



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Efeito do *Micro Shot Peening* na propagação de fenda por fadiga na liga aeronáutica AL 7475-T7351

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

Autor

Gonçalo Beirão de Mira

Orientadores

Professor Doutor José António Martins Ferreira

Doutor Pedro Alexandre de Almeida do Vale Antunes

Júri

Presidente Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa
Professor da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Luís Filipe Pires Borrego
Professor do Instituto Politécnico de Coimbra

Orientador Doutor Pedro Alexandre de Almeida do Vale Antunes
Professor da Universidade de Coimbra

Coimbra, Fevereiro, 2015

“Não me interessa vir a ser o homem mais rico no cemitério. Ir à noite para a cama dizendo a mim próprio que fiz algo de maravilhoso, é isso que me interessa.”

Steve Jobs

Agradecimentos

Ao meu orientador, Doutor Pedro Alexandre de Almeida do Vale Antunes, pela disponibilidade, apoio e ajuda nos mais variados momentos ao longo da realização desta dissertação.

Ao meu orientador, Professor Doutor José António Martins Ferreira, pela orientação na realização dos ensaios de fadiga e auxílio na compreensão dos resultados obtidos.

Ao engenheiro Joel Alexandre da Silva de Jesus pelo apoio na execução e orientação concedidas nos diversos ensaios laboratoriais.

Ao Professor Doutor José Domingos da Costa pela disponibilidade e ajuda em várias questões durante o período da dissertação.

Ao Professor Doutor Luís Filipe Pires Borrego pelo fornecimento da folha de cálculo relativa à obtenção das curvas de projecto.

Aos meus pais e avós por sempre me apoiarem incondicionalmente.

Á minha namorada, Diana Lopes, por todo o carinho, bem como por toda a ajuda concedida na elaboração da presente dissertação.

Aos meus colegas de curso, em especial a José Marques e Alexandre Pires, pelo companheirismo vivido durante todo o meu percurso académico.

Resumo

Esta dissertação tem como objectivo mostrar a influência do tratamento superficial de *Micro Shot Peening* (*MSP*) na propagação de fenda por fadiga, na liga aeronáutica AL 7475-T7351. A análise é feita tendo em conta a influência da espessura dos provetes, a razão de carga utilizada nos ensaios de fadiga e o efeito retardante do bloco de sobrecarga na forma da fenda. De modo a compreender melhor o efeito do tratamento superficial de *Micro Shot Peening* na propagação de fenda, foram efectuadas medições de rugosidade de superfície, microdureza e microestrutura, tanto em provetes polidos, como em provetes tratados superficialmente pela técnica de *MSP*.

Os resultados obtidos mostraram um pequeno aumento nos valores de microdureza, consequência das deformações plásticas impostas pelo tratamento. Todavia, devido à incorrecta optimização dos parâmetros de *Micro Shot Peening*, não sendo esta a mais adequada, tal fez-se sentir nos defeitos superficiais existentes nos provetes, o que, consequentemente, conduziu a uma redução de resistência à propagação de fenda.

Palavras-chave: *Micro Shot Peening*, Fadiga, Propagação de fenda, AL 7475-T7351, Microdureza, Microestrutura.

Abstract

The main objective of the work presented is to show the influence of the superficial treatment of Micro Shot Peening on the crack growth by fatigue in an aerospace aluminum alloy AL 7475-T7351. The analysis is done taking into account the specimen thickness, the charge ratio used in fatigue tests and the retardant effect of the overlaid block in the shape of the crack. In order to understand better the performance of the crack growth, roughness, microhardness and microstructure tests were done, both in the polished and in the surface treated specimen.

Results shown a small increase in the microhardness values, outcome of the plastic deformations imposed by the treatment. However, because of the bad optimization of the Micro Shot Peening parameters. Surface defects appeared, which consequently, led to a reduction of the crack growth resistance.

Keywords: Micro Shot Peening, Fatigue, Crack Growth, Al 7475-T7351, Micro-hardness, Microstructure.

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	viii
Simbologia e Siglas	ix
Simbologia.....	ix
Siglas	x
1. Introdução.....	1
Estrutura da dissertação	2
2. Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Alumínio	3
2.1.1. Ligas de alumínio	4
2.2. Fadiga.....	6
2.2.1. Mecanismo da fadiga.....	6
2.2.2. Ensaios de fadiga	7
2.2.3. Propagação de Fenda	8
2.2.4. Sobrecargas.....	10
2.3. <i>Shot Peening</i>	11
2.3.1. Parâmetros de <i>Shot Peening</i>	12
2.3.2. Processos modificados do <i>Shot Peening</i>	15
3. Materiais e procedimentos.....	19
3.1. Material.....	19
Liga de alumínio 7475-T7351	19
3.2. Provette C(T)	20
3.3. Testes complementares	22
3.3.1. Rugosidade	22
3.3.2. Microdureza.....	24
3.3.3. Microestrutura	25
3.4. Fadiga.....	26
4. Análise de Resultados.....	31
4.1. Rugosidade.....	31
4.2. Microdureza	33
4.3. Análise microestrutural.....	33
4.4. Fadiga.....	36
4.4.1. Influência da Espessura	36
4.4.2. Influência do Micro Shot Peening.....	38
4.4.3. Sobrecargas.....	41
4.5. Análise das superfícies de propagação	46
5. Conclusões e trabalhos futuros	49
Referências Bibliográficas.....	51

Anexo A.....	53
Comparação de curvas $a;N$	53
• Um bloco de carga	53
• Dois blocos de carga	54
Anexo B.....	56
Medição de sobrecargas.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Combinações de elementos na produção de alumínio [5].....	4
Figura 2.2. Combinações de elementos na produção de alumínio.	6
Figura 2.3. Exemplo de curva $a;N$	8
Figura 2.4. Exemplo de curva $da/dN ; \Delta K$	9
Figura 2.5. Efeito de uma sobrecarga numa liga de alumínio 2024-T3 [11].....	11
Figura 2.6. Mecanismo do tratamento de <i>Shot Peening</i>	12
Figura 2.7. Diferenças no número de ciclos até à ruína em função da intensidade do <i>Shot Peening</i> . [16]	14
Figura 2.8. Valor de tensões induzidas na superfície com diferentes parâmetros de <i>Shot Peening</i> [17].	15
Figura 2.9. Esquema de funcionamento de <i>Cavitation Shotless Peening</i> [19].....	17
Figura 2.10. Diferenças entre <i>Shot Peening</i> e <i>Cavitation Shotless Peening</i> [19].....	17
Figura 2.11. Diferenças na superfície com <i>Shot Peening</i> e <i>Ultrasonic Shot Peening</i>	18
Figura 2.12. Diferenças no tamanho de esfera e superfície bombardeada entre <i>Shot Peening</i> e <i>Micro Shot Peening</i>	18
Figura 3.1. Geometria do provete utilizado, definido na norma da ASTM E647[8].....	21
Figura 3.2. Marcas de maquinação dos provetes.	21
Figura 3.3. Rugosímetro utilizado nos ensaios.....	22
Figura 3.4. Medição de rugosidade de um provete C(T).....	23
Figura 3.5. Curva de obtenção de rugosidade média [1]	23
Figura 3.6. Curva de obtenção de rugosidade máxima [1].....	23
Figura 3.7. Durómetro utilizado nos ensaios.	24
Figura 3.8. Microcópico utilizado nos ensaios.....	26
Figura 3.9. Obtenção de imagem por captação de video.....	27
Figura 3.10. Máquina de fadiga uniaxial utilizada nos ensaios.....	27
Figura 3.11. Curva a/C de provetes com 8 e 4 mm	28
Figura 4.1. Valores de rugosidade obtidos num provete polido.	31
Figura 4.2. Valores de rugosidade obtidos num provete tratado superficialmente.	31
Figura 4.3. Perfil de microdurezas nos provetes a uma distância de 0,3mm da superfície. 33	
Figura 4.4. Microestrutura de provete polido.	34

Figura 4.5. Microestrutura e defeitos de mau acabamento superficial devido ao tratamento de Micro Shot Peening.	35
Figura 4.6. Microestrutura e defeitos de arrancamento devido ao Micro Shot Peening.	35
Figura 4.7. Influência da espessura em provetes sem MSP e $R=0,05$	36
Figura 4.8. Influência da espessura em provetes com MSP e $R=0,05$	37
Figura 4.9. Influência da espessura em provetes sem <i>MSP</i> e $R=0,4$	37
Figura 4.10. Influência da espessura em provetes com MSP e $R=0,4$	38
Figura 4.11. Influência do Micro Shot Peening em provetes com 8mm e $R=0,05$	39
Figura 4.12. Influência do Micro Shot Peening em provetes com 4mm e $R=0,05$	39
Figura 4.13. Influência do <i>Micro Shot Peening</i> em provetes com 8mm e $R=0,4$	40
Figura 4.14. Influência do <i>Micro Shot Peening</i> em provetes com 4mm e $R=0,4$	40
Figura 4.15. Vista ampliada em 65 vezes de modo a observar as sobrecargas na superfície.	41
Figura 4.16. Influência das sobrecargas em provetes de 8 mm, com $R=0,05$ e com MSP.	42
Figura 4.17. Influência das sobrecargas em provetes de 8 mm, com $R=0,05$ e sem MSP.	42
Figura 4.18. Influência das sobrecargas, em provetes de 8 mm, com $R=0,4$ e sem MSP.	43
Figura 4.19. Influência das sobrecargas em provetes de 8 mm, com $R=0,4$ e com MSP.	43
Figura 4.20. Influência das sobrecargas em provetes de 4 mm, com $R=0,05$ e sem MSP.	44
Figura 4.21. Influência das sobrecargas em provetes de 4 mm, com $R=0,05$ e com MSP.	44
Figura 4.22. Influência das sobrecargas em provetes de 4 mm, com $R=0,4$ e com <i>MSP</i>	45
Figura 4.23. Influência das sobrecargas em provetes de 4 mm, com $R=0,4$ e sem <i>MSP</i>	45
Figura 4.24. Deformação plástica na iniciação da fenda no provete 8_4_0,4.	46
Figura 4.25. Deformação plástica proveniente da propagação de fenda no provete 15000_8_11_0,4_SP.	47
Figura 4.26. <i>Micro Shot Peening</i> observável no provete 4_5_0,05_SP.	47
Figura 4.27. Rotura frágil no provete 8_4_0,4 ($\log \Delta K=2,40$ MPam).	48
Figura 4.28. Clivagem em zonas de valor de K elevado no provete 8_4_0,4 ($\log \Delta K=2,93$ MPam).	48
Figura A.0.1. Comparação de curvas $a_1;N$ em provetes com 8mm e ensaiados com 2 blocos de carga na segunda situação.	55
Figura B.1. Incógnitas a_1 e a_2 para obtenção das curvas $x_1; a_1$	56
Figura B.2. Irregularidade das curvas $x_1; a_1$ obtidas a partir dos provetes 15000_8_10_0,4 e 15000_8_11_0,4_SP.	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Diferentes séries de alumínio existentes no mercado.	4
Tabela 2.2. Diferentes tipos de ensaios de fadiga.....	7
Tabela 3.1. Algumas propriedades mecânicas da liga de alumínio 7475 T7351.	19
Tabela 3.2. Composição química da liga de alumínio 7475 T7351.	19
Tabela 3.3. Ordem de polimento dos provetes.	21
Tabela 3.4. Composição química do regaente de Keller utilizado.	25
Tabela 3.5. Ensaios de fadiga realizados	29
Tabela 4.1. Valores obtidos de rugosidade média e máxima nos provetes polidos.	32
Tabela 4.2. Valores obtidos de rugosidade média e máxima nos provetes tratados com <i>Micro Shot Peening</i>	32
Tabela 4.3. Número de ciclos de cada provete até à rotura.	41

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

a – Comprimento de fenda

A – Intensidade de *Shot Peening* de acordo com a faixa de Almen do tipo A

B – Espessura do provete

C – Intensidade de *Shot Peening* de acordo com a faixa de Almen do tipo C

C – *Compliance*

E – Módulo de elasticidade

H – Dureza Rockwell do tipo H

HV – Ensaio de dureza do tipo *Vickers*

K_{1C} – Tenacidade à fractura

kgf – Kilograma Força

K_{max} – Tensão máxima aplicada num ciclo de carga

K_{min} – Tensão mínima aplicada num ciclo de carga

kN – *Kilo Newton*

L – Dureza *Rockwell* do tipo L

l_m – Período de medição de rugosidade

M – Dureza *Rockwell* do tipo M

m – Metro

mm – Milímetro

mN – Milínewton

MPa – Mega Pascal

N – *Newton*

N – Número de ciclos

p_i – Pico mais elevado nos ensaios e rugosidade

R – Razão de carga

R_a – Rugosidade média

R_z – Rugosidade máxima

S – Tensão aplicada

S – Dureza *Rockwell* do tipo S

s – Segundo

$u_{máx}$ – Deslocamento do eixo máximo

$u_{mín}$ – Deslocamento do eixo mínimo

v_i – Pico mais profundo nos ensaios de rugosidade

W – Dimensão característica dos provetes

α – Valor adimensional para cálculo de ΔK

λ_c – *Cut Off*

μm – Micrómetro

ρ – Densidade

σ_e – Tensão de cedência

σ_R – Tensão máxima de fractura

Siglas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

MSP – *Micro Shot Peening*

1. INTRODUÇÃO

Actualmente, a indústria aeronáutica é uma indústria em grande desenvolvimento. Como tal, é necessária a evolução das técnicas de fabrico de materiais e de manutenção a usar na indústria e, em especial na indústria aeronáutica.

Face às referidas necessidades, a presente dissertação consiste na avaliação do comportamento de ligas de alumínio para aplicações aeronáuticas.

Ao longo do tempo foram desenvolvidas várias ligas de alumínio, com propriedades mecânicas aptas a suportar as altas solicitações de que esta indústria carece. Tendo em conta essas mesmas solicitações, foi desenvolvida a liga de alumínio 7475-T7351, a qual combina uma elevada tensão de rotura com uma boa tenacidade à fractura e resistência à corrosão [1]. Não obstante estas características, a sua resistência à fadiga ainda é relativamente baixa, tendo em conta as cargas a que podem estar sujeitas.

A propagação de fenda é um fenómeno que ocorre normalmente à superfície, sendo que qualquer alteração nesta a pode influenciar. Face ao exposto, existem tratamentos superficiais, como por exemplo o *Shot Peening*, o qual induz tensões residuais de compressão na superfície, tornando possível o aumento da vida útil do material. Esta dissertação tem como objectivo analisar o efeito do *Micro Shot Peening* na propagação de fenda por fadiga, na liga de alumínio 7475-T7351, tendo em conta a espessura, a razão de carga e o efeito retardante do bloco de sobrecarga na forma da fenda. Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos foi também analisada a microdureza, a microestrutura e a rugosidade dos provetes.

Os principais passos seguidos na dissertação foram:

- Preparação dos provetes;
- Análise da dureza dos provetes;
- Análise da microestrutura dos provetes e do tratamento superficial de *Micro Shot Peening*;
- Análise da rugosidade das amostras;
- Obtenção das curvas de projecto dos ensaios de fadiga.

Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos principais.

No presente capítulo é apresentada uma pequena introdução sobre o tema a tratar, bem como os motivos que levaram à escolha do mesmo. Explicar-se-á ainda o procedimento de realização dos principais pontos, anteriormente mencionados.

No capítulo dois será apresentada a revisão bibliográfica, de modo a clarificar os principais conceitos utilizados ao longo de toda a exposição, relacionados com fadiga e seus parâmetros, bem como técnicas de melhoramento da mesma, evidenciando alguns estudos realizados por múltiplos autores.

No terceiro capítulo são indicados os materiais e os procedimentos utilizados nos diversos ensaios.

No capítulo quatro expor-se-ão e analisar-se-ão os resultados obtidos nos ensaios referidos no capítulo anterior.

Por último, no quinto capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas no termo de todo este procedimento, bem como serão apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Alumínio

A descoberta do elemento químico do alumínio data de 6000 a.C, quando a povoação persa começou a fabricar potes e recipientes de argila, os quais continham óxido de alumínio [2]. Embora já descoberto, o alumínio só começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos.

Hoje em dia, sem sequer nos apercebermos, o alumínio é utilizado nos mais diversos tipos de aplicações, tais como a decoração, linhas de transmissão eléctricas ou na embalagem de alimentos [3]. Registou-se um aumento no uso deste metal em relação a outros, devido à grande variedade de vantagens que apresenta, tais como [4]:

- Metal muito leve, com cerca de um terço do peso específico dos aços ($2,7 \text{ kg/m}^3$);
- Grande resistência à corrosão;
- Boa condutividade;
- Boas qualidades reflectivas, o que juntamente com o seu baixo peso, faz do alumínio, por exemplo, um excelente material para reflectores de luzes;
- É um material dúctil e com um baixo ponto de fusão, o que faz com que seja de fácil processamento e transformação;
- Impermeável, não tóxico;
- Não liberta gases para a atmosfera quando passa o ponto de fusão;
- O alumínio é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, apenas ultrapassado pelo oxigénio e pelo silício;
- Fácil reciclagem.

2.1.1. Ligas de alumínio

Para que se consiga uma baixa densidade e uma alta resistência mecânica desenvolvem-se várias ligas, através da alteração da sua densidade, o que deste modo proporcionará a obtenção de melhores propriedades mecânicas. As ligas de alumínio variam de acordo com as combinações de elementos diferentes, tais como [5]:

- Cobre (Cu);
- Magnésio (Mg);
- Silício (Si);
- Manganês (Mn);
- Zinco.

Ao realizar as variações dos elementos presentes na liga, juntamente com o tratamento térmico próprio para a aplicação pretendida, obtêm-se as propriedades específicas para a solicitação desejada.

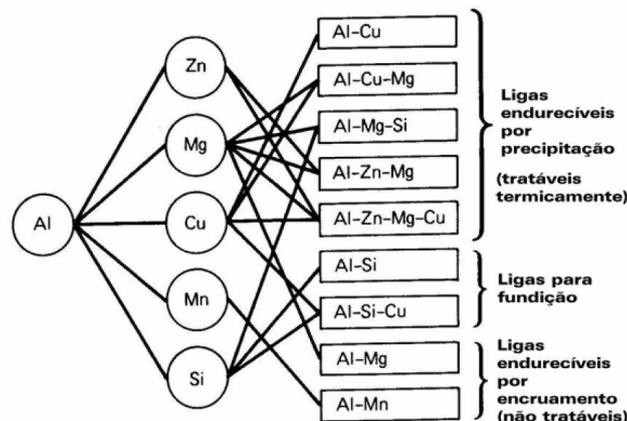


Figura 2.1. Combinações de elementos na produção de alumínio [5].

Na tabela 2.1, podem-se ver as diferentes séries de alumínio que existem no mercado.

Tabela 2.1. Diferentes séries de alumínio existentes no mercado.

Nomenclatura	Descrição
Série 1xxx	Alumínio puro não ligado, com o mínimo de 99% de alumínio. Grande resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e

	eléctrica, baixa resistência mecânica e elevada ductilidade.
Série 2xxx	Principal elemento ligante: Cobre (Cu). Elevada resistência mecânica, se tratadas por solubilização e envelhecimento [1]. Muito utilizado na indústria aeronáutica.
Série 3xxx	Principal elemento ligante: Manganês (Mn). Não são tratadas termicamente, mas têm uma resistência mecânica de cerca de 20% maior que as de série 1xxx.
Série 4xxx	Principal elemento ligante: Silício (Si). Baixa temperatura de fusão.
Série 5xxx	Principal elemento ligante: Magnésio (Mg). Apresenta grande resistência mecânica, assim como boa resistência à corrosão.
Série 6xxx	Principais elementos ligantes: Magnésio (Mg) e Silício (Si). Boa ductilidade e boa resistência à corrosão.
Série 7xxx	Principal elemento ligante: Zinco (Zi). Adiciona-se entre 1 a 8% de quantidade de Zinco. Bastante utilizado na indústria aeronáutica em componentes que requerem uma alta resistência, resistência à corrosão e à tenacidade à fractura.
Série 8xxx	Principal elemento ligante: Lítio (Li). Grande resistência mecânica.
Série 9xxx	Esta série não é usada atualmente.

2.2. Fadiga

É ponto assente que todos os materiais enfraquecem. Os materiais estão sujeitos a várias solicitações ao longo da sua vida, o que provocam a deterioração dos mesmos. Essas solicitações podem ser tanto estáticas, como dinâmicas (variam com o tempo). As solicitações dinâmicas, quando aplicadas numa peça mecânica, podem provocar fadiga, a qual é responsável por grande parte dos danos em peças ou estruturas sujeitas a esforços mecânicos.

A fadiga é um fenómeno de falha de componentes mecânicos sujeitos à repetida aplicação de cargas sobre os mesmos. Nem sempre se conheceu a existência deste fenómeno de ruína. Foi nos finais do século XIX, mais propriamente na década de 60, que o engenheiro Wöhler fez os primeiros estudos sobre o assunto. Esses estudos foram realizados nos eixos das locomotivas onde se começaram a detectar ruínas demasiado frequentes na indústria ferroviária alemã [6]. Wöhler introduziu então as curvas S-N, onde demonstra a amplitude de tensão aplicada (S) num determinado ciclo de vida (N) do material. Ainda hoje estas curvas são utilizadas para a caracterização de um material quanto à sua resistência à fractura por fadiga (Figura 2.2).

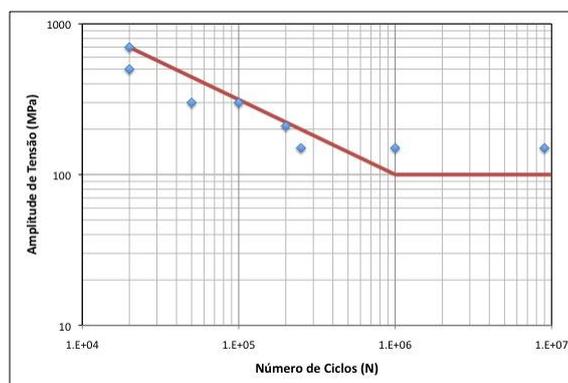


Figura 2.2. Combinações de elementos na produção de alumínio.

2.2.1. Mecanismo da fadiga

O processo de ruína por fadiga é provocado pela nucleação e propagação de fissuras que aparecem num componente sujeita a solicitações dinâmicas repetidas [6]. Esse processo pode ser dividido em quatro fases fundamentais:

1. Nucleação da(s) fenda(s);

2. Crescimento microscópio da(s) fenda(s);
3. Propagação da(s) fenda(s);
4. Rotura final.

A fenda surge em zonas com defeitos, mau acabamento superficial, variações significativas de secção, entre outros, o que proporciona as tensões necessárias para o início da mesma. Caso não tenha esses defeitos, a fenda irá surgir na zona onde as tensões criadas sejam máximas. Na sua fase de crescimento, ocorre um aumento do tamanho da fenda e, conseqüentemente, uma redução da resistência mecânica da peça, à medida que as tensões são aplicadas no material.

2.2.2. Ensaios de fadiga

Para se avaliar os materiais ou componentes em termos de resistência à fadiga efectuam-se diversos ensaios de fadiga. Esses podem ser feitos no próprio componente ou em provetes próprios para comparação de resultados. É muito comum a realização destes ensaios em provetes, pois raramente estes têm a geometria idêntica ou semelhante ao componente [7].

Assim como Christof afirmou na sua dissertação [7], a realização de ensaios de fadiga serve quase exclusivamente para a selecção de materiais, tratamentos térmicos, mecânicos ou químicos, condições de processamento, sensibilidade a entalhes, efeitos da temperatura e corrosão, optimização de formas geométricas e estabelecimento de tensões admissíveis.

Os ensaios de fadiga dependem do tipo de solicitação que se quer aplicar no provete, podendo ser uniaxiais ou biaxiais. Na tabela 2.2 pode-se observar os vários tipos de ensaios de fadiga existentes [7].

Tabela 2.2. Diferentes tipos de ensaios de fadiga.

Tipos de Ensaio de Fadiga				
Solicitações uniaxiais	Flexão rotativa	Flexão plana	Torção alternada	Tracção-compressão alternada, pulsante ou repetida

Solicitações biaxiais	Flexão alternada e tracção alternada	Tracção ou compressão biaxiais	Torção alternada com tracção estática
------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------	---------------------------------------

2.2.3. Propagação de Fenda

2.2.3.1. Curva $a;N$

Uma curva de propagação de fenda descreve o aumento desta, em função do número de ciclos de aplicação da carga. A curva pode ser obtida em laboratório, através da utilização de provetes com entalhe previamente aberto, sendo que assim a fenda se propaga mais facilmente [6].

Na figura seguinte está representada uma curva típica de propagação de fenda com amplitude de carga constante, onde a é o comprimento de fenda em mm e N o número de ciclos associados.

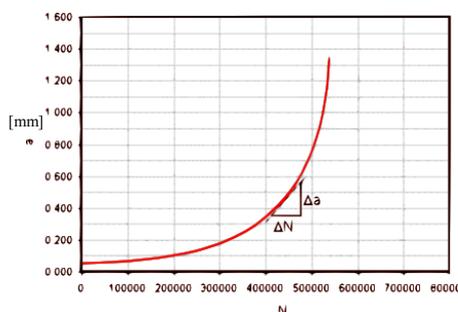


Figura 2.3. Exemplo de curva $a;N$.

2.2.3.2. Curva $da/dN; \Delta K$

O estudo da propagação de fenda é feito analisando a curva $da/dN; \Delta K$. Esta curva relaciona a velocidade de propagação da fenda da/dN com a gama de factor de intensidade de tensões aplicado no ciclo de carga ΔK [6]. O valor de ΔK é dado pela seguinte equação:

$$\Delta K = K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n} \quad (2-1)$$

onde $K_{m\acute{a}x}$ e $K_{m\acute{i}n}$ são os valores máximos e mínimos do factor de intensidade de tensões, K , respectivamente, em cada um dos ciclos de carga.

Experimentalmente, o valor de ΔK para cada ciclo de carga é calculado através do método referido na norma *ASTM E647-00* [8]. O cálculo será demonstrado no terceiro capítulo.

Na figura 2.4, está representado uma curva típica da/dN ; ΔK onde se podem verificar os três regimes de propagação de fenda.

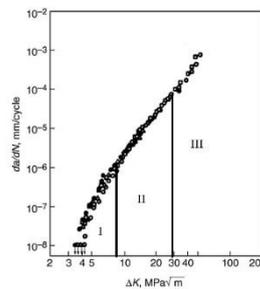


Figura 2.4. Exemplo de curva da/dN ; ΔK .

Totten [9] explica cada um dos três regimes como:

- Regime I

Após a nucleação da fenda, esta propaga-se através de planos de tensão tangencial elevada, de acordo com a superfície do material utilizado. É possível desacelerar a velocidade de propagação devido às barreiras da microestrutura do material. Essas barreiras podem ser fronteiras de grãos, inclusões, ou, no geral, zonas perlíticas à superfície.

- Regime II

O regime II inicia-se quando o valor de K aumenta de tal modo que os planos de propagação da fenda situam-se perpendicularmente à carga aplicada. Tal deve-se ao aumento do tamanho da fenda ou ao aumento das cargas aplicadas. Neste regime, em alguns tipos de materiais, tais como metais puros ou alumínio, surgem estrias, apenas visíveis por microscopia electrónica na superfície do material.

- Regime III

Este regime está relacionado com o aumento instável da fenda quando o valor da tensão máxima aplicada se aproxima do valor da tenacidade à fractura (K_{Ic}).

2.2.3.3. Parâmetros que influenciam a velocidade de propagação da fenda

Existem muitas variáveis externas que podem influenciar a forma da curva da/dN em função de ΔK . Tal como anteriormente os autores afirmaram em [6], seria praticamente impossível referir todos esses parâmetros, como tal, são indicados os mais significativos:

- Estado de superfície;
- Material e tratamento térmico;
- Meio-ambiente;
- Tensão média;
- Frequência;
- Espessura;
- História de carga.

2.2.4. Sobrecargas

Inicialmente, a fenda de fadiga encontra-se sujeita a uma amplitude de carga constante. Se, por sua vez, for submetida a diferentes amplitudes de carga, tal pode levar ao aumento ou diminuição da sua velocidade de propagação [10]. As sobrecargas em componentes mecânicos surgem com bastante regularidade. A título de exemplo, sempre que um equipamento de geração de energia se inicia, origina-se uma sobrecarga no rotor e rolamentos [10].

Um ciclo de sobrecarga/subcarga que se inicie com um pico mínimo de carga, seguido de um pico máximo, figura 2.5, causará um retardamento da propagação de fenda. Tal deve-se ao facto de o pico positivo de carga provocar uma longa zona plástica na ponta da fenda, o que ocorre devido a tensões residuais de compressão, as quais permaneceram no limite da fenda, no momento em que surge a sobrecarga [11].

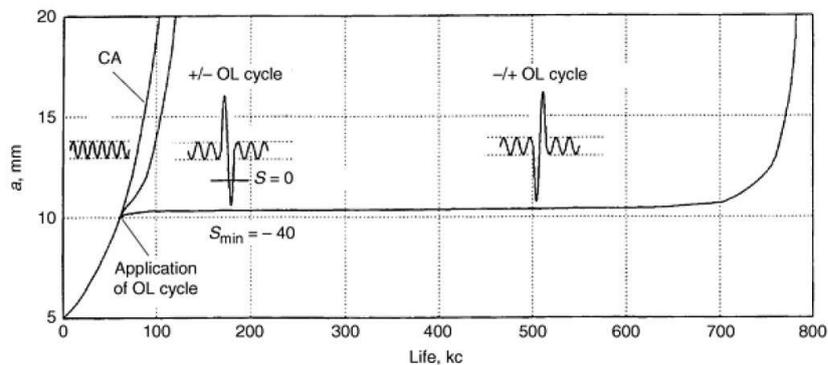


Figura 2.5. Efeito de uma sobrecarga numa liga de alumínio 2024-T3 [11]

Fleck [10] investigou o comportamento da propagação de fenda causado por sobrecargas periódicas em três materiais diferentes. Entre estes encontra-se a liga de alumínio 2024-T4. O autor concluiu que sobrecargas periódicas, constituídas por três pequenos ciclos seguidos por uma sobrecarga, dariam origem a um crescimento de fenda 20% mais rápido do que sem a aplicação das mesmas.

2.3. Shot Peening

Shot peening é um processo de tratamento superficial a frio, o qual induz tensões de compressão residuais na superfície do material, modificando as propriedades mecânicas do mesmo e aumentando assim a resistência à fadiga.

Esta técnica utiliza o bombardeamento de esferas metálicas, de vidro ou cerâmicas com energia suficiente para deformar plasticamente a superfície do material. Por vezes, se feita com os parâmetros otimizados, é capaz de aumentar a vida dos componentes em 1000% [12]. A referida técnica está demonstrada na figura 2.6 [13].

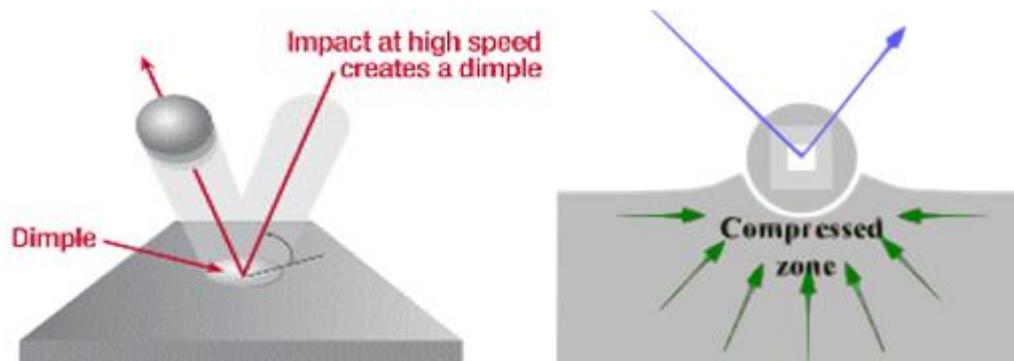


Figura 2.6. Mecanismo do tratamento de *Shot Peening*.

Tensões residuais são tensões que permanecem no material depois da origem da tensão ter sido removida. As tensões de compressão residuais, criadas pela técnica de *Shot Peening*, permanecem no material quando as esferas abandonam a zona de impacto, deformando o material. Os átomos à superfície tentam restaurar a forma inicial, criando, assim, as tensões de compressão. A deformação plástica provoca um encruamento do material, aumentando a resistência da formação e propagação da fenda à fadiga [14], desde que essas tensões estejam perfeitamente estáveis. Os autores em [14] afirmaram que Almen estimou que a estabilidade não poderia ser atingida se as tensões induzidas fossem demasiado elevadas, ou seja, para valores superiores a 55% das tensões do *shot peening*, o que não seria benéfico para a técnica em questão.

Assim, Dalaei *et al.*[14] estudaram a influência das tensões induzidas na superfície, por *Shot Peening*, tendo estes autores concluído que apenas existirá uma melhoria da resistência à fadiga se a estabilidade das tensões estiver assegurada, tal como Almen [14] afirmava.

2.3.1. Parâmetros de *Shot Peening*

2.3.1.1. Tipo de Bombardeamento

O bombardeamento de esferas utilizadas no *Shot Peening* pode ser feito através de esferas de vidro ou cerâmicas, de metal ou cortadas a partir de arame.

As esferas de vidro ou de cerâmica são utilizadas em aplicações leves, onde o processo de *Shot Peening* apenas dá um pequeno reforço ao material a ser bombardeado. As primeiras, pela sua menor resistência ao impacto, podem partir-se ou enfraquecer ao

contactar com a superfície. Por sua vez, as esferas de cerâmica podem ser utilizadas ao invés das de vidro devido à sua dureza e, conseqüentemente, à sua maior probabilidade de reutilização [12].

As esferas de metal são as de mais comum utilização no processo de *Shot Peening*. Tal deve-se ao facto de ao utilizar este tipo de esferas, após o bombardeamento, o material da sua superfície retornar apenas entre 15 a 20% à sua forma original, mantendo-se o restante na deformação plástica induzida pelo *Shot Peening*. Estas esferas podem ter vários tamanhos ou durezas [12], dependendo das especificações do metal. Estes valores são dados em milésimas de polegada e em quatro durezas *Rockwell* distintas: S (40-51 kgf), M (47-56 kgf), L (54-61 kgf) e H (>60 kgf) [4]. Se, a título de exemplo, a superfície for bombardeada por esferas de metal do tipo S-250, isto significa que as esferas são de dureza *Rockwell* entre 40 e 51 kgf e causaram uma abertura no material de 0,635mm (0,0250’’).

Finalmente, as esferas cortadas a partir de arame são utilizadas em alternativa às esferas de metais quando seja necessária uma duração maior das mesmas, uma redução no pó gerado na fabricação das esferas e um maior padrão em termos de tamanhos [12].

2.3.1.2. Intensidade

A intensidade do *Shot Peening* é a quantidade de energia depositada numa superfície padrão de teste, também conhecida como faixa de Almen [12]. Quando a faixa é bombardeada pelo processo origina-se um arco na sua superfície. Para determinar a intensidade realiza-se uma curva da altura do arco em função do tempo de bombardeamento. O ponto onde o dobro do tempo medido dá um aumento de 10% de altura do arco é onde se define a intensidade do *Shot Peening* [12]. De acordo com a *Comco Inc.* [12], este valor é definido pela altura do arco em milésimas de polegadas, seguida do tipo de faixa de Almen utilizado. Se por exemplo a altura do arco for de 0,102mm (0,004’’) numa faixa de tipo A, a intensidade é definida por 4A.

Existem três tipos principais de faixas de Almen, cada uma direcionada a certo tipo de aplicação. A faixa de Almen do tipo A é utilizada na maioria das aplicações, a do tipo N para aplicações com um baixo nível de intensidade e a do tipo C para utilizações com um grau de intensidade elevado. Em todas as faixas, tanto o comprimento como a

largura são idênticos, observando-se na espessura a única diferença, através da seguinte variação de valores [15]:

- Faixa do tipo A: 1,2954 mm;
- Faixa do tipo N: 0,787 mm;
- Faixa do tipo C: 2,3876 mm;

Vielma, *et al.* [16] estudaram a influência da intensidade do *shot peening* na vida à fadiga de um metal temperado, desde uma intensidade baixa de 8A até uma alta intensidade de 21A, com 100% de cobertura. Nos ensaios realizados para as várias intensidades, induziram para cada uma delas tensões residuais na superfície do material de cerca de 45 e 50% da tensão de cedência do metal. Os autores comprovaram que no metal em questão a intensidade que iria dar uma maior otimização do *Shot Peening* seria de 10, constatando que acima dessa intensidade o número dos ciclos até à falha por fadiga diminuía, conforme visível na figura 2.7.

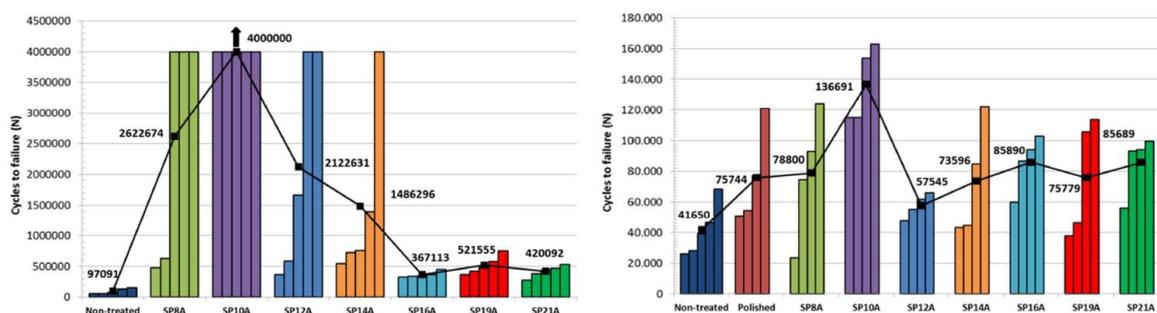


Figura 2.7. Diferenças no número de ciclos até à ruína em função da intensidade do *Shot Peening*. [16]

2.3.1.3. Cobertura

A cobertura é a quantidade de superfície do material que foi bombardeada pelas esferas. Com base na experiência considera-se uma cobertura de 100% do material quando pelo menos 98% deste estiver coberto com, no mínimo, um arco proveniente do bombardeamento das esferas.

Este parâmetro é medido visualmente com recurso a microscópio, usando uma objectiva de ampliação de 10 a 30 vezes. A superfície bombardeada é fotografada e, posteriormente, será analisada por um computador através de algoritmos, eliminando assim o erro humano. Não menos importante é a utilização de um fluido especial, o qual é depositado antes do bombardeamento e durante o qual desaparecerá, com excepção das

zonas não cobertas, verificando-se assim restos do fluido se a superfície não tiver uma cobertura tratada de 100%.

Gao [17] comprovou que ao modificar os parâmetros de *Shot Peening*, as tensões residuais induzidas na superfície vão modificando à medida que penetram na superfície. Essas tensões são diferentes para cada parâmetro escolhido, conforme se pode comprovar na figura 2.8.

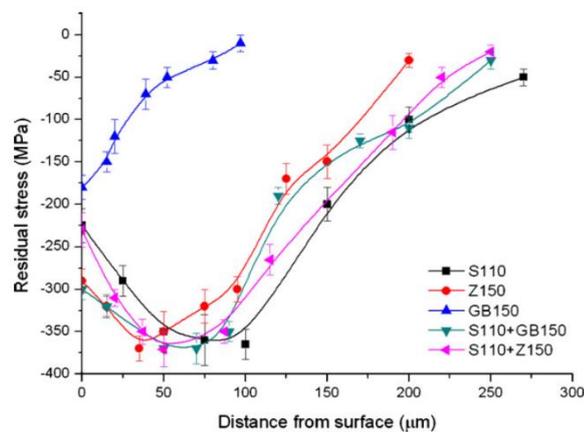


Figura 2.8. Valor de tensões induzidas na superfície com diferentes parâmetros de *Shot Peening* [17].

Usando esferas de vidro, com diâmetro de 0,15 mm e com uma intensidade de apenas 0,10A (GB150), verifica-se que a tensão residual máxima (-200 MPa) se situa à superfície do material. Tal não acontece se, utilizando esferas cerâmicas de 0,15 mm de diâmetro, ou de metal com 0,28 mm, as quais têm um comportamento bastante semelhante, alcançando o valor máximo de tensões residuais (-375 MPa) entre 50 e 100 μm da superfície.

2.3.2. Processos modificados do *Shot Peening*

A técnica de *Shot Peening* pode ser dividida em vários processos distintos e com resultados completamente desiguais entre eles.

- *Water Jet Peening*;
- *Oil Jet Peening*;
- *Cavitation Shotless Peening*;
- *Ultrasonic Peening*;
- *Micro Shot Peening*.

Kumar *et al.* [13] estudaram cada um destes processos e indicaram algumas conclusões, as quais são importantes referir.

2.3.2.1. Water Jet Peening

Ao invés de serem bombardeadas esferas de diferentes materiais, como no *Shot Peening*, são bombardeadas gotas de água a alta velocidade na superfície do material, induzindo as tensões residuais de compressão necessárias para um melhoramento das propriedades mecânicas do material. Quanto maior a pressão a que forem bombardeadas as gotas de água, mais profundo as tensões residuais ocorrem no material [13] e, conseqüentemente, será possível melhorar as tensões residuais em materiais com uma elevada dureza, como por exemplo molas de metal ou titânio.

Fazendo um breve resumo acerca do funcionamento do *Water Jet Peening*, a água em alta pressão é bombardeada para uma abertura própria onde as gotas se irão alinhar ordenadamente na superfície do material e, deste modo, criar as tensões residuais de compressão.

2.3.2.2. Oil Jet Peening

Este processo é bastante idêntico ao usado por *Water Jet Peening*. A única diferença deve-se ao facto de se servir de óleo ao invés de água a alta pressão.

Os autores em [18] estudaram o efeito do *Oil Jet Peening* nas ligas de alumínio AA6063-T6 e AA6061-T4. Nos estudos efectuados, uma camada endurecida com uma profundidade de 350 μm foi criada a partir do tratamento. Em última análise, concluíram que o *Oil Jet Peening* provoca tensões residuais até uma profundidade de 200 μm , o que provocou um aumento de dureza na ordem dos 34-44%.

2.3.2.3. Cavitation Shotless Peening

No método de *Cavitation Shotless Peening* é bombardeado um líquido a alta pressão, todavia, durante a fase de bombardeamento, as gotas a alta pressão sofrem mudança para o estado gasoso pela diminuição da pressão estática, devido ao aumento da velocidade. Na imagem da figura 2.9 é apresentado um esquema do funcionamento deste método onde se verifica a criação de um micro-jacto no momento da mudança para o estado gasoso. Esse micro-jacto, a uma velocidade de 1500 m/s, origina uma deformação plástica na superfície do material. A essa deformação junta-se o ricochete que a gota de

cavitação provoca também na superfície, aumentando a deformação plástica originada anteriormente.

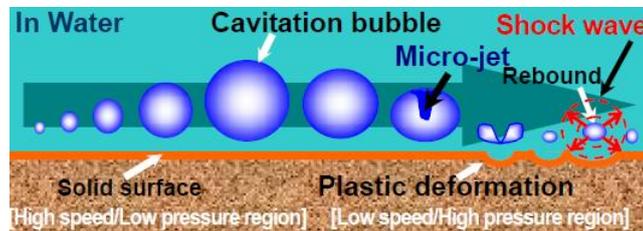


Figura 2.9. Esquema de funcionamento de *Cavitation Shotless Peening* [19].

Soyama, *et al.* em [19], ao investigaram o uso desta técnica numa liga de titânio, *Ti-6Al-4V*, verificaram que existem maiores tensões de compressão a uma distância de 40 μm da superfície e uma superfície muito menos rugosa, contrariamente ao que acontece ao se utilizar a técnica de *Shot Peening*. Esse facto também é comprovado em [19], num aço *SKD61*, mas ao invés de surgirem maiores tensões de compressão a 40 μm , estas surgirão a 50 μm da superfície do material, como se pode comprovar pela figura 2.10.

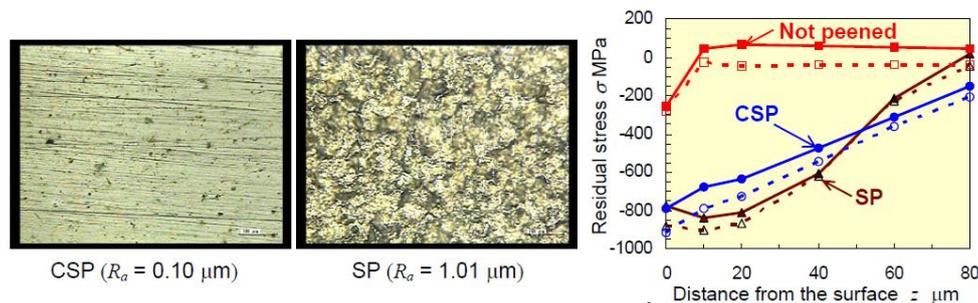


Figura 2.10. Diferenças entre *Shot Peening* e *Cavitation Shotless Peening* [19].

2.3.2.4. Ultrasonic *Shot Peening*

Este processo utiliza a vibração (originada por alta frequência) de uma pequena esfera. Essa vibração faz com sejam induzidas à superfície tensões residuais de compressão, que irão melhorar o comportamento mecânico do material em questão.

Como se pode verificar na figura 2.11, retirada do *site Sonats*, o tratamento por este processo dá origem a uma superfície muito mais regular e menos rugosa do que utilizando a técnica convencional de *Shot Peening*.

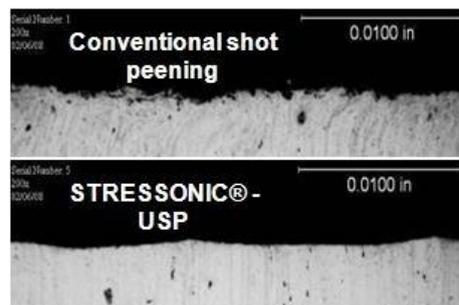


Figura 2.11. Diferenças na superfície com *Shot Peening* e *Ultrasonic Shot Peening*.

Kumar, *et al.* [13] após vários estudos e investigações concluiu que este processo obtém bons resultados em materiais macios, provocando uma redução da probabilidade de iniciação e propagação da fenda na superfície do material.

2.3.2.5. Micro Shot Peening

O *Micro Shot Peening* é a principal variante do *Shot Peening*. Esta técnica consiste na diminuição de tamanho das esferas utilizadas, o qual varia entre os 0,03 e os 0,15 mm. Essa diminuição de tamanho vai conduzir a um maior refinamento dos grãos do material, o que, por sua vez, dará origem a uma maior vida da fadiga.

Kumar, *et al.* [13] analisaram diversos estudos, concluindo que, regra geral, é possível haver um melhoramento nas propriedades mecânicas do material bombardeado por pequenas esferas, em vários materiais. Esse melhoramento pode ser verificado na dureza do material, assim como na resistência à fadiga, como teoricamente previsto.

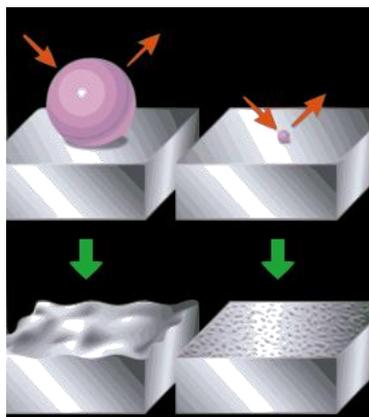


Figura 2.12. Diferenças no tamanho de esfera e superfície bombardeada entre *Shot Peening* e *Micro Shot Peening*.

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

3.1. Material

Liga de alumínio 7475-T7351

O material utilizado na concretização deste estudo foi uma liga de alumínio 7475-T7351, a qual é desenvolvida para aplicações que estarão sujeitas a diversas solicitações, e onde é necessário grande resistência à fractura e à propagação de fendas por fadiga. A liga 7475 foi desenvolvida para aplicações específicas de componentes com indícios de fractura, principalmente na indústria aeronáutica, visto que nesta área a resistência à fractura é uma das maiores questões ainda em desenvolvimento. Como exemplos dessas aplicações temos: os apoios das asas, as placas superficiais das aeronaves e também as anteparas dos aviões.

Nas tabelas seguintes podem-se verificar as suas propriedades físicas e mecânicas, assim como a sua composição química [20]:

Tabela 3.1. Algumas propriedades mecânicas da liga de alumínio 7475-T7351.

ρ [g/cm ³]	2,81
σ_e [MPa]	421
σ_R [MPa]	496
E [GPa]	71,7

Tabela 3.2. Composição química da liga de alumínio 7475-T7351.

Alumínio, Al	Restante
Zinco, Zn	5,2- 6,2%
Magnésio, Mg	1,9-2,6%
Cobre, Cu	1,2-1,9%

Crómio, Cr	0,18-0,25%
Outros, total	$\leq 0,15\%$
Ferro, Fe	$\leq 0,12\%$
Silício, Si	$\leq 0,10\%$
Manganês, Mn	$\leq 0,06\%$
Titânio, Ti	$\leq 0,06\%$
Outros, cada	$\leq 0,05\%$

Segundo Miguel Vicente, na sua dissertação de mestrado [1], este considera a liga 7475 uma versão melhorada da liga 7075, devido à redução de percentagem de ferro e silício e à alteração das condições de têmpera e envelhecimento. As mudanças referidas permitem um maior refinamento de grãos, o que irá provocar uma maior resistência à fadiga.

A liga em questão foi tratada termicamente com o tratamento T7351. Este tratamento consiste no aquecimento e alívio de tensões, através de um alongamento controlado (entre 0,5 e 3% para uma chapa e de 1,5 a 3% para uma placa). Fazendo uma comparação entre os tratamentos T7351 e o T651, conclui-se que para baixas tensões a liga 7475 com o tratamento T651 tem uma maior resistência à propagação de fenda do que teria com o T7351. Já em situações de altas tensões o tratamento T7351 tem maior resistência. Uma vez que esta liga é muito utilizada em situações aeronáuticas, parte-se do princípio que o tratamento T7351 é o melhor para as aplicações necessárias.

3.2. Provette C(T)

O provete utilizado para os ensaios do presente estudo foi o provete *Compact Tension* C(T), referenciado na norma ASTM E647 [8]. É um provete que apenas tem um entalhe, no qual se inicia o crescimento da fenda. Este provete tem vantagem sobre os demais, pois requer muito menos material de teste para avaliar o comportamento de propagação de fenda.

A figura 3.1 apresenta a geometria do provete, onde todas as medidas são referidas em *mm*. No presente estudo, foram considerados dois tipos de provete, apenas com diferenciação na espessura (*B*): o primeiro com 8 mm e o segundo com 4 mm.

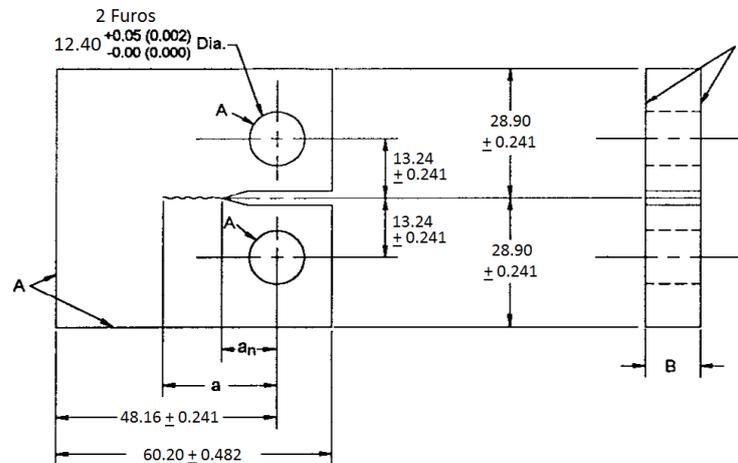


Figura 3.1. Geometria do provete utilizado, definido na norma da ASTM E647[8]

Todos os provetes tinham marcas de maquinação, o que prejudicava a visualização da propagação de fenda. Essas marcas podem ser observadas na figura 3.2.



Figura 3.2. Marcas de maquinação dos provetes.

Para contornar essa situação foi efectuado o polimento dos provetes, o qual foi realizado através lixa de carboneto de silício com várias granulometrias GRIT, conforme indicado na tabela 3.3. Após o polimento foi usada pasta de diamante com 3 e 1 μm para dar uma superfície mais espelhada aos provetes.

Tabela 3.3. Ordem de polimento dos provetes.

Ordem de Polimento	1°	2°	3°	4°	5°
Granulometria GRIT	240	320	600	1000	2500

3.3. Testes complementares

3.3.1. Rugosidade

A rugosidade é um dos factores que mais influencia a propagação de fendas por fadiga. Por esse motivo, é de extrema importância o estudo dos valores da rugosidade na superfície dos provetes polidos, assim como nos provetes tratados com o *Micro Shot Peening*. Para a determinação da rugosidade superficial usaram-se os valores de rugosidade média R_a e os valores de rugosidade máxima R_z do perfil, a fim de serem comparados entre si. A superfície ao longo dos provetes, em geral, difere sempre. Face ao exposto, analisaram-se vários valores de R_a e de R_z e, posteriormente, calculou-se o valor médio de entre os valores obtidos.

Para a realização deste estudo utilizou-se um rugosímetro com aquisição de dados por computador, figura 3.3.



Figura 3.3. Rugosímetro utilizado nos ensaios

Para se seleccionar os parâmetros de medição, foram tidos em conta os valores anteriormente utilizados por Miguel Vicente na sua dissertação [1]. Escolheu-se um valor de *Cut Off*, λ_c , de 2,5 mm para os provetes tratados e de 0,25 mm para os provetes polidos. Estes valores foram retirados da tabela de selecção de *Cut Off* λ_c de 2,5mm [21]. O comprimento da amostra e o passo foram seleccionados automaticamente pelo computador, tendo sido escolhidos de 12,5 e 5mm, respectivamente.



Figura 3.4. Medição de rugosidade de um provete C(T).

Tendo a curva da variação de altura medida pelo rugosímetro em função do comprimento da amostra (figura 3.5), é possível calcular o valor da rugosidade média R_a . Para obter tal resultado, calcula-se a média aritmética dos valores absolutos y_i medidos do perfil de rugosidade durante o período de medição l_m (equação 3-1). Quanto ao parâmetro da rugosidade máxima relativa (figura 3.6), este corresponde à média aritmética da soma dos cinco pontos mais elevados, p_i , com os cinco pontos mais profundos, v_i (equação 3-2)[1].

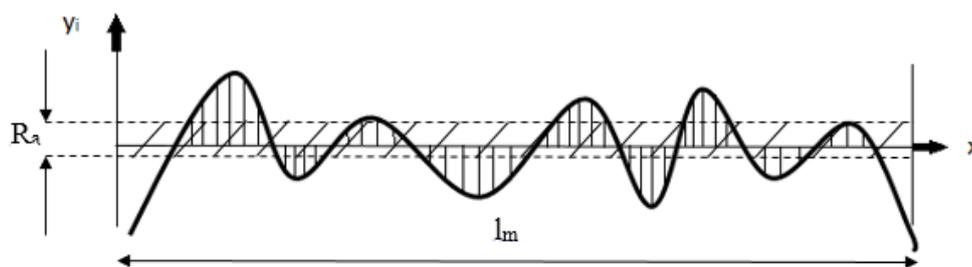


Figura 3.5. Curva de obtenção de rugosidade média [1]

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \quad (3-1)$$



Figura 3.6. Curva de obtenção de rugosidade máxima [1]

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i \right) \quad (3-2)$$

3.3.2. Microdureza

Os ensaios de dureza servem para quantificar a resistência do material ao ser perfurado por outro material, aplicando uma carga durante um certo período de tempo.

Fizeram-se os ensaios de microdureza na direcção transversal aos provetes com e sem o tratamento de *Micro Shot Peening*.

Visto que o material em questão é um alumínio, optou-se por fazer os ensaios de dureza segundo *Vickers*. Neste tipo de ensaios o material é penetrado por uma pirâmide com ponta de diamante e no fim destes, foi possível medir, com precisão, a indentação que a pirâmide deixou no material. Ao relacionar a força exercida pela pirâmide com a área projectada da pirâmide marcada no material obtém-se o valor da dureza. Tal relação pode ser entendido pela equação 3-3.

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2 \times F \times \text{sen} \left(\frac{136^\circ}{2} \right)}{d^2} \approx 1.8544 \times \frac{F}{d^2} \quad (3-3)$$

Para a realização destes ensaios foi utilizado o durómetro Duramin da marca Struers, exibido na seguinte imagem:

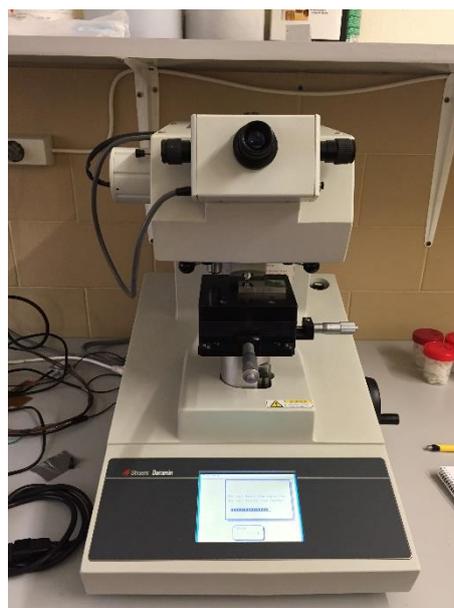


Figura 3.7. Durómetro utilizado nos ensaios.

Foram feitas 20 medições a 0,03 mm da superfície, espaçadas por 0,5 mm, no provete com o tratamento *Micro Shot Peening* e no provete polido. Aplicaram-se forças de 490,35 mN ($HV_{0.05}$) durante 15 segundos ao longo da direcção transversal dos provetes e, deste modo, acompanhou-se a evolução da dureza do material [22].

3.3.3. Microestrutura

A análise da microestrutura é extremamente importante, pois é possível observar o tamanho de grãos do material e alguns defeitos apenas observáveis ao microscópio.

Foram usadas as amostras de provetes que se utilizaram nos ensaios de microdureza. Para tal houve um novo polimento, em ordem a retirar as marcas da pirâmide do durómetro. Para a revelação da microestrutura as amostras foram atacadas quimicamente pelo reagente de *Keller*, durante 1 minuto e 15 segundos. Esse reagente, cuja composição está representado na tabela 3.4, é o mais recomendado para ligas de alumínio, revelando as fronteiras de grãos e precipitações ao longo de toda a amostra [23].

Tabela 3.4. Composição química do reagente de Keller utilizado.

Água Destilada [ml]	HNO₃ [ml]	HCl [ml]	HF [ml]
95	2.5	1.5	1

Depois do ataque químico a análise microestrutural foi realizada no microscópio da figura 3.8, tendo sido incorporada, posteriormente, uma câmara fotográfica para a captura de imagens.

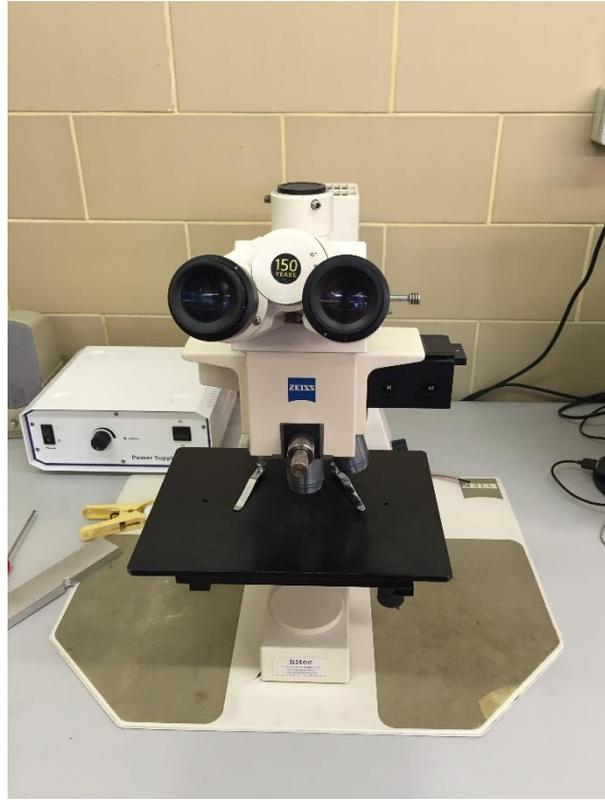


Figura 3.8. Microcópico utilizado nos ensaios.

3.4. Fadiga

Após o polimento adequado dos provetes, passou-se para os ensaios uniaxiais de fadiga. O principal objectivo destes ensaios consiste na obtenção das curvas a/N e das curvas da/dN em função do ΔK . Na realização dos ensaios de fadiga foi utilizada a máquina de fadiga servo-hidráulica *Instron 1341*, ilustrada na figura 3.10, a qual detém uma capacidade máxima de 100 kN. Inicialmente, a obtenção dos dados foi feita por captação de vídeo e edição de imagem, através do *software Inkscape* e, posteriormente, pelo método da curva da *compliance*.



Figura 3.9. Obtenção de imagem por captação de vídeo



Figura 3.10. Máquina de fadiga uniaxial utilizada nos ensaios

De acordo com a norma *ASTM E647-00* [8], existem várias regras a considerar para a obtenção de uma curva a/N válida, as quais permitirão uma melhor compreensão da propagação de fenda. A título de exemplo, a dimensão mínima da fenda antes da recolha de dados será 1 mm. Outro aspecto a considerar é a equação A1.2 da norma *ASTM E647-00*, representada em seguida (equação 3-4), onde se verifica que o intervalo de fenda a recolher é de $0,04 W$ quando o valor de a/W for superior a 0,25, sendo a o tamanho da fenda e W uma dimensão característica do provete (48,03 mm).

$$\Delta a \leq 0,04W \text{ para } 0,25 \leq a/W \leq 0,4 \quad (3-4)$$

$$a/W = 0,25 \Leftrightarrow a = 0,25 \times 48,03 = 12,0075 \text{ mm} \quad (3-5)$$

Resolvendo a equação 3-5 determinou-se como dimensão mínima de a 12,0075 mm, como princípio de recolha de dados.

Com a ajuda de uma folha de cálculo foi possível traçar a curva da/dN ; ΔK , tendo em conta a dimensão dos intervalos de fenda recolhidos. O valor de ΔK foi calculado em cada um dos intervalos, de acordo com a equação 3-6 da norma *ASTM E647-00* [8].

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \quad (3-6)$$

Na equação pode-se observar ΔP (gama de carga), B (espessura do provete e $\alpha = a/W$.

O controlo da propagação de fenda por captação de vídeo nos provetes polidos foi de fácil execução, dado que a superfície espelhada permitia um visionamento muito bom da fenda. O mesmo não acontecia nos provetes tratados por *Micro Shot Peening*, pois o tratamento induzido provocou uma rugosidade de tal forma elevada que seria impossível visualizar a propagação da fenda.

Para contornar essa situação utilizaram-se as curvas da fenda (a) em função da *compliance* (C) em todos os provetes, de modo a ser possível retirar a equação de fenda, num específico número de ciclos, para provetes de espessura diferente.

$$C = \frac{(u_{m\acute{a}x} - u_{m\acute{i}n})}{(P_{m\acute{a}x} - P_{m\acute{i}n})} \quad (3-7)$$

Os valores de distância máxima e mínima, assim como os de carga máxima, foram adquiridos pelo computador durante a realização dos ensaios.

Juntando todas as curvas a/C é possível retirar a equação pretendida e, assim, continuar com os ensaios muito mais rapidamente e sem necessidade de captação de vídeo.

É possível observar os pontos obtidos para os provetes de 8 e 4 mm na figura 3.11, e conseqüentemente a linha tendência que origina as respectivas equações do valor de a .

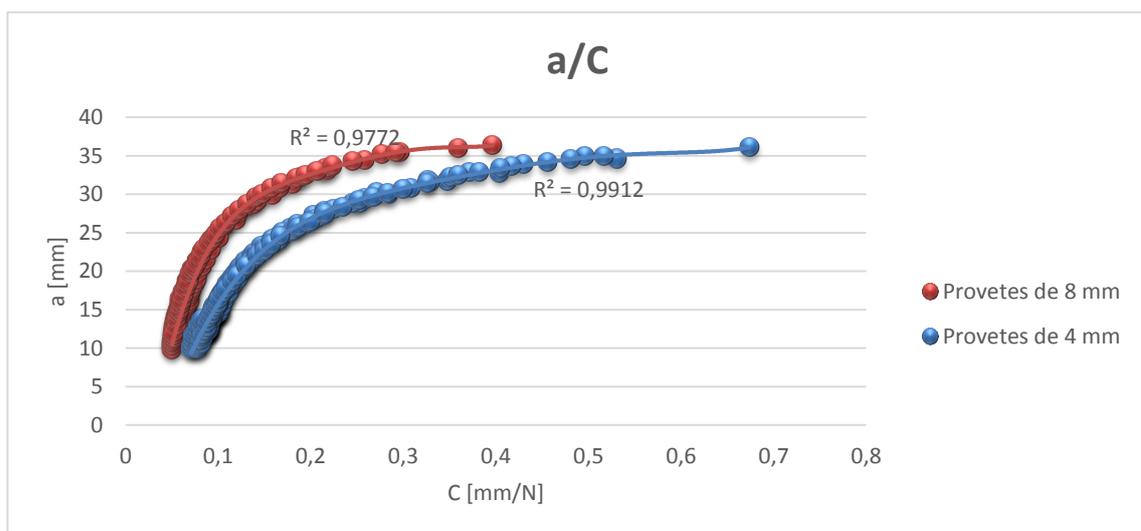


Figura 3.11. Curva a/C de provetes com 8 e 4 mm

$$a_{8mm} = 39515 \times C^5 - 53199 \times C^4 + 27962 \times C^3 - 7278,2 \times C^2 + 980,36 \times C - 23,559 \quad (3-8)$$

$$a_{4mm} = 2905,2 \times C^5 - 6399 \times C^4 + 5393,9 \times C^3 + 2275,3 \times C^2 + 502,82 \times C - 16,62 \quad (3-9)$$

Ao substituir o valor dado na equação 3-7, e nas equações 3-8 e 3-9, seria possível obter o valor de a no ciclo de carga que se achar necessário.

Em cada espessura foram feitos ensaios com razões de carga, $R=0,05$ e $R=0,4$, para que fosse possível verificar os efeitos da fadiga em todas as condições.

Na tabela 3.5 podem-se observar os parâmetros usados nos ensaios de fadiga:

Tabela 3.5. Ensaios de fadiga realizados

Referência	Espessura	Razão de Carga	Blocos de carga	Micro Shot Peening
8_2_0,05	8	0.05	1	
8_3_0,05	8	0.05	1	
8_4_0,4	8	0.4	1	
8_5_0,4	8	0.4	1	
8_6_0,05_SP	8	0.05	1	X
8_7_0,4_SP	8	0.4	1	X
15000_8_8_0,05	8	0.05	2	
15000_8_9_0,05_SP	8	0,05	2	X
15000_8_10_0,4	8	0,4	2	
15000_8_11_0,4_SP	8	0,4	2	X
7500_8_12_0,05	8	0,05	2	
7500_8_13_0,05_SP	8	0,05	2	X
7500_8_14_0,4	8	0,4	2	
7500_8_15_0,4_SP	8	0,4	2	X
4_1_0,05	4	0.05	1	
4_2_0,05	4	0.05	1	

4_3_0,4	4	0.4	1	
4_4_0,4	4	0.4	1	
4_5_0,05_SP	4	0.05	1	X
4_6_0,4_SP	4	0.4	1	X
15000_4_7_0,05	4	0,05	2	
15000_4_8_0,05_SP	4	0,05	2	X
15000_4_9_0,4	4	0,4	2	
15000_4_10_0,4_SP	4	0,4	2	X
7500_4_11_0,05	4	0,05	2	
7500_4_12_0,05_SP	4	0,05	2	X
7500_4_13_0,4	4	0,4	2	
7500_4_14_0,4_SP	4	0,4	2	X

É importante referir que as repetições feitas em alguns ensaios deveram-se à irregularidade de dados obtidos.

Alguns dos ensaios com espessura de 4 mm não sofreram rotura (embora estivessem muito perto), devido a problemas ocorridos na máquina de fadiga.

Para a análise do efeito retardante do bloco de sobrecarga foram efectuados ensaios com duas condições distintas, para que se pudesse comparar os efeitos nas duas situações:

- Primeira situação - 15000 ciclos de carga normal e 300 ciclos com 50% de sobrecarga;
- Segunda situação - 7500 ciclos de carga normal e 300 ciclos com 50% de sobrecarga.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo analisar-se-ão os resultados obtidos de acordo com os procedimentos referidos no capítulo 3.

4.1. Rugosidade

As figuras 4.1 e 4.2 representam, respectivamente, os perfis de rugosidade que se obtiveram num determinado comprimento dos provetes polidos e dos provetes tratados superficialmente pelo *Micro Shot Peening*.

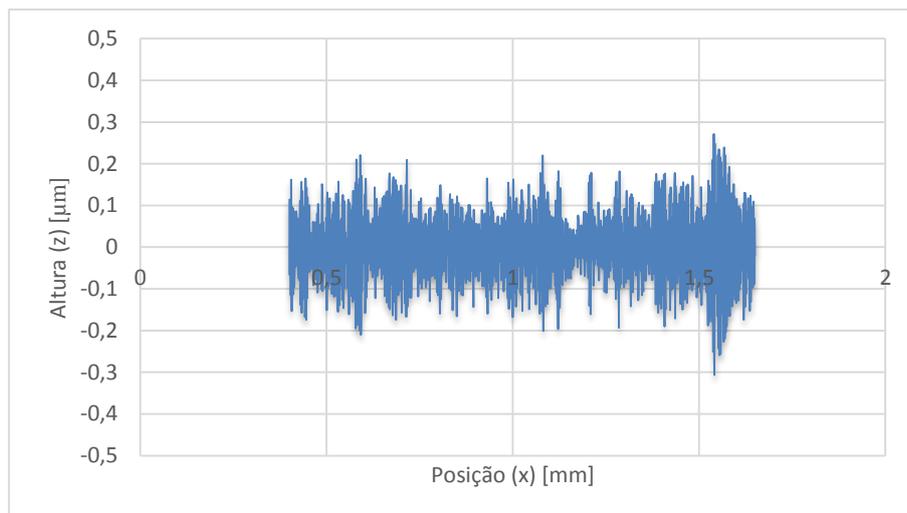


Figura 4.1. Valores de rugosidade obtidos num provete polido.

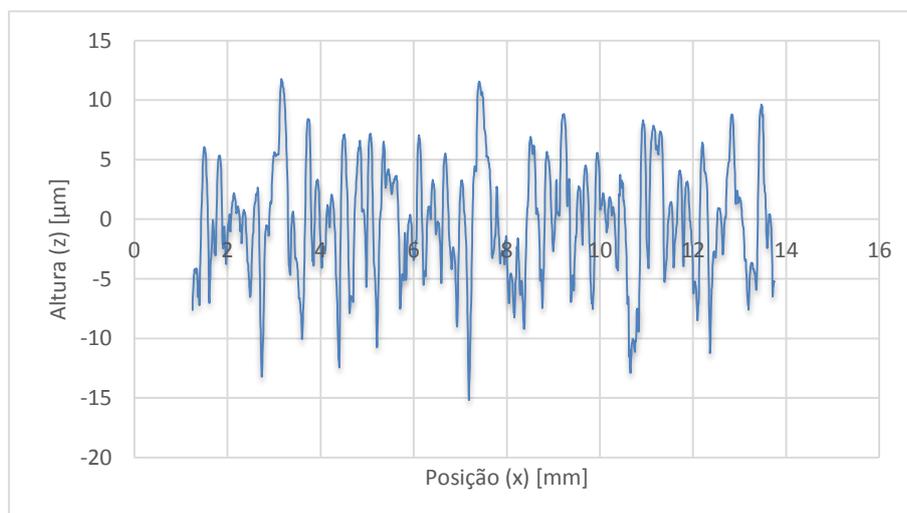


Figura 4.2. Valores de rugosidade obtidos num provete tratado superficialmente.

Comparando as duas curvas é evidente o valor superior da rugosidade nos provetes tratados com *MSP*.

De forma a se obter um valor mais correcto da rugosidade dos provetes, foram anotados os respectivos valores em várias posições ao longo dos provetes. Assim, obtiveram-se os valores médios da rugosidade média (R_a) e máxima relativa (R_z), originando uma melhor interpretação dos resultados. Foram feitos 5 ensaios de rugosidade em cada provete. Os valores obtidos da rugosidade média e máxima podem ser observados nas tabelas seguintes:

Tabela 4.1. Valores obtidos de rugosidade média e máxima nos provetes polidos.

	1°	2°	3°	4°	5°	Valor médio	Desvio Padrão
R_a [μm]	0,061	0,098	0,063	0,071	0,072	0,073	0,015
R_z [μm]	0,506	1,373	0,684	0,647	0,688	0,780	0,340

Tabela 4.2. Valores obtidos de rugosidade média e máxima nos provetes tratados com *Micro Shot Peening*.

	1°	2°	3°	4°	5°	Valor médio	Desvio Padrão
R_a [μm]	3,895	3,767	2,939	3,003	3,405	3,402	0,433
R_z [μm]	23,112	20,285	16,296	18,352	20,252	19,660	2,534

Comparando os valores médios das respectivas rugosidades nos provetes polidos com os provetes tratados por *Micro Shot Peening*, constatou-se que a rugosidade média nos provetes com *MSP* era cerca de 47 vezes superior à rugosidade verificada nos provetes polidos. No que toca à rugosidade máxima relativa, esta obteve um valor superior em 25 vezes nos mesmos provetes.

As deformações plásticas induzidas pelo tratamento superficial justificam os valores mais elevados de rugosidade nos provetes de *MSP*.

4.2. Microdureza

Na figura 4.3 estão representados os valores de microdureza medidos a 0,03 mm da superfície, quer nos provetes polidos, quer nos provetes tratados com a técnica de *Micro Shot Peening*. Nestes últimos, embora pouco notório, é possível observar um certo aumento na sua dureza.

Nos provetes polidos foi obtido um valor médio de dureza de 144,92 kgf/mm², com um desvio padrão de 3,85 entre os valores medidos. Já nos provetes com *MSP* foi obtido um valor médio de dureza de 152,3 kgf/mm², com um desvio padrão de 7,26, correspondendo a um aumento de 5,1% em relação aos primeiros.

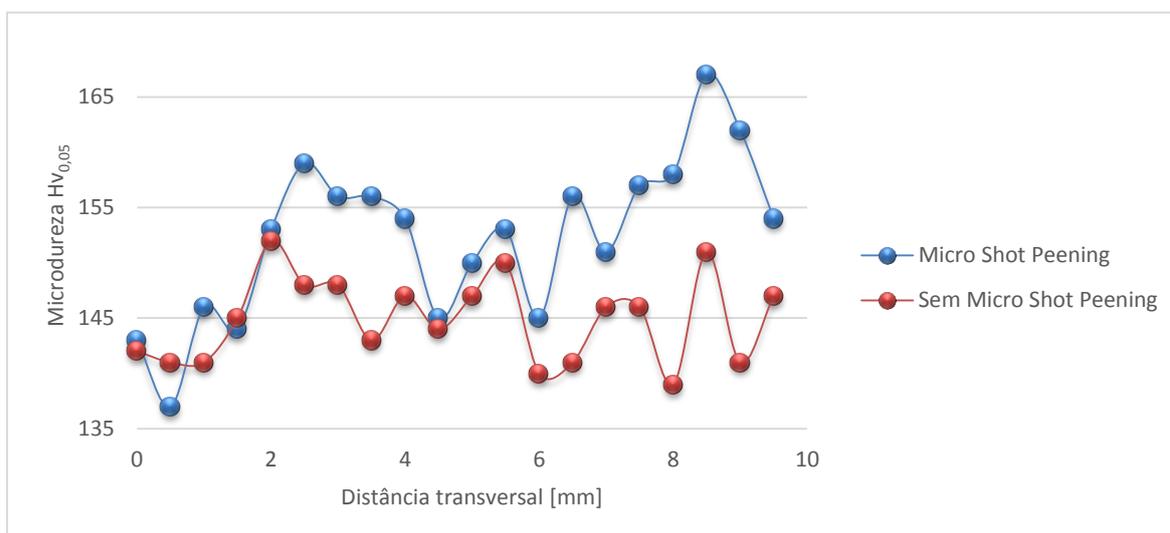


Figura 4.3. Perfil de microdurezas nos provetes a uma distância de 0,3mm da superfície.

4.3. Análise microestrutural

Após o ataque químico, referenciado no capítulo 2, passou-se à análise microestrutural dos provetes com e sem o tratamento superficial de *Micro Shot Peening*, tendo como objectivo a comparação entre estes.

Na figura 4.4 é possível observar a microestrutura do provete polido com uma aproximação de 200 vezes. Analisando a figura 4.4, podem ver-se as linhas de laminagem ao longo de toda a amostra. Os grãos do material encontram-se na direção das linhas de laminagem, sendo longos e achatados.

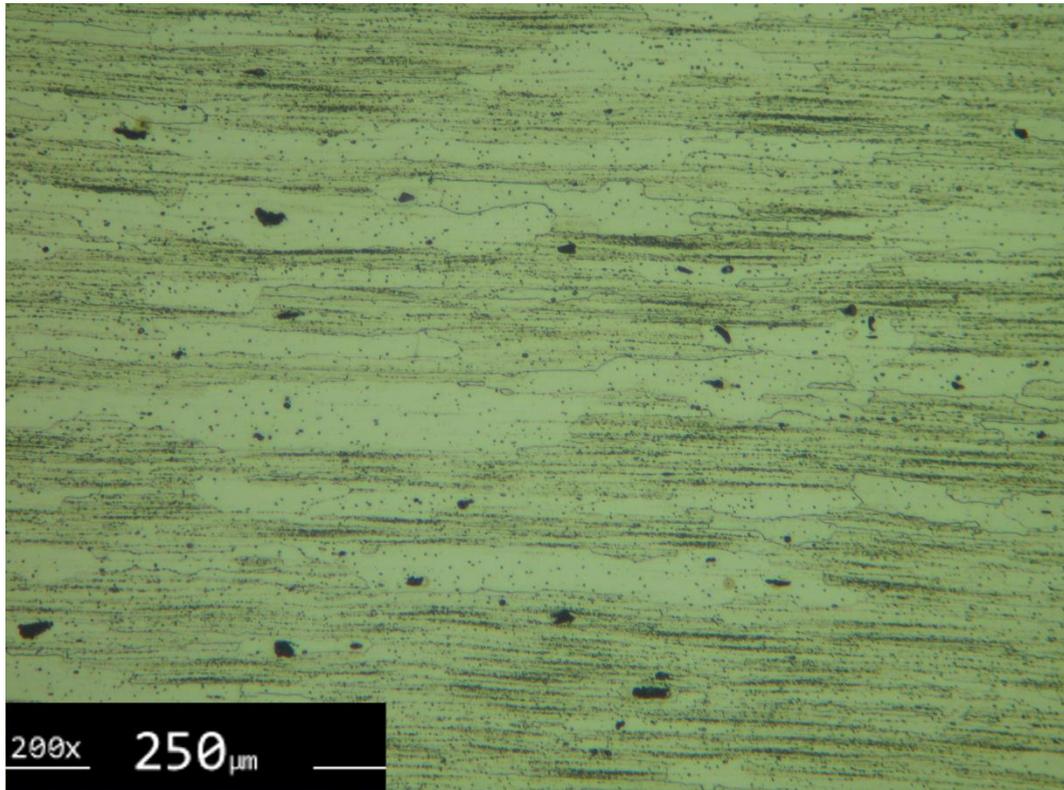


Figura 4.4. Microestrutura de provete polido.

As figuras 4.5 e 4.6 mostram a superfície do provete tratado superficialmente com *MSP*. É de notar o mau acabamento superficial, bem como os diversos defeitos de arrancamento existentes. Fora isto, podem ainda observar-se as linhas de deformação impostas pelo bombardeamento de esferas e as deformações plásticas por este estabelecidas.

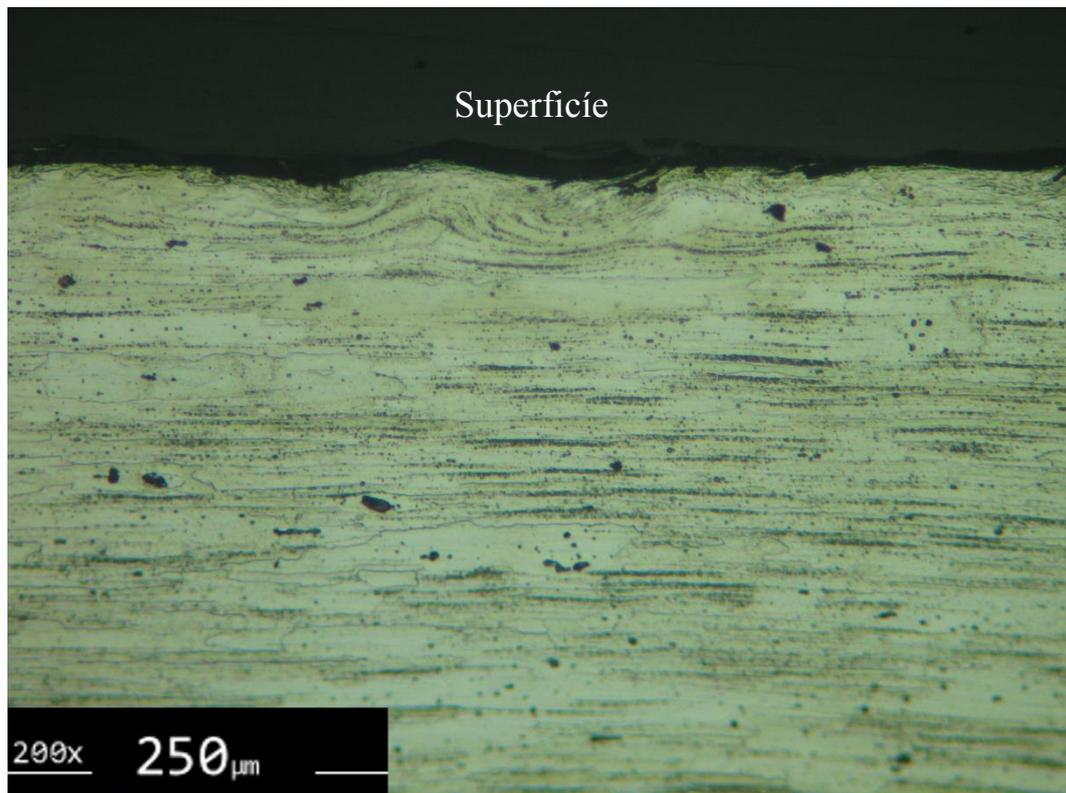


Figura 4.5. Microestrutura e defeitos de mau acabamento superficial devido ao tratamento de Micro Shot Peening.

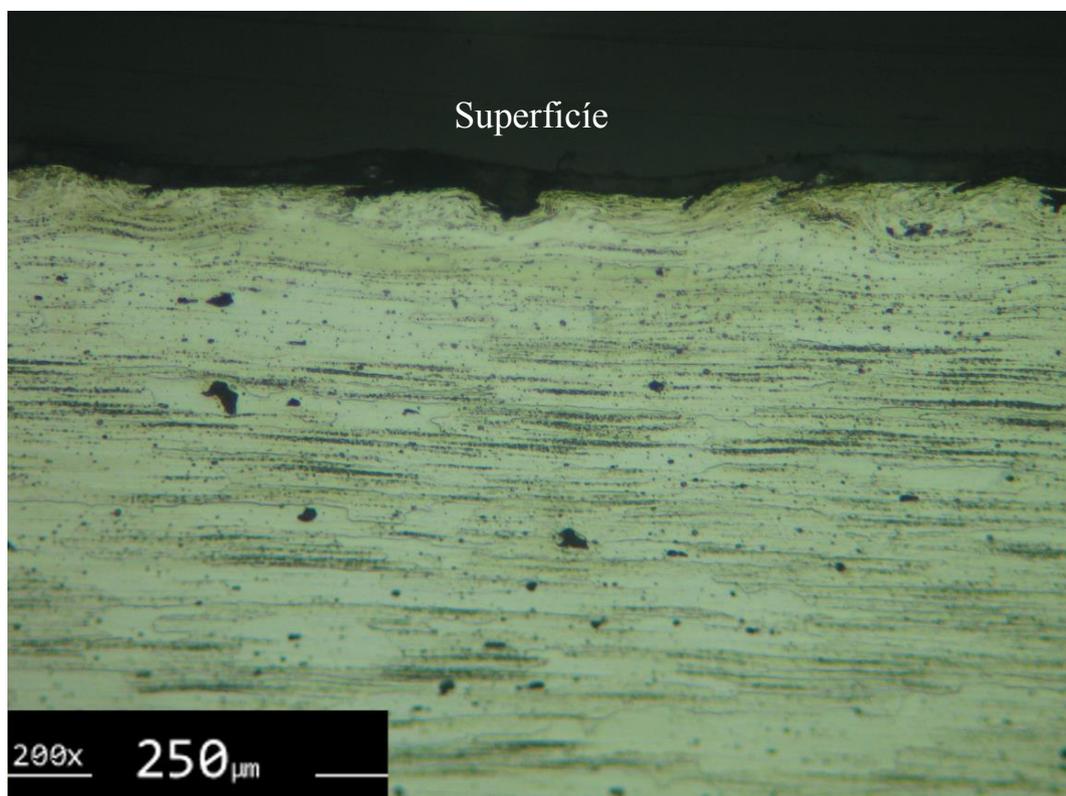


Figura 4.6. Microestrutura e defeitos de arrancamento devido ao Micro Shot Peening.

Por fim, fazendo uma comparação entre as amostras, não são visíveis diferenças significativas entre os grãos, não existindo, deste modo, o refinamento de grãos previsível.

4.4. Fadiga

Sendo este o ponto principal da dissertação, foram realizados ensaios uniaxiais de fadiga nos provetes, os quais foram realizados em diversas condições. Após os ensaios foram traçadas as curvas da/dN em função do ΔK , de modo a verificar a propagação de fenda, tendo em conta a influência da espessura, da razão de carga e, principalmente, do tratamento de *Micro Shot Peening*.

4.4.1. Influência da Espessura

Nas figuras 4.7, 4.8, 4.9, e 4.10 estão representadas as comparações das curvas de propagação da fenda, tendo em conta a espessura.

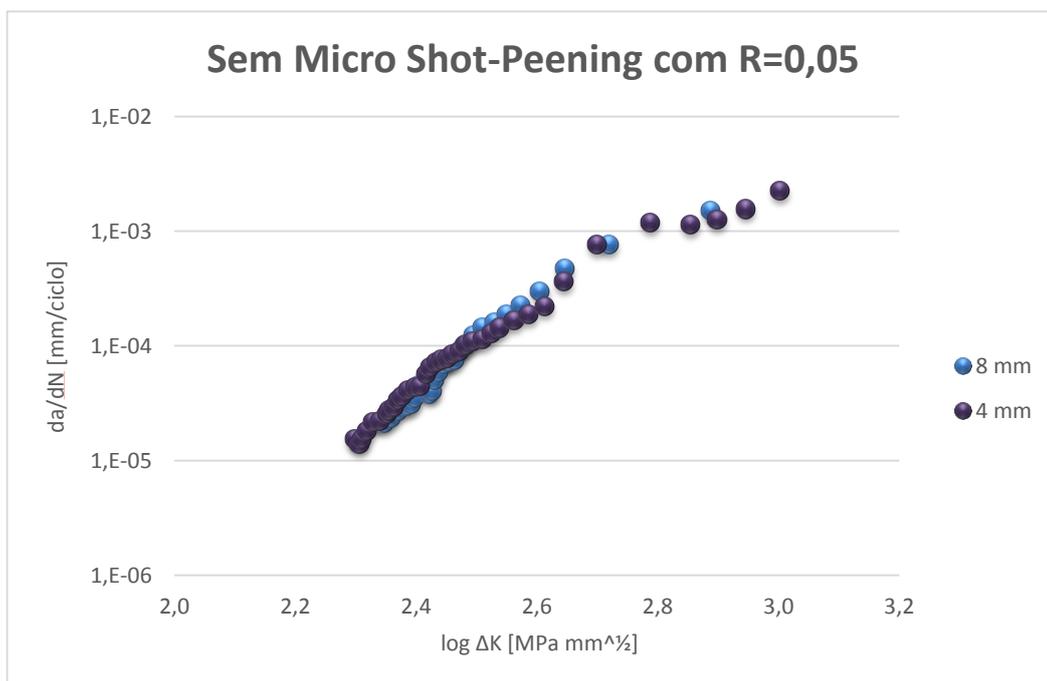


Figura 4.7 Influência da espessura em provetes sem MSP e R=0,05.

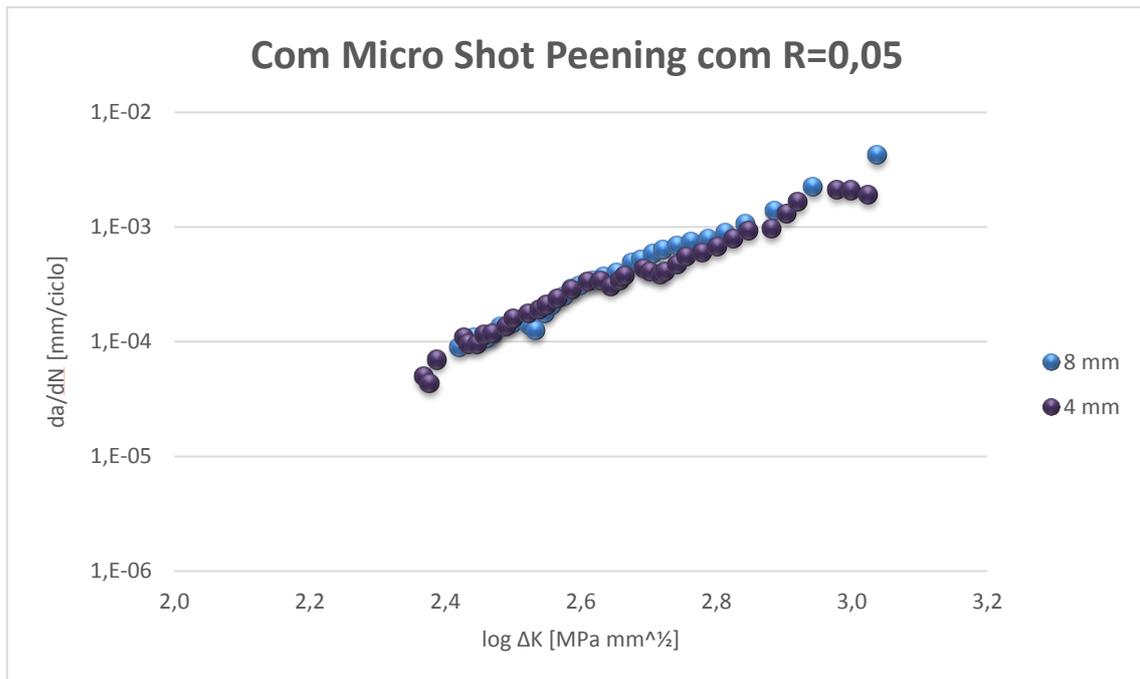


Figura 4.9. Influência da espessura em provetes com MSP e R=0,05.

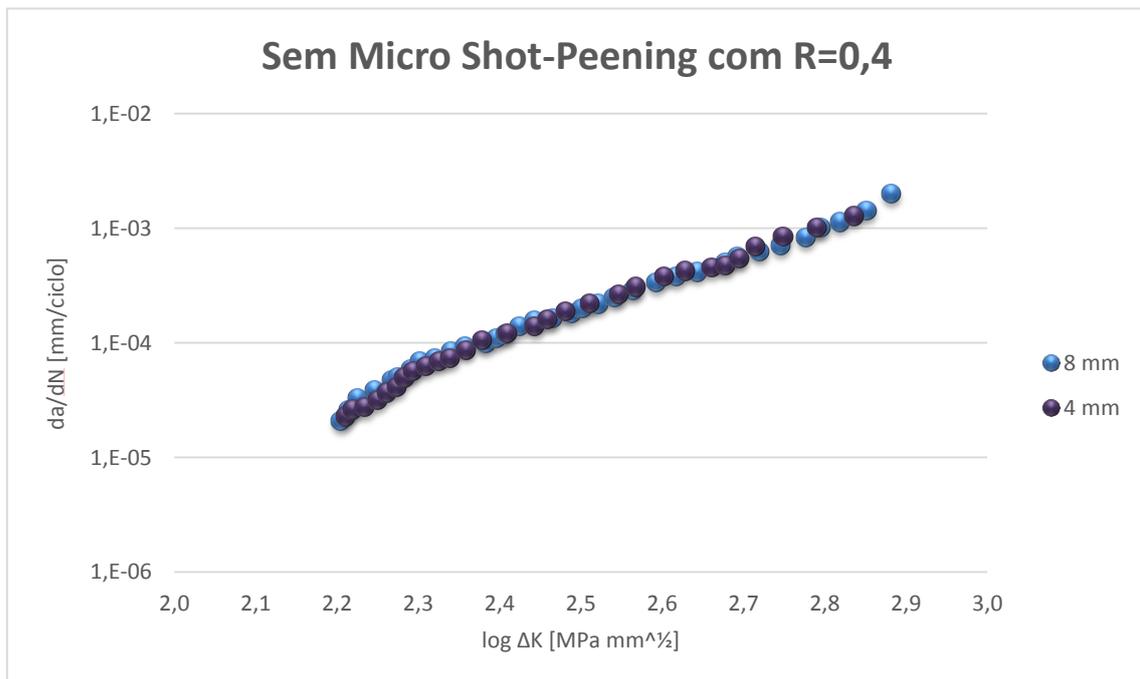


Figura 4.8. Influência da espessura em provetes sem MSP e R=0,4.

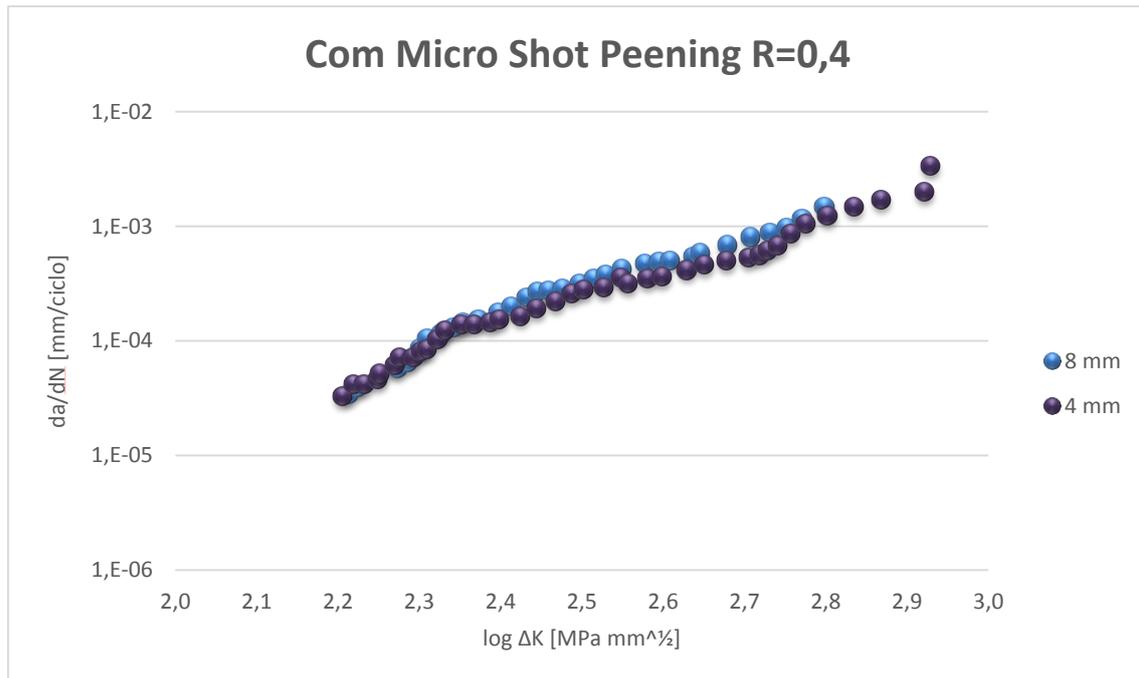


Figura 4.10. Influência da espessura em provetes com MSP e R=0,4

Após a análise das comparações em cima apresentadas, verificou-se que a espessura tem pouca influência na propagação de fenda com razões de carga diferente, em ambos os provetes, quer tenham ou não o tratamento de *Micro Shot Peening*.

4.4.2. Influência do Micro Shot Peening

As figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 mostram a influência do tratamento de *Micro Shot Peening* na propagação de fenda por fadiga.

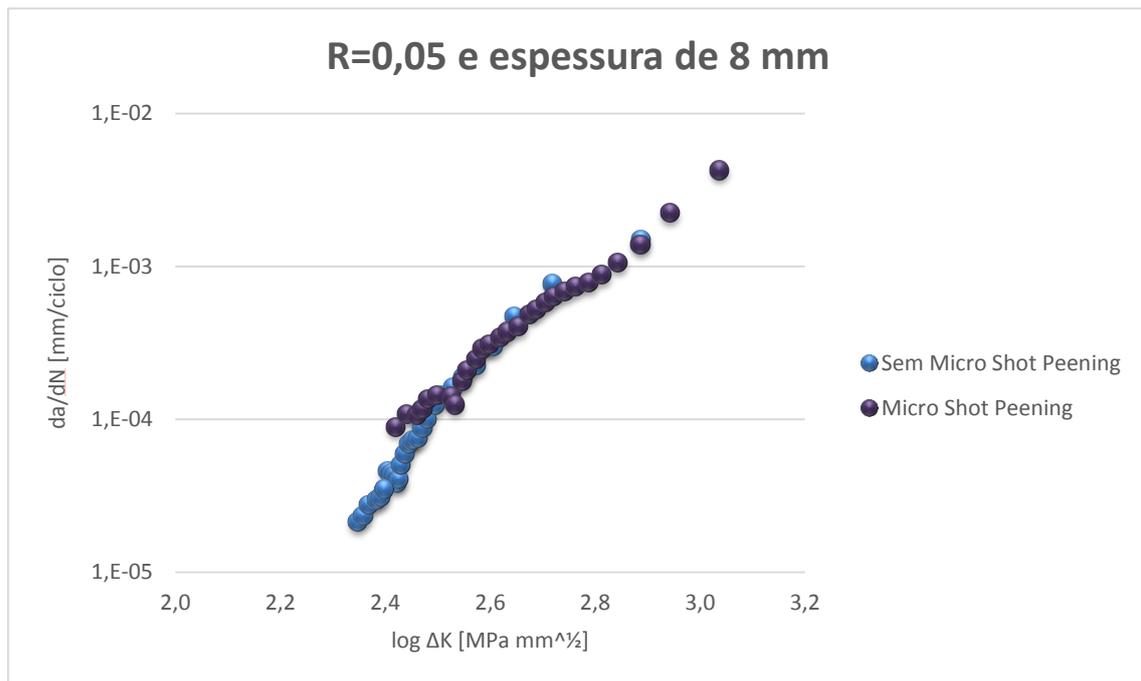


Figura 4.11. Influência do Micro Shot Peening em provetes com 8mm e R=0,05.

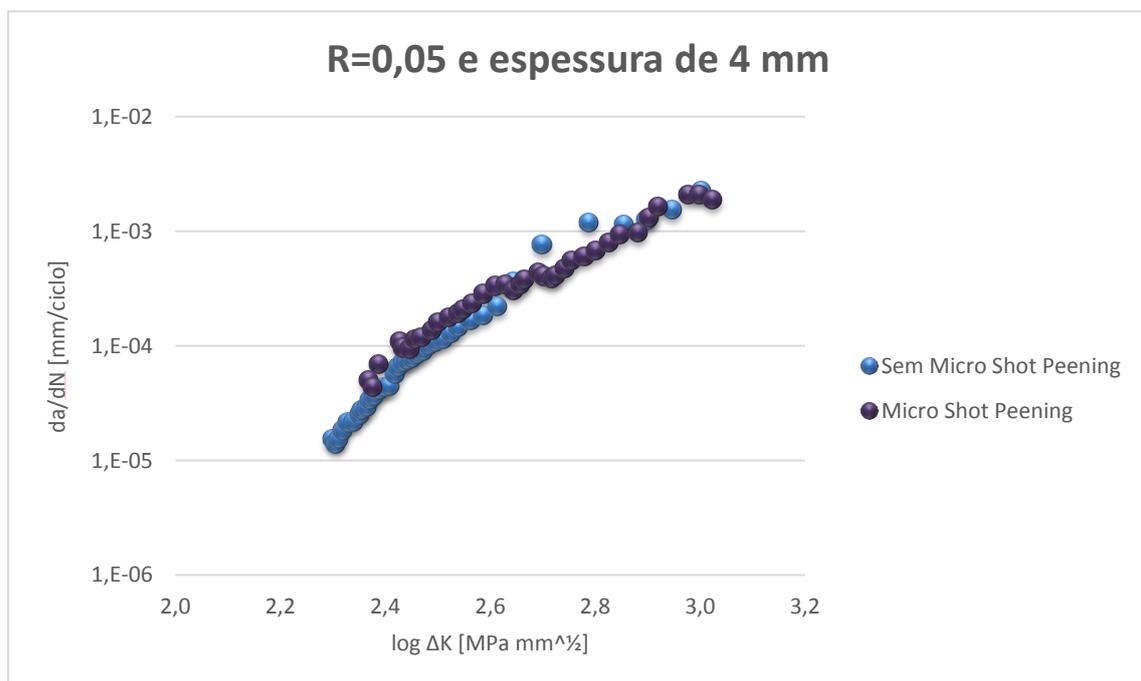


Figura 4.12. Influência do Micro Shot Peening em provetes com 4mm e R=0,05.

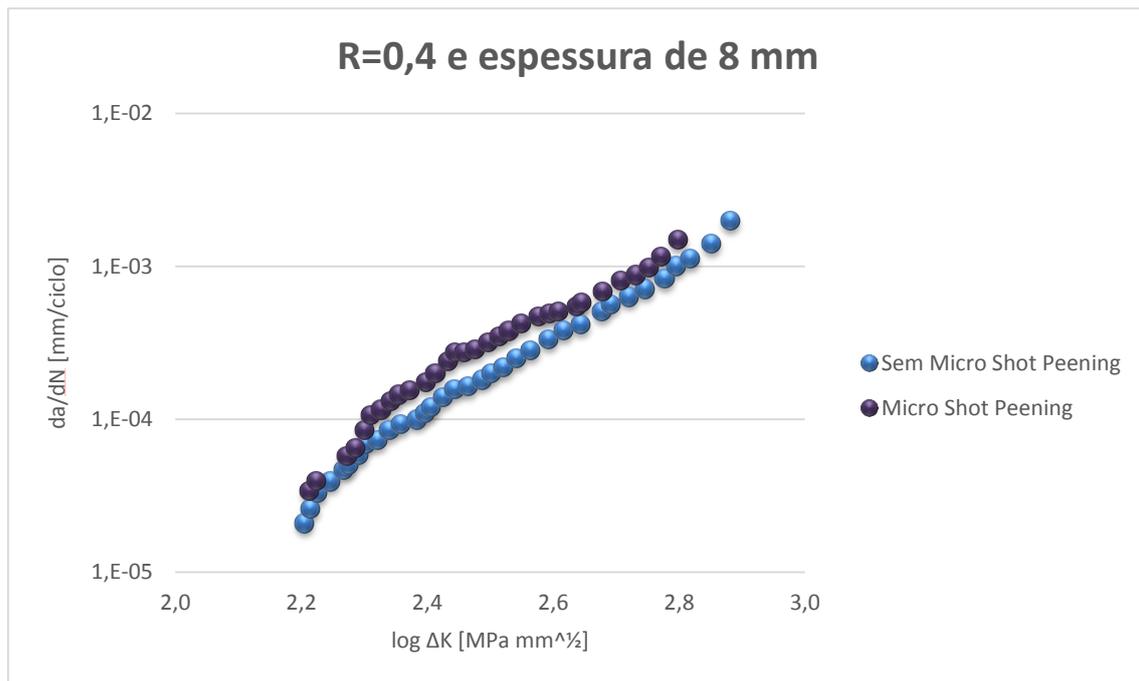


Figura 4.13. Influência do *Micro Shot Peening* em provetes com 8mm e R=0,4.

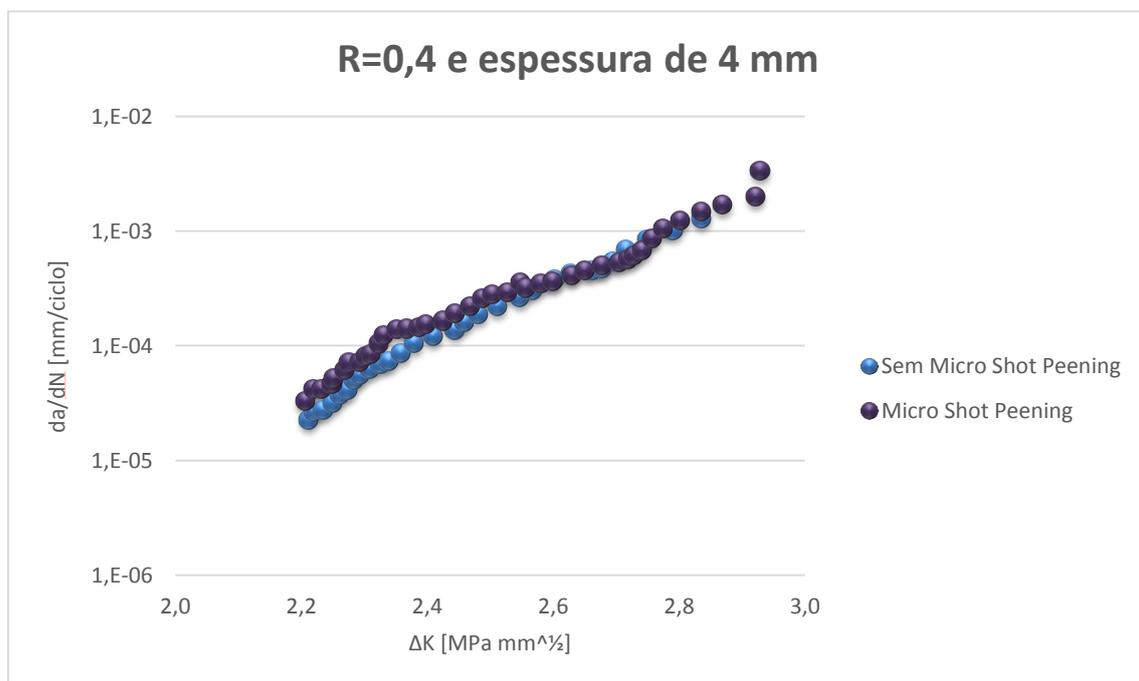


Figura 4.14. Influência do *Micro Shot Peening* em provetes com 4mm e R=0,4.

Através da análise das curvas anteriores é possível concluir que o uso do *Micro Shot Peening* influenciou negativamente a propagação de fenda. Embora não de forma significativa, constata-se uma maior velocidade na propagação da fenda em comparação aos provetes polidos. Como consequência, a rotura do provete deu-se num menor espaço de tempo. Esse efeito é verificado nas duas espessuras e também em ambas as razões de cargas ensaiadas.

Na tabela 4.3, pode-se comparar o número de ciclos até à rotura de cada provete, desde a iniciação de fenda, em condições diferentes. Como se comprovou pelas curvas anteriormente mostradas, dá-se uma ligeira redução de resistência à fadiga, o que significa um número menor de ciclos até à rotura do provete.

Tabela 4.3. Número de ciclos de cada provete até à rotura.

Espessura [mm]	Razão de Carga	Polido [nº de ciclos]	Com Micro Shot Peening [nº de ciclos]
8	0,05	296695	240538
8	0,4	367750	333550
4	0,05	492000	160000
4	0,4	377000	341300

4.4.3. Sobrecargas

Após a realização dos ensaios de fadiga com apenas um bloco de carga, realizaram-se os mesmos ensaios com dois blocos, a fim de se analisar o efeito retardante do bloco de sobrecarga nos provetes.

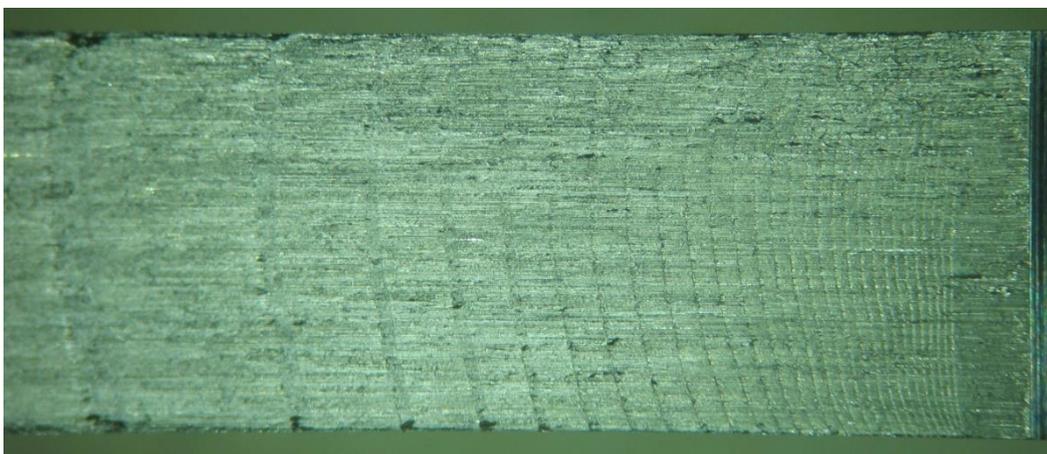


Figura 4.15. Vista ampliada em 65 vezes de modo a observar as sobrecargas na superfície.

Estes ensaios foram de difícil concretização sendo possível que nestes se encontrem erros nas curvas de propagação. Tal deve-se ao método de recolha de dados não ser o mais adequado para o efeito. O método da obtenção da curva pela equação da *compliance*, neste caso, não obtém resultados regulares de uma curva, havendo uma enorme irregularidade de pontos no regime I da propagação. De modo a contornar a situação foi necessário eliminar pontos até se obter a regularidade da curva.

Provetes de 8 mm

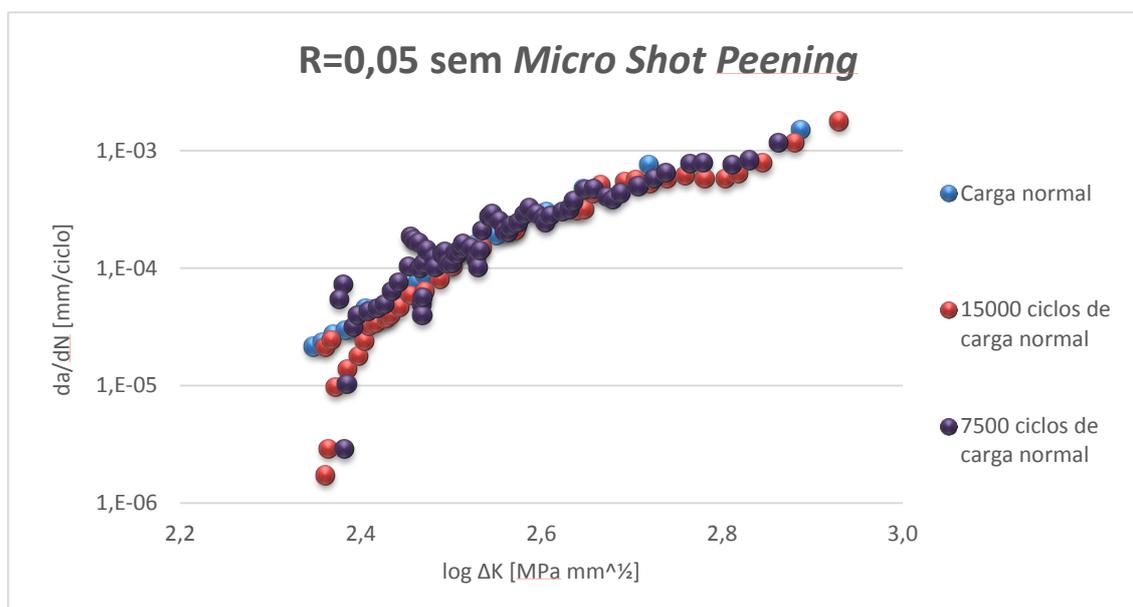


Figura 4.17. Influência das sobrecargas em provetes de 8 mm, com R=0,05 e sem MSP

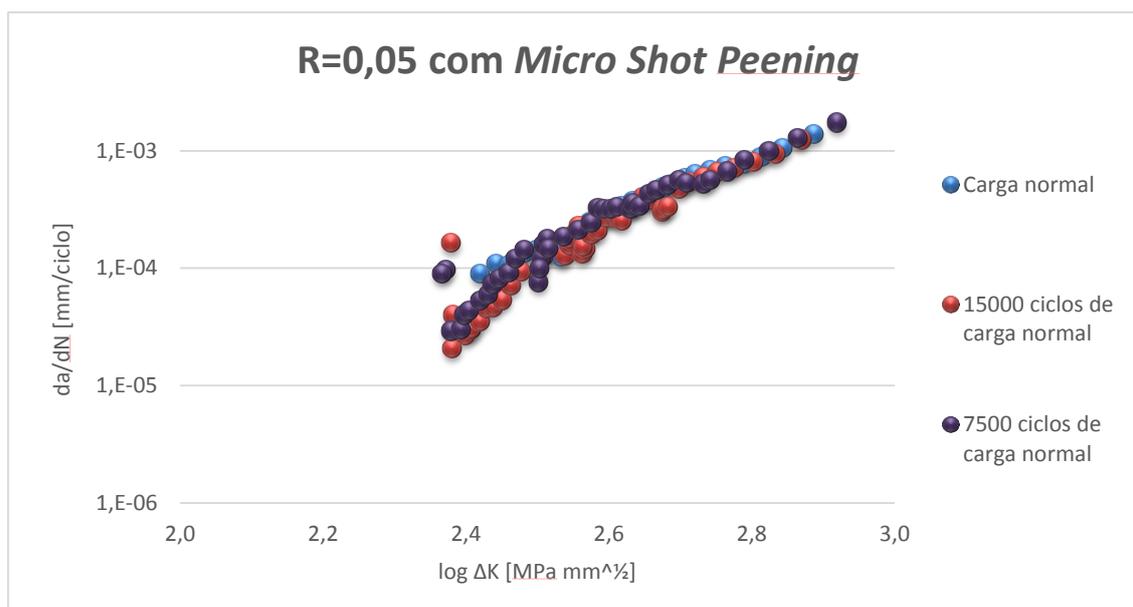


Figura 4.16. Influência das sobrecargas em provetes de 8 mm, com R=0,05 e com MSP

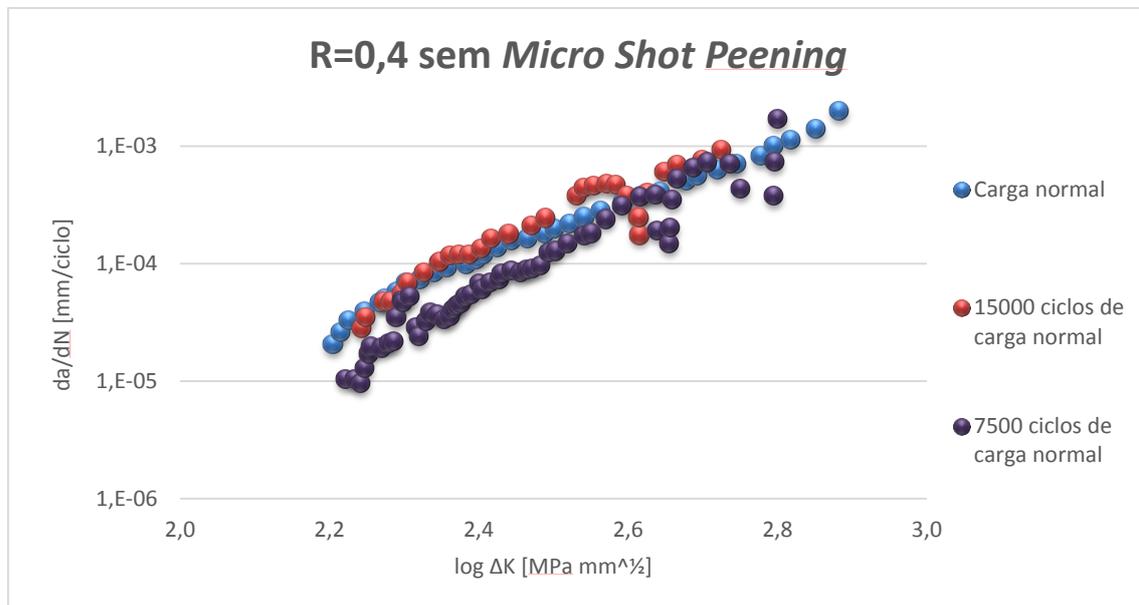


Figura 4.18. Influência das sobrecargas, em provetes de 8 mm, com $R=0,4$ e sem MSP.

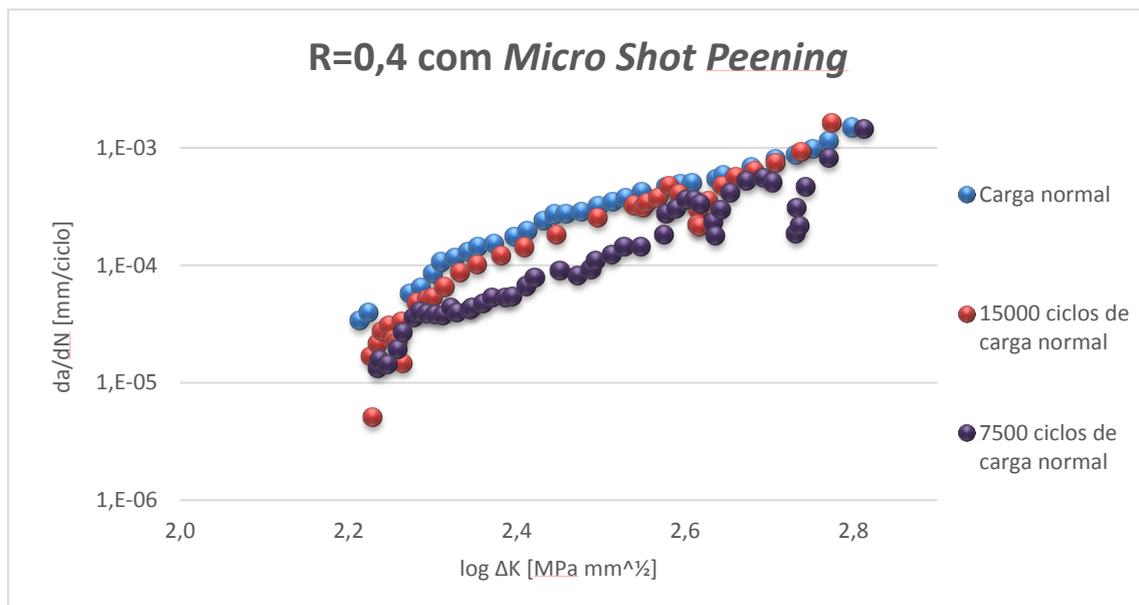


Figura 4.19. Influência das sobrecargas em provetes de 8 mm, com $R=0,4$ e com MSP

Como se pode observar, há uma ligeira redução da velocidade de propagação de fenda no momento em que ocorre a sobrecarga. Porém, em poucos ciclos de carga a velocidade retoma os valores de origem.

Nos provetes com uma espessura de 8 mm e uma razão de tensões de 0,05 é evidente a pouca influência das sobrecargas na velocidade de propagação de fenda. Por sua

vez, relativamente aos provetes ensaiados com $R=0,4$ pode-se verificar uma redução da velocidade de propagação à medida que se diminuem os ciclos em carga normal.

Provetes de 4 mm

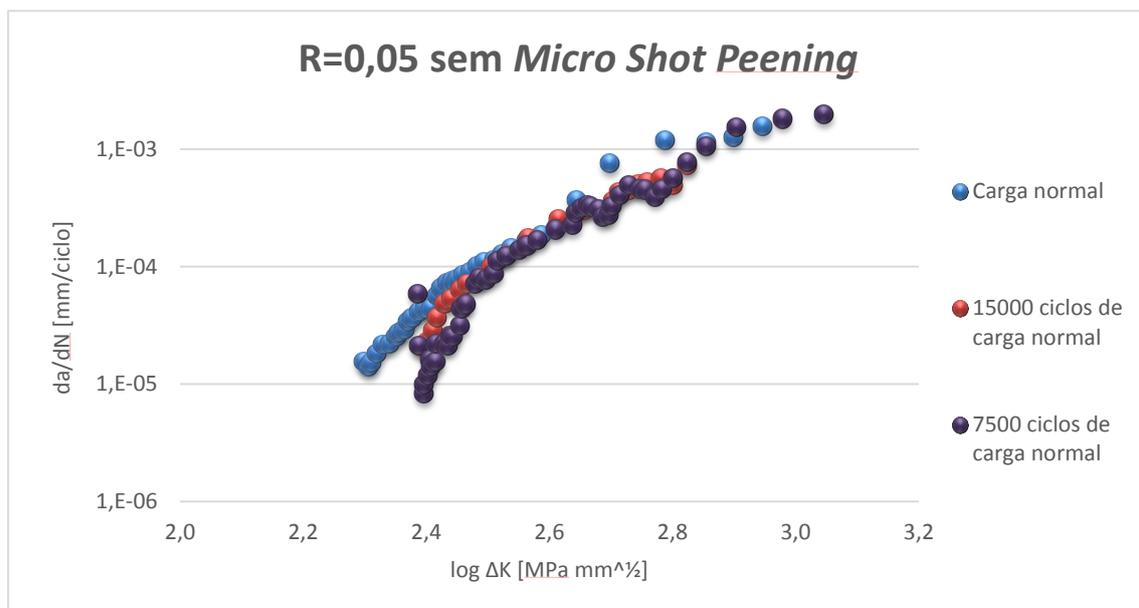


Figura 4.20. Influência das sobrecargas em provetes de 4 mm, com $R=0,05$ e sem MSP

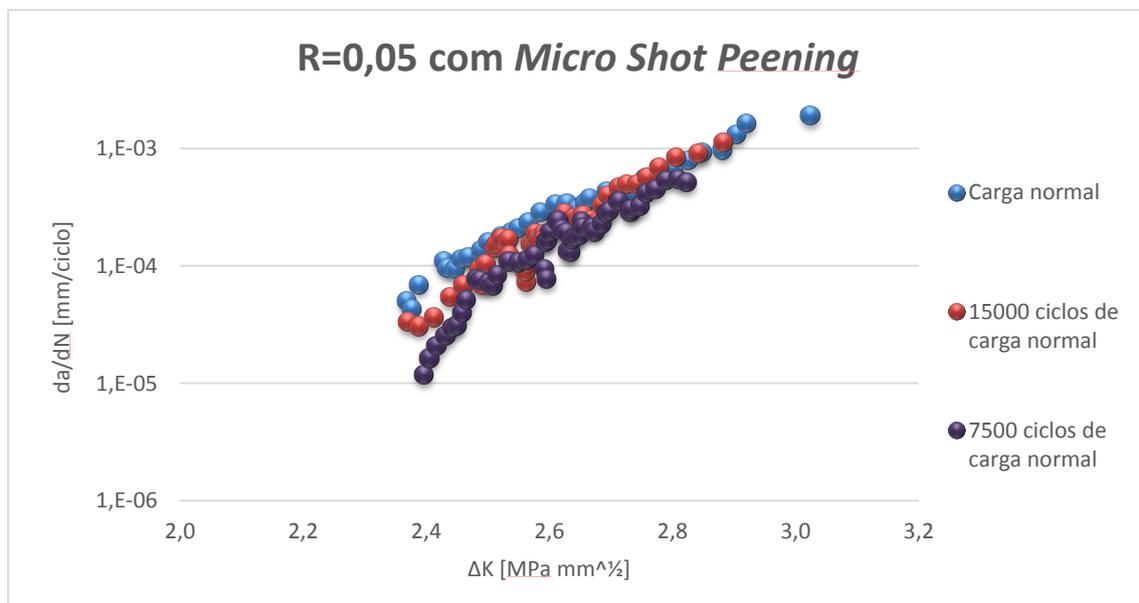


Figura 4.21. Influência das sobrecargas em provetes de 4 mm, com $R=0,05$ e com MSP

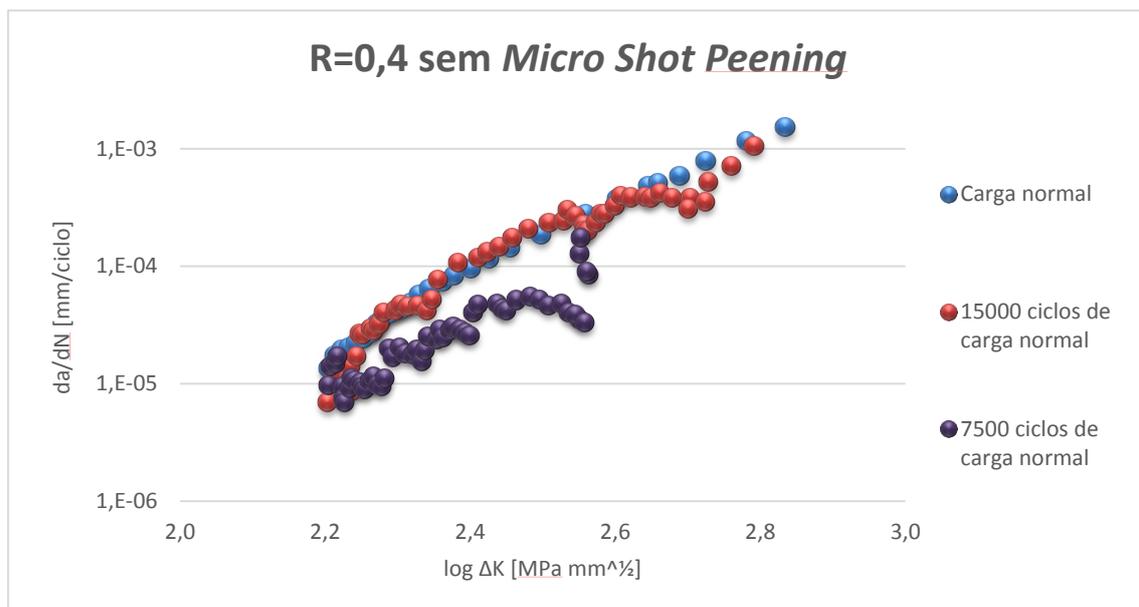


Figura 4.23. Influência das sobrecargas em provetes de 4 mm, com R=0,4 e sem MSP

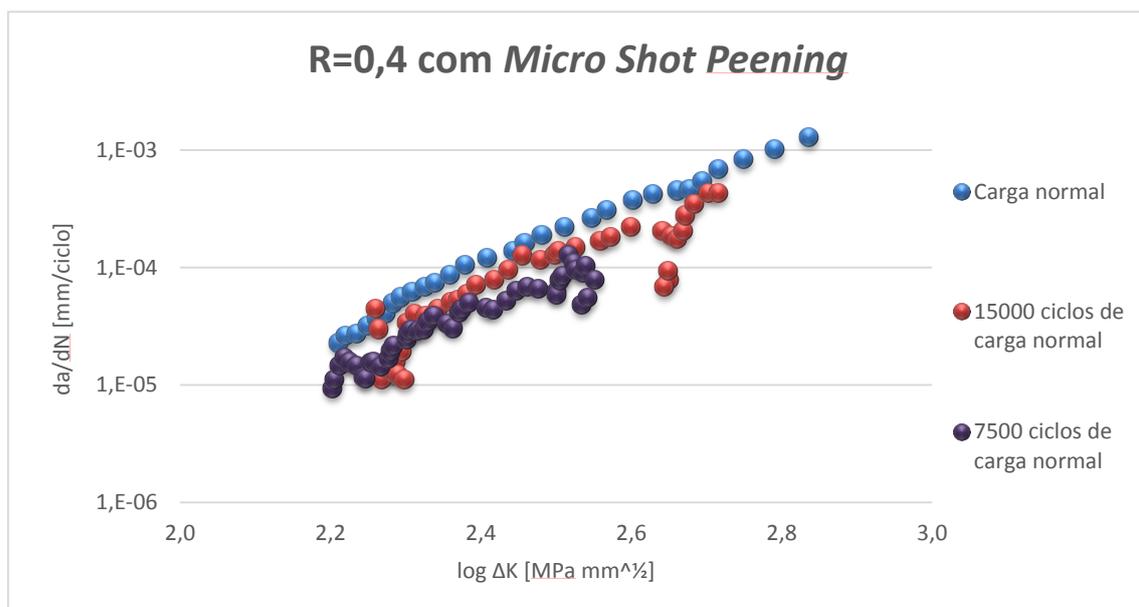


Figura 4.22. Influência das sobrecargas em provetes de 4 mm, com R=0,4 e com MSP

Tal como foi possível observar nos ensaios realizados com provetes de 8 mm, existe uma ligeira redução de velocidade de propagação de fenda no momento da sobrecarga. Verifica-se ainda redução de velocidade de propagação de fenda à medida que se diminui o número de ciclos em carga normal nos ensaios com R=0,4.

4.5. Análise das superfícies de propagação

Para uma melhor compreensão das curvas de projecto, resultantes dos ensaios de fadiga, analisaram-se as superfícies de propagação dos provetes com recurso a um microscópio de varrimento *Philips XL30*, localizado no laboratório de construções mecânicas. De notar que quando é referida a propagação de fenda, esta ocorre no sentido da direita para a esquerda.

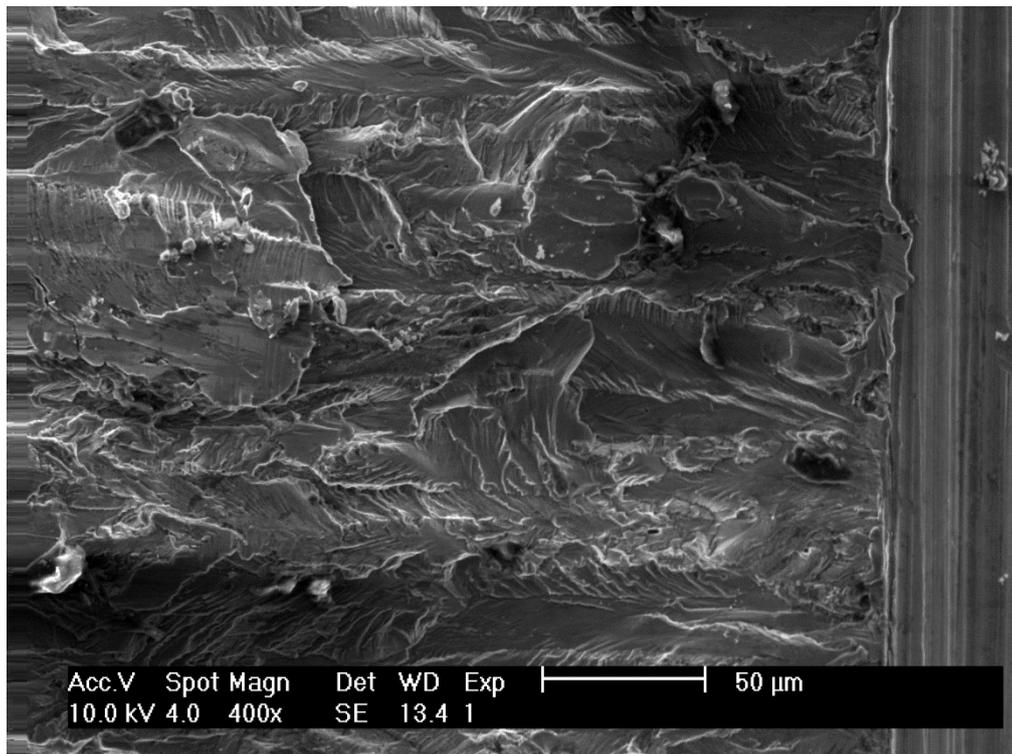


Figura 4.24. Deformação plástica na iniciação da fenda no provete 8_4_0,4

Na figura 4.24 é possível observar a deformação plástica imposta pela iniciação da fenda, originada. Por sua vez, na figura 4.25 pode-se observar a enorme deformação plástica criada a partir da propagação da fenda.

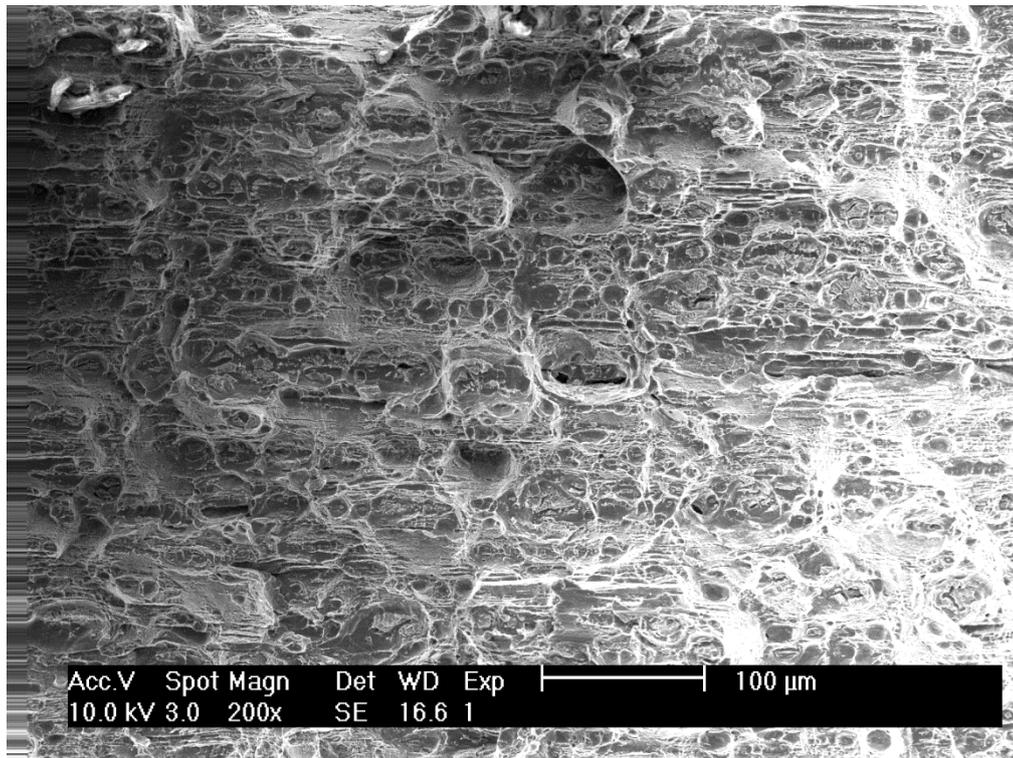


Figura 4.25. Deformação plástica proveniente da propagação de fenda no provete 15000_8_11_0,4_SP

Na figura 4.26 observa-se o tratamento superficial de *Micro Shot Peening* num provete de espessura de 4 mm e os diversos defeitos que o tratamento impôs no material.

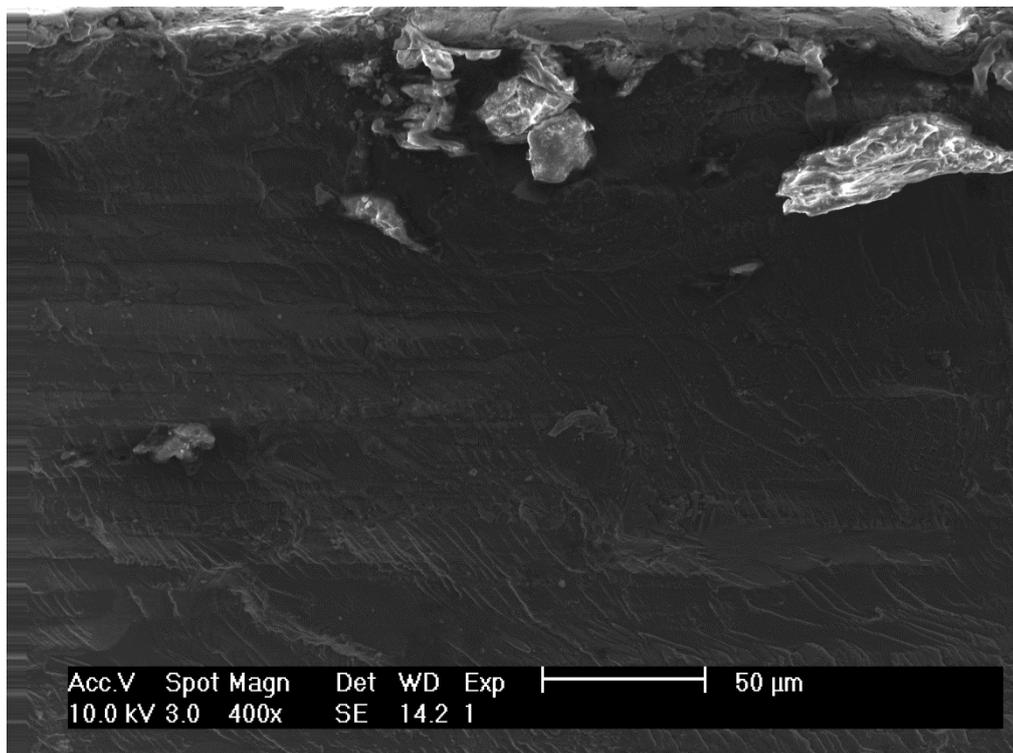


Figura 4.26. *Micro Shot Peening* observável no provete 4_5_0,05_SP

Devido ao efeito de escada presente na figura 4.27, é possível apurar a rotura frágil que estava a ocorrer num determinado tamanho de fenda. Quanto à figura 4.28, observa-se o efeito de clivagem, o que se deve ao elevado valor de K no preciso momento.

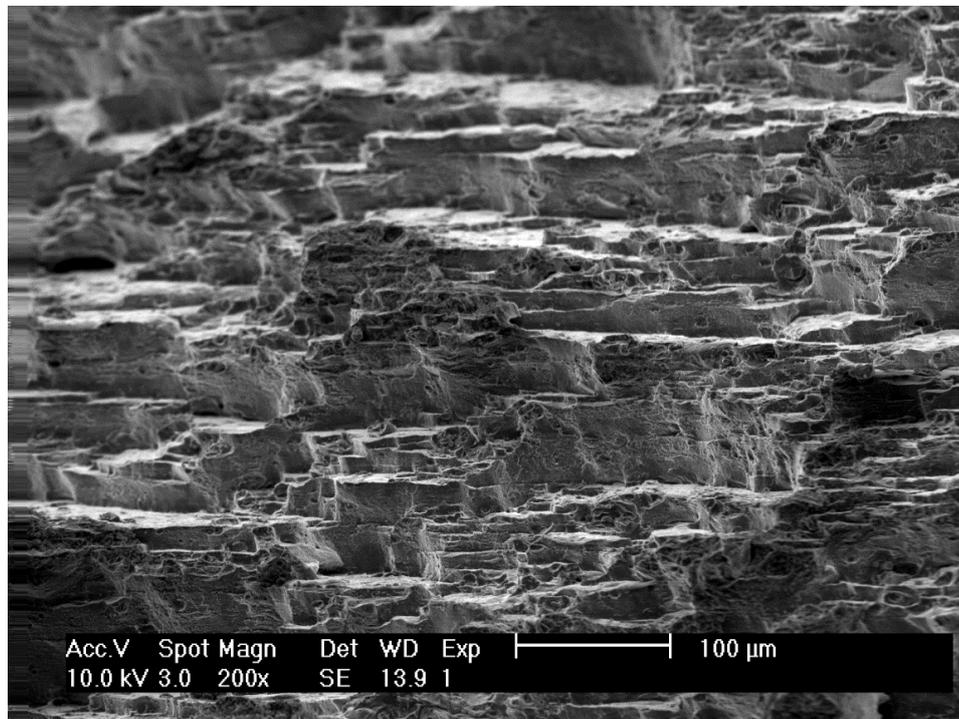


Figura 4.27. Rotura frágil no provete 8_4_0,4 ($\log \Delta K = 2,40 \text{ MPa}\sqrt{m}$)

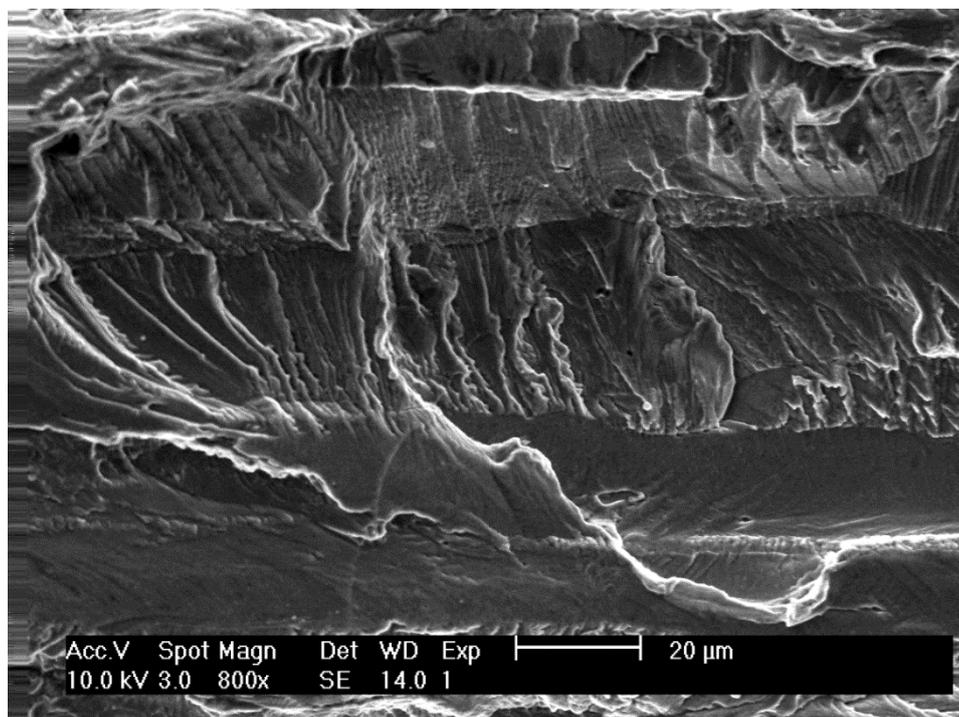


Figura 4.28. Clivagem em zonas de valor de K elevado no provete 8_4_0,4 ($\log \Delta K = 2,93 \text{ MPa}\sqrt{m}$)

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Na presente dissertação foi analisado o efeito do tratamento de *Micro Shot Peening* na propagação de fenda por fadiga, na liga aeronáutica AL 7475-T7351. Foram realizados ensaios complementares de rugosidade, microestrutura e microdureza, de modo a compreender e melhor interpretar os resultados obtidos nos ensaios de propagação de fadiga.

- Assim como foi demonstrado em [11], a rugosidade tem grande influência na resistência à fadiga, levando o material à ruína caso as tensões residuais de compressão não sejam suficientes para se oporem aos efeitos negativos causados pelo mau acabamento superficial. Nos ensaios de rugosidade foram obtidos resultados de rugosidade média e máxima relativa cerca de 47 e 25 vezes, respectivamente, com valores superiores nos provetes tratados superficialmente pela técnica de *MSP*. Os referidos valores de rugosidade estão relacionados com o mau acabamento superficial imposto pelo tratamento o que, posteriormente, afectou o desempenho da propagação de fenda.
- Nos ensaios de microdureza foi possível concluir que o seu aumento nos provetes superficialmente tratados com *MSP* foi cerca de 5,1%, devido às deformações plásticas impostas pelo bombardeamento de esferas. No entanto, o valor obtido não foi suficientemente elevado para que a velocidade de propagação de fenda diminuísse de forma considerável.
- Na análise de microestrutura foi possível obter explicação para o mau desempenho da propagação de fenda nos ensaios de fadiga. Foram observados diversos defeitos de arrancamento, bem como o não refinamento de grãos, sendo suposto com o tratamento de *MSP* conseguir o seu refinamento.

- Nos ensaios de fadiga concluiu-se que a espessura tem pouca, ou relativamente nenhuma, influência na propagação de fenda. Já a influência do *Micro Shot Peening*, embora pouco notória, é observável em todas as condições ensaiadas. Ao contrário do que *Y. K. Gao* e *X.R. Wu* [24] demonstraram em provetes com uma espessura de 10 mm, o tratamento superficial piorou o desempenho da propagação de fenda.
- Na análise de superfície de propagação com recurso ao microscópio de varrimento *Philips XL30*, concluiu-se a presença de partículas no material, assim como, a presença de clivagem no momento de propagação, perto da rotura final.

Uma melhor optimização dos parâmetros de *MSP* pode ser uma recomendação para trabalhos futuros, visto ser uma das grandes falhas detectadas nos resultados obtidos.

A forma de obtenção de resultados nos ensaios de fadiga também é um ponto a melhorar em futuros trabalhos. A utilização de um microscópio melhor, no controlo da propagação de fenda, é um aspecto a ter em conta, visto que se obtêm, desse modo, melhores curvas de projecto.

Seria também interessante comparar os resultados alcançados com resultados obtidos em provetes tratados com os restantes processos modificados de *Shot Peening*, os quais se encontram descritos no ponto 2.3.2, do capítulo 2 deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Vicente, M. (2014) “Melhoria da vida à fadiga em ligas aeronáuticas de alumínio por micro-shot peening.” Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Faculdade de Ciências e Engenharia da Universidade de Coimbra
- [2] ABAL - Associação brasileira do alumínio (2014) "História do Alumínio". Acedido em 15 de Outubro em: <http://www.abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>.
- [3] Nautilus "Aplicações de alumínio". Acedido em 15 de Outubro em : <http://nautilus.fis.uc.pt/st2.5/scenes-p/elem/e01330.html>.
- [4] Hidro - Infinite Aluminum (2012) "Aluminum, environment and society" Oslo, Noruega
- [5] Moreira, M. F. “Alumínio e suas ligas”
- [6] Branco, C. M., Ferreira, J.M., da Costa, J.D. e Ribeiro, A. S. (2008) "Projecto Órgãos de Máquinas" 3ª Edição Fundação Calouste Gulbenkian.
- [7] Pereira, C., dos S., (2013) “Fadiga em Elementos Tubulares de Matriz Epoxídica Reforçada com Fibras de Carbono sujeitos a Solicitações de Torção e Flexão” Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra na especialidade de Sistemas e Equipamentos Mecânicos.
- [8] E 647-00 (1999) “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates” ASTM International.
- [9] Totten G. E. (2008) “Fatigue Crack Propagation,” G.E. Totten & Associates LLC Seattle, Washington.
- [10] Fleck, N. A. (1984) “Fatigue crack growth due to periodic underloads and overloads" Cambridge University Engineering Department, Trumpington Street, Cambridge CB2 1PZ, England
- [11] Schijve J. (1996) "Fatigue Crack Growth under Variable-Amplitude Loading “ASM Handbook Volume 19, ASM International
- [12] Comco Inc.”Shot Peening Overview"
- [13] Kumar, H., Kumar, P., Singh, S. (2013), “Modified Shot Peening Processes – A review”, International Journal of Engineering Sciences & Emrging Technologies, Volume5, Issue 1, 12-19.
- [14] Dalaei, K., Karlsson, B. e Svensson, L. E. (2011) “Stability of shot peening induced residual stresses and their influence on fatigue lifetime” Materials Science and Engineering A528 pp. 1008-1015
- [15] Saran Industries “How is Shot Peening Intensity Measured?” Acedido em 7 de

- Fevereiro em <http://www.saranindustries.com/shot-peening/how-is-shot-peening-measured.asp>
- [16] Vielma, A. T., Llana, V. e Belzunce, F. J. (2014) “Shot peening intensity optimization to increase the fatigue life of a quenched and tempered structural steel” *Procedia Engineering.*, Vol. 74, pp. 273–278
- [17] Gao, Y. K. (2011) “Improvement of fatigue property in 7050-T7451 aluminum alloy by laser peening and shot peening,” *Materials Science and Engineering A528*, pp. 3823–3828
- [18] Grinspan, A. S. e Gnanamoorthy, R. (2006) “Surface modification by oil jet peening in Al alloys, AA6063-T6 and AA6061-T4: Residual stress and hardness” *Applied Surface Science*, vol. 253, pp. 997–1005
- [19] Soyama, H. “Cavitation S Peening. S: Shotless, Shockwave, Smooth, Soyama” *Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics, Tohoku University*
- [20] MatWeb, Your Source for Materials Information “Propriedades da liga de alumínio 7475-T7351” Acedido em 15 de Outubro em: www.matweb.com
- [21] Mahr (1999), “Perthometer. Surface Texture Parameters” MAHR GMBH, Germany - EDITION 1/09/99
- [22] E 92-82 (2003) “Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials” ASTM International
- [23] Cerri, E. e Evangelista, E. (1999) “Metallography of Aluminium alloys” *Dipartimento di Meccanica, Università di Ancona-Italy*, p. 5
- [24] Gao, Y. K. e Wu X. R. (2011) “Experimental investigation and fatigue life prediction for 7475-T7351 aluminum alloy with and without shot peening-induced residual stresses,” *Acta Materialia*, Vol. 59, pp. 3737–3747

ANEXO A

Comparação de curvas $a;N$

- Um bloco de carga

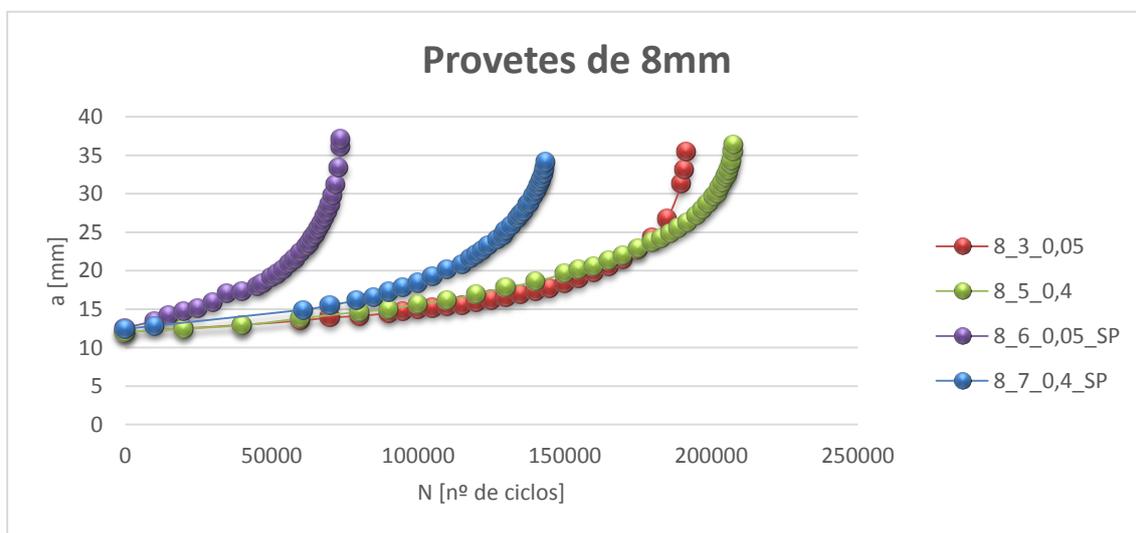


Figura A. 1. Comparação de curvas $a;N$ em provetes com 8mm e ensaiados com um bloco de carga

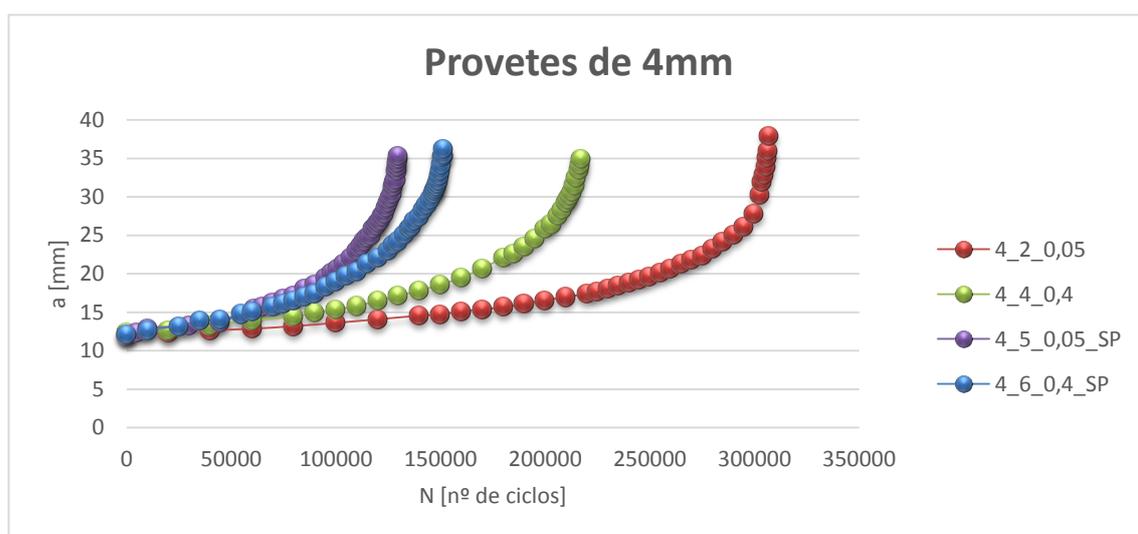


Figura A. 2. Comparação de curvas $a;N$ em provetes com 4mm e ensaiados com um bloco de carga

Em ambas as espessuras é possível observar-se um maior número de ciclos à fadiga nos provetes polidos, do que nos provetes tratados superficialmente com a técnica de *Micro Shot Peening*.

- **Dois blocos de carga**

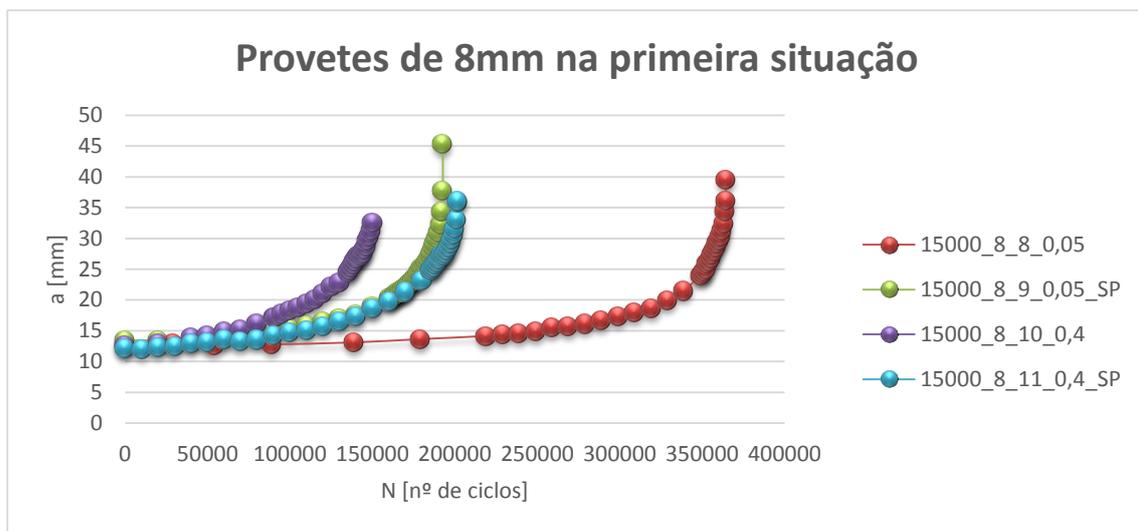


Figura A. 4. Comparação de curvas a/N em provetes com 8mm e ensaiados com dois blocos de carga na primeira situação

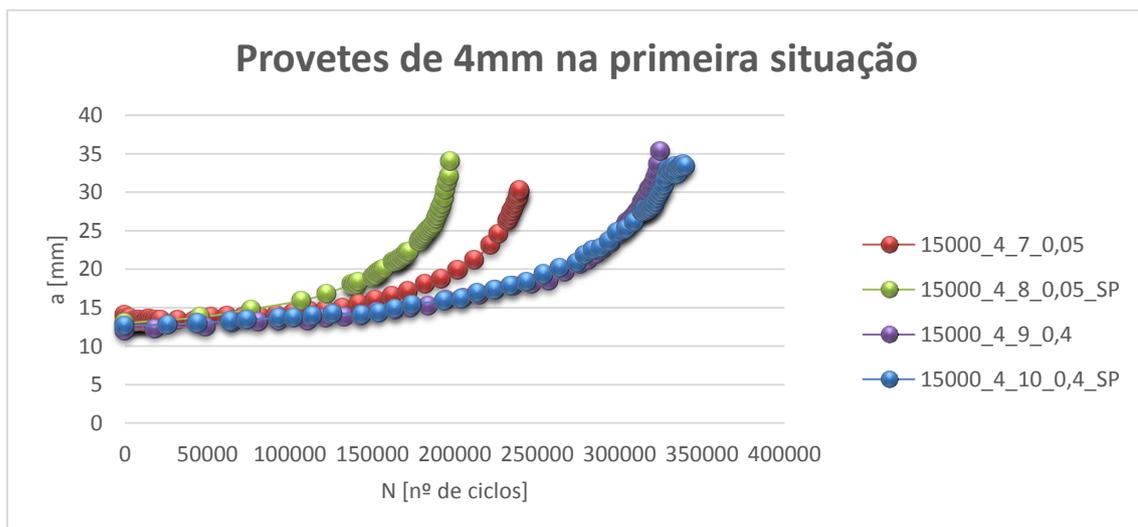


Figura A. 3. Comparação de curvas a/N em provetes com 4mm e ensaiados com dois blocos de carga na primeira situação

Utilizando dois blocos de carga com um intervalo de 1500 ciclos em carga normal foi possível observar uma maior vida nos provetes com *MSP*, com exceção dos provetes com 8mm e uma razão de carga de 0,05, onde os resultados obtidos se identificam com os restantes ensaios de fadiga realizados ao longo da dissertação.

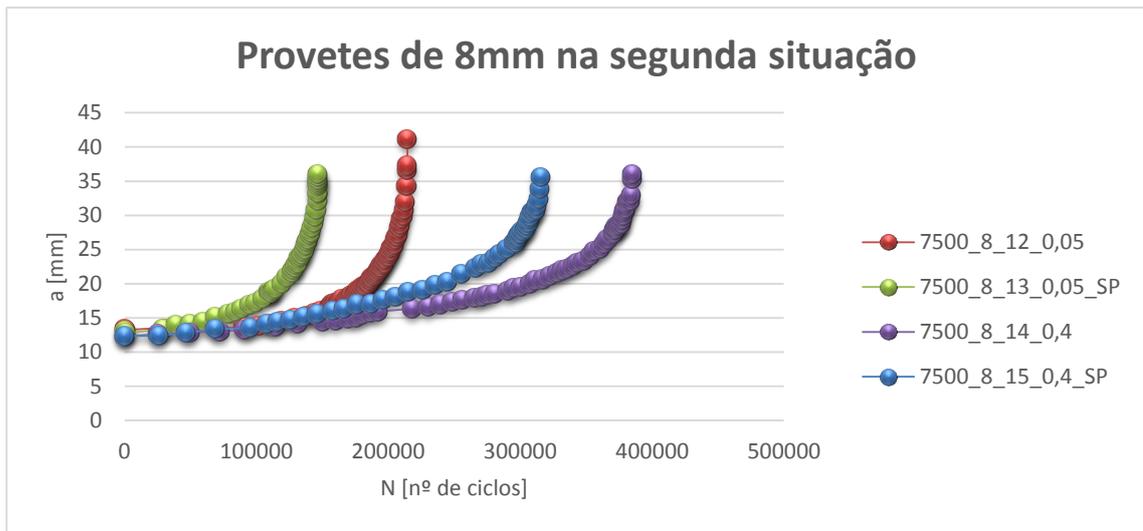


Figura A. 5. Comparação de curvas a/N em provetes com 4mm e ensaiados com 2 blocos de carga na segunda situação

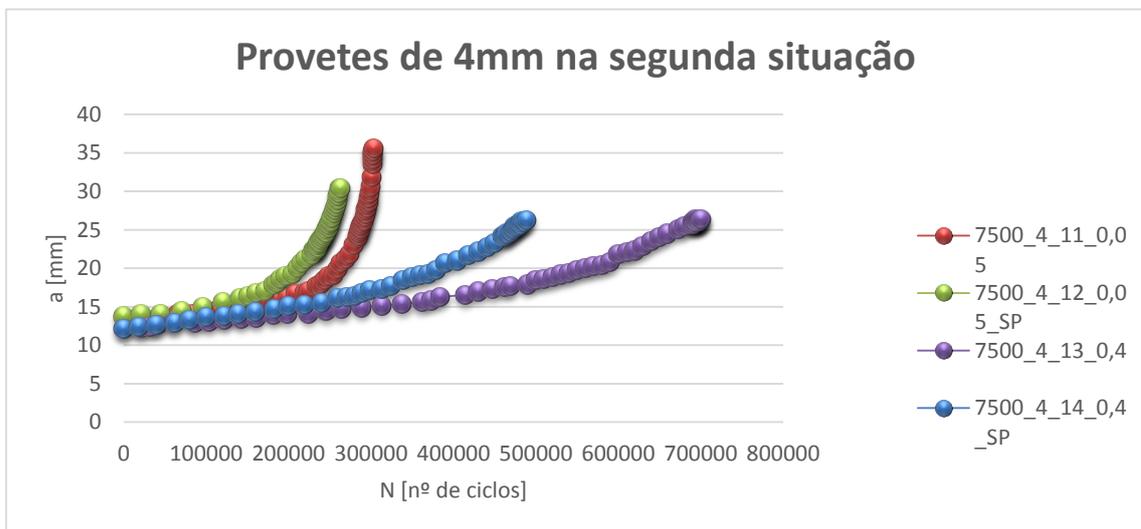


Figura A. 6. Comparação de curvas a/N em provetes com 8mm e ensaiados com 2 blocos de carga na segunda situação

Ao examinar as curvas a/N na segunda situação de sobrecarga também se observa uma vida à fadiga superior no caso dos provetes polidos, devido aos diversos defeitos superficiais provenientes do tratamento de *Micro Shot Peening*.

ANEXO B

Medição de sobrecargas

A medição das sobrecargas não foi alvo de análise profunda, uma vez que os resultados obtidos não foram os melhores.

Apenas em dois provetes, dos dezasseis ensaiados com dois blocos de carga, são visíveis as sobrecargas induzidas no provete. Ambos os provetes têm uma espessura de 8mm e uma razão de carga $R=0,4$, sendo que o que os diferencia é a existência de tratamento superficial de *Micro Shot Peening* num deles.

O objectivo deste ponto seria a obtenção de curvas $x_1 ; a_1$, estando estas duas incógnitas representadas na figura B.1 e na equação B-1.

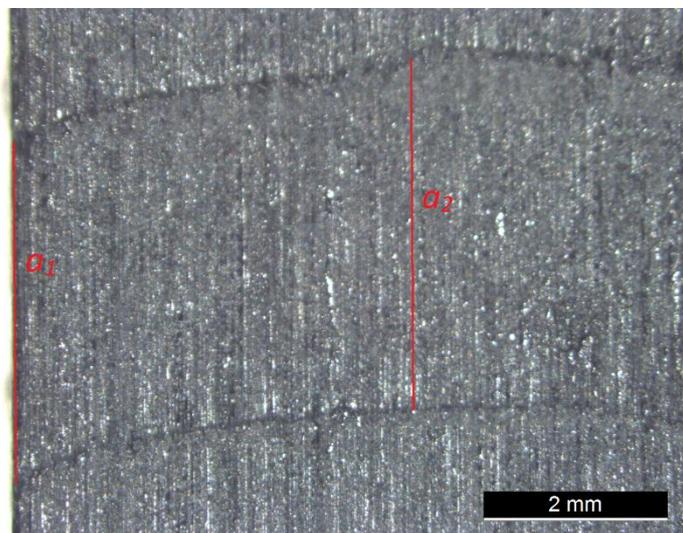


Figura B.1. Incógnitas a_1 e a_2 para obtenção das curvas $x_1 ; a_1$

$$x_1 = a_2 - a_1 \quad (\text{B-1})$$

Ao calcular as curvas em questão (Figura B.2) verificou-se a irregularidade das mesmas, não podendo, assim, discutir qualquer conclusão sobre estas.

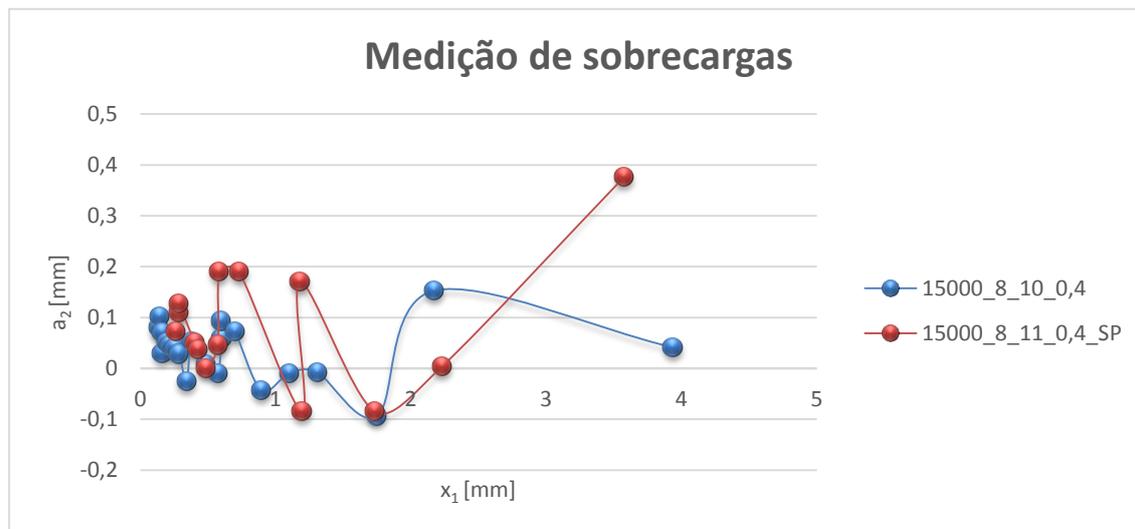


Figura B.2. Irregularidade das curvas $x_1;a_1$ obtidas a partir dos provetes 15000_8_10_0,4 e 15000_8_11_0,4_SP