



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Propagação de Fendas por Fadiga: Efeito de Subcargas**

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

**Autor**

**Luís Filipe Ribeiro Paiva**

**Orientador**

**Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa</b> <b>Professor Associado com agregação da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Ricardo Madeira Soares Branco</b> <b>Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>

**Coimbra, Setembro, 2015**

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcuta

Aos meus pais e ao meu irmão.

## Agradecimentos

A realização desta dissertação apenas se tornou possível graças à contribuição de algumas pessoas, sendo esse auxílio fundamental não poderia deixar de agradecer a todas as pessoas ou instituições, nomeadamente:

Ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Antunes, pelo seu apoio incondicional, disponibilidade e paciência. Sem o seu apoio este trabalho não seria possível, um enorme agradecimento pelos conhecimentos transmitidos e por todas as palavras de apoio nos momentos mais difíceis.

A toda a minha família, principalmente aos meus pais, por todo o apoio, motivação e paciência demonstrada ao longo destes anos. Sem eles nada seria possível, sempre me proporcionaram as melhores condições para atingir os meus objetivos.

Ao meu irmão, Miguel, pela preocupação, motivação e apoio, mesmo longe consegue dar-me força para nunca desistir. Sem dúvida o maior e o melhor exemplo.

A todos os meus amigos que me acompanharam neste percurso pelo apoio e pela amizade, a presença deles foi essencial.

Aos meus colegas do Laboratório de Construções Mecânicas pela ajuda e motivação concedida.

Ao Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica pela cedência do *software* DD3IMP.

À Professora Doutora Marta Oliveira pela disponibilização do *template*.

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



## Resumo

A rotura por fadiga é um modo de falha que surge frequentemente nas peças em serviço, submetidas a cargas cíclicas. Os componentes são muitas vezes sujeitos a espectros de carga variáveis e aleatórios, sendo porém importante começar por compreender inteiramente o efeito de solicitações mais simples como sobrecargas, subcargas e blocos de carga. O fenómeno de fecho de fenda apresenta atualmente um papel bastante relevante no estudo do efeito da razão de tensões e da história de carregamento na velocidade de propagação de fendas por fadiga. Este fenómeno consiste no contacto entre as faces de fenda numa porção do ciclo de carregamento.

O principal objetivo desta dissertação é o estudo do efeito de variações de carga, nomeadamente subcargas, no fenómeno de fecho de fenda induzido por plasticidade (PICC). Foram realizadas diversas simulações numéricas, em condições de estado plano de tensão e em estado plano de deformação, com recurso ao *software* de elementos finitos DD3IMP. O tratamento de resultados incidiu essencialmente na determinação de perfis de fenda, forças de contacto, níveis de fecho de fenda e alongamentos plásticos ( $\Delta y_p$ ).

A aplicação de uma subcarga provoca uma depressão no perfil e uma redução das forças de contacto no local da solicitação, reduzindo os níveis de fecho de fenda. O esmagamento associado à força de compressão acontece principalmente atrás da extremidade da fenda na posição da solicitação. O aumento de  $\Delta F_1 = F_{\min} - F_{UL}$  aumenta o decréscimo dos valores mínimos de fecho no instante em que é aplicada a subcarga e o aumento de  $\Delta F_2 = F_{\max} - F_{UL}$  aumenta as distâncias de propagação necessárias para a ocorrência da estabilização do fecho de fenda. O efeito de uma subcarga está intimamente ligado à deformação plástica inversa e isso explica o aumento do efeito que ocorre com encruamento cinemático. A aplicação de subcargas periódicas prolonga o efeito de uma subcarga, e os valores de fecho aproximam-se dos correspondentes a um ciclo de amplitude constante com  $F_{\min} = F_{UL}$ . A aplicação de uma subcarga após uma sobrecarga reduz parcialmente o efeito da sobrecarga, reduzindo e alterando a posição do pico.

**Palavras-chave:** Propagação de fendas por fadiga, fecho de fenda induzido por deformação plástica (PICC), Subcargas, Sobrecargas.

## Abstract

Fatigue crack propagation is a failure mode that usually happens in working parts ruled by cyclical loads. The components are commonly subjected to variable and random load spectrums, therefore, as a first approach it is important to understand the effect of different simple kinds of loading such as underloads, overloads and load blocks variations. The crack closure phenomenon has a very important role when studying the effect of stress ratio and loading history on fatigue crack growth rate. This phenomenon is the contact of the crack faces during a portion of the loading cycle.

The main objective of this dissertation is the study of the effect of loading variations, namely underloads, on plasticity induced crack closure. Several numeric simulations were made under plane strain and plane stress conditions using to the finite element software DD3IMP. The analysis of the results essentially focused on the determination of crack profiles, contact forces, and on the quantification of the crack closure and plastic elongation ( $\Delta y_p$ ).

Enforcing an underload produces a depression of the crack profile and a decrease of the contact forces in the solicitation zone, reducing the crack closure levels. The smashing related to the compression force mainly happens behind crack tip. The increment of  $\Delta F_1 = F_{\min} - F_{UL}$  increases the reduction of the minimum values of closure on the instant that the underload is applied and the increase of  $\Delta F_2 = F_{\max} - F_{UL}$  increases the crack propagation distance needed to stabilize the closure level. The effect of the underload is directly connected to the reversed plastic deformation which explains the increment of the effect that occurs with cinematic hardening. Periodic underloads prolongs the effect of underload and the closure values are close to the level corresponding to a constant amplitude cycle with  $F_{\min} = F_{UL}$ . The application of an underload right after an overload partially reduces the effect of the overload, reducing and changing the position of the peak.

**Keywords** Fatigue crack growth, Plasticity induced crack closure (PICC), Underloads, Overloads.

## 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. Propagação de fendas por fadiga .....	4
2.2. Fenómeno do fecho de fenda .....	6
2.3. Solicitações de amplitude variável.....	8
2.3.1. Subcargas.....	8
2.3.2. Sobrecargas.....	11
2.4. Parâmetros de extremidade de fenda .....	11
3. Procedimento Numérico .....	14
3.1. Programa de elementos finitos DD3IMP .....	14
3.2. Parâmetro para quantificação da abertura de fenda .....	16
3.3. Parâmetros de extremidade de fenda .....	16
3.4. Geometria e Material .....	17
3.5. Discretização por elementos finitos .....	19
3.6. Condições de Ensaio .....	21
4. Apresentação e Análise de Resultados .....	24
4.1. Caso base .....	24
4.2. Efeito dos parâmetros de carga .....	30
4.2.1. Efeito do $F_{máx}$ .....	30
4.2.2. Efeito do $F_{mín}$ .....	33
4.2.3. Efeito do $F_{UL}$ .....	36
4.3. Varrimento .....	40
4.4. Efeito do comportamento do material.....	41
4.5. Subcargas periódicas.....	43
4.6. Comparação de sobrecargas com subcargas .....	49
4.7. Efeito de uma subcarga após uma sobrecarga .....	52
4.8. Efeito de uma subcarga antes de uma sobrecarga.....	55
5. Conclusões.....	59
Referências Bibliográficas.....	61
Apêndice A – Modelo de Cunhas Plásticas.....	68
Apêndice B – Parâmetros não Lineares.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema das fases da rotura por fadiga. ....	4
Figura 2.2. Curva típica da/dN- $\Delta K$ .....	5
Figura 2.3. Representação dos parâmetros de carregamento cíclico.....	7
Figura 2.4. Esquema das zonas da extremidade da fenda e respetivos gráficos tensão-deformação (Sousa, 2014). ....	12
Figura 3.1. Medição do intervalo de deformação plástica e da energia dissipada por ciclo. ....	17
Figura 3.2. Geometria do provete e detalhe da fenda. ....	18
Figura 3.3. Condições de fronteira e carregamento. a) vista frontal; b) modelo de tensão plana; c) modelo de deformação plana. ....	19
Figura 3.4. Descrição da malha de elementos finitos. ....	20
Figura 3.5. Exemplo do carregamento aplicado. ....	21
Figura 4.1. Perfil de fenda com e sem subcarga (tensão plana, $a=6.272$ , $F=40N$ ). ....	24
Figura 4.2. Perfil de fenda.com subcarga (deformação plana, $F=40N$ ). ....	25
Figura 4.3. Deformação plástica $\Delta y$ (tensão plana). ....	26
Figura 4.4. Deformação plástica $\Delta y$ (deformação plana). ....	26
Figura 4.5. Forças de contacto à carga mínima (tensão plana, $F=0$ ). ....	27
Figura 4.6. Forças de contacto à carga mínima (deformação plana, $F=0$ ). ....	28
Figura 4.7. Nível de fecho de fenda: $PICC_{node1}$ e $PICC_{contact}$ (tensão plana). ....	29
Figura 4.8. Nível de fecho de fenda: $PICC_{node1}$ e $PICC_{contact}$ (deformação plana). ....	29
Figura 4.9. Efeito de $F_{m\acute{a}x}$ no perfil de fenda (tensão plana, $a=6.272$ mm; $F=40N$ ). ....	31
Figura 4.10. Efeito de $F_{m\acute{a}x}$ no nível de fecho de fenda (tensão plana, $PICC_{node1}$ ). ....	32
Figura 4.11. Efeito de $F_{m\acute{a}x}$ no $\Delta R_{ef}$ (tensão plana). ....	32
Figura 4.12. Efeito de $F_{m\acute{a}x}$ em $\Delta a_{stb}$ (tensão plana). ....	33
Figura 4.13. Efeito de $F_{m\acute{i}n}$ no perfil de fenda (tensão plana, $F=40N$ ). ....	34
Figura 4.14. Efeito de $F_{m\acute{i}n}$ no nível de fecho de fenda (tensão plana, $PICC_{node1}$ ). ....	35
Figura 4.15. Efeito de $F_{m\acute{i}n}$ no $\Delta R_{ef}$ (tensão plana). ....	35
Figura 4.16. Efeito de $F_{m\acute{i}n}$ no $\Delta a_{stb}$ (tensão plana). ....	36
Figura 4.17. Efeito de $F_{UL}$ no perfil da fenda (tensão plana, $F=40N$ ). ....	37
Figura 4.18. Efeito de $F_{UL}$ no nível de fecho de fenda (tensão plana, $PICC_{node1}$ ). ....	37
Figura 4.19. Efeito de $F_{UL}$ em $\Delta R_{ef}$ (tensão plana). ....	38

Figura 4.20. Efeito de $F_{UL}$ em $\Delta_{astb}$ (tensão plana). .....	38
Figura 4.21. Efeito de $F_{UL}$ nas forças de contacto a carga mínima (tensão plana, $F=0$ ). ....	39
Figura 4.22. Efeito de $\Delta F_1$ no decréscimo dos valores mínimos de fecho. ....	40
Figura 4.23. Efeito de $\Delta F_2$ na distância de estabilização.....	41
Figura 4.24. Efeito do comportamento do material nas forças de contacto à carga mínima (tensão plana). .....	42
Figura 4.25. Efeito do comportamento do material no nível de fecho de fenda (tensão plana, $PICC_{node1}$ ).....	42
Figura 4.26. Exemplo da solicitação aplicada. ....	43
Figura 4.27. Perfil de fenda com subcargas periódicas de 10 blocos (tensão plana, $F=40N$ ). .....	44
Figura 4.28. Perfil de fenda com subcargas periódicas de 5 blocos (tensão plana, $F=40N$ ). .....	44
Figura 4.29. Perfil de fenda com subcargas periódicas de 2 blocos (tensão plana, $F=40N$ ). .....	45
Figura 4.30. Forças de contacto à carga mínima (tensão plana, $n=10$ blocos, $F=0$ ). .....	46
Figura 4.31. Forças de contacto à carga mínima (tensão plana, $n=5$ e $n=2$ blocos, $F=0$ ). ..	46
Figura 4.32. Nível de fecho de fenda: $PICC_{node1}$ (tensão plana, $n=10$ blocos).....	47
Figura 4.33. Nível de fecho de fenda: $PICC_{node1}$ (tensão plana, $n=5$ blocos).....	48
Figura 4.34. Nível de fecho de fenda: $PICC_{node1}$ (tensão plana, $n=2$ blocos).....	48
Figura 4.35. Perfil de fenda (tensão plana, $F=100N$ ). .....	49
Figura 4.36. Forças de contacto à carga mínima (tensão plana, $F=0$ ). .....	50
Figura 4.37. Nível de fecho de fenda ( $PICC_{node1}$ , tensão plana).....	51
Figura 4.38. Exemplo da solicitação em estudo. ....	52
Figura 4.39. Perfil de fenda (tensão plana, $F=140N$ ). .....	53
Figura 4.40. Deformação plástica $\Delta y$ (tensão plana).....	53
Figura 4.41. Forças de contacto à carga mínima (tensão plana, $F=0$ ). .....	54
Figura 4.42. Nível de fecho de fenda ( $PICC_{node1}$ ; tensão plana). .....	55
Figura 4.43. Exemplo da solicitação aplicada. ....	55
Figura 4.44. Perfil de fenda (tensão plana, $F=140N$ ). .....	56
Figura 4.45. Deformação plástica $\Delta y$ (tensão plana).....	57
Figura 4.46. Forças de contacto à carga mínima (tensão plana, $F=0$ ). .....	57
Figura 4.47. Nível de fecho de fenda ( $PICC_{node1}$ ; tensão plana). .....	58
Figura A.1. Níveis de fecho de fenda pelo método de elementos finitos. ....	69
Figura A.2. Níveis de fecho de fenda previstos pelo modelo.....	70



---

Figura A.3. Valores do COD antes e depois da aplicação da subcarga.....	70
Figura B.1. COD em função de $\Delta K$ e $\Delta K_{ef}$ .....	72

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Caracterização dos ficheiros de entrada e saída. ....	15
Tabela 3.2. Variação de $F_{\text{máx}}$ , sendo $F_{\text{mín}}$ e $F_{\text{UL}}$ constantes. ....	22
Tabela 3.3. Variação de $F_{\text{mín}}$ e de $F_{\text{máx}}$ , sendo $F_{\text{UL}}$ constantes.....	22
Tabela 3.4. Variação de $F_{\text{mín}}$ , sendo $F_{\text{máx}}$ e $F_{\text{UL}}$ constantes. ....	23
Tabela 3.5. Variação da $F_{\text{UL}}$ , sendo $F_{\text{mín}}$ e $F_{\text{máx}}$ constantes. ....	23

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

- a – Comprimento de fenda
- CA – Amplitude constante
- $da/dN$  – Velocidade de propagação
- DP – Estado plano de deformação
- $F_{ab}$  – Força de abertura de fenda
- $F_{cont}$  – Força de contacto
- $F_{m\acute{a}x}$  – Força máxima da sollicitação base
- $F_{m\acute{i}n}$  – Força mínima da sollicitação base
- $F_{OL}$  – Força máxima correspondente à sobrecarga
- $F_{UL}$  – Força mínima correspondente  subcarga
- K – Fator de intensidade de tensão
- $K_{ab}$  – Fator de intensidade de tensão de abertura de fenda
- $K_c$  – Tenacidade à fratura
- $K_{m\acute{a}x}$  – Fator de intensidade de tensão máximo
- $K_{m\acute{i}n}$  – Fator de intensidade de tensão mínimo
- $K_{UL}$  – Fator de intensidade de tensão mínimo correspondente  subcarga
- M(T) – Provede com fenda central
- OL - Sobrecarga
- R – Razão de tensões
- TP – Estado plano de tensão
- U – Razão de carga
- UL - Subcarga
- $\Delta a$  – Distância de propagação
- $\Delta a_{stb}$  – Distância de propagação requerida para a estabilização
- $\Delta F_1$  – Diferença entre  $F_{m\acute{i}n}$  e  $F_{UL}$
- $\Delta F_2$  – Diferença entre  $F_{m\acute{a}x}$  e  $F_{UL}$
- $\Delta K$  – Gama do fator de intensidade de tensões

$\Delta K_{ef}$  – Gama efetiva do fator de intensidade de tensões

$\Delta R_{ef}$  – Decréscimo dos valores mínimos de fecho

$\Delta y_p$  – Alongamento plástico

$\Delta \varepsilon_{p,yy}$  – Gama de deformação plástica na direção vertical

$\Delta \varepsilon_{total,yy}$  – Gama de deformação total na direção yy

$\varepsilon_{p,yy}$  – Deformação plástica na direção vertical

$\varepsilon_{yy}$  – Deformação na direção yy

$\sigma_{ab}$  – Tensão de abertura de fenda

$\sigma_{máx}$  – Tensão máxima

$\sigma_{máxcomp}$  – Tensão máxima de compressão

$\sigma_{mín}$  – Tensão mínima

$\sigma_{UL}$  – Tensão de subcarga

$\sigma_{yy}$  – Componente da tensão na direção yy

## **Siglas**

*AA - Aluminium Association*

*ASTM – American Society for Testing and Materials*

*COD – Crack Opening Displacement*

*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*

*PICC – Plasticity Induced Crack Closure*

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

A fadiga dos materiais é um modo de falha muito importante no universo da engenharia; prever, controlar e evitar as roturas por fadiga é então uma prioridade do projeto moderno. A investigação nesta área permitirá o desenvolvimento de estruturas cada vez mais eficientes, capazes de suportarem maiores cargas dinâmicas, e aumentar a sua vida útil. Neste contexto, controlar as roturas por fadiga é importante para reduzir significativamente os danos materiais, sociais e económicos.

As roturas por fadiga compreendem normalmente quatro fases, a nucleação da fenda, a iniciação da fenda, a propagação estável e a propagação instável. Existem vários micro mecanismos de propagação como a deformação plástica cíclica, a clivagem, a oxidação e o fecho de fenda. O mecanismo em estudo nesta dissertação é o fecho de fenda.

O fecho de fenda tem vindo a desempenhar um papel fundamental no estudo da propagação de fendas por fadiga. Este fenómeno identificado por Elber (1971) consiste no contacto entre as faces da fenda durante um ciclo de carregamento, onde são visíveis alterações nos campos de tensão e de deformação na extremidade da fenda. As referidas alterações afetam significativamente a velocidade de propagação da fenda, sendo assim de extrema importância o seu estudo e compreensão. Este fenómeno estudado experimentalmente, numericamente e analiticamente apresenta diversos mecanismos de fecho que influenciam a velocidade de propagação, como o fecho de fenda induzido por plasticidade (PICC).

A maioria dos estudos numéricos realizados sobre propagação de fendas por fadiga, e em particular sobre fecho de fenda, têm-se limitado a solicitações de amplitude constante, isto é, cargas máximas e mínimas uniformes ao longo do tempo. Normalmente, os componentes são sujeitos a cargas variáveis, assim é importante perceber o efeito das variações de carga. Além disso, as variações de carga permitem estudar os mecanismos subjacentes ao fecho de fenda. Para a sua compreensão é necessário começar por estudar casos mais simples nomeadamente as subcargas.

## 1.2. Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é o estudo do efeito de variações de carga, nomeadamente subcargas, no fenómeno de fecho de fenda induzido por plasticidade (PICC), sendo este o mecanismo mais relevante no regime II de propagação. Neste trabalho vão ser analisadas simulações em condições de estado plano de tensão e em estado plano de deformação. Em estado plano de tensão o fenómeno de fecho de fenda ocorre devido à formação de uma zona plástica na extremidade da fenda enquanto no estado plano de deformação não existe qualquer movimento lateral, sendo nula a deformação segundo a direção da espessura.

Como objetivos mais específicos podem apontar-se:

- Identificar os mecanismos que explicam as variações de fecho de fenda após aplicação de subcargas;
- Estudar o efeito dos parâmetros de carga ( $F_{\text{máx}}$ ,  $F_{\text{mín}}$ ,  $F_{\text{UL}}$ ) nos parâmetros que caracterizam as curvas de fecho de fenda ( $\Delta R_{\text{eff,mín}}$ ,  $\Delta a_{\text{stb}}$ );
- Estudar os efeitos do estado de tensão e do modelo de encruamento do material;
- Verificar se o fecho de fenda consegue explicar a variação de  $da/dN$  quando há subcargas, analisando parâmetros não lineares de extremidade de fenda;
- Estudar outras sequências de carga como:
  - Sobrecargas e subcargas;
  - Subcargas e sobrecargas;
  - Subcargas periódicas.

Para a realização dos estudos apresentados recorreu-se a simulações numéricas utilizando o programa de elementos finitos desenvolvido pelo Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, o *Three-Dimensional Elasto-plastic Finite Element Program* (DD3IMP).

### **1.3. Estrutura da dissertação**

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos, apresentando a seguinte estrutura:

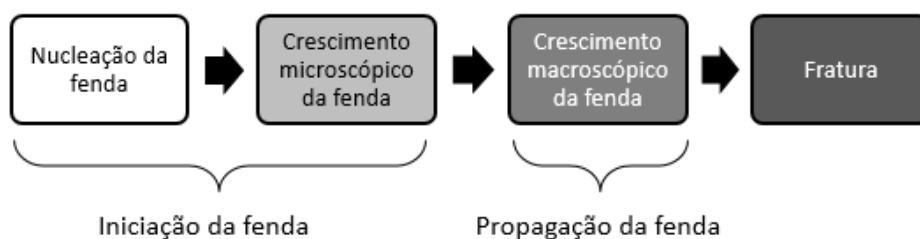
- Capítulo 2: Designado por revisão bibliográfica apresenta os conceitos e as definições mais importantes para a compreensão dos estudos realizados;
- Capítulo 3: Descreve o procedimento numérico e as condições dos ensaios numéricos realizados;
- Capítulo 4: Apresentação e análise dos resultados mais relevantes obtidos durante a realização desta dissertação.
- Capítulo 5: Descreve as principais conclusões retiradas deste trabalho e apresenta propostas para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Propagação de fendas por fadiga

A fadiga dos materiais é um processo que ocorre em cerca de 80% a 90% das peças em serviço, sendo de extrema importância o seu estudo para o desenvolvimento da engenharia (Branco *et al.*, 2012). O desenvolvimento deste dano é provocado por carregamentos cíclicos com ou sem cargas de choque, ocorrendo para tensões inferiores às de rotura do material e às da tensão limite elástica. A rotura por fadiga (Figura 2.1) compreende normalmente três fases: iniciação da fenda; propagação da fenda; rotura final.

A fase de iniciação da fenda é constituída pela nucleação e pelo crescimento microscópico da fenda, ocorrendo na maioria das vezes à superfície, em zonas de maiores concentrações de tensão e em geral onde a ocorrência de deformações plásticas é mais suscetível. O período de propagação é caracterizado pelo crescimento macroscópico da fenda, onde existe um aumento progressivo da velocidade de propagação se a carga aplicada se mantiver. Quando a fenda atinge dimensões críticas ocorre a rotura final do material.



**Figura 2.1.** Esquema das fases da rotura por fadiga.

A propagação de fendas por fadiga tem sido modelada pela abordagem da Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE), metodologia esta que se tem destacado como a mais adequada para quantificar o período de propagação de fenda por fadiga. Irwin (1958) mostrou que à frente da extremidade da fenda a magnitude de tensão podia ser expressa em termos do fator de intensidade de tensão,  $K$ , fator esse que determina a velocidade de propagação de fenda, iniciando assim a abordagem da MFLE. Este fator quantifica a



concentração de tensões existentes pela existência da fenda num corpo elástico e é dado pela seguinte expressão:

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

onde  $\sigma$  é o valor da tensão remota aplicada,  $a$  é o comprimento de fenda e  $Y$  é um parâmetro que considera o efeito da geometria.

Como referido anteriormente foram estes conceitos que permitiram relacionar a velocidade de propagação de fenda com a gama do fator de intensidade de tensão  $\Delta K$ , onde:

$$\Delta K = K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n}, \quad (2.2)$$

sendo que  $K_{m\acute{a}x}$  e  $K_{m\acute{i}n}$  são os valores máximos e mínimos do  $K$ , respetivamente, obtidos durante um ciclo de carga.

A análise dos diagramas  $da/dN$ - $\Delta K$  do material são essenciais no estudo da propagação de fendas por fadiga, sendo que estes relacionam a velocidade de propagação da fenda,  $da/dN$ , com a gama do fator de intensidade de tensão,  $\Delta K$ . Na Figura 2.2 pode-se visualizar um exemplo de uma curva típica  $da/dN$ - $\Delta K$  e identificar três zonas de comportamentos distintos, designados por regimes de propagação I, II e III.

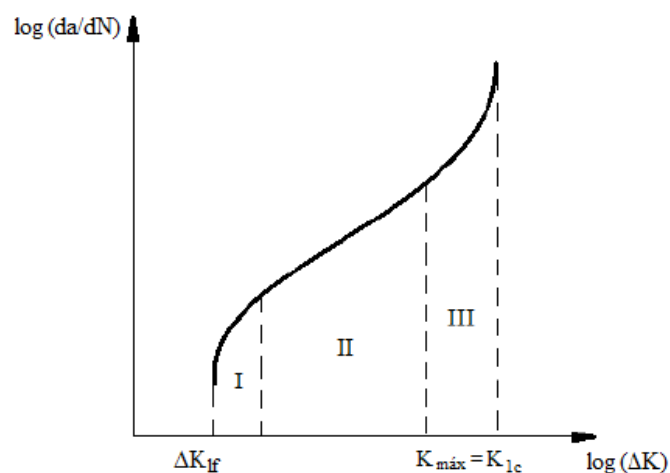


Figura 2.2. Curva típica  $da/dN$ - $\Delta K$ .

No regime I, a fenda apresenta um crescimento muito lento e apresenta como fatores de maior influência a microestrutura, a tensão média e o meio ambiente.

No regime II, facilmente se verifica que a velocidade de propagação da fenda apresenta uma relação aproximadamente linear com o fator de intensidade de tensão em

escalas logarítmicas. Neste regime pode existir uma grande influência do ambiente, da tensão média e da frequência, sendo que a microestrutura e a espessura são menos relevantes. Para descrever a relação referida é aplicável a lei de Paris (1963):

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

onde  $C$  e  $m$  são constantes do material. Esta lei é limitada ao regime II, podendo apresentar erros significativos quando aplicada fora dos seus limites, no entanto tem sido utilizada em diversos estudos devido à sua simplicidade.

No regime III o fator de intensidade de tensão aproxima-se do seu valor crítico provocando uma aceleração da fenda até à fratura ou propagação instável. A microestrutura, a tensão média e a espessura são os fatores mais relevantes. Quando  $K_{\text{máx}}$  atinge um valor crítico ocorre a rotura do material. Esse valor crítico,  $K_c$  é designado como tenacidade à fratura e é uma característica do material.

Como referido anteriormente a tensão média desempenha um efeito significativo na propagação de fenda, sendo normalmente quantificada pela razão entre as tensões mínima e máxima do ciclo de carga:

$$R = \frac{\sigma_{\text{mín}}}{\sigma_{\text{máx}}}, \quad (2.4)$$

O aumento da razão de tensão provoca geralmente um aumento da velocidade de propagação da fenda.

## 2.2. Fenómeno do fecho de fenda

O conceito de fecho de fenda foi introduzido por Elber (1971). O fenómeno do fecho de fenda consiste no contacto entre as faces de fenda num determinado ciclo de carregamento. Inúmeros estudos têm examinado a influência do fecho de fenda no comportamento à fadiga dos materiais. Numa situação ideal, abordada pela Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE), uma fenda sujeita a uma carga de tração fecha quando a carga é nula, porém uma fenda de fadiga pode fechar para cargas positivas.

Segundo Elber só existe propagação da fenda durante a porção do ciclo de carga em que a fenda se apresenta totalmente aberta: quando a fenda está fechada pode existir transmissão de tensões de compressão entre as faces, deixando a extremidade da fenda de

ser um ponto de concentração de tensões. Assim sendo, foi definida uma força motora de propagação de fenda de fadiga,  $\Delta K_{ef}$ , designada por:

$$\Delta K_{ef} = K_{m\acute{a}x} - K_{ab}, \quad (2.5)$$

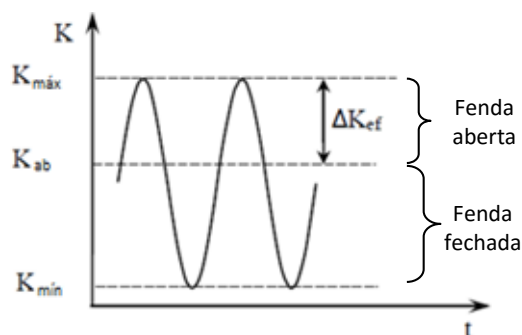
sendo  $K_{ab}$  o fator de intensidade de tensão em que a fenda se encontra totalmente aberta. Para relacionar os parâmetros  $\Delta K_{ef}$  e  $\Delta K$  pode-se usar a seguinte expressão:

$$\Delta K_{ef} = U \times \Delta K, \quad (2.6)$$

onde  $U$  é o parâmetro normalizado da razão de carga, representante da porção do ciclo de carga durante a qual a fenda está aberta e definido por:

$$U = \frac{\Delta K_{ef}}{\Delta K} = \frac{K_{m\acute{a}x} - K_{ab}}{K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n}}, \quad (2.7)$$

Na Figura 2.3 estão representados os parâmetros de carregamento cíclico e o parâmetro  $\Delta K_{ef}$ , sendo que a propagação de fenda por fadiga apenas é influenciada pelas cargas superiores à de abertura.



**Figura 2.3.** Representação dos parâmetros de carregamento cíclico.

O trabalho desenvolvido por Elber impulsionou o estudo da influência do fecho de fenda no comportamento à fadiga dos materiais, propondo um mecanismo baseado na zona plástica residual criada junto à extremidade da fenda, resultante desta ter estado sujeita anteriormente a deformação plástica. Concluiu-se assim que a velocidade de propagação não é apenas influenciada pelas condições à frente da extremidade da fenda, mas também pela natureza do contacto entre as faces da fenda que ocorre atrás da sua extremidade (Borrego, 2001). Estudos posteriores mostraram que o fenómeno de fecho de fenda apresenta diversos mecanismos de fecho que influenciam a velocidade de propagação, como o fecho de fenda

induzido por plasticidade (PICC) (Ritchie *et al.*, 1980); fecho de fenda induzido por óxidos (Suresh *et al.*, 1981); fecho de fenda induzido por rugosidade (Suresh *et al.*, 1982); fecho de fenda induzido por fluido viscoso (Tzou *et al.*, 1985); fecho de fenda induzido por transformação de fase (Pineau e Pelloux, 1974); e fecho de fenda induzido por grafite (Takeshio *et al.*, 1987).

### 2.3. Solicitações de amplitude variável

O efeito de subcargas na propagação de fendas por fadiga é o principal objetivo desta dissertação, no entanto pretende-se estudar este fenómeno para outras solicitações de amplitude variável bastante usuais na prática. Dentro das solicitações de amplitude variável mais simples consideram-se normalmente três tipos distintos: sobrecargas, subcargas e blocos de carga. Neste trabalho serão utilizadas sobrecargas e subcargas, solicitações referenciadas com maior pormenor nos subcapítulos seguintes.

Quanto a solicitações de amplitude constante pode afirmar-se que o aumento do comprimento de fenda é apenas dependente do valor máximo e mínimo da tensão aplicada. Em amplitude variável o crescimento de fenda por fadiga não se apresenta assim tão regular, sendo que as amplitudes e os valores médios das tensões precedentes apresentam um grande peso, efeito esse designado por “histórico de carga”.

#### 2.3.1. Subcargas

As subcargas são solicitações pontuais que apresentam valores inferiores aos valores mínimos do ciclo de carga em questão. Muitos componentes de engenharia estão sujeitos a espetros de carga que contêm subcargas de tração ou de compressão, nomeadamente helicópteros e turbinas de gás (Zitounis, 2007). Os espetros de carga destas estruturas contêm um grande número de ciclos de pequena amplitude com  $R = 0.8$  e  $0.9$ , intercaladas com ciclos de muito maior amplitude com  $R$  aproximadamente zero. Observa-se que até mesmo subcargas de tração provocam a aceleração da propagação, reduzindo a vida à fadiga (Fleck, 1985; Yu, 1987; Romeiro, 2005; Silva, 2007; Dabayeh, 1996; Iranpour, 2012). Zaiken e Ritchie (1985) descobriram que a aplicação de fortes sobrecargas de compressão provocam a imediata reiniciação do crescimento de fendas solicitadas abaixo do limiar de fadiga. Contudo, o contributo para o crescimento da fenda a partir das subcargas, especialmente de compressão, é habitualmente ignorado nos projetos (Macha, 1980;

Iranpour, 2012). De facto, parece razoável acreditar que nenhum contributo do crescimento das fendas é desenvolvido durante um percurso de compressão, pelo que se tornou uma prática comum excluir o efeito das cargas negativas. Isto pode ser perigoso, porque ignorar cargas de compressão leva-nos a previsões não conservadoras (Carlson, 1994). Além disso, existem poucas investigações focadas no efeito das subcargas e especialmente no efeito de subcargas de compressão (Iranpour, 2012).

O fecho de fenda (Zaiken, 1985; Topper, 1994; Zitounis, 2007), o endurecimento do material à frente da extremidade da fenda e a influência da tensão média são os mecanismos sugeridos como sendo responsáveis pelo crescimento acelerado da fenda depois de uma subcarga. Topper and Yu (1994) sugeriram que as subcargas de compressão provocavam uma diminuição no fecho de fenda e assim aumentam a gama de tensão efetiva dos ciclos de amplitude constante aplicados a baixos valores de  $R$ . O programa FASTRAN teve imenso sucesso na previsão dos efeitos de propagação de fenda em espetros de carregamento contendo subcargas (Zitounis, 2004), o que indica que o fecho de fenda é provavelmente o mecanismo principal que explica a influência de subcargas em  $da/dN$ . Zitounis and Irving (2007) propuseram um fator de aceleração, relacionando  $da/dN$  experimental obtido com subcargas com a taxa de crescimento da fenda, calculada por uma soma linear dos valores de  $da/dN$  obtidos considerando os valores de  $da/dN$  em amplitude constante aplicados às subcargas periódicas.

Através da análise de elementos finitos também foi prevista uma diminuição do fecho de fenda após aplicação de uma subcarga (Zhang, 1992; Zheng, 2014). Ranganathan (1995), Makabe *et al.* (2004) e Zitounis and Irving (2007) sugeriram que a aceleração observada após uma subcarga resulta de uma proporção crescente de uma fratura plana que ocorre ao ar. Quando tal sucede, reduzem-se os níveis de fecho que conduzem a um crescimento acelerado comparado com o caso de amplitude constante, onde a referida fratura plana não acontece. Zitounis and Irving (2007) sugeriram que o fecho de fenda induzido por plasticidade é também responsável por pequenas acelerações (30%).

Yu and Ritchie (1987), Herman *et al.* (1989) and Henkener *et al.* (1990) atribuíram também o baixo nível de fecho após as subcargas ao esmagamento das rugosidades atrás da extremidade da fenda. Zaiken and Ritchie (1985) observaram detritos de óxido compactados atrás da extremidade da fenda, e o achatamento das rugosidades nas superfícies, atrás da extremidade da fenda, que levam a uma redução no fecho induzido por

óxidos e por rugosidades, respetivamente. Estes mecanismos foram abundantes em estruturas não envelhecidas onde as rugosidades tiveram maior expressão devida à natureza facetada da fenda (Zaiken, 1985). As características da superfície de fratura, nomeadamente a dureza das rugosidades são também importantes (Carlson, 1994). Um efeito de saturação foi proposto por Kemper *et al.* (1989), em que aumentos da carga compressiva para além de um certo nível, não resultam em aumentos adicionais na taxa de crescimento das fendas. Efeitos de endurecimento do material podem contribuir para o comportamento de saturação (Carlson, 1994; Kardomateas, 1995). Contudo, Iranpour and Taheri (2012) obtiveram uma menor rugosidade superficial com ciclos em tensão, em comparação com ciclos de carga de compressão. Concluíram que o aumento na taxa de crescimento das fendas, devido à introdução de forças compressivas, não acontece por causa da diminuição de fecho induzido por rugosidade. Por outro lado, Silva (2007) and Yang (1994), não relataram quase nenhum efeito com a aplicação de uma subcarga. Tal como Skorupa (1998) resumiu, o efeito de uma subcarga pode variar dependendo dos materiais e dos parâmetros de carga.

Diferentes autores estudaram subcargas periódicas (Tvergaard, 2006; White, 2008). Estas também ocasionam uma taxa de crescimento de fenda maior do que a soma linear das taxas em amplitude constante (Fleck, 1985; Russ, 2005; Topper, 1985). Pompetzki *et al.* (1990) aplicaram subcargas intermitentes compressivas a uma liga de alumínio 2024-T351 e a um aço SAE 1045. A redução da tensão de abertura foi atribuída a uma redução na altura da onda plástica residual devido ao esmagamento plástico resultante da compressão. Número de ciclos decrescentes entre as subcargas aumentaram o seu efeito. Doré e Maddox (2013) estudaram a liga de alumínio 6082-T651 submetida a subcargas periódicas ( $R=0.14$ ) após 10 ciclos de base ( $R=0.57$ ). A vida à fadiga era mais curta do que a obtida sob amplitude constante, tipicamente por um fator de 1.7. Fleck (1985) mostrou que subcargas periódicas (um ciclo de subcarga para 10 ciclos menores) provocaram taxas de propagação de fendas tipicamente 1.8 vezes mais rápidas do que as esperadas para amplitude constante. A aplicação de uma subcarga após uma sobrecarga é um outro tópico de interesse na literatura (Bacila, 2007). Ocorre aguçamento da fenda com a aplicação da subcarga, o que reduz a carga de abertura (Aguilar Espinosa, 2013).

O número de estudos numéricos dedicados ao efeito das subcargas é porém relativamente pequeno, pelo que os métodos numéricos podem ser utilizados para se

perceberem os mecanismos básicos. Assim sendo, este trabalho vai focar-se, principalmente, no efeito de subcargas.

### 2.3.2. Sobrecargas

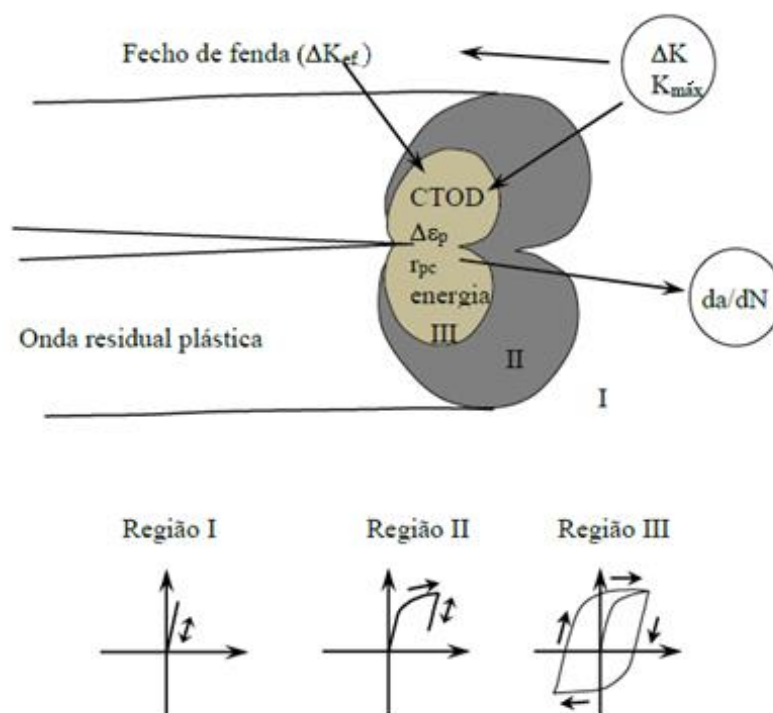
As sobrecargas são as solicitações mais estudadas, pelo facto de serem muito usuais nos espectros de carga reais. As sobrecargas podem ainda ser utilizadas para aumentar a vida à fadiga dos componentes, no entanto neste trabalho este tipo de solicitações é apenas abordado em conjunto com subcargas de modo a perceber o seu efeito em espectros com ambas as solicitações. Este tipo de estudos permite uma aproximação à compreensão de espectros de carga reais.

Após aplicação de uma sobrecarga existe um retardamento do crescimento da fenda. Foram identificados diversos mecanismos para explicar esse efeito, nomeadamente: tensões residuais (Shijve, 1962); fecho de fenda (Elber, 1971); arredondamento da extremidade da fenda (Christensen, 1959); endurecimento do material à frente da extremidade da fenda (Jones, 1973); e a frente de fenda irregular (Suresh, 1983).

O arredondamento da extremidade da fenda devido a um ciclo com sobrecarga pode levar ao retardamento do crescimento da fenda (Rice, 1967). O mecanismo que explica o retardamento na extremidade da fenda afirma que a extremidade 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 logo após a solicitação de uma sobrecarga, por vezes contribui para a diminuição das tensões residuais devido à maximização do efeito do arredondamento. Foi então proposto 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).

## 2.4. Parâmetros de extremidade de fenda

O estudo e a compreensão dos parâmetros de extremidade de fenda é relevante para a explicação das variações existentes na propagação de uma fenda por fadiga. À frente da extremidade da fenda podem ser identificadas três zonas distintas (Paul, 2013): zona elástica, zona intermédia e zona plástica cíclica, representadas respetivamente na Figura 2.4 por região I, II e III.



**Figura 2.4.** Esquema das zonas da extremidade da fenda e respetivos gráficos tensão-deformação (Sousa, 2014).

Na zona elástica, região mais afastada da extremidade da fenda, o material apresenta um tipo de deformação puramente elástica, isto é, o material recupera a sua forma original quando a carga aplicada é retirada. Na zona intermédia, região denominada por zona plástica monótona, o material sofre uma deformação plástica devida à carga máxima. Na zona plástica cíclica, região mais próxima da extremidade da fenda, ocorre um ciclo de histerese, cuja variação depende da razão de tensões e do valor de  $\Delta K$ . A deformação plástica existente no ciclo de histerese provocada pela descarga até ser atingida a carga mínima designa-se por deformação inversa.

Pokluda (2013) assegurou que a força motora para a propagação de fenda está diretamente relacionada com a gama de deformação plástica cíclica. Chen *et al.* (2011) estudou o efeito de furos circulares posicionados perto da extremidade de fenda e afirmou que a redução da gama de deformação plástica faz aumentar o tempo de vida à fadiga do componente.

Um dos parâmetros muito importantes e que tem vindo a ser alvo de estudo é o tamanho da zona plástica inversa. Sendo essa zona grande existirá uma quantidade significativa de energia dissipada. Zhang *et al.* (2005) apresentou uma relação entre o



crescimento de fendas por fadiga e o tamanho da zona plástica inversa. Estes autores ainda propuseram uma expressão para o tamanho da zona inversa, dependente de  $K_{\text{máx}}$  e  $\sigma_{\text{máxcomp}}$ . Zhang *et al.* (2010) encontraram uma forte correlação entre  $da/dN$  e o tamanho da zona plástica inversa para a liga de alumínio 2024-T351.

O arredondamento da extremidade da fenda (*Blunting*) foi uma das primeiras explicações para o retardamento devido a uma sobrecarga como já foi referido no subcapítulo anterior. Tvergaard (2004) e Toribio e Kharin (2013) modelaram numericamente a propagação de fendas por fadiga baseando-se no modelo clássico que afirma que a propagação ocorre devido ao arredondamento e ao aguçamento da fenda. Recorrendo a este conceito foram realizados estudos para prever  $da/dN$  (Pommier e Risbet, 2005). Atualmente considera-se que o arredondamento da extremidade da fenda elimina totalmente ou parcialmente o contacto entre as faces da fenda, contribuindo assim para o período de aceleração inicial, ao contrário do que se previa inicialmente (retardamento da fenda). (Ward-Close *et al.*, 1989; Shin e Hsu, 1993; Ng' Ang'a e James, 1996; Bichler e Pippan, 1999)

### 3. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

#### 3.1. Programa de elementos finitos DD3IMP

Sendo o objetivo desta dissertação o estudo do fenómeno de fecho de fenda através de simulações numéricas, é necessário recorrer a um *software* específico para o efeito. As simulações numéricas foram então realizadas num programa de elementos finitos desenvolvido pelo Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, o *Three-Dimensional Elasto-plastic Finite Element Program* (DD3IMP). O programa em questão apresenta um código numérico bastante complexo, sendo que se baseia num esquema de integração temporal implícito. O DD3IMP foi especialmente edificado para a simulação numérica de processos de conformação de metais.

Para a obtenção dos resultados pretendidos, através do *software*, é necessário fornecer-lhe a informação sobre os parâmetros numéricos e físicos. As informações são fornecidas através de diversos ficheiros, designados por ficheiros de entrada. Após definidos os ficheiros de entrada executa-se o programa, que realizará 160 propagações da fenda e 320 ciclos de carga. Concluída a execução, processo significativamente lento, são obtidos os dados de saída em diversos ficheiros, sendo esses representados por ficheiros de saída. Na Tabela 3.1 estão identificados os ficheiros de entrada e de saída e as respetivas caracterizações.

Depois de obtidos os dados de saída, referidos na Tabela 3.1, estes são tratados para obter os vários valores numéricos da abertura de fenda, as forças de contacto, o perfil de fenda e estudar a extremidade da fenda.

**Tabela 3.1.** Caracterização dos ficheiros de entrada e saída.

	<b>Nome do ficheiro</b>	<b>Caracterização</b>
<b>Ficheiros de entrada</b>	Mesh.dat	Malha de elementos finitos
	Mater1.dat	Propriedades do material
	Phase.dat	Condições de carregamento
	GaussPoints.dat	Elementos e pontos de Gauss onde se pretende obter a curva tensão-deformação
	Bcon.dat	Condições de fronteira
	Input.dat	Parâmetros de controlo do método numérico
	Tool.dat	Ferramenta que garante aplicação da carga e permite simular o contacto das faces da fenda
<b>Ficheiros de saída</b>	#1_entil1.res	Resultados das forças aplicadas para cada incremento da fenda
	Bloco160.ufo	Informação global no bloco 160
	Fcont.dd3	Forças de contato à carga mínima
	Nosfenda2.dat	Coordenadas dos nós ao longo do plano de simetria para os diferentes níveis de carga
	GPoint	Valores nos pontos de Gauss seleccionados no ficheiro de entrada em cada um dos elementos antes de correr o programa

As forças de contacto são dadas pelo ficheiro “Fcont.dd3” à carga mínima para um determinado bloco de carga e o perfil de fenda é obtido através do ficheiro “Nosfenda2.dat”, sendo este um ficheiro que apresenta as coordenadas em todos os nós do flanco da fenda para os diferentes níveis de carga.

### 3.2. Parâmetro para quantificação da abertura de fenda

Para quantificar o nível da abertura de fenda foram utilizados três parâmetros numéricos, o  $PICC_{node1}$ , o  $PICC_{contact}$  e o  $PICC_{compliance}$ , sendo que este último apresentou resultados insatisfatórios para os casos estudados. Assim sendo, neste trabalho, os resultados têm como base os parâmetros  $PICC_{node1}$  e o  $PICC_{contact}$ .

O  $PICC_{node1}$  avalia o contacto do primeiro nó atrás da extremidade da fenda. O aumento discreto da carga que é exercida numericamente poderá trazer imprecisões; para os evitar, a carga de abertura é determinada a partir da extrapolação linear das cargas aplicadas dois incrementos após abertura da fenda. Os ficheiros necessários para obter os valores da abertura de fenda através deste parâmetro são o “Nosfenda2.dat” e o “#1\_entil1.res”.

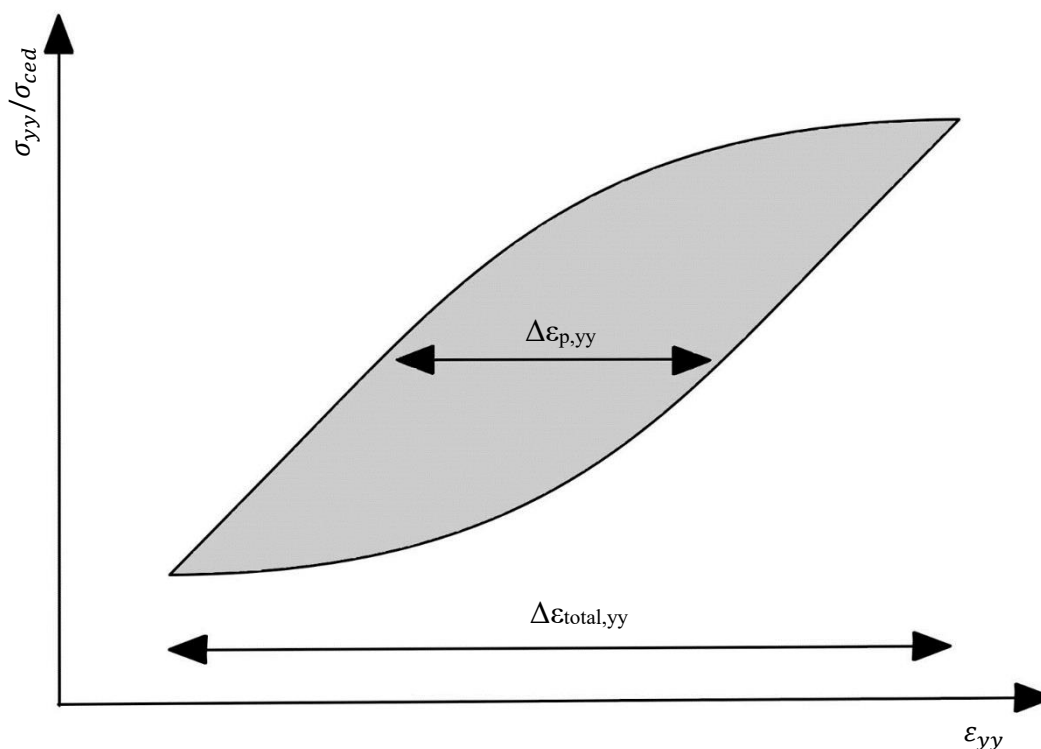
O  $PICC_{contact}$  recorre às forças de contacto à carga mínima para determinar o fator de intensidade de tensão para abrir a fenda. Este é obtido através do somatório das cargas remotas que anulam cada uma das forças de contacto à carga mínima (Antunes, 2014). Este método tem como vantagem a inclusão de todos os nós em contacto atrás da extremidade de fenda. Para quantificar a abertura de fenda recorre aos ficheiros “Fcont.dd3” e ao “#1\_entil1.res”.

O  $PICC_{compliance}$  analisa os dados de compliance medidos no centro da amostra. Recorrendo aos registos carga-deslocamento ( $F-\delta$ ) determina-se a carga de abertura de fenda utilizando a técnica de maximização do coeficiente de correlação. Este parâmetro utiliza a parte superior dos dados  $F-\delta$ , a que se ajusta uma reta por regressão. O seguinte par de dados é acrescentado e o coeficiente de correlação é recalculado. O procedimento referido é executado para todo o conjunto de dados e o  $F_{ab}$  é definido pelo ponto em que o coeficiente de correlação atinge o valor máximo (Borrego, 2003).

### 3.3. Parâmetros de extremidade de fenda

Neste estudo foram apenas considerados dois parâmetros de extremidade de fenda, sendo esses, a gama de deformação plástica e a energia dissipada por ciclo. Esses parâmetros foram estudados em 9 pontos de Gauss para estado plano de tensão e em 13 pontos para estado plano de deformação, pontos esses situados após aplicação da subcarga.

Para a determinação da gama de deformação plástica ( $\Delta\varepsilon_{p,yy}$ ) foi calculada a distância entre as retas correspondentes à deformação elástica, tal como se representa na Figura 3.1. A energia dissipada é a área do ciclo de histerese.



**Figura 3.1.** Medição do intervalo de deformação plástica e da energia dissipada por ciclo.

### 3.4. Geometria e Material

Para a realização do estudo foi utilizado um provete com fenda central do tipo M(T), sendo que a sua geometria 3D respeita a norma ASTM E647 (2011). As suas dimensões estão representadas na Figura 3.2, podendo notar-se uma espessura de 0.2 mm e um comprimento de fenda inicial  $a_0 = 5$  mm. A seleção deste provete deve-se ao facto de se pretender dar continuidade a estudos anteriores (Chermahini *et al.*, 1993; Dougherty *et al.*, 1997; Borrego, 2001; Roychowdury *et al.*, 2003; Jiang *et al.*, 2005; Alizadeh *et al.*, 2006) e por este ser normalizado.

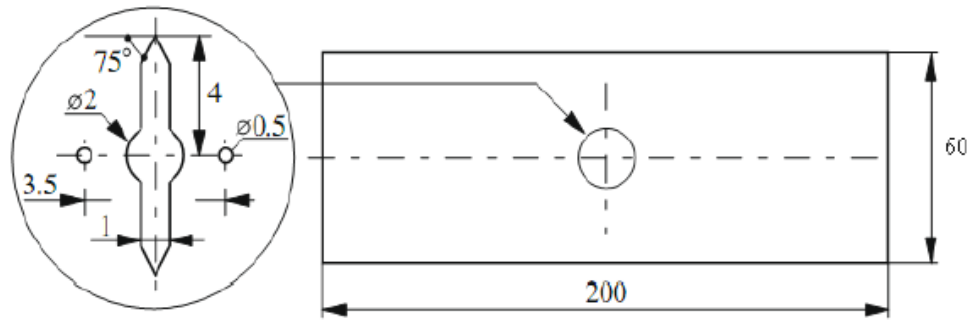


Figura 3.2. Geometria do provete e detalhe da fenda.

Quanto ao material, foi considerada uma liga de alumínio 6016, que é uma liga termicamente tratável, podendo ser endurecida por meio de tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento. O tratamento da liga em questão é o T4, que leva a uma tensão de cedência de 124 MPa. Segundo as respectivas normas, a liga apresenta as seguintes designações: AA-6016 pela norma *Aluminium Association*; EN AW-6016 ou 6016-T4 segundo a norma europeia EN 573 do Comité Europeu para a Normalização; ou AlMgSi devido às elevadas percentagens de magnésio e silício.

Como já foi referido anteriormente, a deformação plástica que ocorre na extremidade da fenda por ação do carregamento cíclico apresenta uma forte correlação com o fenómeno de fecho de fenda induzido por deformação plástica. Assim sendo, é essencial modelar corretamente o comportamento elasto-plástico do material. A liga de alumínio em estudo (6016-T4) apresenta características de comportamento elasto-plástico que são uma combinação de encruamento isotrópico e cinemático. Durante a simulação, o comportamento isotrópico do material foi descrito pelo modelo de (Voce, 1948):

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

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

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

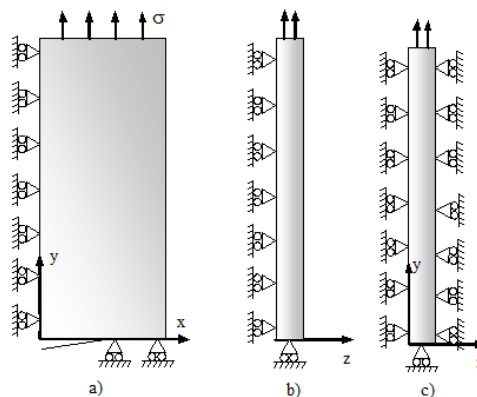
Nas equações (3.1) e (3.2),  $\varepsilon^p$ ,  $Y_0$ ,  $n_v$ ,  $R_{sat}$ ,  $C_x$  e  $X_{sat}$  são constantes características do material. A anisotropia do material foi descrita recorrendo ao critério de (Hill,1948):

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

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

### 3.5. Discretização por elementos finitos

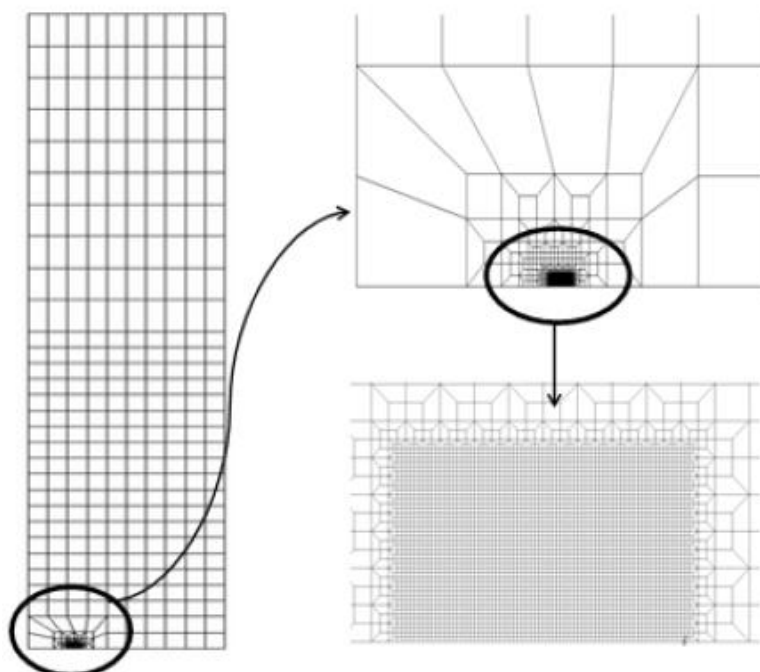
Sendo o provete geometricamente simétrico, como se pode verificar na Figura 3.2, apenas foi considerado 1/8 deste nas simulações, de modo a reduzir o peso numérico associado sem afetar as previsões obtidas. Foram estudados dois estados de tensão, ambos com carregamento em Modo - I: Tensão Plana (TP) e Deformação Plana (DP). As condições de fronteira consideradas e o carregamento imposto estão presentes na Figura 3.3, para os modelos de tensão plana e de deformação plana. Para simular a face oposta da fenda foi colocado um plano rígido paralelo à fenda.



**Figura 3.3.** Condições de fronteira e carregamento. a) vista frontal; b) modelo de tensão plana; c) modelo de deformação plana.

Quanto à malha de elementos finitos utilizada, essa apresenta um maior refinamento na zona da extremidade da fenda. Assim, procura-se garantir uma maior exatidão de valores na zona próxima da extremidade, que é a zona de maior interesse deste estudo. De modo a minorar o peso numérico das simulações e sem alterar significativamente os valores obtidos, a malhagem na zona mais afastada da fenda apresenta um menor refinamento (Figura 3.4). Para se obter a malha 3D foi necessário extrudir a malha 2D na direção da espessura. Considerou-se somente uma camada de elementos em espessura. A malha em questão apresenta elementos quadrados de  $8\ \mu\text{m}$  na zona mais refinada, com 6639 elementos e 13586 nós.

Nas simulações executadas a propagação de fenda ocorria após cada dois ciclos de carga e sempre à carga mínima, para reduzir problemas de convergência. No estado de tensão plana a subcarga foi realizada no segundo ciclo da 60ª propagação ( $a=5.472\text{mm}$ ) e no estado de deformação plana foi no segundo ciclo da 100ª propagação ( $a=5.792\text{mm}$ ), pois os valores de fecho apresentam maior dificuldade em estabilizar em deformação plana. Nas simulações são realizadas 160 propagações de fenda de  $8\ \mu\text{m}$  cada.



**Figura 3.4.** Descrição da malha de elementos finitos.



### 3.6. Condições de Ensaio

Para estudar o efeito de subcargas no fenómeno de fecho de fenda induzido por deformação plástica é fundamental a realização de diversos ensaios. Os casos de estudo considerados apresentam variações nos parâmetros  $K_{m\acute{a}x}$ ,  $K_{m\acute{i}n}$  e  $K_{UL}$ . Estes parâmetros, para provetes do tipo M(T), determinados através da seguinte expressão:

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

sendo  $a_1 = 1.187086$ ,  $a_2 = -0.0680$ ,  $a_3 = 0.113$  e  $a_4 = 1.009325$  constantes obtidas numericamente,  $W$  a largura do provete e  $a$  o comprimento de fenda. Esta expressão foi obtida em estudos não publicados do grupo de investigação.

Na Figura 3.5 está apresentado o tipo de carregamento em estudo nesta dissertação, sendo esse um carregamento cíclico com inclusão de uma subcarga.

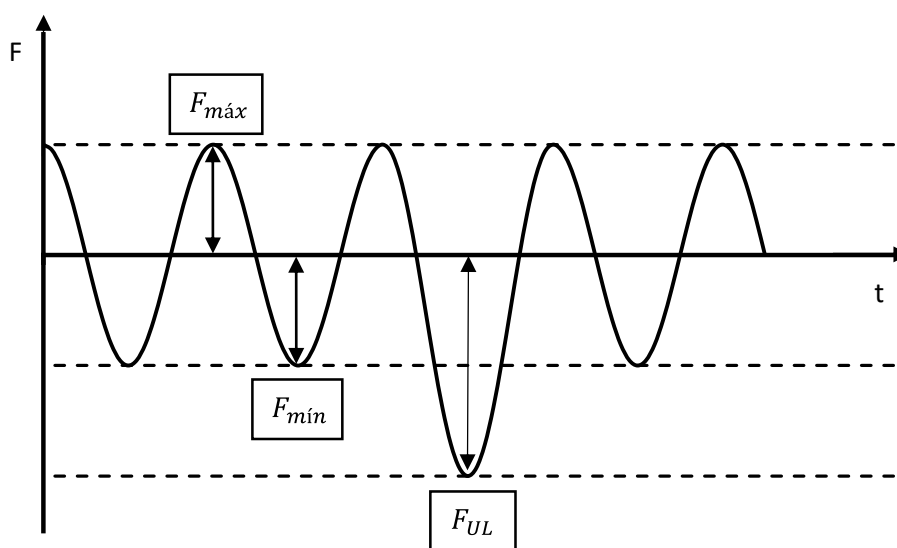


Figura 3.5. Exemplo do carregamento aplicado.

Os ensaios realizados para tensão plana e para deformação plana estão apresentados nas Tabelas 3.2 a 3.5, sendo esses designados como  $UL\_F_{m\acute{i}n}\_F_{m\acute{a}x}\_F_{UL}$ . Para valores de forças negativos apresenta-se um N antes do respetivo valor.

**Tabela 3.2.** Variação de  $F_{máx}$ , sendo  $F_{mín}$  e  $F_{UL}$  constantes.

Designação	$F_{mín}$ [N]	$F_{máx}$ [N]	$F_{UL}$ [N]	$K_{mín}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]	$K_{máx}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]	$K_{UL}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]
UL_0_60_N100	0	60	-100	0	2.67	-4.46
UL_0_80_N100		80			3.57	
UL_0_100_N100		100			4.46	
UL_0_140_N100		140			6.24	
UL_0_180_N100		180			8.02	
UL_0_60_N50	0	60	-50	0	2.68	-2.23
UL_0_80_N50		80			3.57	
UL_0_100_N50		100			4.46	
UL_0_140_N50		140			6.24	
UL_0_180_N50		180			8.02	

**Tabela 3.3.** Variação de  $F_{mín}$  e de  $F_{máx}$ , sendo  $F_{UL}$  constantes.

Designação	$F_{mín}$ [N]	$F_{máx}$ [N]	$F_{UL}$ [N]	$K_{mín}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]	$K_{máx}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]	$K_{UL}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]
UL_16_80_N50	16	80	-50	0.71	3.57	-2.23
UL_20_100_N50	20	100		0.89	4.46	
UL_24_120_N50	24	120		1.07	5.35	
UL_28_140_N50	28	140		1.25	6.24	

**Tabela 3.4.** Variação de  $F_{\min}$ , sendo  $F_{\max}$  e  $F_{UL}$  constantes.

Designação	$F_{\min}$ [N]	$F_{\max}$ [N]	$F_{UL}$ [N]	$K_{\min}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]	$K_{\max}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]	$K_{UL}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]
UL_60_140_N100	60	140	-100	2.67	6.24	-4.46
UL_20_140_N100	20			0.89		
UL_N20_140_N100	-20			-0.89		
UL_N60_140_N100	-60			-2.67		
UL_60_140_N150	60	140	-150	2.67	6.24	-6.67
UL_20_140_N150	20			0.89		
UL_N20_140_N150	-20			-0.89		
UL_N60_140_N150	-60			-2.67		
UL_N100_140_N150	-100			-4.46		

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

Designação	$F_{\min}$ [N]	$F_{\max}$ [N]	$F_{UL}$ [N]	$K_{\min}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]	$K_{\max}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]	$K_{UL}$ [MPa.m <sup>0.5</sup> ]
UL_0_100_N25	0	100	-25	0	4.46	-1.11
UL_0_100_N50			-50			-2.23
UL_0_100_N75			-75			-3.34
UL_0_100_N100			-100			-4.46
UL_0_100_N125			-125			-5.57
UL_N20_140_N60	-20	140	-60	-0.89	6.24	-2.67
UL_N20_140_N100			-100			-4.46
UL_N20_140_N140			-140			-6.24
UL_N20_140_N180			-180			-8.02
UL_N20_140_N220			-220			-9.81

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1. Caso base

Neste subcapítulo estão apresentados os resultados para tensão plana e deformação plana de um ensaio designado como ensaio de referência. Este ensaio, com  $F_{\text{máx}}=140$  N ( $\sigma_{\text{máx}}=46.7$  MPa),  $F_{\text{mín}}=0$  e  $F_{\text{UL}}=-100$  N ( $\sigma_{\text{UL}}=-33.3$  MPa), designado como UL\_0\_140\_N100, foi analisado numa primeira fase para perceber a variação do perfil de fenda, do fecho de fenda e das forças de contacto quando aplicada uma subcarga.

#### i) Perfil de fenda

Na Figura 4.1 está representado o perfil de fenda para tensão plana no momento em que a carga aplicada era de 40N, em amplitude constante e com aplicação de subcarga. No local da subcarga, o perfil de fenda destaca uma pequena deformação, em que existe um ligeiro aumento na distância entre as faces da fenda nesse ponto. No perfil da fenda correspondente à solicitação de amplitude constante (sem aplicação de subcarga), não há qualquer irregularidade. A depressão no perfil da fenda na zona de aplicação da subcarga resulta da ocorrência de deformação plástica inversa.

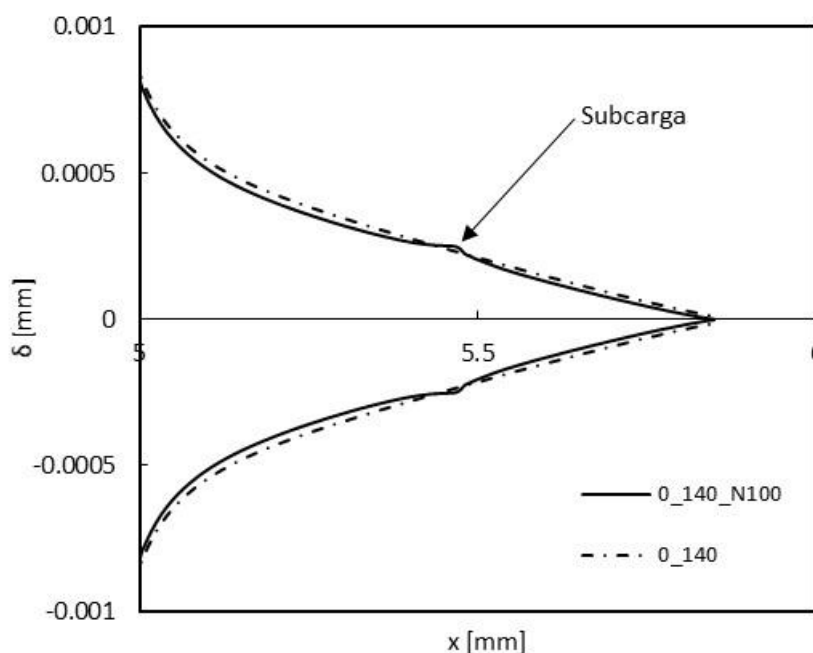
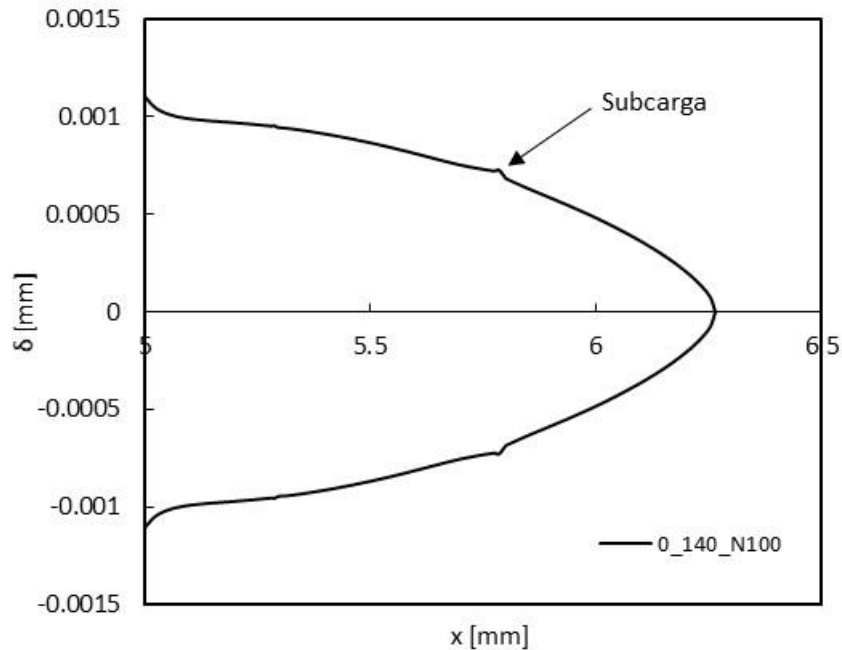


Figura 4.1. Perfil de fenda com e sem subcarga (tensão plana,  $a=6.272$ ,  $F=40$ N).

O perfil de fenda do ensaio de referência para deformação plana, no momento em que a carga aplicada era de 40N, denota uma ligeira deformação na zona da subcarga, além do que os restantes pontos do perfil são idênticos aos do ensaio em amplitude constante. Por esse motivo na Figura 4.2 apenas está ilustrado o ensaio com aplicação de subcarga.



**Figura 4.2.** Perfil de fenda.com subcarga (deformação plana, F=40N).

## ii) Alongamento plástico, $\Delta y_p$

Nas Figuras 4.3 e 4.4 representa-se o alongamento plástico nas faces da fenda. Este alongamento é calculado pela integração da deformação segundo a direção perpendicular ao flanco (Antunes, 2015 (1)):

$$\Delta y_p = \int_0^h \varepsilon_{p,yy} dy \quad (4.1)$$

em que  $\varepsilon_{p,yy}$  é a deformação plástica na direção vertical e h é a altura até onde se faz a integração (que deve abranger toda a zona plástica monótona na direção perpendicular ao flanco da fenda). Em tensão plana não se observa uma alteração significativa, porém em deformação plana há um efeito muito pronunciado que está de acordo com os resultados das Figuras 4.1 e 4.2. O esmagamento na zona da subcarga traduz-se numa diminuição do alongamento plástico aí, em resultado da ocorrência de deformação inversa.

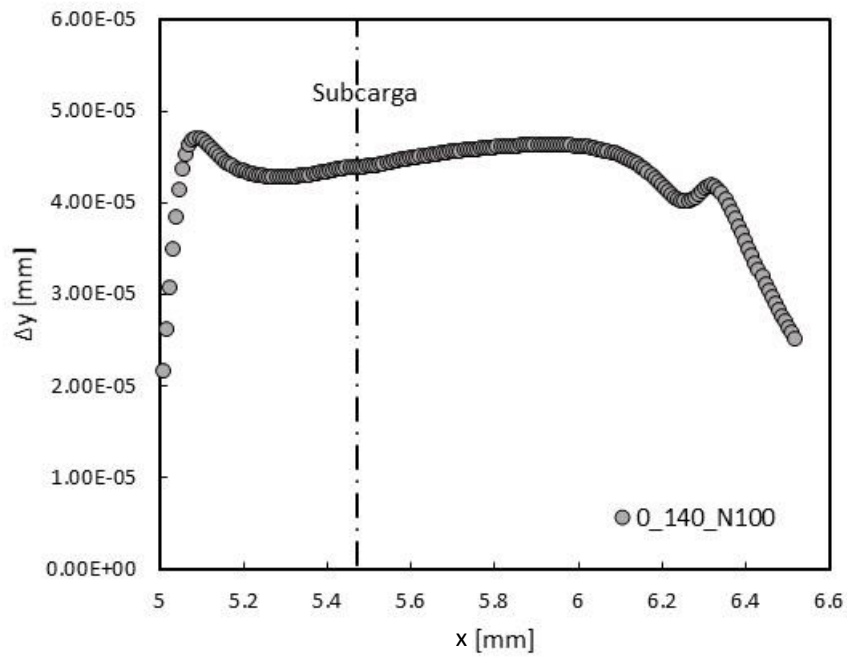


Figura 4.3. Deformação plástica  $\Delta y$  (tensão plana).

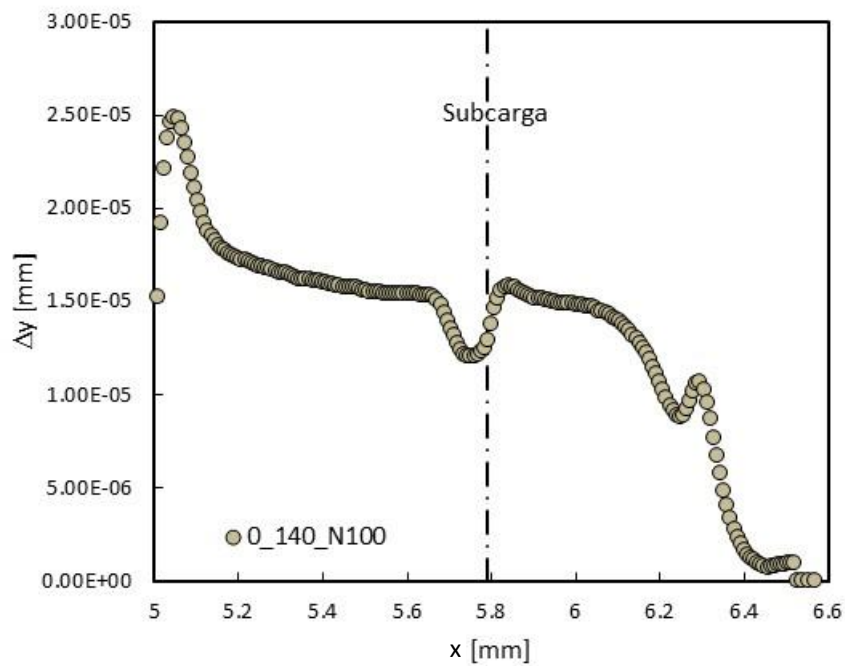


Figura 4.4. Deformação plástica  $\Delta y$  (deformação plana).

### iii) Forças de contacto

Nas Figuras 4.5 e 4.6 são exibidas as forças de contacto em função da coordenada  $x$  do ensaio de referência, para tensão plana e em deformação plana, respetivamente. Nestas figuras a extremidade da fenda está na posição  $x=6.272$  mm. Em ambas as figuras pode reparar-se que, na zona da subcarga, as forças de contacto são praticamente nulas devido ao afastamento das faces da fenda nessa zona. Por outras palavras, a depressão no perfil de fenda observada na Figura 4.1 e na Figura 4.2 concretiza-se numa diminuição das forças de contacto. Notar que o esmagamento associado à força de compressão ocorreu principalmente atrás da extremidade da fenda (na altura de aplicação da subcarga) e, por isso, à frente da extremidade da fenda o efeito é pequeno. O efeito atrás da extremidade da fenda abrange, para o caso representado, cerca de 9 elementos, isto é, aproximadamente  $72 \mu\text{m}$ . Essa tendência está também patente na Figura 4.4.

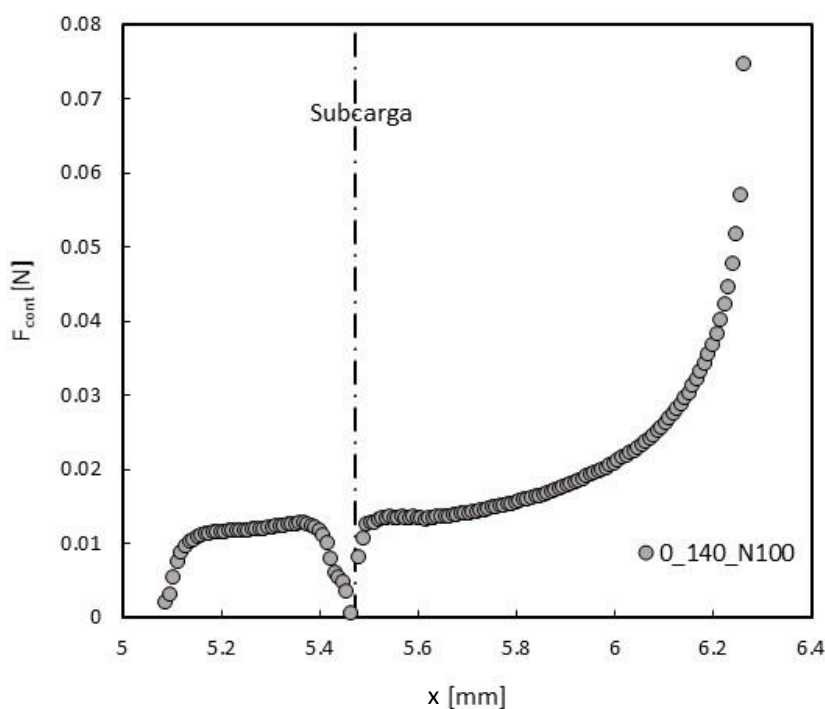


Figura 4.5. Forças de contacto à carga mínima (tensão plana,  $F=0$ ).

Em deformação plana as forças de contacto desaparecem totalmente na zona de aplicação da subcarga. Há um pico de forças de contacto na posição inicial de fenda ( $x=5$  mm), que tem que ver com a grande deformação que ocorre inicialmente, e um pico na posição atual da fenda, que é sempre um ponto de concentração de forças de contacto a carga mínima.

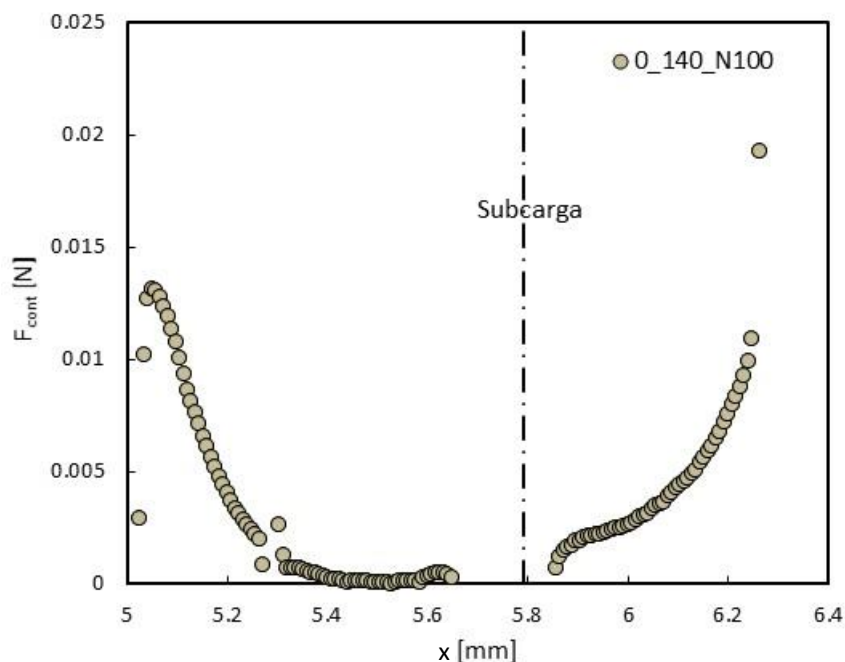


Figura 4.6. Forças de contacto à carga mínima (deformação plana,  $F=0$ ).

#### iv) Fecho de fenda

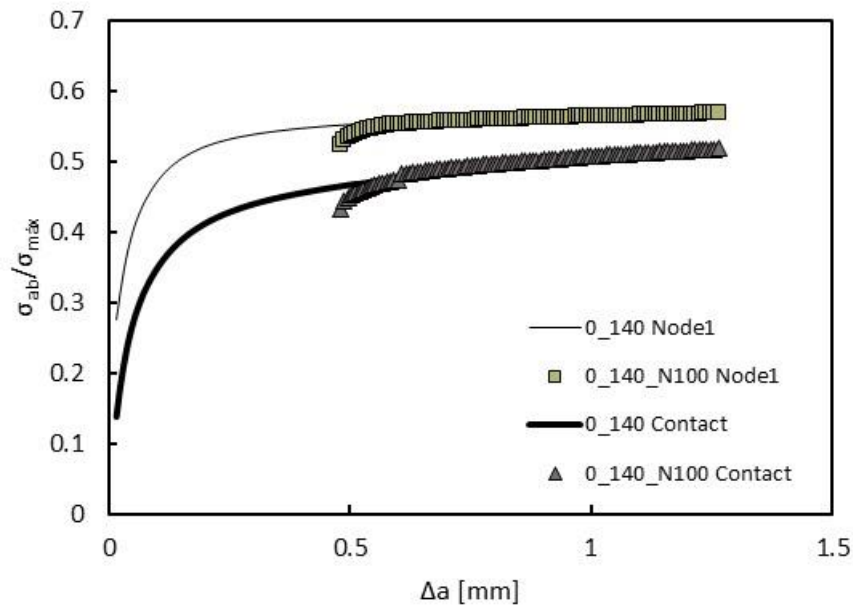
Para quantificar o nível de fecho de fenda foram utilizados dois parâmetros numéricos, o  $PICC_{node1}$ , e o  $PICC_{contact}$ , como já foi referido no capítulo 3. A comparação dos dois parâmetros permite verificar que os valores de fecho são menores para o caso do  $PICC_{contact}$ , tanto na curva correspondente a amplitude constante como na curva da subcarga, devido à natureza do método. Este facto já foi estudado anteriormente e normalmente existe uma razão entre os valores dos dois parâmetros da ordem de 0.9 (Antunes, 2015 (2)).

Na Figura 4.7 mostra-se a variação de fecho de fenda obtida com os dois parâmetros em solicitações de amplitude constante e com aplicação de subcarga para tensão plana. Com aplicação da subcarga dá-se uma diminuição brusca do nível de fecho de fenda e de seguida uma estabilização. A estabilização faz-se muito rapidamente.

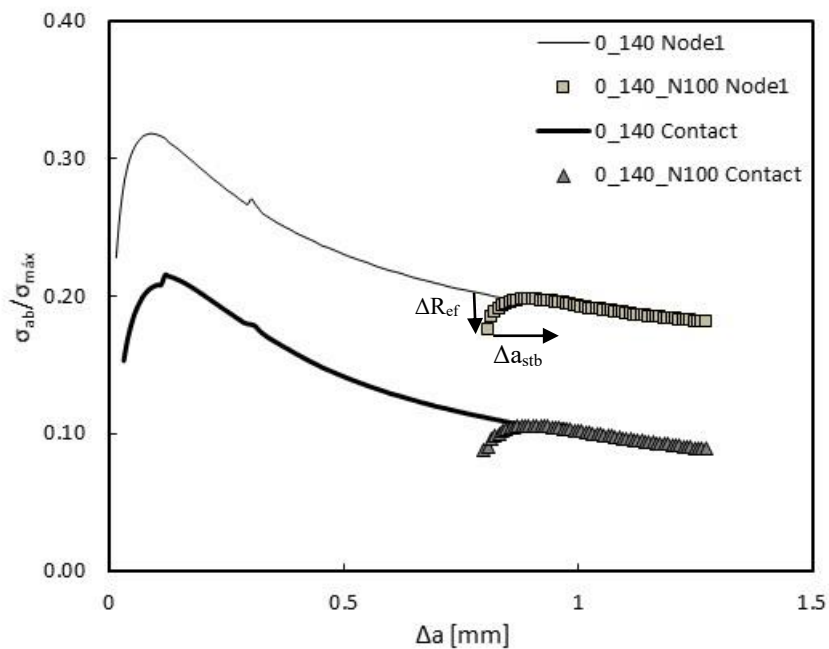
A variação de fecho de fenda obtida em deformação plana apresenta também uma diminuição do nível de fecho de fenda em relação à curva base (amplitude constante) (Figura 4.8). A aproximação às curvas de amplitude constante é também neste caso muito rápida. A diminuição dos níveis de fecho verificada é então definida por  $\Delta R_{ef}$ , valores do decréscimo entre os níveis de fecho antes e após a subcarga.



O caráter efêmero de uma subcarga pode ser considerado positivo, tendo em conta o efeito negativo que esta tem na vida à fadiga.



**Figura 4.7.** Nível de fecho de fenda:  $PICC_{node1}$  e  $PICC_{contact}$  (tensão plana).



**Figura 4.8.** Nível de fecho de fenda:  $PICC_{node1}$  e  $PICC_{contact}$  (deformação plana).

## v) Mecanismos

As variações de carga são extremamente interessantes para estudar os mecanismos subjacentes ao fenómeno de fecho de fenda. No caso das subcargas há um mecanismo principal que explica as variações de fecho após a sua aplicação. Esse mecanismo é a alteração da deformação plástica residual. A aplicação da subcarga provoca uma redução das cunhas plásticas atrás da extremidade da fenda. Isso reduz imediatamente o nível de fecho, pois este é controlado principalmente pelo alongamento plástico imediatamente atrás da extremidade da fenda. Num estudo anterior verificou-se que o efeito de uma cunha plástica decresce exponencialmente com a distância à extremidade da fenda (Antunes, 2015 (1)). A propagação da fenda para além da posição de aplicação da subcarga faz com que a zona afetada se afaste, e por isso os valores de fecho convergem rapidamente para valores correspondentes às amplitudes constantes.

### 4.2. Efeito dos parâmetros de carga

O estudo do efeito dos parâmetros de carga ( $F_{m\acute{a}x}$ ,  $F_{m\acute{m}n}$  e  $F_{UL}$ ) no fecho de fenda é um dos principais objetivos desta dissertação (Figura 3.5). Neste subcapítulo apresentam-se os efeitos destes parâmetros no decréscimo dos valores mínimos de fecho ( $\Delta R_{eff,m\acute{m}n}$ ) e nas distâncias de estabilização ( $\Delta a_{stb}$ ). Após as subcargas os níveis de fecho tendem a convergir para as curvas base, tendência verificada anteriormente, sendo assim importante estudar os diferentes valores de  $\Delta a_{stb}$ . A distância de estabilização ( $\Delta a_{stb}$ ) é a distância de propagação necessária para que uma fenda estabilize e o critério utilizado para a sua determinação foi o seguinte: atinge-se a estabilização quando a variação de dois valores consecutivos de fecho atinge 0,1% do valor de fecho da curva base.

Para uma melhor compreensão da influência de cada parâmetro serão também apresentados alguns perfis de fenda e os seus níveis de fecho.

#### 4.2.1. Efeito do $F_{m\acute{a}x}$

Para estudar o efeito do  $F_{m\acute{a}x}$  foram realizadas diversas simulações onde se fizeram variar os seus valores, mantendo constantes o  $F_{m\acute{m}n}$  e o  $F_{UL}$ .

### i) Perfil de fenda

Na Figura 4.9 encontram-se três perfis de fenda onde é manifesto que com o aumento de  $F_{\text{máx}}$  existe uma diminuição significativa na distância das faces da fenda. A deformação originada pela subcarga apresenta-se mais notória para maiores valores de  $F_{\text{máx}}$ .

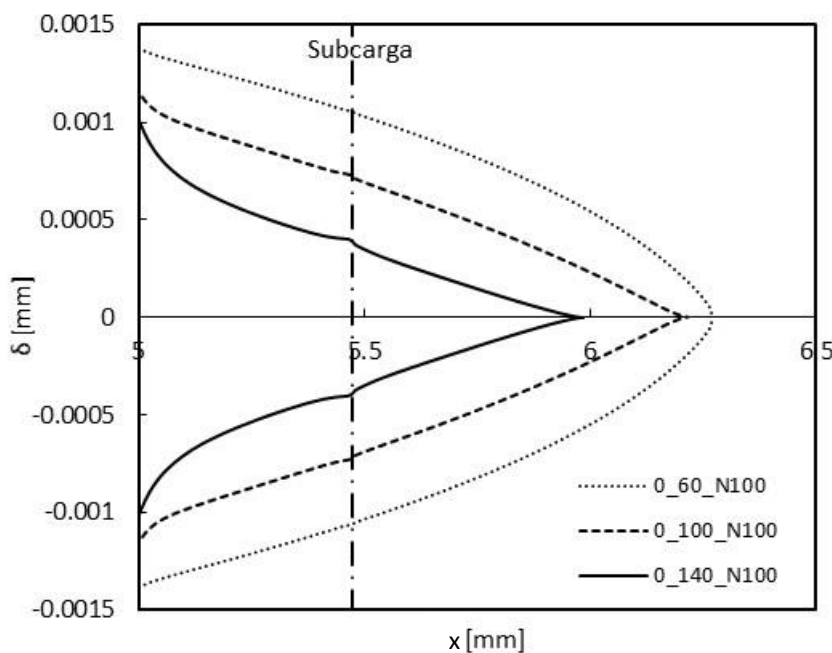


Figura 4.9. Efeito de  $F_{\text{máx}}$  no perfil de fenda (tensão plana,  $a=6.272$  mm;  $F=40$ N).

### ii) Fecho de Fenda

A Figura 4.10 apresenta os níveis de fecho de fenda com e sem subcargas, na qual se vê que os níveis de fecho aumentam com o aumento de  $F_{\text{máx}}$ . Estes resultados estão de acordo com os perfis observados na Figura 4.9. De facto, uma maior aproximação das faces da fenda significa maior alongamento plástico residual e assim maior fecho. Analisando a Figura 4.10 mais pormenorizadamente e com o auxílio da Figura 4.11, conclui-se que com o aumento de  $F_{\text{máx}}$  existe um aumento de  $\Delta R_{\text{eff,mín}}$ .

Quanto às distâncias de estabilização ( $\Delta a_{\text{stb}}$ ), à medida que se aumenta o  $F_{\text{máx}}$  maiores serão os seus valores. Na Figura 4.12 são exibidos os valores de  $\Delta a_{\text{stb}}$  para valores de  $F_{\text{UL}} = -100$  e  $-50$  N e com as respetivas variações de  $F_{\text{máx}}$ .

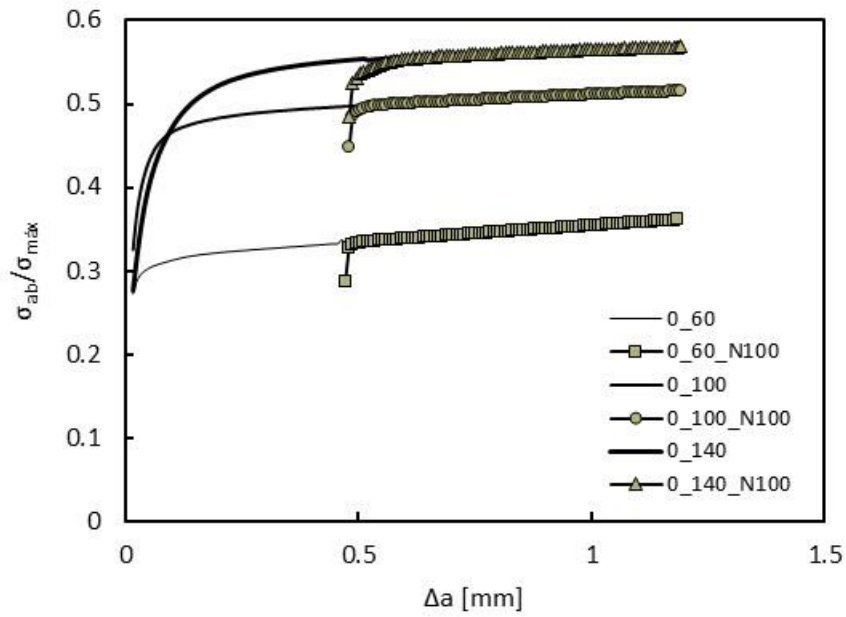


Figura 4.10. Efeito de  $F_{m\acute{a}x}$  no nível de fecho de fenda (tensão plana,  $PICC_{node1}$ ).

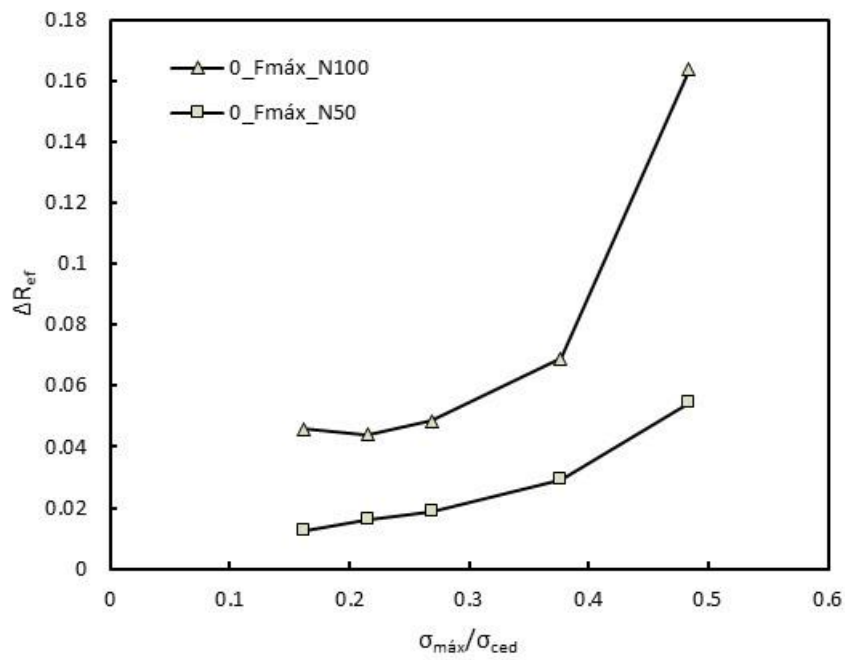


Figura 4.11. Efeito de  $F_{m\acute{a}x}$  no  $\Delta R_{ref}$  (tensão plana).

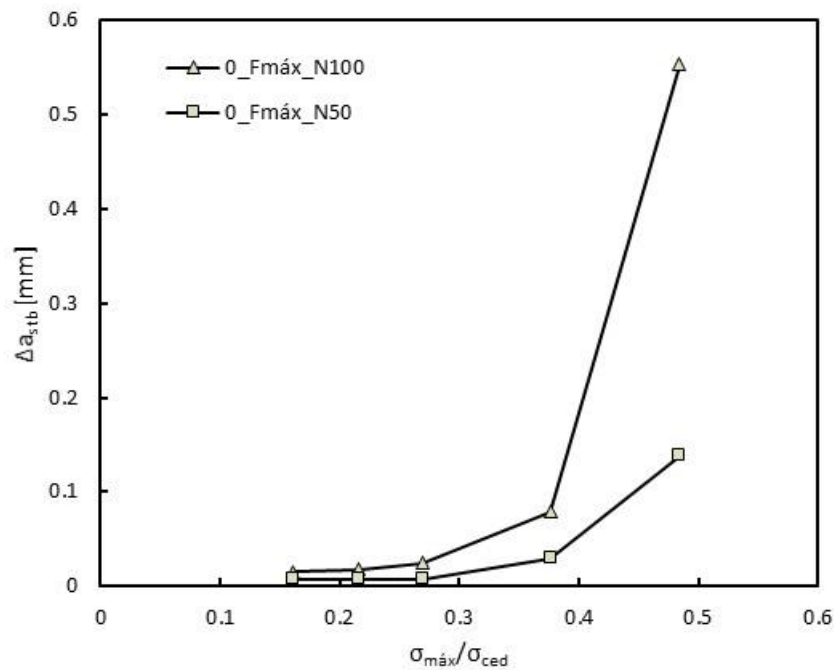


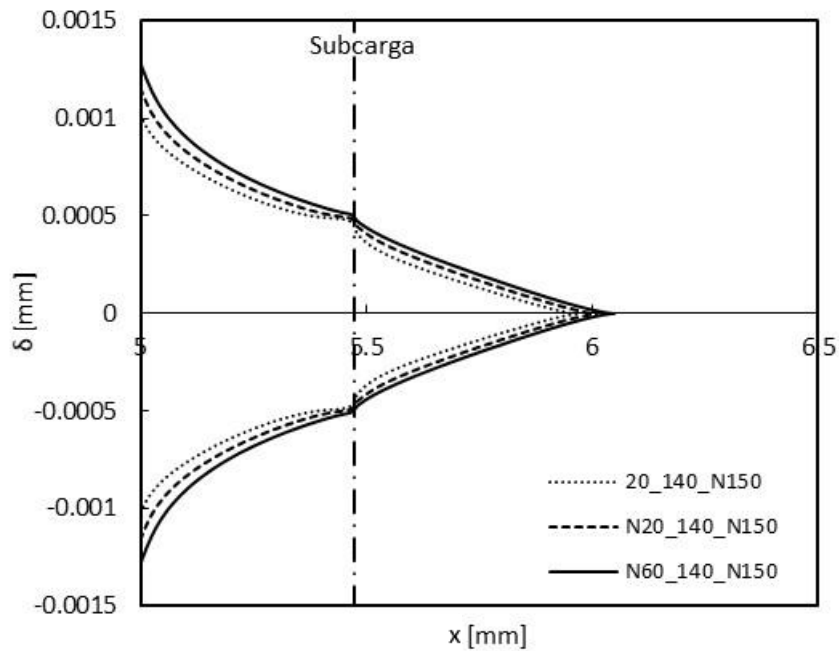
Figura 4.12. Efeito de  $F_{m\acute{a}x}$  em  $\Delta a_{stb}$  (tensão plana).

#### 4.2.2. Efeito do $F_{m\acute{m}n}$

No estudo do efeito de  $F_{m\acute{m}n}$  foram realizadas simulações onde se fez variar os seus valores, mantendo constantes os valores de  $F_{m\acute{a}x}$  e  $F_{UL}$ . As simulações apresentadas foram obtidas para valores de  $F_{UL} = -150$  e  $-100$  N.

##### i) Perfil de fenda

Visualizando os três perfis de fenda caracterizados na Figura 4.13, nota-se que, quanto maior for o  $F_{m\acute{m}n}$ , menor será a distância entre as faces da fenda, havendo também uma maior deformação na zona onde foi solicitada a subcarga para o ensaio com maior valor de  $F_{m\acute{m}n}$ .



**Figura 4.13.** Efeito de  $F_{\min}$  no perfil de fenda (tensão plana,  $F=40N$ ).

## ii) Fecho de fenda

Na Figura 4.14, onde se encontram os níveis de fecho de fenda para os ensaios onde se fez variar o parâmetro em estudo com e sem solicitação de sobrecarga, é notório que o aumento de  $F_{\min}$  produz um maior valor de  $\Delta R_{\text{eff},\min}$ . A tendência referida anteriormente está perfeitamente ilustrada na Figura 4.15. Notar que o aumento de  $F_{\min}$  faz aumentar  $\Delta F_1 = F_{\min} - F_{UL}$ , pelo que serão de esperar maiores reduções dos valores de fecho de fenda.

Com a variação de  $F_{\min}$ , os valores de  $\Delta a_{\text{stb}}$  seguem uma tendência parabólica com concavidade voltada para baixo (Figura 4.16).

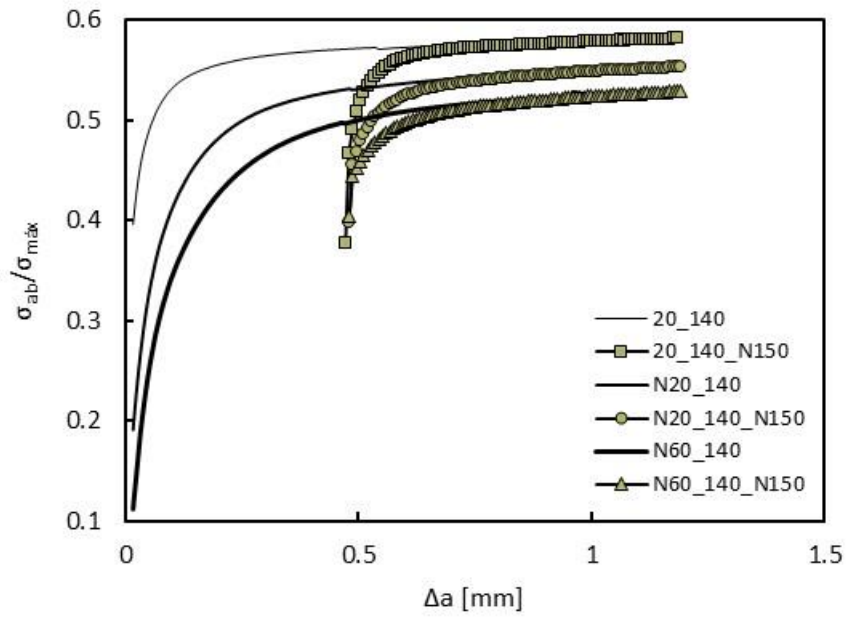


Figura 4.14. Efeito de  $F_{min}$  no nível de fecho de fenda (tensão plana, PICC<sub>node1</sub>).

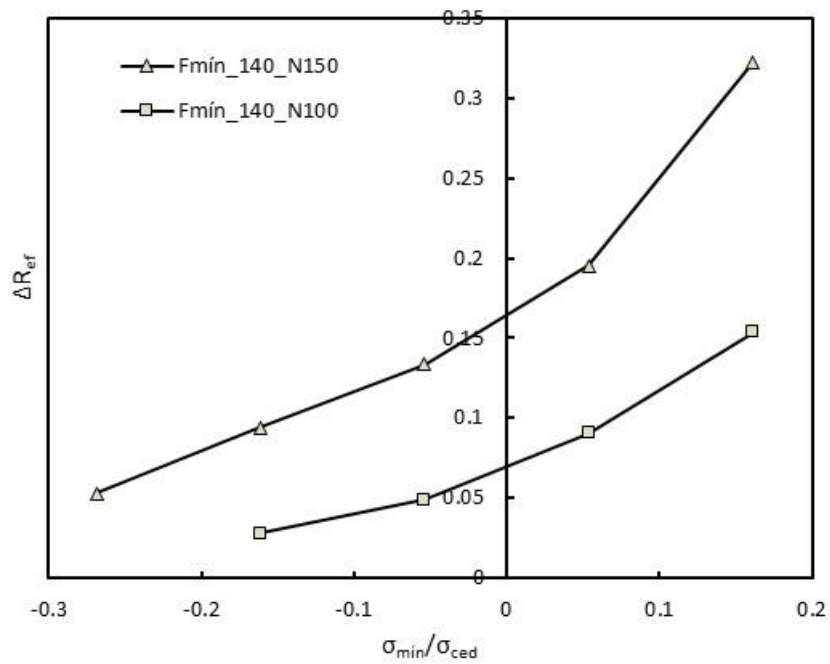


Figura 4.15. Efeito de  $F_{min}$  no  $\Delta R_{ef}$  (tensão plana).

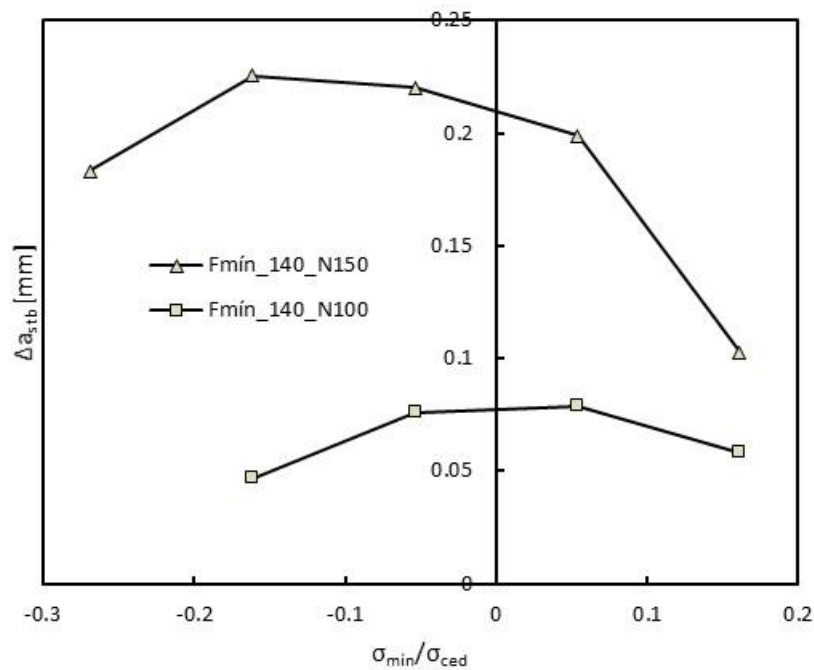


Figura 4.16. Efeito de  $F_{\min}$  no  $\Delta a_{stb}$  (tensão plana).

### 4.2.3. Efeito do $F_{UL}$

O efeito das subcargas no fenômeno de fecho de fenda induzido por plasticidade é o principal objetivo deste trabalho, neste sentido foram realizadas inúmeras simulações onde se variou o  $F_{UL}$  mantendo constantes os parâmetros do carregamento base.

#### i) Perfil de fenda

Na Figura 4.17 é possível verificar que, à medida que se aumenta a força de compressão ( $F_{UL}$ ), aumenta a distância entre as faces da fenda nas zonas anteriores à subcarga. Nas zonas posteriores à solicitação de subcarga, o perfil tende à sua posição “original”.



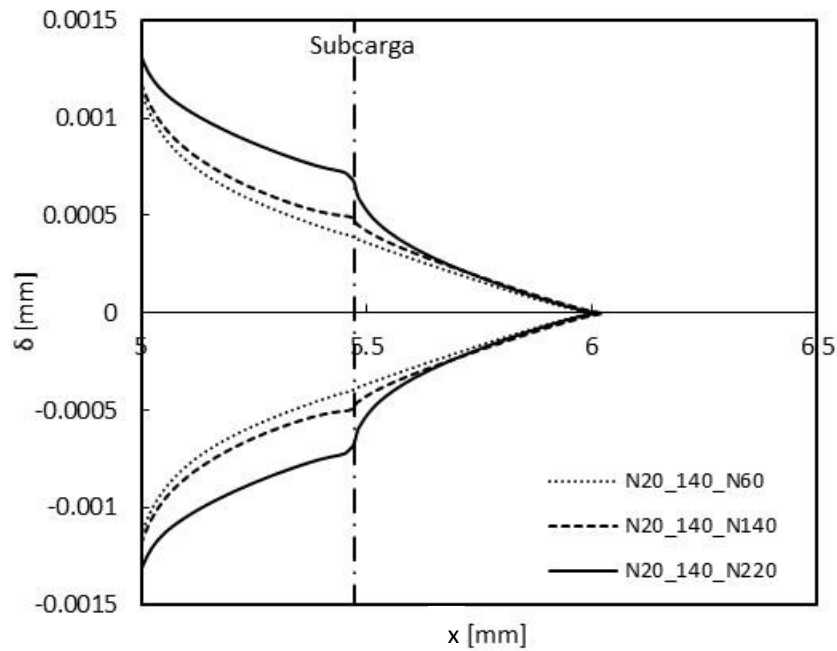


Figura 4.17. Efeito de  $F_{UL}$  no perfil da fenda (tensão plana,  $F=40N$ ).

## ii) Fecho de Fenda

Relativamente aos níveis de fecho de fenda, esses diminuem com o aumento de  $F_{UL}$  (Figura 4.18 e 4.19). Quanto às suas distâncias de estabilização ( $\Delta_{astb}$ ) é evidente que os seus valores tendem a aumentar com o aumento de  $F_{UL}$  (Figura 4.20).

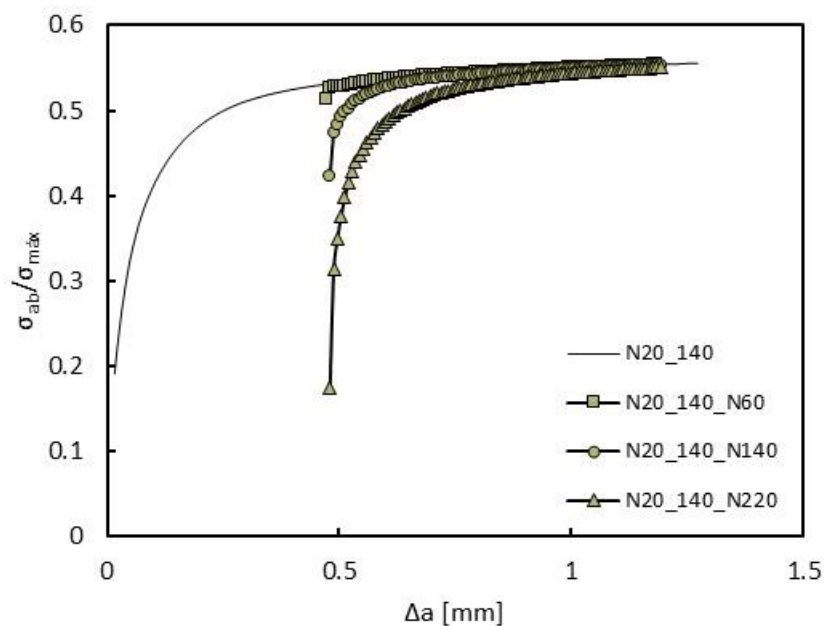


Figura 4.18. Efeito de  $F_{UL}$  no nível de fecho de fenda (tensão plana,  $PICC_{node1}$ ).

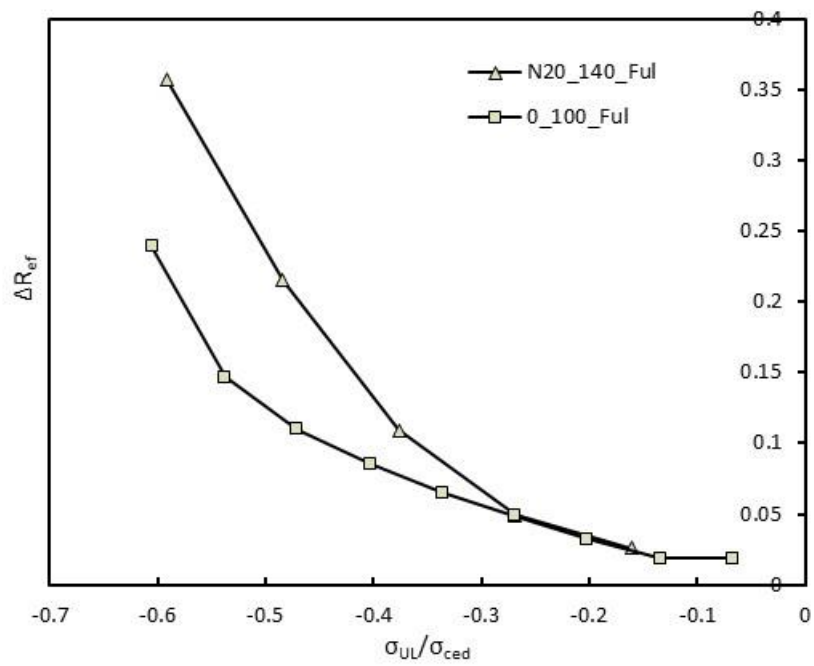


Figura 4.19. Efeito de  $F_{UL}$  em  $\Delta R_{ef}$  (tensão plana).

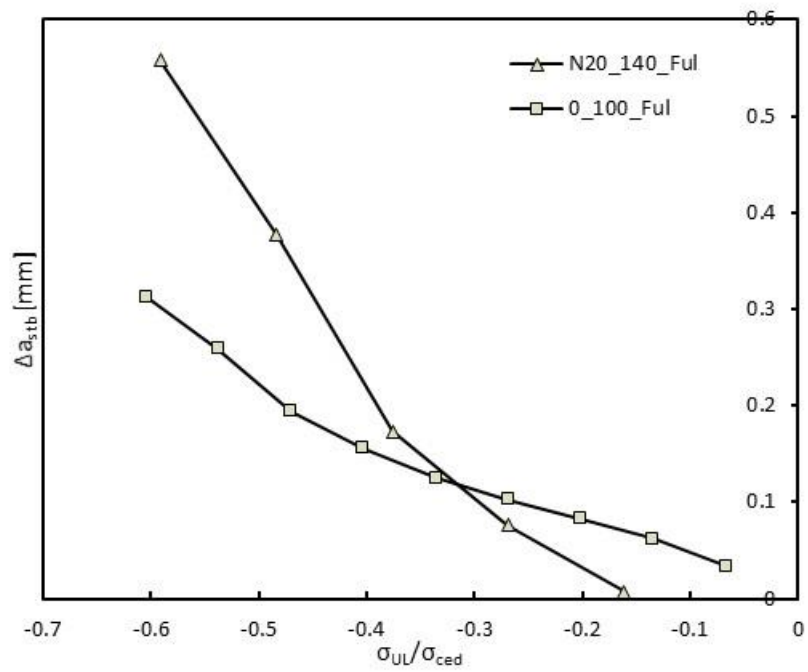
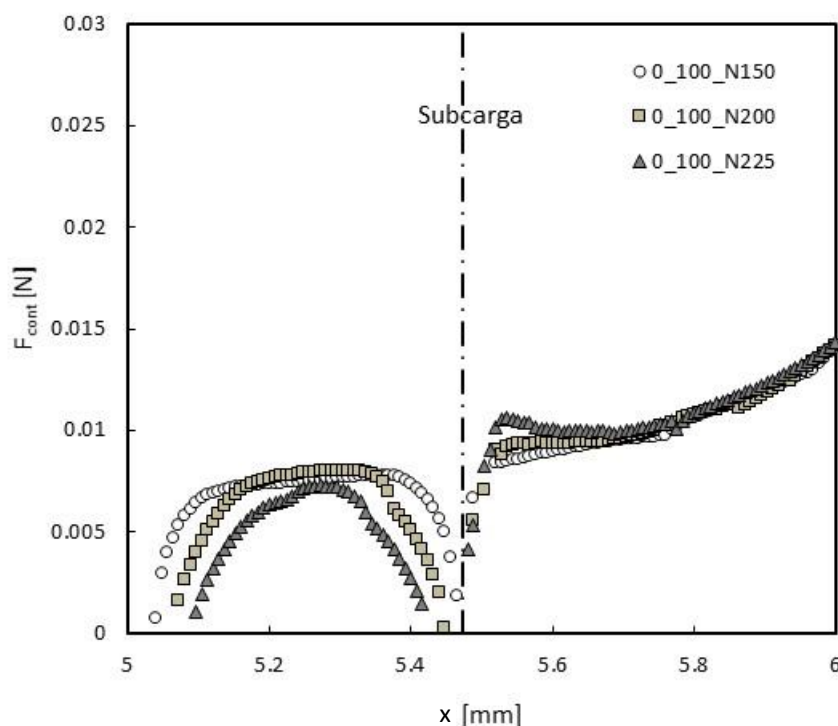


Figura 4.20. Efeito de  $F_{UL}$  em  $\Delta a_{stb}$  (tensão plana).

### iii) Forças de contacto

Na Figura 4.21 estão representadas as forças de contacto de três casos onde se fez variar o  $F_{UL}$ . Nessa figura apenas estão representadas as forças até aos 6mm de comprimento de fenda para que se possa observar com maior rigor a zona mais afetada. Nos pontos posteriores aos 6mm de comprimento, os valores são praticamente invariáveis ao longo dos ensaios. Tal como se observa na figura em questão, os valores das forças de contacto apresentam menores valores para maiores valores de  $F_{UL}$  na zona atrás da solicitação. Na figura também se distingue um pequeno aumento das forças de contacto, logo após a solicitação, dos ensaios com maior  $F_{UL}$ . Com isto, confirma-se que a aplicação de uma subcarga afeta principalmente a zona anterior à solicitação e que na zona da subcarga as forças de contacto são nulas. A zona afetada atrás da posição  $x=5.472$  mm (onde foi aplicada a subcarga) aumenta significativamente com a subcarga, porém a extensão da zona afetada à frente não parece aumentar.

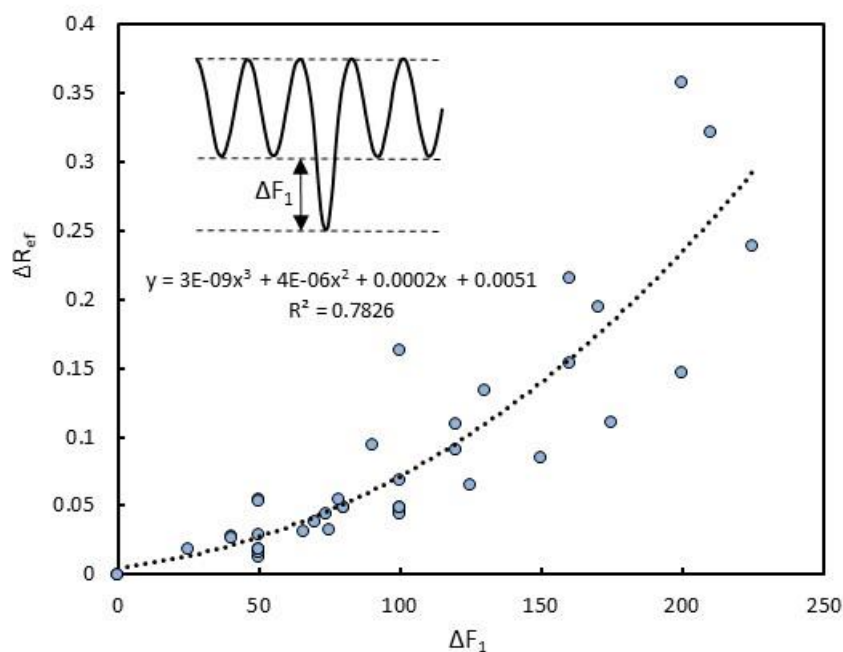


**Figura 4.21.** Efeito de  $F_{UL}$  nas forças de contacto a carga mínima (tensão plana,  $F=0$ ).

### 4.3. Varrimento

Neste subcapítulo serão apresentadas correlações de  $R_{\text{eff, mín}}$  e  $\Delta a_{\text{stb}}$  com base em diversos ensaios numéricos em estado plano de tensão.

Na Figura 4.22 estão representados os decréscimos dos valores mínimos de fecho ( $\Delta R_{\text{ef}}$ ) em função da diferença entre a carga mínima e a subcarga aplicada ( $\Delta F_1$ ) para a maioria das simulações realizadas. Pode reparar-se que existe uma correlação interessante que comprova que, com o aumento de  $\Delta F_1$ , ocorre um aumento no decréscimo dos valores mínimos de fecho no instante em que é solicitada a subcarga.



**Figura 4.22.** Efeito de  $\Delta F_1$  no decréscimo dos valores mínimos de fecho.

Na Figura 4.23 a tendência apresentada mostra que, quando maior for a diferença entre  $F_{\text{máx}}$  e  $F_{\text{UL}}$ , maiores serão as distâncias de propagação necessárias para a ocorrência de estabilização da fenda.

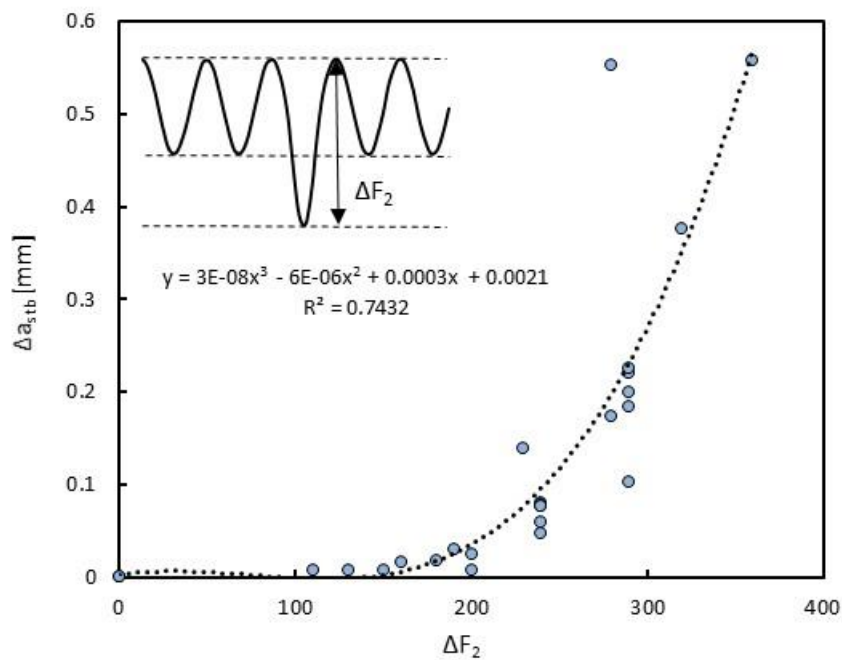


Figura 4.23. Efeito de  $\Delta F_2$  na distância de estabilização.

#### 4.4. Efeito do comportamento do material

Nas Figuras 4.24 e 4.25 pode ver-se o efeito do modelo de encruamento do material. Foram considerados 3 modelos de encruamento: misto (descrito no capítulo 3 e utilizado ao longo deste trabalho), isotrópico e cinemático. Os resultados indicam que o comportamento misto é próximo do encruamento isotrópico. Além disso, no caso do encruamento cinemático, o efeito da subcarga é bastante mais relevante do que nos dois outros casos. Isso seria de esperar, pois o efeito da subcarga está intimamente ligado com a ocorrência de deformação inversa na zona da extremidade da fenda. Ademais, o encruamento cinemático promove a ocorrência deste fenómeno. Notar ainda que a zona afetada pela subcarga é sempre mais relevante atrás da extremidade do que à frente, o que é bem visível na Figura 4.24.

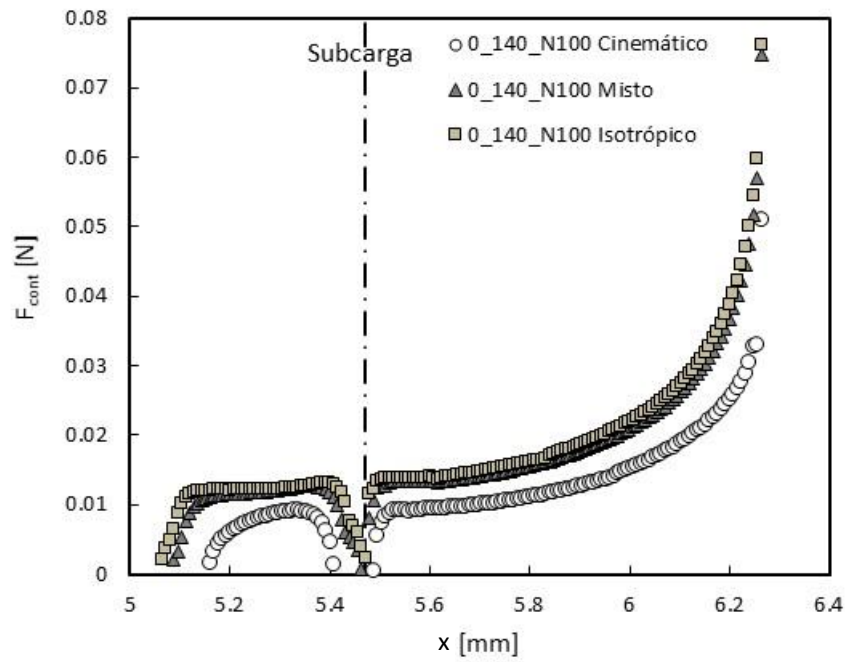


Figura 4.24. Efeito do comportamento do material nas forças de contacto à carga mínima (tensão plana).

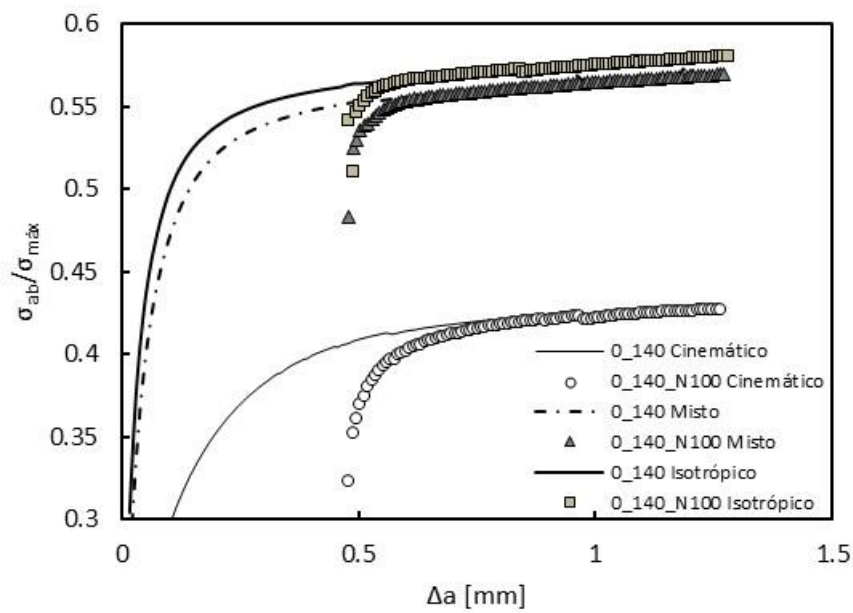


Figura 4.25. Efeito do comportamento do material no nível de fecho de fenda (tensão plana,  $PICC_{node1}$ ).

## 4.5. Subcargas periódicas

A análise das subcargas periódicas foi realizada para o ensaio com  $F_{m\acute{a}x}=140$  N,  $F_{m\acute{i}n}=0$  e  $F_{UL}=-100$  N e as subcargas foram aplicadas em períodos constantes. Esse período compreende  $n$  blocos (Figura 4.26). Foram concretizadas três simulações, com solicitações após cada 2, 5 e 10 blocos. Para as simulações de períodos 2 e 5 blocos foram realizadas 6 subcargas enquanto para  $n=10$  foram aplicadas 5 subcargas, sendo que em todas as simulações a primeira subcarga foi aplicada no bloco 60.

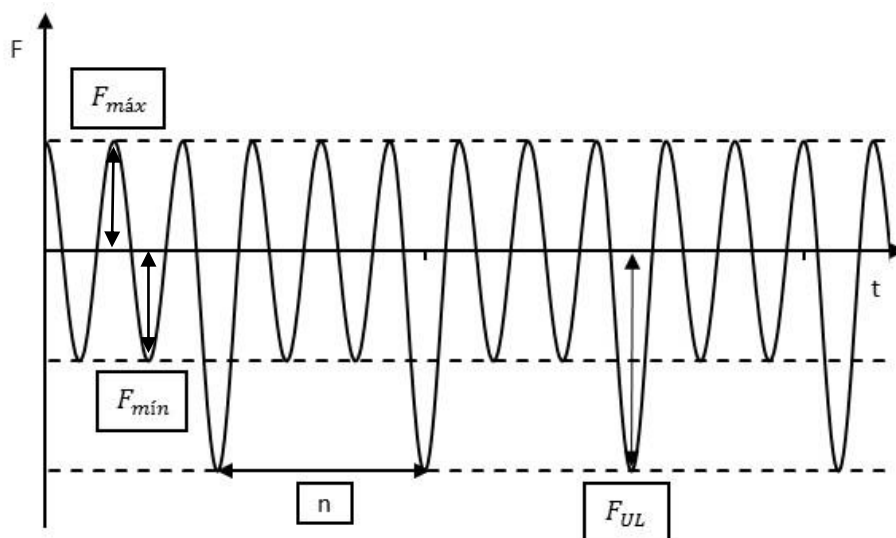
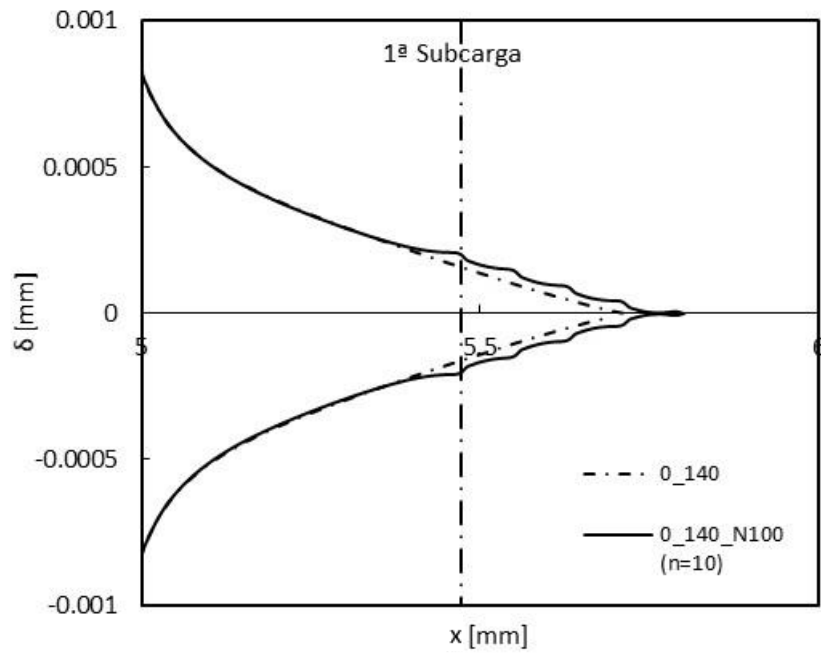


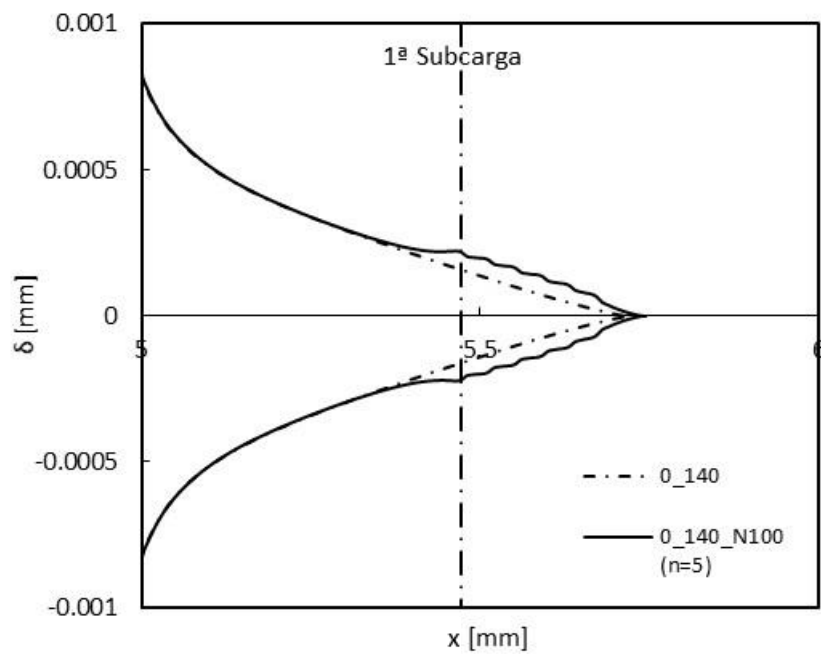
Figura 4.26. Exemplo da solicitação aplicada.

### i) Perfil de fenda

Os perfis de fenda do estudo de subcargas periódicas com solicitações após cada 10, 5 e 2 blocos estão ilustrados respectivamente nas Figuras 4.27, 4.28 e 4.29. Nos ensaios realizados é possível constatar que após a aplicação da primeira subcarga existe um afastamento das faces da fenda, constata-se também que quando são aplicadas subcargas com intervalos mais curtos, a deformação causada pela subcarga não chega a estabilizar, ficando assim o perfil com um maior afastamento das faces da fenda após a primeira solicitação. A redução de  $n$  torna o perfil da fenda mais suave na zona de aplicação das subcargas.

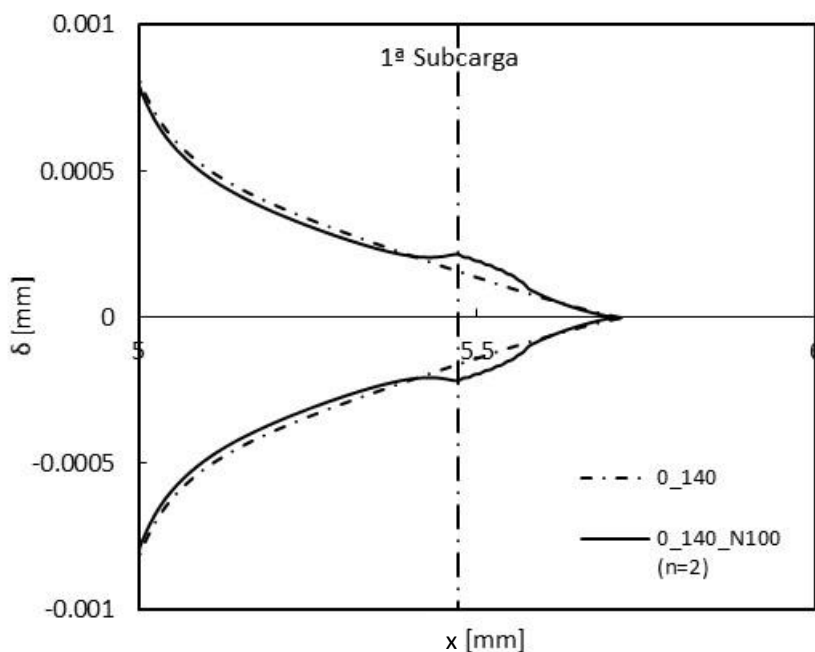


**Figura 4.27.** Perfil de fenda com subcargas periódicas de 10 blocos (tensão plana,  $F=40N$ ).



**Figura 4.28.** Perfil de fenda com subcargas periódicas de 5 blocos (tensão plana,  $F=40N$ ).

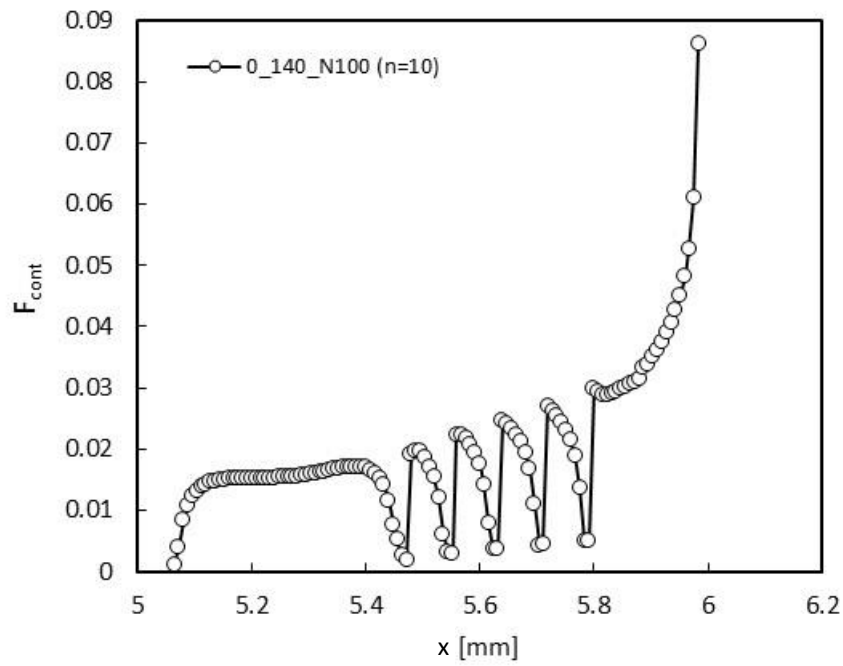




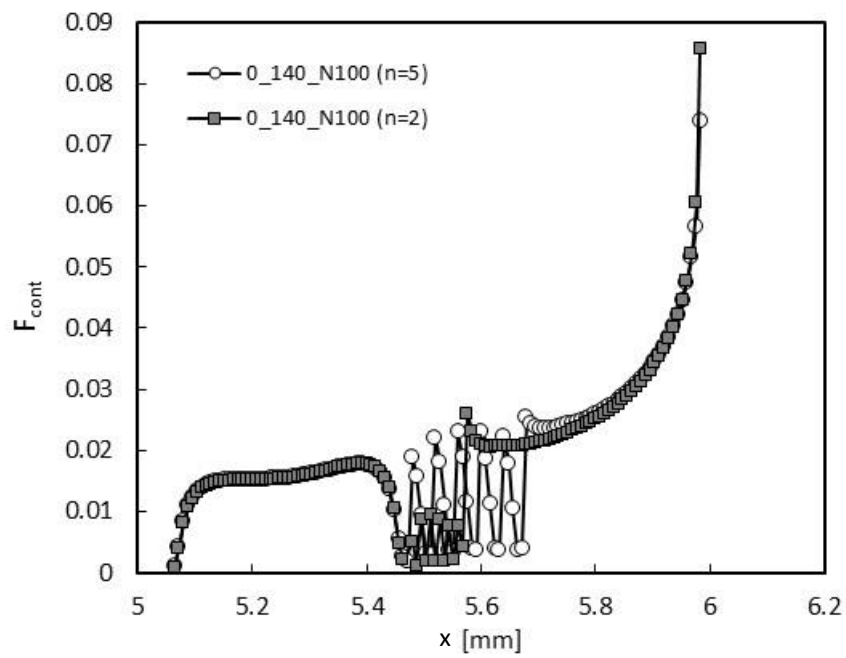
**Figura 4.29.** Perfil de fenda com subcargas periódicas de 2 blocos (tensão plana,  $F=40N$ ).

## ii) Forças de contacto

As forças de contacto em função da coordenada  $x$  dos ensaios em estudo estão ilustradas nas Figura 4.30 e 4.31, pode observar-se que, na zona da subcarga, as forças de contacto são praticamente nulas devido ao afastamento das faces da fenda nessa zona. Analisando pormenorizadamente as figuras, verifica-se que, quanto menor for o intervalo de solicitação da subcarga, menores serão os valores das forças de contacto nesses intervalos, devido à não estabilização e consequentemente ao maior afastamento das faces da fenda.



**Figura 4.30.** Forças de contacto à carga mínima (tensão plana,  $n=10$  blocos,  $F=0$ ).



**Figura 4.31.** Forças de contacto à carga mínima (tensão plana,  $n=5$  e  $n=2$  blocos,  $F=0$ ).

### iii) Fecho de fenda

A quantificação do nível de fecho de fenda foi obtida pelo parâmetro numérico  $PICC_{node1}$  em solicitações de amplitude constante e com aplicação de subcargas periódicas (Figura 4.32, 4.33 e 4.34). Nos gráficos é possível notar a diminuição do nível de fecho de fenda com aplicação de subcargas, sendo que com a diminuição da periodicidade o nível de fecho não chega a estabilizar. Não chegando a estabilizar, seria de esperar que com aplicação de uma nova subcarga os valores de fecho fossem inferiores aos da subcarga anterior, mas tal não sucede. Os valores de fecho mínimos mantêm-se idênticos aos anteriores e seguem a tendência da curva de amplitude constante. Os valores mínimos correspondem a um ensaio de amplitude constante com  $F_{min}=F_{UL}$ . A aplicação repetida das subcargas mantém este mecanismo ativo (Tvergaard, 2006). O efeito das subcargas desaparece rapidamente se a sua aplicação cessar.

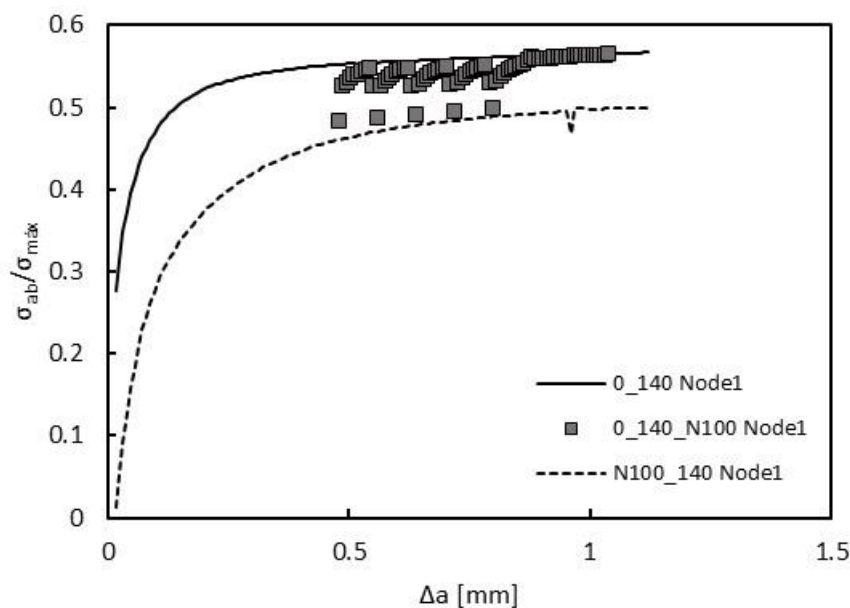


Figura 4.32. Nível de fecho de fenda:  $PICC_{node1}$  (tensão plana,  $n=10$  blocos).

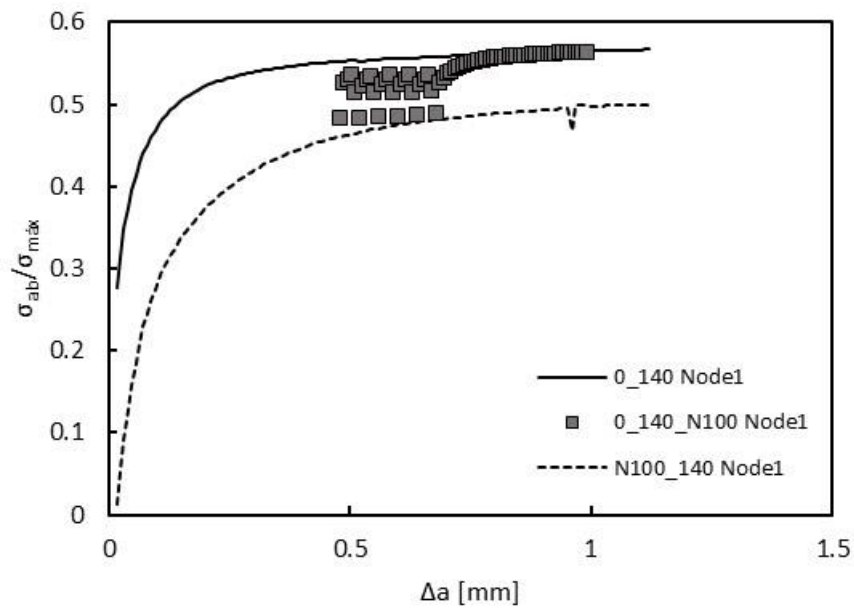


Figura 4.33. Nível de fecho de fenda:  $PICC_{node1}$  (tensão plana, n=5 blocos).

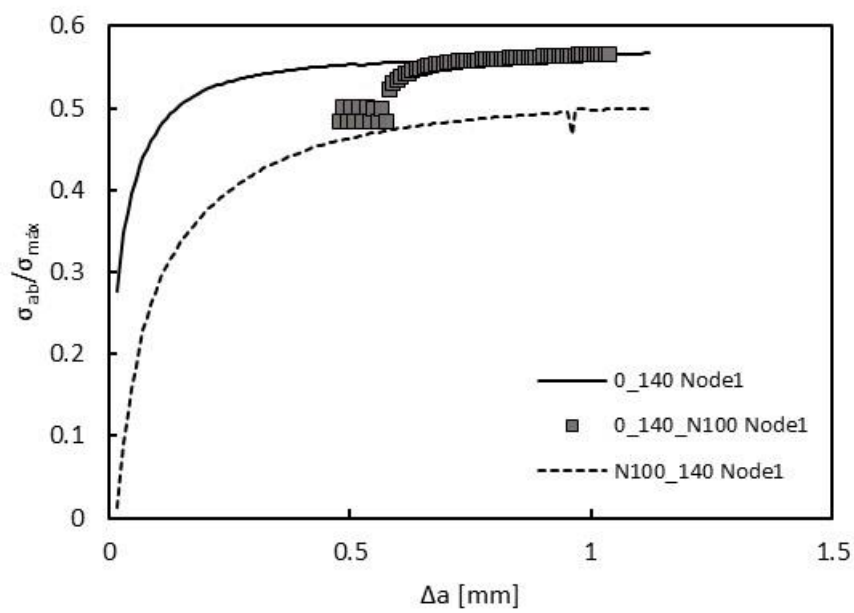


Figura 4.34. Nível de fecho de fenda:  $PICC_{node1}$  (tensão plana, n=2 blocos).

## 4.6. Comparação de sobrecargas com subcargas

Tendo já sido analisadas sobrecargas e subcargas, é importante compreender qual das solicitações apresenta maiores efeitos na propagação de fendas por fadiga. Neste subcapítulo serão comparados os perfis de fenda, as forças de contacto e os níveis de fecho de uma sobrecarga de 200N com uma subcarga de -100N, ambas para o caso de  $F_{\text{máx}}=140\text{N}$  e  $F_{\text{mín}}=0\text{N}$ .

### i) Perfil de fenda

Analisando a Figura 4.35, é facilmente perceptível que as sobrecargas têm maiores variações nos perfis de fenda. Na figura em questão verifica-se que com aplicação de uma sobrecarga existe uma aproximação das faces da fenda no local da solicitação, enquanto nas subcargas a variação do perfil é mínima e, com base nos resultados anteriores, ocorre um afastamento das faces da fenda.

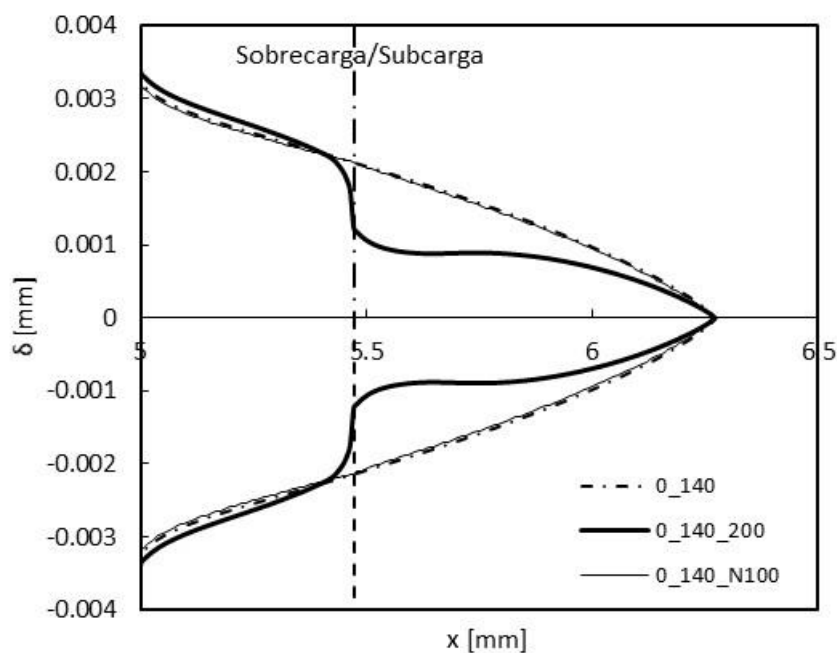


Figura 4.35. Perfil de fenda (tensão plana,  $F=100\text{N}$ ).

## ii) Forças de contacto

Analisando as forças de contacto (Figura 4.36), observa-se que com aplicação de uma sobrecarga sucede um aumento das forças de contacto após a sollicitação, sendo que quando solicitada por uma subcarga, as forças de contacto são praticamente nulas devido ao afastamento das faces da fenda nessa zona. O aumento significativo das forças de contacto, quando solicitada por uma sobrecarga, é espectável sendo que existe uma notória aproximação das faces da fenda nessa zona (Figura 4.35). É também bastante diferente a distância afetada pela variação de carga. No caso das sobrecargas o efeito é bastante extenso à frente do ponto de aplicação, enquanto nas subcargas a zona afetada é pequena e atrás da zona de aplicação. Assim, são de esperar distâncias de estabilização dos valores de fecho bastante diferentes. Notar que as sobrecargas estão intimamente ligadas à deformação monótona, enquanto as subcargas estão relacionadas com a deformação plástica inversa. A deformação inversa concentra-se junto da extremidade da fenda enquanto a deformação monótona se estende bastante para a frente.

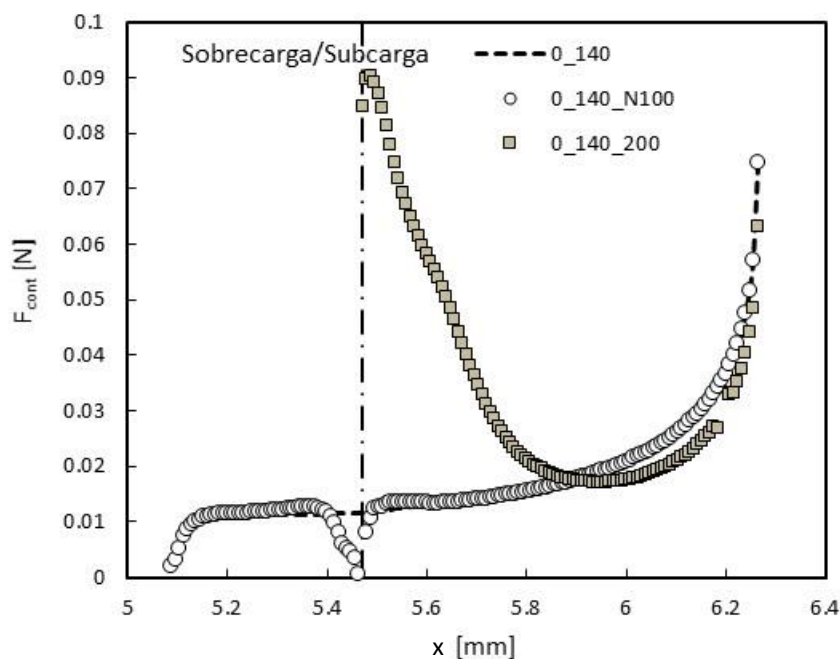


Figura 4.36. Forças de contacto à carga mínima (tensão plana,  $F=0$ ).

### iii) Fecho de fenda

Na Figura 4.37 exibe-se o nível de fecho de fenda para as duas solicitações em análise. É evidente que a aplicação de uma sobrecarga apresenta uma maior variação nos níveis de fecho de fenda que uma subcarga. A aplicação de sobrecargas acompanha normalmente a tendência representada na figura, sendo essa uma diminuição no momento da solicitação seguida de um aumento significativo dos seus valores até um valor máximo, após o qual há uma convergência para a curva base. Quanto às subcargas, existe uma pequena diminuição nos valores de fecho, ao que esses convergem rapidamente para a curva base. O efeito da sobrecarga é bastante mais moroso.

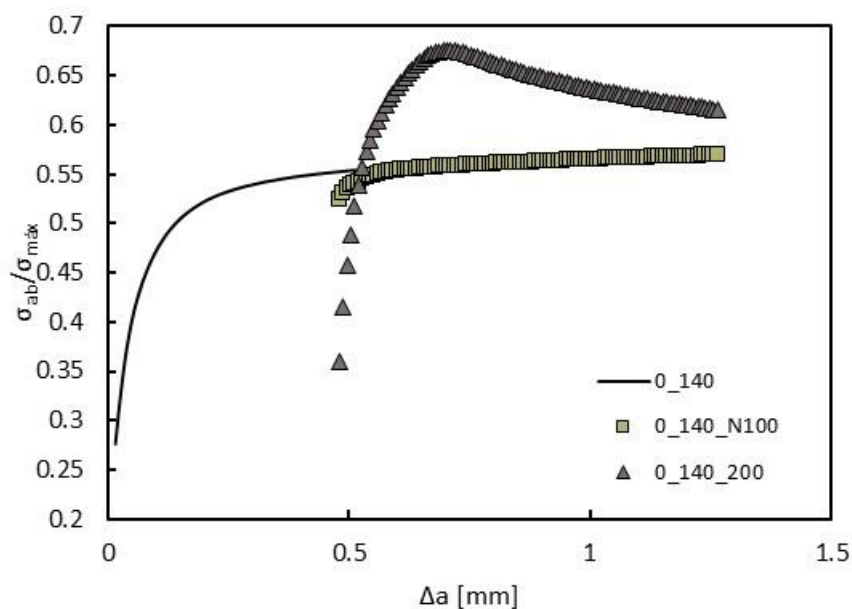


Figura 4.37. Nível de fecho de fenda ( $PICC_{node1}$ , tensão plana).

## 4.7. Efeito de uma subcarga após uma sobrecarga

Sendo o objetivo desta dissertação o estudo do efeito de subcargas, foram executadas diversas simulações em que após uma sobrecarga foi aplicada uma subcarga (Figura 4.38). Nas simulações realizadas apenas se variou o valor da subcarga ( $F_{UL}$ ), mantendo constantes os valores  $F_{m\acute{a}x}$ ,  $F_{m\acute{i}n}$  e  $F_{OL}$ . A análise em questão foi realizada para tensão plana, apresentando esses ensaios os parâmetros  $F_{m\acute{a}x}=140\text{N}$ ,  $F_{m\acute{i}n}=0\text{N}$  e  $F_{OL}=200\text{N}$  (OL\_UL\_0\_140\_200\_  $F_{UL}$ ).

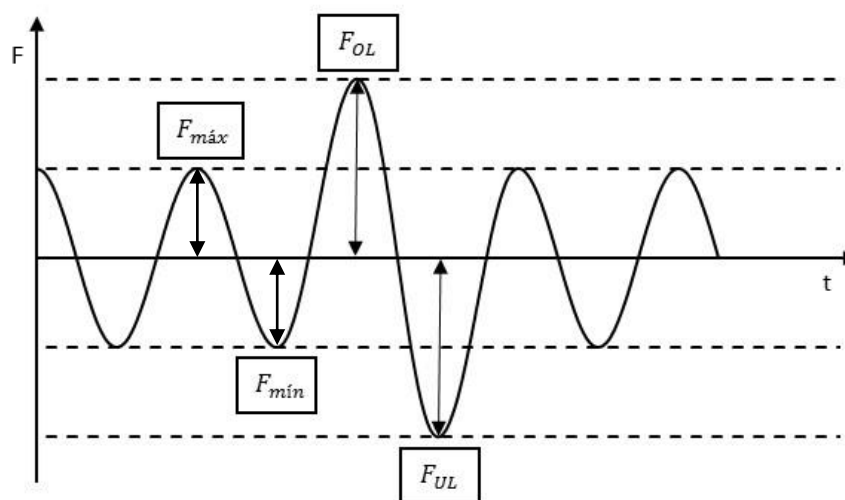


Figura 4.38. Exemplo da solicitação em estudo.

### i) Perfil de fenda

Na Figura 4.39 está ilustrado o perfil de fenda com amplitude constante, exclusivamente com a solicitação de sobrecarga e os três ensaios em que se variou a  $F_{UL}$ , no momento em que a carga é máxima. Percebe-se que, quando aplicada uma sobrecarga, existe uma aproximação entre as faces da fenda à frente do ponto de aplicação dessa sobrecarga. Com a aplicação de uma subcarga após a sobrecarga, verifica-se que quanto maior for a  $F_{UL}$ , maior é a distância entre as faces da fenda. Assim, a subcarga atenua o efeito da sobrecarga aproximando a forma da fenda da correspondente à amplitude constante. A alteração introduzida pela subcarga é relativamente próxima da zona de aplicação da subcarga. Tal seria de esperar, uma vez que a subcarga tem um efeito local.



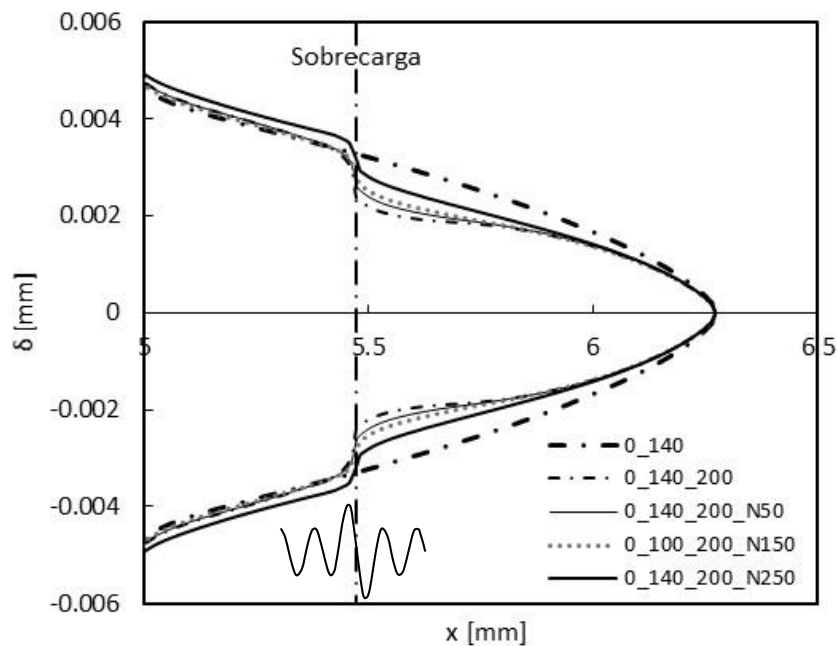


Figura 4.39. Perfil de fenda (tensão plana, F=140N).

## ii) Alongamento plástico, $\Delta y_p$

Na Figura 4.40 é mostrado o alongamento plástico nas faces da fenda. Analisando as curvas, sabe-se que com aplicação de uma subcarga após uma sobrecarga existe uma diminuição do alongamento plástico, confirmando assim que o esmagamento na zona da subcarga traduz-se numa diminuição da deformação plástica.

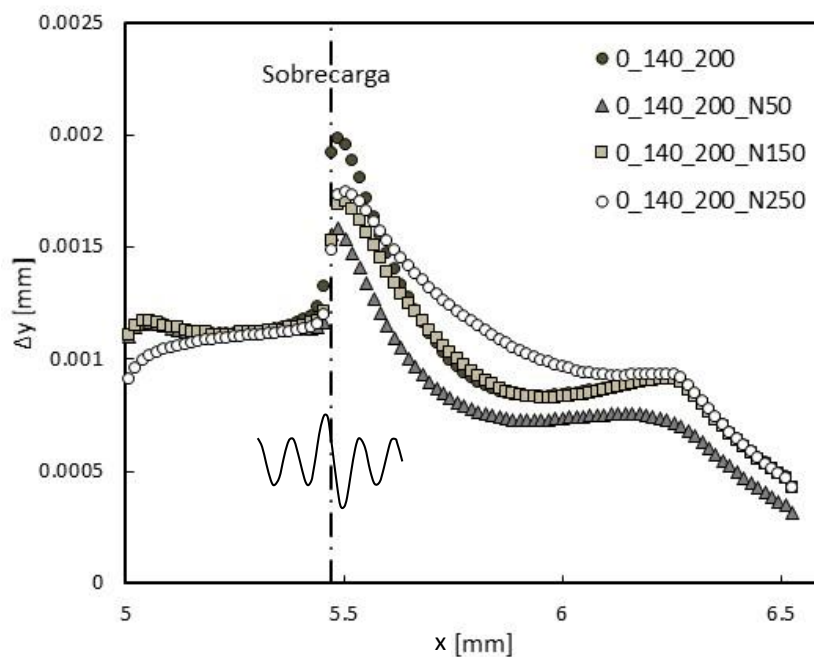


Figura 4.40. Deformação plástica  $\Delta y$  (tensão plana).

### iii) Forças de contacto

Na Figura 4.41 são exibidas as forças de contacto em função da coordenada  $x$  de três ensaios onde se fez variar  $F_{UL}$ , no caso em que a fenda está na posição  $x=6.272$  mm e à carga mínima. Observando a figura, nota-se que todas as forças atrás da zona da subcarga foram eliminadas, o que tem que ver com um efeito de arredondamento da extremidade da fenda produzido pela sobrecarga.

Ao aplicar uma subcarga após uma sobrecarga, verifica-se uma diminuição nas forças de contacto logo após a sobrecarga, sendo esse efeito “compensado” de seguida com um aumento das forças de contacto em relação ao ensaio sem solicitação de subcarga. Este efeito aumenta com o aumento da  $F_{UL}$ .

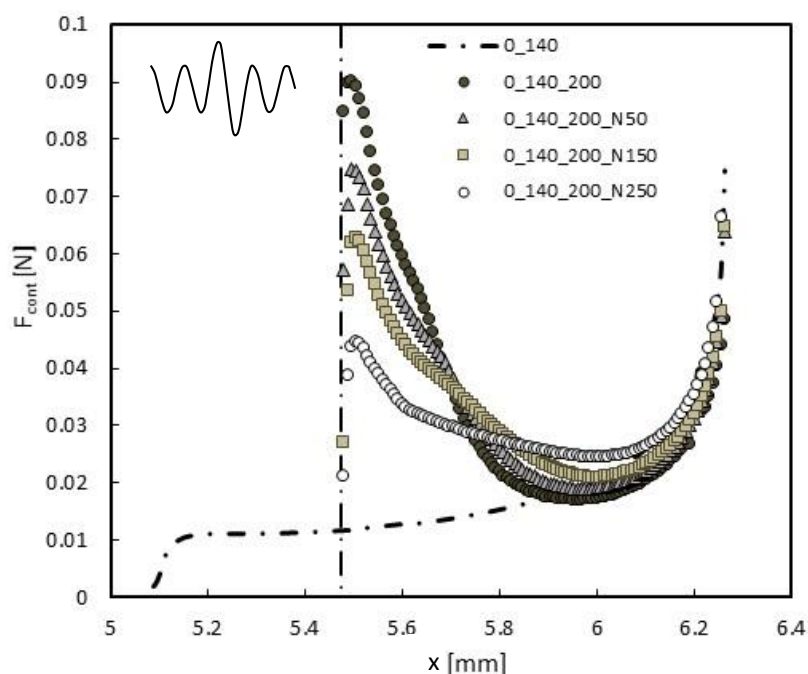


Figura 4.41. Forças de contacto à carga mínima (tensão plana,  $F=0$ ).

### iv) Fecho de fenda

As curvas  $(\sigma_{ab}/\sigma_{m\acute{a}x})-\Delta a$  para os ensaios que têm vindo a ser expostos são reveladas na Figura 4.42, as quais evidenciam duas tendências notórias. Quanto maior for a  $F_{UL}$  aplicada após a sobrecarga, menor é o valor do pico das curvas e menor é o valor mínimo de abertura de fenda.

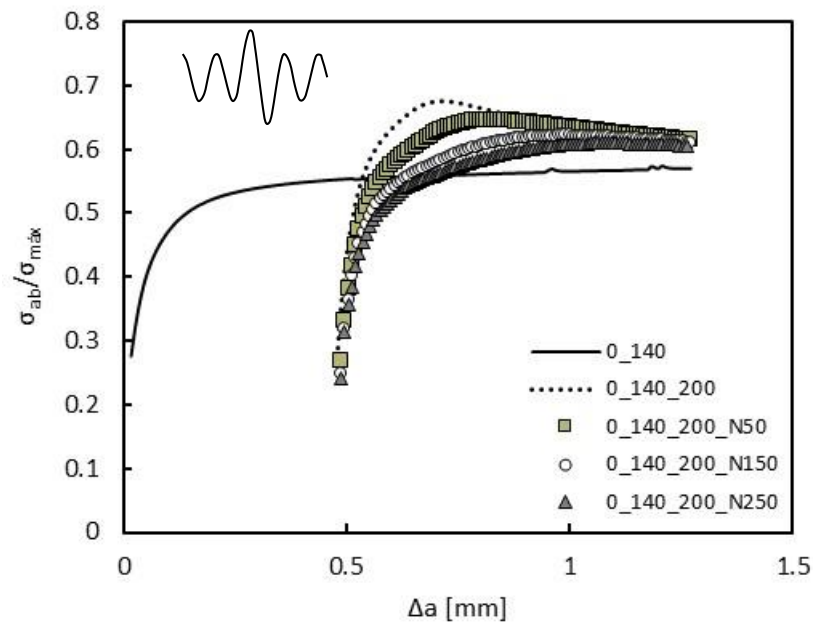


Figura 4.42. Nível de fecho de fenda ( $PICC_{node1}$ ; tensão plana).

#### 4.8. Efeito de uma subcarga antes de uma sobrecarga

O estudo do efeito de uma subcarga, quando aplicada antes de uma sobrecarga, foi efetuado superficialmente, sendo analisado apenas um ensaio que apresenta uma  $F_{m\acute{a}x}=140\text{N}$ ,  $F_{m\acute{i}n}=0\text{N}$ ,  $F_{UL}=-150\text{N}$  e  $F_{OL}=200\text{N}$  (UL\_OL\_0\_140\_N150\_200).

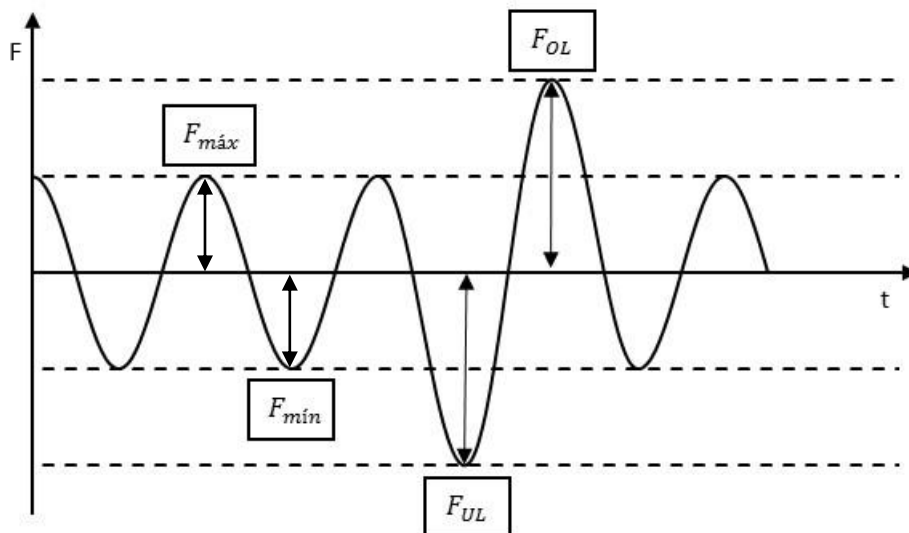


Figura 4.43. Exemplo da solitação aplicada.

### i) Perfil de fenda

Atentando aos perfis de fenda ilustrados na Figura 4.44, verifica-se que, ao aplicar-se uma subcarga previamente a uma sobrecarga, existe um aumento muito pouco significativo na distância entre as faces da fenda em comparação com o perfil apenas solicitado por uma sobrecarga, antes das respectivas solicitações.

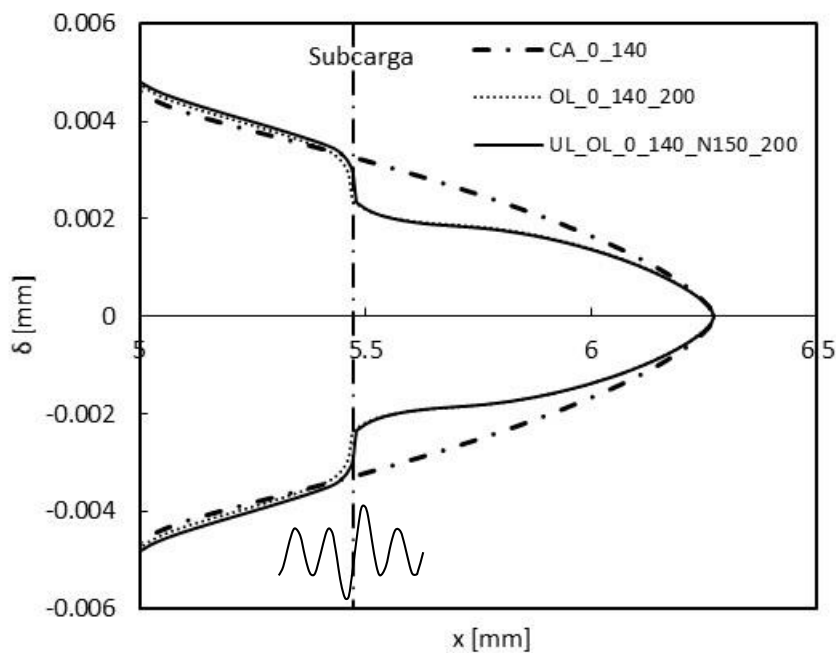


Figura 4.44. Perfil de fenda (tensão plana, F=140N).

### ii) Alongamento plástico, $\Delta y_p$

Comparando o alongamento plástico nas faces da fenda com e sem solicitação de subcarga antes de uma sobrecarga (Figura 4.45), constata-se que não existem variações muito significativas. Visualiza-se uma pequena diminuição do elemento plástico, quando solicitada pela subcarga, nos valores anteriores à solicitação.

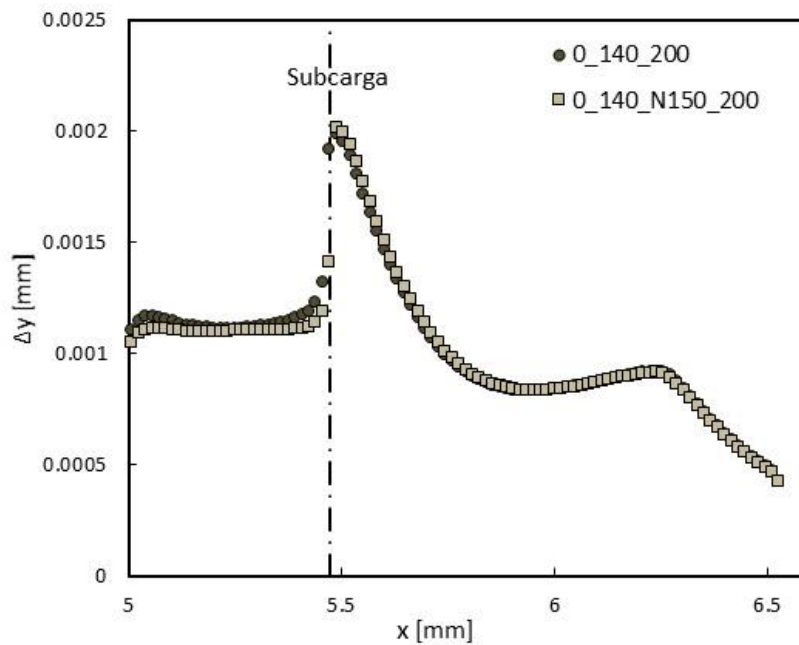


Figura 4.45. Deformação plástica  $\Delta y$  (tensão plana).

### iii) Forças de contacto

As forças de contacto à carga mínima em função da coordenada  $x$  com e sem solicitação de subcarga estão representadas na Figura 4.46, concluindo-se que a solicitação de uma subcarga antes de uma sobrecarga não afeta as forças de contacto.

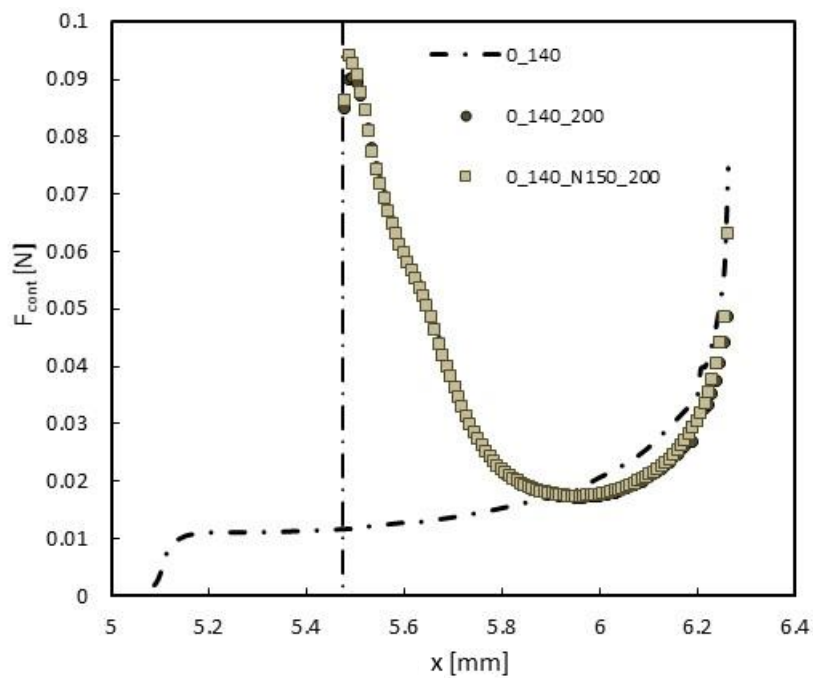


Figura 4.46. Forças de contacto à carga mínima (tensão plana,  $F=0$ ).

### iii) Fecho de fenda

Examinando o nível de fecho de fenda (Figura 4.47), deduz-se que, ao aplicar-se uma subcarga antes de uma sobrecarga, essa não vai afetar os níveis de fecho de fenda.

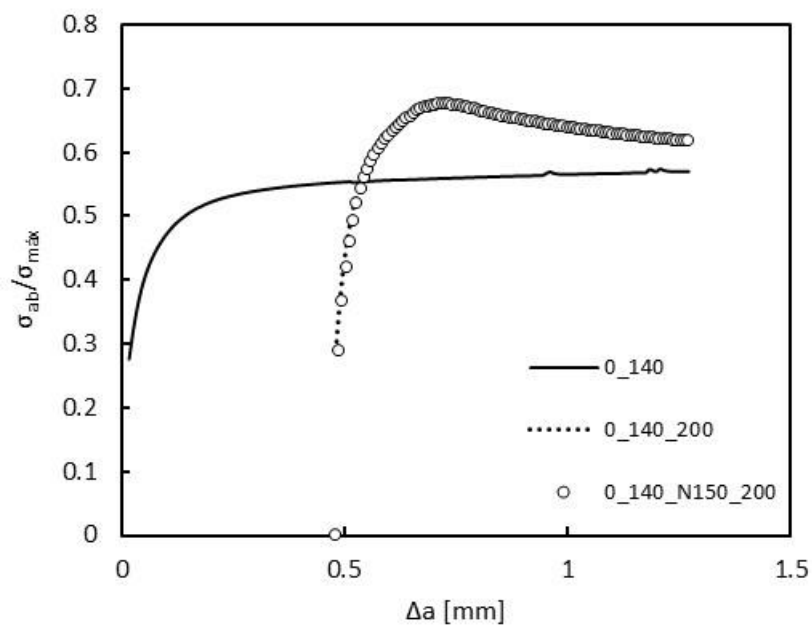


Figura 4.47. Nível de fecho de fenda (PICC<sub>node1</sub>; tensão plana).

## 5. CONCLUSÕES

Na finalização desta dissertação, pode afirmar-se que todos os seus objetivos foram cumpridos e desses retiram-se as seguintes conclusões:

- A solicitação de uma subcarga, tanto em estado plano de tensão como em estado plano de deformação, provoca uma depressão no perfil e uma redução das forças de contacto no local da solicitação, reduzindo os níveis de fecho de fenda em relação às respetivas curvas base (amplitude constante).
- A aplicação de uma subcarga afeta significativamente as forças de contacto atrás da zona de solicitação. Nessa zona os valores das forças de contacto apresentam menores valores para maiores valores de  $F_{UL}$ . A redução do alongamento plástico atrás da extremidade da fenda tem um efeito imediato nos níveis de fecho de fenda, uma vez que este depende maioritariamente do contacto entre as faces da fenda.
- O efeito de uma subcarga está intimamente ligado à deformação plástica inversa e isso explica o aumento do efeito que ocorre com o encruamento cinemático. O modelo de encruamento do material misto evidencia um comportamento muito próximo do isotrópico.
- Com o aumento de  $F_{máx}$ , dá-se um aumento no decréscimo dos valores mínimos de fecho ( $\Delta R_{eff,mín}$ ) e um aumento nas distâncias de estabilização ( $\Delta a_{stb}$ ).
- Com o aumento de  $F_{mín}$ , aumentando assim o  $\Delta F_1 = F_{mín} - F_{UL}$ , o decréscimo dos valores mínimos de fecho ( $\Delta R_{eff,mín}$ ) aumenta e as distâncias de estabilização ( $\Delta a_{stb}$ ) evoluem com uma tendência parabólica com concavidade voltada para baixo.
- O aumento da força de compressão ( $F_{UL}$ ) aumenta a distância entre as faces da fenda nas zonas anteriores à subcarga. Nas zonas posteriores à solicitação de subcarga, o perfil tende para a sua posição “original”. O decréscimo do nível de fecho de fenda e a distância de estabilização aumentam com o aumento de  $F_{UL}$ .

- A aplicação de subcargas periódicas demonstra resultados bastante idênticos à aplicação exclusiva de uma subcarga, sendo que o efeito das subcargas desaparece rapidamente se a sua aplicação cessar. O perfil de fenda é esmagado por uma distância correspondente às solicitações das subcargas. No entanto, não há um efeito cumulativo e os níveis de fecho não superam inferiormente a curva correspondente ao caso de carga de amplitude constante  $CA\_FUL\_F_{máx}$ . Se a periodicidade da solicitação de subcargas for reduzida, os valores de fecho aproximam-se do caso  $CA\_FUL\_F_{máx}$ .
- Os efeitos das sobrecargas são muito mais extensos e visíveis do que os das subcargas.
- A solicitação de uma subcarga após uma sobrecarga atenua os efeitos provocados pela sobrecarga.
- A solicitação de uma subcarga antes de uma sobrecarga não apresenta variações muito significativas.

Como trabalhos futuros, de modo a aprofundar o estudo do efeito das subcargas na propagação de fendas por fadiga seria interessante:

- Desenvolver modelos empíricos para previsão do efeito das subcargas;
- Fazer a previsão do efeito das subcargas na vida à fadiga utilizando modelos de propagação de fenda.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Espinosa A.A., Fellows N.A., Durodola J.F., Experimental measurement of crack opening and closure loads for 6082-T6 aluminium subjected to periodic single and block overloads and underloads, *International Journal of Fatigue* 47,71-82, 2003
- Alizadeh H, Hills D.A., de Matos P.F.P., Nowell D., Pavier M.J., Paynter R.J., Smith D.J., Simandjuntak S. A comparison of two and three-dimensional analyses of fatigue crack closure. *International Journal of Fatigue*. Article in press, 2006.
- Antunes F.V., Chegini A.G., Camas D., Correia L., Empirical model for plasticity induced crack closure based on  $K_{max}$  and  $\Delta K$ , *Fatigue and Fracture of Engng Materis and Structures* 38, 983-996, 2015 (1).
- Antunes F.V., Chegini A.G., Correia L., Branco R. Numerical study of contact forces for crack closures analysis. *International Journal of Solids and Structures* 51(6), 1330-1339, 2014.
- Antunes F.V., Correia L., Ramalho A.L., A parameter for quantitative analysis of plasticity induced crack closure, *International Journal of Fatigue* 71, 87-97, 2015 (2).
- Bichler C., Pippan R. Direct observations of the residual plastic deformation caused by a single tensile overload. *Advances in Fatigue Crack Closure Measurements and Analysis: Second Volume*, ASTM STP 1343, R. C. McClung, J. C. Newman Jr. (eds.), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 191-206, 1999
- Borrego L.F.P. Fatigue crack growth under variable amplitude loading in AlMgSi aluminium alloys. PhD thesis, University of Coimbra, Portugal, 2001.
- Borrego L.P., Ferreira J.A.M., Pinho da Cruz J.M., Costa J.M. Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure. *Engng Fract Mech* 70, 1379-1397, 2003.
- Branco C., Ferreira J., Costa J., Ribeiro A. *Projecto de Órgãos de Máquinas*, 2012.

- 
- Carlson R.L., Kardomateas G.A.. Effects of compressive load excursions on fatigue crack growth. *Int J Fat* 16, 141-146, 1994.
- Chaparro B.M., Thuillier S., Menezes L., Manach P.Y., Fernandes J.V. Material parameters identification: Gradient-based, genetic and hybrid optimization algorithms. *Computational Materials Science* 44 (2), 339-346, 2008.
- Chen H., Chen W., Li T. and Ure J. Effect of circular holes on the ratchet limit and crack tip plastic strain range in a centre cracked plate. *Eng. Fract. Mech.* 78, 2310-2324, 2011.
- Chermahini R.G., Palmberg B., Blom A.F. Fatigue crack growth and closure behaviour of semicircular and semielliptical surface flaws. *International Journal of Fatigue* 15, 259-263, 1993.
- Christensen R.H. Fatigue crack, fatigue damage and their detection. *Metal fatigue*. New York: MacGraw-Hill, 1959.
- Dabayeh A.A., Xu R.X., Du P.B., Topper T.H. Fatigue of cast aluminium alloys under constant and variable amplitude loading. *Int J Fatigue* 18, 95-104, 1996.
- Doré M.J., Maddox S.J. Accelerated Fatigue Crack Growth in 6082 T651 Aluminium Alloy Subjected to Periodic Underloads, *Procedia Engineering* 66, 313-322, 2013.
- Dougherty J.D., Padovan J., Srivatsan T.S. 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 closures under cyclic tension. *Damage tolerance in aircraft structures*. ASTM STP 486, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 230-242, 1971.
- Fleck N.A. Fatigue crack growth due to periodic underloads and overloads. *Acta Metall* 33, 1339-1354, 1985.
- 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.

- 
- Henkener J.A., Scheumann T.D., Grandt A.F. Fatigue crack growth behaviour of a peak-aged Al-2.56Li00.092 alloy, Proc 4th int conf on fatigue and fatigue thresholds, 957-962, 1990
- Herman W.A., Hertzberg R.W., Jaccard R. Prediction and simulation of fatigue crack growth under conditions of low closure, in advances in Fracture Research, 7th Int conf on Fracture, Houston, 2, 1417, 1989.
- Hill R., A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of Mathematical, Physical and Engineering Science, Royal Society London, 1948.
- Irwin G.R. Fracture in: Encyclopedia of Physics, S. Flugge, 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.
- Kardomateas G.A., Carlson R.L. An inelastic multiple discrete asperities model for the effects of compressive underloads in fatigue crack growth, Int journal of Fracture, 70, 99-115, 1995.
- Kemper H., Weiss B., Stickler R. An alternative presentation of the effects of the stress-ratio on the fatigue threshold, Engineering Fracture Mechanics, Volume 32, Issue 4, 591-600, 1989.
- Lee S.Y., Liaw P.K., Choo H., Rogge R.B. 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.
- Macha D.E., Grandt A.F., Wicks B.J. Effects of Gas turbine engines load spectrum variables on crack propagation. In: Effect of load spectrum variables on fatigue crack initiation and propagation. ASTM STP 714. ASTM, 1980.
- Makabe C., Purnowidodo A., McEvily A.J., Effects of surface deformation and crack closure on fatigue crack propagation after overloading and underloading, International Journal of Fatigue 26, 1341-1348, 2004.

- 
- Ng' Ang'a S.P., James M. N. Variable amplitude loading in En8 (080M40) steel: a detailed experimental study of crack growth. *Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures* 19, 207-216, 1996
- Paris P.C., Erdogan J. Critical analysis of crack growth propagation laws. *Journal of Basic Engineering* 85D, 528-534, 1963.
- Paul S.K., Tarafder S. Cyclic plastic deformation response at fatigue crack tips. *Int Journal of Pressure Vessels and Piping* 101, 81-90, 2013.
- Paul White, Barter S.A., Molent L. Observations of crack path changes caused by periodic underloads in AA7050-T7451, *International Journal of Fatigue* 30, 1267-1278, 2008.
- Pineau A.G., Pelloux R.M. Influence of strains induced martensitic transformations on fatigue crack growth rates in stainless steels. *Metallurgic Transactions* 5, 1103-1112, 1974.
- Pokluda. Dislocation-based model of plasticity and roughness-induced crack closure. *Int Journal of Fatigue* 46, 35-40, 2013.
- Pompetzki M.A., Topper T.H., DuQuesnay D.L. The effect of compressive underloads and tensile overloads on fatigue damage accumulation in SAE 1045 steel, *International Journal of Fatigue* 12 (3), 207-213, 1990.
- Ranganathan N., Adiwijayanto F., Petit J., Baillon J.P. Fatigue crack propagation mechanisms in an aluminium–lithium alloy. *Acta Metall Mater* 43, 1029-1035, 1995.
- Rice J.R. Mechanisms of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue. *Fatigue Crack Propagation*. ASTM STP 415, 247-309, 1967.
- Ritchie R.O., Suresh S., Moss C.M. Near-threshold fatigue crack growth in 2(1/4)Cr-1 Mo pressure vessel steel in air and hydrogen. *Journal of Engineering Materials and Technology* 102, 293-299, 1980.
- Romeiro F., de Freitas M., Pommier S. Effect of overloads and underloads on fatigue crack growth and interaction. In: McKeighan P.C., Ranganathan N., editors. *Fatigue Testing and Analysis Under Variable Amplitude Loading Conditions*, ASTM STP 1439. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 453-467, 2005.

- Roychowdhury S., Dodds Jr. R.H. A numerical investigation of 3-D small-scale yielding fatigue crack growth. *Engng Fracture Mech* 70, 2363-2383, 2003.
- Russ S.M. Effect of LCF on HCF crack growth of Ti-17. *Int J Fatigue* 27, 36-1628, 2005.
- 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.
- Shin C.S., Hsu S.H. On the mechanisms and behaviour of overload retardation in AISI 304 stainless steel. *International Journal of Fatigue* 15, 181-192, 1993.
- Silva F.S. Fatigue crack propagation after overloading and underloading at negative stress ratios. *Int J Fatigue* 29, 1757-1771, 2007.
- Skorupa M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading-a literature review. PART I: EMPIRICAL TRENDS. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 21, 987-1006, 1998.
- Sousa T.D., Propagação de fendas por fadiga: Influência do contacto nos parâmetros de extremidade de fenda. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal, 2014.
- Suresh S. Micromechanisms of fatigue crack growth retardation following overloads. *Engng Fract Mech* 18, 577-593, 1983.
- Suresh S., Ritchie R.O. A geometric model for fatigue crack closure induced by fracture surface roughness. *Metallurgical Transactions* 13A, 1627-1631, 1982.
- Suresh S., Ritchie R.O. On the influence of fatigue underloads on cyclic crack growth at low stress intensities. *Materials Science and Engineering* 51, 61-69, 1981.
- Takehio O., Koboyshi H. Near-threshold fatigue crack growth and crack closures in a nodular cast iron. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 10, 273-280, 1987.
- Topper T.H., Yu M.T. The effect of overloads on threshold and crack closure. *Int J Fatigue* 7, 159-164, 1985.
- Topper T.H., Yu M.T. The effects of overloads on threshold and crack closure. *Int J Fatigue* 16, 141-146, 1994.

- 
- Toribio J., Kharin V. Simulations of fatigue crack growth by blunting-re-sharpening: Plasticity induced crack closure vs. alternative controlling. *International Journal of Fatigue* 50, 72-82, 2013.
- Tvergaard V. On fatigue crack growth in ductile materials by crack-tip blunting. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 52(9), 2149-2166, 2004.
- Tvergaard V., Effect of underloads or overloads in fatigue crack growth by crack-tip blunting, *Engineering Fracture Mechanics* 73, 869-879, 2006.
- Tzou J.L., Suresh S., Ritchie R.O. Fatigue crack propagation in oil environments. I-crack growth in silicone and paraffin oils. *Acta Metallurgica* 33, 105-116, 1985.
- Voce E., The relationship between stress and strain for homogeneous deformation. *Journal of the Institute of Metals* 74, 537-562, 1948.
- Ward-Close C.M., Blom A.F., Ritchie R.O. Mechanisms associated with transient fatigue crack growth under variable amplitude loading: an experimental and numerical study. *Engineering Fracture Mechanics* 32, 613-638, 1989.
- Yang R. Prediction of fatigue crack growth under complex loading cycles. *Fatigue* 16, 397-402, 1994.
- Yu W., Ritchie R.O. Fatigue crack propagation in 2090 aluminium–lithium alloy: effect of compression overload cycles. *Trans ASME J Engng Mater Technol* 109, 81-85, 1987.
- Zaikin E., Ritchie R.O. On the role of compression overloads in influencing crack closure and the threshold condition for fatigue crack Growth in 7150 aluminum alloy, *Engineering Fracture Mechanics* 22, 35-48, 1985
- Zhang J., He X.D., Du S.Y. Analyses of the fatigue crack propagation process and stress ratio effects using the two parameter method. *International Journal of Fatigue* 27, 1314-1318, 2005.
- Zhang J., He X.D., Sha Y., Dua S.Y. The compressive stress effect on fatigue crack growth under tension–compression loading. *International Journal of Fatigue* 32, 361-367, 2010.

Zhang X., Chan A.S.L., Davies G.A.O. Numerical simulation of fatigue crack growth under complex loading sequences. *Engng Fract Mech* 42, 305-321, 1992.

Zheng X., Cui H., Engler-Pinto Jr. C.C., Su X., Wen W. Numerical modeling of fatigue crack propagation based on the Theory of Critical Distances: Effects of overloads and underloads, *Engineering Fracture Mechanics* 128, 91-102, 2014.

Zitounis V., Fatigue crack growth rates under variable amplitude load spectra containing tensile underloads, PhD Thesis, Cranfield University, 2004

Zitounis V., Irving P.E. Fatigue crack acceleration effects during tensile underloads in 7010 and 8090 aluminium alloys, *International Journal of Fatigue* 29, 108-118, 2007.

## APÊNDICE A – MODELO DE CUNHAS PLÁSTICAS

O fecho de fenda induzido por deformação plástica é o principal resultado da deformação plástica residual que ocorre atrás da extremidade da fenda.

Foi desenvolvido um modelo numérico tendo em conta que o alongamento vertical das cunhas plásticas ( $\Delta y_p$ ) é o parâmetro que controla o efeito da área plástica residual no fecho de fenda e que:

- i. O princípio da sobreposição linear aplica-se ao efeito de cada cunha plástica presente atrás da extremidade da fenda. A zona plástica residual é vista como um conjunto de cunhas plásticas verticais;
- ii. A influência do  $\Delta y_p$  decresce exponencialmente com a distância à extremidade da fenda.

Posto isto, o alongamento vertical das cunhas plásticas residuais é dado por:

$$\Delta y_p = \int_0^{r_{pm}} \varepsilon_{p,yy} dy, \quad (\text{A.1})$$

em que  $\varepsilon_{p,yy}$  é a deformação plástica vertical e  $r_{pm}$  é a extensão da zona plástica monótona, ambas definidas perpendicularmente ao flanco de fenda. Contudo, é importante referir que é necessário efetuar uma análise de elementos finitos de forma a obter o  $\Delta y_p$  ao longo do flanco da fenda.

A contribuição de cada cunha plástica para o nível de fecho de fenda depende da sua posição ( $d$ ) e da sua magnitude ( $\Delta y_p$ ), sendo modelada como:

$$PICC_i = \tilde{f}(d, \Delta y_p) = a \times d^b, \quad (\text{A.2})$$

em que  $d$  é a distância à extremidade da fenda e  $a, b$  são constantes dependentes de  $\Delta y_p$ .

Para os parâmetros  $a$  e  $b$  foram considerados polinómios de grau cinco. Posto isto, através do somatório da contribuição individual de cada cunha presente atrás da extremidade da fenda, tendo em conta o princípio da sobreposição linear, obtém-se o valor global de fecho de fenda produzido pela área residual plástica.

As constantes dos polinómios de grau cinco foram conseguidas pela minimização das diferenças entre os resultados do nível de fecho da fenda, por sua vez obtidos a amplitude constante de carregamento com o método dos elementos finitos e as



previsões do modelo obtidos a partir dos valores de  $\Delta y_p$ . O presente modelo foi desenvolvido com base em cinco casos de amplitude constante de carregamento:

- CA\_0\_80;
- CA\_0\_180;
- CA\_-60\_140.
- CA\_0\_140;
- CA\_0\_200;

Os valores de fecho foram determinados através das forças de contacto. Salienta-se que o modelo empírico proposto no ponto anterior não abrange os efeitos de outros fenómenos, como o arredondamento da extremidade de fenda. Esta aparente desvantagem é na verdade interessante uma vez que permite o isolamento do efeito das cunhas plásticas residuais.

Na Figura A.1 apresentam-se os resultados do método dos elementos finitos (MEF) e a Figura A.2 mostra as previsões do modelo. A deformação plástica residual é também apresentada na Figura A.2, podendo notar-se que a subcarga provoca uma ligeira alteração do perfil da fenda. Porém, a redução da abertura de fenda prevista pelo modelo das cunhas é significativamente inferior à observada no MEF. Isso parece indicar que a modificação da deformação plástica residual introduzida pela subcarga não explica totalmente a variação de fecho de fenda, devendo por isso existir um mecanismo adicional. Na Figura A.3 representa-se o valor do COD antes e após a aplicação de subcarga. Como se pode ver a abertura de fenda é ligeiramente superior após a solicitação, o que pode ser responsável pelo aumento do efeito da subcarga.

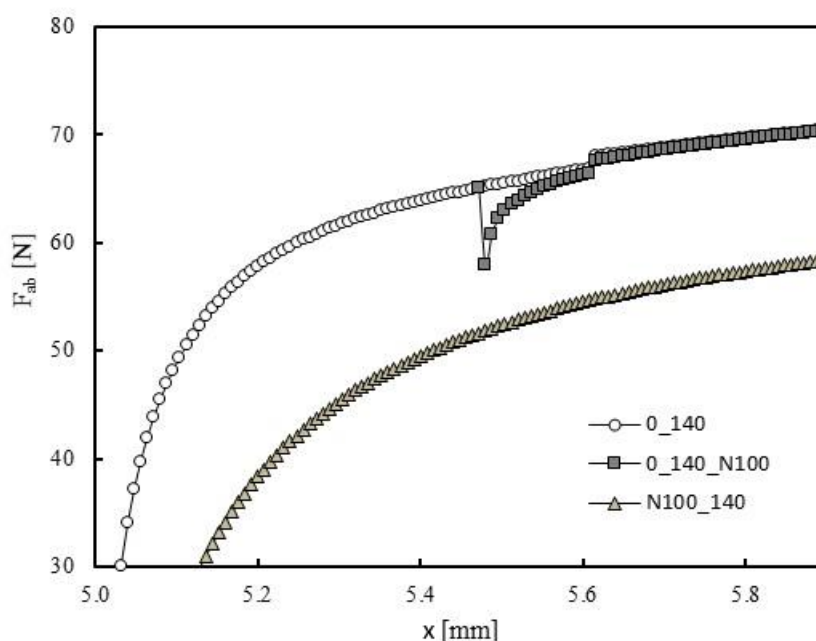


Figura A.1. Níveis de fecho de fenda pelo método de elementos finitos.

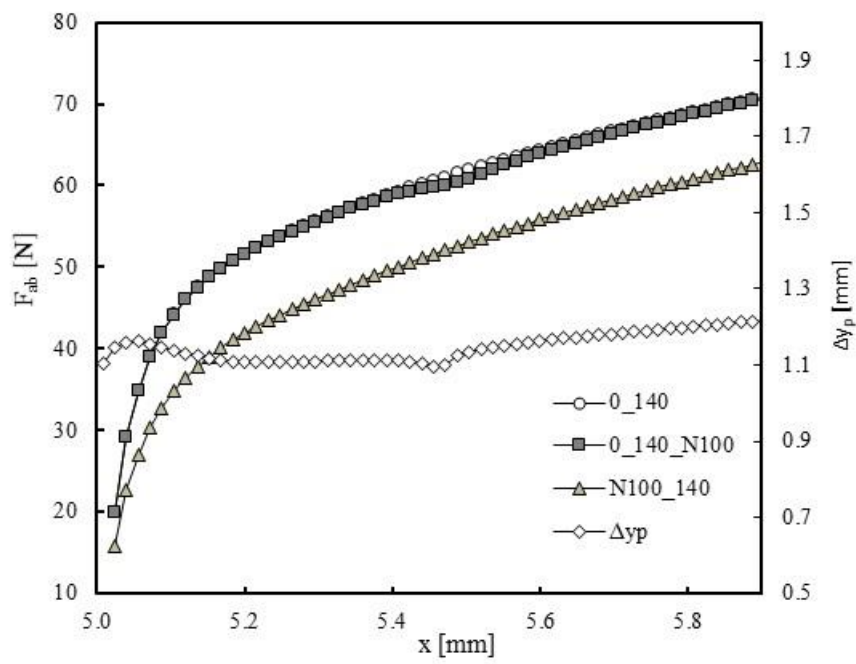


Figura A.2. Níveis de fecho de fenda previstos pelo modelo.

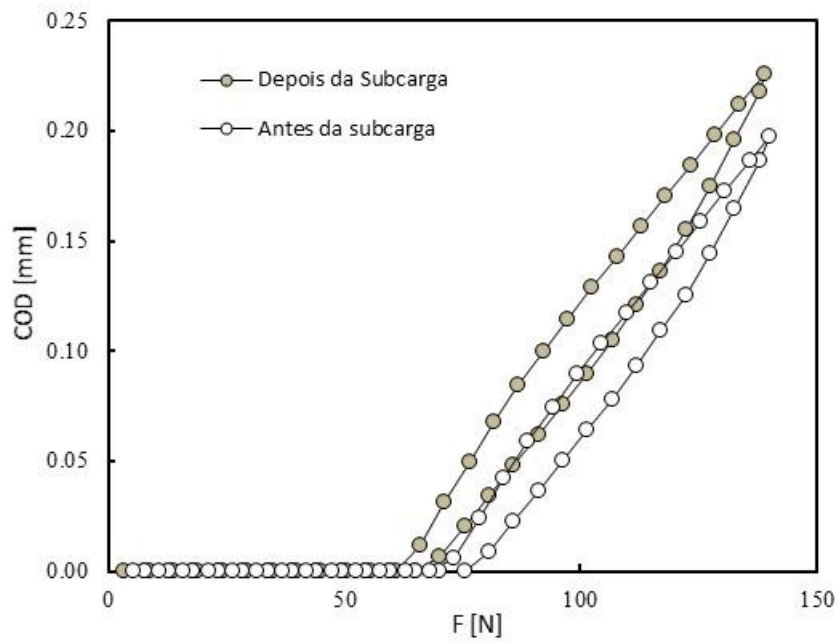


Figura A.3. Valores do COD antes e depois da aplicação da subcarga.

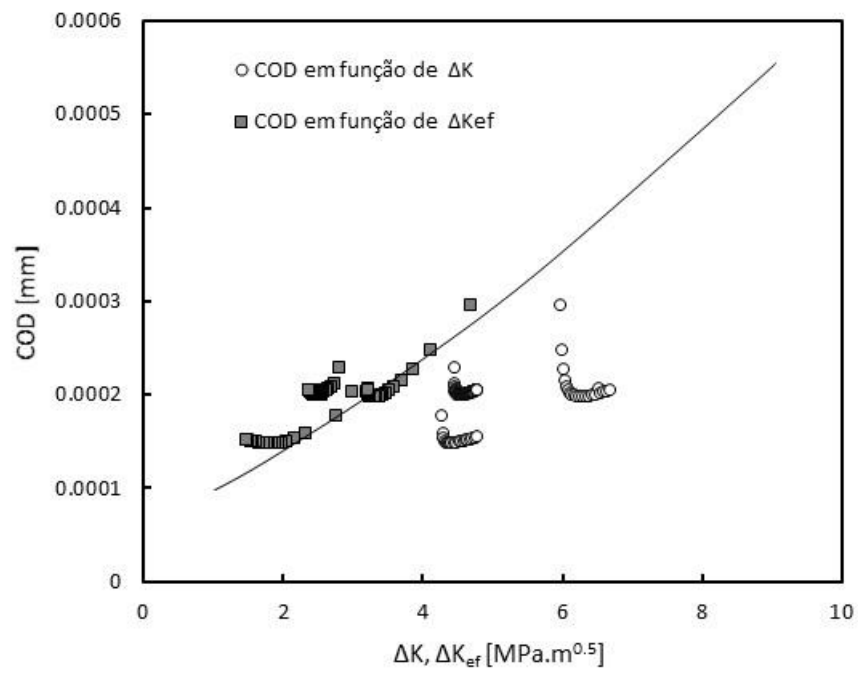
## APÊNDICE B – PARÂMETROS NÃO LINEARES

Num estudo prévio (Sousa, 2014) 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. Segundo a literatura, estes parâmetros estão intimamente ligados com a velocidade de propagação de fenda. Foi feito um elevado número de ensaios, em que se variaram os parâmetros de carga. Ainda assim, 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 contato 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  $\Delta K_{ef}$ , 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 subcargas. Assim, mediu-se o COD a carga máxima e o fecho de fenda após a aplicação de uma subcarga. O objetivo era perceber se a variação de fecho de fenda provocada pela aplicação de uma subcarga está diretamente relacionada com os parâmetros não lineares e assim com a velocidade de propagação de fenda.

Na Figura B.1 representam-se os resultados obtidos. Pode verificar-se que os pontos obtidos com  $\Delta K$  estão bastante afastados da curva mestra, porém, quando se considera  $\Delta K_{ef}$  os pontos caem sobre as curvas mestras. Deste modo, espera-se que o conceito de fecho de fenda seja capaz de explicar as variações da velocidade de propagação observadas após a aplicação de uma subcarga.



**Figura B.1.** COD em função de  $\Delta K$  e  $\Delta K_{ef}$