Delta K$  para a liga 2050L com aplicação de sobrecarga. É possível observar que o que foi concluído em subcapítulos anteriores em relação às sobrecargas, se mantém. Através desta análise com as curvas  $U - \Delta K$ , é possível observar com mais clareza o impacto do fecho de fenda nas sobrecargas. Neste caso já se consegue perceber melhor o impacto da primeira sobrecarga, mas tal como concluído anteriormente, esta não apresenta uma modificação notável na curva. É possível observar que após a aplicação desta sobrecarga, a curva sobe ligeiramente e de seguida decresce um pouco, alcançado a velocidade de  $\Delta P$  constante logo de seguida, comportamento este já esperado teoricamente, mas como referido, não teve grande impacto. Este comportamento é revelador de que o fecho de fenda fica inalterado, logo não fez variar a velocidade de propagação.

De seguida, a curva continua estabilizada num valor de  $U$  pouco abaixo de 0,70, chegando a um  $\Delta K$  de  $12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , onde se aplica a segunda sobrecarga, esta de 100%, notando-se nitidamente um grande crescimento da curva para um  $U$  aproximado de 0,95 e logo de seguida um grande decaimento para valores de  $U$  de 0,45 tendo de seguida o comportamento esperado, ou seja, um crescimento progressivo até atingir a velocidade de  $\Delta P$  constante, num  $U$  pouco acima de 0,70, com um  $\Delta K$  próximo de  $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Isto significa que há mudança de velocidade da fenda dado que o fecho de fenda aumenta após a aplicação da sobrecarga.



**Figura 40** - Gráfico U- $\Delta K$  durante a carga para sobrecargas para a liga 2050L

Na figura 41 é apresentada a curva  $U - \Delta K$  para a série 7050L. É importante referir que para este caso, por lapso após a aplicação de cada uma das sobrecargas, os pontos após a aplicação da mesma não foram todos medidos com recurso a extensómetro, apenas alguns, daí só se poder estimar os valores de fecho para alguns pontos após a aplicação destas sobrecargas.

Observa-se, novamente, a relação do fator U em função de  $\Delta K$  para a série 7050L com aplicação de sobrecarga. Através do mesmo é possível analisar que mesmo tendo muito poucos pontos após a aplicação de cada uma das sobrecargas, estes pontos têm o comportamento esperado: na primeira sobrecarga é alcançada logo de seguida a velocidade de  $\Delta P$  constante e na segunda, ocorre o aumento de U, descendo depois, e voltando novamente à velocidade de  $\Delta P$  constante.

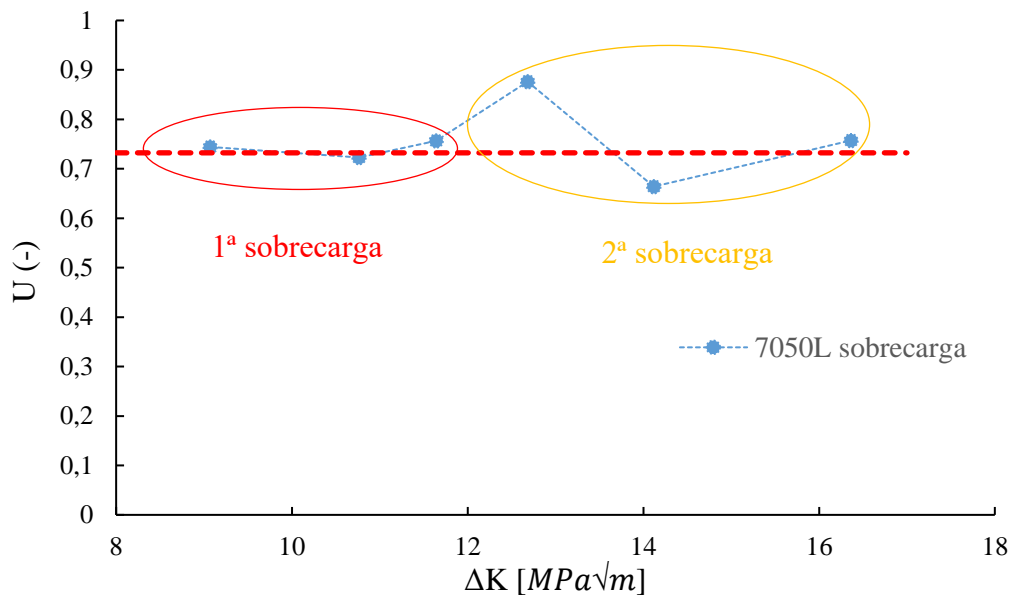
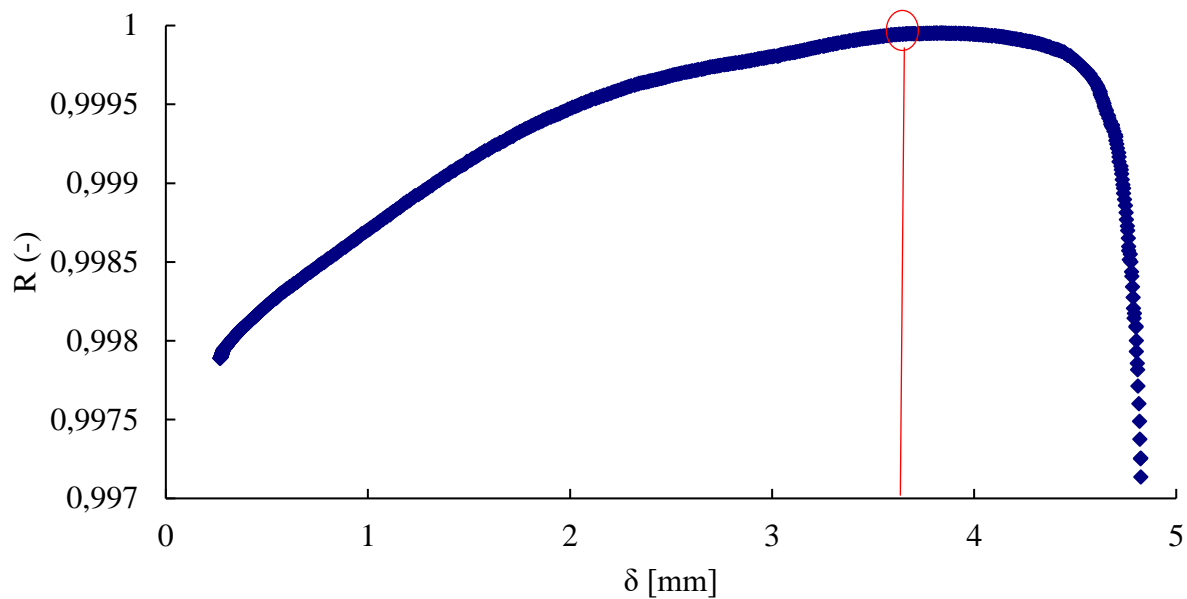


Figura 41 - Gráfico U-ΔK durante a carga para sobrecargas para a liga 7050L

É importante referir que para a descarga não foi possível realizar os gráficos  $U - \Delta K$  pois apesar do resultado esperado para a descarga corresponder a uma carga de fecho maior que a carga de abertura, por exemplo para a série 2050L, a segunda sobrecarga foi aplicada com uma fenda de 10,82mm e quando esta já tinha 13,21mm de comprimento, ou seja quando já devia ter estabilizado, a carga de abertura continua muito elevada. No apêndice A.5, e na figura 42, é apresentado o que acabou de ser referido.

Na figura que se encontra no apêndice A.5, os 13,21mm correspondem ao primeiro ponto onde a curva já estabilizou e seria de esperar uma carga muito perto dos 2000N ( $U$  aproximado de 0,65) e como é possível observar pela figura 42, para os 13,21mm na descarga o fecho de fenda apresenta um valor de 3675N apresentando um  $U$  de 0,27 pelo que se concluiu que para este material após a aplicação das sobrecargas não é possível medir o fecho corretamente durante o ciclo de descarga.

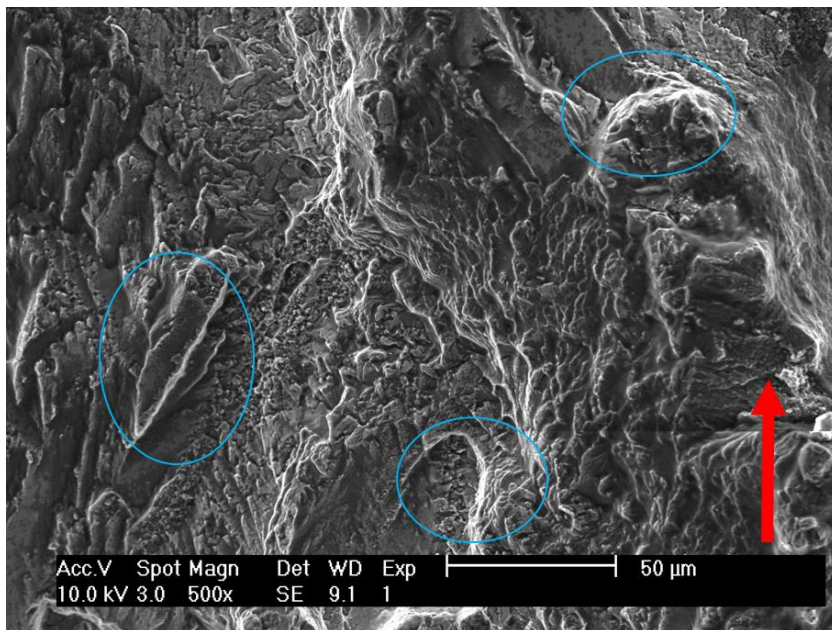


**Figura 42** - Determinação da carga  $P_{fe}$  através do Método da Maximização do Coeficiente de Correlação

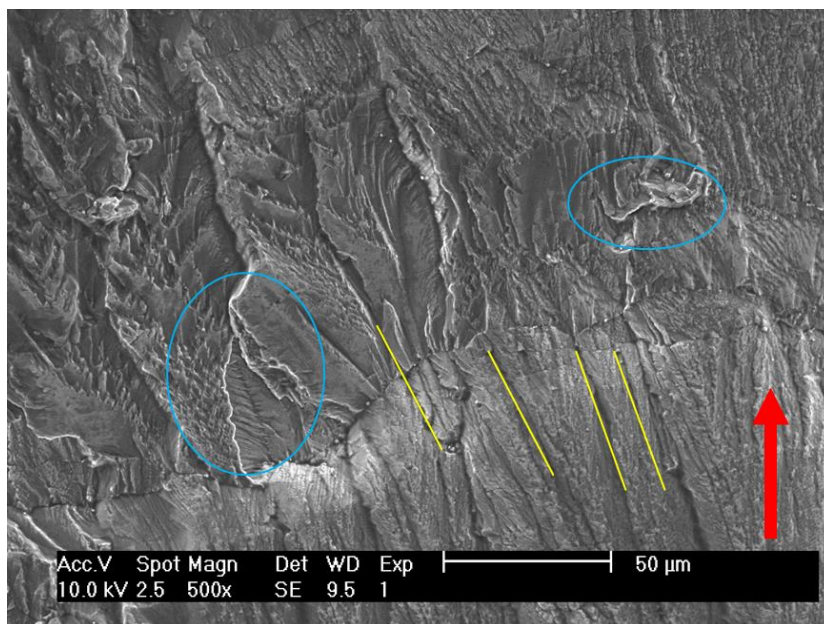
#### 4.8. Análise das superfícies de fratura

Através da análise das superfícies por MEV foi possível identificar alguns aspetos importantes sobre a propagação de fendas por fadiga. As imagens foram captadas para as séries 2050L e 7050L, quando a fenda propagava com velocidade de  $\Delta P$  constante com um  $\Delta K = 7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  para ambas as series e na zona da primeira sobrecarga para um  $\Delta K = 9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . É apresentado nas figuras 43 e 44 as superfícies de fratura na zona de propagação com velocidade de  $\Delta P$  constante para as séries 2050L e 7050L, respetivamente.

Analisando a figura 43 é possível observar diferentes planos de propagação da fenda enquanto que na figura 44 já é possível ter uma melhor perceção da propagação da fenda, propagando de forma mais uniforme, o que prova que na liga de alumínio 7050 a fenda propaga mais rapidamente, ou seja, fica provado mais uma vez que a liga e alumínio 7050 apresenta menor vida que a liga de alumínio 2050. Nas figuras 43 e 44 a vermelho é apresentado o sentido de propagação da fenda, a azul alguns dos planos com  $45^\circ$  de inclinação devido ao estado plano de tensão e na figura 44 encontra-se a amarelo as linhas de propagação da fenda.



**Figura 43** - Superfície de fratura da série 2050L sem sobrecarga



**Figura 44** - Superfície de fratura da série 7050L sem sobrecarga

Em relação às superfícies de fratura aquando da aplicação das sobrecargas, não foi possível notar em ambas as séries a zona deformada plasticamente, ou seja, a mudança na superfície de fratura.

## 5. CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi estudado o comportamento à fadiga das ligas de alumínio 2050-T8 e 7050-T7451 tendo sido possível retirar as seguintes conclusões:

- A variação dos elementos de liga nestas ligas não tem uma influência tão significativa, mesmo assim, nota-se que a liga 2050 apresenta durezas ligeiramente maiores que a liga 7050 e melhor comportamento à propagação de fenda;
- Para estas ligas quando o provete é obtido segundo a direção T-L este apresenta um comportamento muito melhor à propagação de fenda do que quando o provete é obtido segundo a direção S-T visto que a fenda tem que atravessar os grãos microestruturais durante o seu percurso;
- A mudança de geometria revelou que a resistência à fadiga era menor nestes casos e que no caso dos provetes das ligas obtidos segundo a direção T-L apresentou uma propagação de fenda irregular o que leva a concluir que para matérias dúcteis de baixa espessura no caso destas ligas os provetes M(T) apresentam uma melhor performance apesar de as conclusões tiradas para os provetes M(T) voltarem a ser demonstradas com a mudança de geometria, ou seja, a liga 2050 apresenta maior resistência à propagação bem como a direção T-L;
- As quatro séries estudadas apresentam fecho de fenda sendo este superior na série 2050L, logo esta serie apresentou melhor vida;
- A aplicação de uma sobrecarga de 50% não altera significativamente a vida destas ligas, enquanto que para uma sobrecarga de 100% a liga 7050 e 2050 têm um decaimento de velocidade de aproximadamente 35% e 44% o que mostra um grande retardamento do avanço da fenda. Este decaimento de velocidade pode ser explicado devido ao aumento do fecho de fenda;

- Tendo em conta as quatro séries estudadas nesta dissertação os provetes das séries obtidos segundo a direção T-L apresentam melhor comportamento à propagação de fendas por fadiga tal como a liga 2050 pelo que para aplicações onde a propagação de fendas por fadiga seja um fator importante a série 2050L é a mais apropriada;
- A superfície de fratura apresenta-se irregular para ambas as series, menos irregular para a liga de alumínio 7050-T7451, em ambas ligas é possível perceber diferentes planos de propagação de fenda. No caso das sobrecargas não foi possível perceber a mudança na superfície de fratura em ambas as ligas

### **5.1. Sugestões para trabalhos futuros**

Com a realização da seguinte dissertação chegou-se à conclusão que seria interessante estudar/melhorar o trabalho desenvolvido através do estudo de ligas de alumínio obtidas segundo a direção S-L e estimando o fecho de fenda para todas as medições realizadas após a aplicação de sobrecargas até ser atingida a velocidade de  $\Delta P$  constante algo que nesta dissertação só foi realizado para uma das séries bem como uma preparação de modelos numéricos de previsão de propagação de fendas tanto para  $\Delta P$  constante como não constante de maneira a confrontar esses resultados com os resultados obtidos nesta dissertação.



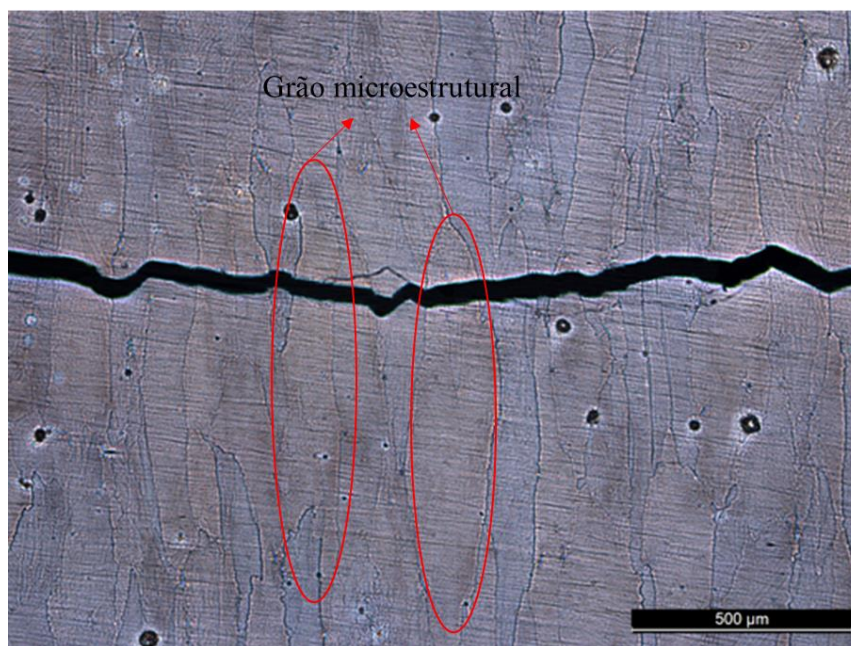
---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

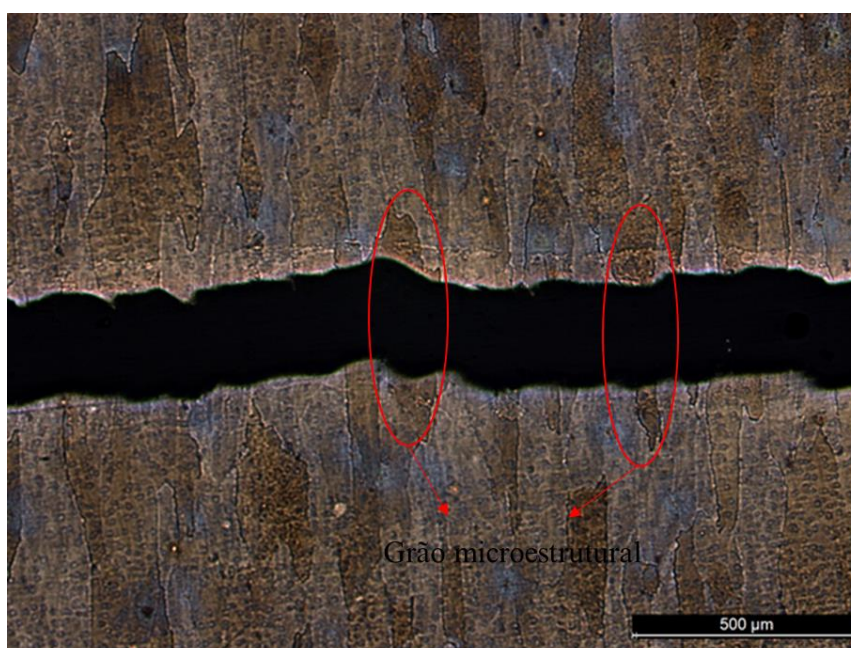
- [1] C. Moura Branco, J. Martins Ferreira, J. Domingos Da Costa, and A. Silva Ribeiro, *Projecto de Órgãos de Máquinas*, 3ª Edição. 2012.
- [2] A. Heinz, A. Haszler, C. Keidel, S. Moldenhauer, R. Benedictus, and W. S. Miller, “Recent development in aluminium alloys for aerospace applications,” vol. 280, pp. 102–107, 2000.
- [3] N.R.Mandal, *ALUMINIUM WELDING*. 2002.
- [4] V. D. Onder, “Análise Da Liga De Alumínio Aa7050 Na Condição De Análise Da Liga De Alumínio Aa7050 Na Condição De,” 2015.
- [5] S.Suresh, *Fatigue of Materials*, Second Edi. Cambridge University Press, 1998.
- [6] F. Bergner, G. Zouhar, and G. Tempus, “The material-dependent variability of fatigue crack growth rates of aluminium alloys in the Paris regime,” *Int. J. Fatigue*, vol. 23, no. 5, pp. 383–394, 2001.
- [7] G.R. Irwin, *Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate*. J.Appl.Mech. 24, 1957.
- [8] P. Paris and F. Erdogan, “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws S - ' K - O T,” 2013.
- [9] E. Wolf, “Fatigue crack closure under cyclic tension,” vol. 2, pp. 37–45, 1970.
- [10] S. Suresh, G. F. Zamiski, D. Corporation, R. Beach, M. Engineering, and L. B. Labora-, “Oxide-Induced Crack Closure : An Explanation for Near-Threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior,” vol. 12, no. August, 1981.
- [11] S. Suresh and R. O. Ritchie, “A geometric model for fatigue crack closure induced by fracture surface roughness,” *Metall. Trans. A*, vol. 13, no. 9, pp. 1627–1631, 1982.
- [12] L. P. Borrego, J. M. Ferreira, and J. M. Costa, “Partial crack closure under block loading,” *Int. J. Fatigue*, vol. 30, no. 10–11, pp. 1787–1796, 2008.
- [13] M. LANG and G. MARCI 1, “The influence of single and multiple overloads on fatigue crack,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 22, pp. 257–271, 1999.
- [14] L. P. Borrego, J. M. Costa, S. Silva, and J. M. Ferreira, “Microstructure dependent fatigue crack growth in aged hardened aluminium alloys,” *Int. J. Fatigue*, vol. 26,

- no. 12, pp. 1321–1331, 2004.
- [15] J. R. Rice, “Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue,” *Fatigue Crack Propag.*, vol. ASTM STP 4, no. January 1967, pp. 247–309, 1967.
- [16] F. Authors, “Aircraft Engineering and Aerospace Technology,” 1962.
- [17] R. E. Jones, “FATIGUE SINGLE-CYCLE GROWTH RETARDATION AFTER PEAK OVERLOAD IN Ti-6Al-4V TITANIUM,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 5, pp. 585–604, 1973.
- [18] T. Dubois, “Constellium Inaugurates New ‘Airware’ Aluminum Casthouse.” .
- [19] N. Hfaiedh, P. Peyre, H. Song, I. Popa, V. Ji, and V. Vignal, “Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum alloy,” *Int. J. Fatigue*, vol. 70, pp. 480–489, 2015.
- [20] A. Cu, “2050.”
- [21] C. Bianchetti, M. Lévesque, and M. Brochu, “Probabilistic analysis of the effect of shot peening on the high and low cycle fatigue behaviors of AA 7050-T7451,” *Int. J. Fatigue*, vol. 111, no. January, pp. 289–298, 2018.
- [22] J. J. Schubbe, “Evaluation of fatigue life and crack growth rates in 7050-T7451 aluminum plate for T-L and L-S oriented failure under truncated spectra loading,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 16, no. 1, pp. 340–349, 2009.
- [23] A. S. ASTM E647, “ASTM E647 - Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates,” *ASTM B. Stand.*, vol. 03, no. July, pp. 1–49, 2016.
- [24] L. P. Borrego, J. D. Costa, and J. A. M. Ferreira, “Crack Propagation of 7050 Aluminum alloy under Constant Amplitude Loading and Peak Overloads,” *Procedia Eng.*, vol. 114, pp. 613–620, 2015.
- [25] J. D. Costa and C. Capela, “Analysis of fatigue crack propagation sintering XV Analysis Paço de metal Thermo-mechanical modeling of a high pressure turbine blade Analysis of fatigue crack propagation in laser sintering metal airplane gas turbine engine of an,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 5, pp. 239–246, 2017.
- [26] B. A. F. Ritchie, R. O., Yu, W., Holm, D.K., “Development of fatigue crack closure with the extension of long and short cracks in aluminum alloy 2124: a comparison of experimental and numerical results.,” vol. Mech. Fati, pp. 171–185, 1988.

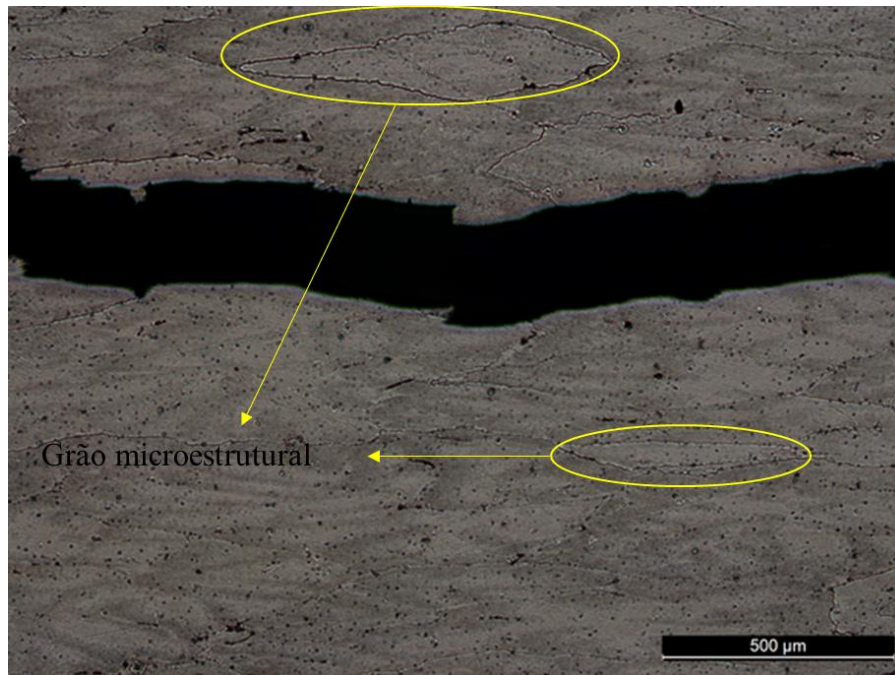
## APÊNDICE A



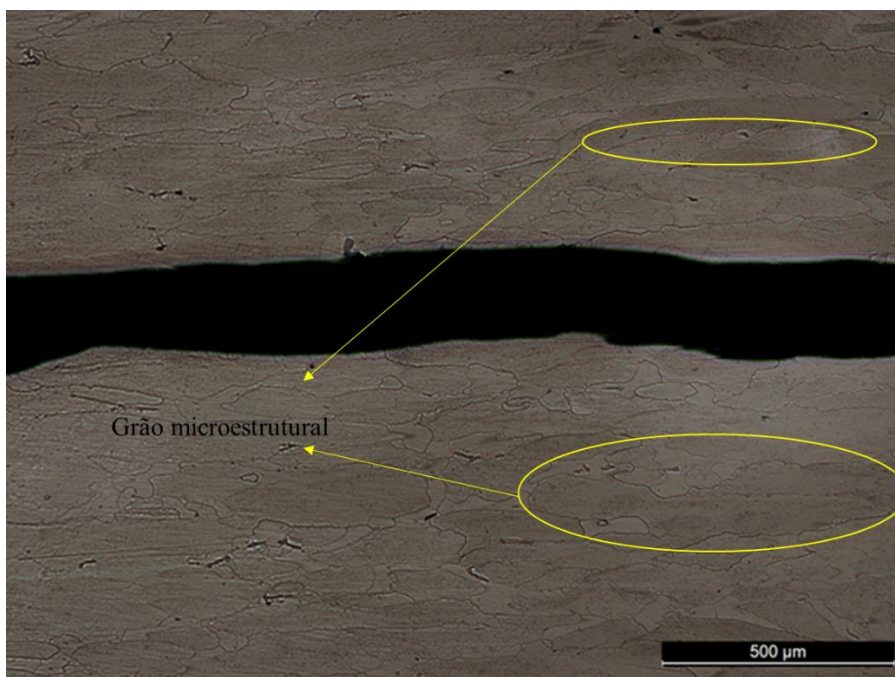
Apêndice A.1 - Perfil de propagação da série 2050L



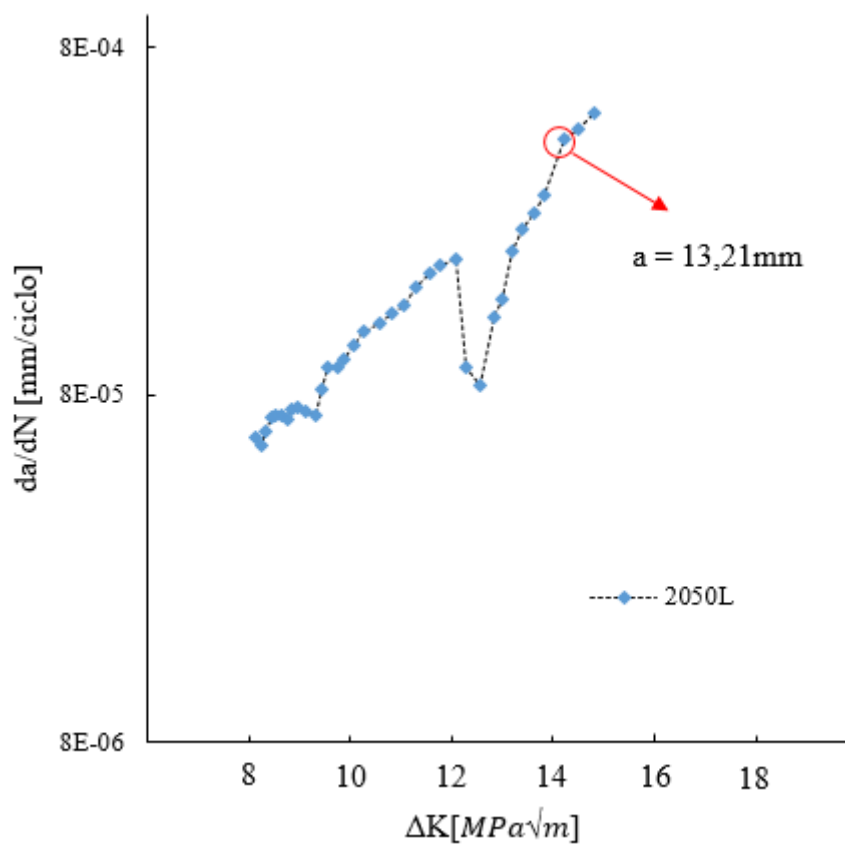
Apêndice A.2 - Perfil de propagação da série 7050L



**Apêndice A.3** - Perfil de propagação da série 2050T



**Apêndice A.4** - Perfil de propagação da série 7050T



Apêndice A.5 - Curva  $da/dN$ - $\Delta K$  para sobrecarga na série 2050L