



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Propagação de fendas por fadiga: Efeitos transientes associados a variações de carga**

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

**Autor**

**João Filipe Bandeira Baptista**

**Orientadores**

**Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes**

**Professor Doutor Luís Filipe Pires Borrego**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor José António Martins Ferreira</b> <b>Professor Associado com agregação da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa</b> <b>Professor Associado com agregação da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>

**Coimbra, Setembro, 2014**

“A dúvida é o princípio da sabedoria”

Aristóteles

Aos meus pais

## Agradecimentos

A elaboração desta tese apenas foi possível devido à contribuição de várias pessoas. Por isso, queria expressar os meus agradecimentos:

- Ao orientador, Professor Doutor Fernando Antunes, por toda a ajuda que me deu, por toda a sua disponibilidade que sempre teve comigo, por todo o conhecimento que me transmitiu para a realização desta tese e por toda a força que me deu. Simplesmente, por tudo.
- Ao orientador, Professor Luís Borrego, pela oportunidade de trabalhar nesta tese.
- A toda a minha família e amigos, especialmente aos meus pais, por todo o apoio que me deram durante esta fase e por tudo o que fizeram nos últimos anos para que eu chegasse a esta etapa importante da minha vida.
- A todos os meus colegas do Laboratório de Construções Mecânicas, porque sempre que pedi ajuda, nunca tiveram problemas em ajudar-me, principalmente ao colega Tiago Sousa pelos ensinamentos em relação ao *software* DD3IMP.
- Ao Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica pela utilização do *software* DD3IMP.
- À Fundação para a Ciência e Tecnologia e ao Programa Operacional Temático Fatores de Competitividade (COMPETE), participado pelo fundo comunitário Europeu FEDER (Projeto PTDC/EMS-PRO/3148/2012; COMPETE: FCOMP-01-0124-FEDER-029112).



## Resumo

A falha por fadiga é o modo de ruína mais frequente em equipamentos em serviço submetidos a carga cíclica. Os espectros reais são normalmente complexos, contendo muitas vezes sobrecargas e subcargas. O conceito de fecho de fenda permite explicar o comportamento transiente da propagação da fenda por fadiga que se observa após a aplicação de sobrecargas, subcargas ou blocos de carga.

Esta dissertação estuda, de um modo sistemático, o efeito das sobrecargas e subcargas no fenómeno de fecho de fenda induzido por deformação plástica (PICC). Este estudo foi feito através de um programa de elementos finitos, o DD3IMP, onde se variaram os parâmetros de carga para depois obter vários resultados como as curvas  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})-\Delta a$  ou os perfis da fenda após a sobrecarga/subcarga. Verificou-se que a aplicação de uma sobrecarga provoca um arredondamento da extremidade da fenda, que elimina o contacto atrás do ponto de aplicação da sobrecarga. A propagação até ao pico e a propagação necessária para a estabilização dependem de  $\Delta K_{OL}$ . O pico de fecho depende de  $\Delta K_{OL2}=K_{OL}-K_{max,BL}$  que foi o parâmetro de carga que apresentou melhores resultados em termos de influência. A análise dos parâmetros não lineares de extremidade de fenda permitiu verificar que os valores de fecho, obtidos numericamente, sobrestimam o efeito do contacto das faces da fenda. O fecho parcial da fenda implica a correção de  $\Delta K_{eff}$ , tendo-se obtido melhores resultados com um modelo da literatura.

**Palavras-chave:** Sobrecargas, propagação da fenda por fadiga, fecho de fenda induzido por deformação plástica (PICC), arredondamento da extremidade da fenda, fecho parcial da fenda.

## Abstract

Fatigue failure is the most common cause of failure in operation equipment submitted to cyclic loading. The real spectra are usually complex, often containing overloads and underloads. The concept of crack closure allows us to explain the transient behavior of fatigue crack growth after an overload, underload or load block.

This thesis studies the effect of overloads and underloads on Plasticity Induced Crack Closure (PICC), in a systematic way. This study was done using a finite element program, DD3IMP, where different load conditions were varied to obtain several results like  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})\text{-}\Delta a$  curves or crack tip profiles after an overload/underload. It has been verified that the application of an overload causes blunting of crack tip that eliminates the contact behind the application point of overload. The crack propagation up to the peak and the propagation required for stabilization depend on  $\Delta K_{\text{OL}}$ . The crack opening level corresponding to the peak depends on  $\Delta K_{\text{OL}2} = K_{\text{OL}} - K_{\text{max,BL}}$ , the parameter which presented the greatest influence. The analysis of crack tip parameters allowed us to verify that crack closure values obtained numerically overestimate the effect of contact of the crack flanks. The partial crack closure implies a correction of  $\Delta K_{\text{eff}}$  and better results were obtained using a model described in the literature.

**Keywords** Overloads, fatigue crack growth, Plasticity Induced Crack Closure (PICC), blunting, partial crack closure.

## Índice

Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	viii
Simbologia e Siglas .....	ix
Simbologia.....	ix
Siglas .....	x
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	3
2. Revisão Bibliográfica .....	4
2.1. Fadiga.....	4
2.2. Fenómeno do Fecho de Fenda .....	6
2.3. Solicitações de Amplitude Variável .....	7
3. Procedimento Numérico .....	12
3.1. Geometria e Discretização por Elementos Finitos.....	12
3.2. Modelação do Comportamento Mecânico do Material .....	14
3.3. Obtenção dos Resultados a partir do DD3IMP.....	15
3.4. Condições de Ensaio .....	17
4. Apresentação e Análise dos Resultados .....	21
4.1. Efeito do Parâmetro Numérico de Fecho de Fenda .....	21
4.2. Efeito dos Parâmetros de Carga.....	24
4.2.1. Efeito de $K_{max,BL}$ .....	25
4.2.2. Efeito de $K_{min,BL}$ .....	29
4.2.3. Efeito de $K_{OL}$ .....	34
5. Discussão dos Resultados.....	38
5.1. Valor mínimo de abertura de fenda .....	38
5.2. Valor do pico de abertura de fenda .....	42
5.3. Valor da propagação da fenda até atingir o pico .....	43
5.4. Distância de Estabilização .....	45
5.5. Comparação de $\Delta K$ com $\Delta K_{eff}$ em termos de Energia e Deformação.....	47
6. Conclusões.....	51
Referências Bibliográficas.....	54
Anexo A – Modelo Empírico de Fecho.....	58
Anexo B - Subcargas .....	62
B.1. Efeito de $K_{max,BL}$ .....	62
B.2. Efeito de $K_{min,BL}$ .....	65
B.3. Efeito de $K_{UL}$ .....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva típica da/dN- $\Delta K$ . .....	5
Figura 2.2 - Parâmetros de carregamento cíclico. ....	6
Figura 2.3 - Carregamento cíclico com uma sobrecarga aplicada. ....	8
Figura 2.4 - Curvas típicas ( $\sigma_{open}/\sigma_{max}$ )- $\Delta a$ com e sem sobrecarga. ....	10
Figura 2.5 - Representação do perfil da fenda após uma sobrecarga. ....	11
Figura 3.1 - Geometria do provete juntamente com o detalhe do entalhe central. ....	12
Figura 3.2 - Condições de fronteira e carregamento. ....	13
Figura 3.3 - Malha de elementos finitos com vista frontal em pormenor. ....	14
Figura 3.4 - Processo para obtenção dos resultados. ....	17
Figura 4.1 - Comparação entre $PICC_{node1}$ e $PICC_{contact}$ . ....	21
Figura 4.2 - Demonstração de um caso utilizando o $PICC_{node1}$ (1). ....	22
Figura 4.3 - Demonstração de um caso utilizando o $PICC_{node1}$ (2). ....	23
Figura 4.4 - Evolução da fenda em relação a U. ....	24
Figura 4.5 - Efeito de $K_{max,BL}$ no nível de fecho de fenda. ....	25
Figura 4.6 - Efeito de $K_{max,BL}$ no valor mínimo da abertura de fenda. ....	26
Figura 4.7 - Efeito de $K_{max,BL}$ no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda. ....	27
Figura 4.8 - Efeito de $K_{max,BL}$ no valor do pico da abertura de fenda. ....	27
Figura 4.9 - Efeito de $K_{max,BL}$ no acréscimo do valor do pico da abertura de fenda. ....	28
Figura 4.10 - Efeito de $K_{max,BL}$ no valor da propagação da fenda até atingir o pico. ....	28
Figura 4.11 - Efeito de $K_{max,BL}$ no perfil da fenda; $F=60N$ ; $K=2.68 MPa.m^{0.5}$ . ....	29
Figura 4.12 - Efeito de $K_{min,BL}$ no nível de fecho de fenda. ....	30
Figura 4.13 - Efeito de $K_{min,BL}$ no valor mínimo da abertura de fenda. ....	31
Figura 4.14 - Efeito de $K_{min,BL}$ no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda. ....	31
Figura 4.15 - Efeito de $K_{min,BL}$ no valor do pico da abertura de fenda. ....	32
Figura 4.16 - Efeito de $K_{min,BL}$ no acréscimo do valor do pico da abertura de fenda. ....	32
Figura 4.17 - Efeito de $K_{min,BL}$ no valor da propagação da fenda até atingir o pico. ....	33
Figura 4.18 - Efeito de $K_{min,BL}$ no perfil da fenda; $F=100N$ ; $K=4.46 MPa.m^{0.5}$ . ....	33
Figura 4.19 - Efeito de $K_{OL}$ no nível de fecho de fenda. ....	34
Figura 4.20 - Efeito de $K_{OL}$ no valor mínimo da abertura de fenda. ....	35

Figura 4.21 - Efeito de $K_{OL}$ no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda. ....	35
Figura 4.22 - Efeito de $K_{OL}$ no valor do pico da abertura de fenda. ....	36
Figura 4.23 - Efeito de $K_{OL}$ no acréscimo do valor do pico da abertura de fenda. ....	36
Figura 4.24 - Efeito de $K_{OL}$ no valor da propagação da fenda até atingir o pico. ....	37
Figura 4.25 - Efeito de $K_{OL}$ no perfil da fenda; $F=100N$ ; $K=4.46 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ . ....	37
Figura 5.1 - Comparação do valor mínimo de abertura de fenda para dois casos. ....	38
Figura 5.2 - Arredondamento da extremidade da fenda na zona da sobrecarga. ....	39
Figura 5.3 - Forças de contacto a carga mínima (1). ....	40
Figura 5.4 - Forças de contacto a carga mínima (2). ....	41
Figura 5.5 - Gráfico tensão-deformação. ....	41
Figura 5.6 - Efeito de $\Delta K_{OL2}$ no valor do pico de abertura de fenda. ....	42
Figura 5.7 - Efeito de $\Delta K_{OL}$ no valor da propagação da fenda até atingir o pico. ....	44
Figura 5.8 - $\Delta a_{\text{peak}}$ numérico vs $\Delta a_{\text{peak}}$ analítico. ....	45
Figura 5.9 - Distância de estabilização após sobrecarga (Borrego <i>et al.</i> , 2003). ....	46
Figura 5.10 - Distância de estabilização após sobrecarga na escala logarítmica. ....	47
Figura 5.11 - Representação esquemática dos parâmetros e zonas da extremidade da fenda. .....	48
Figura 5.12 - Efeito de $\Delta K$ e $\Delta K_{\text{eff}}$ na energia. ....	50
Figura 5.13 - Efeito de $\Delta K$ e $\Delta K_{\text{eff}}$ na gama de deformação plástica. ....	50
Figura A.1 - Efeito de $K_{\text{max}}$ com $\Delta K$ constante. ....	59
Figura A.2 - Efeito de $K_{\text{max}}$ com $R$ constante. ....	60
Figura A.3 - Efeito de $\Delta K$ com $K_{\text{max}}$ constante. ....	60
Figura A.4 - Efeito de $\Delta K$ com $R$ constante. ....	61
Figura B.1 - Efeito de $K_{\text{max,BL}}$ no nível de fecho de fenda (subcarga). ....	63
Figura B.2 - Efeito de $K_{\text{max,BL}}$ no valor mínimo da abertura de fenda (subcarga). ....	63
Figura B.3 - Efeito de $K_{\text{max,BL}}$ no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda (subcarga). ....	64
Figura B.4 - Efeito de $K_{\text{max,BL}}$ no perfil da fenda (subcarga); $F=40N$ ; $K=1.78 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ...	64
Figura B.5 - Efeito de $K_{\text{min,BL}}$ no nível de fecho de fenda (subcarga). ....	65
Figura B.6 - Efeito de $K_{\text{max,BL}}$ no valor mínimo da abertura de fenda (subcarga). ....	66
Figura B.7 - Efeito de $K_{\text{min,BL}}$ no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda (subcarga). ....	66
Figura B.8 - Efeito de $K_{\text{min,BL}}$ no perfil da fenda (subcarga); $F=40N$ ; $K=1.78 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ...	67
Figura B.9 - Efeito de $K_{UL}$ no nível de fecho de fenda. ....	68

---

Figura B.10 - Efeito de $K_{UL}$ no valor mínimo da abertura de fenda.....	68
Figura B.11 - Efeito de $K_{UL}$ no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda. ....	69
Figura B.12 - Efeito de $K_{UL}$ no perfil da fenda; $F=40N$ ; $K=1.78 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ .....	69
Figura B.13 - Forças de contacto a carga mínima (subcarga). ....	70

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Variação da $F_{\max, BL}$ , sendo $F_{\min, BL}$ e $F_{OL}$ constantes.....	18
Tabela 3.2 - Variação da $F_{\min, BL}$ , sendo $F_{\max, BL}$ e $F_{OL}$ constantes.....	18
Tabela 3.3 - Variação da $F_{OL}$ , sendo $F_{\min, BL}$ e $F_{\max, BL}$ constantes.....	19
Tabela 3.4 - Variação da $F_{\min, BL}$ e $F_{\max, BL}$ sendo $F_{OL}$ e $R$ constantes. ....	19
Tabela 3.5 - Variação da $F_{\max, BL}$ , sendo $F_{\min, BL}$ e $F_{UL}$ constantes.....	19
Tabela 3.6 - Variação da $F_{\min, BL}$ , sendo $F_{\max, BL}$ e $F_{UL}$ constantes.....	20
Tabela 3.7 - Variação da $F_{UL}$ , sendo $F_{\min, BL}$ e $F_{\max, BL}$ constantes.....	20
Tabela 3.8 - Variação da $F_{\min, BL}$ e $F_{\max, BL}$ sendo $F_{UL}$ e $R$ constantes. ....	20

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

a - Comprimento de fenda

da/dN - Velocidade de propagação

$F_{\max,Bl}$  - Força máxima da solicitação base

$F_{\min,Bl}$  - Força mínima da solicitação base

$F_{OL}$  - Força máxima correspondente à sobrecarga

$F_{UL}$  - Força mínima correspondente à subcarga

$K_{\max,Bl}$  - Fator de intensidade de tensão máximo da solicitação base

$K_{\min,Bl}$  - Fator de intensidade de tensão mínimo da solicitação base

$K_{OL}$  - Fator de intensidade de tensão máximo correspondente à sobrecarga

$K_{open}$  - Fator de intensidade de tensão de abertura de fenda

$K_{UL}$  - Fator de intensidade de tensão mínimo correspondente à subcarga

$M(T)$  - Provete com fenda central

R - Razão de tensões

$R_{eff}$  - Razão efetiva de tensões ( $=\sigma_{open}/\sigma_{\max}$ )

$r_{pc}$  - Dimensão da zona plástica cíclica

U - Razão de carga

$\Delta a_{peak}$  - Valor da propagação da fenda até atingir o pico

$\Delta a_{stb}$  - Valor da propagação requerida para a estabilização

$\Delta \epsilon_p$  - Gama de deformação plástica

$\Delta K$  - Gama do fator de intensidade de tensões

$\Delta K_{Bl}$  - Gama do fator de intensidade de tensões da solicitação base

$\Delta K_{eff}$  - Gama efetiva do fator de intensidade de tensões

$\Delta K_{OL}$  - Gama do fator de intensidade de tensões correspondente à subcarga

$\sigma_{\max}$  - Tensão máxima

$\sigma_{\min}$  - Tensão mínima

$\sigma_{open}$  - Tensão de abertura de fenda

$\sigma_{ys}$  - Tensão de cedência

## **Siglas**

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

COD - Deslocamento de abertura de fenda

DD3IMP - *Three-Dimensional Elasto-plastic Finite Element Program*

EN - *European Normalization*

FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

MFLE - Mecânica de Fratura Linear Elástica

OLR – *Overload Ratio* (Razão de sobrecarga)

PICC - *Plasticity Induced Crack Closure* (Fecho de fenda induzido por plasticidade)

ULR – *Underload Ratio* (Razão de subcarga)

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Muitas estruturas de engenharia estão sujeitas a cargas variáveis, o que faz com que a rotura por fadiga seja o principal modo de falha em serviço (Branco *et al.*, 2012). As fendas de fadiga compreendem os períodos de iniciação, propagação e fratura final, envolvendo muitas vezes danos materiais, humanos e económicos muito significativos. Por isso, é necessário aumentar a resistência e vida útil das estruturas, retardando ou eliminando o crescimento das fendas por fadiga.

Até à data já foram realizados inúmeros estudos sobre a propagação de fendas por fadiga em situações de amplitude constante, ou seja, com cargas mínimas e máximas uniformes ao longo do tempo. Mas, como se sabe, em muitas estruturas que estão sujeitas a ciclos de cargas, existem variações ocasionais de amplitude, como as sobrecargas e subcargas. Estas súbitas variações podem causar um aceleração e/ou retardamento no crescimento da fenda, por isso é fundamental um estudo mais complexo quando o tema é o efeito destas cargas e descargas inesperadas.

Para tal, é necessário estudar o fenómeno de fecho de fenda, identificado por Elber (1971), que consiste no contacto entre as faces de fenda durante o ciclo de carregamento, em que se pode verificar, na extremidade da fenda, variações de tensões, deformações e de energia. Existem vários mecanismos que são associados a este fenómeno, dentro dos quais se destaca o fecho de fenda induzido por plasticidade (PICC) (Ritchie *et al.*, 1980), que é, provavelmente, o mais usado para explicar o efeito das sobrecargas no crescimento de fendas por fadiga. A aplicação de uma sobrecarga produz um grande alongamento plástico à frente da extremidade da fenda, comparativamente com a solicitação base. À medida que a fenda cresce após a zona da sobrecarga, as tensões residuais causam um aumento do nível do fecho de fenda que vai fazer com que haja um retardamento da propagação da fenda.

Apesar de já terem sido feitos vários estudos sobre carregamentos de amplitude variável, o efeito destes no fenómeno de fadiga ainda não está totalmente

compreendido. Falta esclarecer se o fecho de fenda controla de facto a velocidade de propagação de fenda após aplicação de uma sobrecarga e falta compreender os micromecanismos que explicam as variações de fecho observadas. Além disso, é importante desenvolver modelos que permitam prever a variação de fecho pós-sobrecarga.

## 1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é, pois, analisar o efeito de variações de carga, nomeadamente de sobrecargas e subcargas, no fenómeno de fecho de fenda induzido por deformação plástica. Pretende-se mais especificamente:

- Identificar os parâmetros das curvas fecho de fenda versus propagação de fenda,  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})-\Delta a$ ;
- Desenvolver um estudo paramétrico para analisar os efeitos da força máxima, força mínima e força de sobrecarga/subcarga nos parâmetros referidos no ponto anterior;
- Identificar os mecanismos que explicam as variações de fecho de fenda após aplicação de sobrecargas.
- Desenvolver modelos de previsão dos pontos-chave das curvas fecho de fenda versus distância de propagação de fenda;
- Analisar a ligação entre  $\Delta K_{eff}$  e os parâmetros não lineares de extremidade de fenda, procurando demonstrar a validade do conceito de fecho de fenda em situações de variação de carga.

Este estudo foi feito numericamente utilizando o programa de elementos finitos DD3IMP desenvolvido pelo Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. Foram analisados os perfis da fenda após sobrecarga/subcarga; as forças de contacto a carga mínima, as curvas tensão-deformação em pontos de Gauss localizados à frente de fenda, os valores de fecho de fenda induzido por deformação plástica e os parâmetros não lineares de extremidade de fenda.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está dividida em seis capítulos juntamente com dois anexos. A estrutura é a seguinte:

- Capítulo 2: A chamada revisão bibliográfica, no qual são explicados, de forma sintética, os principais conceitos e definições necessários para um melhor entendimento dos capítulos seguintes;
- Capítulo 3: Descrição do modelo numérico, nomeadamente da geometria, propriedades do material, casos de carga estudados, e restantes condições de trabalho;
- Capítulo 4: Apresentação e análise dos resultados obtidos que foram realizados para a elaboração desta tese;
- Capítulo 5: Discussão dos resultados para uma melhor compreensão dos fenómenos estudados;
- Capítulo 6: O último capítulo, onde estão descritas as conclusões finais, juntamente com propostas para futuros trabalhos.
- No Anexo A apresenta-se um modelo empírico de fecho proposto na literatura. No Anexo B apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos para as subcargas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Fadiga

A falha por fadiga compreende três fases principais:

- 1) O período de iniciação que engloba a nucleação e o crescimento microscópico da fenda. Esta fase ocorre habitualmente à superfície devido ao facto dessa ser a zona que apresenta a maior concentração de tensões e onde a deformação plástica é mais fácil;
- 2) O período de propagação que é caracterizado pelo crescimento macroscópico da fenda, onde há um aumento progressivo de velocidade de propagação e do tamanho da fenda;
- 3) A rotura final, quando a fenda se apresenta com uma dimensão crítica.

A abordagem da Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE) tem sido fundamental para o estudo da propagação de fendas por fadiga. Irwin (1958) mostrou que a magnitude da tensão à frente da extremidade da fenda podia ser expressa em termos do fator de intensidade de tensão,  $K$ . Este fator quantifica a intensidade de tensões provocada pela existência da fenda e é dado pela seguinte expressão:

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

onde  $Y$  representa o parâmetro geométrico,  $\sigma$  a tensão aplicada e  $a$  o comprimento de fenda. Quando  $K$  atinge um valor crítico,  $K_c$ , também conhecido por tenacidade à fratura, ocorre a rotura instável do material.

Com bases nestes conceitos, chegou-se à conclusão que o estudo da propagação de fendas por fadiga está relacionado com a gama do fator de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , onde:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2.2)$$

em que  $K_{max}$  é o valor máximo de  $K$  e  $K_{min}$ , o valor mínimo, durante um ciclo de carga.

A realização desse estudo é, geralmente, feita através da análise das curvas  $da/dN-\Delta K$ , onde  $da/dN$  é a velocidade de propagação da fenda. Na figura 2.1, pode ser visto um exemplo típico deste tipo de curva, sendo possível identificar três regimes de propagação:

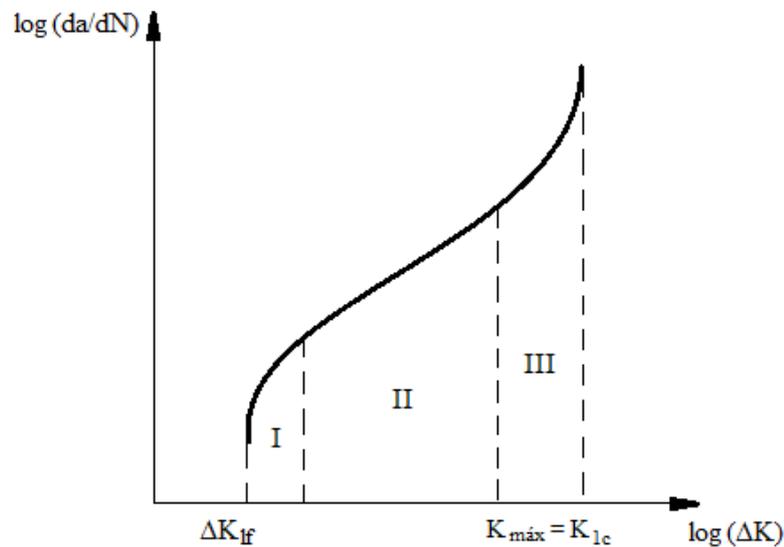


Figura 2.1 - Curva típica  $da/dN-\Delta K$ .

No regime I, verifica-se um crescimento lento da fenda, enquanto no regime III, o valor do  $K_{max}$  aproxima-se do valor crítico, fazendo com que haja uma aceleração da fenda, o que pode levar à fratura instável do material. No regime II pode-se comprovar que o logaritmo da velocidade de propagação e o logaritmo da gama do fator de intensidade de tensões apresentam uma relação linear. Essa relação pode ser descrita através de uma equação, também chamada Lei de Paris (1963):

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.3)$$

onde  $C$  e  $m$  são constantes do material. Apesar de esta equação ser apenas válida para o regime II, ela tem sido bastante utilizada nos mais variados estudos, devido à sua simplicidade. Contudo, a tensão média também tem um efeito significativo na propagação da fenda. Essa tensão média é dada pela razão de tensões ( $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ ), onde um aumento de  $R$  conduz ao aumento da velocidade propagação da fenda.

## 2.2. Fenómeno do Fecho de Fenda

Diferentes estudos tentaram explicar a influência da tensão média, onde se destaca o fenómeno do fecho de fenda, introduzido por Elber (1971), que tem sido amplamente adotado como o mecanismo essencial responsável pelos efeitos de  $R$ . Segundo Elber, a propagação da fenda, durante o ciclo de carga, só acontece quando esta se encontra totalmente aberta. Quando a fenda está fechada pode haver transmissão de tensões de compressão entre as suas faces o que faz com que a extremidade da fenda deixe de ser um ponto de concentração de tensões.

Desta forma, foi definida uma nova força motora da propagação de fendas por fadiga:  $\Delta K_{eff}$ , também conhecida por gama efetiva do fator de intensidade de tensões:

$$\Delta K_{ef} = K_{m\acute{a}x} - K_{open} \quad (2.4)$$

em que  $K_{open}$  é o fator de intensidade de tensão a partir do qual a fenda está aberta. Os parâmetros  $\Delta K$  e  $\Delta K_{eff}$  podem ser relacionados a partir da seguinte expressão:

$$\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K \quad (2.5)$$

onde:

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{open}}{K_{max} - K_{min}} \quad (2.6)$$

representa a porção do ciclo de carga durante a qual a fenda está aberta. Na figura 2.2, pode-se verificar um exemplo de um ciclo de carga, onde o que realmente conta para a propagação de fenda é a parte acima de  $K_{open}$ .

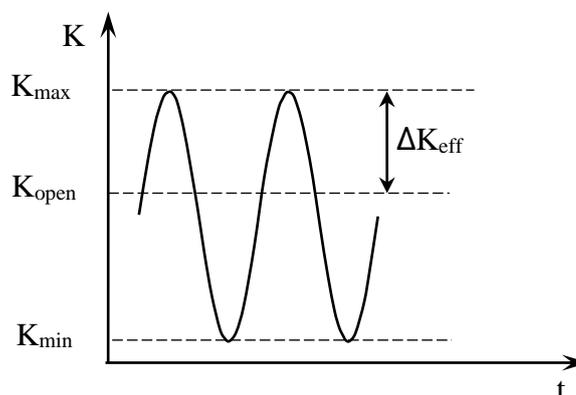


Figura 2.2 - Parâmetros de carregamento cíclico.

Dentro dos mecanismos do fecho de fenda, pode-se encontrar o fecho de fenda induzido por plasticidade (PICC) (Ritchie *et al.*, 1980), o fecho de fenda induzido por óxidos (Suresh *et al.*, 1981), o fecho de fenda induzido por rugosidade (Suresh *et al.*, 1982), o fecho de fenda induzido por fluido viscoso (Tzou *et al.*, 1985), o fecho de fenda induzido por transformação de fase (Pineau *et al.*, 1987) e o fecho de fenda induzido por grafite (Takeshio *et al.*, 1987). Este trabalho vai-se focar no estudo do PICC, por este ser o mais relevante no regime II de propagação de fenda. A aplicação de um carregamento faz com que ocorra deformação plástica na extremidade da fenda. Com a propagação de fenda, forma-se uma onda plástica residual inserida num meio deformado elasticamente. A recuperação elástica do material circundante, durante a descarga, força o contacto das faces da fenda, o que tem um efeito protetor sobre os campos de tensão e deformação que ocorrem na extremidade da fenda.

O fenómeno do fecho de fenda tem sido bastante importante para explicar diferentes aspetos da propagação de fendas por fadiga, como a influência da tensão média nos regimes I e II de propagação (Elber, 1971; Blom, 1984; Borrego, 2001), o crescimento transiente de fenda após a aplicação das sobrecargas (Borrego, 2001), a taxa de crescimento de fendas curtas (Rao, 1988) e o efeito da espessura (Bao, 1998; Costa, 1998).

Diferentes modelos empíricos foram propostos na literatura com o objetivo de referir a influência da tensão média no fecho de fenda induzido por plasticidade e no crescimento da fenda. Nesses modelos, o nível de fecho de fenda (PICC) foi quantificado pelo parâmetro,  $U$ , ou pela razão efetiva de tensões:

$$PICC = R_{eff} = \frac{\sigma_{open}}{\sigma_{max}} \quad (2.7)$$

Os parâmetros  $U$  e PICC estão relacionados através da expressão:

$$PICC = 1 - (1 - R)U \quad (2.8)$$

### 2.3. Solicitações de Amplitude Variável

Neste trabalho, pretende-se estudar a propagação de fendas para o caso de solicitações de amplitude variáveis, que são bastante usuais na prática. Em casos de solicitações de amplitude constante, o aumento do comprimento da fenda depende apenas do valor máximo e mínimo da tensão aplicada (para além dos parâmetros geométricos e de

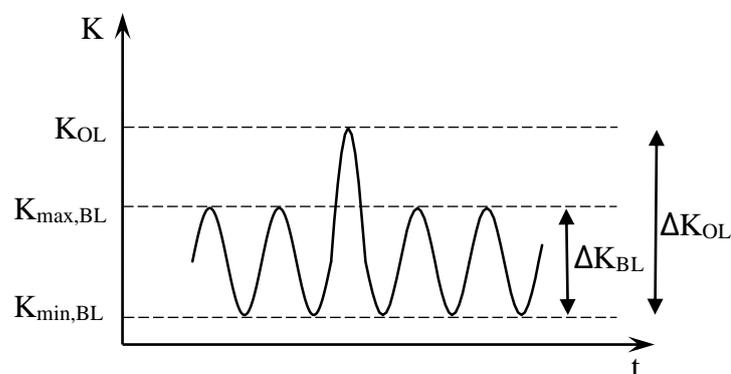
material). Nos casos de amplitude variável, o crescimento da fenda por fadiga é mais complexo pois as amplitudes e os valores médios das tensões precedentes também vão ter um grande peso, sendo formado um efeito chamado “história de carga”. Dentro das amplitudes variáveis, existem as sobrecargas, subcargas e blocos de carga. As solicitações mais estudadas são as sobrecargas, porque é usual nos espectros de cargas reais existirem picos de carga. Além disso, o estudo das sobrecargas permite uma primeira abordagem à complexidade dos ciclos reais. As sobrecargas podem ainda ser utilizadas, de modo controlado, para aumentar a vida à fadiga dos componentes. Por isso, este trabalho vai-se focar, principalmente, nas sobrecargas, sendo depois feito um breve estudo sobre as subcargas.

Na figura 2.3 está representado um carregamento cíclico, desta vez com a solicitação de uma sobrecarga. Nesta figura identificam-se os diferentes parâmetros independentes que é possível considerar. Os parâmetros  $K_{max,BL}$  e  $K_{min,BL}$  são os fatores de intensidade de tensões máximos e mínimos, respetivamente, da solicitação base e o  $K_{OL}$  é o fator de intensidade de tensão máximo correspondente à sobrecarga. A intensidade da sobrecarga, também chamada razão de sobrecarga, pode ser representada através da seguinte expressão:

$$OLR = \frac{\Delta K_{OL}}{\Delta K_{BL}} = \frac{K_{OL} - K_{min,BL}}{K_{max,BL} - K_{min,BL}} \quad (2.9)$$

A solicitação base tem uma razão de tensões:

$$R = \frac{\sigma_{min,BL}}{\sigma_{max,BL}} = \frac{K_{min,BL}}{K_{max,BL}} \quad (2.10)$$



**Figura 2.3** - Carregamento cíclico com uma sobrecarga aplicada.

Pretende-se perceber de que modo a aplicação da sobrecarga afeta a propagação de fenda durante o carregamento cíclico subsequente. Vários mecanismos foram criados para explicar o retardamento do crescimento da fenda após a aplicação da sobrecarga, entre os quais se encontram as tensões residuais (Shijve, 1962), o fecho de fenda (Elber, 1971), o arredondamento da extremidade da fenda (Christensen, 1959), o endurecimento do material à frente da extremidade da fenda (Jones, 1973) e a frente de fenda irregular (Suresh, 1983).

Rice (1967) argumentou que o arredondamento da extremidade da fenda devido a um ciclo com sobrecarga pode levar ao retardamento do crescimento da fenda. O mecanismo subjacente para este atraso é que a extremidade da fenda vai-se comportar como um entalhe com uma menor concentração de tensões do que a fenda original. A subdivisão da fenda (*crack branching*), que costuma acontecer imediatamente após uma sobrecarga, pode contribuir para a redução de tensões residuais devido à maximização do efeito do arredondamento. Foi sugerido que o atraso do crescimento da fenda resulta da contribuição combinada do aumento das tensões compressivas residuais e do arredondamento da extremidade da fenda com fendas secundárias (Lee *et al.*, 2011). Apesar do arredondamento influenciar o crescimento da fenda após a sobrecarga, este fenómeno não pode racionalizar quantitativamente as reduções da propagação da fenda por fadiga (pós sobrecarga) observadas experimentalmente.

Como já foi referido no capítulo da Introdução, a aplicação da sobrecarga produz um alongamento do material à frente da fenda. Esta cunha plástica faz variar o contacto das faces da fenda, o que se reflete na gama efetiva do fator de intensidade de tensões,  $\Delta K_{\text{eff}}$ , e conseqüentemente na velocidade de propagação da fenda.

Já se sabe que o nível de fecho de fenda (PICC) é dado pela expressão  $\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}}$ . Na figura 2.4 são apresentadas duas curvas típicas  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})-\Delta a$  com os diferentes parâmetros que serão a base deste trabalho. A curva a tracejado (OLR=1) é a curva de fecho obtida sem aplicação de sobrecarga, ou seja, a amplitude constante. Pode-se verificar que o PICC vai sofrendo um ligeiro aumento à medida que o comprimento da fenda aumenta, mas não muito significativo. Na curva contínua (OLR=1.125), antes da aplicação da sobrecarga, os valores do PICC são iguais aos da curva base. A sobrecarga é aplicada quando  $\Delta a=0.472$  mm, fazendo com que haja uma repentina descida do PICC.

Esta redução acontece devido ao fenómeno do arredondamento da extremidade da fenda que será explicado mais à frente no capítulo da discussão dos resultados. Depois disso, dá-se um aumento do PICC até atingir um valor máximo e uma nova redução até alcançar a sua estabilização. Os principais parâmetros das curvas  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})-\Delta a$  são: o valor mínimo da abertura de fenda,  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{min}$ ; o decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda,  $\Delta(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{min}$ ; o valor do pico da abertura de fenda,  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{peak}$ ; o acréscimo do valor do pico da abertura de fenda,  $\Delta(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{peak}$ ; o valor da propagação da fenda até atingir o pico,  $\Delta a_{peak}$ ; o valor da propagação requerida para a estabilização,  $\Delta a_{stb}$ .

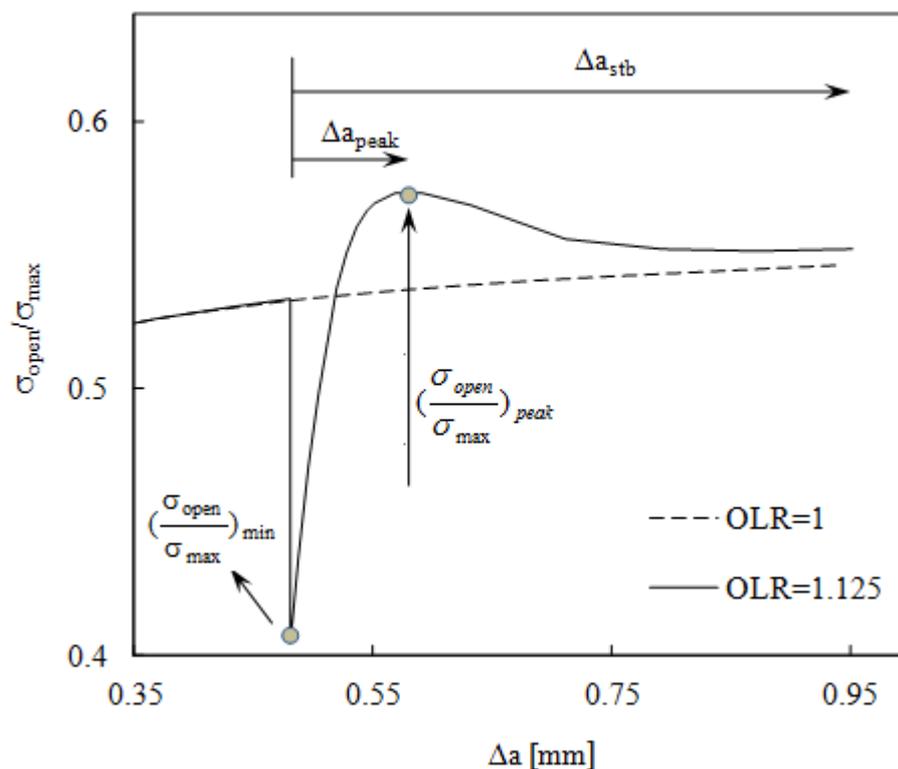
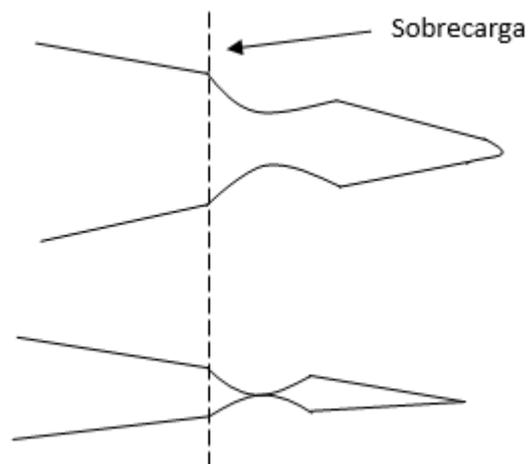


Figura 2.4 - Curvas típicas  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})-\Delta a$  com e sem sobrecarga.

Na figura 2.5 pode-se visualizar o perfil da fenda após uma sobrecarga (Fleck, 1988): no primeiro caso, a fenda ainda está aberta ( $K=K_{max}$ ); no segundo caso, as faces da fenda já estão em contacto, o que traduz o chamado fenómeno de fecho de fenda ( $K=K_{open}$ ). Pode-se verificar a existência de lombas residuais de deformação plástica nas faces da fenda à frente da zona onde a sobrecarga foi aplicada. Este excesso de material faz aumentar as tensões de contacto, resultando, assim, em elevados níveis de fecho de fenda, em comparação com uma situação a amplitude constante.

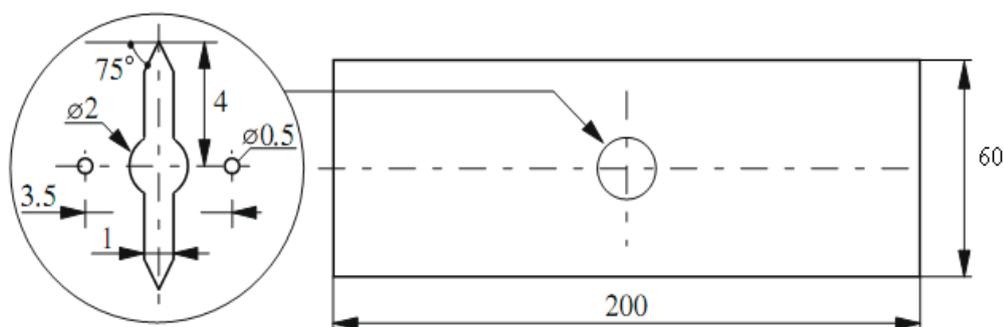


**Figura 2.5** - Representação do perfil da fenda após uma sobrecarga.

### 3. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

#### 3.1. Geometria e Discretização por Elementos Finitos

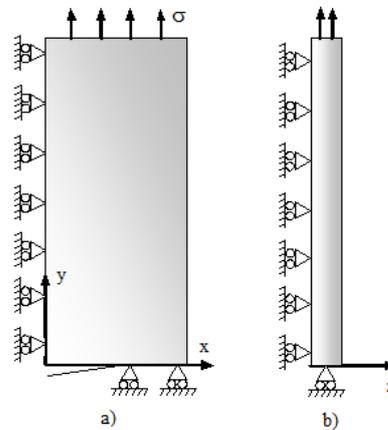
Para a realização deste estudo, foram feitas simulações numéricas, utilizando um programa de elementos finitos, o *Three-Dimensional Elasto-plastic Finite Element Program* (DD3IMP), desenvolvido pelo Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. Considerou-se um provete com fenda central, tipo M(T), com uma geometria 3D conforme a norma ASTM E647 (2011), uma espessura de 0.2 mm e um comprimento inicial de  $a_0 = 5\text{mm}$ . Na figura 3.1, podem ver-se as dimensões do provete. O motivo da escolha desta geometria deve-se ao facto, de além de ser normalizada, já ter sido utilizada noutros estudos como (Chermahini *et al.*, 1993), (Dougherty *et al.*, 1997), (Borrego, 2001), (Roychowdury *et al.*, 2003), (Jiang *et al.*, 2005) e (Alizadeh *et al.*, 2006).



**Figura 3.1** - Geometria do provete juntamente com o detalhe do entalhe central.

Devido à simetria do provete, apenas foi considerado 1/8 deste, aplicando condições de simetria adequadas. Com esta medida, consegue-se reduzir o peso numérico aliado a cada ensaio, não havendo alterações em termos de previsões numéricas. Na figura 3.2, pode-se visualizar as condições de fronteira a que o provete está sujeito e o respetivo

carregamento. A simulação do contacto das faces da fenda foi feita através da colocação de um plano rígido paralelo à fenda.



**Figura 3.2** - Condições de fronteira e carregamento.

Na figura 3.3, está demonstrada, em detalhe, a malha de elementos finitos. Como se pode verificar, existe uma zona mais refinada que é a zona da extremidade da fenda. Para os ensaios realizados, foram considerados elementos quadrados com  $8\ \mu\text{m}$  de lado na zona mais refinada. Como este é o “ponto de interesse” deste estudo, tem sentido haver um refinamento maior neste local que vai fazer com que os resultados sejam mais precisos, mais fiáveis. O refinamento da malha aumenta o esforço numérico, então, para aliviar o peso numérico geral, como as zonas mais afastadas da extremidade da fenda não têm tanto motivo de interesse para este estudo, o refinamento da malha nessas zonas é mais reduzido, como se pode visualizar na figura 3.3. Para obter a malha 3D, a malha 2D foi extrudada na direção da espessura. O modelo de elementos finitos tem um número total de elementos isoparamétricos de 6639 e 13586 nós.

A propagação de fenda foi simulada libertando um elemento após cada 2 ciclos de carga, sempre a carga mínima. A aplicação da sobrecarga ou subcarga foi feita no segundo ciclo da 60ª propagação. As simulações numéricas prosseguiram, tendo sido paradas ao fim de 160 propagações de fenda, cada uma de  $8\ \mu\text{m}$ . Além disso, para comparação, foram feitos estudos a amplitude de carga constante, que decorriam ininterruptamente até à 160ª propagação.

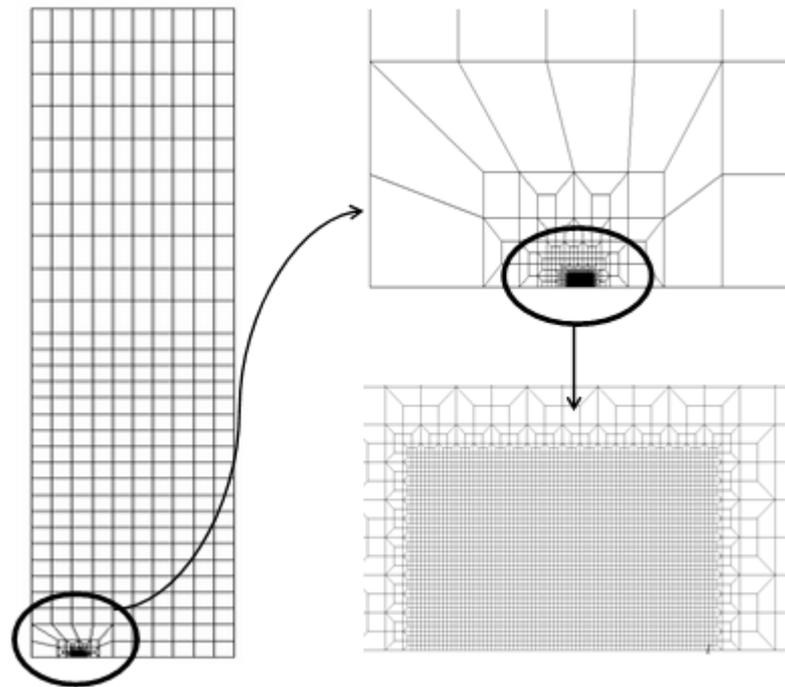


Figura 3.3 - Malha de elementos finitos com vista frontal em pormenor.

### 3.2. Modelação do Comportamento Mecânico do Material

O material que está em análise neste estudo é a liga de alumínio 6016 com tratamento T4: 6016-T4 (solubilizado e envelhecido naturalmente) com uma tensão de cedência de 124 MPa. Este material também é conhecido por AA-6016 segundo as normas da Aluminium Association, EN AW-6016 segundo a norma europeia EN 573 do Comité Europeu para a Normalização e AlMgSi devido às elevadas percentagens de magnésio e silício.

Como já foi referido no capítulo de Introdução, o fenómeno de fecho de fenda induzido por deformação plástica está profundamente ligado à deformação plástica que ocorre na extremidade da fenda por ação do carregamento cíclico. Deste modo, é fundamental modelar corretamente o comportamento elasto-plástico do material. A liga em estudo apresenta características de comportamento elasto-plástico que são um misto de encruamento isotrópico e cinemático. De modo a descrever o comportamento isotrópico do material durante a simulação, foi usado o modelo de Voce:

$$Y = Y_0 + R_{sat}(1 - e^{-n_v \bar{\epsilon}^p}), \quad (3.1)$$

A componente cinemática foi modelada usando uma lei de saturação (Haddadi, 2006):

$$\dot{\mathbf{X}} = C_x \left[ \frac{X_{sat}(\sigma' - \mathbf{X})}{\bar{\sigma}} - \mathbf{X} \right] \dot{\varepsilon}^p, \text{ com } \mathbf{X}(0) = 0, \quad (3.2)$$

Nas equações 3.1 e 3.2,  $\varepsilon^p$ ,  $Y_0$ ,  $n_v$ ,  $R_{sat}$ ,  $C_x$  e  $X_{sat}$  são constantes características do material. A anisotropia do material foi descrita recorrendo ao critério de Hill:

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = K^2, \quad (3.3)$$

em que F, G, H, L e N são os coeficientes que definem o estado de anisotropia do material. A caracterização do comportamento elasto-plástico do material foi efetuada realizando ensaios de tração e de corte em trajetórias simples e complexas (Chaparro, 2008). As constantes determinadas para o material em estudo foram:  $Y_0=124$  MPa,  $R_{sat}=291$  MPa,  $n_v=9.5$ ,  $C_x=146.5$ ,  $X_{sat}=34.90$  MPa,  $F=0.5998$ ,  $G=0.5862$ ,  $H=0.4138$  e  $L=M=N=1.2654$

### 3.3. Obtenção dos Resultados a partir do DD3IMP

Para o estudo do fecho de fenda, foi utilizado o programa DD3IMP como já tinha sido referido no início deste capítulo. Neste programa, é necessário inserir informações, através de certos ficheiros, para os obter os resultados pretendidos. Na figura 3.4, está presente um esquema que representa esse funcionamento. De forma sintética, como dados de entrada, existem os ficheiros que caracterizam os seguintes aspetos: o modelo de elementos finitos (mesh.dat), o material (mater1.dat), as condições de carregamento (phase.dat), os pontos de Gauss onde se pretendem obter as curvas tensão-deformação (GaussPoints.dat) e as condições de fronteira (bcon.dat). O ficheiro “input.dat” fornece parâmetros de controlo para o correto funcionamento do programa e o ficheiro “tool.dat” define as “ferramentas” que fazem a aplicação de carga e permitem simular o contacto das faces da fenda. Como dados de saída, o ficheiro “#1\_enti1.res” contém os resultados das forças aplicadas na simulação, o “bloco160.ufo” a informação global no bloco 160, o “Fcont.dd3” as forças de contacto à carga mínima e o “NosFenda2.dat” as coordenadas dos diferentes nós do flanco da fenda para os diferentes níveis de carga.

---

Depois de os dados de saída serem obtidos, estes são tratados para obter os valores de fecho de fenda. Para quantificar o nível do fecho de fenda, foram usados dois parâmetros numéricos:

- $PICC_{\text{node1}}$  – baseia-se no contacto do primeiro nó atrás da extremidade da fenda. Para evitar problemas associados com o aumento discreto da carga, a carga de abertura é obtida a partir da extrapolação linear das cargas correspondente aos dois incrementos após abertura da fenda;
- $PICC_{\text{contact}}$  – baseia-se nas forças de contacto a carga mínima. A carga de abertura de fenda é obtida através do somatório das cargas remotas que eliminam cada uma das forças de contacto a carga mínima. Este método tem a vantagem de envolver todos os nós em contacto atrás da extremidade da fenda, o que é vantajoso no caso das sobrecargas, pois ocorre frequentemente fecho parcial (isto é, fecho em zonas afastadas da extremidade da fenda). Informações mais detalhadas deste método podem ser encontradas na literatura (Antunes, 2014).

Existe ainda um terceiro parâmetro que já foi usado em trabalhos anteriores para casos de amplitudes constantes,  $PICC_{\text{compliance}}$ , entretanto, no caso deste estudo, deu vários resultados insatisfatórios. Por isso, para este trabalho, os resultados têm como base os dois parâmetros referidos em cima.

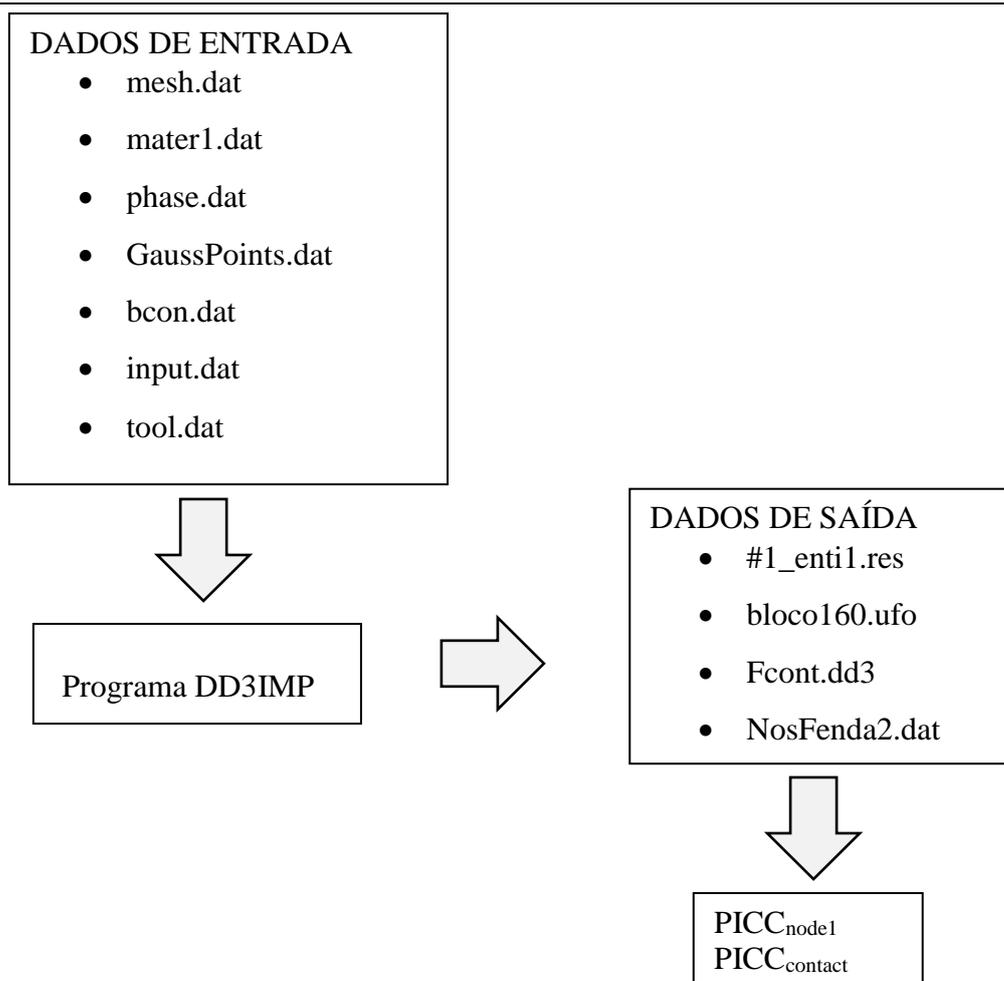


Figura 3.4 - Processo para obtenção dos resultados.

### 3.4. Condições de Ensaio

O estudo do efeito da  $K_{\max, BL}$ ,  $K_{\min, BL}$  e  $K_{OL}$  (ver figura 2.3) é fundamental para a análise do fecho de fenda, em casos de amplitude variável. Devido à complexidade do tema, foram realizados diversos ensaios, onde se variaram os parâmetros referidos. Estes ensaios estão representados nas seguintes tabelas e foram designados como  $F_{\min, BL}$ ,  $F_{\max, BL}$ ,  $F_{OL}$  para as sobrecargas e  $F_{\min, BL}$ ,  $F_{\max, BL}$ ,  $F_{UL}$  para as subcargas (anexo B). A letra F designa as forças aplicadas remotamente. Os casos onde não houve a aplicação de sobrecarga/subcarga terão como nome  $F_{\min, BL}$ ,  $F_{\max, BL}$ . Uma força negativa será representada com um N antes do seu valor. Haverá situações onde vai ser necessário referir mais que um ensaio, então terá o mesmo tipo de designação, alterando apenas a sigla que varia: por exemplo, N50\_  $F_{\max, BL}$ \_140 refere-se aos 4 primeiros ensaios da tabela 3.1 onde se varia a  $F_{\max, BL}$ .

Os valores de  $K$ , para o provete  $M(T)$ , foram obtidos através da seguinte expressão:

$$Y = \frac{K}{\sigma\sqrt{\pi a}} = a_1 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - a_2 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + a_3 \frac{a}{W} + a_4, \quad (3.4)$$

em que  $a=5,472$  mm,  $a_1=1,187086$ ,  $a_2=-0,0680$ ,  $a_3=0,113$  e  $a_4=1,009325$  são constantes obtidas numericamente,  $W$  é a largura do provete e  $a$  o comprimento de fenda. A tensão remota aplicada,  $\sigma$ , está relacionada com a força aplicada de acordo com:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{30 \times 0.1} = \frac{F}{3} \quad (3.5)$$

Notar que a porção de provete simulado tem largura de 30 mm e uma espessura de 0.1 mm.

**Tabela 3.1** - Variação da  $F_{\max, BL}$ , sendo  $F_{\min, BL}$  e  $F_{OL}$  constantes.

Designação	$F_{\min, BL}$ [N]	$F_{\max, BL}$ [N]	$F_{OL}$ [N]	$K_{\min, BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{\max, BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{OL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]
N50_25_140	-50	25	140	-2.23	1.11	6.24
N50_50_140		50			2.23	
N50_75_140		75			3.34	
N50_100_140		100			4.46	
0_60_160	0	60	160	0	2.68	7.13
0_80_160		80			3.57	
0_100_160		100			4.46	
0_140_160		140			6.24	
0_60_200	0	60	200	0	2.68	8.92
0_80_200		80			3.57	
0_100_200		100			4.46	
0_140_200		140			6.24	
0_180_200		180			8.02	

**Tabela 3.2** - Variação da  $F_{\min, BL}$ , sendo  $F_{\max, BL}$  e  $F_{OL}$  constantes.

Designação	$F_{\min, BL}$ [N]	$F_{\max, BL}$ [N]	$F_{OL}$ [N]	$K_{\min, BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{\max, BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{OL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]
0_100_140	0	100	140	0	4.46	6.24
N50_100_140	-50			-2.23		
N100_100_140	-100			-4.46		
N150_100_140	-150			-6.69		
60_140_160	60	140	160	2.68	6.24	7.13
20_140_160	20			0.89		
N20_140_160	-20			-0.89		
N60_140_160	-60			-2.68		
N100_140_160	-100			-4.46		
60_140_180	60	140	180	2.68	6.24	8.02
20_140_180	20			0.89		
N20_140_180	-20			-0.89		
N60_140_180	-60			-2.68		
N100_140_180	-100			-4.46		

**Tabela 3.3** - Variação da  $F_{OL}$ , sendo  $F_{min,BL}$  e  $F_{max,BL}$  constantes.

Designação	$F_{min,BL}$ [N]	$F_{max,BL}$ [N]	$F_{OL}$ [N]	$K_{min,BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{max,BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{OL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]
N50_50_75	-50	50	75	-2.23	2.23	3.34
N50_50_100			100			4.46
N50_50_125			125			5.57
N50_50_150			150			6.69
0_50_62.5	0	50	62.5	0	2.23	2.79
0_50_75			75			3.34
0_50_87.5			87.5			3.90
0_50_100			100			4.46
0_100_150	0	100	150	0	4.46	6.69
0_100_175			175			7.80
0_100_200			200			8.92
0_100_225			225			10.03
20_140_170	20	140	170	0.89	6.24	7.58
20_140_200			200			8.92
20_140_230			230			10.25
20_140_260			260			11.59
60_140_160	60	140	160	2.68	6.24	7.13
60_140_180			180			8.02
60_140_200			200			8.92
60_140_220			220			9.81

**Tabela 3.4** - Variação da  $F_{min,BL}$  e  $F_{max,BL}$  sendo  $F_{OL}$  e  $R$  constantes.

Designação	$F_{min,BL}$ [N]	$F_{max,BL}$ [N]	$F_{OL}$ [N]	$K_{min,BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{max,BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{OL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]
16_80_160	16	80	160	0.71	3.57	7.13
20_100_160	20	100		0.89	4.46	
24_120_160	24	120		1.07	5.35	
27_140_160	28	140		1.25	6.24	

**Tabela 3.5** - Variação da  $F_{max,BL}$ , sendo  $F_{min,BL}$  e  $F_{UL}$  constantes.

Designação	$F_{min,BL}$ [N]	$F_{max,BL}$ [N]	$F_{UL}$ [N]	$K_{min,BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{max,BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{UL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]
0_60_N100	0	60	-100	0	2.68	-4.46
0_80_N100		80			3.57	
0_100_N100		100			4.46	
0_140_N100		140			6.24	
0_180_N100		180			8.02	
0_60_N50	0	60	-50	0	2.68	-2.23
0_80_N50		80			3.57	
0_100_N50		100			4.46	
0_140_N50		140			6.24	
0_180_N50		180			8.02	

**Tabela 3.6** - Variação da  $F_{\min, BL}$ , sendo  $F_{\max, BL}$  e  $F_{UL}$  constantes.

Designação	$F_{\min, BL}$ [N]	$F_{\max, BL}$ [N]	$F_{UL}$ [N]	$K_{\min, BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{\max, BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{UL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]
60 140 N150	60	140	-150	2.68	6.24	-6.69
20 140 N150	20			0.89		
N20 140 N150	-20			-0.89		
N60 140 N150	-60			-2.68		
N100 140 N150	-100			-4.46		
60 140 N100	60	140	-100	2.68	6.24	-4.46
20 140 N100	20			0.89		
N20 140 N100	-20			-0.89		
N60 140 N100	-60			-2.68		

**Tabela 3.7** - Variação da  $F_{UL}$ , sendo  $F_{\min, BL}$  e  $F_{\max, BL}$  constantes.

Designação	$F_{\min, BL}$ [N]	$F_{\max, BL}$ [N]	$F_{UL}$ [N]	$K_{\min, BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{\max, BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{UL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]
0 100 N25	0	100	-25	0	4.46	-1.11
0 100 N50			-50			-2.23
0 100 N75			-75			-3.34
0 100 N100			-100			-4.46
0 100 N125			-125			-5.57
N20 140 N60	-20	140	-60	-0.89	6.24	-2.68
N20 140 N100			-100			-4.46
N20 140 N140			-140			-6.24
N20 140 N180			-180			-8.02
N20 140 N220			-220			-9.81

**Tabela 3.8** - Variação da  $F_{\min, BL}$  e  $F_{\max, BL}$  sendo  $F_{UL}$  e  $R$  constantes.

Designação	$F_{\min, BL}$ [N]	$F_{\max, BL}$ [N]	$F_{UL}$ [N]	$K_{\min, BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{\max, BL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]	$K_{UL}$ [MPa.m <sup>0,5</sup> ]
16 80 N50	16	80	-50	0.71	3.57	-2.23
20 100 N50	20	100		0.89	4.46	
24 120 N50	24	120		1.07	5.35	
28 140 N50	28	140		1.25	6.24	

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. Efeito do Parâmetro Numérico de Fecho de Fenda

Como já foi referido no capítulo 3, foram usados, para todos os ensaios, dois parâmetros para quantificar o nível de fecho de fenda:  $PICC_{node1}$  e  $PICC_{contact}$ . A comparação dos resultados obtidos com os dois parâmetros permitiu verificar que para a maior parte desses ensaios a tendência era igual, enquanto noutros havia diferenças notórias. Na figura 4.1, onde se representa a variação de fecho de fenda obtida com os dois parâmetros em solicitações de amplitude constante e com aplicação de sobrecarga, pode-se visualizar a tendência mais verificada durante os testes. Pode confirmar-se que os valores de fecho são menores para o caso do  $PICC_{contact}$  tanto na curva correspondente à solicitação base, como na curva da sobrecarga, devido à natureza do próprio método. Esta diferença já foi verificada em estudos anteriores e, por norma, existe uma razão entre os valores dos dois parâmetros da ordem de 0,9 (Antunes *et al.*, submetido).

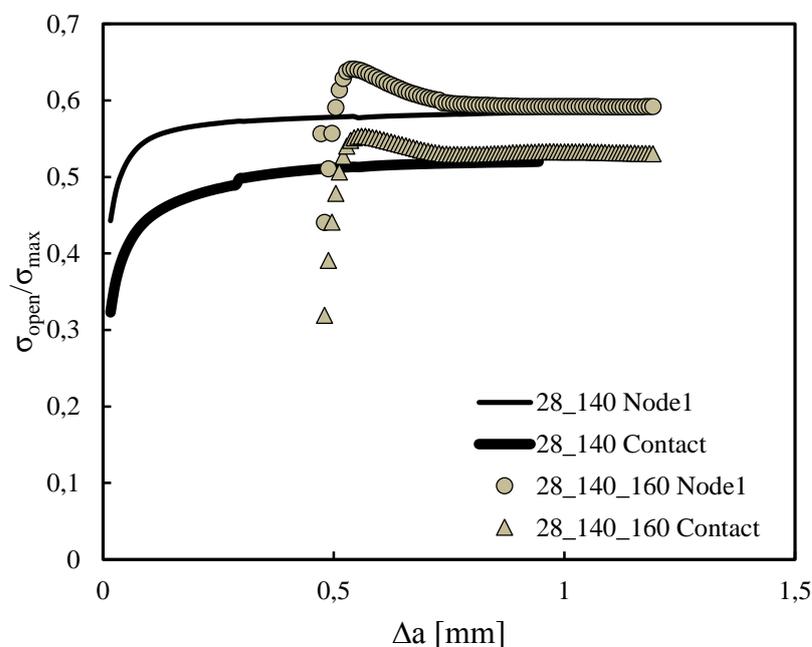


Figura 4.1 - Comparação entre  $PICC_{node1}$  e  $PICC_{contact}$ .

Mas nem em todos os testes se confirmou este tipo de tendência, tendo existido alguns problemas para o parâmetro  $PICC_{node1}$ . Na figura 4.2 apresentam-se os valores de fecho obtidos para os ensaios 0\_80 (amplitude constante) e 0\_80\_160 (sobrecarga) com base no  $PICC_{node1}$ . Pode verificar-se que, na curva obtida no caso em que a sobrecarga é aplicada, após o pico, o fecho desce abaixo da curva base, estabilizando a crescer, o que não é usual conforme se pode confirmar nas figuras 4.1. e 2.4. De facto, este fenómeno nunca foi verificado na literatura podendo ser explicado pela ocorrência de fecho parcial significativo. Notar que a análise do nó 1 centra-se na extremidade da fenda, porém, após propagação da fenda, esta pode estar aberta e existir contacto remotamente. A determinação de fecho utilizando as forças de contacto, que engloba todo o contacto das faces da fenda, elimina este problema.

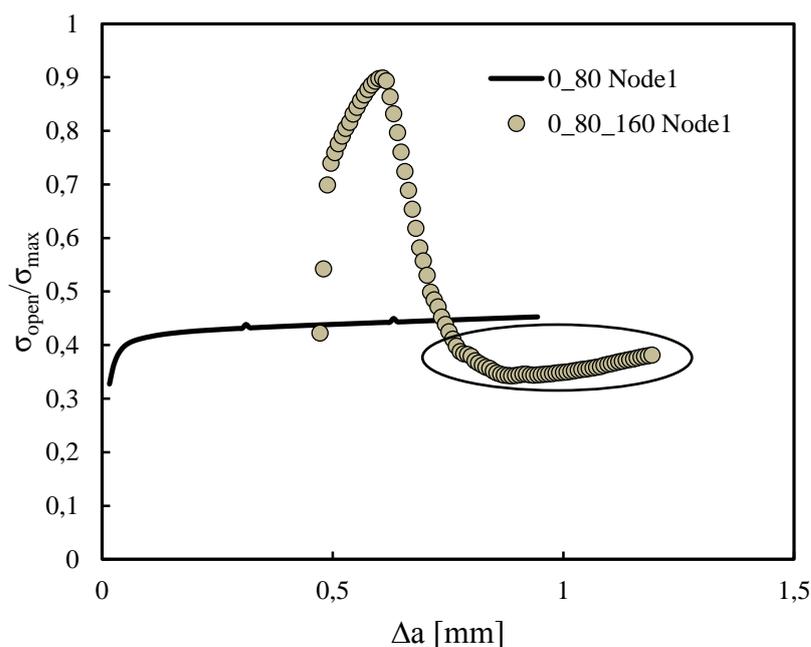
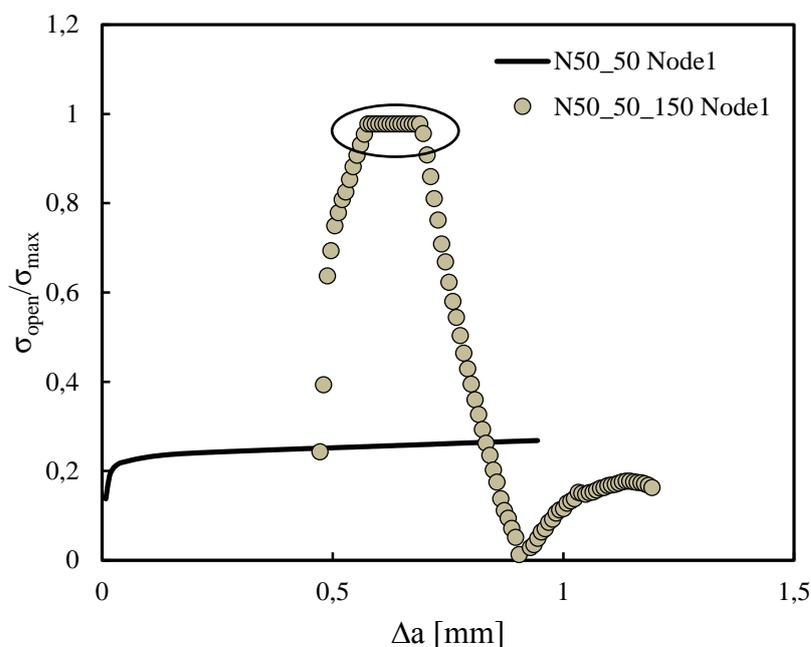


Figura 4.2 - Demonstração de um caso utilizando o  $PICC_{node1}$  (1).

A figura 4.3 mostra outro exemplo da discrepância entre os dois parâmetros. Nesta figura representa-se a variação de fecho de fenda obtida com o nó 1 em solicitações de amplitude constante e com aplicação de sobrecarga. Como se pode ver, quando há o aumento do nível de fecho de fenda até atingir o pico, este não desce logo, mas permanece constante há medida que o comprimento de fenda aumenta, sendo que a sua descida é

efetuada mais tarde. Pode-se verificar que quando este tipo de fenómeno acontece, o nível de fecho de fenda é igual a 1, ou seja, a fenda está completamente fechada. Este tipo de casos apenas aconteceu quando havia uma grande diferença entre a força máxima da solicitação base e a força correspondente à sobrecarga. Esta situação não acontece para o  $PICC_{\text{contact}}$ , pois, neste modelo, a carga de abertura de fenda é o somatório das cargas remotas que eliminam cada uma das forças de contacto a carga mínima. Como este método dá sempre a carga necessária para abrir a fenda, o valor do pico do PICC não estabiliza, sendo que, para alguns casos, este valor pode ser superior a 1. Todo este fenómeno, em termos práticos, implicaria a paragem da propagação da fenda, sendo que, numericamente, a fenda é forçada a propagar-se.



**Figura 4.3** - Demonstração de um caso utilizando o  $PICC_{\text{node1}}$  (2).

Um outro aspeto relevante é o modo como a carga de abertura é apresentada, podendo utilizar-se os parâmetros  $\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}}$ ,  $U$  ou mesmo  $\Delta K_{\text{eff}}$ . Na figura 4.4 apresentam-se os resultados obtidos através da razão de carga,  $U$ , onde se pode verificar que as curvas  $U$ - $\Delta a$  vão ser o simétrico das curvas  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})$ - $\Delta a$ , já que o parâmetro  $U$  representa a porção do ciclo de carga durante a qual a fenda está aberta.

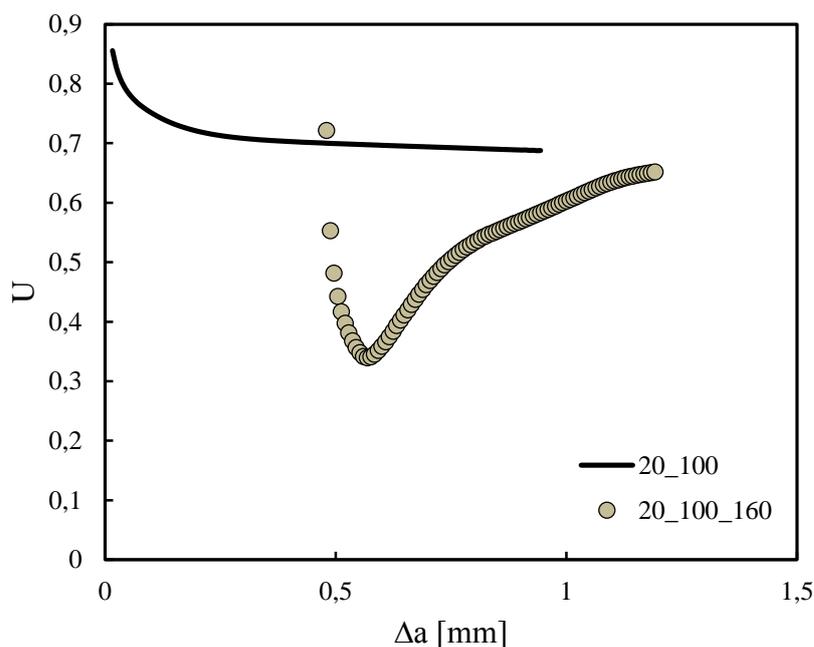


Figura 4.4 - Evolução da fenda em relação a U.

Com base no que foi dito em cima, os resultados que irão ser apresentados nos seguintes subcapítulos foram obtidos através do parâmetro  $PICC_{contact}$ .

## 4.2. Efeito dos Parâmetros de Carga

A realização deste trabalho tem como principal objetivo estudar o efeito das sobrecargas e subcargas (Anexo B) no fecho de fenda. Este estudo será feito através das curvas  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})-\Delta a$ , onde os seus principais parâmetros foram identificados no capítulo 2. Então, nos seguintes subcapítulos, para cada parâmetro de carga, serão mostradas as curvas  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})-\Delta a$  e o efeito desses parâmetros de carga nos pontos das referidas curvas e no perfil de fenda. Notar que, como os parâmetros de carga serão representados pelo fator de intensidade de tensão, em certos gráficos, quando a  $F_{min}$  é negativa, irá aparecer o valor de K negativo, o que não está completamente correto. Mesmo assim, desta forma, é possível explicar a variação da carga. Então, por uma questão de uniformização, utilizou-se o K nos eixos dos x em todos os gráficos.

#### 4.2.1. Efeito de $K_{\max, BL}$

Na figura 4.5 estão representadas as curvas  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})-\Delta a$  para três ensaios diferentes (a amplitude variável), onde se variou o  $K_{\max, BL}$  enquanto o  $K_{\min, BL}$  e  $K_{OL}$  se mantiveram constantes. A diferença mais notória que se pode verificar é que quanto maior for o valor  $K_{\max, BL}$ , menor é o valor do pico das curvas para os casos em que a sobrecarga é aplicada. Em termos de solicitação base (a amplitude constante), quanto maior é o valor  $K_{\max, BL}$ , maior será o nível de fecho de fenda.

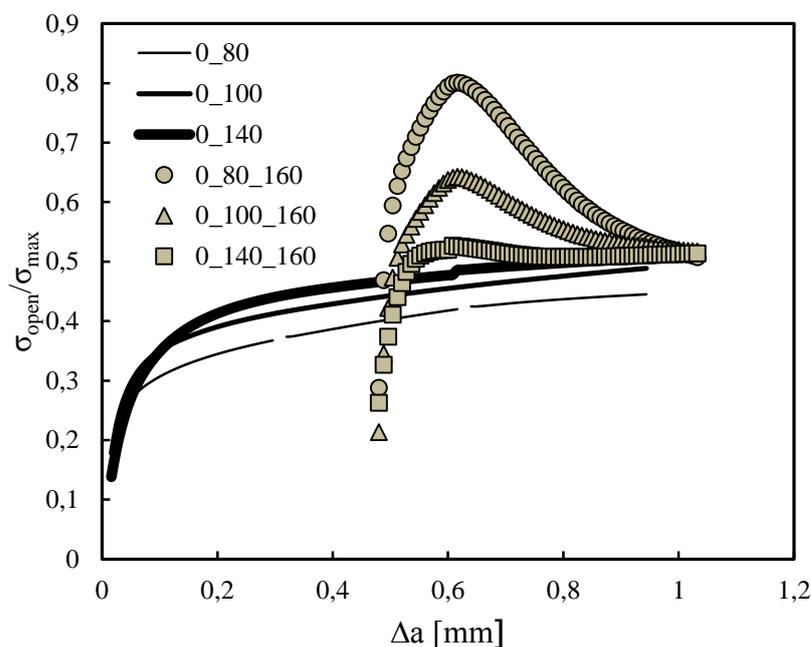


Figura 4.5 - Efeito de  $K_{\max, BL}$  no nível de fecho de fenda.

O estudo mais em pormenor da influência do  $K_{\max, BL}$  pode ver-se nas figuras 4.6-4.10, onde se analisa o seu efeito em relação aos diferentes parâmetros das curvas  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})-\Delta a$ , estando representados todos os ensaios em que houve variação do  $K_{\max, BL}$ .

Em relação ao valor mínimo da abertura de fenda (figura 4.6),  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$ , quanto maior for o  $K_{\max, BL}$ , menor será esse valor até um certo ponto. A partir desse ponto, o  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$  sofre um crescimento. O decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda (figura 4.7),  $\Delta(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$  vai ter o comportamento inverso: aumenta com a subida do  $K_{\max, BL}$  até um certo valor e depois há uma redução. O valor do pico da abertura de fenda (figura 4.8),  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{peak}}$ , como já tinha dado para reparar na figura 4.5, desce à medida que o valor de  $K_{\max, BL}$  sobe. O mesmo efeito acontece com acréscimo do valor do pico da

abertura de fenda,  $\Delta(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{peak}}$  (figura 4.9). Já o valor da propagação da fenda até atingir o pico,  $\Delta a_{\text{peak}}$ , não parece sofrer grandes alterações com o aumento de  $K_{\text{max, BL}}$ , como se pode ver na figura 4.10.

Como se pode reparar nos cinco gráficos, existe uma quarta curva designada de “F<sub>min\_</sub> F<sub>max\_</sub>160”, onde se variou tanto a  $F_{\text{max, BL}}$  como a  $F_{\text{min, BL}}$ , mantendo constante a  $F_{\text{OL}}$  e a  $R$ . O objetivo da realização desta série era saber, entre a  $K_{\text{max, BL}}$  e a  $K_{\text{min, BL}}$ , qual destes parâmetros tinha um maior peso. Os resultados não deixam dúvidas onde se poder verificar que a tendência é igual à das séries onde apenas se variou a  $K_{\text{max, BL}}$ , concluindo-se que a  $K_{\text{max, BL}}$  tem uma maior influência nas sobrecargas do que a  $K_{\text{min, BL}}$ . No subcapítulo seguinte, pode-se confirmar essa maior influência quando se estudar a variação da  $K_{\text{min, BL}}$ .

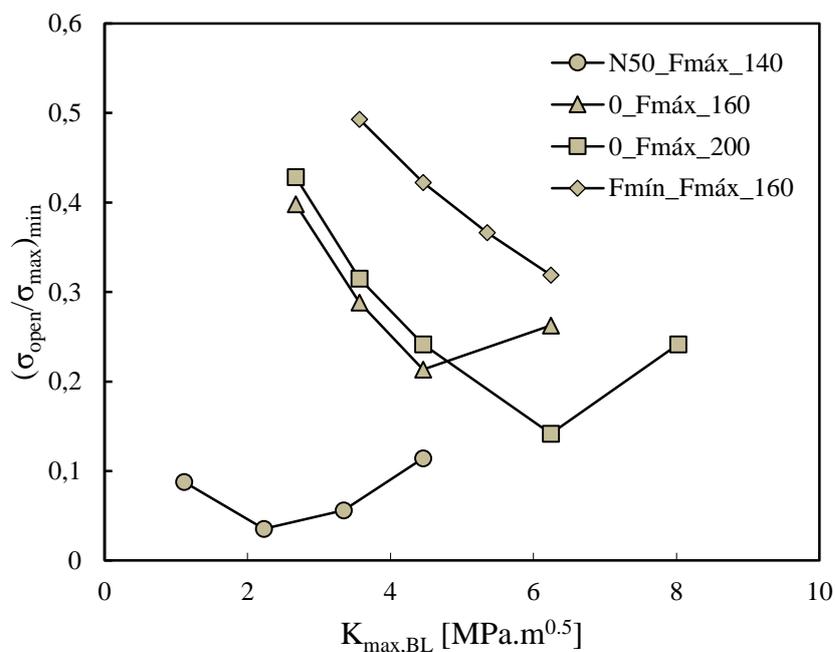


Figura 4.6 - Efeito de  $K_{\text{max, BL}}$  no valor mínimo da abertura de fenda.

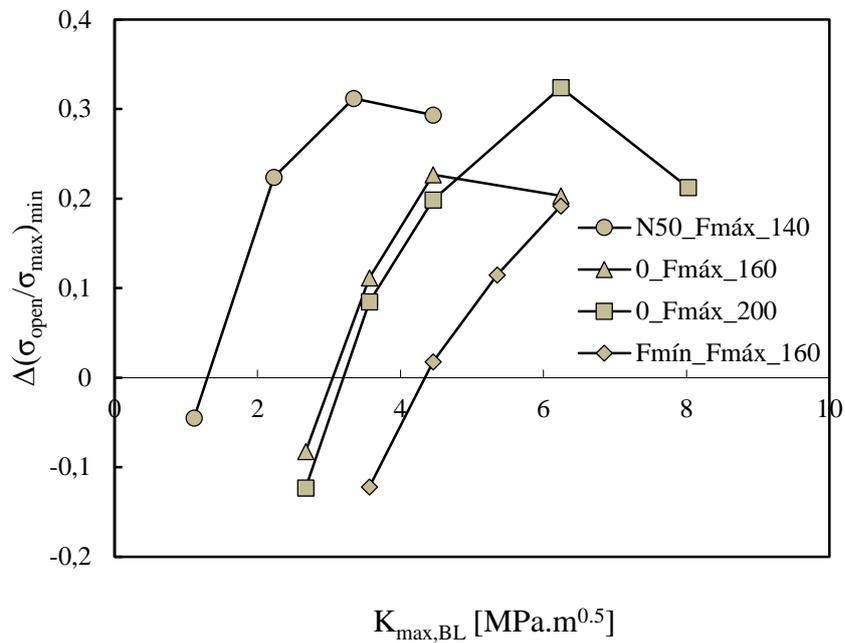


Figura 4.7 - Efeito de  $K_{max,BL}$  no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda.

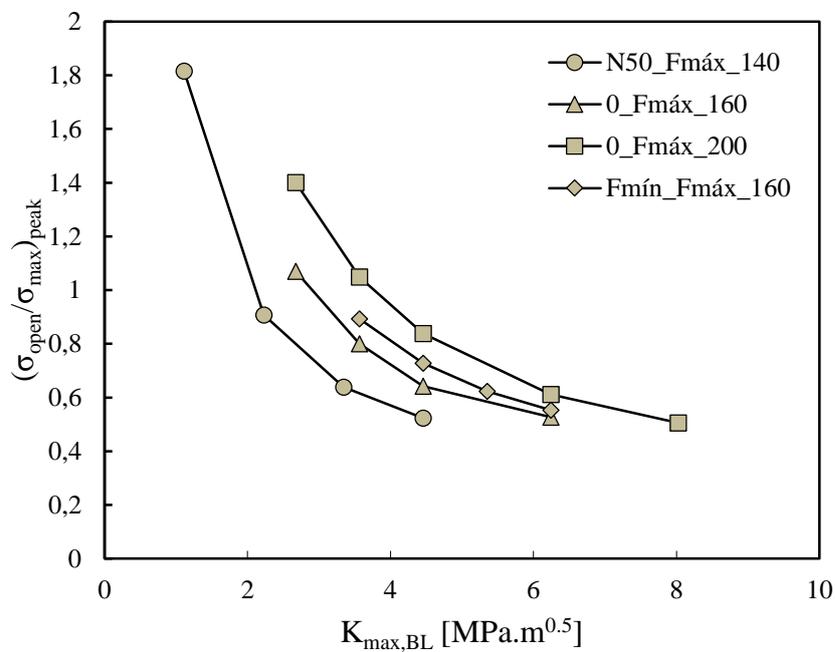
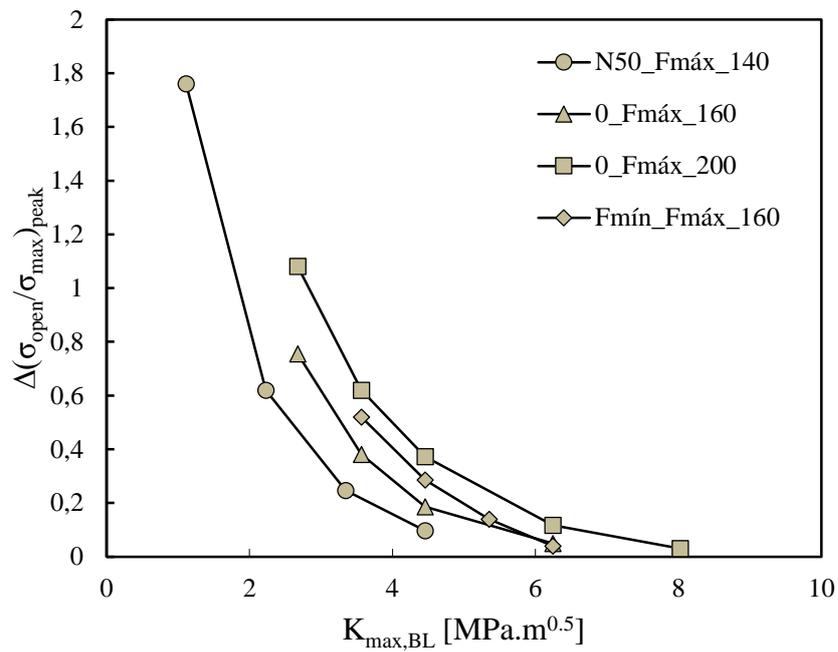
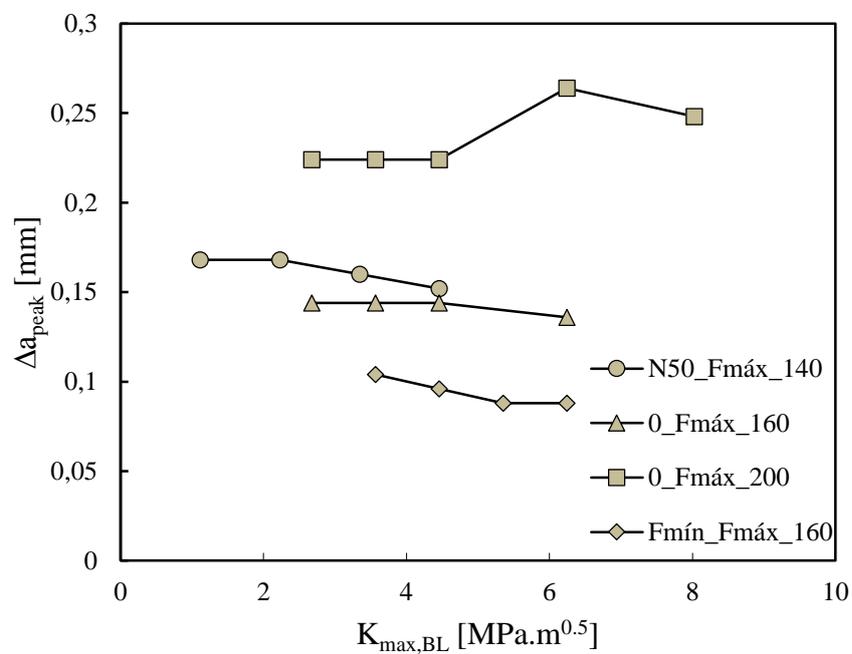


Figura 4.8 - Efeito de  $K_{max,BL}$  no valor do pico da abertura de fenda.



**Figura 4.9** - Efeito de  $K_{max,BL}$  no acréscimo do valor do pico da abertura de fenda.



**Figura 4.10** - Efeito de  $K_{max,BL}$  no valor da propagação da fenda até atingir o pico.

Na figura 4.11 está ilustrado o perfil da fenda no momento em que a carga aplicada era de 60N, para um comprimento de fenda de 6.192 mm, em que se variou o  $K_{\max, BL}$  de três ensaios diferentes. Pode-se reparar quanto menor for o  $K_{\max, BL}$ , menor é a distância entre as faces da fenda logo após a sobrecarga. Por outro lado, o arredondamento da extremidade da fenda, na zona de sobrecarga, diminui com o aumento de  $K_{\max, BL}$ .

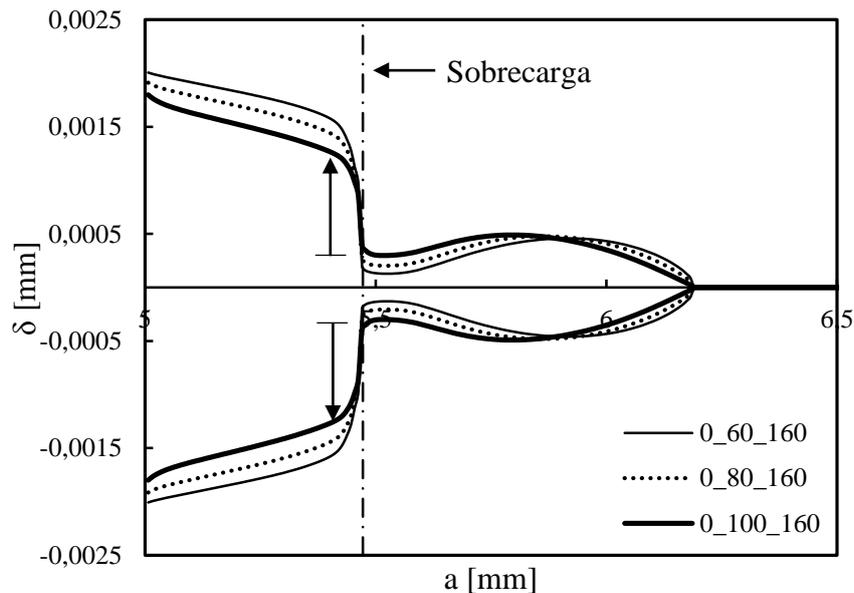
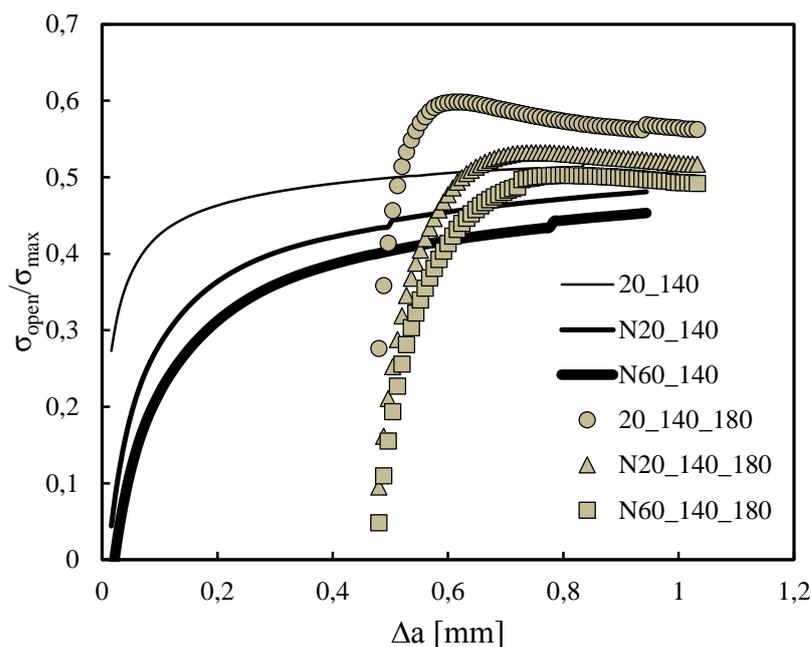


Figura 4.11 - Efeito de  $K_{\max, BL}$  no perfil da fenda;  $F=60N$ ;  $K=2.68 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ .

#### 4.2.2. Efeito de $K_{\min, BL}$

A influência de  $K_{\min, BL}$  está ilustrada na figura 4.12, em que  $K_{\max, BL}$  e  $K_{OL}$  mantiveram-se constantes. Pode-se verificar, em primeira instância, que quanto maior for o valor de  $K_{\min, BL}$  maior será o valor do pico das curvas em que foram aplicadas a sobrecarga. O mesmo efeito está presente em termos da sollicitação base, onde um aumento de  $K_{\min, BL}$  traduz-se num valor de nível de fecho de fenda maior.



**Figura 4.12** - Efeito de  $K_{min,BL}$  no nível de fecho de fenda.

Para uma melhor compreensão do efeito deste parâmetro de carga, e de forma análoga ao estudo do efeito de  $K_{min,BL}$ , nas figuras 4.13-4.17 está representado esse efeito nos parâmetros das curvas  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})-\Delta a$ . Pode-se verificar (figura 4.13) que o aumento do valor  $K_{min,BL}$  leva a um aumento do valor mínimo da abertura de fenda. Já o decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda, não há uma grande variação para valores baixos de  $K_{min,BL}$ , mas para valores mais altos, pode-se reparar numa redução deste parâmetro (figura 4.14). Notar que no último ponto das curvas “ $F_{min\_140\_160}$ ” e “ $F_{min\_140\_180}$ ”, que corresponde a uma  $F_{min}$  de 60N, o valor do  $\Delta(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{min}$  é negativo, o que quer dizer que, quando é aplicada a sobrecarga, não há redução inicial do nível de fecho de fenda. No que se refere ao valor do pico da abertura de fenda, comprova-se o aumento deste parâmetro à medida que o valor de  $K_{min,BL}$  cresce (figura 4.15). O mesmo poderá ser dito em relação ao acréscimo do valor do pico da abertura de fenda, no entanto, para valores mais baixos de  $K_{min,BL}$ , o aumento do  $\Delta(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{peak}$  não é muito acentuado (figura 4.16). Relativamente ao valor da propagação da fenda até atingir o pico, ao contrário de que se verificou com o  $K_{max,BL}$ , o  $K_{min,BL}$  já vai ter uma maior influência, onde o seu aumento leva a uma redução do  $\Delta a_{peak}$  (figura 4.17).

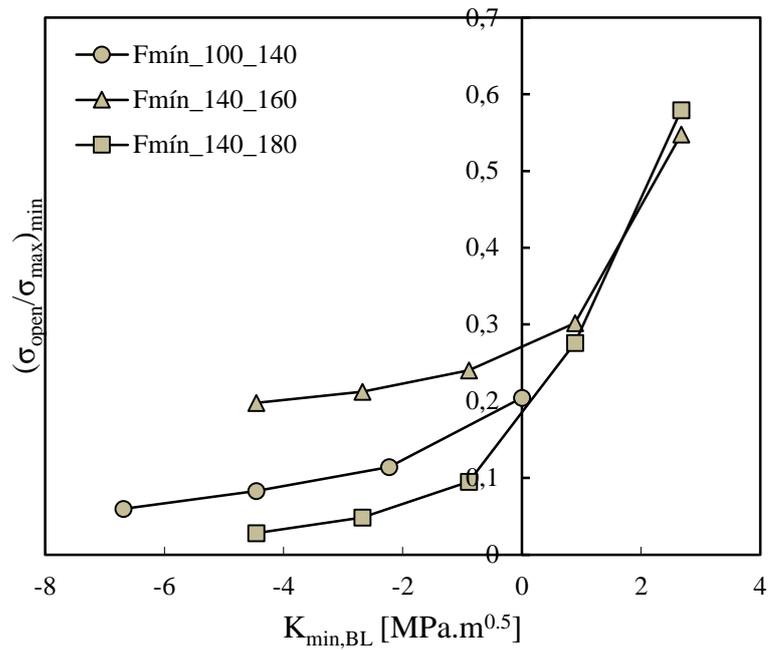


Figura 4.13 - Efeito de  $K_{min,BL}$  no valor mínimo da abertura de fenda.

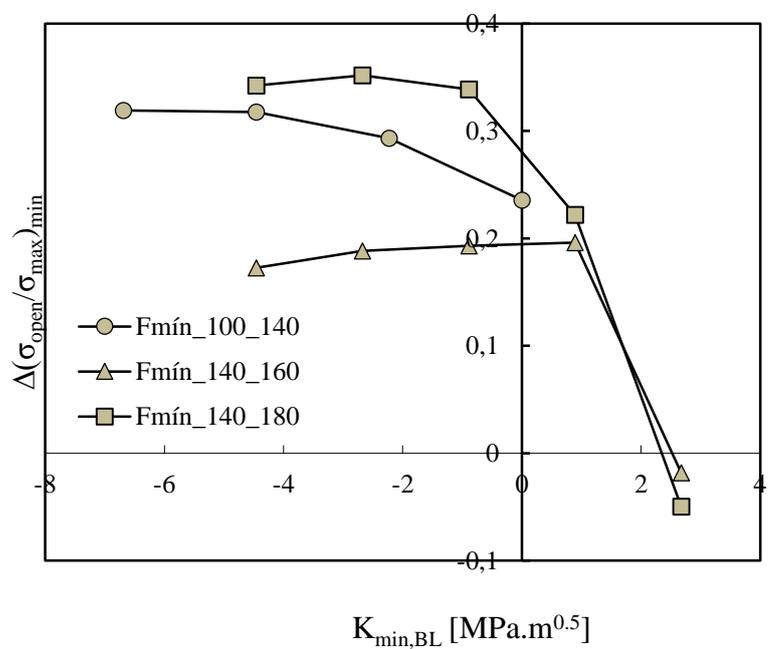


Figura 4.14 - Efeito de  $K_{min,BL}$  no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda.

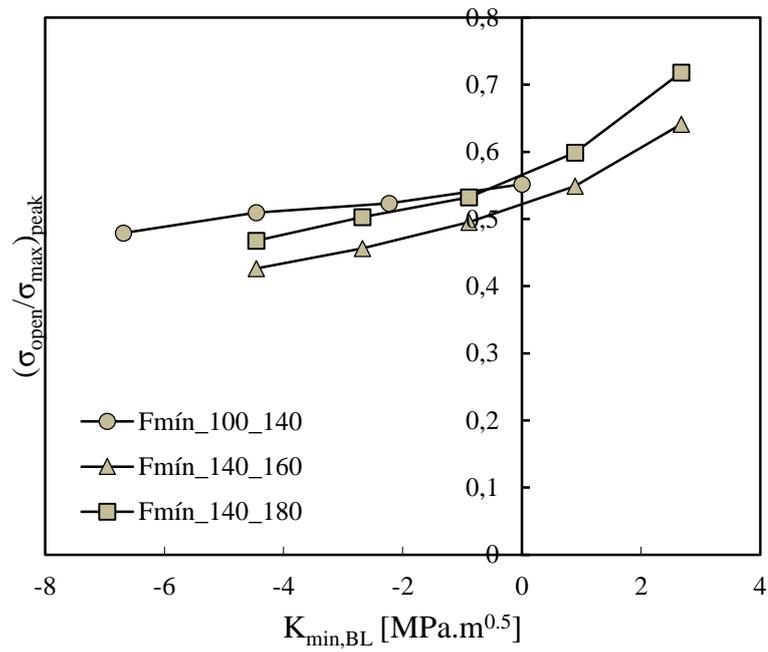


Figura 4.15 - Efeito de  $K_{\min, BL}$  no valor do pico da abertura de fenda.

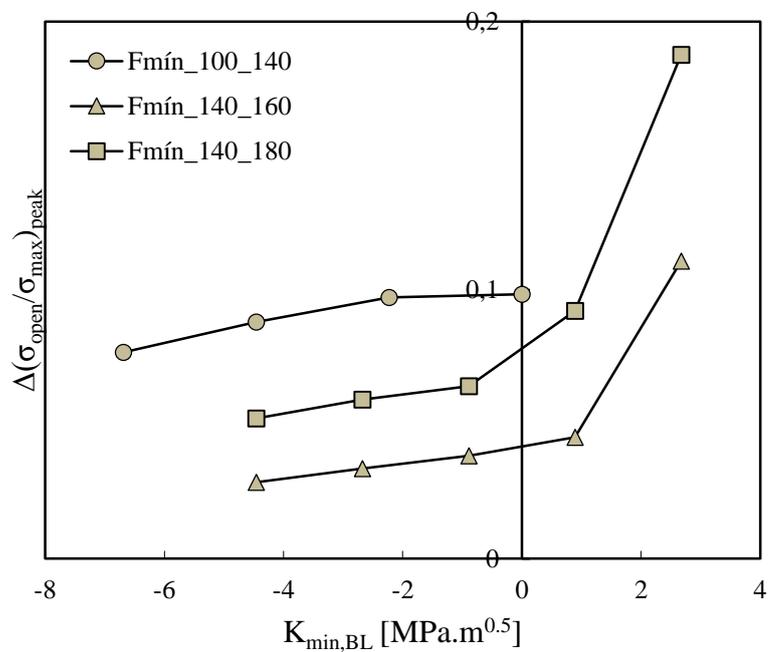
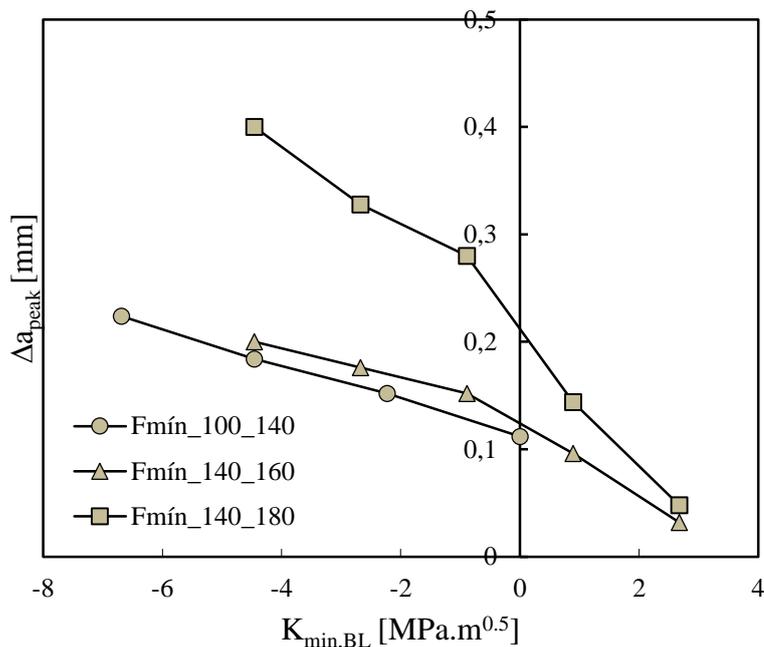
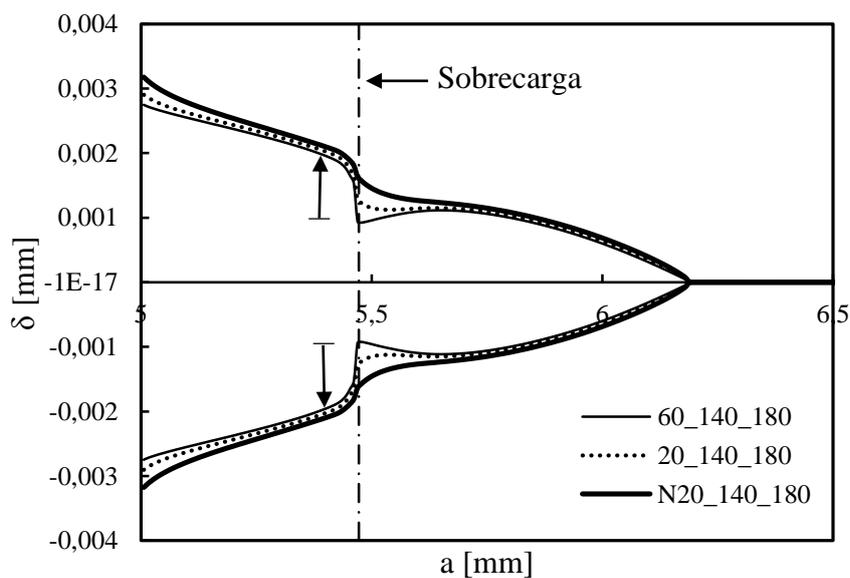


Figura 4.16 - Efeito de  $K_{\min, BL}$  no acréscimo do valor do pico da abertura de fenda.



**Figura 4.17** - Efeito de  $K_{min,BL}$  no valor da propagação da fenda até atingir o pico.

Em termos de perfil de fenda, na figura 4.18 estão representados três exemplos, com valores diferentes de  $K_{min,BL}$ , no momento em que a carga aplicada era de 100N, para um comprimento de fenda de 6.192 mm. Observa-se que quanto maior for o  $K_{min,BL}$ , menor é a distância entre as faces da fenda após a aplicação da sobrecarga. Em relação ao arredondamento da extremidade da fenda, na zona de sobrecarga, vai aumentar com o aumento de  $K_{min,BL}$ .



**Figura 4.18** - Efeito de  $K_{min,BL}$  no perfil da fenda;  $F=100N$ ;  $K=4.46$  MPa.m<sup>0.5</sup>.

### 4.2.3. Efeito de $K_{OL}$

O último parâmetro de carga a analisar é o  $K_{OL}$ . A figura 4.19 compara três ensaios diferentes (a amplitude variável), em que se variou o  $K_{OL}$ , mantendo constantes o  $K_{max,BL}$  e  $K_{min,BL}$ . É possível, logo, verificar que o aumento do  $K_{OL}$  leva a um crescimento do pico das curvas em que é aplicada a sobrecarga, bem como da distância de propagação até ao pico.

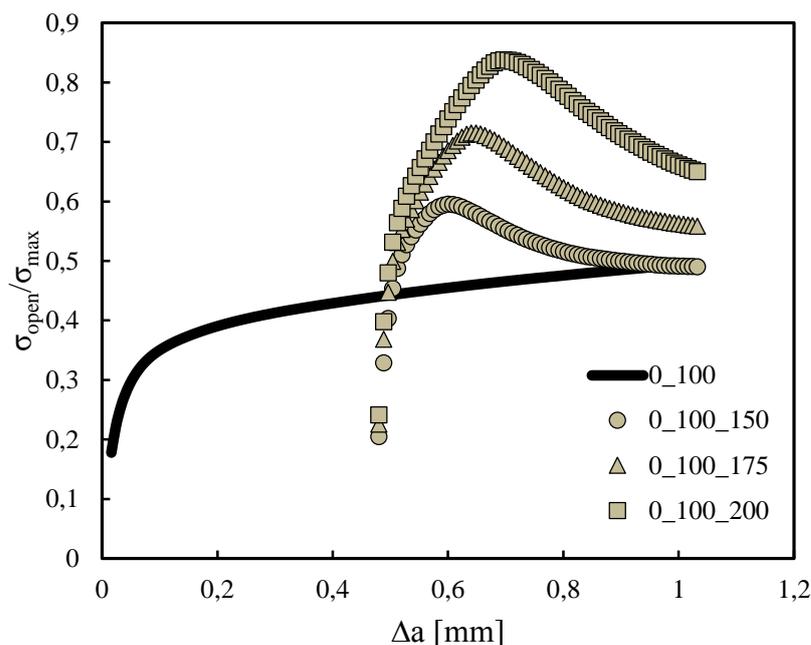


Figura 4.19 - Efeito de  $K_{OL}$  no nível de fecho de fenda.

Nas figuras 4.20-4.24, estão, novamente, representados os parâmetros das curvas ( $\sigma_{open}/\sigma_{max}$ )- $\Delta a$ , desta vez com a variação de  $K_{OL}$ . O valor mínimo da abertura de fenda, na maior parte dos casos, cresce com o aumento do valor de  $K_{OL}$  (figura 4.20). Mas no ensaio “N50\_50\_F<sub>OL</sub>”, o efeito é completamente o oposto. No que diz respeito ao decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda, o aumento do  $K_{OL}$  traduz-se numa descida do  $\Delta(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{min}$ , com a exceção do caso “N50\_50\_F<sub>OL</sub>” (figura 4.21). Como já tinha sido demonstrado na figura 4.19, o valor do pico da abertura de fenda cresce com o aumento do  $K_{OL}$  (figura 4.22). O mesmo acontece para o caso do valor do acréscimo do valor do pico da abertura de fenda (figura 4.23). No que se refere ao valor da propagação da fenda até atingir o pico, sendo também possível verificar na figura 4.19, este cresce à medida que o  $K_{OL}$  aumenta (figura 4.24).

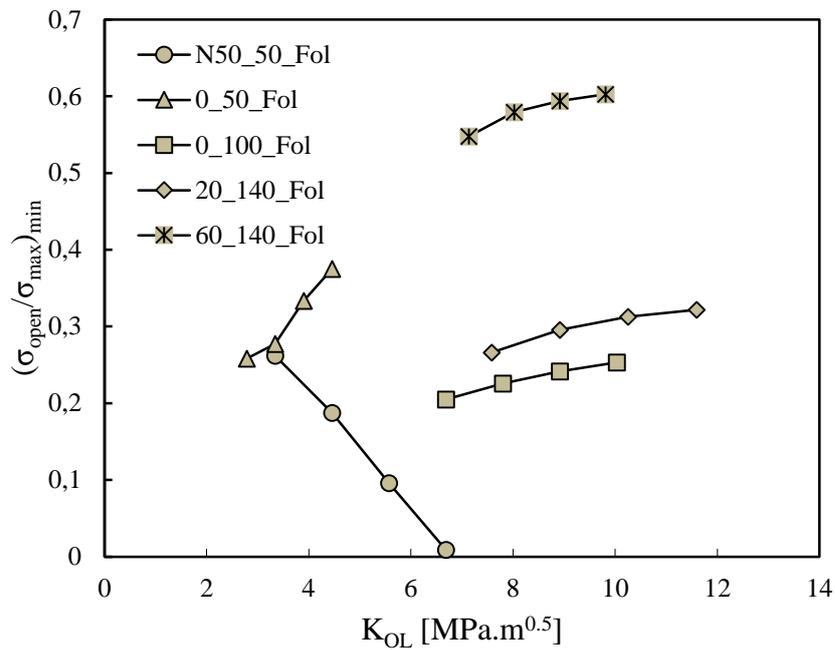


Figura 4.20 - Efeito de  $K_{OL}$  no valor mínimo da abertura de fenda.

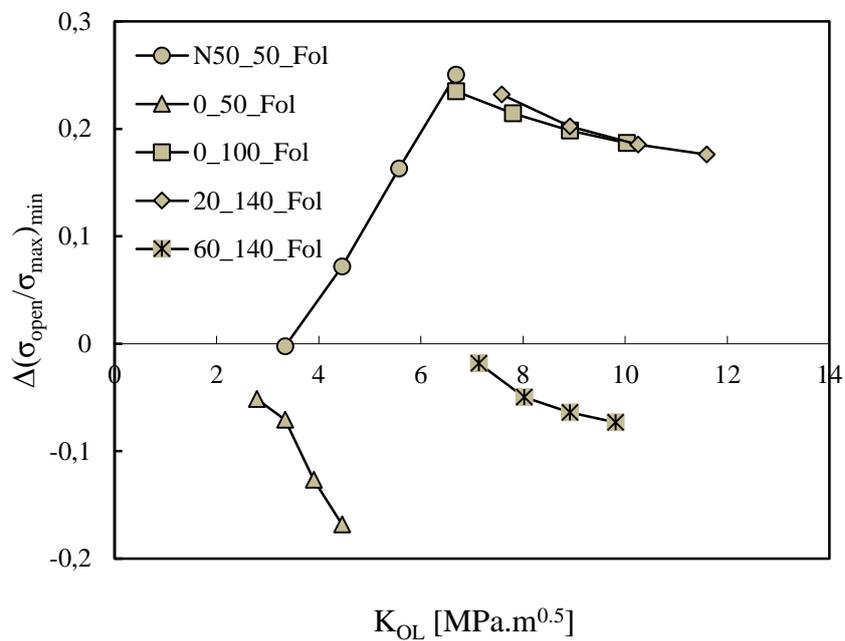


Figura 4.21 - Efeito de  $K_{OL}$  no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda.

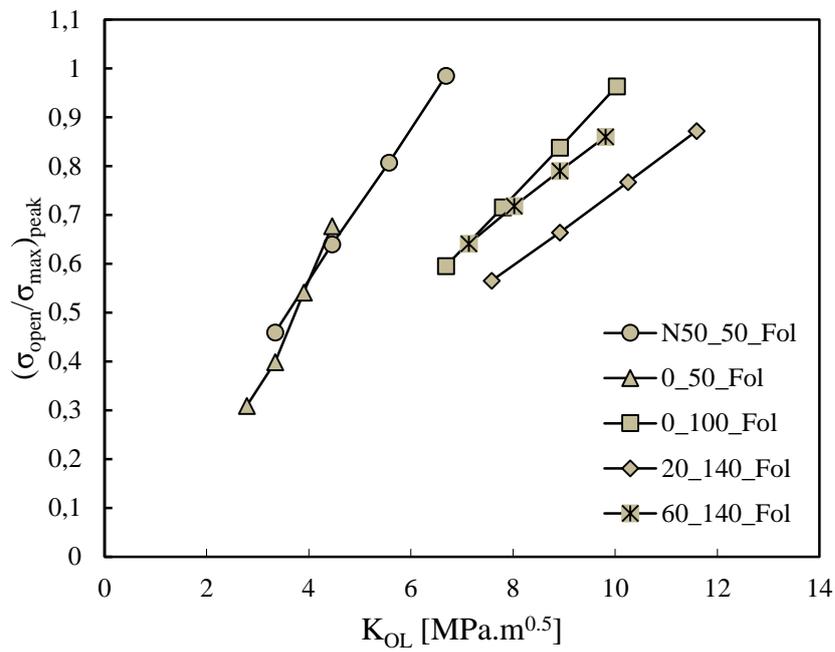


Figura 4.22 - Efeito de  $K_{OL}$  no valor do pico da abertura de fenda.

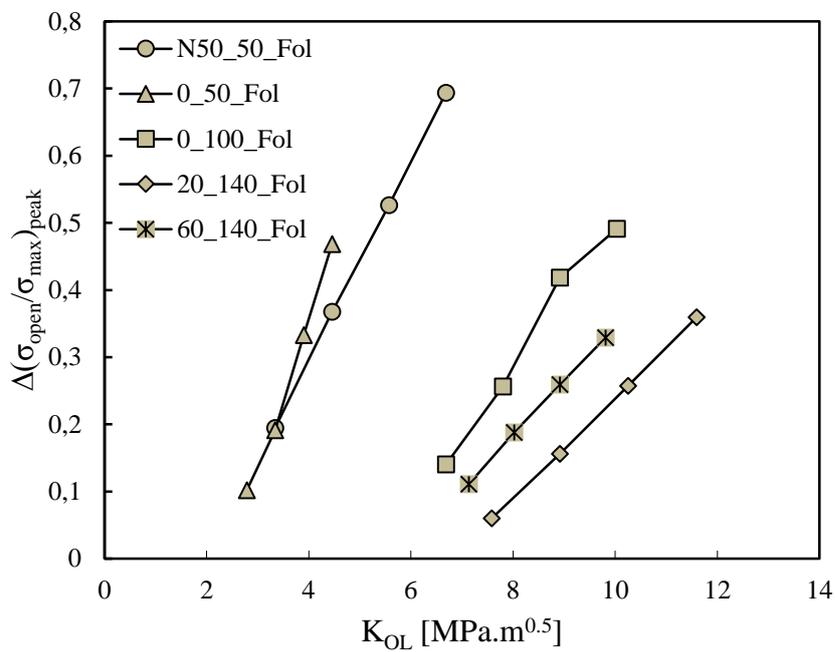
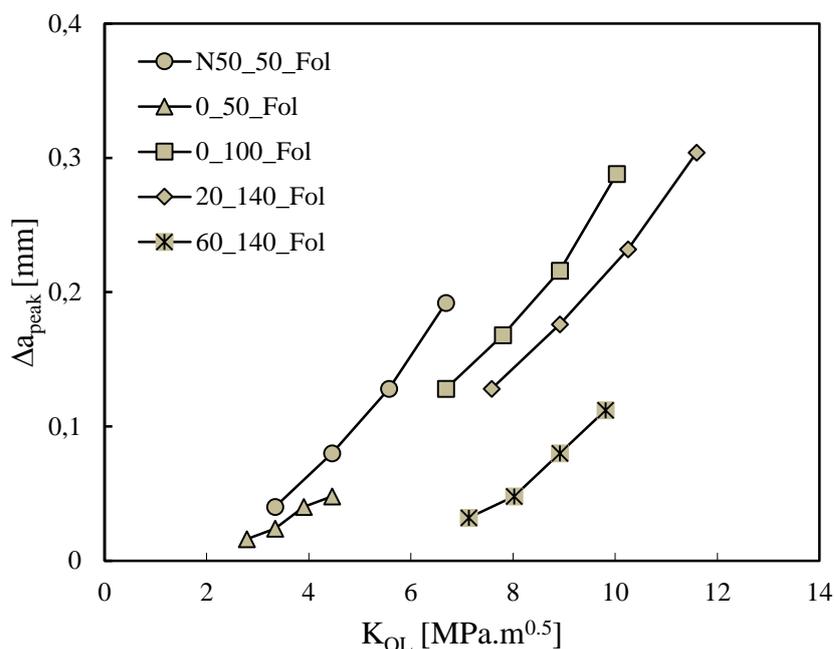
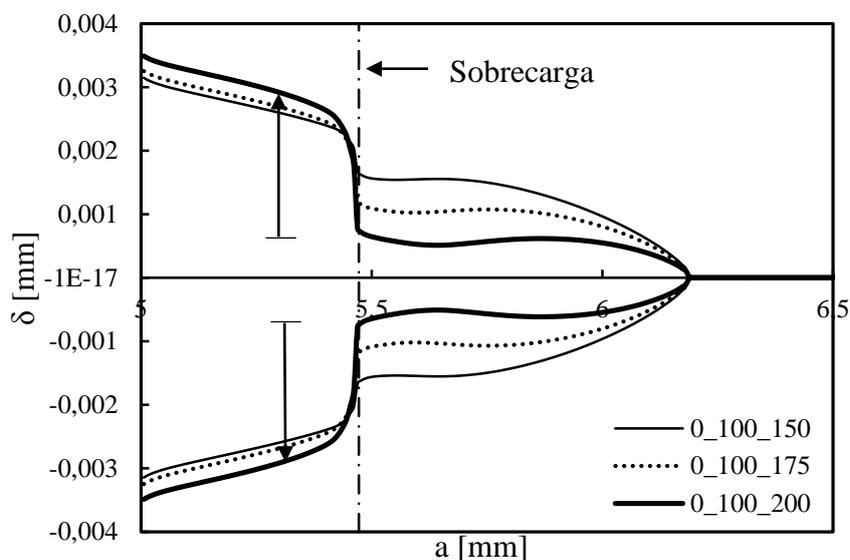


Figura 4.23 - Efeito de  $K_{OL}$  no acréscimo do valor do pico da abertura de fenda.



**Figura 4.24** - Efeito de  $K_{OL}$  no valor da propagação da fenda até atingir o pico.

Da mesma forma que foi feita para os outros dois parâmetros de carga, na figura 4.25, é possível visualizar o perfil da fenda de três ensaios com  $K_{OL}$  diferentes, no momento em que a carga aplicada era de 100N, para um comprimento de fenda de 6.192 mm. É possível verificar que ao aumentar o  $K_{OL}$ , a distância entre as faces da fenda, depois da aplicação da sobrecarga, é menor. No que diz respeito ao arredondamento da extremidade da fenda, na zona de sobrecarga, este aumenta com o aumento de  $K_{OL}$ .



**Figura 4.25** - Efeito de  $K_{OL}$  no perfil da fenda;  $F=100\text{N}$ ;  $K=4.46 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ .

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Valor mínimo de abertura de fenda

Neste subcapítulo pretende-se esclarecer o porquê da existência do valor mínimo de abertura de fenda,  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$ , nas curvas  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})-\Delta a$  e a razão deste valor ser maior ou menor em certos casos. Na figura 5.1, pode-se visualizar um exemplo de dois ensaios em que se pode reparar, de forma clara, a diferença entre esse tal valor, onde no caso do N100\_140\_180 é bastante inferior ao do 60\_140\_180. No subcapítulo 4.2.2, já tinha sido confirmado que quanto maior fosse o  $K_{\text{min,BL}}$ , maior seria o valor do  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$ .

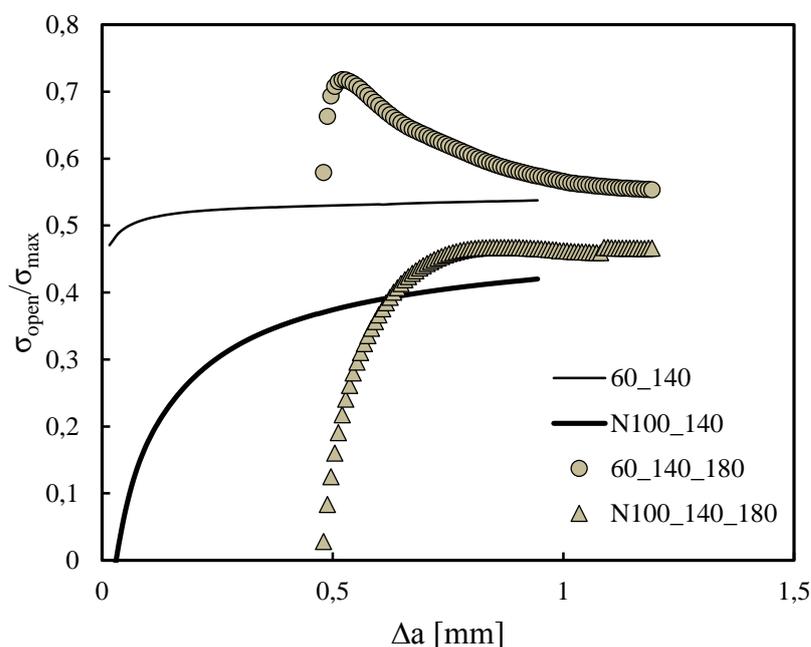
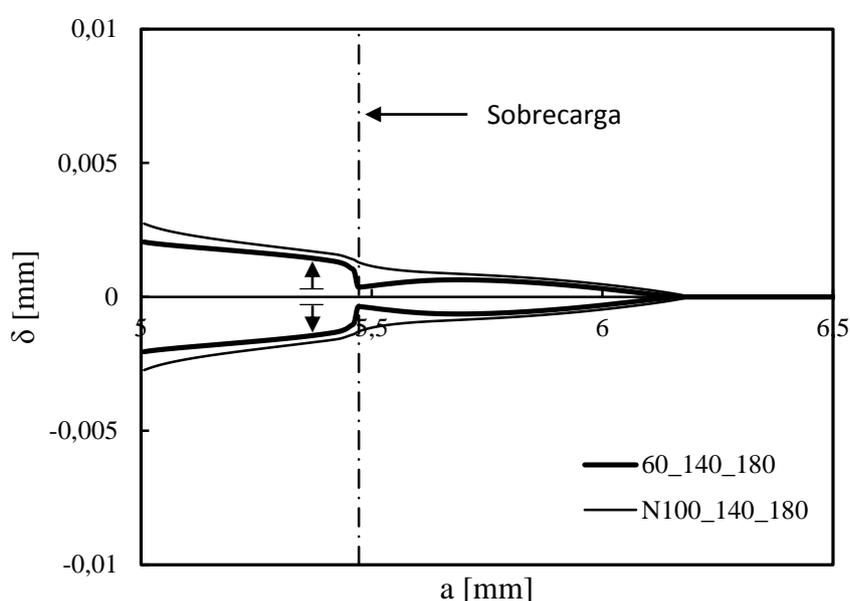


Figura 5.1 - Comparação do valor mínimo de abertura de fenda para dois casos.

A existência deste valor mínimo pode ser explicada através do fenómeno chamado arredondamento da extremidade da fenda, também conhecido como “blunting”. Na figura 5.2 está representado o perfil de fenda para os 2 ensaios já referidos no momento

em que a carga aplicada era de 80N, para um comprimento de fenda de 6.192 mm. Como se pode verificar, na zona da sobrecarga, há um certo arredondamento da fenda que é consequência da própria sobrecarga. Este efeito tem uma maior visibilidade no caso 60\_140\_180 já que a força mínima da solicitação base é maior. Pode-se dizer, assim, que este caso tem mais “blunting” do que o outro, ou seja, existe mais fecho neste caso, daí o valor superior do  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{min}$  em relação ao N100\_140\_180, algo que também pode ser confirmado na figura 5.1.



**Figura 5.2** - Arredondamento da extremidade da fenda na zona da sobrecarga.

Este fenómeno do “blunting” também tem o efeito de modificar o contacto que está para trás. Nas figuras 5.3 e 5.4 estão representadas as forças de contacto em função da coordenada  $x$ , quando a fenda tem um comprimento de 6.26 mm. No caso do ensaio 60\_140\_180, pode-se verificar que, atrás da zona da sobrecarga, todas as forças de contacto foram eliminadas, enquanto no ensaio N100\_140\_180, apesar de ainda haver forças de contacto atrás da zona da sobrecarga, existe um vazio imediatamente antes dessa zona. Pode-se reparar também que, em certos casos com o da figura 5.3, na zona após sobrecarga, não existe contacto a carga mínima. Isto deve-se o facto de haver um efeito protetor da cunha plástica associada à sobrecarga nos flancos da fenda mais próximos.

Além disso, o facto da carga mínima não ser muito baixa reduz as forças de contacto. Notar que este efeito protetor também justifica a ausência de forças de contacto atrás da zona da sobrecarga, apesar do fenómeno do “blunting” ter uma maior influência.

No subcapítulo 4.2.2 (figura 4.14) quando se estudou o efeito do  $K_{\min, BL}$ , havia casos, nomeadamente o 60\_140\_180, em que o  $\Delta(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\min}$  era negativo, ou seja, o  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\min}$  estava acima da curva base como pode ser confirmado na figura 5.1. Este tipo de fenómeno pode-se explicar através das forças de contacto, como está ilustrado na figura 5.3, uma vez que o “blunting” eliminou todo o contacto que estava para trás.

Outro estudo que pode ser feito é através das curvas tensão-deformação, logo após a sobrecarga, representadas na figura 5.5 a tracejado, sendo que, as linhas cheias representam a deformação residual (a mais cheia refere-se à do ensaio N100\_140\_180). Quanto maior for este tipo de deformação, mais fecho existirá. Ao analisar a figura 5.5 (através do eixo do X), pode-se afirmar que o caso 60\_140\_180 tem uma maior deformação residual, o que também pode servir para explicar o maior valor de  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\min}$  em comparação com o N100\_140\_180.

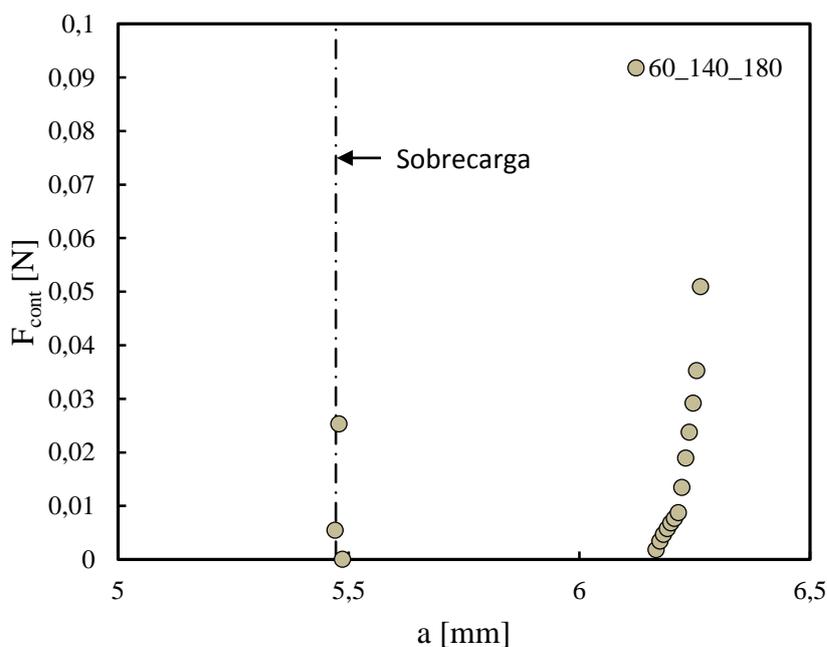


Figura 5.3 - Forças de contacto a carga mínima (1).

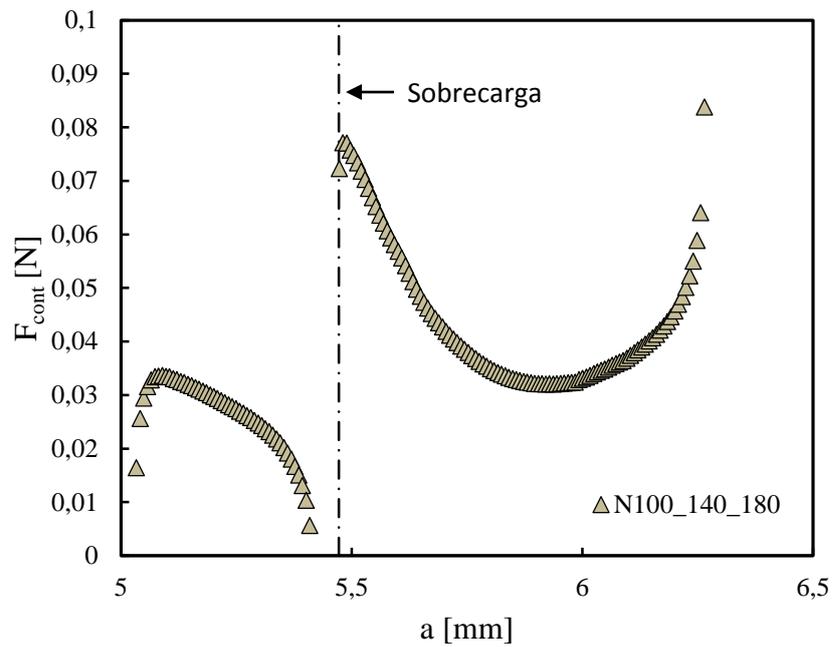


Figura 5.4 - Forças de contacto a carga mínima (2).

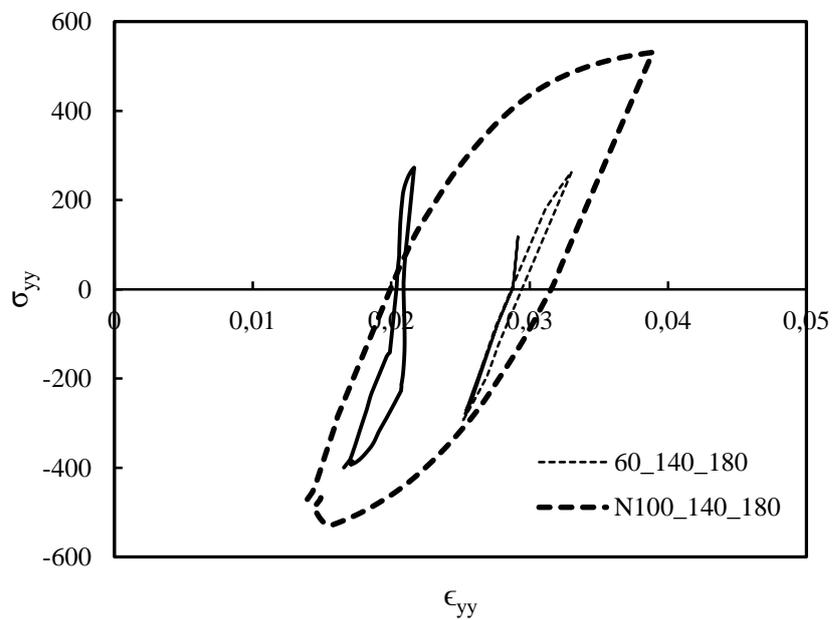


Figura 5.5 - Gráfico tensão-deformação.

## 5.2. Valor do pico de abertura de fenda

O valor do pico de abertura de fenda é um dos parâmetros fundamentais das curvas  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})-\Delta a$ . Durante a realização deste estudo, tentou-se encontrar o parâmetro de carga mais influente no valor de  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{peak}$ . Com base no que foi dito, dentro dos parâmetros identificados no capítulo 2, a razão de sobrecarga, OLR, foi o que teve melhores resultados em termos de influência, apesar desses mesmos resultados não serem 100% satisfatórios. Então foi criado um novo parâmetro:  $\Delta K_{OL2}$ . Como no capítulo 2 já tinha sido identificado a gama do fator de intensidade de tensões correspondente à sobrecarga,  $\Delta K_{OL}$ , que era a diferença entre  $K_{OL}$  e  $K_{min,BL}$ , então nomeou-se este novo parâmetro como uma segunda gama do fator de intensidade de tensões correspondente à sobrecarga através da seguinte expressão:

$$\Delta K_{OL2} = K_{OL} - K_{max,BL} \quad (5.1)$$

Na figura 5.6 está ilustrada a influência de  $\Delta K_{OL2}$  no valor de  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{peak}$  para todos os ensaios realizados em que foram aplicadas sobrecargas (Tabela 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4). Pode-se reparar que existe uma correlação interessante que comprova a importância deste parâmetro de carga no  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{peak}$ .

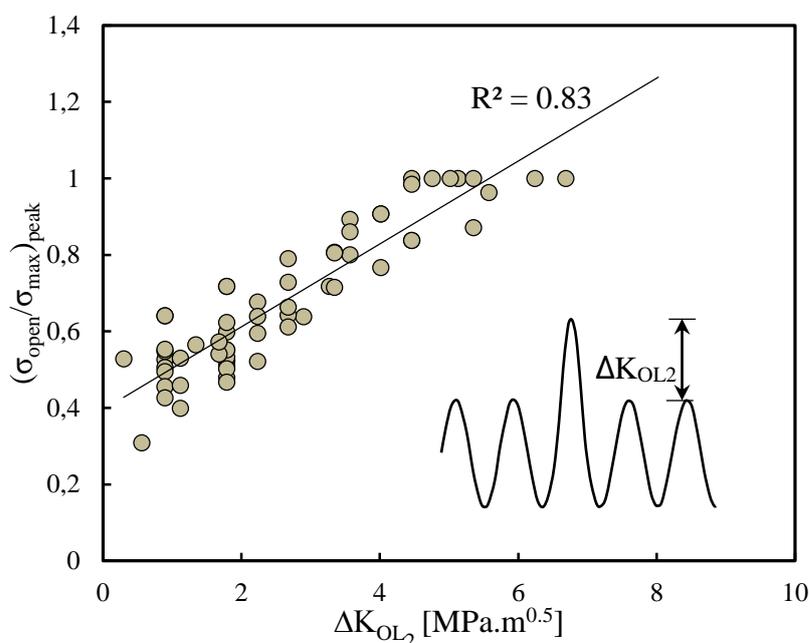


Figura 5.6 - Efeito de  $\Delta K_{OL2}$  no valor do pico de abertura de fenda.

### 5.3. Valor da propagação da fenda até atingir o pico

Outro parâmetro das curvas  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})-\Delta a$  a ser analisado é o  $\Delta a_{peak}$ . O pico produzido por uma sobrecarga é semelhante ao pico observado no início da propagação da fenda para casos de deformação plana em situações de amplitude constante. Notar que os resultados deste estudo foram realizados para tensão plana. Como já foi observado nas curvas típicas  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})-\Delta a$ , onde existe a aplicação de uma sobrecarga, após atingir o pico, o valor do PICC desce até atingir a sua estabilização. Fleck (1986), para o pico inicial observado em condições de deformação plana, propôs a seguinte expressão:

$$\Delta a_{peak} = 0.05 \left( \frac{K_{max}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (5.2)$$

Os resultados obtidos neste trabalho indicaram que o valor da sobrecarga é o parâmetro dominante. Entretanto, certos parâmetros de base, como o  $\Delta K_{BL}$ , também afetam o valor do pico. Para o mesmo valor de  $K_{OL}$ , verificou-se que  $\Delta a_{peak}$  aumentava com  $\Delta K_{BL}$ . Decidiu-se, então, para casos de sobrecargas, calcular  $\Delta a_{peak}$  a partir da equação 5.2, mas desta vez em função de  $\Delta K_{OL}$ , ou seja:

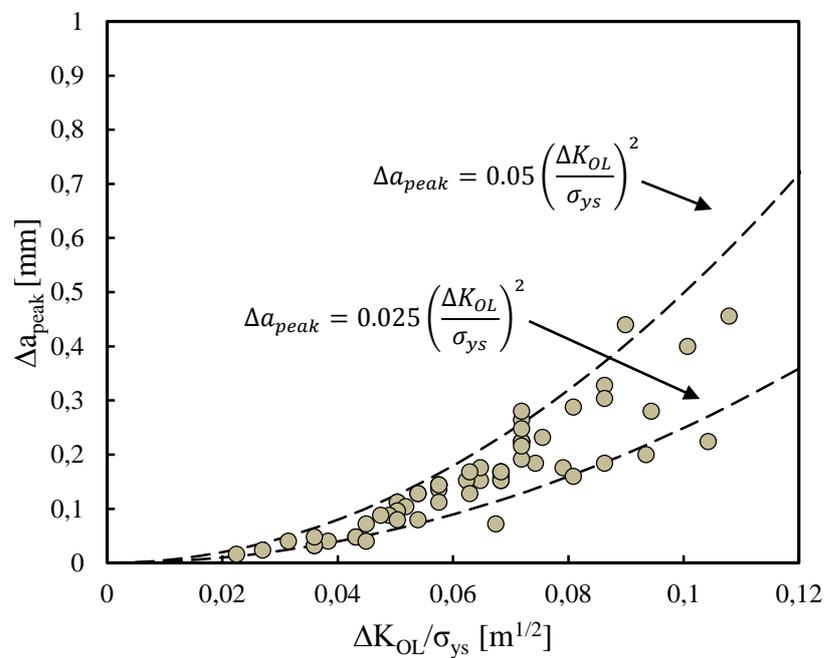
$$\Delta a_{peak} = 0.05 \left( \frac{\Delta K_{OL}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (5.3)$$

Neste estudo, para termos de comparação, também foi usada a seguinte equação:

$$\Delta a_{peak} = 0.025 \left( \frac{\Delta K_{OL}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (5.4)$$

Da mesma forma que foi feita para o parâmetro anterior, o objetivo era obter o parâmetro de carga que tivesse melhor correlação. Neste caso, apenas o  $\Delta K_{OL}$  apresentou resultados aceitáveis, sendo que os outros parâmetros de carga mostraram enormes dispersões. Na figura 5.7, podem ser vistos esses resultados da relação de  $\Delta K_{OL}$  e  $\Delta a_{peak}$ , juntamente com as linhas a tracejado que indicam as equações 5.3 e 5.4. Verifica-se que os resultados obtidos numericamente têm uma tendência semelhante às curvas analíticas e que esses valores são inferiores à curva da equação 5.3, algo que se justifica devido a esta

equação ter tido origem na equação 5.2 que foi criada para situações de deformação plana onde, geralmente, o  $\Delta a_{peak}$  é superior. Na figura 5.8 compara-se  $\Delta a_{peak}$  obtido numericamente e  $\Delta a_{peak}$  obtido a partir da equação 5.3. A mesma conclusão que se tirou anteriormente pode ser verificada nesta figura 5.8. Também se pode reparar que, para valores elevados de  $\Delta a_{peak}$ , existe uma maior dispersão, ao contrário do que acontece para valores baixos de  $\Delta a_{peak}$ , onde há uma maior convergência. Mais uma vez foram considerados os casos de carga indicados nas tabelas 3.1-3.4 para a obtenção dos resultados numéricos.



**Figura 5.7** - Efeito de  $\Delta K_{OL}$  no valor da propagação da fenda até atingir o pico.

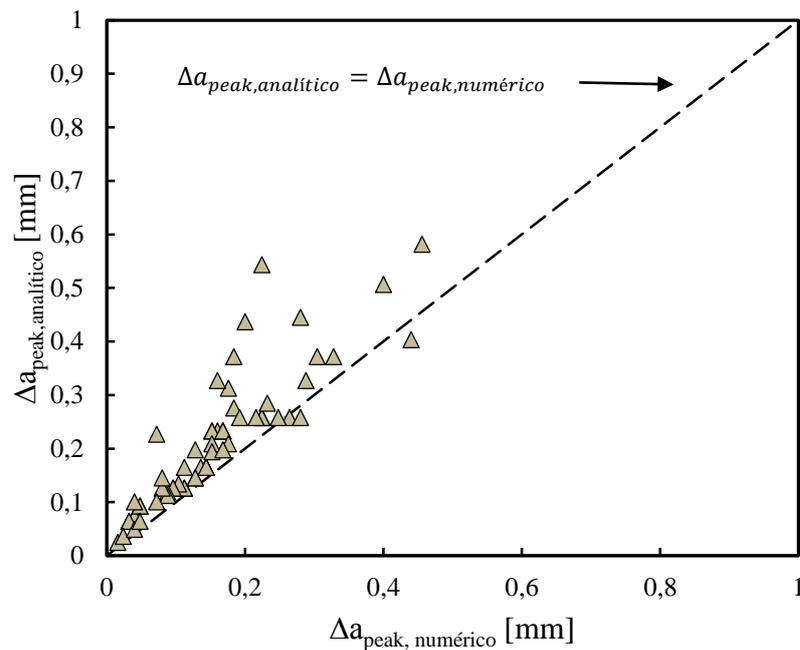


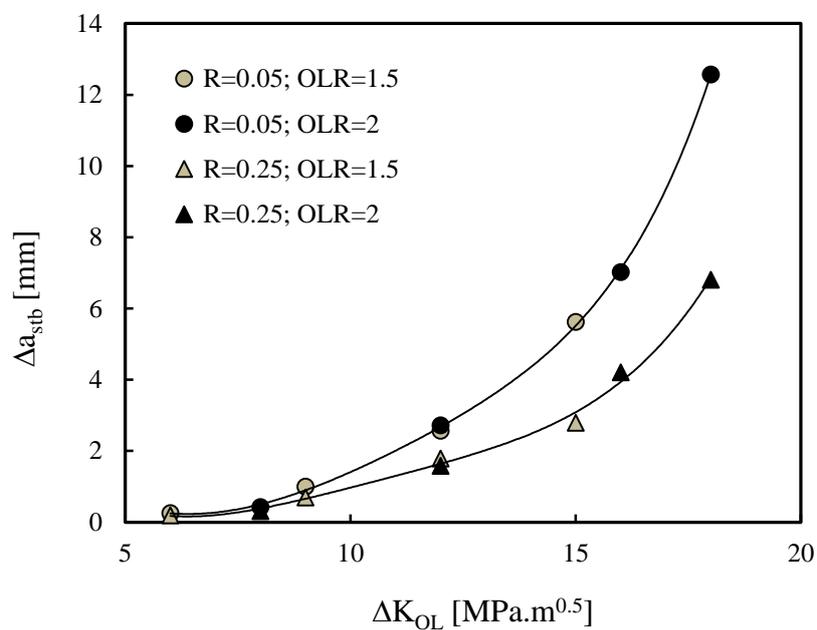
Figura 5.8 -  $\Delta a_{peak}$  numérico vs  $\Delta a_{peak}$  analítico.

#### 5.4. Distância de Estabilização

A distância de propagação da fenda requerida para a fenda estabilizar é dos parâmetros mais problemáticos para estudar numericamente devido há existência de distâncias de estabilização muito longas, fazendo com que a predição numérica possa envolver um grande número de propagações de fenda e, como consequência, um enorme esforço numérico. Borrego *et al.* (2003) verificaram efeitos transientes associadas a uma sobrecarga que se prolonga até 12 mm. Uma das teorias mais aceites para explicar a distância de estabilização diz que o efeito da sobrecarga se estende por um comprimento igual ao tamanho da zona plástica. A extremidade da fenda deve crescer para além da zona afetada pela sobrecarga para que a taxa de crescimento da fenda retorne a valores estáveis. O crescimento da fenda para a estabilização é mais longo para os materiais que desenvolvem uma maior zona plástica, como por exemplo, materiais que apresentam uma baixa tensão de cedência ou que tenham secções finas (Daneshpour *et al.*, 2009).

Na figura 5.9 pode-se confirmar um resultado experimental realizado por Borrego *et al.* (2003) onde se compara a gama do fator de intensidade de tensões

correspondente à subcarga,  $\Delta K_{OL}$ , com o valor da propagação requerida para a estabilização,  $\Delta a_{stb}$ . Através deste gráfico, conclui-se que:  $\Delta K_{OL}$  é o parâmetro de carga que controla a estabilização, independentemente do valor de OLR;  $\Delta a_{stb}$  cresce à medida que  $\Delta K_{OL}$  aumenta;  $\Delta a_{stb}$  diminui com o aumento de R. Na figura 5.10 estão os mesmos resultados, mas numa escala logarítmica onde se verifica uma tendência linear que serviu para obter duas expressões para calcular a distância de estabilização após uma sobrecarga.



**Figura 5.9** - Distância de estabilização após sobrecarga (Borrego *et al.*, 2003).

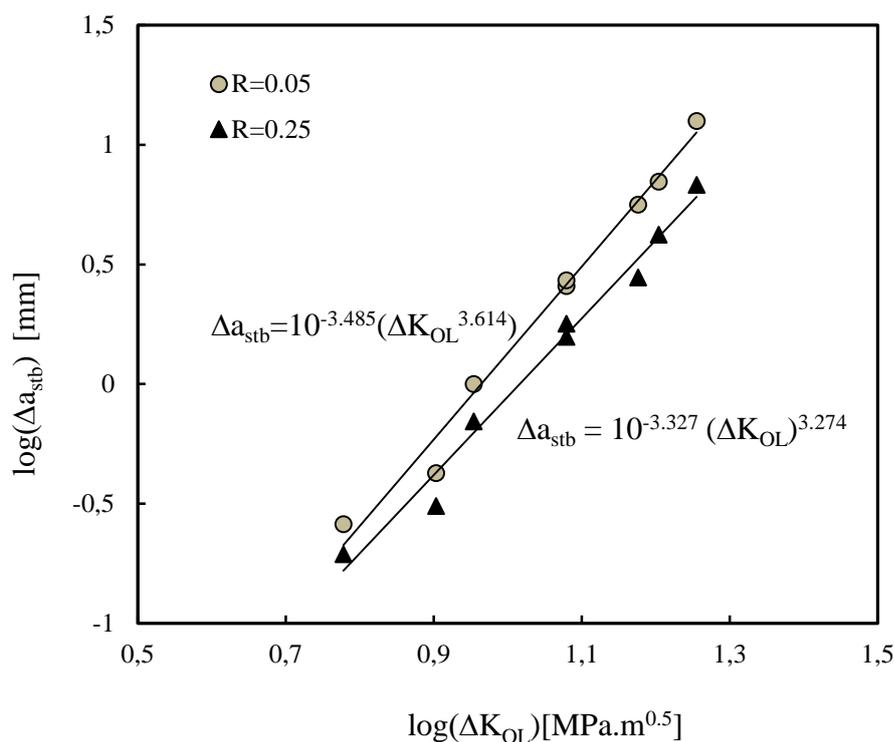


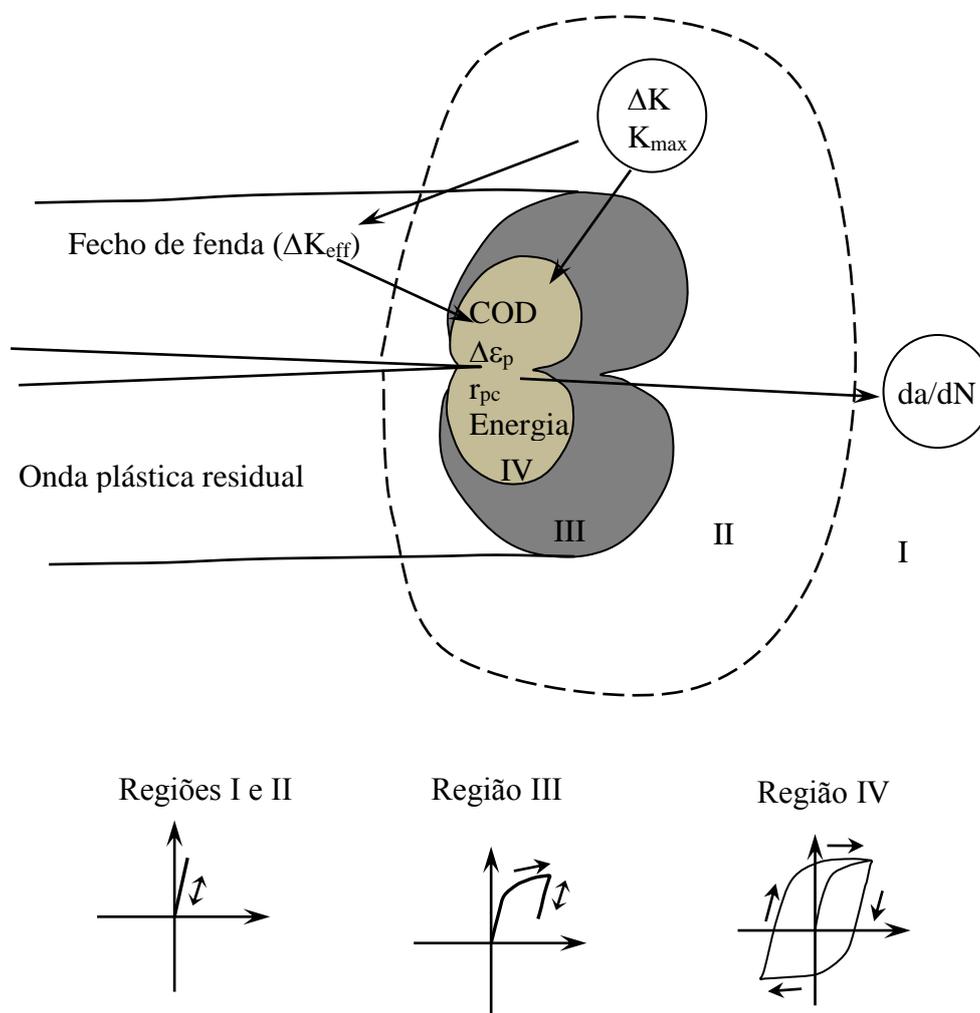
Figura 5.10 - Distância de estabilização após sobrecarga na escala logarítmica.

## 5.5. Comparação de $\Delta K$ com $\Delta K_{eff}$ em termos de Energia e Deformação

Num estudo prévio relacionaram-se os parâmetros não lineares de extremidade de fenda com a gama do fator de intensidade de tensão,  $\Delta K$ , sem contacto das faces da fenda. Os parâmetros não lineares estudados foram a energia específica máxima dissipada à frente da fenda, a gama de deformação plástica,  $\Delta \epsilon_p$ , a dimensão da zona plástica cíclica,  $r_{pc}$ , e o deslocamento de abertura de fenda, COD.

Na figura 5.11 pode-se visualizar uma representação da fenda onde estão identificados estes parâmetros juntamente com quatro zonas à frente da extremidade da fenda (Paul *et al.*, 2013): as regiões I e II, que fazem parte do domínio elástico, são as zonas mais afastadas da extremidade da fenda onde a deformação é apenas elástica. Na região II, o fator de intensidade de tensões é quem controla as tensões e deformações; a região III, também conhecida como zona plástica monótona, cuja deformação plástica ocorre durante o carregamento; a região IV (zona plástica inversa) é a zona mais perto da

extremidade da fenda onde ocorre os chamados “ciclos de histerese”, e em que os valores de  $R$  e de  $\Delta K$  vão ter uma enorme importância nestes ciclos.



**Figura 5.11** - Representação esquemática dos parâmetros e zonas da extremidade da fenda.

Segundo a literatura, os parâmetros não lineares referidos em cima estão intimamente ligados com a velocidade de propagação de fenda. Num estudo anterior (Sousa, 2014), foi feito um elevado número de ensaios, em que se variaram os parâmetros de carga. Obtiveram-se relações bem definidas entre  $\Delta K$  e os parâmetros de extremidade de fenda, o que validou o conceito de mecânica da fratura linear elástica. As curvas obtidas sem contacto foram designadas curvas mestras. A modelação numérica do contacto das faces da fenda, para os mesmos casos de carga, alterou significativamente a relação entre os parâmetros não lineares e  $\Delta K$ . Ainda assim, quando se substituiu  $\Delta K$  por  $\Delta K_{\text{eff}}$ , isto é,

quando se considerou o conceito de fecho de fenda, os pontos obtidos coincidiram, com as curvas mestras. Este resultado indicou que o conceito de fecho de fenda é válido, permitindo explicar as variações de velocidade de propagação de fenda associadas a variações de carga.

Esta abordagem foi aplicada ao estudo do efeito das sobrecargas. Assim, mediram-se os parâmetros não lineares de extremidade de fenda, nomeadamente a energia e a gama de deformação plástica, e o fecho de fenda após a aplicação de uma sobrecarga. O objetivo era perceber se a variação de fecho de fenda provocada pela aplicação de uma sobrecarga controla diretamente os parâmetros não lineares, assim como a velocidade de propagação de fenda.

Nas figuras 5.12 e 5.13 representam-se os resultados obtidos para dois casos com sobrecarga juntamente com a linha mestra e respetivos pontos do estudo anterior já referido neste subcapítulo. Pode verificar-se que os pontos obtidos com  $\Delta K$  estão claramente à direita das curvas mestras, estando de acordo com o estudo anterior (Sousa, 2014). Quando se considera  $\Delta K_{\text{eff}}$ , os pontos deslocam-se para a esquerda das curvas mestras, mas as tendências de variação são semelhantes.

Paris *et al.* (1999), para casos onde existia fecho parcial, obtiveram duas expressões para determinar o  $\Delta K_{\text{eff}}$ :

$$\Delta K_{\text{eff}2} = K_{\text{max}} - \frac{2}{\pi} K_{\text{open}} \quad (5.5)$$

$$\Delta K_{\text{eff}3} = K_{\text{max}} - \frac{2}{\pi} K_{\text{open}} - \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) K_{\text{min}} \quad (5.6)$$

Considerando o  $\Delta K_{\text{eff}}$  das equações 5.5 e 5.6, os pontos obtidos já se aproximam mais das curvas mestras, o que, de certa maneira, valida o conceito de fecho de fenda para o caso das sobrecargas, em que o fecho parcial é particularmente relevante. Todavia, é necessário aprofundar, ainda mais, este assunto para a obtenção de melhores resultados e de uma melhor compreensão.

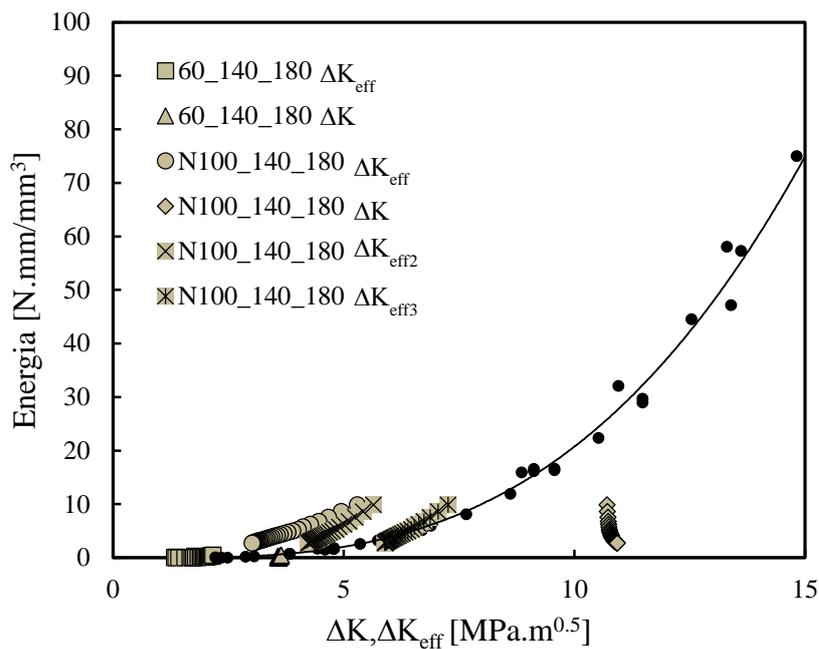


Figura 5.12 - Efeito de ΔK e ΔK<sub>eff</sub> na energia.

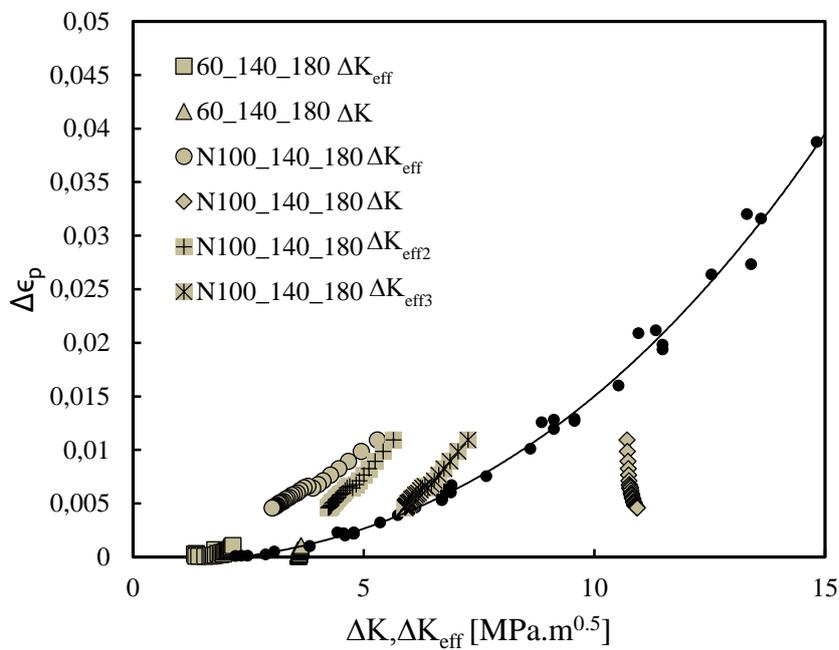


Figura 5.13 - Efeito de ΔK e ΔK<sub>eff</sub> na gama de deformação plástica.

## 6. CONCLUSÕES

Sabendo que o fenómeno do fecho de fenda para casos de amplitude variável ainda não está completamente compreendido na literatura, a realização desta tese serviu para esclarecer vários aspetos sobre este assunto, no qual foram retiradas as seguintes conclusões:

- Dos dois parâmetros numéricos para quantificar o nível de fecho de fenda,  $PICC_{node1}$  e  $PICC_{contact}$ , este último apresentou melhores resultados, pois envolve todos os nós em contacto atrás da extremidade da fenda, o que é fundamental para o caso de sobrecargas devido ao fecho parcial.
- Ao aumentar o  $K_{max,BL}$ : o valor mínimo da abertura de fenda desce até um certo valor de  $K$  e depois aumenta, o valor do pico da abertura de fenda sobe e o valor da propagação da fenda até atingir o pico não se altera muito.
- Ao aumentar o  $K_{min,BL}$ : o valor mínimo da abertura de fenda sobe, o valor do pico da abertura de fenda também cresce e o valor da propagação da fenda até atingir o pico diminui.
- Ao aumentar o  $K_{OL}$ : o valor mínimo da abertura de fenda, o valor do pico da abertura de fenda e o valor da propagação da fenda até atingir o pico aumentam.
- De acordo com as tendências obtidas, o  $K_{max,BL}$  tem maior influência do que  $K_{min,BL}$  nos casos de sobrecargas.
- Devido à sobrecarga, o perfil da fenda vai apresentar lombas residuais de deformação plástica nas faces da fenda à frente da zona onde a sobrecarga foi aplicada, em que se verificou que quanto maior for o  $K_{max,BL}$ , maior será a distância entre as faces da fenda; quanto maior for

o  $K_{\min, BL}$ , menor será essa distância; quanto maior for o  $K_{OL}$ , a distância entre as faces da fenda será menor.

- O arredondamento da extremidade da fenda, na zona da sobrecarga, (blunting) é um dos fenómenos mais importante no estudo das sobrecargas que permite explicar diversos comportamentos da fenda já que consegue modificar, e, em certos casos, eliminar todo o contacto que está para trás da zona da aplicação da sobrecarga o que justifica, juntamente com a variação dos parâmetros de carga, as diferentes posições do valor mínimo da abertura de fenda.
- Outro método para justificar o valor mínimo da abertura de fenda é analisar os gráficos tensão-deformação, nomeadamente a deformação residual. Quanto maior for esta deformação, maior é o PICC.
- Um novo parâmetro,  $\Delta K_{OL2}$ , foi o parâmetro de carga que apresentou melhor correlação com o valor do pico de abertura de fenda.
- O parâmetro  $\Delta K_{OL}$  foi o único parâmetro de carga que apresentou resultados aceitáveis para o estudo do valor da propagação da fenda até atingir o pico. Foram, ainda, comparados os resultados de  $\Delta a_{\text{peak}}$  obtidos numericamente com os resultados obtidos através da uma expressão da literatura e verificou-se que, para valores baixos de  $\Delta a_{\text{peak}}$ , havia uma boa concordância, mas para valores mais elevados de  $\Delta a_{\text{peak}}$  havia uma maior dispersão.
- O parâmetro  $\Delta K_{OL}$  é o parâmetro de carga que controla a distância de estabilização após uma sobrecarga. Com base em resultados experimentais da literatura, obtiveram-se duas expressões que permitem determinar, analiticamente, a  $\Delta a_{\text{stb}}$ .
- Analisando os parâmetros não lineares de extremidade de fenda como a energia específica máxima dissipada à frente da fenda e a gama de deformação plástica, verificou-se que os pontos obtidos com valores de  $\Delta K_{\text{eff}}$ , apesar de apresentarem uma tendência similar em relação às curvas mestras, ficaram a uma relativa distância destas curvas. Foram

calculados, ainda, valores de  $\Delta K_{\text{eff}}$ , resultantes de duas expressões da literatura, em que os pontos obtidos ficavam mais próximos das curvas mestras, validando, assim, o fenómeno do fecho de fenda para o caso das sobrecargas. Ainda assim, é possível melhorar os resultados, pelo que é necessário um estudo mais aprofundado sobre este tema.

No geral, os objetivos propostos foram cumpridos. Ainda assim, o estudo do fecho de fenda para solicitações de amplitude variável ainda tem várias questões que necessitam respostas. Deste modo, são propostos os seguintes assuntos para trabalho futuro:

1. Aprofundar o estudo dos parâmetros não lineares da extremidade da fenda em situações de sobrecargas.
2. Aprofundar o estudo das subcargas.
3. Estudar o efeito das sobrecargas periódicas e dos blocos de carga.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alizadeh H, Hills DA, de Matos PFP, Nowell D, Pavier MJ, Paynter RJ, Smith DJ, Simandjuntak S. A comparison of two and three-dimensional analyses of fatigue crack closure. *International Journal of Fatigue*. Article in press, 2006.
- Antunes FV, Chegini AG, Camas D, Correia L. Empirical model for plasticity induced crack closure based on  $K_{max}$  and  $\Delta K$ . Submetido à revista *Fatigue and Fracture of Engng Materials and Structures*.
- Antunes FV, Chegini AG, Correia L, Branco R. Numerical study of contact forces for crack closure analysis. *International Journal of Solids and Structures* 51(6), 1330-1339, 2014.
- ASTM E 647, Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates. American Society for Testing and Materials, 2011.
- Bao H, McEvily AJ. On Plane Stress-Plane Strain Interactions in Fatigue Crack Growth. *Int. J Fatigue* 20(6), 441-448, 1998.
- Blom AF, Holm DK. An experimental and numerical study of crack closure. *Eng Fract Mech* 22, 997-1011, 1984.
- Borrego LFP. Fatigue crack growth under variable amplitude loading in AlMgSi aluminium alloys. PhD thesis, University of Coimbra, Portugal, 2001.
- Borrego LP, Ferreira JM, Costa JM. Fatigue crack growth and crack closure in an AlMgSi alloy. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 24, 255-265, 2001.
- Borrego LP, Ferreira JM, Pinho da Cruz JM, Costa JM. Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure. *Engng Fracture Mechanics* 70, 1379-1397, 2003.
- Branco C, Ferreira J, Costa J, Ribeiro A. *Projecto de Órgãos de Máquinas*, 2012.
- Chaparro BM, Thuillier S, Menezes L, Manach PY, Fernandes JV. Material parameters

- identification: Gradient-based, genetic and hybrid optimization algorithms. *Computational Materials Science* 44(2), 339-346, 2008.
- Chermahini RG, Palmberg B, Blom AF. Fatigue crack growth and closure behaviour of semicircular and semielliptical surface flaws. *International Journal of Fatigue* 15, 259-263, 1993.
- Christensen RH. Fatigue crack, fatigue damage and their detection. *Metal fatigue*. New York: MacGraw-Hill, 1959.
- Costa JDM, Ferreira JAM. Effect of Stress Ratio and Specimen Thickness on Fatigue Crack Growth of CK45 Steel. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 30, 65-73, 1998.
- Daneshpour S, Koçak M, Langlade S, Horstmann M. Effect of overload on fatigue crack retardation of aerospace Al-alloy laser welds using crack-tip plasticity analysis. *International Journal of Fatigue* 31, 1603–1612, 2009.
- Dougherty JD, Padovan J, Srivatsan TS. Fatigue crack propagation and closure behaviour of modified 1071 steel: finite element study. *Engng Fracture Mech* 66 (2), 189-212, 1997.
- Elber W. The significance of fatigue crack closure under cyclic tension. *Damage tolerance in aircraft structures*. ASTM STP 486, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 230-242, 1971.
- Fleck NA. Influence of stress rate on crack grow retardation. *Base Questions in Fatigue: Volume I*, ASTM STP 924, 157-183, 1988.
- Haddadi H, Bouvier S, Banu M, Maier C, Teodosiu C. Towards an accurate description of the anisotropic behaviour of sheet metals under large plastic deformations: Modelling, numerical analysis and identification. *International Journal of Plasticity* 22, 2226–2271, 2006.
- Irwin GR. Fracture em: *Encyclopedia of Physics*, S. Flugged, vol. VI, Springer Verlag, 551-590, 1958.
- Jiang Y, Feng M, Ding F. A re-examination of plasticity-induced crack closure in fatigue crack propagation. *Int. Journal of Plasticity* 21, 1720-1740, 2005.

- Jones RE. Fatigue crack growth retardation after single-cycle peak overload in Ti-6Al-4V titanium alloy. *Engng Fract Mech* 5, 585-604, 1973.
- Lee SY, Liaw PK, Choo H, Rogge RB. A study on fatigue crack growth behavior subjected to a single tensile overload Part I. An overload-induced transient crack growth micromechanism. *Acta Materialia* 59, 485-494, 2011.
- Paris PC, Erdogan J. Critical analysis of crack growth propagation laws. *J Basic Eng* 85D, 528-34, 1963.
- Paris PC, Tada H, Donald JK. Service Load fatigue damage – a historical perspective. *International Journal of Fatigue* 21, s35-s46, 1999.
- Paul SK, Tarafder S. Cyclic plastic deformation response at fatigue crack tips. *Int Journal of Pressure Vessels and Piping* 101, 81-90, 2013.
- Pineau AG, Pelloux RM. Influence of strain induced martensitic transformations on fatigue crack growth rates in stainless steels. *Metallurgical Transactions* 5, 1103-1112, 1974.
- Rao KTV, Yu W, Ritchie RO. On the behaviour of small fatigue cracks in commercial aluminium lithium alloys. *Eng Fract Mech* 31(4), 623-635, 1988.
- Rice JR. Mechanisms of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue. *Fatigue Crack Propagation*. ASTM STP 415, 247-309, 1967.
- Ritchie RO, Suresh S, Moss CM. Near-threshold fatigue crack growth in 2(1/4)Cr-1 Mo pressure vessel steel in air and hydrogen. *Journal of Engng Materials and Technology* 102, 293-299, 1980.
- Roychowdhury S, Dodds Jr. RH. A numerical investigation of 3-D small-scale yielding fatigue crack growth. *Engng Fracture Mech* 70, 2363-2383, 2003.
- Shijve J, Broek D. The result of a test program based on a gust spectrum with variable amplitude loading. *Aircraft Engng* 34, 314-316, 1962.
- Sousa T. Propagação de fendas por fadiga: Influência do contacto nos parâmetros de extremidade de fenda, 2014.
- Suresh S, Ritchie RO. A geometric model for fatigue crack closure induced by fracture

surface roughness. *Metallurgical Transactions* 13A, 1627-1631, 1982.

Suresh S, Ritchie RO. On the influence of fatigue underloads on cyclic crack growth at low stress intensities. *Materials Science and Engng* 51, 61-69, 1981.

Suresh S. Micromechanisms of fatigue crack growth retardation following overloads. *Engng Fract Mech* 18, 577-593, 1983.

Takehio O, Koboyshi H. Near-threshold fatigue crack growth and crack closure in a nodular cast iron. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 10, 273-280, 1987.

Tzou JL, Suresh S, Ritchie RO. Fatigue crack propagation in oil environments. I-crack growth in silicone and paraffin oils. *Acta Metallurgica* 33, 105-116, 1985.

## ANEXO A – MODELO EMPÍRICO DE FECHO

Esta tese teve como principal objetivo estudar o nível do fecho de fenda em situações de amplitude variável. Previamente a este estudo, foi feito um outro sobre o nível do fecho de fenda para amplitude de carga constante onde se analisou o efeito dos parâmetros de carga no PICC. Esta análise foi feita através de um modelo empírico criado por Antunes *et al.* (submetido), que é representado pela seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_{open}}{\sigma_{max}} = m \left( \frac{\Delta K}{\sigma_{ys}} \right) + \left( \frac{\sigma_{open}}{\sigma_{max}} \right)_{\Delta K=0} \quad (A.1)$$

onde:

$$m = -47.311 \left( \frac{K_{max}}{\sigma_{ys}} \right) + 0.0993 \quad (A.2)$$

$$\left( \frac{\sigma_{open}}{\sigma_{max}} \right)_{\Delta K=0} = 0.835 \log \left( \frac{K_{max}}{\sigma_{ys}} \right) + 1.755 \quad (A.3)$$

O modelo é válido para as seguintes restrições:

$$0 < \frac{K_{max}}{\sigma_{ys}} < 0.08 \quad (A.4)$$

$$0 < \frac{\Delta K}{\sigma_{ys}} < 0.1 \quad (A.5)$$

$$Se K_{open} < K_{min} \rightarrow K_{open} = K_{min} \quad (A.6)$$

Este modelo é interessante para estudar o efeito dos parâmetros de carga. Nas figuras A.1-A.4 estão demonstrados alguns exemplos de aplicação de modelo. Na figura A.1, pode-se ver que ao aumentar  $K_{max}$ , mantendo  $\Delta K$  constante, o valor do PICC aumenta.

O mesmo efeito acontece no caso em que  $R$  é mantido constante (figura A.2). Na figura A.3, pode-se concluir que ao aumentar  $\Delta K$ , mantendo  $K_{\max}$  constante, o PICC baixa, mas esta redução não é muito significativa. Já quando o  $R$  é mantido constante, o PICC aumenta com o aumento do  $\Delta K$  (figura A.4). Tanto na figura A.2 como na figura A.4 é possível verificar que, mantendo  $K_{\max}$  ou  $\Delta K$  constante, o aumento do  $R$  leva ao crescimento do PICC.

Referir que, durante a realização do estudo das sobrecargas, tentou-se aplicar o modelo para obter o valor do pico de abertura de fenda  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{peak}}$  e comparar com o valor obtido numericamente. Tanto utilizando os parâmetros de carga indicados na expressão,  $\Delta K_{\text{BL}}$  e  $K_{\text{max, BL}}$ , como os parâmetros existente em casos de sobrecargas,  $\Delta K_{\text{OL}}$  e  $K_{\text{OL}}$ , a relação entre os resultados numéricos e analíticos ficou aquém das expectativas, concluindo-se, assim, que este modelo não é aplicável para casos de amplitude variável.

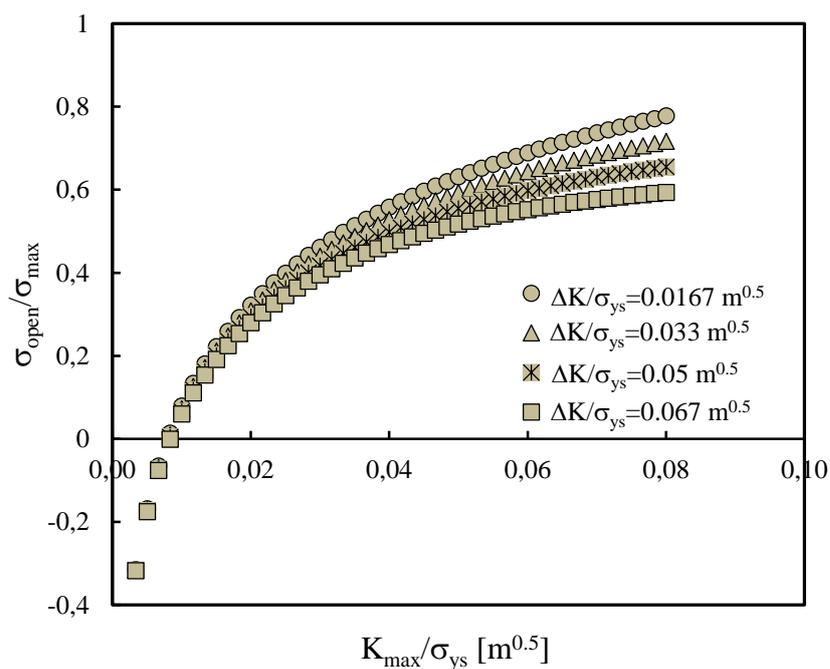


Figura A.1 - Efeito de  $K_{\max}$  com  $\Delta K$  constante.

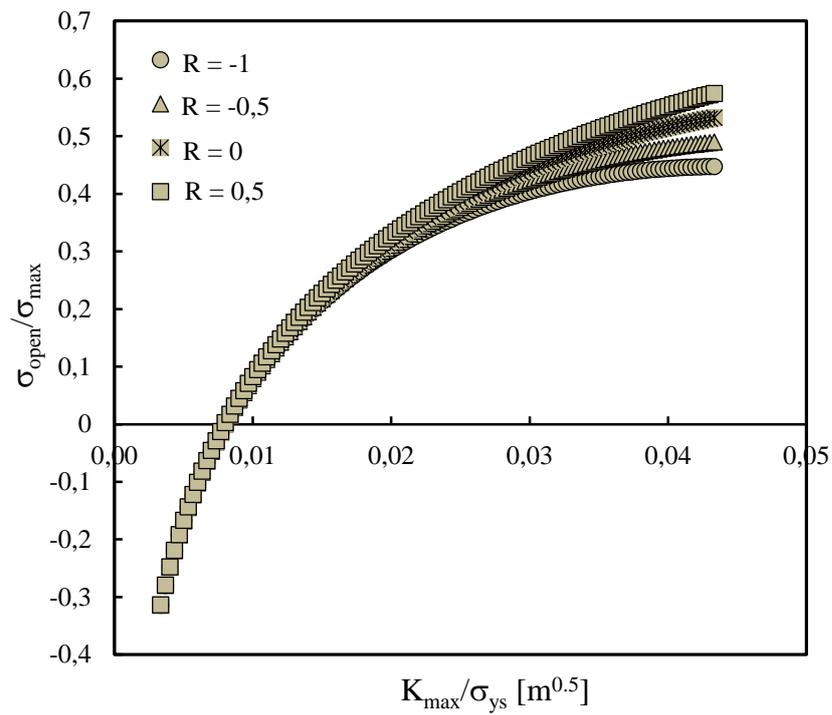


Figura A.2 - Efeito de  $K_{max}$  com R constante.

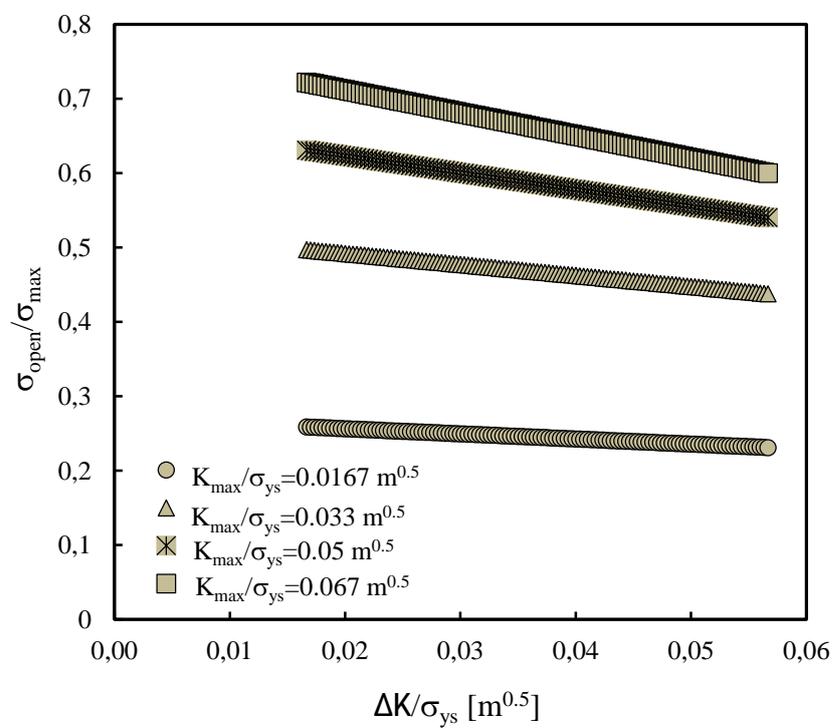


Figura A.3 - Efeito de  $\Delta K$  com  $K_{max}$  constante.

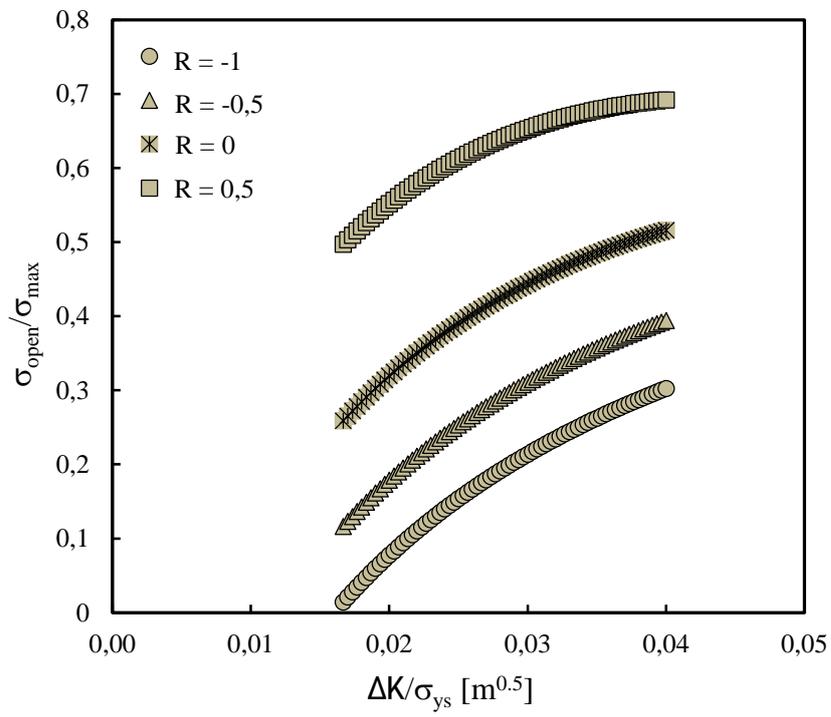


Figura A.4 - Efeito de  $\Delta K$  com R constante.

## ANEXO B - SUBCARGAS

Juntamente com as sobrecargas, as subcargas são um outro tipo de solicitações a amplitude variável. Apesar da sua menor complexidade em comparação com as sobrecargas, decidiu-se fazer um breve estudo sobre este tipo de cargas. Analisando as curvas  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})-\Delta a$  existem apenas dois parâmetros: o valor mínimo da abertura de fenda,  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$ , e o decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda,  $\Delta(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$ . Em relação ao perfil da fenda para um caso com subcarga, vai haver um esmagamento da zona plástica atrás da zona da aplicação da subcarga que vai provocar uma alteração do perfil com o aparecimento de uma reentrância, ou seja, vai ter um efeito contrário ao que foi visto para o caso das sobrecargas, pois as faces da fenda vão-se afastar, imediatamente antes, da zona da aplicação da subcarga, enquanto no caso das sobrecargas, as faces da fenda aproximavam-se após a aplicação da sobrecarga. Nos seguintes subcapítulos será feita uma análise sobre o efeito dos parâmetros de carga nos pontos das curvas  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})-\Delta a$  e no perfil de fenda.

### B.1. Efeito de $K_{\text{max,BL}}$

Na figura B.1 estão ilustrados três ensaios diferentes (a amplitude variável) onde se variou o  $K_{\text{max,BL}}$ . Com a ajuda da figura B.2, pode-se concluir que o valor  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$  aumenta com o crescimento de  $K_{\text{max,BL}}$ , no entanto, quando se chega a valores mais elevados de  $K_{\text{max,BL}}$ , há uma redução do  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$ . Em relação ao  $\Delta(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$ , este cresce à medida que  $K_{\text{max,BL}}$  aumenta (figura B.3). Da mesma forma que foi feito para o caso das sobrecargas, fez-se um ensaio onde se variou tanto o  $K_{\text{max,BL}}$  como o  $K_{\text{min,BL}}$  para saber qual dos parâmetros base tinha uma maior influência. Nas figuras B.2 e B.3 pode-se confirmar que o  $K_{\text{max,BL}}$  volta a ser o parâmetro base mais influente. Na figura B.4 está representado o perfil de fenda para três casos diferentes. Pode-se ver que no caso que tem maior  $K_{\text{max,BL}}$ , as faces da fenda estão mais próximas. A

reentrância que se pode visualizar na zona da subcarga é mais notória para o caso com o maior  $K_{max,BL}$ .

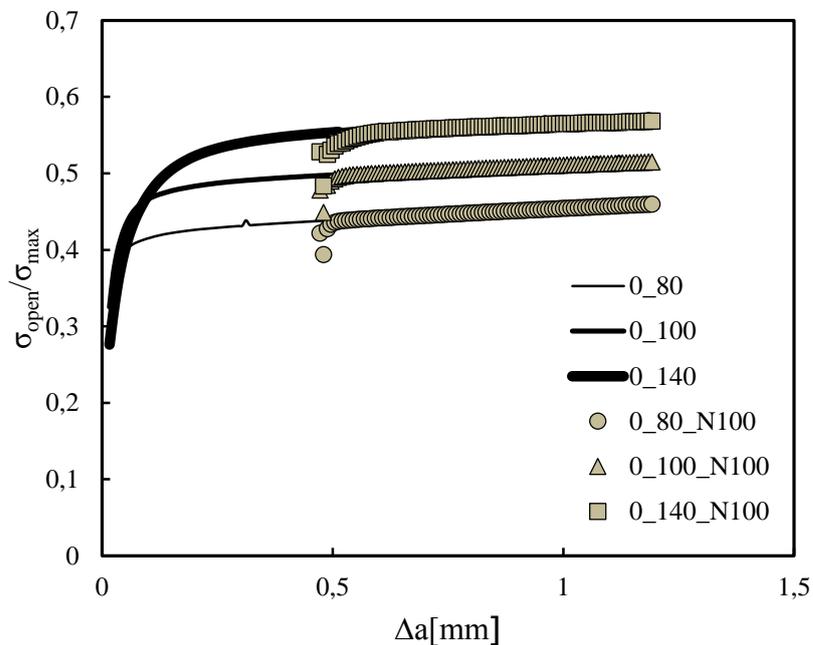


Figura B.1 - Efeito de  $K_{max,BL}$  no nível de fecho de fenda (subcarga).

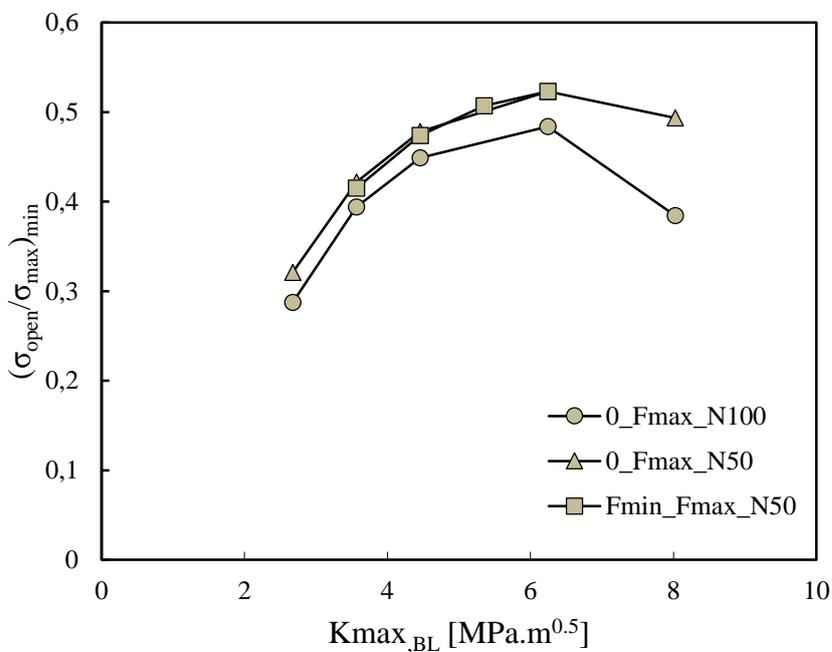
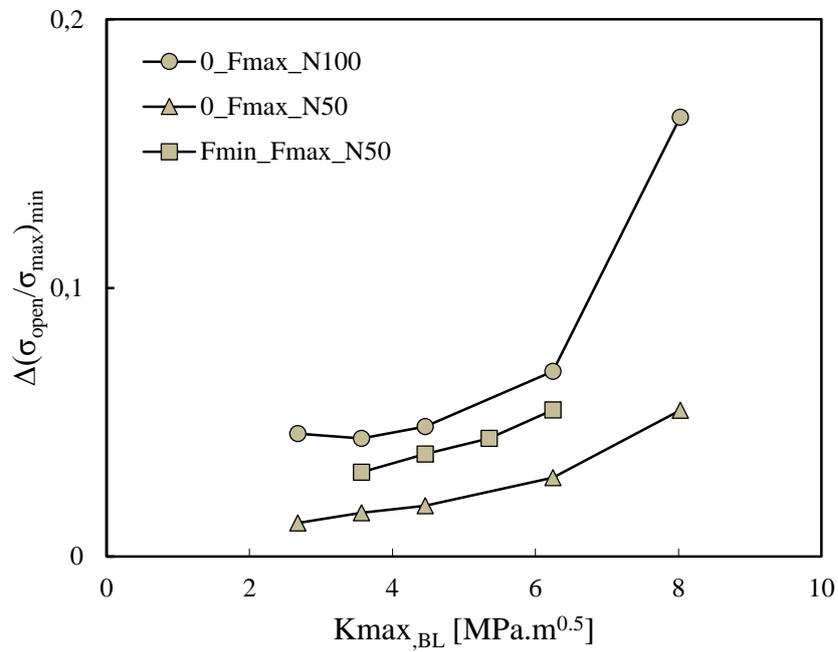
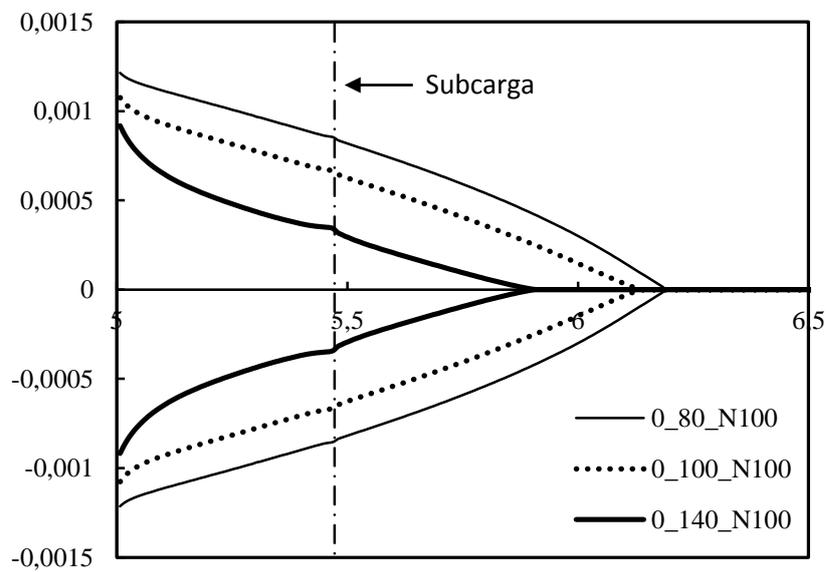


Figura B.2 - Efeito de  $K_{max,BL}$  no valor mínimo da abertura de fenda (subcarga).



**Figura B.3** - Efeito de  $K_{max,BL}$  no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda (subcarga).



**Figura B.4** - Efeito de  $K_{max,BL}$  no perfil da fenda (subcarga);  $F=40N$ ;  $K=1.78$  MPa.m<sup>0.5</sup>.

## B.2. Efeito de $K_{\min, BL}$

Na figura B.5 compara-se três casos onde se variou o  $K_{\min, BL}$  (a amplitude variável). Pode-se reparar que quanto maior for este parâmetro menor será o  $(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$ , mas esta variação não é muito acentuada como se pode verificar na figura B.6. Uma maior variação já acontece quando se fala no  $\Delta(\sigma_{\text{open}}/\sigma_{\text{max}})_{\text{min}}$ , onde este valor aumenta com o crescimento do  $K_{\min, BL}$  (figura B.7). Na figura B.8 está ilustrado o perfil de fenda para três ensaios diferentes onde se vê que as faces da fenda aproximam-se quanto maior for o  $K_{\min, BL}$ . Em relação à reentrância já referida no início deste Anexo, está é mais visível para o caso com o maior  $K_{\min, BL}$ .

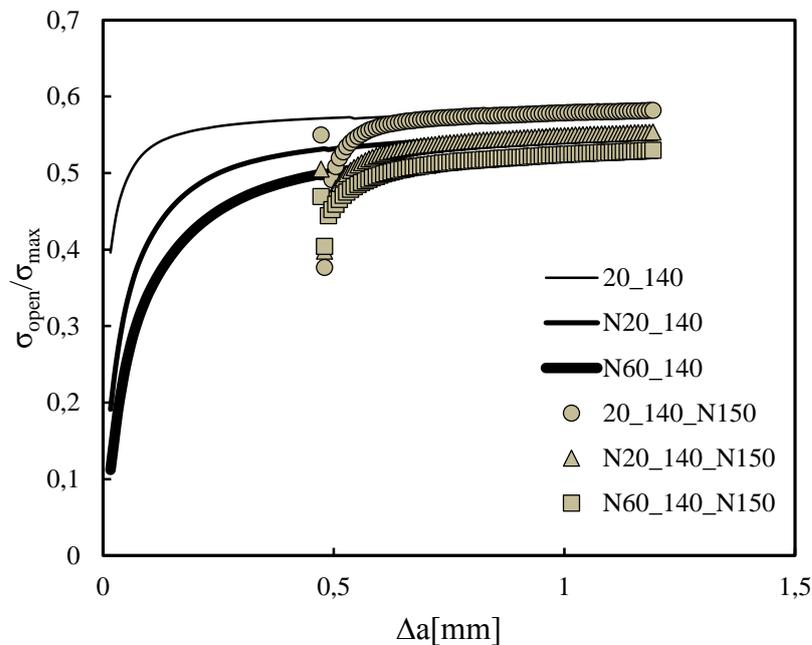


Figura B.5 - Efeito de  $K_{\min, BL}$  no nível de fecho de fenda (subcarga).

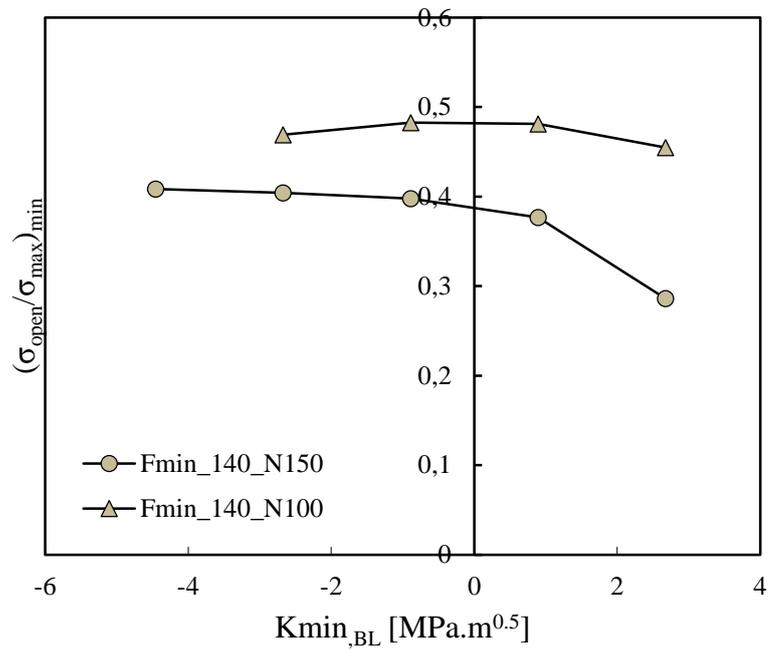


Figura B.6 - Efeito de  $K_{max,BL}$  no valor mínimo da abertura de fenda (subcarga).

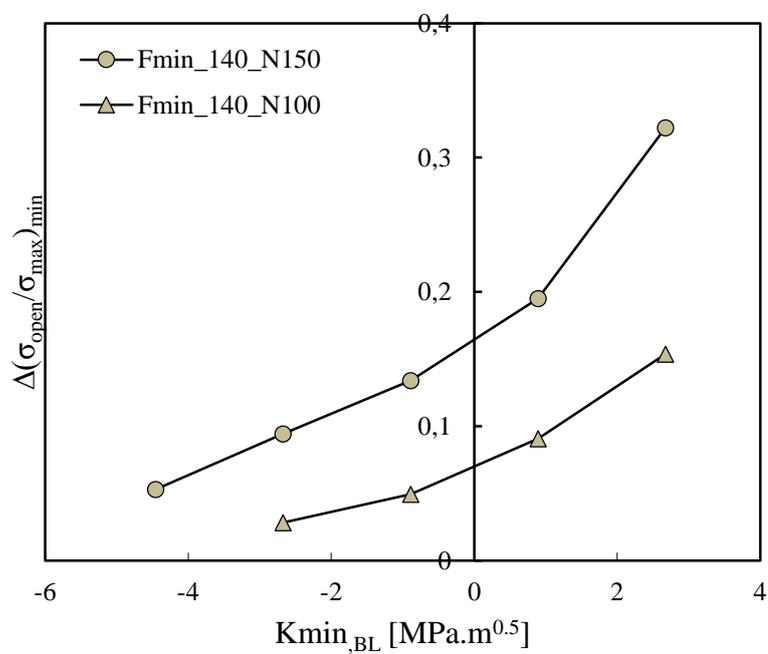
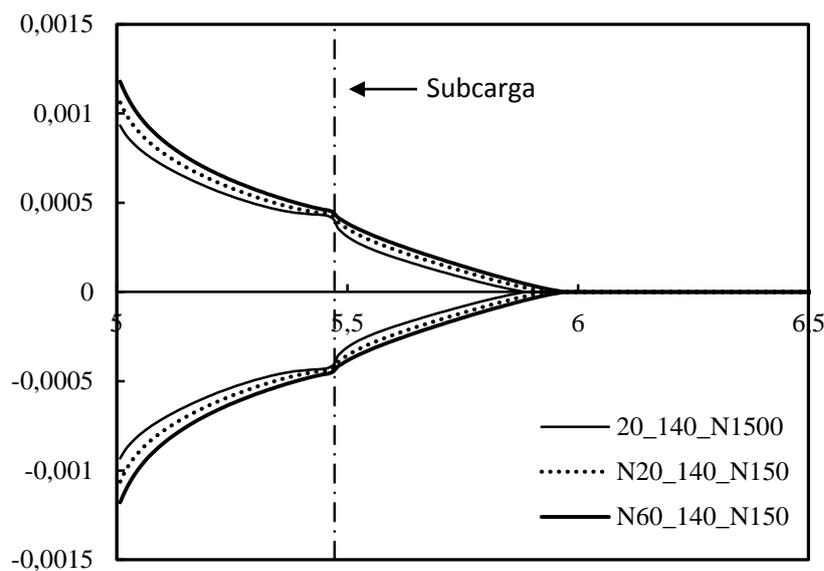


Figura B.7 - Efeito de  $K_{min,BL}$  no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda (subcarga).



**Figura B.8** - Efeito de  $K_{min,BL}$  no perfil da fenda (subcarga);  $F=40N$ ;  $K=1.78 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ .

### B.3. Efeito de $K_{UL}$

A influência de  $K_{UL}$  está demonstrada na figura B.9, onde se pode confirmar que quanto maior for  $K_{UL}$ , maior será  $(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{min}$ . Na figura B.10 pode-se confirmar esta tendência, mas verifica-se que na série 0\_100\_F<sub>UL</sub> essa variação é muito menos acentuada. O efeito será contrário no que diz respeito ao  $\Delta(\sigma_{open}/\sigma_{max})_{min}$ : este parâmetro desce com o aumento de  $K_{UL}$ , sendo que na série 0\_100\_F<sub>UL</sub> continua a verificar-se a variação menos ressaltante (figura B.11). Na figura B.12 pode-se visualizar o perfil de fenda para três exemplos diferentes em que se pode conferir que quanto maior for o  $K_{UL}$ , menor será a distância entre as faces da fenda. No que se refere à reentrância, está é mais evidente para o caso com o menor  $K_{UL}$ .

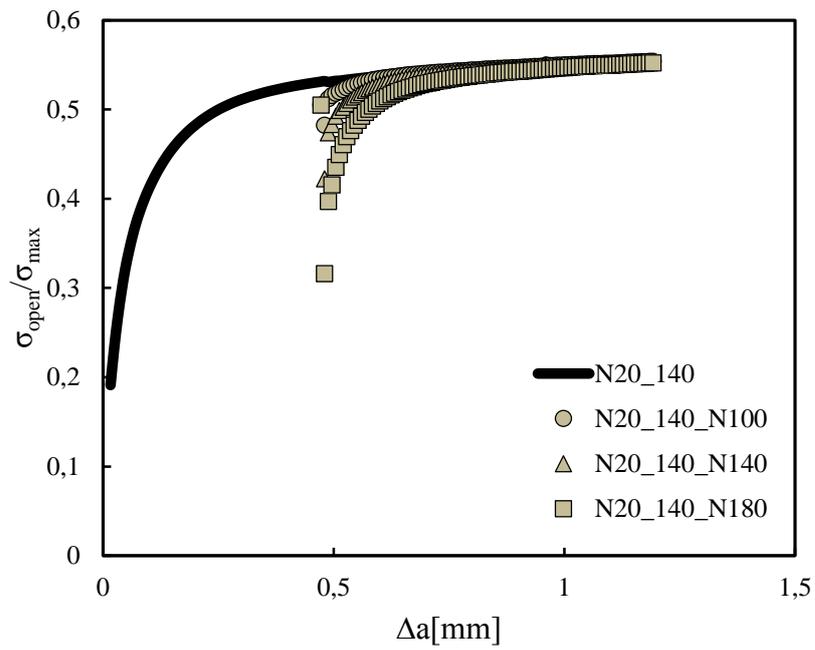


Figura B.9 - Efeito de  $K_{UL}$  no nível de fecho de fenda.

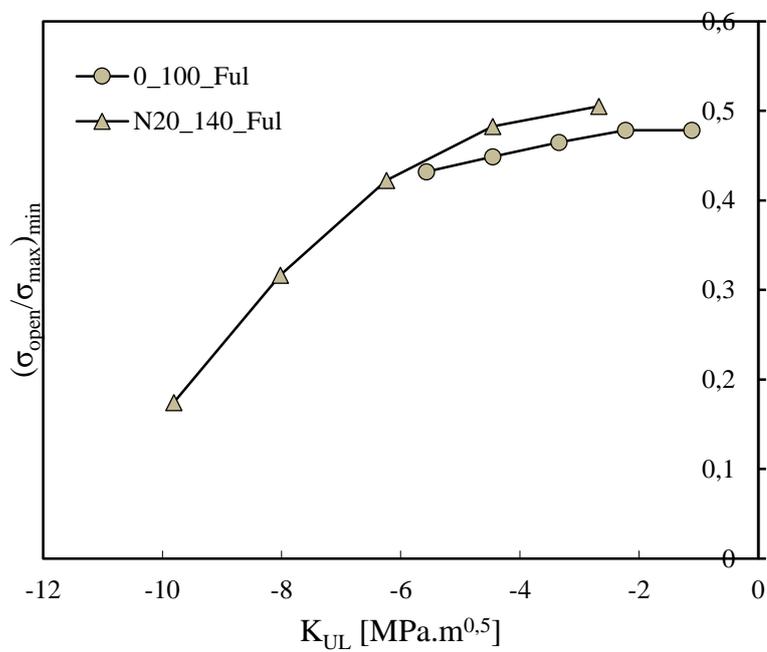
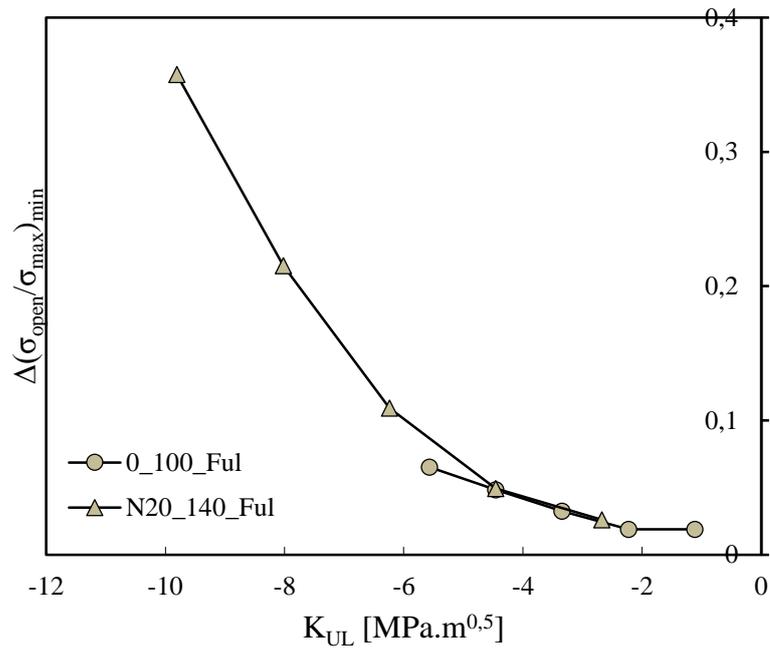
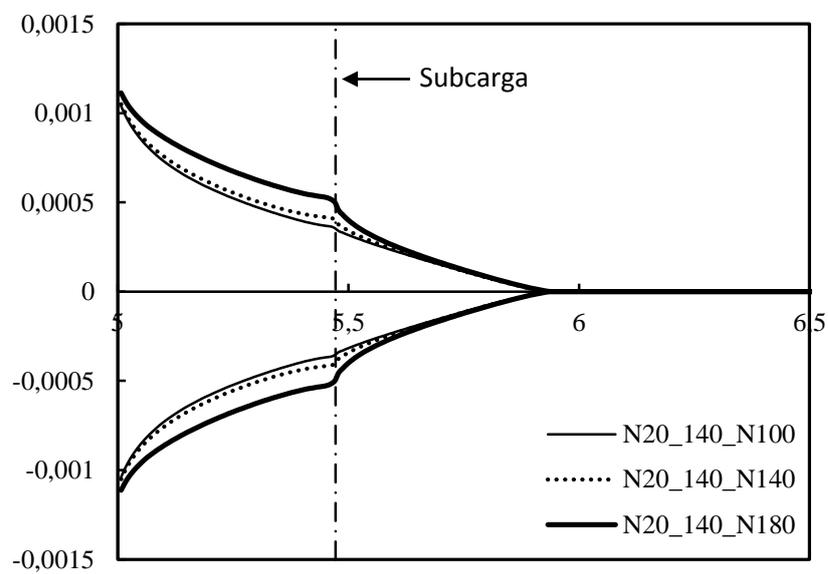


Figura B.10 - Efeito de  $K_{UL}$  no valor mínimo da abertura de fenda.

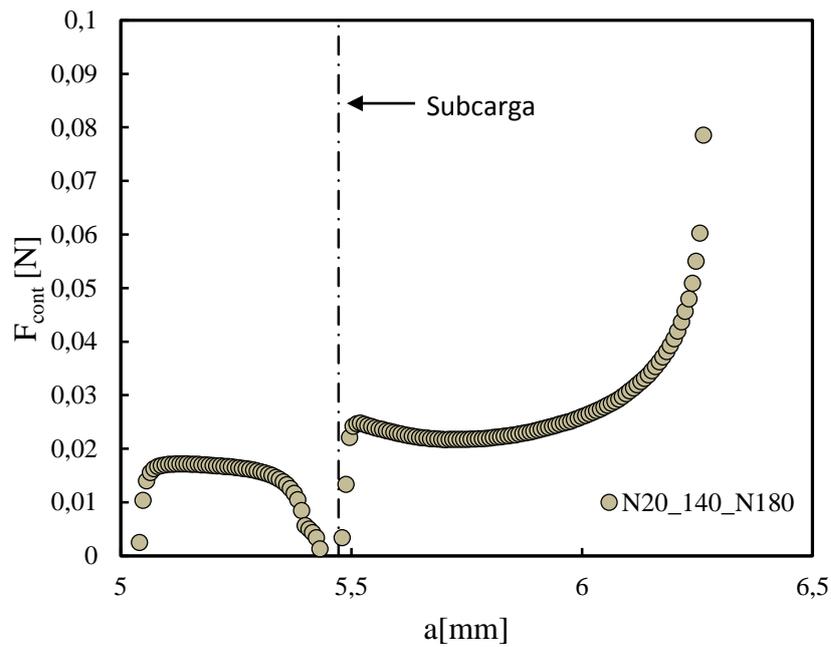


**Figura B.11** - Efeito de  $K_{UL}$  no decréscimo do valor mínimo da abertura de fenda.



**Figura B.12** - Efeito de  $K_{UL}$  no perfil da fenda;  $F=40N$ ;  $K=1.78$  MPa.m<sup>0,5</sup>.

Para concluir, na figura B.13 estão ilustradas as forças de contacto em função da coordenada  $x$ , quando a fenda tem um comprimento de 6.26 mm. Pode-se reparar que na zona da subcarga, as forças de contacto são praticamente nulas devido ao afastamento das faces da fenda nessa zona.



**Figura B.13** - Forças de contacto a carga mínima (subcarga).