



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Propagação de fendas de fadiga em aços sinterizados a laser

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

Fatigue crack propagation of laser sintered steels

Autor

Ricardo César Caldas Almeida

Orientadores

Professor Doutor José António Martins Ferreira

Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa

Júri

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

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

Orientador Professor Doutor José António Martins Ferreira
Professor da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2016

“Se não se puder destacar pelo talento, vença pelo esforço.”

Dave Weinbaum

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho aqui apresentado contou com o apoio e colaboração de algumas pessoas às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao Professor Doutor José António Martins Ferreira e ao Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa pela orientação e oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Professor Joel Alexandre da Silva Jesus pelo tempo e dedicação dispensados na execução deste trabalho.

Ao Professor Doutor Amílcar Ramalho pela disponibilidade e comentários que ajudaram a completar este trabalho.

À Erofio, ao Professor Doutor Carlos Capela e ao Engenheiro Luís pela disponibilização dos provetes e amarras para a realização dos ensaios.

Aos meus amigos e colegas que estiveram sempre presentes pelo apoio ao longo de todo este percurso.

À Caren Jane Rodrigues um agradecimento especial por todo o apoio, motivação e força que me faz enfrentar cada dia.

O autor agradece o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projeto de 016713 (PTDC/EMS-PRO/1356/2014), no âmbito do qual a tese foi desenvolvida, financiado pelo Projeto 3599 PROMOVER a Produção Científica e Desenvolvimento Tecnológico e a Constituição de Redes Temáticas (3599-PPCDT) e por fundos FEDER. Agradecem também à empresa EROFIO SA, Batalha, pelo fornecimento das amostras para ensaio.



Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, INOVAÇÃO E DO ENSINO SUPERIOR

Resumo

Devido ao avanço tecnológico, aumentou a necessidade do fabrico de peças de geometria complexa e de prototipagem rápida. Os processos de fabrico convencionais são relativamente limitados em termos de geometria da peça, o que originou o desenvolvimento de processos por adição. Os processos de manufatura por adição (AM) permitem uma liberdade total quanto á geometria do componente, e uma rápida prototipagem uma vez que são utilizados desenhos em CAD, diretamente transferidos para a máquina em questão.

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico á propagação por fadiga de elementos sinterizados a laser, de aço 18Ni300, mais precisamente obtenção das curvas de propagação de fenda, obtenção das constantes para aplicação da lei de Paris, determinação do limiar de fadiga, avaliação do efeito de sobrecarga e medição do fecho de fenda, para $R=0$, $R=0,3$ e $R=0,6$ em provetes fabricados com velocidade de laser de 200 mm/s e para $R=0$ para 400 mm/s.

O presente estudo permitiu concluir que a razão de tensões não afeta substancialmente a velocidade de propagação. Pelo método usado para medição de fecho de fenda não foi possível detetar fecho em qualquer ensaio. A sobrecarga não provoca um efeito muito significativo no material, no entanto o efeito transitório é mais pronunciado para níveis de sobrecarga superiores. Concluiu-se também que a fenda tende a propagar-se entre camadas de sinterização.

Palavras-chave: Sinterização, DMLS, Propagação, Limiar de fadiga, Sobrecarga, Fecho de fenda.

Abstract

Due to the technological advance, the need for complex geometry components and rapid prototyping have increased. The conventional manufacturing methods are relatively limited in terms of geometry, which lead to the development of additive processes. Additive manufacturing (AM) processes allow total geometric freedom as well as rapid prototyping, since CAD files are directly transferred to the machinery.

The objective of this essay is to evaluate the fatigue behavior of laser sintered components, made from 18Ni300 steel alloy, more precisely the fatigue crack growth rate, Paris law application, fatigue threshold, overload influence and crack closure for the load ratios of $R=0$, $R=0.3$ and $R=0.6$, with specimens manufactured by laser sintering using a laser speed of 200 and $R=0$ for laser speed of 400 mm/s.

This research revealed that the load ratio have little effect on the crack growth rate, with the measurement method used there was no crack closure in any experiment, the influence of overload cycles was not very significant, however the transient behavior was more noticeable with higher overload ratios, it was also noticed that the fatigue crack has the propensity to grow through the interface between sintering layers.

Keywords Sintering, DMLS, Crack growth, Threshold, Overload, Crack Closure.

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	viii
Simbologia e Siglas	ix
Simbologia.....	ix
Siglas	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Processo de Manufatura por adição	3
2.2. Propagação de fendas por fadiga	5
2.2.1. Fator de intensidade de tensão.....	6
2.2.2. Curvas da/dN – ΔK	8
2.2.3. Lei de Paris	9
2.2.4. Fecho de fenda.....	10
2.2.5. Sobrecarga	12
3. Materiais e métodos.....	15
3.1. Caracterização do material.....	15
3.2. Geometria dos provetes	16
3.3. Preparação dos provetes.....	17
3.4. Máquina de ensaios.....	17
3.5. Método experimental	18
3.5.1. Ensaio com ΔK crescente	19
3.5.2. Ensaio com ΔK decrescente	19
3.6. Determinação do fecho de fenda.....	19
3.7. Efeito da sobrecarga.....	21
3.8. Análise da superfície de fratura	22
4. Análise de resultados	24
4.1. Curvas da/dN – ΔK	24
4.2. Lei de Paris	26
4.3. Análise das curvas carga-deslocamento.....	28
4.4. Influência das sobrecargas	30
4.5. Análise às superfícies de fratura	34
5. Conclusões.....	41
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustrações das primeiras patentes de AM de A) Ciraud e B) Housholder (modificado de [1]).....	4
Figura 2. Ilustração do processo DMLS (Modificado de www.EOS.info).	5
Figura 3 - Exemplo de ciclo de cargas.	6
Figura 4 - Modos de fratura.....	7
Figura 5 - Evolução típica da curva $da/dN - \Delta K$	9
Figura 6 - Aplicação da Lei de Paris na curva $da/dN - \Delta K$	10
Figura 7 - Exemplo de fecho de fenda em gráfico de tempo por K e abertura de fenda.....	11
Figura 8 - Mecanismos de fecho de fenda: a) sem fecho, fecho induzido por b) plasticidade, c) óxidos e d) rugosidade (modificado de [12]).	11
Figura 9 - Exemplo de influência significativa das sobrecargas no material (comprimento de fenda por número de ciclos).	13
Figura 10 - Gráfico de tensão em relação ao tempo de um ciclo de sobrecarga.	13
Figura 11 – Relação entre dimensões do provete C(T) segundo a norma ASTM E647 – 00 (Modificado de [8]).	16
Figura 12 - Equipamento usado para os ensaios.	18
Figura 13 - Provete para determinação do fecho de fenda, e extensómetro usado.....	20
Figura 14 - Exemplo de gráfico carga-deslocamento com fecho de fenda (modificado de [22])......	21
Figura 15 - Microscópio eletrónico por varrimento <i>Philips XL 30</i>	22
Figura 16 - Rugosímetro <i>Mitutoyo SURFTEST SJ-500</i>	23
Figura 17 – Curvas $da/dN - \Delta K$ obtidas para a velocidade de 200 mm/s.	24
Figura 18 - Curvas $da/dN - \Delta K$ das velocidades de laser 200 e 400 mm/s para R=0.....	25
Figura 19 - Deflexão de fenda observada durante e após os ensaios.	26
Figura 20 - Aplicação da lei de Paris nas curvas $da/dN - \Delta K$ obtidas para 200mm/s.	27
Figura 21 - Comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os de Osgood [23]....	28
Figura 22 - Curvas carga-deformação obtidas para R=0.....	29
Figura 23 - Curvas carga-deformação obtidas para R=0,3.....	29
Figura 24 - Curvas carga-deformação obtidas para R=0,6.....	30

Figura 25 - Gráfico da influência da sobrecarga no avanço de fenda pelo número de ciclos (ΔK de 10 $MPa\sqrt{m}$).....	31
Figura 26 - Gráfico da Influência da sobrecarga na velocidade de propagação pelo avanço de fenda (ΔK de 10 $MPa\sqrt{m}$).	31
Figura 27 - Gráfico da influência da sobrecarga no avanço de fenda pelo número de ciclos (ΔK de 15 $MPa\sqrt{m}$).....	32
Figura 28 - Gráfico da Influência da sobrecarga na velocidade de propagação pelo avanço de fenda (ΔK de 15 $MPa\sqrt{m}$).	32
Figura 29 - Curvas carga-deformação obtidas para R=0, 0,05 mm após aplicação de sobrecarga.....	33
Figura 30 - Efeito de deformação das cristas de rugosidade típico observado a) Início de fenda b) perto do local de rotura).	34
Figura 31 - Perfil de rugosidade da superfície de fratura do provete de 200 mm/s em R=0, com camada por comprimento de fenda.....	35
Figura 32 - Perfil de rugosidade da superfície de fratura do provete de 200 mm/s em R=0,3, com camada por comprimento de fenda.....	35
Figura 33 - Perfil de rugosidade da superfície de fratura do provete de 200 mm/s em R=0,6, com camada por comprimento de fenda.....	36
Figura 34 - Perfil de rugosidade da superfície de fratura do provete de 400 mm/s em R=0, com camada por comprimento de fenda.....	36
Figura 35 - Imagem microscópica da microestrutura ao longo da fenda para 200 mm/s e R=0.	37
Figura 36 - Imagem microscópica da microestrutura ao longo da fenda para 200 mm/s e R=0,3.....	37
Figura 37 - Imagem microscópica da microestrutura ao longo da fenda para 200 mm/s e R=0,6.	38
Figura 38 - Imagem microscópica da microestrutura ao longo da fenda para 400 mm/s e R=0.	38
Figura 39 - Defeito na superfície de fratura, provete de 200 mm/s.....	39
Figura 40 - Defeito na superfície de fratura, provete de 200 mm/s.....	39
Figura 41 - Defeitos volumosos na superfície de fratura, provete de 400 mm/s.....	40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Elementos da liga 18Ni300 [2].....	15
Tabela 2 - Propriedades da liga 18Ni300 [2].....	16
Tabela 3. $\Delta K [MPa\sqrt{m}]$ inicial para as diferentes razões de tensão.....	19
Tabela 4 - Valores de aplicação de sobrecarga nos ensaios.	21
Tabela 5 - Parâmetros da lei de Paris.	27
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de sobrecarga.	33

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

K – Fator intensidade de tensões

ΔK – Gama do fator intensidade de tensões

Y – Fator geométrico

a – Comprimento de fenda

$\Delta\sigma$ – Gama de tensão

σ_{\min} – Tensão mínima

σ_{\max} – Tensão máxima

ΔP – Gama de carga

P_{\min} – Carga mínima

P_{\max} – Carga máxima

R – Razão de tensões

C, m – Constantes da lei de Paris

N – Número de ciclos

ΔK_{th} – Limiar de propagação por fadiga

ΔK_{eff} – Gama do fator intensidade de tensões efetivo

K_{op} – Fator intensidade de tensão de abertura de fenda

P_{op} – Carga de abertura

K_{\max} - Fator intensidade de tensão máximo

U – Parâmetro normalizado da razão de carga

OLR – Razão de sobrecarga

ΔK_{ol} – Variação do fator intensidade de tensões de sobrecarga

N_{ol} – Número de ciclos em que foi aplicada a sobrecarga

a_{ol} – Comprimento de fenda em que foi aplicada a sobrecarga

N_p – Número de ciclos após sobrecarga

a_p – Comprimento de fenda após sobrecarga

Siglas

AM – Additive Manufacturing

DMLS – Direct Metal Laser Sintering

MFLE – Mecânica da Fratura Linear Elástica

MEV – Microscopia eletrônica de varrimento

1. INTRODUÇÃO

Devido ao elevado avanço tecnológico, houve necessidade de criar métodos de manufatura de peças de alta precisão, com geometrias complexas e com boa resistência mecânica, esta necessidade tecnológica deu origem ao desenvolvimento de um método inicialmente idealizado em 1971.

O processo de sinterização de metais por meio de laser, é um método de manufatura de componentes em metal por adição (AM) ainda em desenvolvimento. Como tal é de interesse o estudo aprofundado das características mecânicas do produto final deste processo.

Por ser uma tecnologia relativamente recente, é ainda muito dispendiosa em relação a outros processos convencionais subtrativos, por este motivo é interessante avaliar o comportamento mecânico dos componentes obtidos através deste método. Os materiais usados são já bastante variados havendo uma ampla escolha dependendo da aplicação do projeto em questão. Existem já matérias-primas para AM de diversas ligas metálicas.

O objetivo deste trabalho é analisar os parâmetros de fadiga de componentes sinterizados, viabilizando ou não o uso destes materiais em projeto mecânico. Os parâmetros a analisar serão a propagação de fenda á fadiga em amplitude de tensão constante, efeito de sobrecarga e fecho de fenda.

No segundo capítulo irá ser apresentada uma descrição mais detalhada sobre o processo de fabrico utilizado para produzir os provetes para este estudo, bem como uma pequena revisão sobre os conceitos teóricos necessários para uma caracterização à propagação de fadiga de materiais.

No terceiro capítulo temos uma descrição detalhada sobre o material usado, geometria e dimensões do provete, máquina de ensaio utilizada, bem como uma descrição pormenorizada sobre os passos para a realização de todos os ensaios efectuados e sobre a análise à superfície de fratura efetuada.

No quarto capítulo irão ser discutidos os resultados obtidos, comparando-os com outros materiais para determinar se o material estudado é de interesse em projeto de sistemas mecânicos. Iremos também avaliar o fecho de fenda, se é detetável ou não, e se sim qual a

sua magnitude. As imagens microscópicas das superfícies de fratura irão ser analisadas para determinar o mecanismo de fratura presente durante a propagação de fenda á fadiga.

Finalmente no quinto e último capítulo será apresentado um resumo das conclusões tiradas pela análise dos resultados obtidos ao longo deste estudo, assim como sugestões para estudos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma pequena revisão sobre os processos de AM em desenvolvimento, tal como a história do surgimento do referido processo e o progresso da sua evolução, será também feita uma descrição sobre o seu funcionamento.

irão ser expostos os conceitos científicos que serão necessários para a correta caracterização das propriedades de propagação á fadiga de um material usando métodos experimentais.

Serão também apresentadas as propriedades do aço 18Ni300 que será o material de estudo neste trabalho, tal como a sua microestrutura, após o seu processamento por AM

2.1. Processo de Manufatura por adição

O processo de manufatura por adição AM, embora ainda em desenvolvimento, foi inicialmente idealizado em 1971 por Pierre Ciraud, que tentou patentear a sua ideia, descrevendo-a como um processo de manufatura de materiais metálicos, com qualquer geometria, por aplicação de pó metálico aquecido localmente por meio de um feixe de energia [1]. Este processo não foi desenvolvido nesta época por falta de meios tecnológicos, tanto informáticos como tecnologia laser. Em 1977 Ross Housholder descreveu um processo semelhante ao de Ciraud, no entanto já fazia referência ao fabrico de componentes por camadas, tecnologia informática e de laser. Sendo um inventor independente acabou por apenas usar uma variação deste processo que não envolvia lasers, uma vez que esta tecnologia embora já existisse, ainda tinha um custo muito elevado [1]. Os esquemas usados nas patentes de Ciraud e Householder estão apresentados na Figura 1.

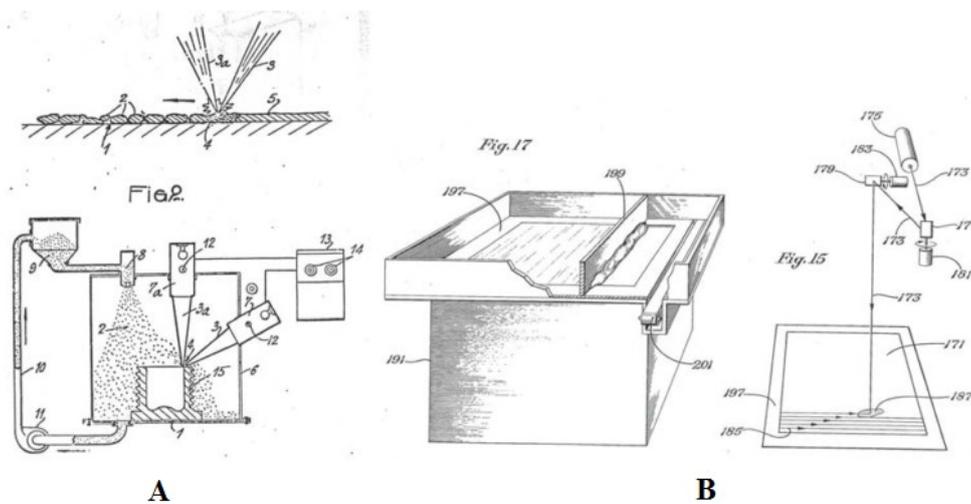


Figura 1 - Ilustrações das primeiras patentes de AM de A) Ciraud e B) Housholder (modificado de [1]).

Em meados dos anos 80, este processo começou a ser comercializado e desenvolvido por diversas entidades até aos dias de hoje [1].

O processo de sinterização a laser permite uma liberdade total na geometria do componente a projetar sendo assim uma ótima opção para projetos complexos, pelo que atualmente esta tecnologia é já utilizada na indústria automóvel, aeronáutica, biomédica, de turbo-maquinaría e de moldes [2].

AM consiste na adição de material por camadas, fazendo uso de um laser de alta potência, que é incidido localmente, fundindo o pó metálico que é previamente adicionado, dando origem a uma fina secção do componente. Após cada camada o recipiente onde se encontra o componente sobe (a altura da camada adicionada) e um braço de varredura adiciona novamente o pó, ficando assim em condições de começar outra iteração, ou seja, adição de outra camada. Na Figura 2 está uma representação esquemática do funcionamento deste processo. A espessura da camada adicionada é um parâmetro variável tipicamente entre 20 a 100 μm [3]. Depois do processo concluído é removido o componente imerso no pó, que pode ser reutilizado [4].

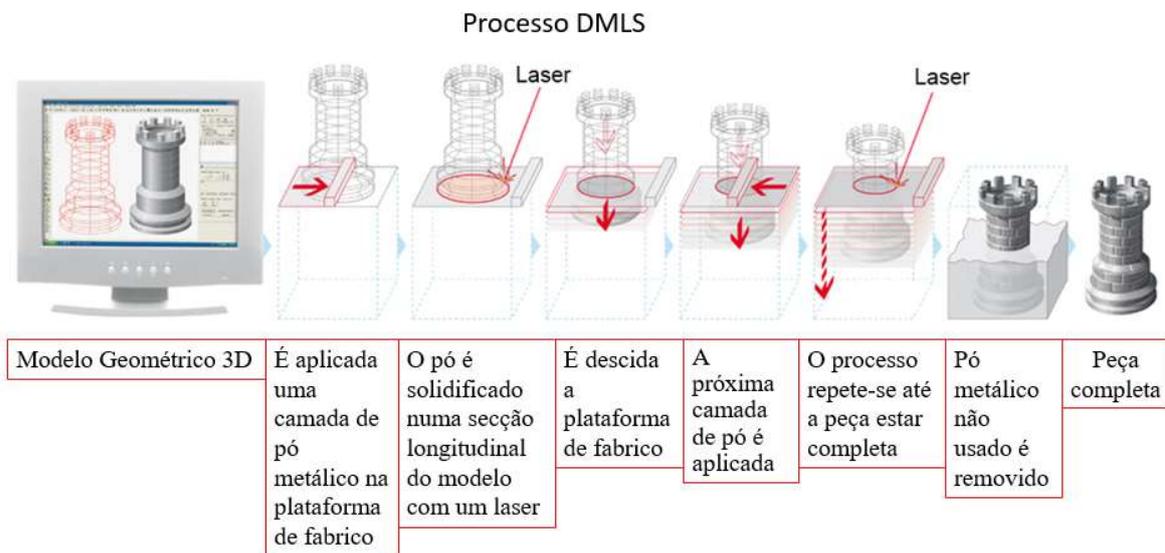


Figura 2. Ilustração do processo DMLS (Modificado de www.EOS.info).

O projeto dos componentes é realizado em CAD e pode ser diretamente usado para o fabrico neste processo uma vez que o próprio sistema informático converte o desenho para um modelo de camadas [5].

O nome do processo varia com cada fabricante, sendo todos denominados por AM, porém podem ser também designados por SLM, SLS, ou DMLS, este ultimo caso é usado pela marca CONCEPT LASER, que é o fabricante da máquina usada para o fabrico das amostras utilizadas neste estudo.

Os materiais usados no fabrico através deste processo são variados, titânio, ligas com base de níquel, ferro, titânio, alumínio, bronze, cobre, aços inoxidáveis, aços rápidos e de trabalho a quente, bem como compósitos de matriz metálica [2,3].

2.2. Propagação de fendas por fadiga

O conhecimento da resistência á fadiga de um componente sujeito a cargas dinâmicas é importante em projeto mecânico, sendo que durante a fase de projeto é necessário prever o tempo de vida de componentes críticos para planear as suas substituições atempadamente sem que ocorra falha catastrófica do equipamento.

O processo de propagação de fendas por fadiga de um determinado componente mecânico está dividido em três fases, começando pela nucleação de fenda, crescimento, e

por fim a propagação instável até um comprimento de fenda tal, que a secção de material restante não suporta as cargas aplicadas e sofre de rotura. A fase de nucleação ocorre geralmente onde existam pequenos defeitos, gerando uma concentração de tensões mais elevada.

No caso de um componente mecânico sujeito a um ciclo de cargas, é relativamente difícil observar o dano causado pelo processo de fadiga, neste âmbito é necessário ter um conhecimento substancial das propriedades de fadiga de um dado material, para uso em projeto de sistemas mecânicos.

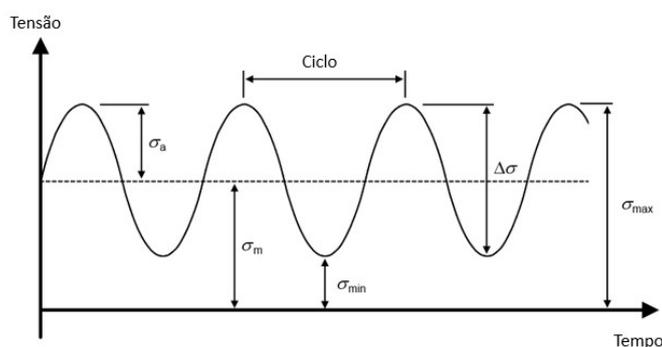


Figura 3 - Exemplo de ciclo de cargas.

Neste subcapítulo será apresentada uma revisão dos conceitos gerais necessários para fazer uma análise correta e dentro da norma internacional.

2.2.1. Fator de intensidade de tensão

O uso do fator de intensidade de tensão, K , para caracterizar a propagação de fendas foi introduzido por Irwin [6] usando os métodos analíticos de Westergaard [7], pois o método de caracterização da propagação de fendas de fadiga é baseado na MFLE, uma vez que na ponta da fenda a zona de deformação plástica é muito inferior à zona de deformação elástica.

A fratura causada pela fenda de fadiga pode ser caracterizada por três modos como está exemplificado na Figura 4, no entanto o modo I é o mais predominante em condições de solitação, por esta razão os estudos sobre propagação de fendas por fadiga são realizados neste modo. Existem casos específicos durante a propagação de uma fenda

em que pode de fato ocorrer fratura em modo II, estes casos irão ser descritos nos capítulos seguintes.

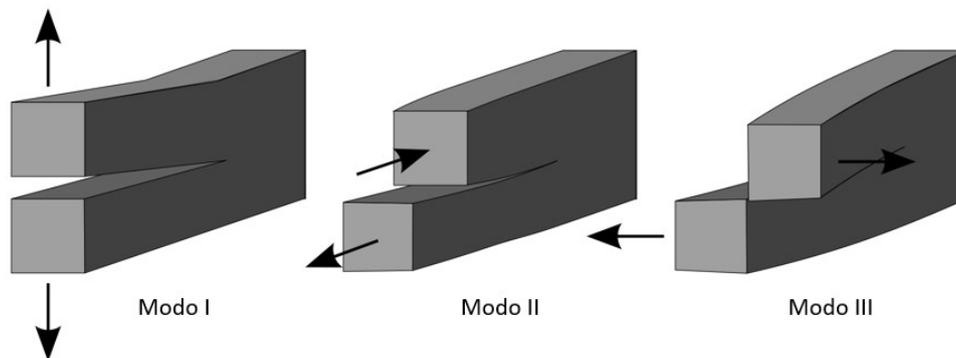


Figura 4 - Modos de fratura.

O parâmetro K é entendido como a concentração de tensões, neste caso, induzida pela fenda ou entalhe, sendo dependente do seu comprimento, e da própria geometria do componente. K pode ser calculado usando a seguinte equação:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}, \quad (2.1)$$

onde σ é a tensão aplicada, a o comprimento de fenda, e Y é o fator geométrico que é um parâmetro dependente da geometria do componente, da fenda e do carregamento.

Nos ensaios de fadiga, aplicando uma carga cíclica, apenas faz sentido quantificar a carga durante o ensaio pela variação de tensão, $\Delta\sigma$, que é dado pela equação (2.2), e pela razão de tensões R , que será o quociente entre as tensões máxima e mínima, mostrado na equação (2.3).

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}. \quad (2.2)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}. \quad (2.3)$$

Devido ao fato de, nos ensaios de fadiga, se recorrer à aplicação de cargas variáveis, o fator K também vai ser usado como ΔK ou seja:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}. \quad (2.4)$$

Assim é possível escrever a equação de K anteriormente exposta, da seguinte forma:

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

Como o fator geométrico Y não é de fácil obtenção, existem hoje em dia formulações de ΔK para diversas geometrias, como é o caso da geometria dos provetes usados neste estudo.

Segundo a norma ASTM E 647 00 [8], para a geometria dos provetes usados a formulação para a determinação do fator intensidade de tensão é dado pela equação:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4), \quad (2.6)$$

as variáveis B , W e a são relativos à geometria do provete e vão ser revistos no subcapítulo 3.2, ΔP é a variação de carga aplicada no ensaio, e α é um parâmetro adimensional dado pela expressão:

$$\alpha = \frac{W}{a}. \quad (2.7)$$

A expressão de ΔK dada pela norma é válida apenas para valores de α maiores ou iguais a 0,2.

2.2.2. Curvas da/dN – ΔK

Para um melhor entendimento do comportamento da propagação de fenda em componentes sujeitos a cargas variáveis Paris et al [9] sugeriram o uso de número de ciclos por incremento de fenda para caracterizar a propagação à fadiga de um material. A partir de um ensaio de fadiga facilmente se recolhem dados capazes de produzir um gráfico do crescimento de fenda por número de ciclos, porém estes resultados só podem ser relacionados com a geometria específica do provete utilizado. Para obter valores que possam ser relacionados com a resistência à fadiga efetiva do material, Paris et al [9] relacionaram os dados referidos anteriormente com o fator de intensidade de tensão, dando origem às curvas da/dN – ΔK . Deste modo teremos resultados aplicáveis a qualquer geometria desde que a formulação de ΔK seja conhecida.

Nas curvas da/dN – ΔK é possível observar claramente os três regimes de propagação, Nucleação (I), Propagação (II), e Propagação Instável (III) (Figura 5).

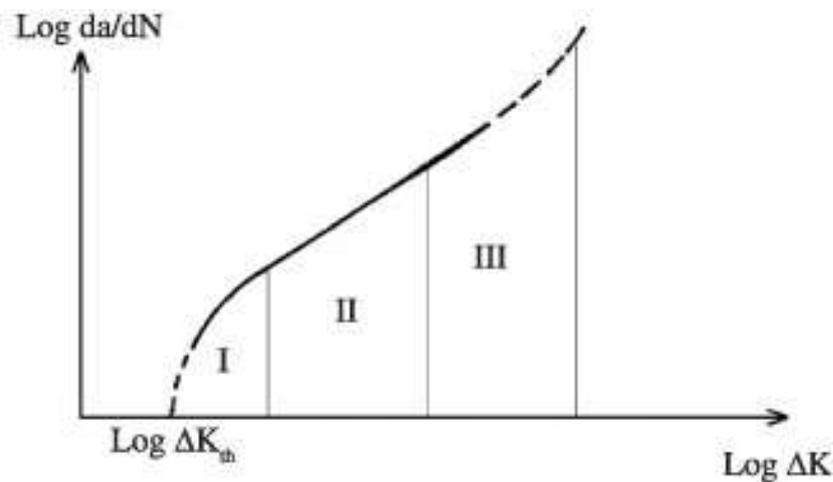


Figura 5 - Evolução típica da curva da/dN - ΔK.

2.2.3. Lei de Paris

Apesar das curvas não terem um comportamento linear nas suas extremidades, grande parte da vida útil de fadiga de um componente é dada no regime de propagação (II), que é aproximadamente linear. Neste âmbito Paris et al [9] introduziram uma relação empírica que ignora os regimes I e III de propagação, aproximando assim a curva da/dN - ΔK de um material, a uma reta em escala logarítmica. Esta relação empírica é dada pela equação:

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

onde C e m são constantes obtidas experimentalmente. A aplicação da lei de Paris nas curvas da/dN - ΔK está exemplificada na Figura 6.

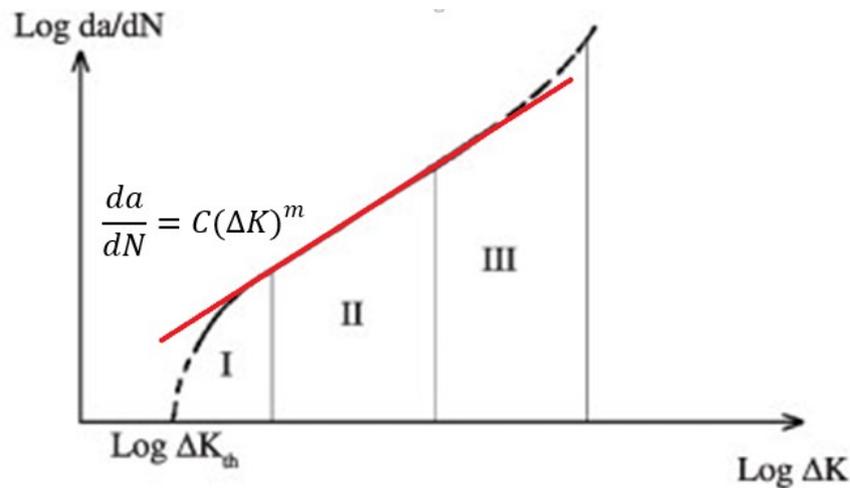


Figura 6 - Aplicação da Lei de Paris na curva $da/dN - \Delta K$.

Esta formulação da lei de Paris pode dar origem a erros de projeção de manutenção se for aplicada fora dos limites da fase de propagação do material, deste modo é necessário o conhecimento desta lei e dos seus limites.

2.2.4. Fecho de fenda

Elber [10] introduziu o conceito de fecho de fenda para explicar algumas anomalias detetáveis nos ensaios de fadiga. Este fenómeno provoca uma interação entre as superfícies da fenda prematuramente causando o seu fecho antes do ciclo de cargas atingir P_{min} , reduzindo assim a variação do fator de intensidade de tensões nas vizinhanças da extremidade da fenda e provocando um eventual aumento de vida por fadiga.

No caso de existir fecho de fenda a equação (2.4) dada anteriormente deixa de estar válida e o ΔK efetivo passa ser dado pela equação:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}, \quad (2.9)$$

em que K_{op} , é o valor de K necessário para o início de abertura da fenda.

Para quantificar e melhor avaliar o fecho de fenda, é útil usar uma razão entre ΔK_{eff} e o valor inicial de ΔK sem considerar o fecho de fenda, assim surge a equação:

$$\Delta K_{eff} = U\Delta K, \quad (2.10)$$

em que U é o parâmetro normalizado da razão de carga e é obtido experimentalmente através da medição do fecho de fenda. Na Figura 7 está representada a definição de ΔK_{eff} pelos gráficos de K e abertura de fenda versus tempo.

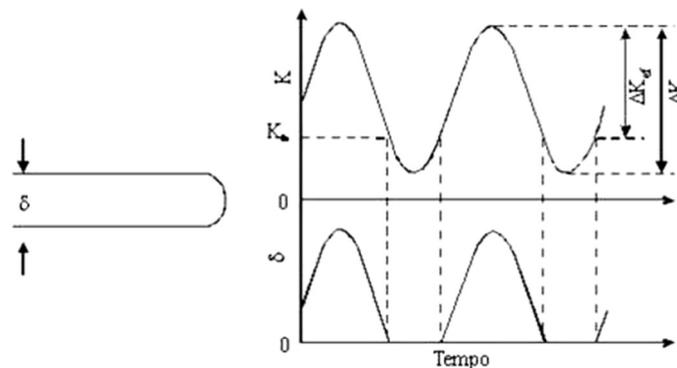


Figura 7 - Exemplo de fecho de fenda em gráfico de tempo por K e abertura de fenda.

No estudo de Elber [10] foram descritos também os parâmetros que influenciavam o fecho de fenda como a velocidade de propagação, o estado de tensão, comprimento de fenda entre outros. Devido às investigações de Elber e de outras posteriores [11–14], foi determinado que existem outros mecanismos responsáveis pelo fecho de fenda, como oxidação das superfícies de fenda, rugosidade de superfície de fenda, entre outras não relevantes para este estudo. No entanto na explicação inicial de Elber, o fecho de fenda por plasticidade da ponta, será a mais predominante [15,16]. Na Figura 8 estão ilustrados os diferentes tipos de fecho de fenda referidos anteriormente.

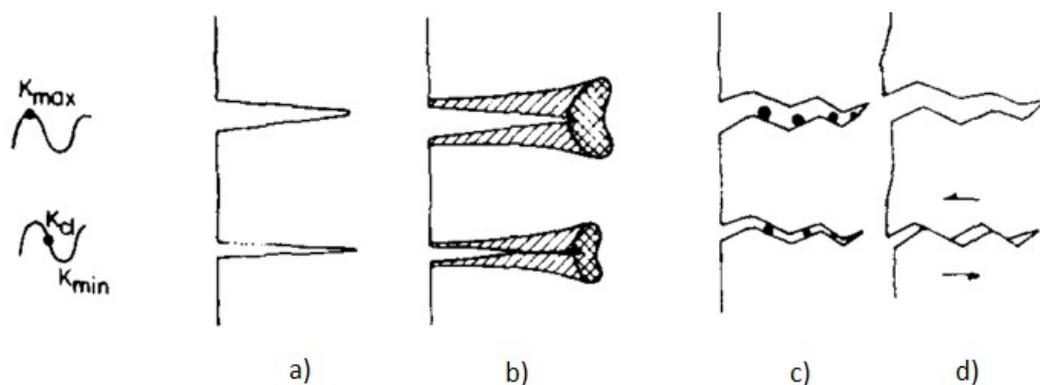


Figura 8 - Mecanismos de fecho de fenda: a) sem fecho, fecho induzido por b) plasticidade, c) óxidos e d) rugosidade (modificado de [12]).

Este fenómeno já foi bastante estudado e grandes esforços foram feitos para um melhor conhecimento deste, pois o fecho de fenda pode alterar significativamente o comportamento à fadiga de um material sem alterar as suas propriedades.

Irão ser descritos os modos de fecho de fenda mais comuns e de mais provável ocorrência no caso deste estudo.

2.2.4.1. Fecho de fenda induzido por plasticidade

Este tipo de fecho de fenda é o mais comum entre os materiais metálicos e está associado à plasticidade na ponta da fenda. Elber [10] sugeriu que não só as zonas na frente da fenda são responsáveis pelo comportamento do material à fadiga, mas também as zonas após a abertura da fenda que foram deformadas anteriormente, formando uma cunha de regiões deformadas proporcionando um contacto prematuro entre superfícies de fratura.

2.2.4.2. Fecho de fenda induzido por rugosidade

Outro tipo de causa para o fecho de fenda é uma interação prematura entre superfícies de fratura devido à rugosidade das mesmas. Durante o ciclo de cargas é possível haver deformação não só em modo I, mas também em modo II, como é o caso de uma deflexão de fenda, caso se verifique esta condição, haverá um desalinhamento das irregularidades da superfície de fratura provocando contacto prematuro [15].

2.2.5. Sobrecarga

Em componentes mecânicos sujeitos a cargas cíclicas, é frequente haver sobrecargas pontuais durante o normal funcionamento, não é incomum essa sobrecarga ser aplicada deliberadamente para usufruir de alguns aspetos benéficos no comportamento do componente à fadiga [17].

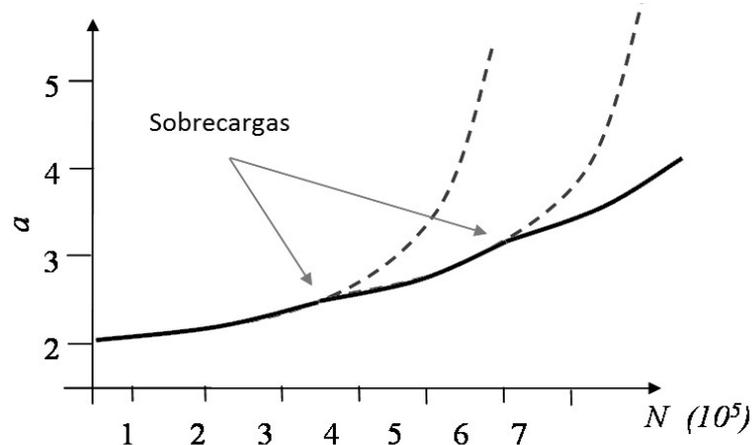


Figura 9 - Exemplo de influência significativa das sobrecargas no material (comprimento de fenda por número de ciclos).

Usualmente em materiais metálicos, durante uma propagação de fenda, se sofrerem a aplicação de uma sobrecarga, a velocidade de avanço de fenda vai diminuir, esta diminuição da velocidade de propagação é transitória e a sua duração é um dos parâmetros ditados pelo material e a analisar, outro parâmetro será a magnitude da queda da velocidade de propagação. O parâmetro a definir para os ensaios de sobrecarga será o rácio entre o ΔK_{ol} que é o fator intensidade de tensão da sobrecarga, e o ΔK_{BL} que é o valor de ΔK base dos ensaios regulares, que é denominado por OLR e é calculado da seguinte forma:

$$OLR = \frac{\Delta K_{ol}}{\Delta K_{BL}} \times 100. \quad (2.11)$$

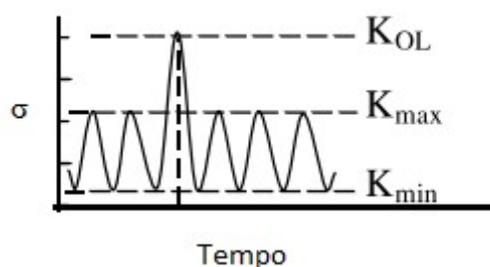


Figura 10 - Gráfico de tensão em relação ao tempo de um ciclo de sobrecarga.

2.2.5.1. Fecho de fenda induzido por plasticidade

Tal como já foi descrito anteriormente no capítulo 2.2.4.1, o fecho de fenda por plasticidade é causado pelas deformações plásticas causadas pela propagação da fenda. Elber

[10] propôs que as condições de fecho de fenda por plasticidade poderiam ser uma resposta ao comportamento transiente observado após aplicação de uma sobrecarga. No momento da sobrecarga esta irá provocar uma deformação excessiva na ponta da fenda ampliando o efeito do fecho de fenda por plasticidade.

2.2.5.2. Arredondamento da ponta da fenda

Existem estudos que suportam o conceito do arredondamento da ponta da fenda como causa do retardamento de velocidade de propagação [18]. A sobrecarga aplicada pode causar uma deformação tal que a ponta da fenda ganha uma forma arredondada, que se comporta como um entalhe, diminuindo assim os valores de K em relação à fenda penetrante, provocando assim um retardamento da propagação, no entanto este mecanismo é pontual e não causa efeitos posteriores ao novo arranque de fenda.

2.2.5.3. Endurecimento do material na ponta da fenda

Esta explicação para o comportamento transitório após sobrecarga foi inicialmente sugerido por Jones [19], e teria como causa um endurecimento do material após a deformação plástica causada pela sobrecarga na zona imediatamente à frente da fenda, este endurecimento poderá causar um retardamento na velocidade de propagação enquanto a fenda não ultrapassar esta zona.

2.2.5.4. Tensões residuais de compressão

Na aplicação da sobrecarga é possível, devido à deformação plástica, que surjam tensões residuais de compressão na zona imediatamente após a extremidade da fenda, que suprimem parte da carga de tração aplicada durante o ensaio. Esta hipótese foi primeiramente sugerida por Schive e Broek [20] para explicar o retardamento de fenda após sobrecarga.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização do material

Os provetes foram fabricados através de DMLS usando uma máquina da marca *CONCEPT LASER* modelo *M3* usando tecnologia *LaserCUSING®*, o material usado foi o aço 18Ni300, com velocidades do laser de 200 mm/s e 400mm/s. Os provetes fabricados com velocidade de 200 mm/s foram ensaiados em R=0, R=0,3 e R=0,6, os provetes com 400 mm/s foram ensaiados apenas em R=0.

Os componentes fabricados por DMLS são normalmente porosos devido a certos fatores inerentes ao processo, como contaminação do pó metálico, evaporação ou simplesmente por falta pontual de material numa determinada camada [2]. A porosidade do material aumenta com o aumento da velocidade de laser, como já foi registado em estudos anteriores [21].

Os provetes apresentam uma certa heterogeneidade, na medida em que para a mesma velocidade do laser, foi possível verificar vários níveis de porosidade superficial entre amostras, possivelmente devido à diferente posição relativa da interface entre camadas de deposição.

A liga 18Ni300 é usada em processos de AM pois tem boas características mecânicas, boa soldabilidade e estabilidade dimensional, na Tabela 1 estão descritos os elementos de liga e na Tabela 2 as propriedades mecânicas. Esta liga após fabricada por este processo apresenta uma microestrutura martensítica.

Tabela 1 - Elementos da liga 18Ni300 [2].

Elemento	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr,	C	Mn	P	Si	Fe
%	18,2	9,0	5,0	0,6	0,05	0,3	0,01	0,04	0,01	0,1	Restante

Tabela 2 - Propriedades da liga 18Ni300 [2].

Velocidade [mm/s]	Porosidade [%]	Densidade [g/m ³]	Dureza [HV1]	Módulo de Young [GPa]	Tensão de rotura [MPa]
200	0,74±0.09	7,42	354±5	168±29	1147±13
400	7,37±0.99	7,49	348±6	155±30	1032±27

3.2. Geometria dos provetes

Em todo os ensaios realizados, foram utilizados os provetes de tensão compacta, designados mais comumente por provetes C(T). Este tipo de provete tem a vantagem de ter o mínimo de material de teste para avaliar o comportamento do crescimento de fenda [8]. As suas dimensões são dependentes de W como pode ser visto na Figura 11, no caso deste estudo foram utilizados provetes com W igual a 36 mm, 6 mm de espessura e a_n de 7 mm.

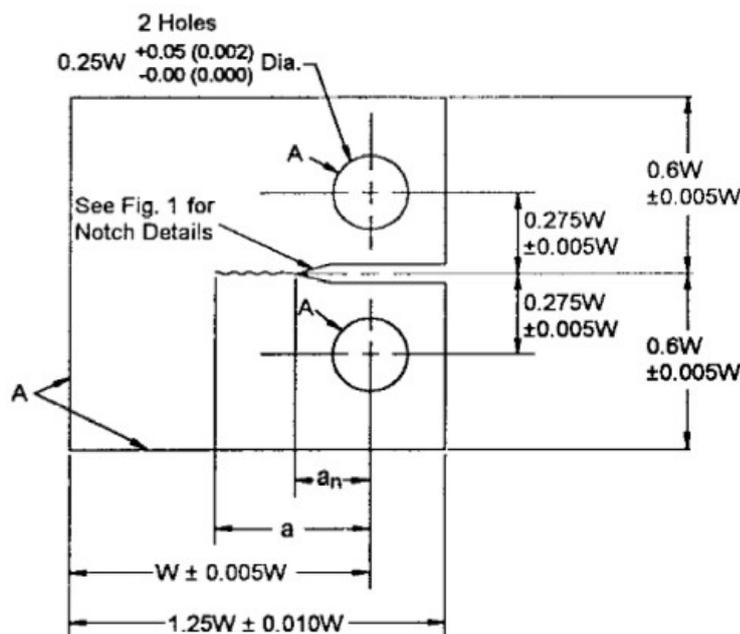


Figura 11 – Relação entre dimensões do provete C(T) segundo a norma ASTM E647 – 00 (Modificado de [8]).

Usando a equação (2.6) para determinar o fator intensidade de tensões, podemos constatar que a condição dada na equação (2.7) não é válida para a geometria inicial do entalhe do provete uma vez que a_n é igual a 7 mm, temos $\alpha \approx 0,194$ que é inferior a 0,2, no

entanto este parâmetro ultrapassa este valor quando a fenda atinge os 0,25 mm de comprimento após o entalhe, validando assim os valores de ΔK obtidos a partir deste comprimento de fenda.

3.3. Preparação dos provetes

Previamente à realização dos ensaios os provetes foram polidos para uma melhor observação e medição da fenda. Foi usada uma máquina de polimento *Buehler*, e lixas com quatro granulometrias, P360, P600, P1000 e P2500 usadas por ordem crescente. De seguida foi usado um prato de polimento juntamente com pasta diamantada de 3 μm , para um melhor acabamento.

3.4. Máquina de ensaios

Os ensaios de propagação de fenda, limiar e fecho de fenda á fadiga, foram realizados numa máquina de ensaios elétrica *INSTRON ELECTROPULS E10000*, com capacidade de carga dinâmica de 10 kN, esta máquina de ensaios é controlada apenas por computador, através de uma consola virtual e *software* específico para geração de cargas dinâmicas e aquisição de dados (*INSTRON WaveMatrix*). Com este *software* é possível criar sucessões de tarefas com número de ciclos limitados ou não, com controlo de carga, curso da haste, deslocamento ou deformação. Na Figura 12 é mostrado o equipamento utilizado para a realização dos ensaios.

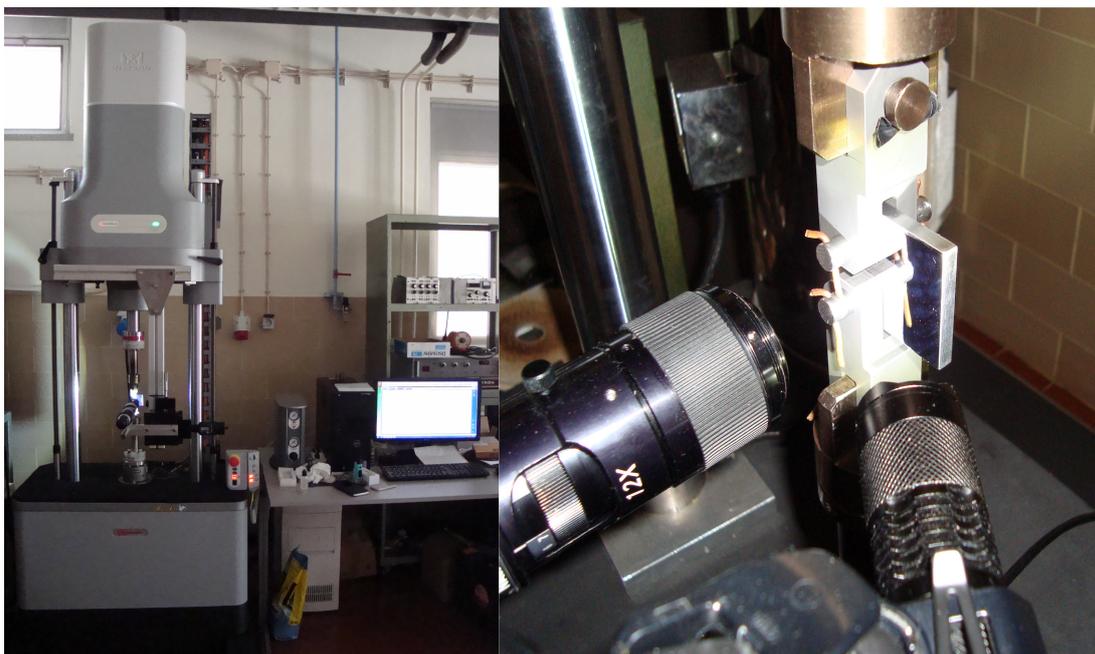


Figura 12 - Equipamento usado para os ensaios.

Para observação e medição do comprimento de fenda foi usada uma luneta fixa, montada num apoio móvel com nónio de precisão até á milésima de milímetro, e como iluminação do provete durante a observação foi usada uma lanterna fixa apontada na direção da face observada.

3.5. Método experimental

Para obtenção de cada curva da $da/dn-\Delta K$ é necessário realizar dois ensaios dividindo assim o mesmo em duas fases, uma para obtenção da parte superior da curva, e outra para obtenção da parte inferior, fazendo uma aproximação ao limiar de fadiga ΔK_{th} .

Os valores iniciais de abertura de fenda de ΔK estão expressos na Tabela 3. Estes valores foram usados para as duas velocidades de laser estudadas. No caso da razão de tensão de $R=0$, para evitar cargas compressivas anómalas geradas pela máquina de ensaios, o valor da razão usado efetivamente foi de $R=0,05$.

Os valores de da/dN foram calculados fazendo uso do método polinomial incremental de cinco pontos, este método está descrito na norma ASTM E 647 – 00 [8].

Todos os ensaios foram efetuados em controlo de carga, fixando assim o valor de ΔP .

Tabela 3. $\Delta K [MPa\sqrt{m}]$ inicial para as diferentes razões de tensão.

Velocidade do laser	R=0	R=0,3	R=0,6
200 mm/s	8	7,5	7
400 mm/s	8	-	-

3.5.1. Ensaio com ΔK crescente

Na primeira fase do ensaio de fadiga foi usada uma tensão constante desde a abertura de fenda, até à rotura do provete, esta tensão foi calculada a partir da formulação contemplada na norma e mostrada anteriormente na equação (2.6), usando os valores de ΔK iniciais descritos no subcapítulo anterior, obtendo assim os valores de ΔP a serem usados nos vários ensaios.

Durante os ensaios foram registados os números de ciclos de carga a cada 0,25mm de incremento de fenda. O ensaio foi dado como terminado quando ocorreu rotura total do provete.

3.5.2. Ensaio com ΔK decrescente

Na segunda fase, depois da abertura de uma pré-fenda com o comprimento de 0,5mm usando as mesmas cargas dos ensaios anteriores, foram efetuadas descidas no valor de ΔP com um decréscimo de 10% a cada 0.5mm de propagação de fenda.

Neste ensaio o número de ciclos foi registado a cada 0,1 mm de incremento de fenda, dando origem a 5 pontos equidistantes em cada patamar de carga. O teste deu-se por terminado quando foram atingidos valores de da/dN inferiores a 2×10^{-7} mm/ciclo.

3.6. Determinação do fecho de fenda

O fecho de fenda foi medido recorrendo a um extensómetro de pinos da marca *SANDNER* com deslocamento máximo de $\pm 0,625$ mm, montado diretamente no provete por meio de furos cegos previamente maquinados na sua face, como é mostrado na Figura 13.

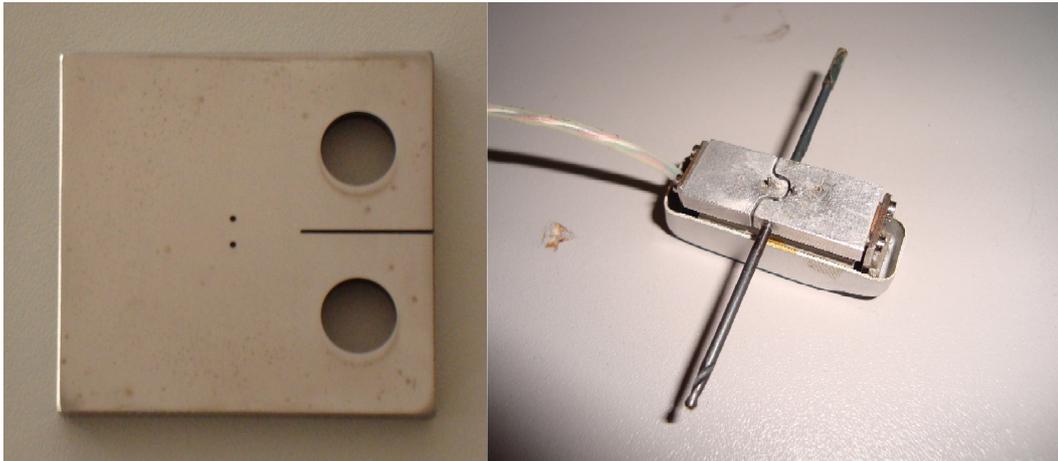


Figura 13 - Provete para determinação do fecho de fenda, e extensômetro usado.

Durante os ensaios com ΔK constante fez-se a medição do fecho de fenda, a partir dos 8 mm de comprimento de fenda, pois os furos para fixação do provete encontravam-se a esta distância da ponta do entalhe.

O fecho de fenda foi medido a cada 0,5mm de incremento de fenda, fazendo uso do *software* da máquina de ensaios para criar um método específico para este efeito, fazendo um ciclo de carga completo, e recolhendo todos os dados simultaneamente. Depois da medição do fecho de fenda o ensaio prosseguiu normalmente.

O objetivo deste ensaio é obter os dados para construção de gráficos de carga por deformação, a inclinação deste gráfico corresponde à rigidez do provete. Uma vez que quando existe fecho de fenda, a rigidez do provete altera-se na carga exata em que a fenda abre ou fecha, é possível identificar por estes gráficos se existe ou não fecho de fenda analisando se existe alguma alteração no declive da curva durante a aplicação de um ciclo de carga. Na Figura 14 está exemplificado um gráfico carga-deslocamento em que existe fecho de fenda. Se de fato existir fecho, os dados obtidos têm que ser sujeitos a um processamento para identificar a carga exata em que este ocorre.

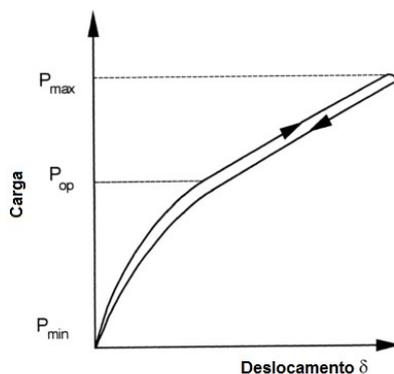


Figura 14 - Exemplo de gráfico carga-deslocamento com fecho de fenda (modificado de [22]).

3.7. Efeito da sobrecarga

Foram ensaiados dois níveis de OLR, 50% e 100% ambos em $R=0$, usando um provete para cada nível. A velocidade do laser usado para o fabrico dos provetes para este ensaio foi 200 mm/s, a velocidade de 400 mm/s não foi estudada.

Nestes ensaios foram iniciadas e propagadas as fendas identicamente aos ensaios com ΔK crescente, os valores das sobrecargas foram obtidos a partir do valor de carga obtido anteriormente. Posteriormente ambos os provetes foram sujeitos à aplicação das sobrecargas em comprimentos de fenda relativos a ΔK de 10 e 15 $MPa\sqrt{m}$, como está exposto na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de aplicação de sobrecarga nos ensaios.

OLR	50%		100%	
$\Delta K [MPa\sqrt{m}]$	10	15	10	15
a [mm]	10	15,5	10	15,5

Foram recolhidos os dados tal como no caso do estudo de propagação, exceto imediatamente após a aplicação da sobrecarga em que a recolha de informação foi efetuada em incrementos de 0,05 mm até ao avanço de fenda completar 0,5 mm após sobrecarga. Esta diminuição no incremento de fenda teve como objetivo aumentar a resolução de resultados naquele período.

Neste ensaio foi usado o método da secante para cálculo de da/dN para reduzir a influência de pontos anteriores à aplicação da sobrecarga. Este método está contemplado na norma ASTM E 647 – 00 [8].

Nestes ensaios foi também medido o fecho de fenda, 0,05 mm após a aplicação da sobrecarga.

3.8. Análise da superfície de fratura

Para determinar o modo de propagação da fenda, foram analisadas as superfícies de fratura dos provetes que sofreram rotura, ou seja os provetes sujeitos ao ensaio com ΔK crescente. As superfícies das amostras foram sujeitas a uma limpeza através de ultrassons enquanto imersas em álcool etílico, de seguida foram analisadas por Microscopia eletrónica de varrimento (MEV) e foi usado um microscópio *Philips XL 30* como mostra a Figura 15, 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 no início de fenda e imediatamente antes da rotura para analisar a maior comparação possível entre ΔK .



Figura 15 - Microscópio eletrônico por varrimento *Philips XL 30*.

Foi posteriormente medida a rugosidade da superfície de fratura através de um rugosímetro da marca *Mitutoyo* modelo *SURFTTEST SJ-500* mostrado na Figura 16, este

equipamento tem uma resolução de medição da unidade de detecção de $0,01 \mu\text{m}$ para o curso máximo de $800 \mu\text{m}$, extensão da medição máxima de $\pm 5 \text{ mm}$, e com uma força de medição de 4 mN . Foram efetuadas medições da rugosidade num comprimento total de 4 mm ,



Figura 16 - Rugosímetro Mitutoyo SURFTEST SJ-500.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo irão ser apresentados os resultados dos ensaios de propagação por fadiga realizados, ou seja as curvas $da/dN - \Delta K$ das razões de tensão especificadas para o aço 18Ni300 produzido por DMLS com velocidades de 200 mm/s e 400 mm/s, bem como o estudo realizado sobre a influência das sobrecargas na propagação de fadiga, e a verificação da existência de fecho de fenda.

Serão também expostas as análises de superfície de fratura, microscopia por MEV e perfis de rugosidade, para tentar correlacionar as características morfológicas com os modos de propagação observados.

4.1. Curvas $da/dN - \Delta K$

Pelos ensaios de fadiga realizados foram obtidas as curvas $da/dN - \Delta K$ para as razões de tensão $R=0$, $R=0,3$ e $R=0,6$, e provetes fabricados com 200mm/s de velocidade de laser.

O gráfico mostrado na Figura 17 está representado em escala logarítmica com da/dN versus ΔK .

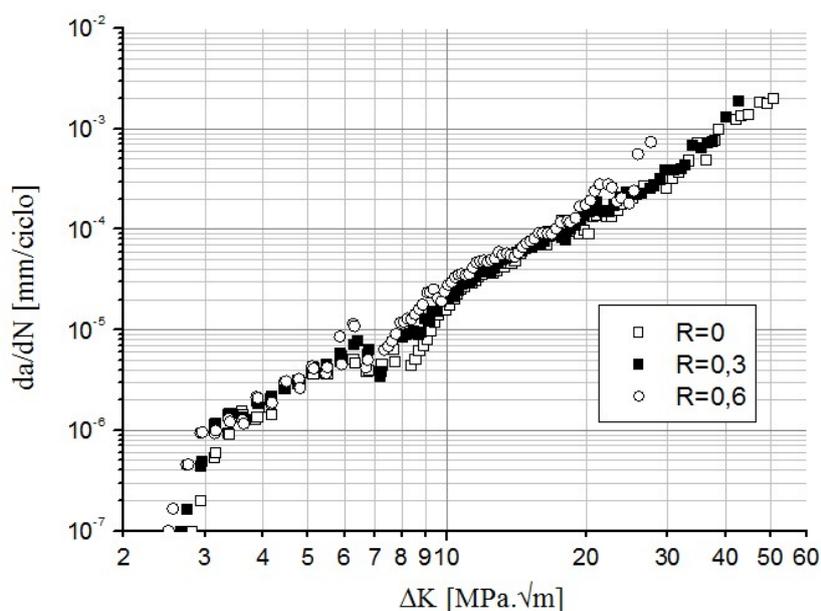


Figura 17 – Curvas $da/dN - \Delta K$ obtidas para a velocidade de 200 mm/s.

Pelo gráfico obtido experimentalmente é possível observar que existe pouca influência da razão de tensões na propagação à fadiga, com exceção do limiar. O limiar de fadiga parece ser um pouco influenciado por R, apresentando um valor mais baixo com o aumento de R, sendo os valores aproximados de ΔK_{th} 2,80, 2,65, 2,50 para R=0, R=0,3 e R=0,6 respectivamente.

Pela Figura 17 é possível observar que existe um comportamento anômalo com uma excessiva dispersão, estes valores correspondem ao início de cada ensaio, ΔK crescente e ΔK decrescente, este fato pode estar relacionado com tensões residuais presentes na zona do entalhe, ou com a presença de fecho de fenda significativo em comprimentos de fenda pequenos, as análises ao fecho de fenda irão ser expostas e discutidas mais adiante.

Foram também obtidas as curvas $da/dN - \Delta K$ para R=0, em provetes fabricados com 400 mm/s de velocidade de laser. Neste caso está representado na Figura 18 o gráfico comparando as curvas $da/dN - \Delta K$ das duas velocidades de laser estudadas para a mesma razão de tensão, ou seja R=0. Não foi possível obter o limiar de fadiga ΔK_{th} pois o ensaio revelou-se mais demorado do que o esperado e não o foi possível terminar.

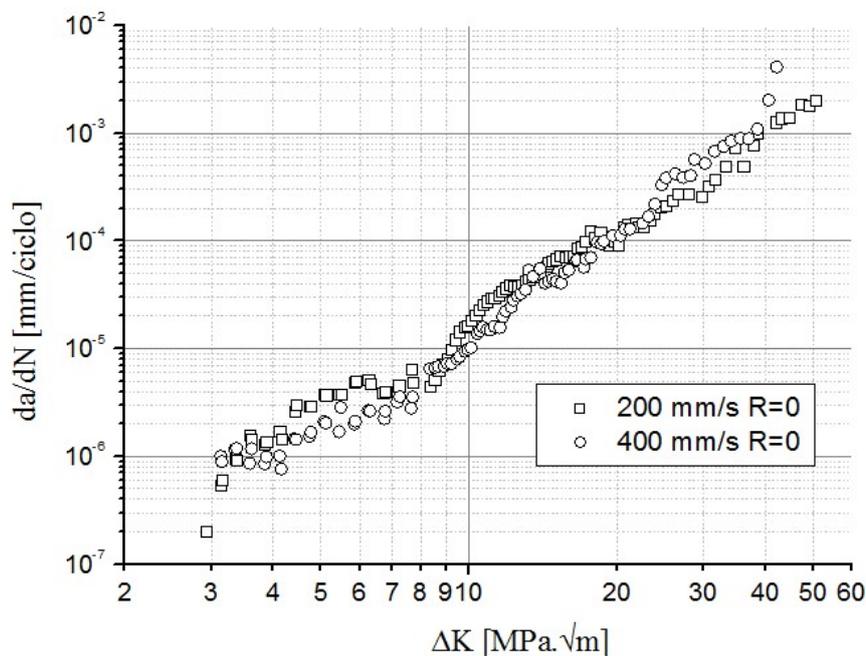


Figura 18 - Curvas $da/dN - \Delta K$ das velocidades de laser 200 e 400 mm/s para R=0.

Durante e após os ensaios verificou-se que a fenda sofre várias deflexões no seu percurso como se pode ver na Figura 19, este fato indicia que existiram deslocamentos em modo II aumentando a possibilidade da existência de fecho de fenda por rugosidade.

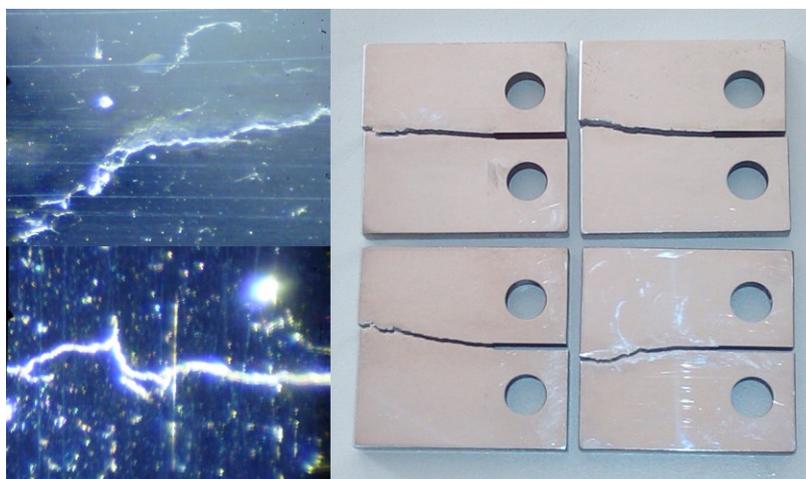


Figura 19 - Deflexão de fenda observada durante e após os ensaios.

4.2. Lei de Paris

As curvas $da/dN - \Delta K$ obtidas experimentalmente são válidas para a aplicação da lei de Paris, sendo que é possível verificar pelos gráficos que as curvas se encontram nos regimes I e II de propagação. Foram descartados os valores respectivos ao regime I e III, uma vez que não estão dentro dos limites de aplicação da lei, e foi criada uma linha de tendência potencial para cada curva $da/dN - \Delta K$, obtendo de seguida as respetivas equações, temos por fim as constantes C e m como é possível observar pela Figura 20.

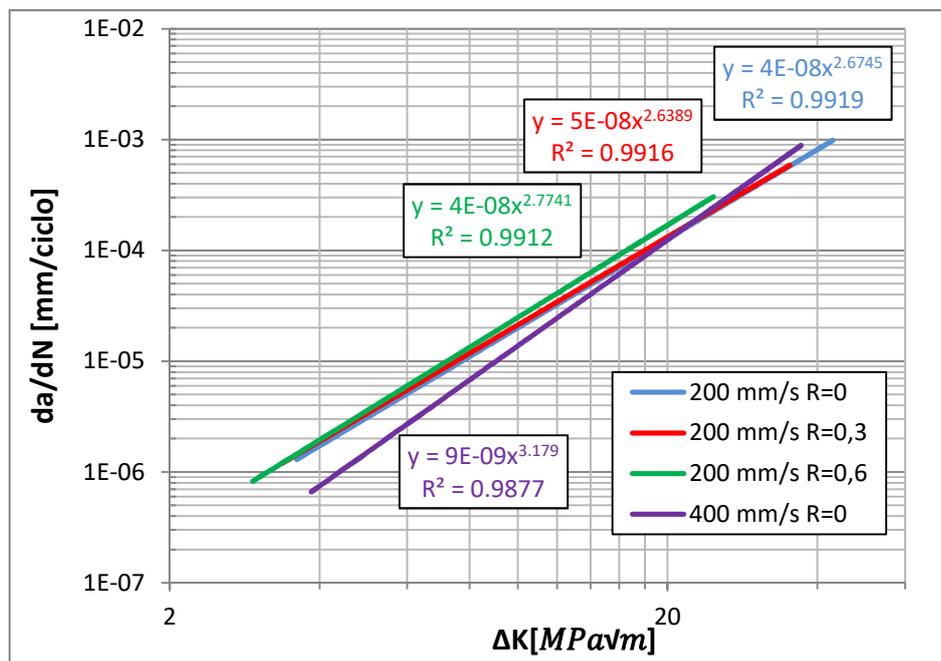


Figura 20 - Aplicação da lei de Paris nas curvas da/dN – ΔK obtidas para 200mm/s.

Após este processamento de dados foi possível construir a Tabela 5 com as constantes da lei de Paris, C, m, o coeficiente de correlação R², e o intervalo de ΔK para validação desta lei para as razões de tensão estudadas.

Tabela 5 - Parâmetros da lei de Paris.

Parâmetros	Velocidade	C	m	R ²	Intervalo de ΔK
R=0	200 mm/s	3E-08	2,6745	0,9919	3,6≤ΔK≤42
	400 mm/s	9E-9	3,1790	0,9877	3,1≤ΔK≤37
R=0,3	200 mm/s	5E-08	2,6389	0,9916	3,3≤ΔK≤35
R=0,6	200 mm/s	4E-08	2,7741	0,9912	2,9≤ΔK≤25

Pela análise aos parâmetros expostos é possível verificar que não existe uma diferença significativa das propriedades de fadiga entre as razões de tensão estudadas, a maior discrepância está no limite máximo da aplicação da lei de Paris que como seria de esperar é inversamente proporcional ao aumento de R.

A propagação no material fabricado com 400 mm/s apresenta uma menor velocidade de propagação para valores de ΔK baixos, em relação à velocidade de laser mais baixa, no entanto o limite superior de aplicação da lei de Paris é mais baixo o que significa que este material entra em regime de propagação instável mais cedo. Outro aspecto negativo da

velocidade de 400 mm/s é a dificuldade da obtenção do limiar de fadiga. Durante o ensaio tudo levava a crer que o limiar teria valores superiores à velocidade de laser mais baixa, porém para valores de ΔK inferiores a cerca de $4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, o valor de velocidade de propagação manteve-se praticamente inalterada apesar das descidas de carga, dando indicação de que o limiar de fadiga na verdade iria atingir valores muito mais baixos.

Comparando os resultados obtidos neste trabalho com os resultados de Osgood [23] para aços martensíticos, podemos verificar que este material não obteve resultados insatisfatórios para valores de ΔK inferiores a cerca de $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Na Figura 21 estão representadas as retas da lei de Paris obtidas neste estudo juntamente com a reta obtida por Osgood.

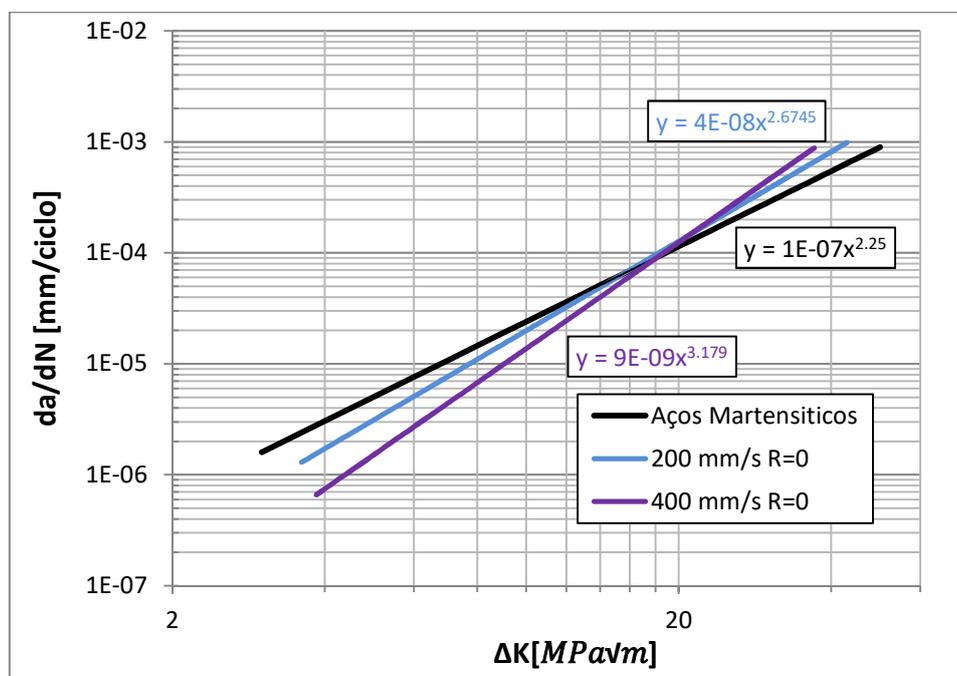


Figura 21 - Comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os de Osgood [23].

4.3. Análise das curvas carga-deslocamento

Com os dados dos ensaios realizados para verificação do fecho de fenda foi possível construir as curvas carga-deformação para verificar se há uma alteração na rigidez do provete validando a existência de fecho.

Na Figura 22, Figura 23 e Figura 24 estão representadas algumas das curvas carga-deslocamento obtidas para todas as razões de tensão ensaiadas, e em vários comprimentos de fenda. Em nenhuma das curvas obtidas foi detectado fecho de fenda pois as suas

inclinações mantêm-se constantes ao longo de toda a aplicação do ciclo de carga, significando que a rigidez do provete também se mantém constante.

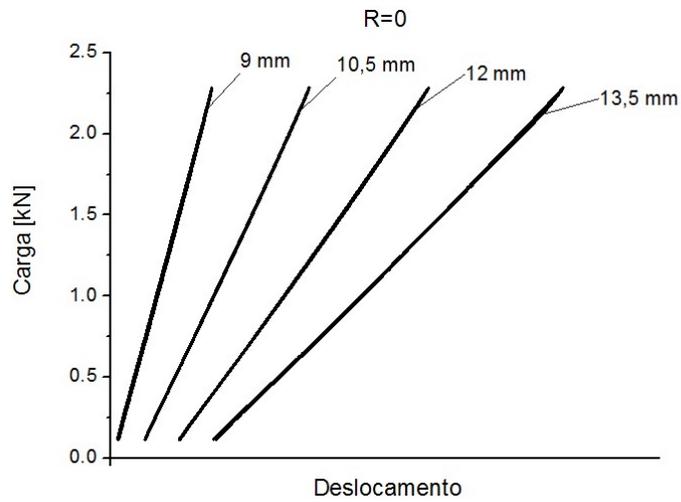


Figura 22 - Curvas carga-deformação obtidas para R=0.

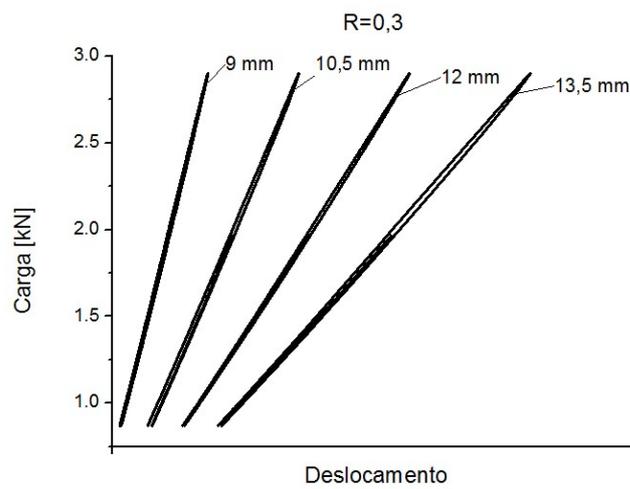


Figura 23 - Curvas carga-deformação obtidas para R=0,3.

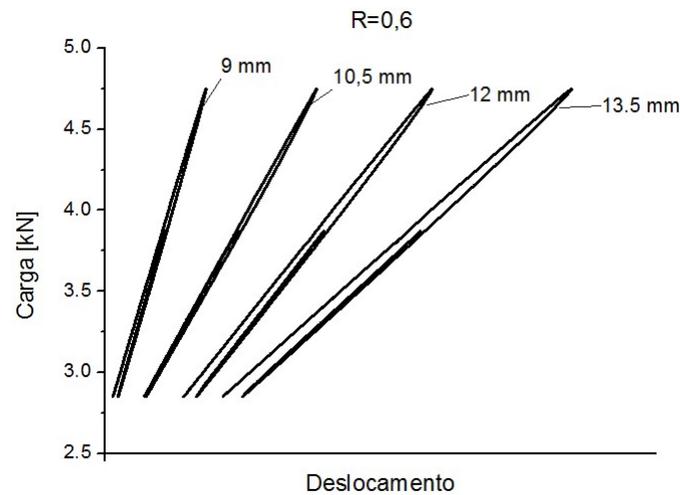


Figura 24 - Curvas carga-deformação obtidas para R=0,6.

4.4. Influência das sobrecargas

Para uma melhor localização da sobrecarga nos resultados obtidos, os valores de N e a foram processados deslocando sua origem para o local onde a sobrecarga foi aplicada, usando as equações:

$$N_p = N - N_{ol}, \quad (4.1)$$

$$a_p = a - a_{ol} \quad (4.2)$$

O ensaio para avaliar a influência das sobrecargas permitiu construir os gráficos necessários para obtenção de valores que caracterizam o efeito transitório após aplicação da sobrecarga.

Os gráficos representados na Figura 25 e na Figura 26 são referentes à primeira aplicação de sobrecarga, com ΔK de $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, comparando os seus efeitos entre OLR de 50 e 100%.

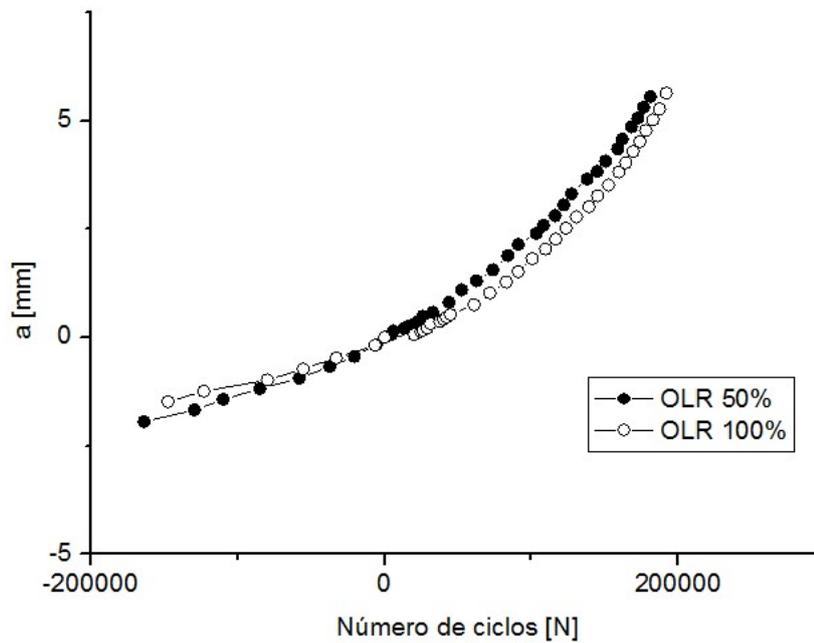


Figura 25 - Gráfico da influência da sobrecarga no avanço de fenda pelo número de ciclos (ΔK de $10 \text{ MPa}\sqrt{m}$).

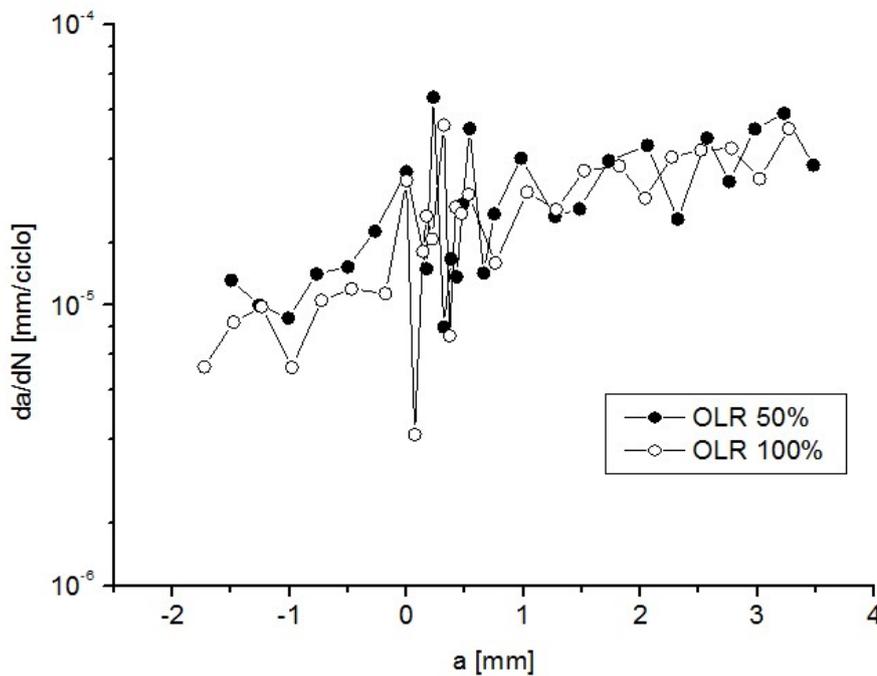


Figura 26 - Gráfico da Influência da sobrecarga na velocidade de propagação pelo avanço de fenda (ΔK de $10 \text{ MPa}\sqrt{m}$).

Para a mesma magnitude de sobrecarga foi efetuado outro estudo do seu efeito no comprimento de fenda correspondente a ΔK de $15 \text{ MPa}\sqrt{m}$, mais uma vez comparando entre os níveis de OLR de 50 e 100%, e os resultados estão expostos na Figura 27 e na Figura 28.

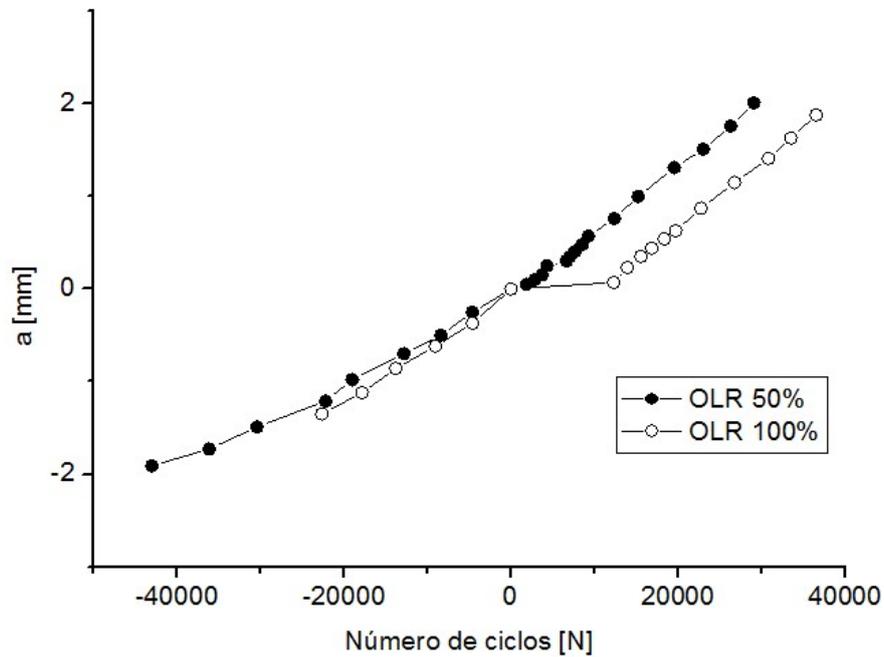


Figura 27 - Gráfico da influência da sobrecarga no avanço de fenda pelo número de ciclos (ΔK de $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

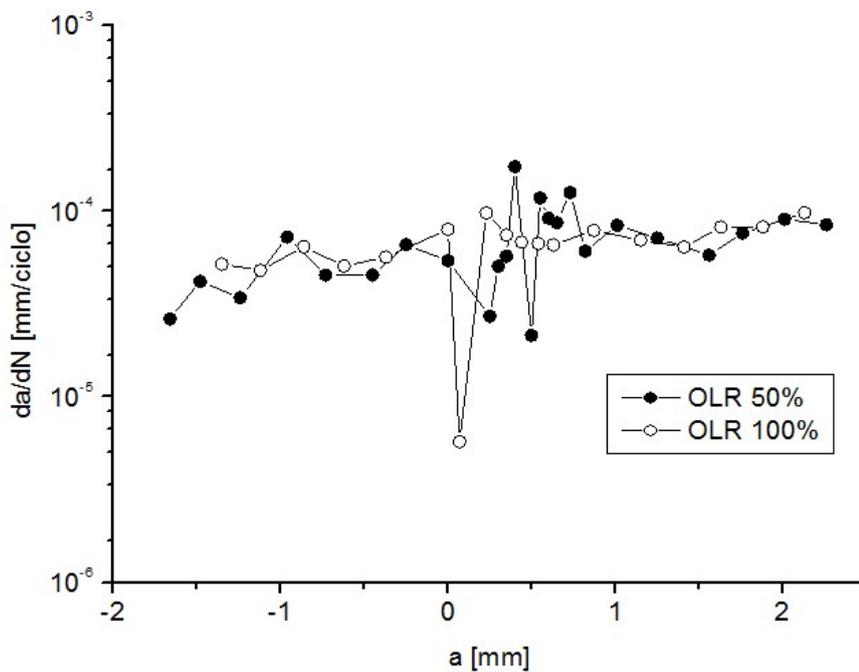


Figura 28 - Gráfico da Influência da sobrecarga na velocidade de propagação pelo avanço de fenda (ΔK de $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

Através dos gráficos apresentados é possível então analisar alguns aspetos como o número de ciclos de atraso N_D , da/dN mínimo e o comprimento de fenda afetado pela sobrecarga Δa_{ol} , podendo assim construir a Tabela 6, que contém todos estes parâmetros bem

como a razão entre o da/dN mínimo do ensaio da sobrecarga e o da/dN correspondente ao mesmo comprimento de fenda de um ensaio em ΔK constante, da/dN_c .

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de sobrecarga.

ΔK [MPa \sqrt{m}]	OLR [%]	Δa_{ol} [mm]	N_D	da/dn_{min}	$\frac{da/dn_{min}}{da/dn_c}$
10	50	0,98	6653	8,35E-6	0,4611
	100	0,94	20581	3,46E-06	0,1910
15	50	0,82	1467	2,14E-05	0,2961
	100	0,60	10966	5,71E-06	0,0843

Para o nível de OLR de 100% houve uma maior expressão do comportamento transiente comparativamente ao nível inferior, mas a sua curta manifestação foi semelhante, não alterando a vida de fadiga significativamente.

Através da observação da fenda durante este ensaio foi possível observar que a maior discrepância no número de ciclos efetuados por incremento de fenda, foi imediatamente após a aplicação da sobrecarga, como os resultados acima mostrados indicam, este fator sugere que o mecanismo de retardamento da velocidade de propagação será por arredondamento da ponta da fenda, endurecimento da ponta da fenda, ou tensões residuais.

Foi também analisado o fecho de fenda 0.05 mm após a sobrecarga, e tal como nos casos anteriores relatados no capítulo 4.3, não foi detetado fecho como se pode ver pelo gráfico da Figura 29.

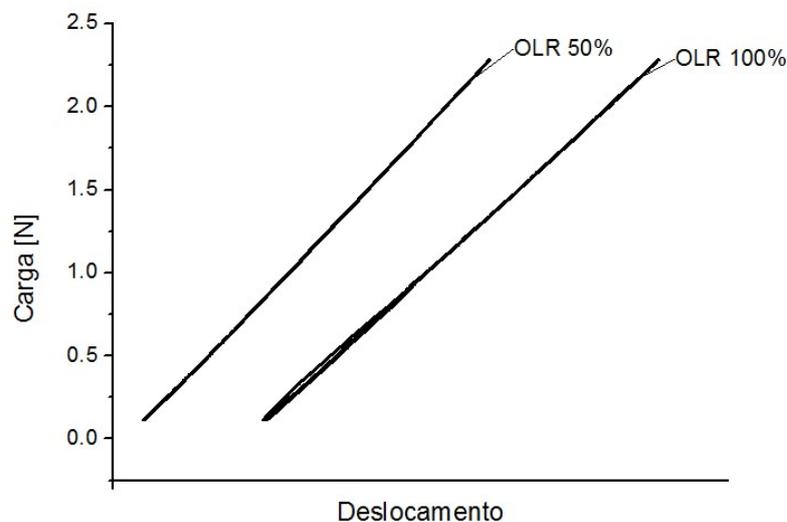


Figura 29 - Curvas carga-deformação obtidas para R=0, 0,05 mm após aplicação de sobrecarga.

4.5. Análise às superfícies de fratura

Pela análise das superfícies por MEV foi possível identificar alguns aspetos importantes sobre características morfológicas do material e também sobre a propagação de fendas por fadiga. As imagens foram captadas em diversos pontos da superfície de fratura, porém existe uma grande diferença entre a superfície do início de fenda e de final, junto do ponto de rotura, esta diferença aplica-se a ambas as velocidades de laser estudadas e a todas as razões de tensão ensaiadas. Na zona de início de fenda é observável uma deformação excessiva das cristas da rugosidade da superfície (Figura 30), isto sugere a existência de deformação no modo II e forças compressivas, sugerindo a existência de fecho de fenda, no entanto pela análise feita anteriormente no capítulo 4.3 o fecho de fenda é inexistente, que leva a crer que esta deformação é apenas devido à deslocação entre superfícies no modo II provocando uma fricção excessiva na superfície de fratura, dando origem a desgaste.

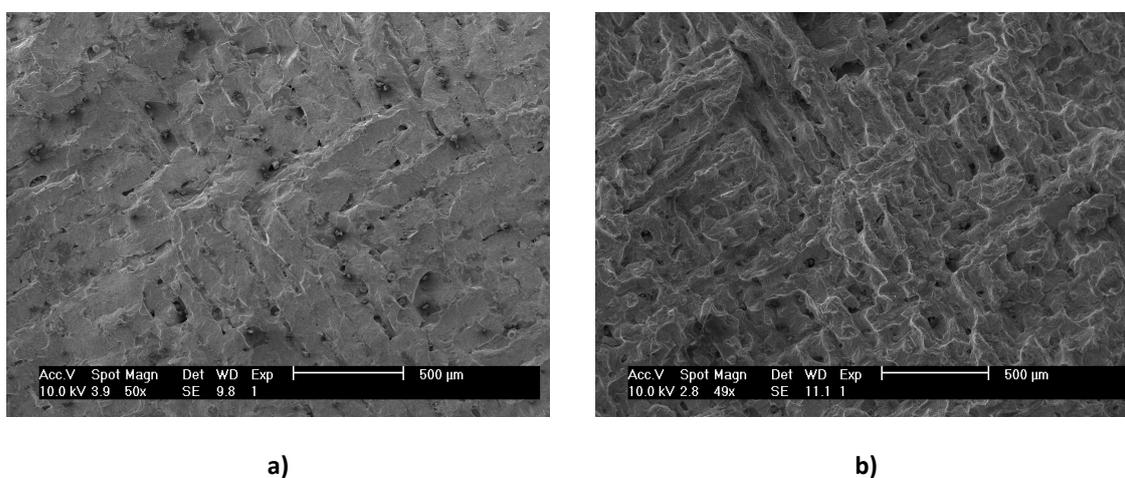


Figura 30 - Efeito de deformação das cristas de rugosidade típico observado a) Início de fenda b) perto do local de rotura).

Os gráficos dos perfis de rugosidade, apresentados na Figura 31, Figura 32, Figura 33 e na Figura 34, foram processados para que a escala em Y seja unitária em relação à camada de adição de material, deste modo cada unidade neste eixo corresponderá exatamente a 30 µm.

Pela análise dos perfis de rugosidade da superfície de fenda conjuntamente com as micrografias, verificou-se que o trajeto da fenda de fadiga varia bastante ao longo do seu

percurso, avançando entre camadas de adição de material, e alternando de camada entre passagens do laser, daí existirem várias deflexões de fenda discutidas no capítulo 4.1. As orientações das passagem do laser entre cada camada são cruzadas, a propagação da fenda parece tender a alternar entre pares de camadas, ou seja uma camada de cada orientação. Estes fatores não aparentam ser dependentes da razão de tensões, nem da velocidade de laser do processo de fabrico, no entanto na velocidade mais elevada, os perfis de rugosidade revelam que existe deflexão entre camadas mais frequente do que na velocidade inferior.

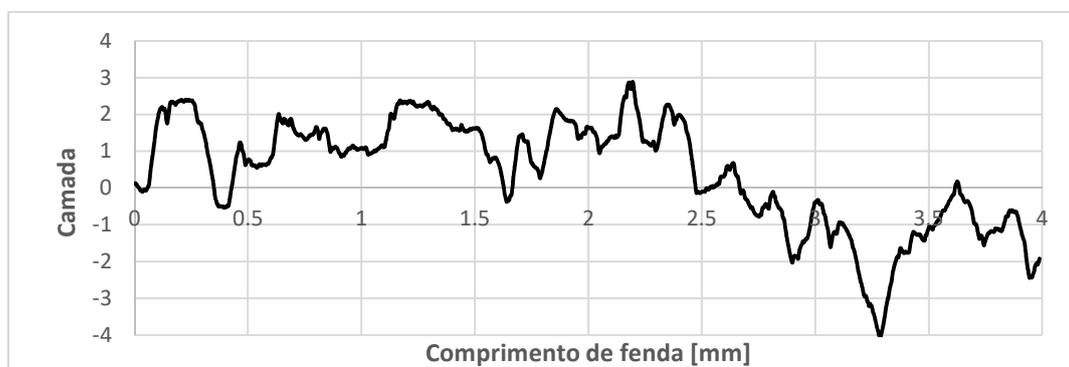


Figura 31 - Perfil de rugosidade da superfície de fratura do provete de 200 mm/s em R=0, com camada por comprimento de fenda.

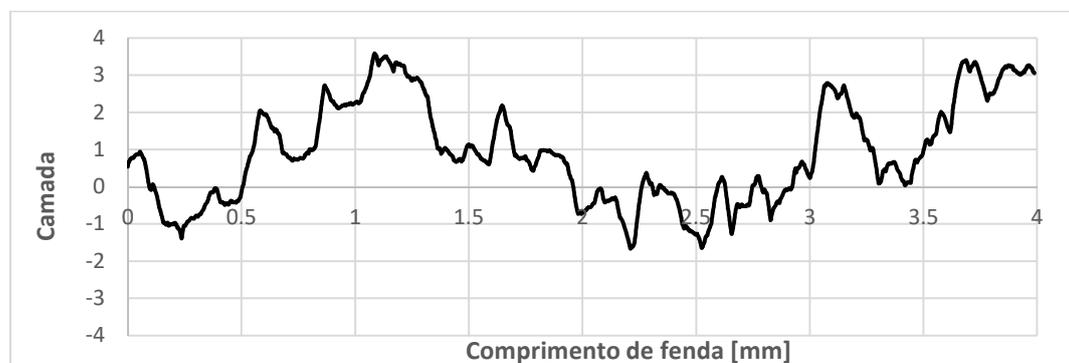


Figura 32 - Perfil de rugosidade da superfície de fratura do provete de 200 mm/s em R=0,3, com camada por comprimento de fenda.



Figura 33 - Perfil de rugosidade da superfície de fratura do provete de 200 mm/s em R=0,6, com camada por comprimento de fenda.



Figura 34 - Perfil de rugosidade da superfície de fratura do provete de 400 mm/s em R=0, com camada por comprimento de fenda.

Para reforçar esta análise de rugosidade foram captadas imagens microscópicas na direção paralela ao plano da superfície de fratura e perpendicular ao avanço da fenda (Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38), nestas imagens é possível observar que o avanço de fenda percorre preferencialmente direções intergranulares, ou seja entre camada ou passagem do laser, apresentando no entanto locais que a fenda avança intragranularmente. Esta aleatoriedade no modo de propagação deve-se provavelmente à presença de defeitos que deflectem a fenda pelo caminho de menor resistência. Foi também possível visualizar o efeito de alisamento das cristas de rugosidade por fricção.

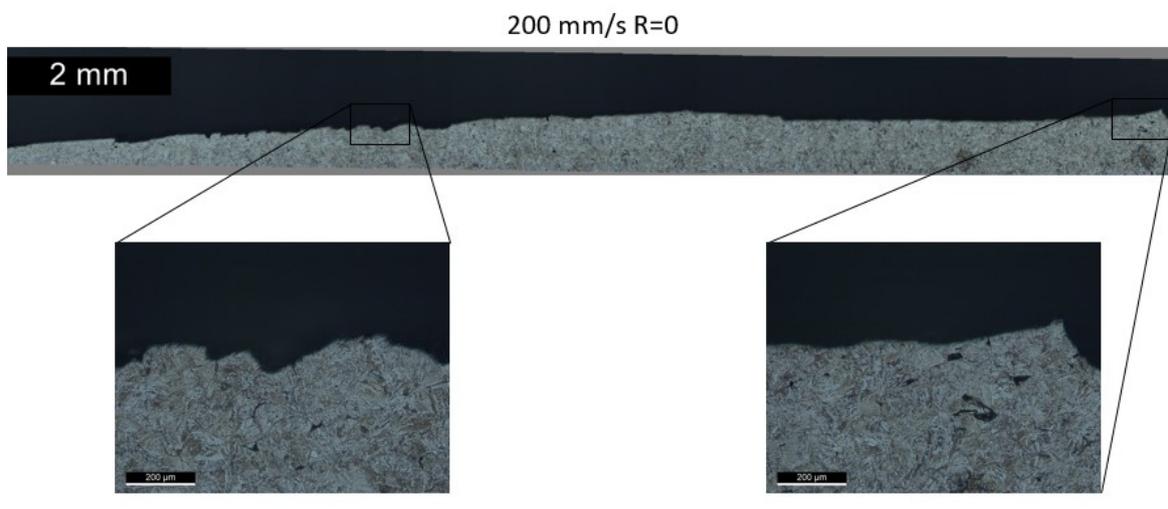


Figura 35 - Imagem microscópica da microestrutura ao longo da fenda para 200 mm/s e R=0.

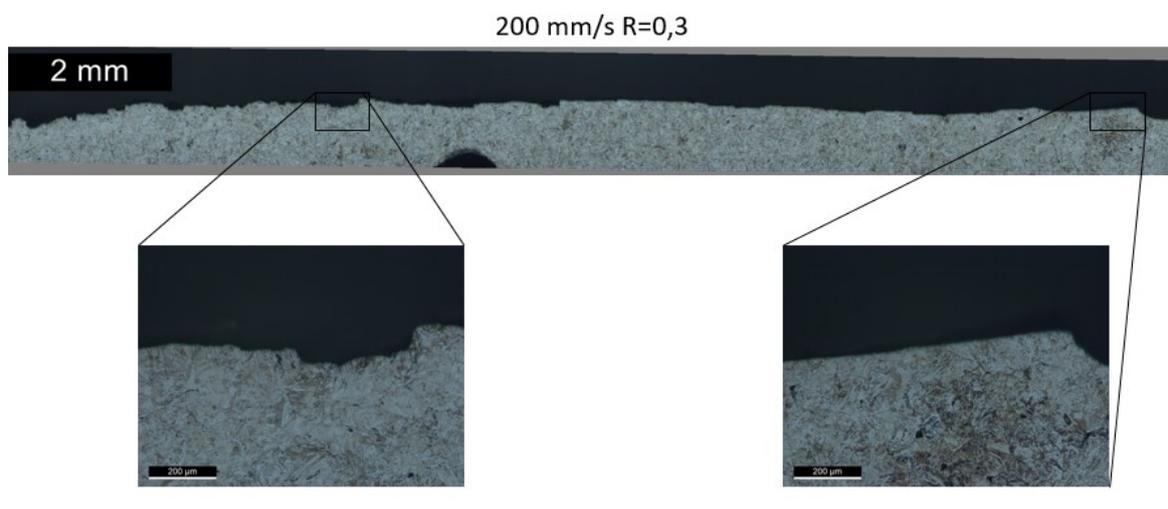


Figura 36 - Imagem microscópica da microestrutura ao longo da fenda para 200 mm/s e R=0,3.

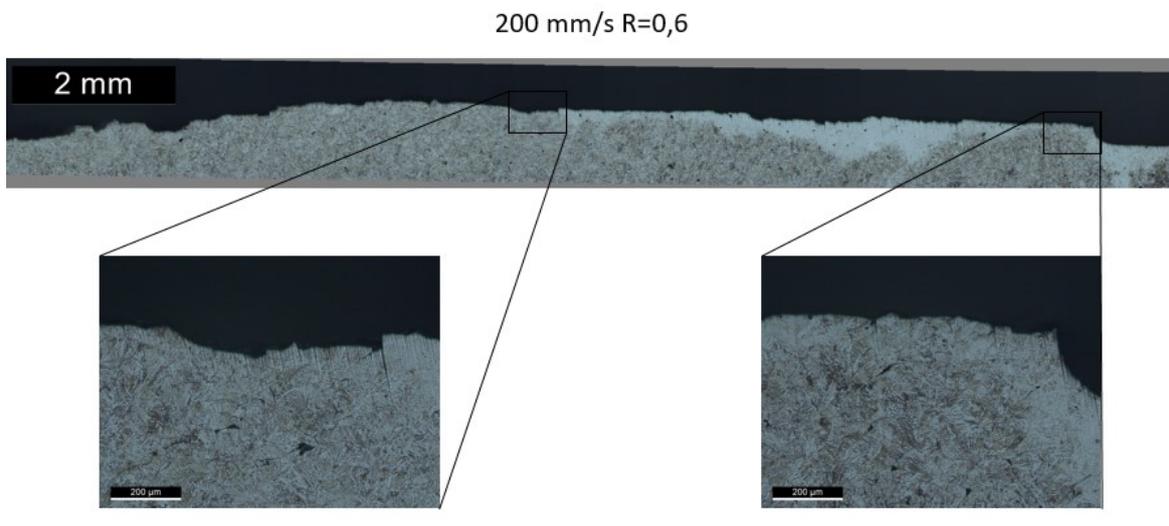


Figura 37 - Imagem microscópica da microestrutura ao longo da fenda para 200 mm/s e R=0,6.

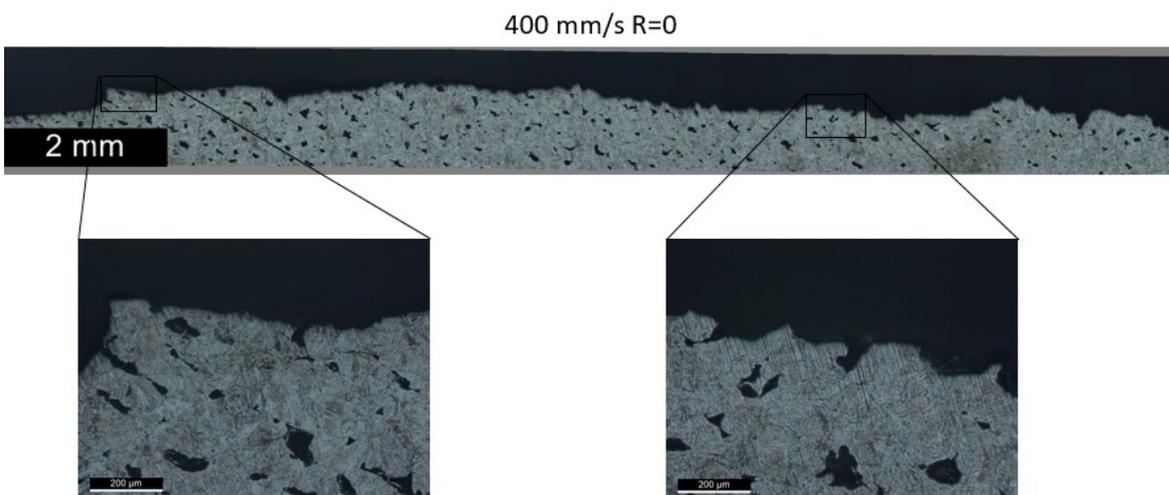


Figura 38 - Imagem microscópica da microestrutura ao longo da fenda para 400 mm/s e R=0.

Comparando as superfícies de fratura das duas velocidades de laser estudadas, é possível verificar que a o material fabricado a 400 mm/s apresenta defeitos maiores, sendo estes arredondados. Na velocidade inferior os defeitos também estão presentes e possivelmente na mesma quantidade, embora fechados e aguçados. Esta característica pode explicar os valores de propagação mais baixos na velocidade superior, uma vez que uma fenda em propagação ao atingir um defeito arredondado, vai haver uma queda de ΔK atrasando-a. Na Figura 39, Figura 40 e Figura 41 é possível observar as diferenças de geometria dos defeitos entre as velocidades do laser de 200 e 400 mm/s.

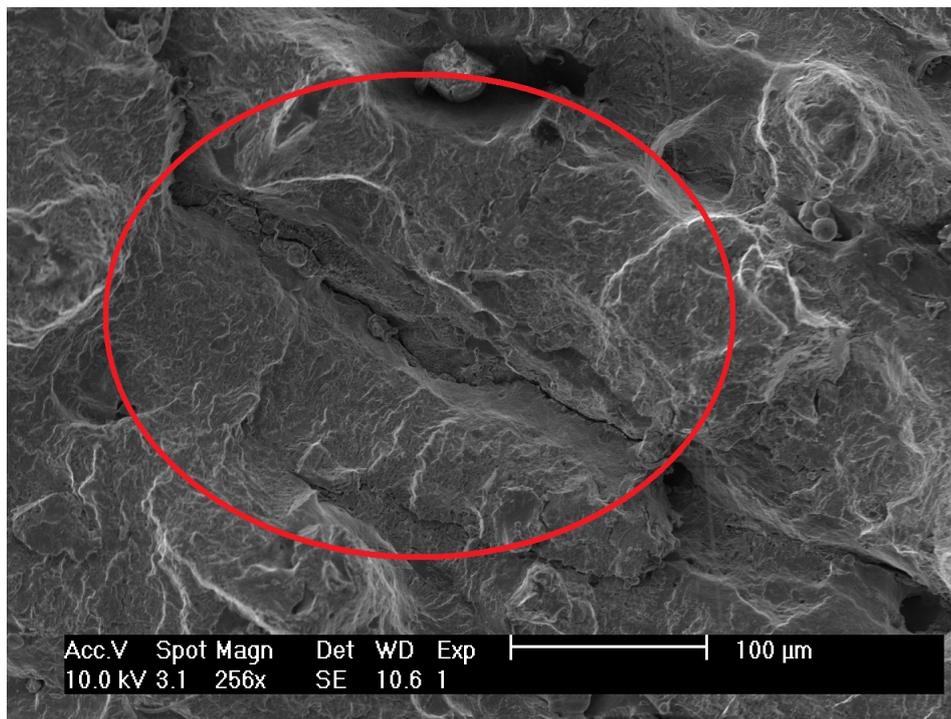


Figura 39 - Defeito na superfície de fratura, provete de 200 mm/s.

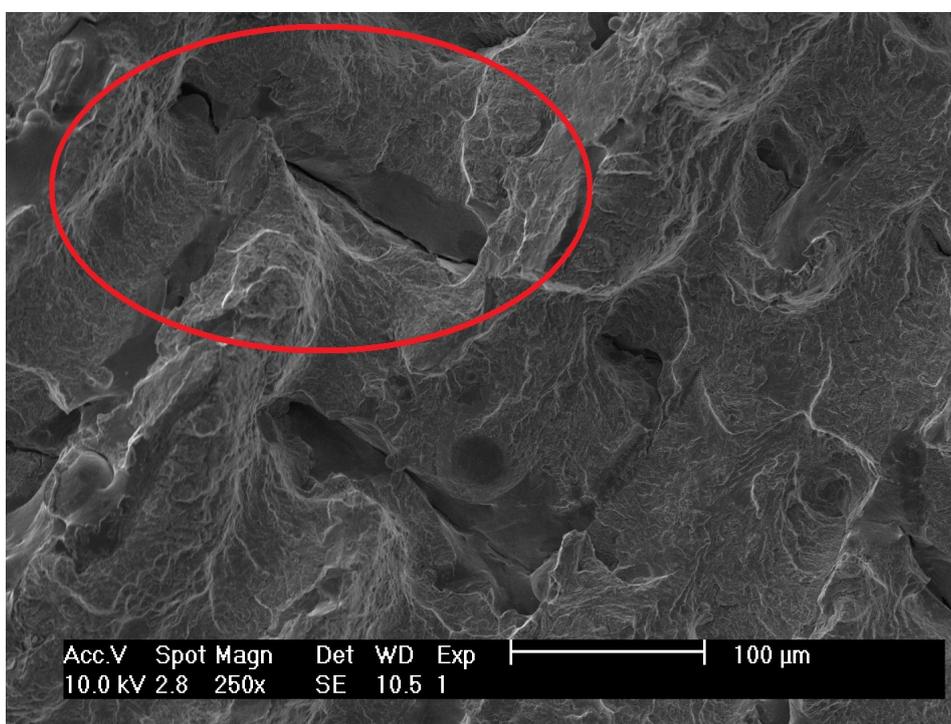


Figura 40 - Defeito na superfície de fratura, provete de 200 mm/s.

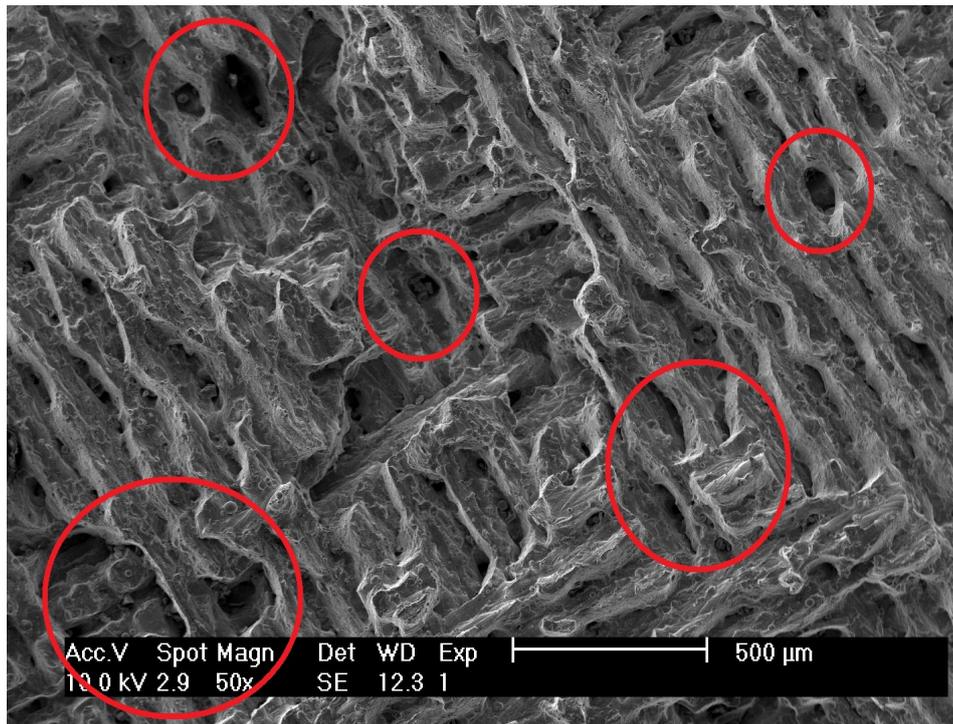


Figura 41 - Defeitos volumosos na superfície de fratura, provete de 400 mm/s.

Grande parte dos defeitos presentes na velocidade de 200mm/s parecem ser devidos a má coesão de material entre passagens do laser, no entanto na velocidade de 400 mm/s os defeitos dão a entender falta de material ou material ainda por processar, pois é possível até observar partículas, provavelmente do pó de aço, retidas nos defeitos discutidos.

5. CONCLUSÕES

Através deste estudo foi possível concluir que para o aço 18Ni300 produzido por DMLS:

- A razão de tensões não tem uma influência significativa na propagação de fendas por fadiga para a velocidade do laser de 200 mm/s, uma vez que pela aplicação da lei de Paris, as constantes obtidas experimentalmente são muito semelhantes, apenas alterando o limiar de fadiga que é inversamente proporcional ao aumento da razão de tensões.
- A velocidade de laser de 400mm/s não provoca grandes alterações no comportamento do material á fadiga no regime 2 de propagação, tendo até valores de da/dn inferiores à menor velocidade do laser para ΔK inferior a cerca de $20 MPa\sqrt{m}$.
- Pelas constantes da lei de Paris este material está equiparado a outros aços de microestrutura martensítica.
- Com o método e equipamento usado não foi detetado fecho de fenda em qualquer razão de tensões nem imediatamente após a aplicação de sobrecarga.
- A aplicação de sobrecargas não altera significativamente a vida útil de um componente, pois pela aplicação de um OLR de 50 e 100% verificou-se que o comportamento em propagação transitório não retardou o avanço da fenda significativamente e rapidamente restabeleceu o comportamento normal, no entanto este efeito foi tanto maior quanto OLR e ΔK de aplicação da sobrecarga.
- A superfície de fratura para todas as razões de tensão e velocidade do laser, apresenta uma deformação nas cristas de rugosidade, que é mais evidente no local de nucleação da fenda e vai perdendo esta característica com o avanço da fenda, este fato sugere a presença deformação em modo II causando desgaste nas superfícies de fratura.

- No local de rotura é possível observar que existem defeitos mais volumosos e arredondados nos provetes com velocidade de 400 mm/s comparativamente com 200 mm/s, em que os defeitos são mais achatados e pontiagudos, este facto pode explicar a discrepância na velocidade de propagação entre estas duas velocidades de laser, pois o arredondamento dos defeitos provoca uma descida do fator intensidade de tensão.
- A fenda tende a propagar entre camadas, porém alterna entre camadas frequentemente, especialmente com velocidade de laser de 400 mm/s.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Uma vez que a tecnologia de AM está em expansão seria de interesse a continuação e aprofundamento de estudos relativos ao material obtido por este processo. Uma vez que os ensaios de propagação por fadiga revelaram que contrariamente ao esperado a velocidade de laser superior sofreu menor velocidade de propagação, seria interessante avaliar o efeito das sobrecargas e medição do fecho de fenda para esta velocidade.

Como o processo de DMLS é ainda muito dispendioso seria interessante avaliar o comportamento de fenda à fadiga de componentes híbridos, ou seja, um substrato metálico com implante por sinterização a laser, caso se observem resultados positivos seria possível fabricar parte básica de um componente por processo subtrativo, e uma parte complexa por este processo.

Bibliografia

- [1] M. Shellabear, O. Nyrrhilä, DMLS – DEVELOPMENT HISTORY AND STATE OF THE ART, (2004).
- [2] L.M.S. Santos, J.A.M. Ferreira, J.S. Jesus, J.M. Costa, C. Capela, Fatigue behaviour of selective laser melting steel components, *Theor. Appl. Fract. Mech.* (2016).
- [3] Materials laser melting - Concept Laser, (2016). <http://www.concept-laser.de/en/technology/materials.html>.
- [4] B. Gibson, I; Rosen, D.W; Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, (2010).
- [5] E. Sachs, M. Cima, J. Cornie, Three-Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 39 (1990) 201–204.
- [6] G.R. Irwin, Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, *J. Appl. Mech.* 24 (1957) 361–364.
- [7] H.M. Westergaard, Bearing Pressures and Cracks, *J. Appl. Mech.* 6 (1939) 49–53.
- [8] *Astm, E 647 - 00, 03* (2001) 43.
- [9] P.C. Paris, M.P. Gomez, W.E. Anderson, A Rational Analytic Theory of Fatigue, *Trend Eng.* 13 (1961) 9–14.
- [10] E. Wolf, Fatigue crack closure under cyclic tension, *Eng. Fract. Mech.* 2 (1970) 37–45.
- [11] S. Suresh, G.F. Zamiski, D.R.O. Ritchie, Oxide-Induced Crack Closure: An Explanation for Near-Threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior, *Metall. Trans. A.* 12 (1981) 1435–1443.
- [12] S. Suresh, R.O. Ritchie, A geometric model for fatigue crack closure induced by fracture surface roughness, *Metall. Trans. A.* 13 (1982) 1627–1631.
- [13] S. Suresh, R.O. Ritchie, Near-threshold fatigue crack propagation: a perspective on the role of crack closure, *Fatigue Crack Growth Threshold Concepts*, 1984.
- [14] R.O. Ritchie, S. Suresh, C.M. Moss, Near-Threshold Fatigue Crack Growth in 2 1/4 Cr-1Mo Pressure Vessel Steel in Air and Hydrogen, *J. Eng. Mater. Technol.* 102 (1980) 293.
- [15] S. Suresh, *Fatigue of Materials*, Second Edi, Cambridge University Press, 1998.
- [16] K.K. Shi, L.X. Cai, S. Qi, C. Bao, A prediction model for fatigue crack growth using effective cyclic plastic zone and low cycle fatigue properties, (2016).
- [17] M. LANG, G. MARCI, The influence of single and multiple overloads on fatigue crack propagation, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 22 (1999) 257–271.
- [18] J. Rice, Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue, em: *Fatigue Crack Propag.*, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1967: pp. 247–247–65.
- [19] R.E. Jones, Fatigue crack growth retardation after single-cycle peak overload in Ti-6Al-4V titanium alloy, *Eng. Fract. Mech.* 5 (1973) 585–604.
- [20] J. Schijve, D. Broek, Crack Propagation: The Result of a Test Program Based on a Gust Spectrum with Variable Amplitude Loading, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* 34 (1962) 314–316.
- [21] J. Almeida, Comportamento à fadiga de componentes de aço produzidos por sinterização laser, Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, 2015.

- [22] J.D.M. Costa, J.A.M. Ferreira, Effect of stress ratio and specimen thickness on fatigue crack growth of CK45 steel, *Theor. Appl. Fract. Mech.* 30 (1998) 65–73.
- [23] C.C. Osgood, *Fatigue design*, 1982.