



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Propagação de Fendas por Fadiga: Efeitos de Blocos de Carga

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

Autor

Fábio Abrantes Castanheira

Orientador

Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes

Júri

Presidente	Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa Professor Associado com agregação da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Luís Filipe Borrego Professor Coordenador do Instituto Politécnico de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2015

“Quanto mais aumenta o nosso conhecimento mais evidente fica a nossa
ignorância”

John F. Kennedy

Aos meus pais e à Bárbara.

Agradecimentos

Esta dissertação não seria possível sem a colaboração e a ajuda de várias pessoas às quais não poderia passar sem deixar uma palavra de apreço:

- Ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Antunes, por toda a disponibilidade, paciência e conhecimento que me transmitiu ao longo desta tese. Mais que um professor foi um amigo e, sem ele, seria impossível.
- A toda a minha família principalmente aos meus pais e à minha irmã por me darem a oportunidade que eles nunca tiveram e por estarem sempre lá quando era preciso. Estarei para sempre grato.
- A todos os meus amigos que, tanto nos bons momentos como nos menos bons sempre me apoiaram e me deram uma palavra de conforto. Foram sem dúvida uma peça fundamental neste meu percurso.
- A todos os meus colegas do Laboratório de Construções Mecânicas por me apoiarem e ajudarem em tudo o que precisei ao longo desta tese.
- Ao Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica pela disponibilização do *software* DD3IMP.
- À Professora Doutora Marta Oliveira pela disponibilização do *template* da tese.
- 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

As falhas por fadiga são as mais importantes em órgãos de máquinas submetidos a cargas cíclicas. Em situações normais, os espectros reais são complexos e imprevisíveis contendo sobrecargas, subcargas e variações de blocos de carga, muitas vezes de forma aleatória. O contacto das faces da fenda tem sido utilizado para explicar o efeito da história de carregamento e da razão de tensões na velocidade de propagação de fendas por fadiga.

Esta tese tem por objetivo o estudo do efeito de variações de blocos de carga no fecho de fenda induzido por deformação plástica, mais especificamente os blocos de carga do tipo *High-Low*. Para isso recorreu-se a um programa de elementos finitos (DD3IMP) onde se variaram parâmetros de carga para posteriormente obter perfis de fenda, forças de contacto e parâmetros de fecho de fenda. Deu-se também especial atenção aos mecanismos que explicam as variações de fecho: cunhas plásticas residuais e arredondamento da extremidade de fenda.

Em casos *High-Low* após variação de carga observa-se um aumento imediato do nível de fecho seguido de um decréscimo progressivo ao valor estável correspondente ao 2º bloco de carga. O degrau de carga aumenta linearmente a distância de estabilização, enquanto o pico inicial apresenta uma estabilização. O arredondamento da extremidade de fenda explica as variações bruscas observadas nas variações de carga. A variação posterior tem a ver com a influência das cunhas plásticas residuais no nível de fecho. O arredondamento é particularmente afetado quando a carga ultrapassa a carga base anterior. Recorrendo aos parâmetros não lineares de extremidade de fenda pode-se afirmar que o conceito de fecho de fenda é válido no caso de blocos de carga do tipo *High-Low*.

Palavras-chave: Propagação de fendas por fadiga, fecho de fenda induzido por deformação plástica (PICC), blocos de carga, cunhas plásticas residuais, arredondamento da extremidade de fenda.

Abstract

The fatigue failures are the most important in machine elements subjected to cyclic loading. In normal situations, the real spectrums are complex and unpredictable, containing overloads, underloads and load blocks variations very often randomly. The contact of the crack faces has been used to explain the loading historic and stress ratios of propagation of fatigue cracks.

This thesis has the objective of studying the effect of load blocks variations on crack closure induced by plastic deformation, specifically the load blocks of High-Low type. In order to do this, it was appealed to a finite element program (DD3IMP) where it was varied the load parameters to subsequently obtain crack profiles, contact forces and crack closure parameters. It was also given a special attention to the mechanisms that explain closure variations: residual plastic wedges and blunting.

In High-Low cases after loading variation we observe an immediate increase in the closure level, followed by a progressive decrease to the stable value corresponding to the 2nd load block. The load step increases linearly the stabilization distance, while the initial peak presents a stabilization. The blunting explain the abrupt changes observed in the load variations. The subsequent variation is related to the influence of residual plastic wedges on the closure level. The blunting is particularly affected when the load exceeds the previous base load. Using the non-linear parameters of crack tip it can be said that the concept of the crack closure is valid in the case of load blocks of High-Low type.

Keywords Fatigue crack growth, plasticity induced crack closure (PICC), load blocks, residual plastic wedges, blunting.

Índice

Índice de Figuras	vi
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 Tese	3
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1. Modos de Falha em Serviço.....	4
2.2. Fadiga.....	4
2.3. Fenómeno de Fecho de Fenda	7
2.4. Variação de Blocos de Carga.....	9
3. Procedimento Numérico	12
3.1. Geometria.....	12
3.2. Material.....	12
3.3. Malhagem	14
3.4. Propagação de Fenda	15
3.5. Carregamento e Condições de Fronteira.....	15
3.6. Parâmetros para Quantificação de Abertura de Fenda.....	19
3.7. Parâmetros de Extremidade de Fenda.....	19
3.8. Programa de Elementos Finitos	20
4. Apresentação e análise de resultados.....	23
4.1. Caso de Referência	23
4.2. Outros Parâmetros.....	28
4.2.1. <i>High-Low</i> ($F_{\min} = \text{constante}$) vs <i>High-Low</i> ($F_{\max} = \text{constante}$).....	28
4.2.2. <i>High-Low</i> ($F_{\min} = \text{constante}$) vs <i>Low-High</i> ($F_{\min} = \text{constante}$).....	30
4.2.3. <i>High-Low</i> (Tensão Plana) vs <i>High-Low</i> (Deformação Plana).....	33
4.3. Varrimento	36
4.3.1. Efeito de $F_{\max 2}$	36
4.3.2. Efeito de ΔF_{\max} ($F_{\max BL} - F_{\max 2} = \text{constante}$)	37
4.3.3. Efeito de $F_{\max BL}$	37
4.3.4. Distância de Estabilização	38
4.3.5. Valor do Pico de Abertura de Fenda	39
5. Discussão de resultados	41
5.1. Mecanismos	41
5.1.1. Cunhas Plásticas	41
5.1.2. Arredondamento da Extremidade de Fenda	46

5.2. Parâmetros Não Lineares de Extremidade de Fenda	53
6. Conclusões.....	55
Referências Bibliográficas.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Curva típica da/dN- ΔK	6
Figura 2.2. Parâmetros de carregamento cíclico.....	8
Figura 2.3. Exemplo do tipo de carregamento utilizado.....	10
Figura 2.4. Exemplo da variação de velocidade de propagação de uma fenda após aplicação de uma variação de carga <i>High-Low</i> (a) e <i>Low-High</i> (b). (Borrego, 2001).....	11
Figura 3.1. Geometria do provete e da fenda.	12
Figura 3.2. Pormenor da malha de elementos finitos.	14
Figura 3.3. Condições de fronteira e respetivo carregamento.	15
Figura 3.4. Exemplo de curva tensão-deformação e de como foi medido o intervalo de deformação plástica e a energia dissipada por ciclo.....	20
Figura 3.5. Fluxograma do procedimento numérico.	22
Figura 4.1. Perfil de fenda dos casos de referência para $F=100$ N.....	23
Figura 4.2. Perfil de fenda dos casos de referência a carga máxima.	24
Figura 4.3. Forças de contacto nos casos de referência.....	25
Figura 4.4. $PICC_{Contact}$ relativo aos casos de referência.....	26
Figura 4.5. $PICC_{Node1}$ relativo aos casos de referência.....	26
Figura 4.6. Perfis de Fenda: HL_0_180_0_140 vs HL_0_180_140_180 (carga máxima). 29	
Figura 4.7. $PICC_{Node1}$: HL_0_180_0_140 vs HL_0_180_140_180.	29
Figura 4.8. Perfis de Fenda: HL_0_180_0_140 vs LH_0_140_0_180 (carga máxima).	30
Figura 4.9. Forças de contacto: HL_0_180_0_140 vs LH_0_140_0_180.	31
Figura 4.10. $PICC_{Contact}$: HL_0_180_0_140 vs LH_0_140_0_180.	32
Figura 4.11. $PICC_{Node1}$: HL_0_180_0_140 vs LH_0_140_0_180.	32
Figura 4.12. Perfil de Fenda: HL_0_140_0_120 (TP vs DP) (carga máxima).....	33
Figura 4.13. Forças de contacto: HL_0_140_0_120 (TP vs DP).	34
Figura 4.14. $PICC_{Contact}$: HL_0_140_0_120 (TP vs DP).	35
Figura 4.15. $PICC_{Node1}$: HL_0_140_0_120 (TP vs DP).	35
Figura 4.16. Efeito de $F_{máx2}$: HL_0_140_0_80 e HL_0_140_0_120.	36
Figura 4.17. Efeito de $\Delta F_{máx}$: $F_{máxBL} - F_{máx2} = \text{constante}$	37
Figura 4.18. Efeito de $F_{máxBL}$: HL_0_140_0_120 e HL_0_180_0_120.	38

Figura 4.19. Efeito de ΔF_3 na distância de estabilização.....	39
Figura 4.20. Efeito de ΔF_3 no valor do pico de abertura de fenda.....	40
Figura 5.1. Comparação entre o MEF e o Modelo Analítico (BL_-140_140).....	43
Figura 5.2. FEM vs Modelo Analítico [HL_0_140_0_120].....	44
Figura 5.3. FEM vs Modelo Analítico [HL_0_140_80_140].....	45
Figura 5.4. FEM vs Modelo Analítico [HL_0_140_30_110].....	45
Figura 5.5. FEM vs Modelo Analítico [LH_0_140_0_180].....	46
Figura 5.6. OL_0_140_200: Variação do COD (medido a 100N).....	47
Figura 5.7. COD (medido a 80 N) para os casos HL_0_140_0_120 e HL_0_140_0_80. ...	48
Figura 5.8. Efeito do F_{OL} no COD.....	50
Figura 5.9. Efeito de ΔF_{ol} no COD residual.	50
Figura 5.10. Correlação entre ΔCOD e ΔF_{OL}	51
Figura 5.11. COD no caso LH_0_140_0_180 (zona de transição).	52
Figura 5.12. Influência da variação <i>High-Low</i> no <i>Blunting</i>	52
Figura 5.13. Pontos de Gauss em estudo.	53
Figura 5.14. Efeito de ΔK e ΔK_{ef} na energia dissipada.	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química da Liga AA6016-T4 (percentagem em peso %)	13
Tabela 3.2: Carregamentos simulados.....	17
Tabela 3.3: Carregamentos simulados (continuação).....	18
Tabela 5.1: Energia Dissipada e Deformação Plástica em HL_0_140_0_120.....	53

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

a = Comprimento de fenda

da/dN – Velocidade de propagação

DP – Estado plano de deformação

F_{ab} – Carga de abertura de fenda

$F_{máxBL}$ – Força máxima de solitação base

$F_{mínBL}$ - Força mínima da solitação base

$F_{máx2}$ – Força máxima após a variação de blocos de carga

$F_{mín2}$ – Força mínima após a variação de blocos de carga

F_{OL} – Força máxima correspondente à sobrecarga

K – Fator de intensidade de tensão

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

$K_{máx}$ – Fator de intensidade de tensão máximo

$K_{mín}$ – Fator de intensidade de tensão mínimo

$M(T)$ – Provete com fenda central

R – Razão de tensões

R_{eff} – Razão efetiva de tensões ($=\sigma_{ab}/\sigma_{máx}$)

TP – Estado plano de tensão

U – Parâmetro normalizado da razão de carga

Δa_{stb} – Valor de propagação requerida para a estabilização

ΔF_{peak} – Valor do pico de abertura de fenda

ΔF_1 – Gama de tensões da solitação base ($F_{máxBL} - F_{mínBL}$)

ΔF_2 – Gama de tensões do bloco de carga final ($F_{máx2} - F_{mín2}$)

ΔF_3 – Diferença entre $F_{máxBL}$ e $F_{máx2}$

ΔF_4 – Diferença entre $F_{mínBL}$ e $F_{mín2}$

ΔK – Gama do fator de intensidade de tensões

ΔK_{ef} – Gama efetiva do fator de intensidade de tensões

$\sigma_{\text{máx}}$ – Tensão máxima

$\sigma_{\text{mín}}$ – Tensão mínima

σ_{ab} – Tensão de abertura de fenda

Siglas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CEMUC – Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

COD – Deslocamento de abertura de fenda

DD3IMP – *Three-Dimensional Elasto-Plastic Finite Element Program*

DEMUC – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

EN – *European Normalization*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

MEF – Método dos elementos finitos

MFLE – Mecânica de Fratura Linear Elástica

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

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

As falhas por fadiga são responsáveis por cerca de 80% a 90% das falhas de serviço em peças sujeitas a cargas cíclicas (Branco *et al.*, 2012). Por esta razão, o dimensionamento à fadiga assume um papel de extrema importância no projeto de engenharia. Se a propagação da fenda se consumir até à rotura final podem advir daí vários danos, tanto humanos como materiais e económicos. É então essencial aumentar a resistência e a vida útil das estruturas, atrasando ou mesmo eliminando o crescimento das fendas por fadiga.

As fraturas por fadiga são normalmente caracterizadas por um período de iniciação da fenda (onde se dá a nucleação e o crescimento microscópico), por um período de propagação da fenda (onde se dá o crescimento macroscópico) e pela rotura final do material. Em peças onde existam defeitos ou entalhes, a fase de propagação assume uma maior importância.

A velocidade de propagação de fenda é afetada por um fenómeno extrínseco denominado fecho de fenda. O fenómeno de fecho de fenda ocorre quando existe contacto entre as faces da fenda durante um ciclo de carregamento. Este fenómeno tem sido estudado numericamente, analiticamente e experimentalmente. Este acontecimento provoca alterações relevantes nos campos de tensão e de deformação nas zonas adjacentes à extremidade da fenda que afetam a velocidade de propagação da mesma. Essas alterações devem ser por isso estudadas e compreendidas para que se possa prever com maior rigor o seu efeito no fenómeno de fadiga. Existem vários tipos de fecho de fenda tais como o fecho de fenda induzido por plasticidade (PICC) (Richie *et al.*, 1980), o fecho de fenda induzido por óxidos (OICC) (Suresh *et al.*, 1981), o fecho de fenda induzido por rugosidade (RICC) (Suresh *et al.*, 1982), o fecho de fenda induzido pela penetração de um líquido viscoso entre as faces da fenda (Tzou *et al.*, 1985), o fecho de fenda induzido por uma transformação de fase (Pineau e Pelloux, 1974) e o fecho de fenda induzido pelo pó de grafite (Takeshi e

Koboyashi. 1987). O fenómeno de fecho de fenda é porém um tema que ainda gera bastante controvérsia na comunidade científica, devido à divergência sobre o efeito do contacto das faces da fenda.

Esta dissertação vai incidir o seu estudo no fecho de fenda induzido por deformação plástica (PICC), uma vez que é o tipo de fecho mais relevante no regime II de propagação (regime onde é válida a Lei de Paris). Pretende-se estudar numericamente o efeito de variações de carga, e em particular de blocos de carga do tipo *High-Low*, uma vez que são poucos os estudos numéricos existentes.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo do efeito de variações de blocos de carga no fecho de fenda induzido por deformação plástica. Pretendem-se estudar de um modo mais particular os blocos de carga do tipo *High-Low*.

Como objetivos específicos podem referir-se:

- Estudo do efeito das variações de carga do tipo *High-Low* com incidência nos efeitos no perfil de fenda, nas forças de contacto e nos parâmetros de fecho de fenda ($PICC_{Node1}$ e $PICC_{Contact}$).
- Relacionar os parâmetros das curvas de fecho com os parâmetros de carga. Para isso considerou-se um vasto leque de parâmetros de carga.
- Estudar comparativamente o efeito de outros parâmetros, nomeadamente, blocos de carga do tipo *Low-High*, e o estado de tensão (tensão plana e deformação plana).
- Identificar e quantificar os mecanismos que explicam as variações de fecho: cunhas plásticas residuais e arredondamento da extremidade da fenda. Utilizar o modelo das cunhas plásticas para prever o efeito das cunhas plásticas residuais.
- Estudar parâmetros não lineares de extremidade de fenda para validar a aplicação do conceito de fecho.

A estratégia utilizada no desenvolvimento deste estudo passou por uma abordagem numérica, utilizando o *software* DD3IMP desenvolvido pelo Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

1.3. Estrutura da Tese

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos sendo a sua estrutura a seguinte:

- Capítulo 2: Neste capítulo pode-se encontrar a revisão bibliográfica. Nela estão descritos conceitos e definições que o autor achou relevante para a compreensão dos capítulos seguintes.
- Capítulo 3: Aqui encontra-se descrito o procedimento numérico onde se pode encontrar informação acerca da geometria e material do provete, da malhagem, do programa de elementos finitos utilizado, entre outros aspetos.
- Capítulo 4: Apresentação e análise dos resultados obtidos com especial atenção para o caso de referência, para o varrimento dos parâmetros de carga e para a exploração de outros parâmetros.
- Capítulo 5: Discussão de resultados obtidos e estudados ao longo da dissertação e análise dos mecanismos subjacentes ao fenómeno de fecho. Faz-se ainda a validação do conceito de fecho utilizando parâmetros não lineares de extremidade de fenda.
- Capítulo 6: Este é o último capítulo e nele estão descritas as conclusões finais desta dissertação assim como propostas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Modos de Falha em Serviço

O dimensionamento de componentes mecânicos é realizado com o objetivo de diminuir a probabilidade de ocorrência de ruína dos mesmos. Os componentes mecânicos podem entrar em ruína devido a várias causas, sendo que as mais comuns e que devem ser previstas em projeto são:

- Ruína por rotura: fadiga, rotura súbita (frágil ou dúctil), fluência localizada, corrosão sob tensão.
- Ruína por deformação: deformação plástica (devido a cargas excessivas), deformação elástica excessiva, fluência generalizada (deformação contínua a carga constante).
- Ruína por degradação superficial: corrosão, erosão, desgaste, cavitação, gripagem, fretting-fadiga e fadiga de contato.

As falhas por fadiga são as mais importantes em órgãos de máquinas, afetando cerca de 80% a 90% das peças em serviço (Branco *et al.*, 2012).

2.2. Fadiga

A fadiga é um fenómeno que se verifica em componentes estruturais sujeitos a cargas dinâmicas e que ocorre a tensões inferiores às da tensão limite de elasticidade do material. A falha por fadiga contempla normalmente três fases principais:

- i. Iniciação da fenda: período que engloba a nucleação e o crescimento microscópico da fenda. Esta fase ocorre normalmente à superfície, zona onde há menos constrangimento o que favorece a ocorrência de deformação plástica, ou nas zonas de maior concentração de tensões

(entalhes, microfissuras, reentrâncias, etc.). O efeito desfavorável do meio ambiente também pode ser um fator importante.

- ii. Propagação da fenda: esta fase pode-se subdividir em duas fases: uma fase inicial de propagação lenta e uma segunda fase de propagação mais rápida. Na fase inicial a propagação faz-se segundo os planos cristalinos do material onde existe uma elevada tensão de corte, afetando apenas alguns grãos. Na fase posterior, a propagação acontece na direção perpendicular à da aplicação da carga. Nesta fase, a fenda cresce devido ao repetido arredondamento e afiamento da extremidade da fenda (em materiais dúcteis).
- iii. Ruptura final: Esta fase é alcançada quando a fenda se propaga a uma velocidade elevada e adquire um tamanho crítico.

A abordagem da Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE) tem-se revelado fundamental para o estudo da propagação de fendas por fadiga. Irwin (1958) demonstrou que a magnitude da tensão à frente da extremidade da fenda poderia ser expressa em termos do fator de intensidade de tensão (K). Este fator é função do carregamento, da dimensão da fenda, do modo de deformação da fenda e da geometria do sólido. Tem como função quantificar a intensidade de tensões provocadas pela existência da fenda e é dado pela expressão seguinte:

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

onde Y é um parâmetro geométrico, σ representa a tensão aplicada e a o comprimento de fenda. Quando K atinge um valor crítico, K_c , ocorre ruptura instável do material.

Tendo em conta estes conceitos, considera-se que o estudo da propagação de fendas por fadiga está relacionado com a gama do fator de intensidade de tensões (ΔK), em que:

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

onde $K_{m\acute{a}x}$ e $K_{m\acute{i}n}$ são, respetivamente, o valor máximo e mínimo de K durante um ciclo de carregamento.

Na Figura 2.1 pode-se ver a relação entre a velocidade de propagação da fenda da/dN e a gama do fator de intensidade de tensão, ΔK .

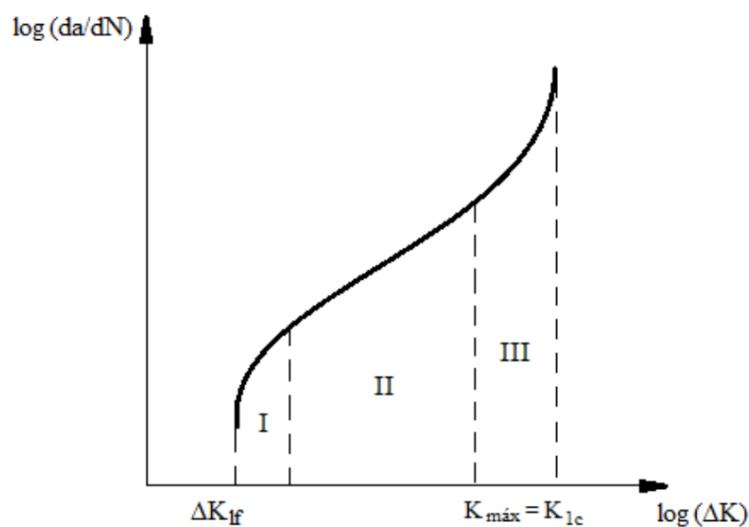


Figura 2.1. Curva típica da/dN - ΔK .

Observando a figura é possível identificar três regimes de propagação. No regime I o crescimento da fenda faz-se de uma forma lenta ao passo que no regime III, derivado ao $K_{máx}$ se aproximar do valor crítico, a fenda propaga-se rapidamente. No regime II é notório que o logaritmo da velocidade de propagação e o logaritmo da gama do fator de intensidade de tensões apresentam uma relação de linearidade. Essa relação é caracterizada pela Lei de Paris (1963):

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

em que C e m são constantes obtidas experimentalmente, que dependem de vários fatores nomeadamente do material. A propagação estável acaba quando o valor de K máximo atinge o valor crítico do fator de intensidade de tensão (também conhecido como tenacidade à fratura do material) ou quando a secção útil não suporta os esforços aplicados.

A tensão média é também um parâmetro que se deve ter em conta quando se fala de propagações de fenda. R é a razão entre as tensões mínima e máxima do ciclo de carga ($R = \sigma_{mín}/\sigma_{máx}$) e o seu aumento conduz geralmente a um aumento da velocidade de propagação da fenda.

2.3. Fenómeno de Fecho de Fenda

O conceito de fecho de fenda foi introduzido por Elber (1971) e tem sido adotado como principal mecanismo responsável pelos efeitos da tensão média. Elber defendia que a velocidade de propagação da fenda não é apenas influenciada pelo estado em que se encontra a frente da extremidade da fenda mas também pela natureza do contacto entre as faces da fenda existente atrás da sua extremidade. Estes estudos revelaram-se de extrema importância para compreender a dependência da velocidade de propagação de fatores como o comprimento da fenda, o histórico de carregamento, o estado de tensão, entre outros (Borrego, 2001).

Segundo Elber, só pode ocorrer propagação da fenda durante a parte do ciclo de carga em que esta se encontre totalmente aberta. Quando a fenda está fechada pode transmitir tensões de compressão entre as suas faces o que faz com que a extremidade da fenda deixe de ser um ponto de concentração de tensões. Posto isto, foi definida uma nova força motora de propagação de fendas por fadiga designada por ΔK_{ef} (gama efetiva do fator de intensidade de tensões):

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

em que K_{ab} é o fator de intensidade de tensão para o qual a fenda se encontra totalmente aberta. ΔK_{ef} e ΔK podem-se relacionar através da seguinte expressão:

$$\Delta K_{ef} = U \times \Delta K \quad (2.5)$$

onde U é o parâmetro normalizado da razão de carga:

$$U = \frac{\Delta K_{ef}}{\Delta K} = \frac{K_{m\acute{a}x} - K_{ab}}{K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n}} \quad (2.6)$$

A Figura 2.2 ilustra um ciclo de carga onde está indicado o valor de ΔK_{ef} (valor que controla o propagação da fenda).

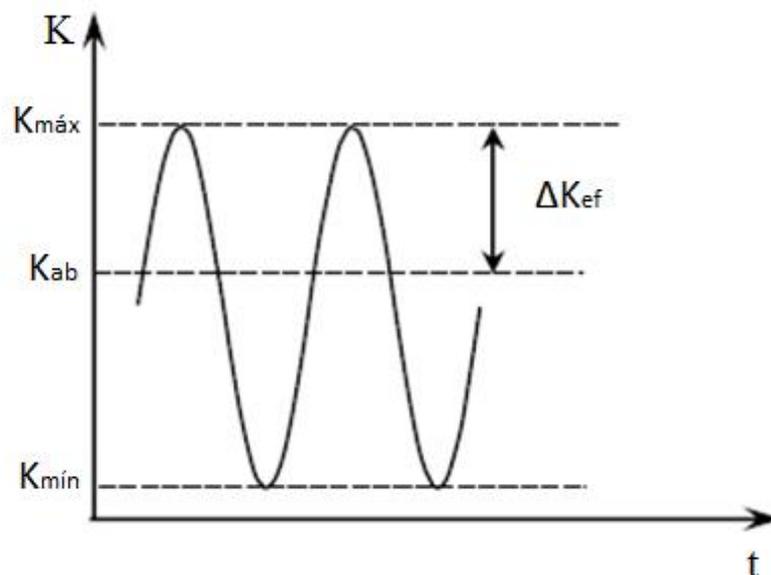


Figura 2.2. Parâmetros de carregamento cíclico.

Existem vários mecanismos de fecho de fenda sendo os mais comuns o fecho de fenda induzido por plasticidade (PICC) (Richie *et al.*, 1980), o fecho de fenda induzido por óxidos (OICC) (Suresh *et al.*, 1981), o fecho de fenda induzido por rugosidade (RICC) (Suresh *et al.*, 1982), o fecho de fenda induzido pela penetração de um líquido viscoso entre as faces da fenda (Tzou *et al.*, 1985), o fecho de fenda induzido por uma transformação de fase (Pineau e Pelloux, 1974) e o fecho de fenda induzido pelo pó de grafite (Takeshi e Koboyashi, 1987). De notar que alguns destes mecanismos apenas ocorrem em condições especiais ou em alguns materiais.

Esta dissertação vai centrar-se no estudo do PICC uma vez que é o mecanismo mais relevante no regime II de propagação de fenda. O fecho de fenda depende de vários parâmetros, nomeadamente, do material, da geometria e do carregamento, sendo que aqui se pretende estudar o efeito da carga. O estudo vai ser feito numericamente com base no método dos elementos finitos. Os modelos numéricos têm sido utilizados com sucesso para prever o fenómeno de fecho de fenda induzido por deformação plástica. Esta análise consiste basicamente em discretizar e modelar o corpo fissurado com comportamento elasto-plástico, em aplicar uma carga cíclica, em propagar a fenda e em medir o nível de fecho de fenda. Os primeiros modelos foram desenvolvidos nos anos setenta por Newman (Newman e JC, 1976), tendo desde então sido desenvolvido um grande número de estudos (McClung e Sehitoglu, 1989), (Chermani *et al.*, 1989), (Pommier e Freitas, 2002), (Wei e James, 2004)

e (de Matos e Nowell, 2007). A relativa facilidade de implementação do procedimento nos programas comerciais de elementos finitos tem promovido o aparecimento de novos estudos. O procedimento tem um grande número de parâmetros e a maior parte dos estudos numéricos tem-se centrado na otimização desses parâmetros. Após a otimização do procedimento numérico é relativamente simples adaptá-lo ao estudo de novos materiais, condições de carga ou comprimentos de fenda, o que faz com que as abordagens numéricas sejam ideais para estudos paramétricos. Além disso, permitem uma compreensão dos mecanismos básicos, e assim explicar as tendências experimentais.

2.4. Variação de Blocos de Carga

Os espectros reais de carga têm normalmente variações mais ou menos aleatórias. Na previsão de vida das estruturas e componentes sujeitos a cargas variáveis consideram-se normalmente espectros simplificados, de modo a reduzir o esforço de ensaio em laboratório. Além disso, para a compreensão dos mecanismos subjacentes ao fenómeno de propagação de fendas por fadiga é importante estudar casos de carga simples, nomeadamente sobrecargas, subcargas e blocos de carga.

O objetivo principal desta dissertação é o estudo do efeito dos blocos de carga, também conhecidos como degraus de carga, na propagação de fendas por fadiga. Em solicitações de amplitude constante, para além do material e de parâmetros geométricos, a propagação da fenda depende apenas da carga máxima e mínima aplicada. Quando se fala em blocos de carga, o crescimento da fenda por fadiga torna-se um pouco mais complexo pois vão entrar mais fatores em consideração e as amplitudes e valores médios das tensões anteriores vão também ser fatores determinantes, formando o chamado “histórico de carregamento”.

Na Figura 2.3 pode-se observar os parâmetros independentes a ter em conta quando se estudam os efeitos dos blocos de carga. $F_{\text{máxBL}}$ e $F_{\text{mínBL}}$ representam respetivamente as forças máximas e mínimas do bloco de carga inicial e $F_{\text{máx2}}$ e $F_{\text{mín2}}$ representam as forças máximas e mínimas do bloco de carga aplicado posteriormente. Para

além destes parâmetros, pode ainda considerar-se ΔF_1 , ΔF_2 , ΔF_3 , e ΔF_4 , que são as gamas de tensões representadas na Figura 2.3.

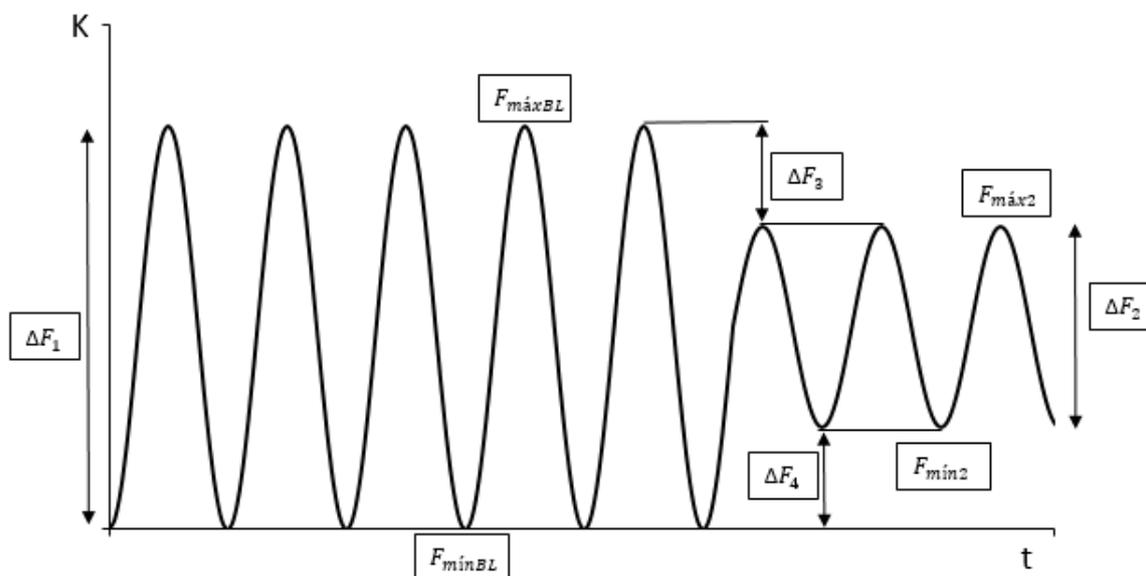


Figura 2.3. Exemplo do tipo de carregamento utilizado.

Na Figura 2.4 pode-se observar a comparação entre a velocidade de propagação de fenda aquando da aplicação de uma variação de carga do tipo *High-Low* e do tipo *Low-High*. Na Figura 2.4 (a) (*High-Low*) nota-se que após a aplicação da variação de carga, a velocidade de propagação sofre um efeito de retardamento, estabilizando depois num valor correspondente ao de ΔK_2 . Um aspeto relevante é que o retardamento máximo é sempre imediato à variação de carga (Sehitoglu e McDiarmid, 1980), (Ward-Close *et al.*, 1989), (Ng'Ang'a e James, 1996). Normalmente, o retardamento da velocidade de propagação da fenda aumenta com o decréscimo de ΔK (Sehitoglu e McDiarmid, 1980), (McDiarmid *et al.*, 1984) podendo mesmo ocorrer paragem da fenda quando o nível de ΔK do bloco de menor amplitude for inferior a 60% relativamente ao bloco de maior amplitude (Sehitoglu e McDiarmid, 1980), (Borrego, 2001).

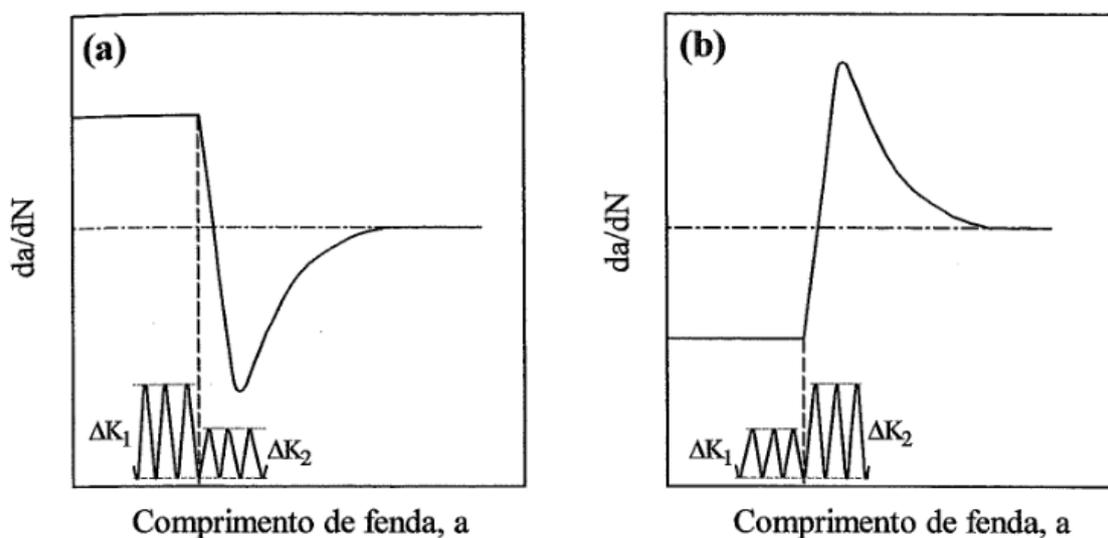


Figura 2.4. Exemplo da variação de velocidade de propagação de uma fenda após aplicação de uma variação de carga *High-Low* (a) e *Low-High* (b). (Borrego, 2001).

Na Figura 2.4 (b) observa-se exatamente o oposto do verificado anteriormente. Como se trata de uma variação *Low-High*, a velocidade de propagação sofre um aumento instantâneo superior ao que era esperado para este nível de carga (Ward-Close *et al.*, 1989), (Ng'Ang'a e James, 1996) estabilizando depois num valor correspondente a ΔK_2 .

Apesar dos trabalhos já desenvolvidos centrados no estudo do efeito dos blocos de carga, o efeito destes no fecho de fenda e na propagação de fendas por fadiga não está ainda totalmente compreendido. Os estudos numéricos de fecho de fenda em particular são muito escassos, sendo que estes são uma ferramenta importante para compreender os mecanismos subjacentes ao efeito dos blocos de carga.

Tabela 3.1. Composição química da Liga AA6016-T4 (percentagem em peso %)

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
AA6016-T4	1.0-1.5	<0.5	<0.2	<0.2	0.25-0.6	<0.1	<0.2	<0.15

O fenómeno de fecho de fenda está bastante ligado à deformação plástica que ocorre na extremidade da fenda por ação do carregamento cíclico. Estes comportamentos mecânicos determinam a forma como as cargas e deformações afetam material. Sendo assim é fundamental modelar corretamente o comportamento elasto-plástico do material. A liga em estudo apresenta características de comportamento elasto-plástico que são um misto de encruamento isotrópico e cinemático.

No caso do comportamento isotrópico do material, durante a simulação foi usado o modelo de Voce. Este é descrito pela seguinte expressão:

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

Para descrever a componente cinemática durante a simulação usou-se uma lei de saturação (Haddadi, 2006):

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

Nas equações (3.1) e (3.2), ϵ^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:

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

onde F, G, H, L e N são coeficientes que definem o estado de anisotropia do material. A caracterização do comportamento elasto-plástico do material foi efetuada realizando ensaios de tração e de corte em trajetórias simples e complexas (Chaparro, 2008). As constantes determinadas para o material em estudo foram: $Y_0 = 124 \text{ MPa}$, $R_{sat} = 291 \text{ MPa}$, $n_v = 9.5$, $C_x = 146.5$, $X_{sat} = 34.90 \text{ MPa}$, $F = 0.5998$, $G = 0.5862$, $H = 0.4138$ e $L = M = N = 1.265$.

3.3. Malhagem

Na Figura 3.2 está demonstrada a malha de elementos finitos e como se pode observar esta apresenta níveis de refinamento diferentes.

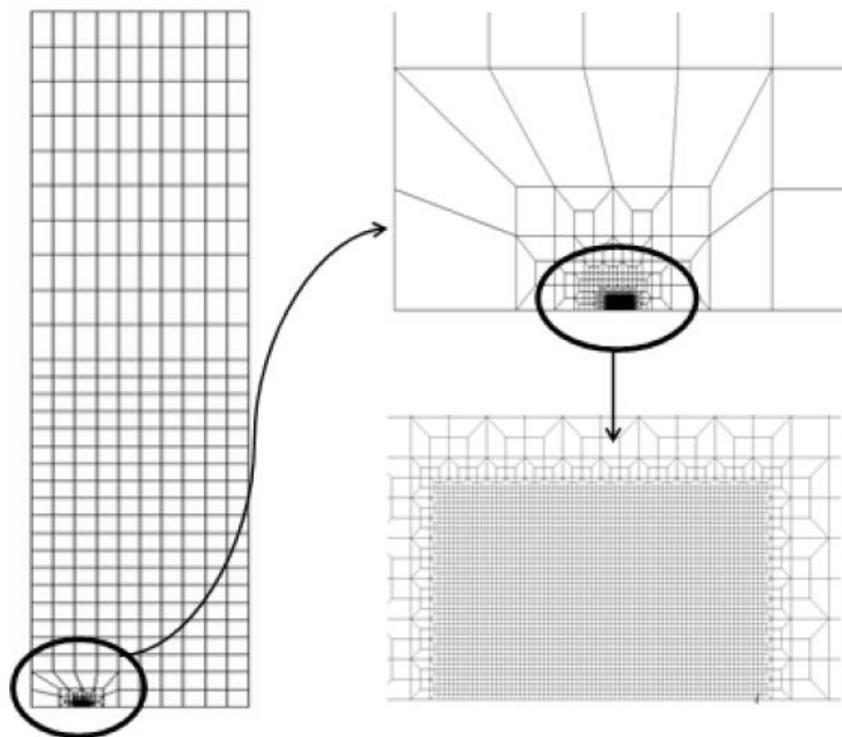


Figura 3.2. Pormenor da malha de elementos finitos.

Junto da extremidade da fenda há grandes gradientes de tensão e deformação, pelo que é necessário utilizar aí elementos finitos bastante pequenos. Além disso, a dimensão destes elementos afeta o incremento mínimo de fenda. Uma vez que nas zonas mais afastadas da extremidade da fenda a análise não é tão importante, optou-se por um refinamento de malha mais reduzido diminuindo assim o peso numérico das simulações. Na zona mais refinada foram considerados elementos com $8 \mu m^2$. Para obter a malha 3D, a malha 2D foi extrudada na direção da espessura. Considerou-se somente uma camada de elementos em espessura, com uma dimensão de 0.1 mm.

3.4. Propagação de Fenda

Ao longo da fase de simulação foram feitas 160 propagações de fenda com $8\ \mu\text{m}$ cada uma. A propagação foi simulada libertando um elemento após cada 2 ciclos de carga e sempre a carga mínima. A variação do bloco de carga foi feita ao segundo ciclo da 60ª propagação, como se descreve seguidamente.

3.5. Carregamento e Condições de Fronteira

Atendendo à simetria do provete em termos de geometria, material e carregamento, considerou-se apenas 1/8 deste, aplicando as condições de simetria adequadas. Sendo assim conseguiu-se reduzir de uma forma significativa o peso numérico associado a cada simulação sem que haja alteração das previsões.

A simulação do contacto da fenda foi feita introduzindo um plano paralelo à fenda, atrás da extremidade da mesma.

Na Figura 3.3 podem observar-se as condições de fronteira utilizadas nos ensaios assim como o carregamento imposto.

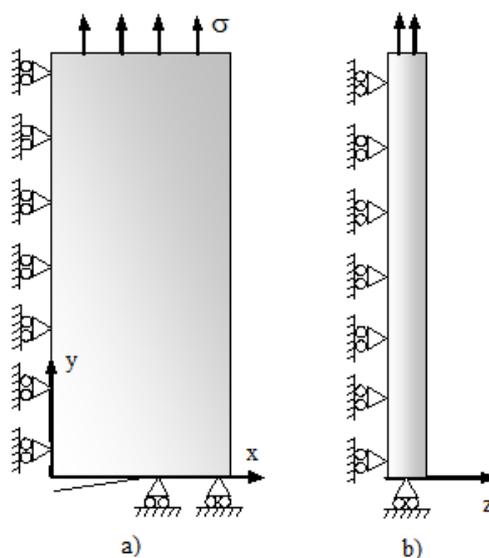


Figura 3.3. Condições de fronteira e respetivo carregamento.

A seleção dos carregamentos a utilizar foi feita de modo a que se abrangesse o maior número de casos possíveis, dentro daquilo que se considera razoável.

A gama de tensões, ΔK , é a diferença entre $K_{\text{máx}}$ e $K_{\text{mín}}$, sendo estes obtidos através da expressão seguinte:

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

onde $a_1 = 1.187086$, $a_2 = -0.0680$, $a_3 = 0.113$ e $a_4 = 1.009325$ são constantes obtidas numericamente pelo Professor Doutor Fernando Antunes, W a largura do provete e a o comprimento de fenda. De notar que a porção do provete simulado tem uma espessura de 0,1 mm e largura de 30 mm.

Para uma melhor identificação de cada caso, recorreu-se à seguinte nomenclatura: HL_F_{mín}BL_F_{máx}BL_F_{mín2}_F_{máx2}, sendo HL uma abreviatura de *High-Low*; LH_F_{mín}BL_F_{máx}BL_F_{mín2}_F_{máx2}, sendo LH uma abreviatura de *Low-High* e BL_F_{mín}BL_F_{máx}BL para os casos onde não houve variação de blocos de carga.

Na Tabela 3.2 e Tabela 3.3 podem-se consultar os casos *High-Low* simulados.

Tabela 3.2: Carregamentos simulados.

Designação	$F_{\text{mínBL}}$	$F_{\text{máxBL}}$	$F_{\text{mín2}}$	$F_{\text{máx2}}$
HL_0_140_0_40	0	140	0	40
HL_0_140_0_80				80
HL_0_140_0_120				120
HL_0_140_40_140	0	140	40	140
HL_0_140_80_140			80	
HL_0_140_120_140			120	
HL_0_140_50_90	0	140	50	90
HL_0_140_30_110			30	110
HL_0_140_10_130			10	130
HL_-60_140_-60_20	-60	140	-60	20
HL_-60_140_-60_60				60
HL_-60_140_-60_100				100
HL_-60_140_60_140	-60	140	60	140
HL_-60_140_80_140			80	
HL_-60_140_100_140			100	
HL_-60_140_120_140			120	
HL_0_200_0_60	0	200	0	60
HL_0_200_0_100				100
HL_0_200_0_140				140
HL_0_200_0_180				180

Tabela 3.3: Carregamentos simulados (continuação).

Designação	$F_{\text{mínBL}}$	$F_{\text{máxBL}}$	$F_{\text{mín2}}$	$F_{\text{máx2}}$
HL_-140_140_-140_20	-140	140	-140	20
HL_-140_140_-140_60				60
HL_-140_140_-140_100				100
HL_-140_140_60_140	-140	140	60	140
HL_-140_140_80_140			80	
HL_-140_140_100_140			100	
HL_-140_140_120_140			120	
HL_0_180_0_40	0	180	0	40
HL_0_180_0_80				80
HL_0_180_0_120				120
HL_0_180_0_140				140
HL_0_180_100_180	0	180	100	180
HL_0_180_120_180			120	
HL_0_180_140_180			140	
HL_0_180_160_180			160	
HL_-70_70_-70_-10	-70	70	-70	-10
HL_-70_70_-70_10				10
HL_-70_70_-70_30				30
HL_-70_70_-70_50				50
HL_-100_50_-100_-30	-100	50	-100	-30
HL_-100_50_-100_-10				-10
HL_-100_50_-100_10				10
HL_-100_50_-100_30				30

3.6. Parâmetros para Quantificação de Abertura de Fenda

Um dos aspetos em aberto no estudo numérico de fecho de fenda é o parâmetro numérico mais adequado para quantificar o fenómeno. Neste trabalho consideraram-se os seguintes parâmetros:

$PICC_{Node1}$ – Este método baseia-se no contacto do primeiro nó atrás da extremidade da fenda. Com o objetivo de evitar problemas associados ao aumento discreto da carga, a carga de abertura é obtida a partir da extrapolação linear das cargas correspondentes aos dois incrementos após a abertura da fenda.

$PICC_{Contact}$ – Este procedimento baseia-se nas forças de contacto a carga mínima. A carga de abertura da fenda é alcançada somando as cargas remotas que eliminam cada uma das forças de contacto. Uma das vantagens deste método é que envolve todos os nós em contacto atrás da extremidade da fenda (Antunes, 2014).

Existe também um parâmetro que é muitas vezes usado para casos de amplitudes constantes ($PICC_{Compliance}$) mas que para este estudo os resultados não estavam a corresponder ao esperado. Sendo assim, os resultados desta dissertação têm por base o $PICC_{Node1}$ e o $PICC_{Contact}$.

3.7. Parâmetros de Extremidade de Fenda

Os parâmetros de extremidade de fenda considerados neste estudo foram o intervalo de deformação plástica ($\Delta\varepsilon_{p,yy}$) e a energia dissipada por ciclo. Estes parâmetros foram medidos em 9 pontos de Gauss situados a seguir à variação do bloco de carga e correspondentes às propagações 60^a, 61^a, 62^a, 65^a; 68^a, 73^a, 78^a, 83^a e 88^a. Na Figura 3.4 pode-se observar um exemplo de como se mede o intervalo de deformação plástica ($\Delta\varepsilon_{p,yy}$) e a energia dissipada por ciclo (área sombreada da Figura 3.4).

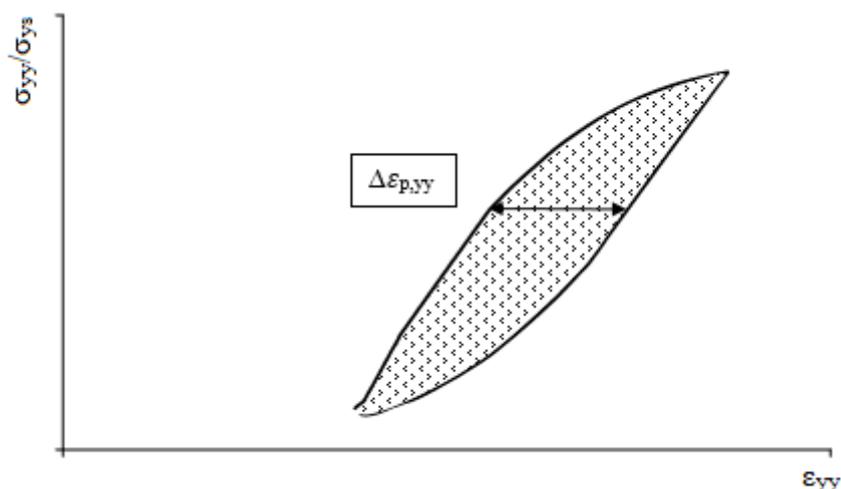


Figura 3.4. Exemplo de curva tensão-deformação e de como foi medido o intervalo de deformação plástica e a energia dissipada por ciclo.

3.8. Programa de Elementos Finitos

Sendo este um estudo do fenómeno de fecho de fenda baseado em simulações numéricas é essencial recorrer a um *software*. O programa utilizado foi o *Three-Dimensional Elasto-Plastic Finite Element Program* (DD3IMP).

Este programa, desenvolvido no CEMUC, baseia-se num esquema de integração temporal implícito o que lhe confere bastante solidez. De notar também que o modelo mecânico e os métodos numéricos usados foram desenvolvidos sobretudo para a simulação numérica de processos de conformação de metais. A utilização deste programa no estudo do fenómeno de fecho de fenda induzido por deformação plástica teve a ver com a sua competência na modelação de deformação plástica e também com a proximidade relativamente à equipa que desenvolve o programa.

Para o programa fazer aquilo a que está destinado é necessário fornecer-lhe diversas informações sobre parâmetros físicos e numéricos. Estes parâmetros estão divididos por diversos ficheiros definidos por dados de entrada, sendo eles:

- Mesh.dat – Dados sobre a malha de elementos finitos;
- Mater1.dat – Propriedades elasto-plásticas do material utilizado;
- Phase.dat – Condições de carregamento pretendidas na simulação;
- GaussPoints.dat – Pontos de Gauss onde se pretendem obter as curvas tensão-deformação;
- Bcon.dat – Condições de fronteira consideradas;
- Input.dat – Parâmetros de controlo para o funcionamento correto do programa;
- Tool.dat – Ferramentas necessárias para o programa fazer a aplicação de carga.

Executando o programa, este fará 160 propagações de fenda e naturalmente 320 ciclos de carga. Depois desta operação que é relativamente demorada obtêm-se os dados de saída que serão posteriormente analisados, sendo eles:

- #1_enti1 – Cargas aplicadas na simulação;
- Bloco160.ufo – Informação global no bloco 160;
- Fcont – Forças de contacto a carga mínima;
- NosFenda2 – Coordenadas dos nós do flanco da fenda para os diferentes níveis de carga;
- GPoint – Valores obtidos nos pontos de Gauss seleccionados anteriormente.
- Extensom – Valor de deslocamento de cada ponto.

Na Figura 3.5 é apresentado o fluxograma que ilustra de grosso modo quais são os ficheiros de entrada e de saída do *software* DD3IMP. Os ficheiros de saída obtidos são de extrema importância para *à posteriori* se analisarem os parâmetros de interesse ao presente estudo. Os ficheiros utilizados são os seguintes:

- PICCcontact: #1_enti1 + Fcont;
- PICCnode1: #1_enti1 + NosFenda2;
- Forças de Contacto: Fcont;
- Perfil de Fenda: NosFenda2;
- Deformação Plástica e Energia Dissipada: GPoint.

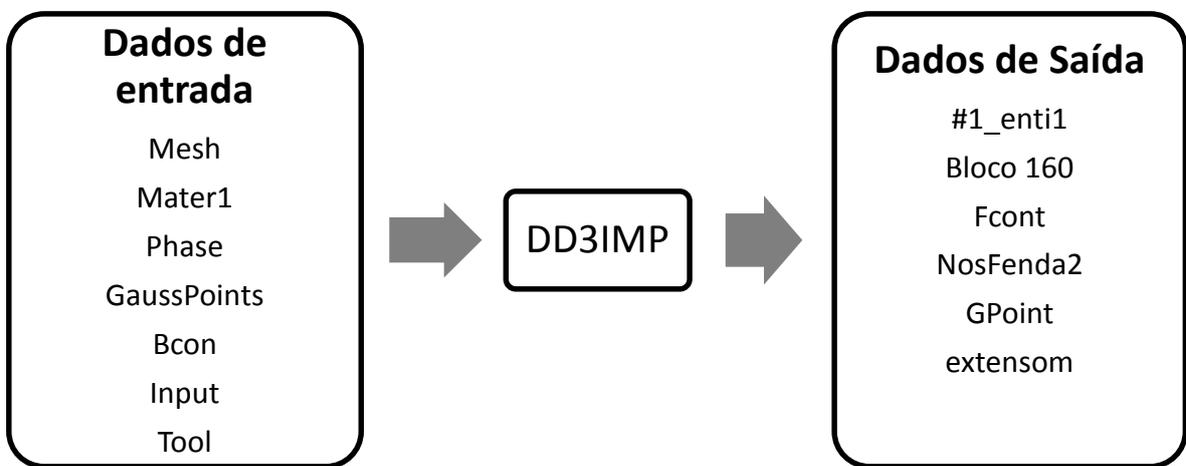


Figura 3.5. Fluxograma do procedimento numérico.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Caso de Referência

Neste estudo o caso de referência utilizado foi o BL_0_140 tendo depois sido feitas 3 variações de blocos de carga na 60ª propagação de fenda. Foram elas: HL_0_140_0_40; HL_0_140_0_80 e HL_0_140_0_120.

Foram estas simulações que serviram como ponto de partida para os estudos e análises feitas durante esta dissertação.

i. Perfil de Fenda

Na Figura 4.1 estão representados os perfis de fenda dos casos de referência incluindo a situação sem variação de blocos de cargas (BL_0_140) e as três variações efetuadas e já referidas anteriormente. Estes perfis foram retirados da última propagação de fenda, a uma carga de 100 N.

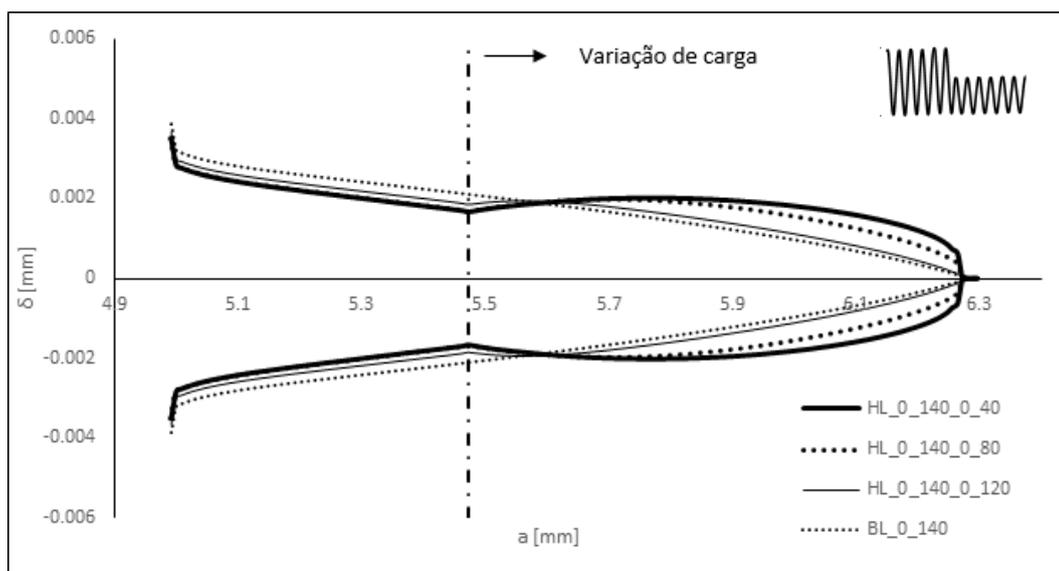


Figura 4.1. Perfil de fenda dos casos de referência para F=100 N.

Para obter os perfis todos à mesma carga (100 N) fez-se uma sobrecarga na última propagação de fenda para os casos HL_0_140_0_40 e HL_0_140_0_80 uma vez que em condições normais as suas cargas não atingiriam o valor pretendido a ser estudado. Daí que, como se pode observar, estes dois casos sofrem um arredondamento significativo na extremidade de fenda em relação aos outros dois casos. O caso em que vai haver menos fecho é claramente o HL_0_140_0_40 uma vez que após a variação de blocos de carga o alongamento das cunhas plásticas é muito inferior ao que tinha sido aplicado anteriormente. Este facto verifica-se em todos os casos, coerentemente, havendo cada vez mais fecho para os casos HL_0_140_0_80 e HL_0_140_0_120.

A Figura 4.2 é semelhante à anterior, sendo que nesta situação os perfis foram retirados da última propagação de fenda a carga máxima.

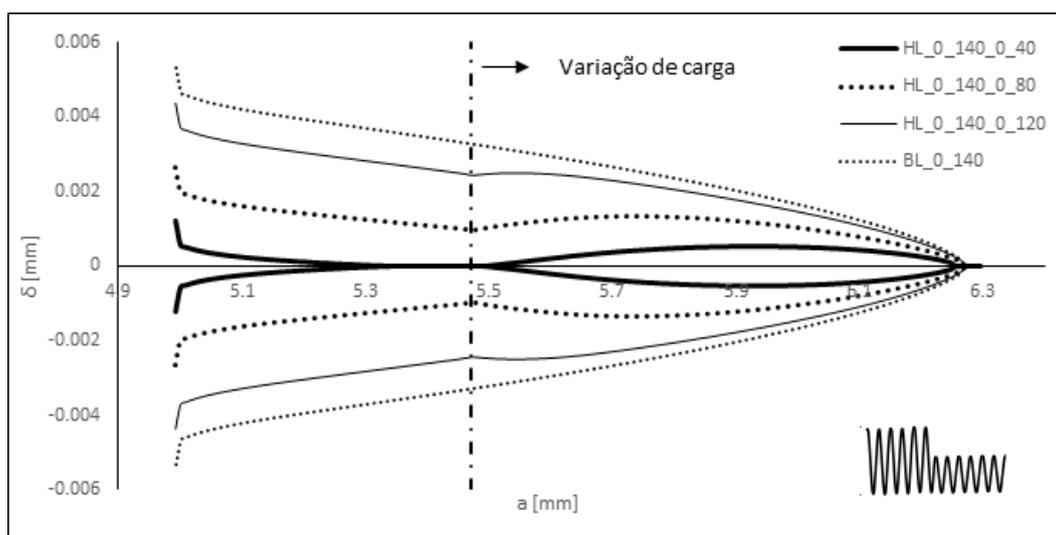


Figura 4.2. Perfil de fenda dos casos de referência a carga máxima.

Pode-se reparar que a tendência de perfis é semelhante à verificada anteriormente, ou seja, após a variação de blocos de carga, a distância entre as faces da fenda aumenta ligeiramente dependente da diferença entre $F_{máxBL}$ e $F_{máx2}$. O aumento da carga de medição aumenta a abertura de fenda, como seria de esperar. Se a variação de cargas for suficientemente alta pode ocorrer fecho parcial, isto é, fecho numa posição remota relativamente à extremidade da fenda, enquanto esta está aberta. Isto é o que acontece no caso HL_0_140_0_40, mesmo a carga máxima.

ii. Forças de Contacto

Na Figura 4.3 podem-se observar as forças de contacto ao longo dos flancos da fenda dos casos de referência, obtidas a carga mínima.

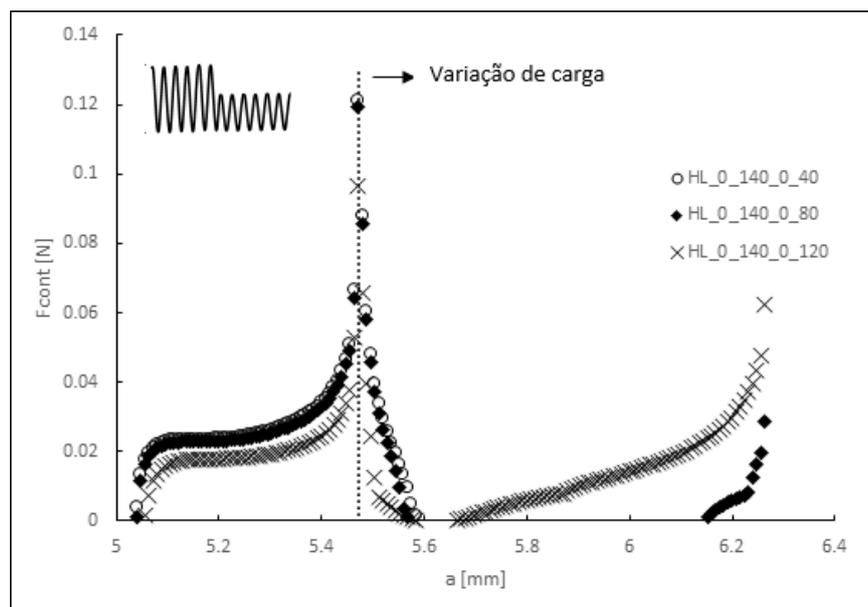


Figura 4.3. Forças de contacto nos casos de referência.

Como se pode reparar, as forças de contacto atingem um grande “pico” no valor $\Delta a = 5.472$ mm, instante das variações de blocos de carga, o que já era expectável. É igualmente perceptível que quanto maior for a diferença entre $F_{máxBL}$ e $F_{máx2}$ maiores são as forças de contacto, facto que está de acordo com os perfis de fenda obtidos.

Note-se também que depois da variação de carga as forças de contacto reduzem-se substancialmente, desaparecendo mesmo no caso HL_0_140_0_40. Isto acontece porque a variação de cargas é tão elevada que forma um género de “cotovelo” naquela zona o que impede o contacto das faces da fenda a partir desse instante, como se pode reparar na Figura 4.2 dos perfis de fenda apresentada anteriormente. Esse cotovelo fica a ser o principal apoio quando a carga se reduz até o seu valor mínimo, o que explica o pico das forças de contacto.

À medida que nos aproximamos da extremidade da fenda as forças de contacto do HL_0_140_0_80 e do HL_0_140_0_120 vão aumentando novamente uma vez que a extremidade da fenda é a zona em que supostamente haverá maior contacto e consequentemente maiores forças de contacto.

iii. Parâmetros de Fecho de Fenda

Na Figura 4.4 e Figura 4.5 encontram-se representadas, respetivamente, as curvas do $PICC_{Contact}$ e $PICC_{Node1}$ para os casos de referência HL_0_140_0_80 e HL_0_140_0_120. Encontram-se também representadas em ambas as figuras as respetivas curvas de referência (BL_0_80, BL_0_120 e BL_0_140).

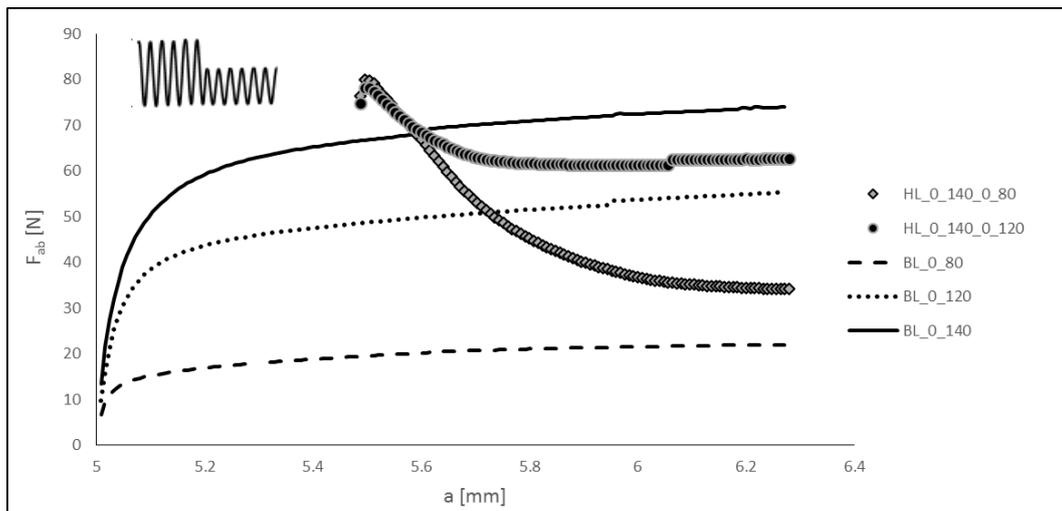


Figura 4.4. $PICC_{Contact}$ relativo aos casos de referência.

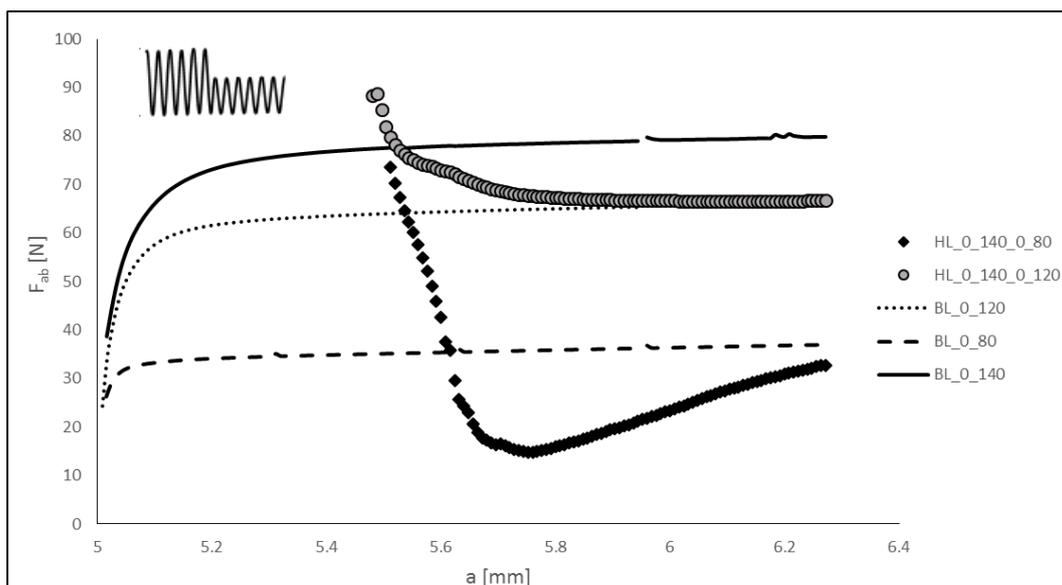


Figura 4.5. $PICC_{Node1}$ relativo aos casos de referência.

Em ambos os parâmetros pode-se observar que de seguida à variação de blocos de carga os valores de fecho aumentam, e depois tendem a decrescer e a estabilizar juntos às respetivas curvas de referência. A propagação de fenda necessária para estabilizar os valores de fecho depende dos parâmetros de carga, aumentando com o decréscimo de carga, como seria de esperar.

Note-se que na Figura 4.5 o fecho desce abaixo da curva de referência estabilizando depois à medida que vai crescendo, fenómeno que não era expectável. Isto acontece visto que a análise do nó 1 centra-se na extremidade da fenda, contudo, após a propagação da fenda, esta pode estar aberta e existir contacto remotamente, isto é, fecho parcial da fenda. Este problema pode ser eliminado usando as forças de contacto para a determinação do fecho, que engloba todo o contacto das faces da fenda. De facto, na Figura 4.4 esse fenómeno desaparece.

Pode-se também confirmar que os valores de fecho de fenda são menores para o $PICC_{Contact}$ quer nas curvas de referência como nas curvas com variação de blocos de carga, característica inerente ao próprio processo. Esta discrepância já foi estudada e verificada anteriormente e, normalmente, existe uma razão entre os valores dos dois parâmetros da ordem de 0,9 (Antunes, 2014).

iv. Mecanismos de Fecho

É possível identificar dois mecanismos principais, que explicam as variações de fecho. Um dos mecanismos é a redução do alongamento plástico após a variação de carga. Essa variação é bem visível na figura 4.1. O crescimento de fenda faz com que as cunhas plásticas provocadas pelos ciclos iniciais de carga se afastem da extremidade atual de fenda. Assim, o efeito vai-se atenuando, sendo substituído progressivamente pelas novas cunhas plásticas (mais pequenas), o que provoca a redução progressiva do nível de fecho.

O segundo mecanismo é o arredondamento da extremidade da fenda, que explica o aumento de fecho imediatamente após a variação de carga. A redução de carga provoca uma redução imediata das cunhas plásticas e por isso seria de esperar uma redução imediata do nível de fecho. Porém, o que se observa é um aumento do nível de fecho (visível nas figuras 4.4 e 4.5), que é provocado pela redução do arredondamento de fenda, com o

consequente aumento de fecho de fenda. Este é um mecanismo muito pouco estudado, e que merece uma atenção especial pela sua importância para o fenómeno de fecho de fenda.

Estes dois mecanismos vão ser estudados e analisados com mais atenção e pormenor mais à frente no capítulo 5 desta dissertação.

4.2. Outros Parâmetros

Neste subcapítulo irão ser apresentadas análises comparativas de perfis de fenda, forças de contacto, $PICC_{Contact}$ e $PICC_{Node1}$ tendo em atenção outros parâmetros tais como o estado de tensão ou a morfologia de carregamento.

4.2.1. *High-Low* (F_{min} = constante) vs *High-Low* (F_{max} = constante)

i. Perfil de Fenda

Na Figura 4.6 encontram-se representados os perfis de fenda dos casos HL_0_180_0_140 e HL_0_180_140_180. Observando estes dois perfis de fenda nota-se que no momento em que se altera o carregamento, no caso HL_0_180_0_140 a distância entre as faces da fenda aumenta ligeiramente (isto é o alongamento plástico reduz-se após a variação de carga). No caso HL_0_180_140_180 acontece o oposto, isto é, há um aumento do alongamento plástico após alteração de carga. Essa variação é porém muito subtil, sendo explicada pela redução da deformação inversa com o aumento da carga mínima. A alteração do perfil de fenda é mais visível no caso HL_0_180_0_140, demonstrando assim que o principal parâmetro que controla a forma da fenda é o $F_{máximo}$.

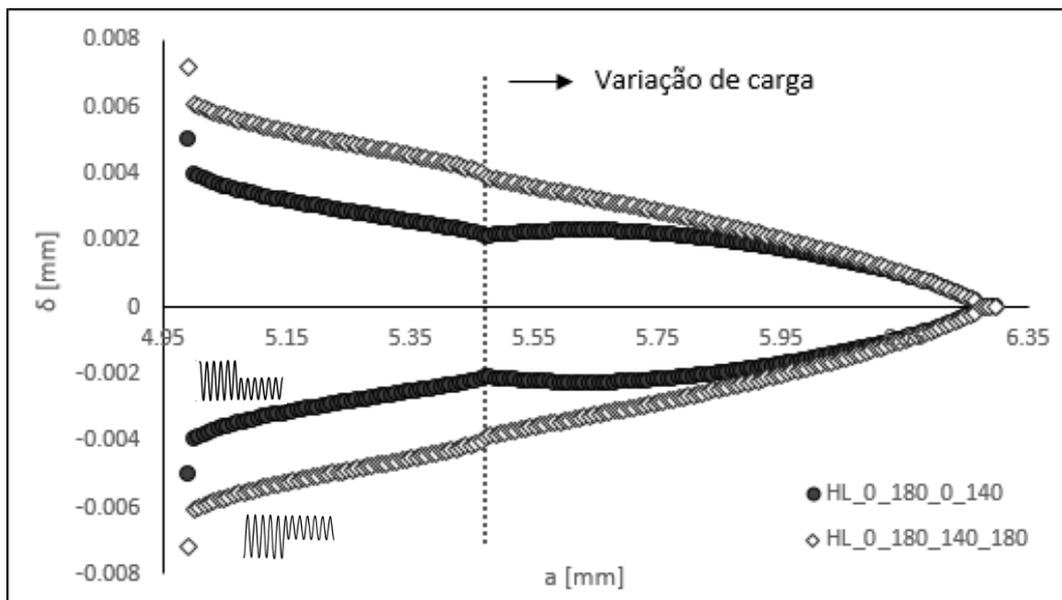


Figura 4.6. Perfis de Fenda: HL_0_180_0_140 vs HL_0_180_140_180 (carga máxima).

ii. Parâmetros de Fecho de Fenda

Na Figura 4.7 observam-se as curvas de fecho de fenda utilizando o $PICC_{node1}$ para os casos em análise. Para este parâmetro de fecho de fenda é visível que ambos os casos convergem para as suas curvas de referência. No caso HL_0_180_0_140, nota-se um “pico” ascendente antes de este convergir para a curva BL_0_140, fenómeno que irá ser estudado e analisado *à posteriori* no decorrer da dissertação.

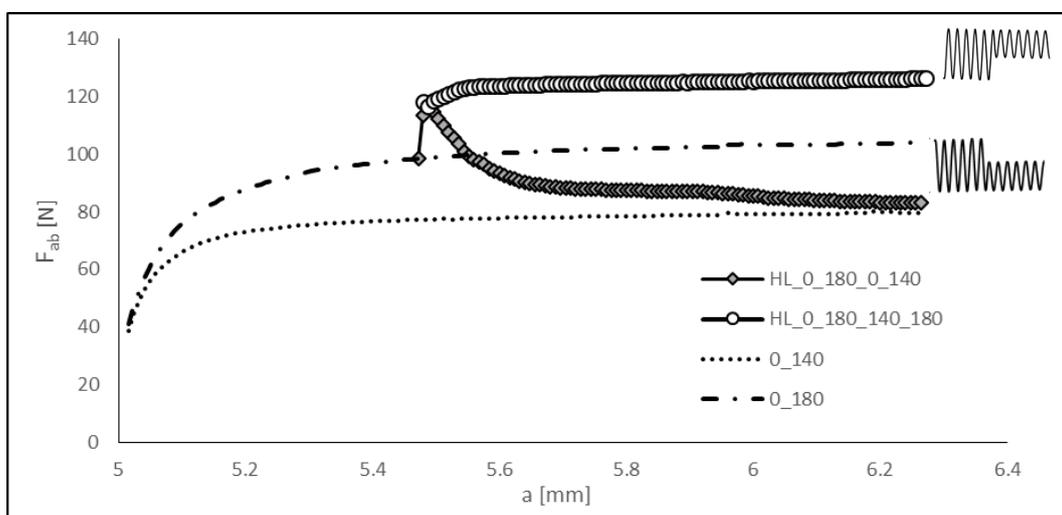


Figura 4.7. $PICC_{Node1}$: HL_0_180_0_140 vs HL_0_180_140_180.

4.2.2. *High-Low* ($F_{\min} = \text{constante}$) vs *Low-High* ($F_{\min} = \text{constante}$)

i. Perfil de Fenda

Na Figura 4.8 encontram-se representados os perfis de fenda para um caso de carregamento *High-Low* e para um caso *Low-High*. No caso HL_0_180_0_140, depois da variação de carregamento a distância entre as faces da fenda aumentou ligeiramente uma vez que o alongamento das cunhas plásticas vai ser menor devido à menor deformação monótona a carga máxima. Na caso HL_0_140_0_180 observa-se exatamente o oposto. Irá haver maior alongamento das cunhas plásticas após variação de carregamento e, por essa razão, a distância interfacial diminui.

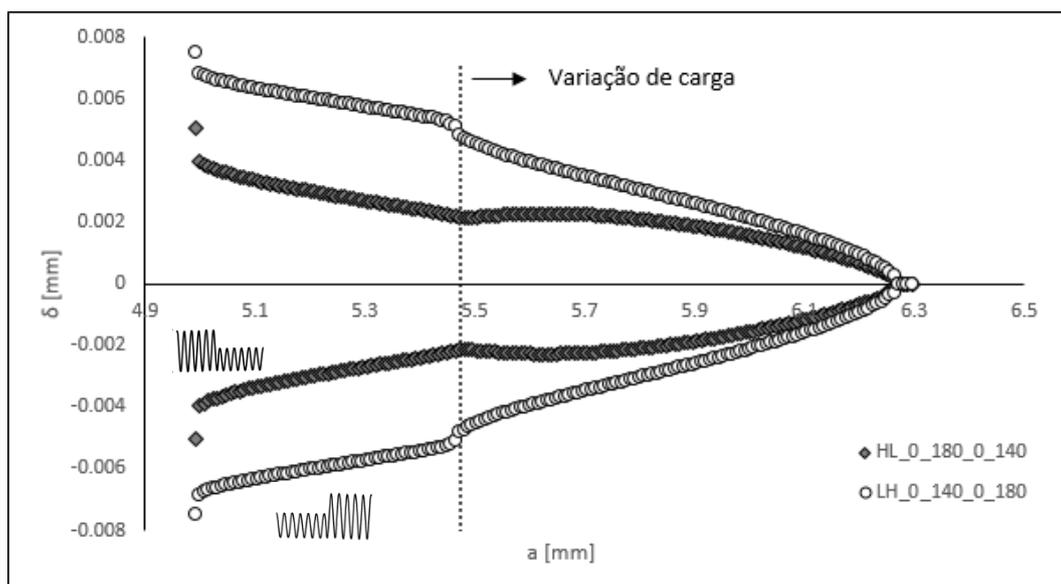


Figura 4.8. Perfis de Fenda: HL_0_180_0_140 vs LH_0_140_0_180 (carga máxima).

ii. Forças de contacto

Na Figura 4.9 encontram-se representados as forças de contacto para os casos *High-Low* e *Low-High* em estudo, quando a extremidade da fenda está na posição $\Delta a = 6.272$ mm. No caso HL_0_180_0_140 observa-se um “pico” quando $\Delta a = 5,472$ mm, resultante da

variação de carregamento. Após a variação de carga há uma redução substancial das forças que aumentam novamente junto da extremidade de fenda, onde há um segundo pico. No caso LH_0_140_0_180 só se começam a visualizar forças de contacto a partir do instante $\Delta a = 5,56$ mm. Isto acontece porque a morfologia do carregamento impede o contacto entre as faces da fenda atrás da posição $\Delta a = 5.472$ mm e conseqüentemente elimina as forças de contacto. À medida que nos aproximamos da extremidade da fenda as forças de contacto vão aumentar naturalmente e são superiores às do caso HL_0_180_0_140 visto que o alongamento das cunhas plásticas vai ser também superior e portanto haverá maior “esmagamento”, o que implica maiores forças de contacto.

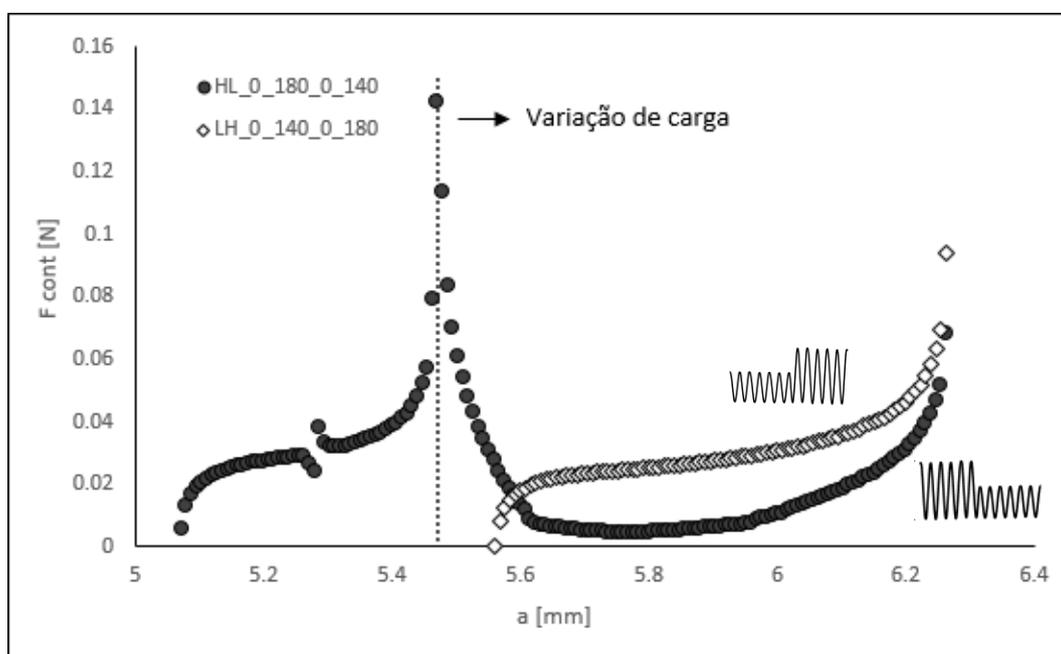


Figura 4.9. Forças de contacto: HL_0_180_0_140 vs LH_0_140_0_180.

iii. Parâmetros de Fecho de Fenda

A Figura 4.10 e Figura 4.11 representam respetivamente os valores de fecho de fenda para os casos em análise recorrendo ao $PICC_{Contact}$ e $PICC_{Node1}$. Embora sejam parâmetros diferentes é perceptível que as tendências que tomam são semelhantes.

No caso HL_0_180_0_140 observa-se um “pico” ascendente a partir da curva de referência 0_180 convergindo depois para valores de fecho próximos da curva BL_0_140. No caso LH_0_140_0_180, verifica-se exatamente o oposto do anterior. Os valores de fecho

decrecem rapidamente após variação de carga, convergindo depois para valores próximos da curva 0_180. O mecanismo de arredondamento explica as variações bruscas de fecho, como se verá mais à frente.

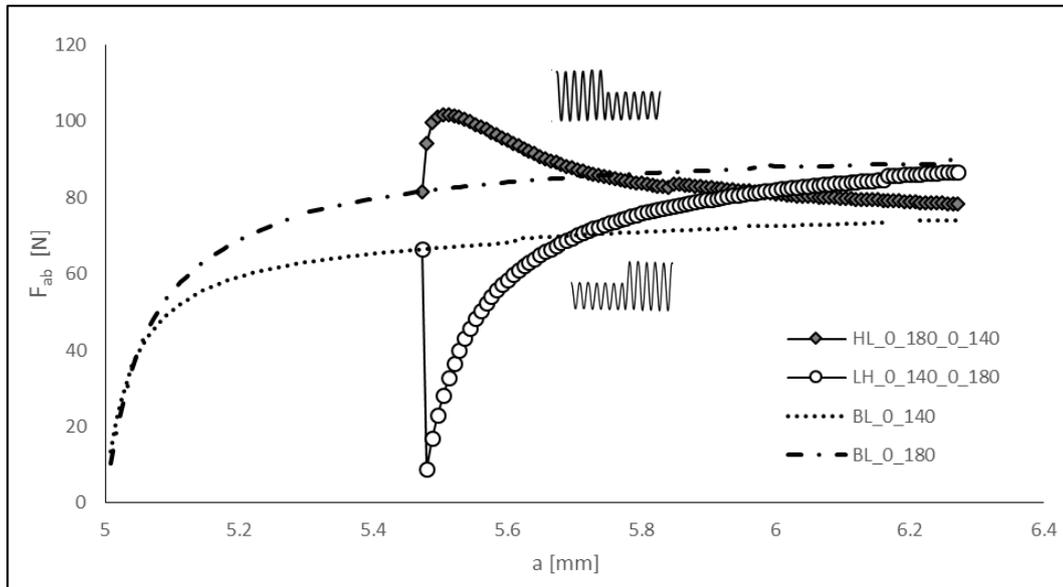


Figura 4.10. PICC_{Contact}: HL_0_180_0_140 vs LH_0_140_0_180.

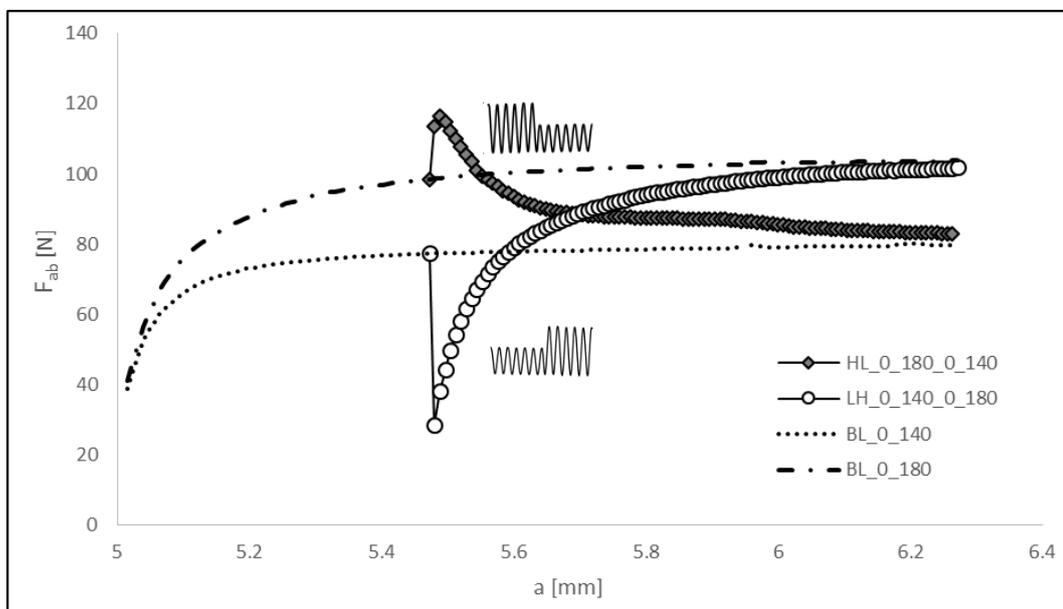


Figura 4.11. PICC_{Node1}: HL_0_180_0_140 vs LH_0_140_0_180.

4.2.3. High-Low (Tensão Plana) vs High-Low (Deformação Plana)

Antes de atentar às análises feitas comparando diferentes estados de tensão, note-se que a variação de blocos de carga nos casos de tensão plana foi efetuada na 60ª propagação de fenda ao passo que em deformação plana foi feita na 100ª propagação. Isso foi feito porque a estabilização dos valores de fecho é mais problemática em deformação plana exigindo mais propagação.

i. Perfil de Fenda

Na Figura 4.12 observam-se os perfis de fenda do caso HL_0_140_0_120 para tensão plana e para deformação plana. É notório que no perfil associado a tensão plana a variação de carga é muito mais visível do que em deformação plana. Para ambos os casos, após a variação de blocos de carga, a distância entre as faces da fenda aumenta ligeiramente devido à redução do alongamento das cunhas plásticas. O menor alongamento das cunhas é devido à menor deformação plástica monótona resultante da redução da carga máxima.

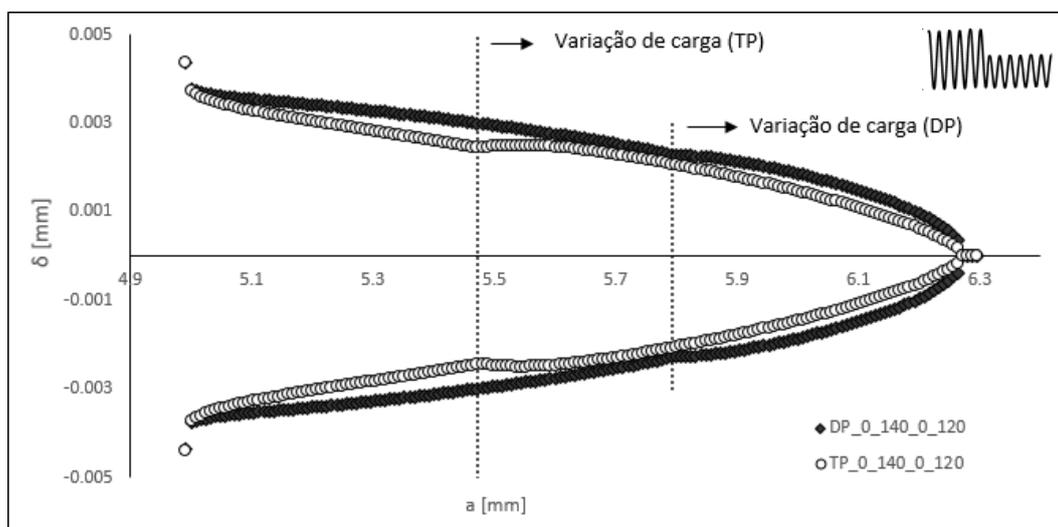


Figura 4.12. Perfil de Fenda: HL_0_140_0_120 (TP vs DP) (carga máxima).

ii. Forças de contacto

Na Figura 4.13 estão representadas as forças de contacto para os dois casos sujeitos a análise. É bem visível que a variação de carga imposta foi feita em locais diferentes. Quando $\Delta a = 5,472$ mm, a curva associada a tensão plana sofre um “pico” ao passo que para a deformação plana isso acontece quando $\Delta a = 5,792$ mm. Nota-se que as forças de contacto associadas a deformação plana são inferiores às forças associadas a tensão plana, dado que está de acordo com os perfis de fenda apresentados anteriormente. Em deformação plana as forças de contato desaparecem após variação de carga, o que praticamente não acontece em tensão plana. O fenómeno de fecho parcial é pois bem mais significativo em deformação plana.

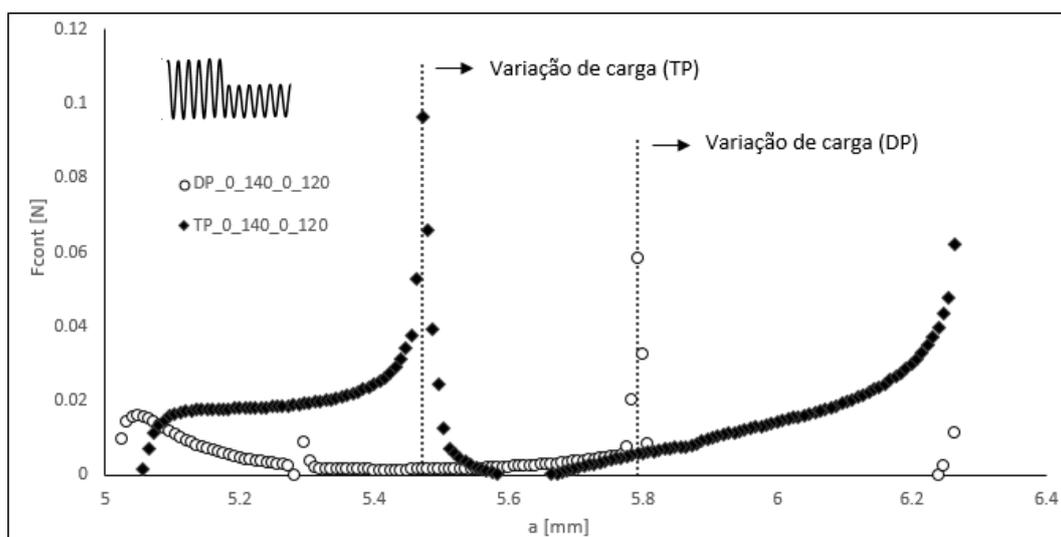


Figura 4.13. Forças de contacto: HL_0_140_0_120 (TP vs DP).

iii. Parâmetros de Fecho de Fenda

Nas Figura 4.14 e Figura 4.15 podem-se observar respetivamente para os parâmetros $PICC_{contact}$ e $PICC_{node1}$ as curvas do nível de fecho para o caso HL_0_140_0_120 em deformação plana e tensão plana assim como as suas curvas de referência.

Embora se utilizem parâmetros diferentes é perceptível que as curvas assumem a mesma tendência em ambos os casos. Tanto nos casos de deformação plana como nos casos de tensão plana, as curvas de fecho partem da curva de referência BL_0_140, sofrem um

ligeiro pico ascendente e convergem depois para valores próximos da curva BL_0_120, o que já era esperado. O pico é ligeiramente superior no caso de tensão, sendo a distância de estabilização maior em tensão plana. De notar que, como se pode ver nas figuras, os valores de abertura de fenda nos casos de deformação plana são bastante inferiores aos valores registados em tensão plana.

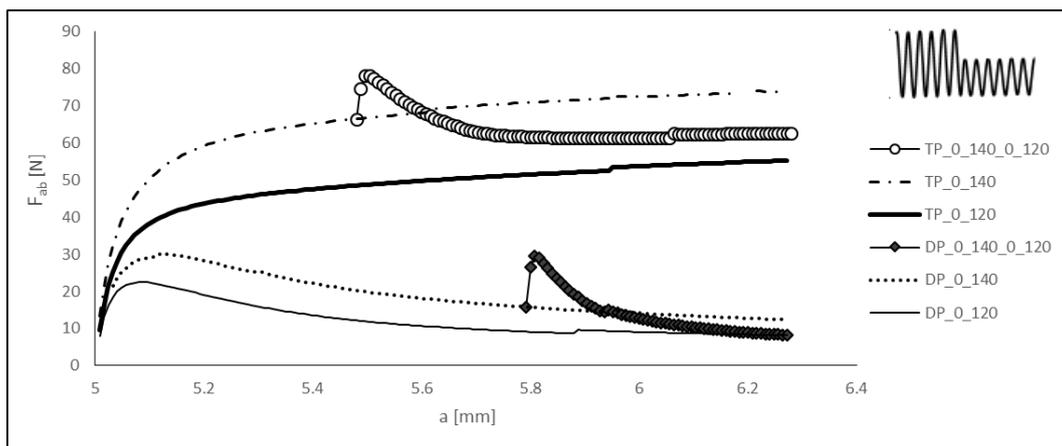


Figura 4.14. PICC_{Contact}: HL_0_140_0_120 (TP vs DP).

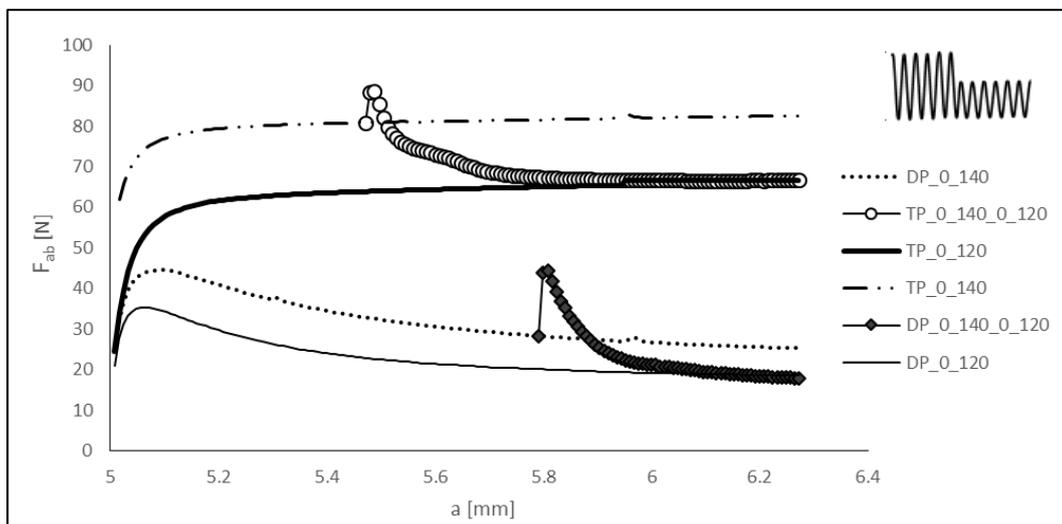


Figura 4.15. PICC_{Node1}: HL_0_140_0_120 (TP vs DP).

4.3. Varrimento

Neste subcapítulo irá ser feito um estudo com vista a relacionar os resultados de fecho de fenda com os parâmetros de carga. Irá ser dada atenção ao pico observado imediatamente após variação de carga e às distâncias de estabilização.

4.3.1. Efeito de $F_{máx2}$

Na Figura 4.16 pode-se observar o estudo comparativo entre os casos HL_0_140_0_80 e HL_0_140_0_120, feito com o objetivo de perceber o efeito de $F_{máx2}$ no nível de fecho. Nota-se que após a variação de carregamento, o aumento do nível de fecho no caso HL_0_140_0_80 é bastante superior ao do caso análogo devido ao maior degrau de carga imposto. À medida que a fenda se propaga, o nível de fecho desce abaixo do caso HL_0_140_0_120 visto que o alongamento das cunhas plásticas residuais ser inferior, provocando assim menores índices de fecho. De notar também que a estabilização no caso HL_0_140_0_80 é mais demorada.

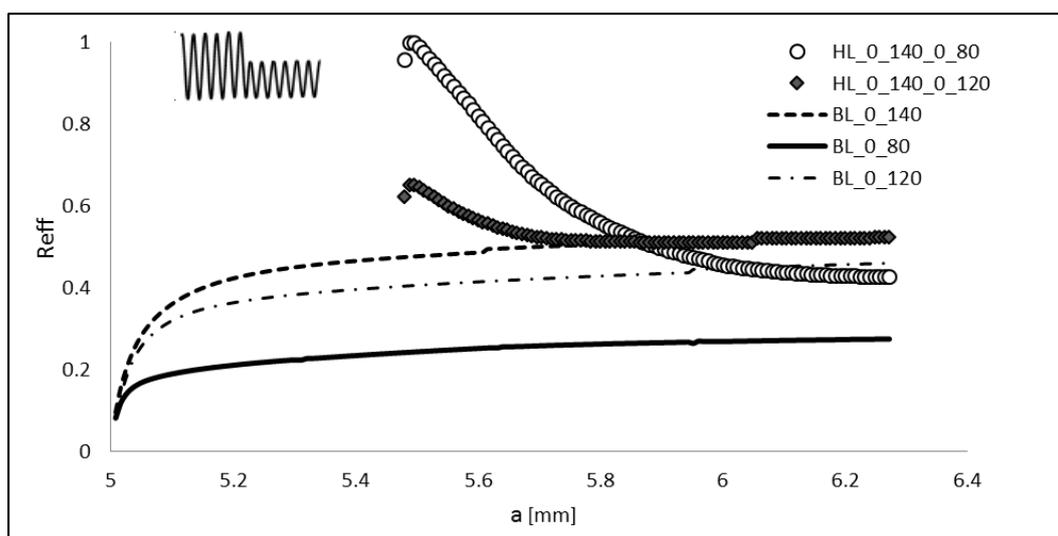


Figura 4.16. Efeito de $F_{máx2}$: HL_0_140_0_80 e HL_0_140_0_120.

4.3.2. Efeito de $\Delta F_{\text{máx}}$ ($F_{\text{máxBL}} - F_{\text{máx2}} = \text{constante}$)

Na Figura 4.17 podem-se ver representadas as curvas de nível de fecho dos casos HL_0_140_0_80, HL_0_180_0_120 e HL_0_200_0_140. Note-se que a diferença entre $F_{\text{máxBL}}$ e $F_{\text{máx2}}$ se manteve constante (60 N) a fim de se observar a influência das cargas máximas. Observando a figura nota-se que o maior “pico” de valor de fecho após a variação de carga pertence ao caso HL_0_140_0_80 e o menor ao caso HL_0_200_0_140. Este facto sugere que neste caso, uma vez que o degrau se mantém constante, o “pico” é controlado e inversamente proporcional aos valores de $F_{\text{máxBL}}$ e $F_{\text{máx2}}$. Com a propagação de fenda, o efeito das cunhas plásticas residuais do segundo bloco de carga começa a sentir-se e, naturalmente, os valores mais elevados do nível de fecho verificam-se no caso HL_0_200_0_140 e os valores mais baixos no caso HL_0_140_0_80. A reter: o degrau de carga é um parâmetro importante no estudo do nível de fecho de fenda, não sendo no entanto o único parâmetro a ter em conta como se pode constatar pela figura.

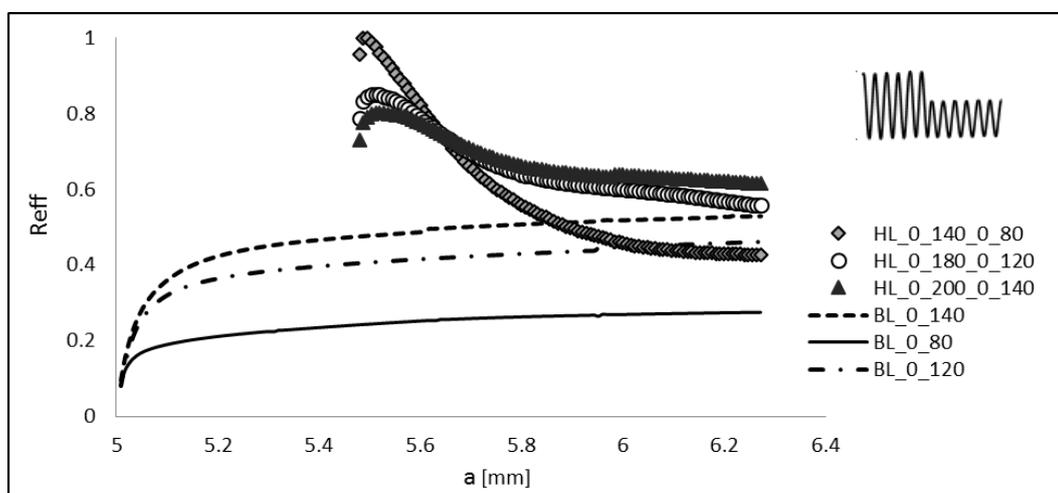


Figura 4.17. Efeito de $\Delta F_{\text{máx}}$: $F_{\text{máxBL}} - F_{\text{máx2}} = \text{constante}$.

4.3.3. Efeito de $F_{\text{máxBL}}$

Na Figura 4.18 são apresentados os níveis de fecho dos casos HL_0_140_0_120 e HL_0_180_0_120. Neste caso, o critério foi fixar o $F_{\text{máx2}}$ e estudar o efeito de $F_{\text{máxBL}}$. É notório que o caso em que existe maior degrau de carga (HL_0_180_0_120) é também o

caso em que o “pico” inicial após a variação de carga é superior, como também já se tinha verificado na Figura 4.16. Uma vez que após a variação de carregamento a amplitude dos blocos dos dois casos apresentados é igual, ambas as curvas de fecho tendem para o mesmo valor. Como se pode ver também, o caso HL_0_140_0_120 vai estabilizar mais rapidamente junto da sua curva de referência, o que pode sugerir uma relação entre a distância de estabilização e o pico inicial de fecho.

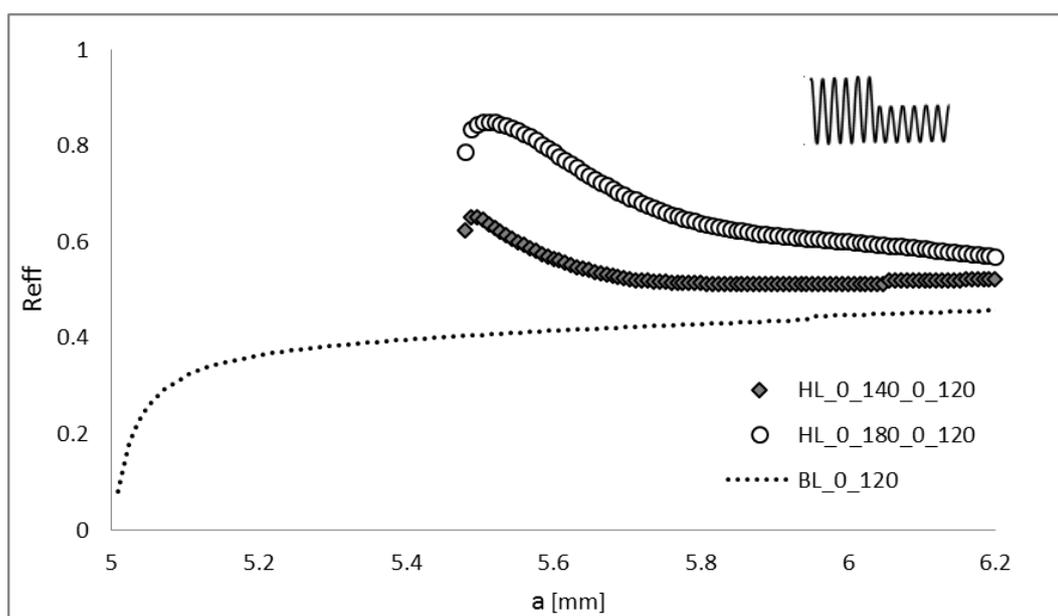


Figura 4.18. Efeito de $F_{máxBL}$: HL_0_140_0_120 e HL_0_180_0_120.

4.3.4. Distância de Estabilização

A distância de propagação necessária a que uma fenda estabilize é um dos parâmetros mais problemáticos no âmbito dos estudos de carácter numérico. De facto, há distâncias de estabilização bastante longas que fazem com que os estudos numéricos envolvam um grande número de propagações de fenda e, conseqüentemente, um elevado esforço numérico. O critério utilizado para estudar as distâncias de estabilização foi o seguinte: atinge-se a estabilização quando a variação de dois valores consecutivos de fecho atinge 0,5% do valor de fecho.

Na Figura 4.19 estão representadas as distâncias de estabilização (Δa_{stb}) de praticamente todos os casos *High-Low* simulados em função de ΔF_3 (degrau de carregamento). É visível que os pontos têm uma correlação razoável com a linha de tendência apresentada. À medida que o degrau de carga é mais elevado, a distância de propagação necessária até à estabilização também será maior. É interessante que todas as distâncias de estabilização obtidas pelos autores até aqui (Baptista, 2014), (Antunes *et al.*, 2013) (em amplitude constante e em sobrecargas) dependem de um valor de ΔK .

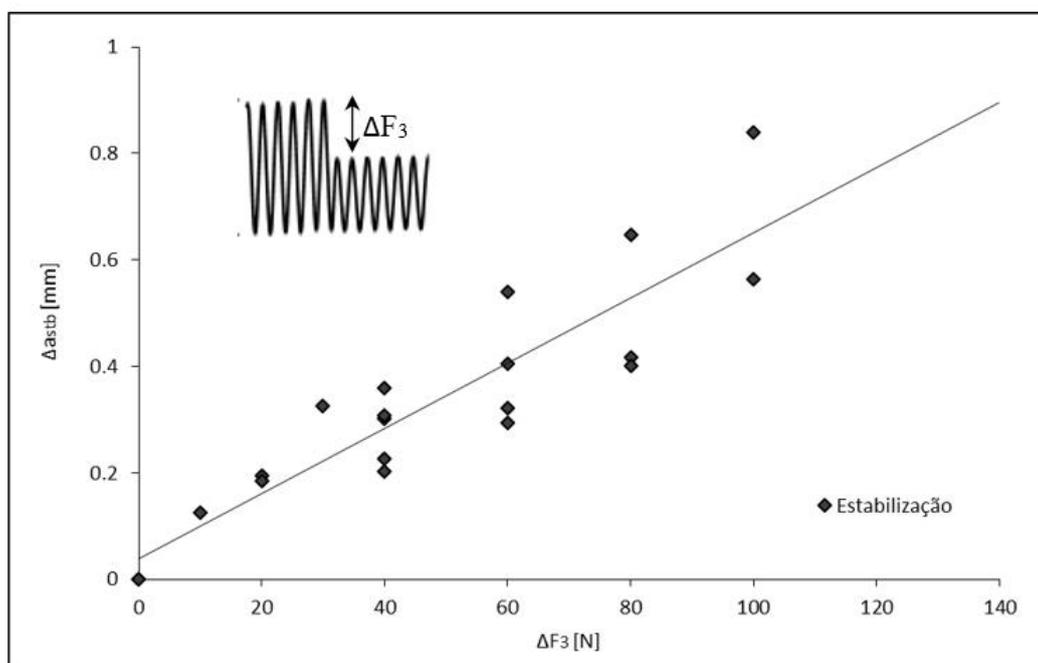


Figura 4.19. Efeito de ΔF_3 na distância de estabilização.

4.3.5. Valor do Pico de Abertura de Fenda

O valor do pico de abertura de fenda é o outro parâmetro relevante das curvas de fecho em blocos de carga. Este foi um parâmetro do qual não resultaram conclusões 100% claras. Na Figura 4.20 representam-se os valores dos picos (ΔF_{peak}) presentes em quase todos os casos *High-Low* estudados em função do degrau de carga imposto. Embora não seja muito

claro, nota-se que no início, os valores dos picos crescem com o aumento de ΔF_3 mas, a partir de uma certa altura, estes valores tendem a estabilizar.

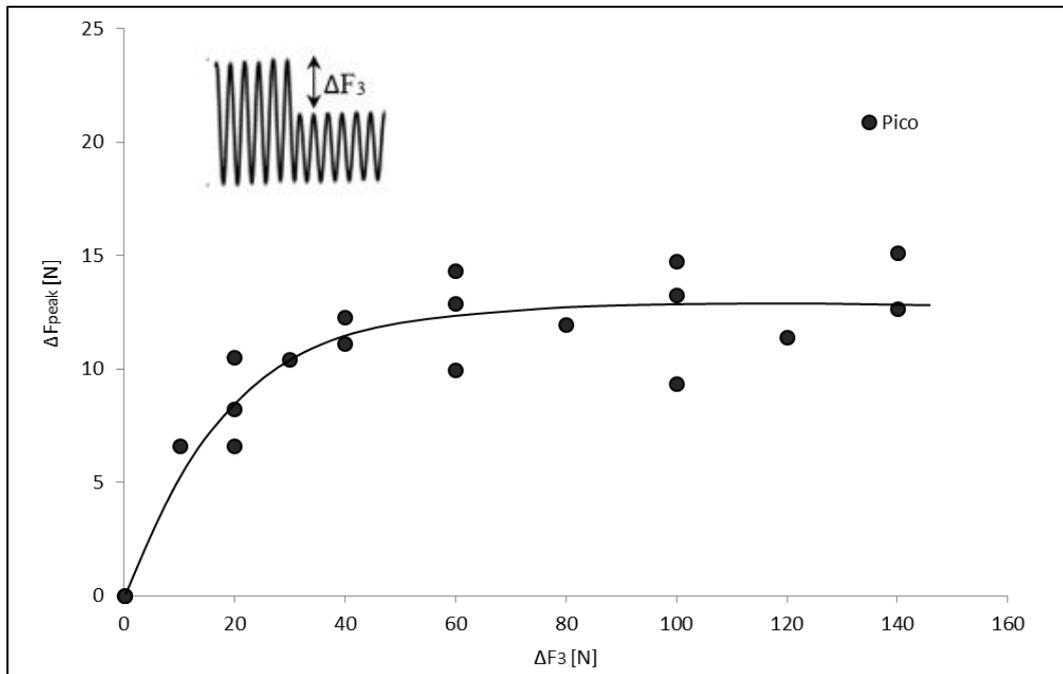


Figura 4.20. Efeito de ΔF_3 no valor do pico de abertura de fenda.

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. Mecanismos

5.1.1. Cunhas Plásticas

O fecho de fenda por deformação plástica é uma consequência principalmente da deformação plástica residual que acontece atrás da extremidade de fenda.

Foi então desenvolvido um modelo numérico considerando que o Δy_p (alongamento vertical das cunhas plásticas residuais) 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 Δy_p decresce exponencialmente com a distância à extremidade da fenda.

O alongamento vertical das cunhas plásticas residuais é dado por:

$$\Delta y_p = \int_0^{r_{pm}} \varepsilon_{p,yy} dy \quad (5.1)$$

sendo $\varepsilon_{p,yy}$ a deformação plástica vertical e r_{pm} a extensão da zona plástica monótona, ambas definidas perpendicularmente ao flanco de fenda. De notar que é necessária uma análise de elementos finitos de modo a obter o Δy_p ao longo do flanco da fenda.

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

$$PICC_i = \tilde{f}(d, \Delta y_p) = a \times d^b \quad (5.2)$$

em que d é a distância à extremidade da fenda e a, b são constantes dependentes de Δy_p .

Foram considerados polinómios de grau cinco para os parâmetros a e b . O valor global de fecho de fenda produzido pela área residual plástica é então obtido através do somatório da contribuição individual de cada cunha presente atrás de extremidade de fenda, considerando o princípio da sobreposição linear.

As constantes dos polinómios de grau cinco foram obtidas pela minimização das diferenças entre os resultados do nível de fecho da fenda obtidos a amplitude constante de carregamento com o método dos elementos finitos e as previsões do modelo obtidos a partir dos valores de Δy_p . Este modelo foi construído com base em cinco casos de amplitude constante de carregamento: BL_0_80, BL_0_140; BL_0_180; BL_0_200 e BL_-60_140. Os valores de fecho da fenda foram obtidos a partir das forças de contacto. Na Figura 5.1 apresenta-se a confrontação entre o modelo analítico formulado e o método dos elementos finitos para o caso BL_-140_140. Pode-se observar que as tendências das duas curvas são claramente semelhantes e os valores da carga de abertura são próximos, tendo em conta as normais limitações inerentes ao próprio modelo. Posto isto, considera-se que o modelo analítico construído é válido.

Notar que o modelo empírico proposto no ponto anterior não inclui os efeitos de outros fenómenos, tais 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.

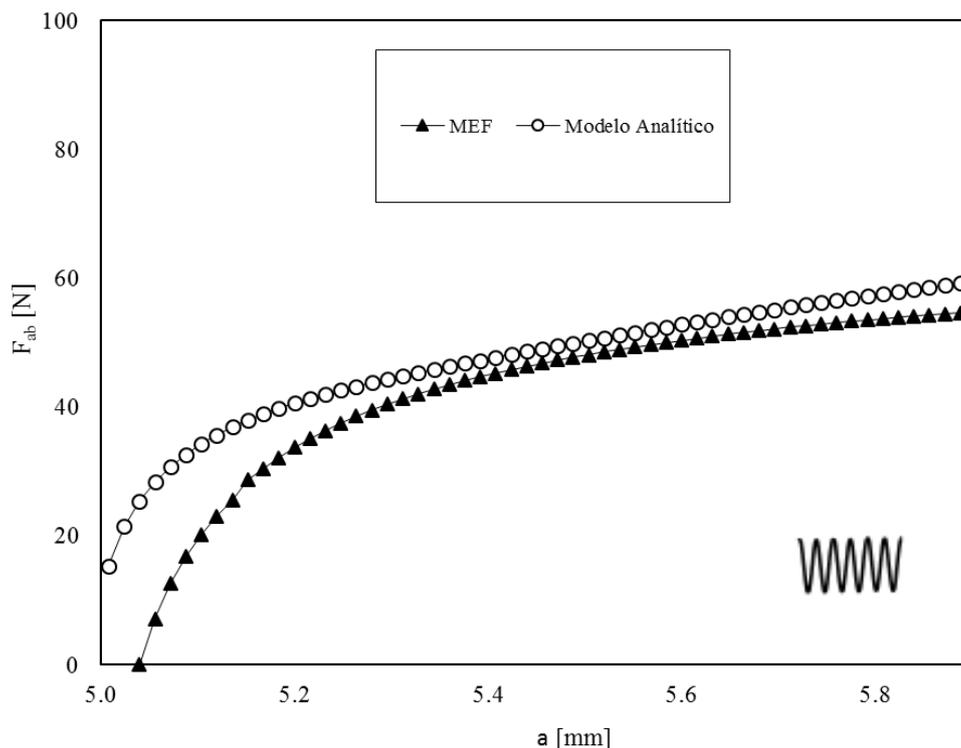


Figura 5.1. Comparação entre o MEF e o Modelo Analítico (BL_-140_140).

De seguida é feita a comparação entre o modelo analítico construído e o método dos elementos finitos para 4 casos, todos eles de diferentes tipos, de forma a analisar e perceber o que acontece em situações distintas. É também apresentada em cada figura a curva correspondente ao Δy_p para que se possa observar o alongamento vertical das cunhas plásticas em cada caso.

Na Figura 5.2 é apresentado o caso HL_0_140_0_120 ($K_{\min} = \text{constante}$). É notório que as curvas obtidas pelo método dos elementos finitos (MEF) e do modelo têm praticamente a mesma tendência assumindo em algumas situações valores coincidentes mas, aquando da variação de carregamento, a curva correspondente ao MEF sofre um “pico” ascendente considerável. Quanto ao Δy_p , este diminui quando o carregamento sofre variação, o que faz todo o sentido visto que a carga máxima diminui, diminuindo assim também o alongamento das cunhas plásticas.

Na Figura 5.3 é mostrado o caso HL_0_140_80_140 ($K_{\max} = \text{constante}$). À semelhança do caso anterior, as curvas correspondentes ao MEF e ao modelo são quase coincidentes até à variação de carregamento. Depois disso, a curva associada ao MEF sofre um “pico” ascendente convergindo depois para próximo da curva do modelo. No que toca

ao Δy_p , a partir da variação de carregamento é notório um aumento ligeiro visto que o K_{\min} aumenta e portanto o alongamento é também superior. Notar que o aumento de K_{\min} reduz a deformação plástica inversa, o que aumenta o alongamento residual e por isso o nível de fecho.

Na Figura 5.4 pode-se observar o caso HL_0_140_30_110 ($F_{\text{médio}} = \text{constante}$). É mais uma vez semelhante aos casos anteriores, surgindo um “pico” ascendente na curva associada ao MEF no instante $a = 5,472$ mm mas depois convergindo para valores semelhantes de F_{ab} do modelo. O Δy_p diminui aquando da variação de carregamento uma vez que o K_{\min} aumenta e o $K_{\text{máx}}$ diminui, diminuindo assim também o alongamento das cunhas plásticas.

Na Figura 5.5 observa-se um caso um pouco diferente dos anteriores: LH_0_140_0_180. As curvas correspondentes ao MEF e ao modelo analítico são bastante próximas até à variação de carregamento, observando-se depois um “pico” descendente tomando depois as duas curvas a mesma tendência. Na curva do Δy_p é visível que no momento da variação de carregamento o alongamento das cunhas plásticas aumenta visto que o $K_{\text{máx}}$ também aumenta e por isso as cunhas encontram-se mais “esticadas”.

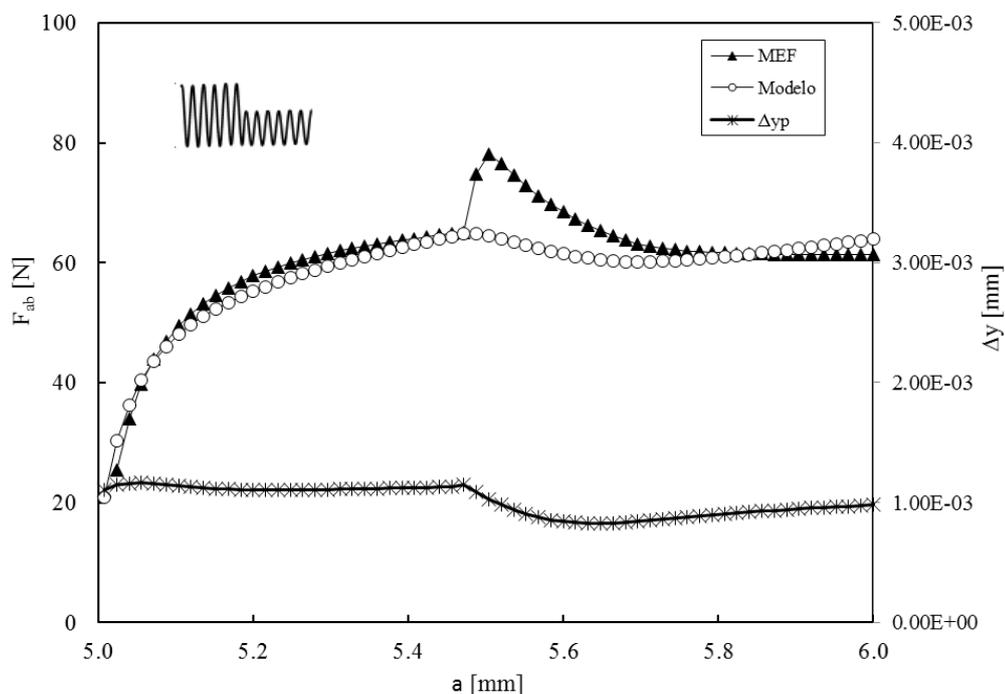


Figura 5.2. FEM vs Modelo Analítico [HL_0_140_0_120].

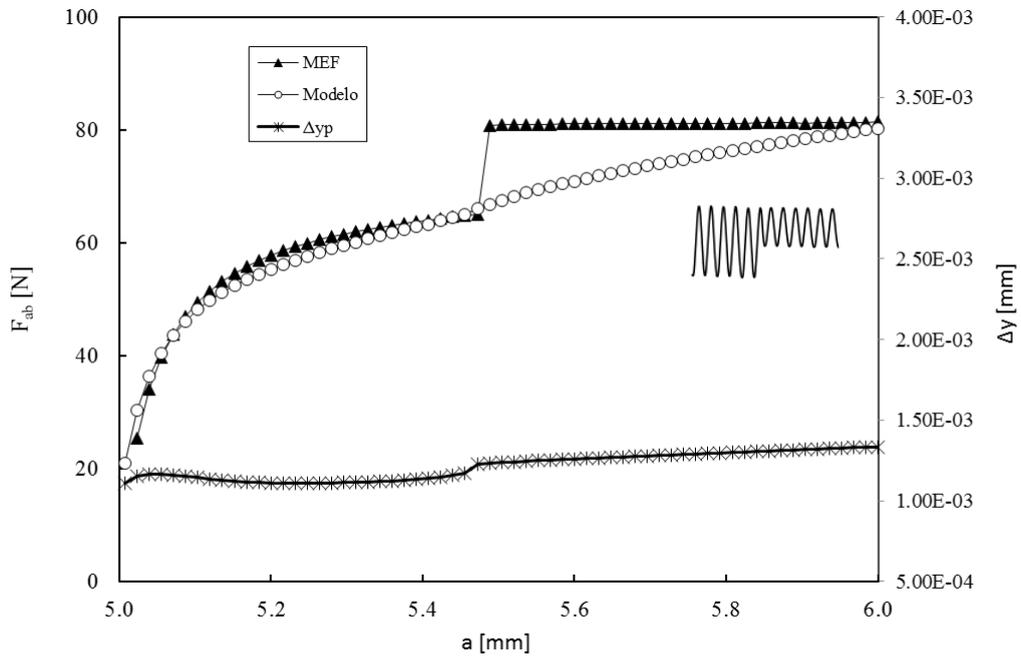


Figura 5.3. FEM vs Modelo Analítico [HL_0_140_80_140].

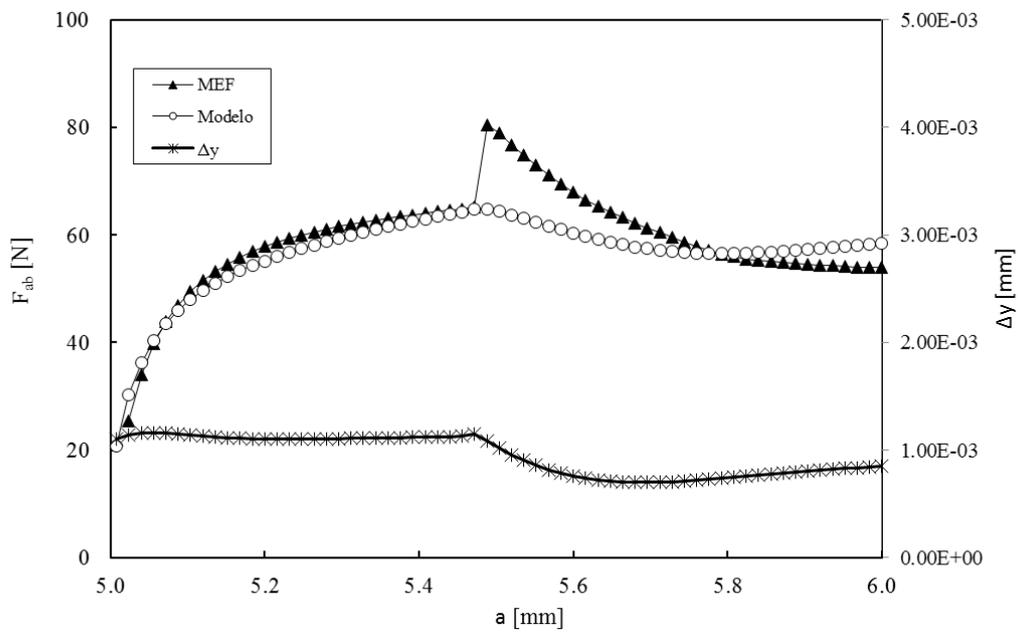


Figura 5.4. FEM vs Modelo Analítico [HL_0_140_30_110].

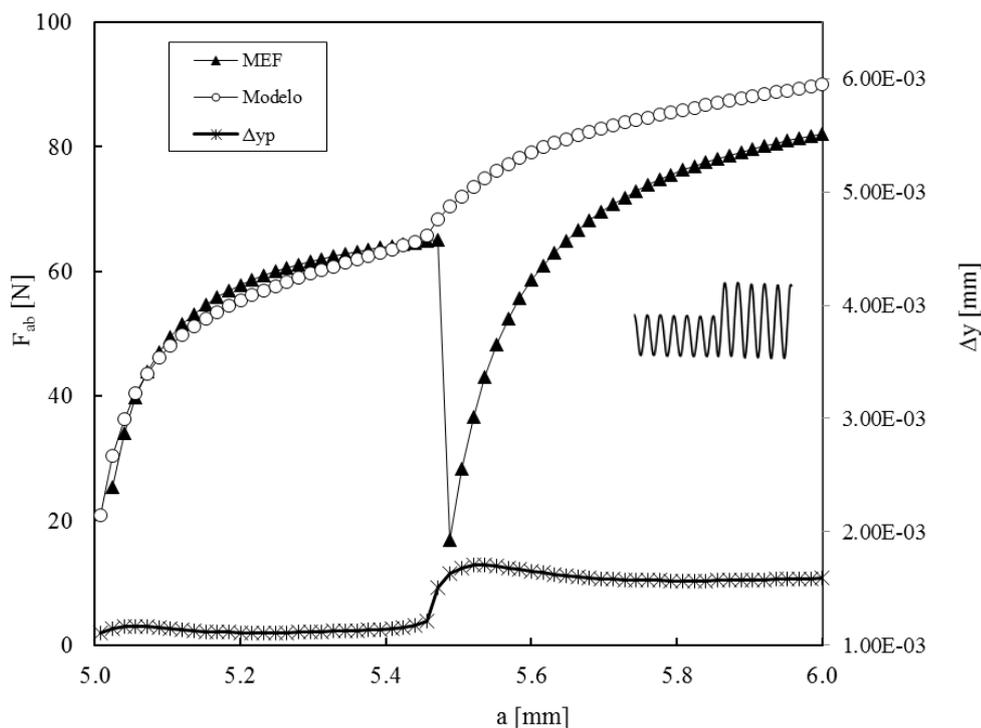


Figura 5.5. FEM vs Modelo Analítico [LH_0_140_0_180].

Mas, no fim de observar com alguma atenção os resultados acima expostos fica uma questão por responder: Por que razão surgem os “picos” ascendentes nos casos *High-Low* e descendente no caso *Low-High* aquando da variação de carregamento? Isto sugere que tem de haver um mecanismo que não o das cunhas plásticas a atuar e a controlar o fecho de fenda. Acredita-se que esse fenómeno poderá ser o arredondamento da extremidade de fenda, que será então por isso estudado no ponto seguinte.

5.1.2. Arredondamento da Extremidade de Fenda

O arredondamento da extremidade de fenda é outro dos mecanismos que controla o fecho de fenda. O COD (*crack opening displacement*) é normalmente definido como a distância entre dois pontos encontrados pela interseção das faces da fenda com duas linhas (+45° e -45°) provenientes da extremidade da fenda. Este mecanismo ainda não foi estudado no âmbito do fecho de fenda sendo também pouco utilizado em estudos de fadiga.

O arredondamento da extremidade da fenda (*Blunting*) tem porém sido usado na área de fadiga e fratura. O modelo clássico que explica a propagação de fendas por fadiga indica que é o arredondamento e o aguçamento da fenda que fazem a propagação de fenda. (Tvergaard, 2007) e (Toribio e Kharin, 2013) modelaram numericamente a propagação de fenda utilizando este conceito. (Handerhan e Garrison, 1992) e (Firrao e Roberti, 1984) utilizaram o conceito em estudos relacionados com a fratura de materiais. (Pommier e Risbet, 2005) utilizaram o *Blunting* para prever da/dN . O *Blunting* é considerada uma variável de estado que caracteriza a deformação plástica na extremidade da fenda e a dissipação de energia que lhe está associada.

Na Figura 5.6 observa-se a variação do COD em função do comprimento de fenda do caso OL_0_140_200 juntamente com os respectivos valores de fecho. Os valores de COD foram medidos a 100 N. De notar que parece haver uma correlação entre os valores de fecho e os valores de COD. Aquando da sobrecarga, por exemplo, o mínimo valor de fecho corresponde ao valor máximo do COD.

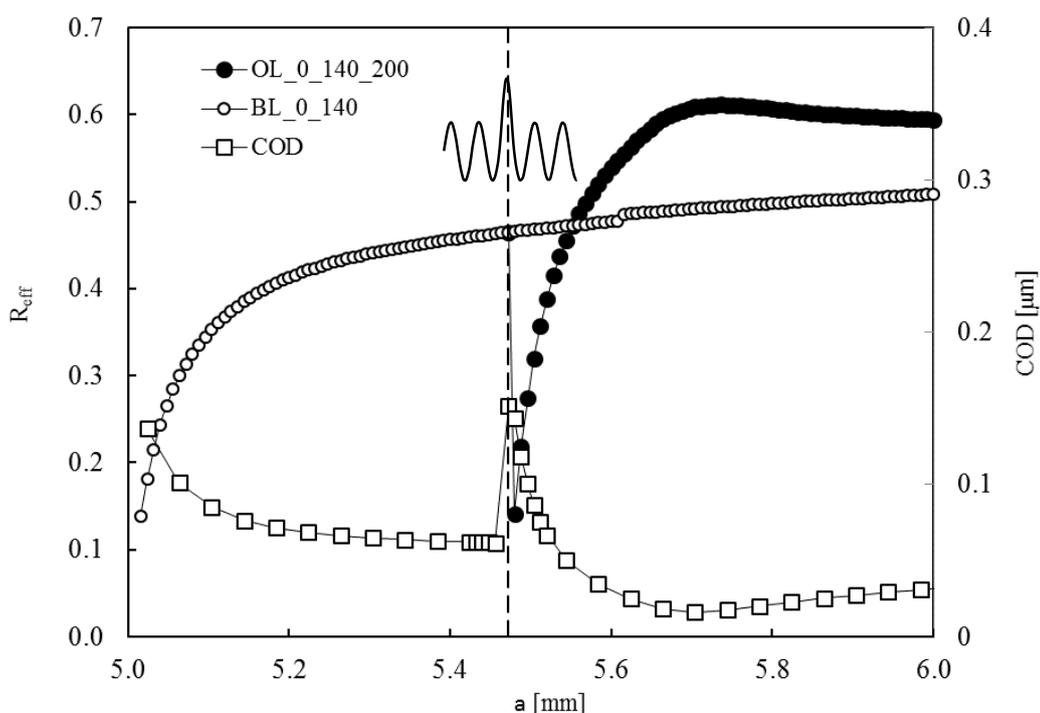


Figura 5.6. OL_0_140_200: Variação do COD (medido a 100N).

Embora o COD e os valores de fecho apresentem normalmente uma boa correlação é preciso ter outros aspetos em conta. Na Figura 5.7 encontra-se a medição do

COD para os casos HL_0_140_0_120 e HL_0_140_0_80. Estes valores foram medidos a 80 N. Um aspeto que se pode constatar e que é relevante nesta figura é que quanto mais próximo for o valor a que foi retirado o arredondamento da extremidade de fenda do valor de $F_{máx2}$, maior será o valor de COD.

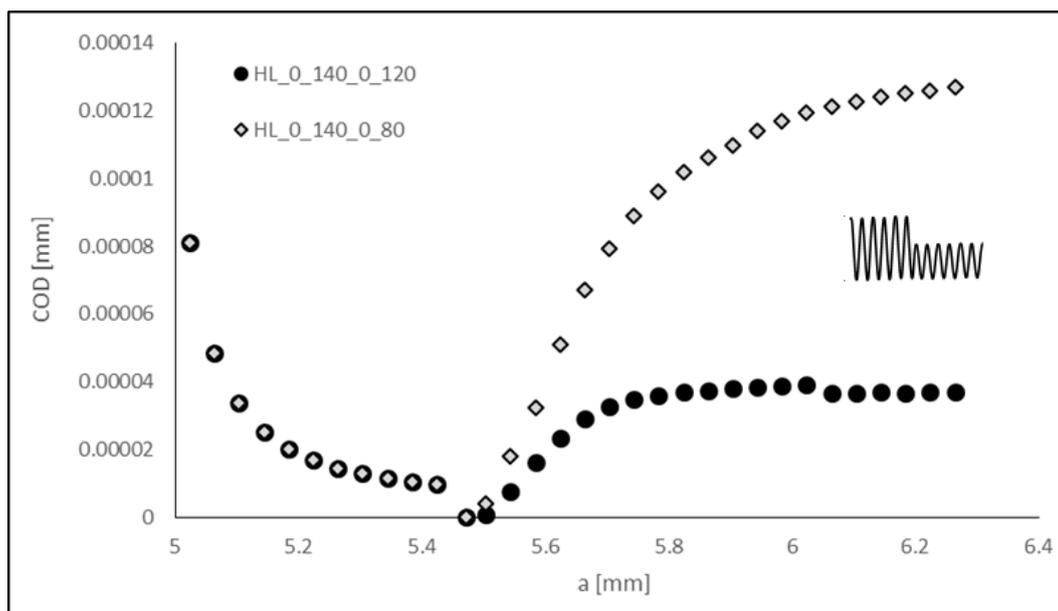


Figura 5.7. COD (medido a 80 N) para os casos HL_0_140_0_120 e HL_0_140_0_80.

Na Figura 5.8 mostra-se uma experiência realizada com o objetivo de perceber a importância que o arredondamento da extremidade de fenda tem no fecho de fenda. Com base no caso BL_0_140 e depois de este ser sujeito a 160 propagações de fenda, alterou-se a carga máxima no ficheiro “*phase*” para 220, 200, 180 e 160 N e simulou-se um ciclo completo de carregamento até voltar aos 0 N. Olhando para o caso OL_0_140_220 podem notar-se quatro regiões. Na região I a fenda está fechada. O aumento de carga faz abrir a fenda, entrando-se na região II. Numa 1ª fase a deformação é linear com a carga, pois a deformação é elástica. O aumento de carga provoca deformação plástica e uma variação não linear do COD com a carga. O aumento da carga acima do valor base altera significativamente o comportamento da curva (região III). A deformação plástica é mais forte, o que se reflete no COD. Isto indica que o arredondamento da extremidade de fenda é particularmente relevante se a carga ultrapassar a carga base. Quando se faz a descarga (região IV) existe uma fase inicial com a mesma inclinação do início da região II. Isso tem com a ver com o facto de a descarga ser inicialmente elástica. A redução de carga provoca

deformação inversa e uma redução significativa do COD. A carga mínima há um COD residual, que indica que a fenda ficou aberta. O arredondamento residual após sobrecargas foi observado por diferentes autores, nomeadamente Lee *et al* (2011), Carlson *et al.* (1991) e Bichler e Pippan, (2007). Este COD residual, como se pode constatar na figura 5.8, é tanto maior quanto maior foi a sobrecarga imposta. Os resultados apresentados nesta figura permitem explicar as tendências observadas na figura 5.6. De facto, o aumento de COD resultante da sobrecarga reduz imediatamente o efeito das cunhas plásticas, o que reduz drasticamente o nível de fecho após uma sobrecarga. Quando a sobrecarga é suficientemente elevada, o efeito das cunhas anteriores desaparece totalmente o que quer dizer que o fecho tem de crescer desde zero com a formação da nova cunha plástica residual.

Para estudar o efeito do COD residual que se pode ver na Figura 5.8, procedeu-se a uma experiência. Para os casos BL_0_100, BL_60_140 e BL_-60_140 efetuaram-se várias sobrecargas e, após cada uma delas, mediu-se o COD a carga mínima. O resultado é apresentado na Figura 5.9. Para os casos apresentados observa-se que quanto maior for a sobrecarga imposta, maior será o COD residual. É importante ter este valor em conta uma vez que se for superior a zero, como já foi dito anteriormente, o efeito das cunhas plásticas residuais pode ser eliminado. Note-se que estes dados estão também de acordo com o observado na Figura 5.8.

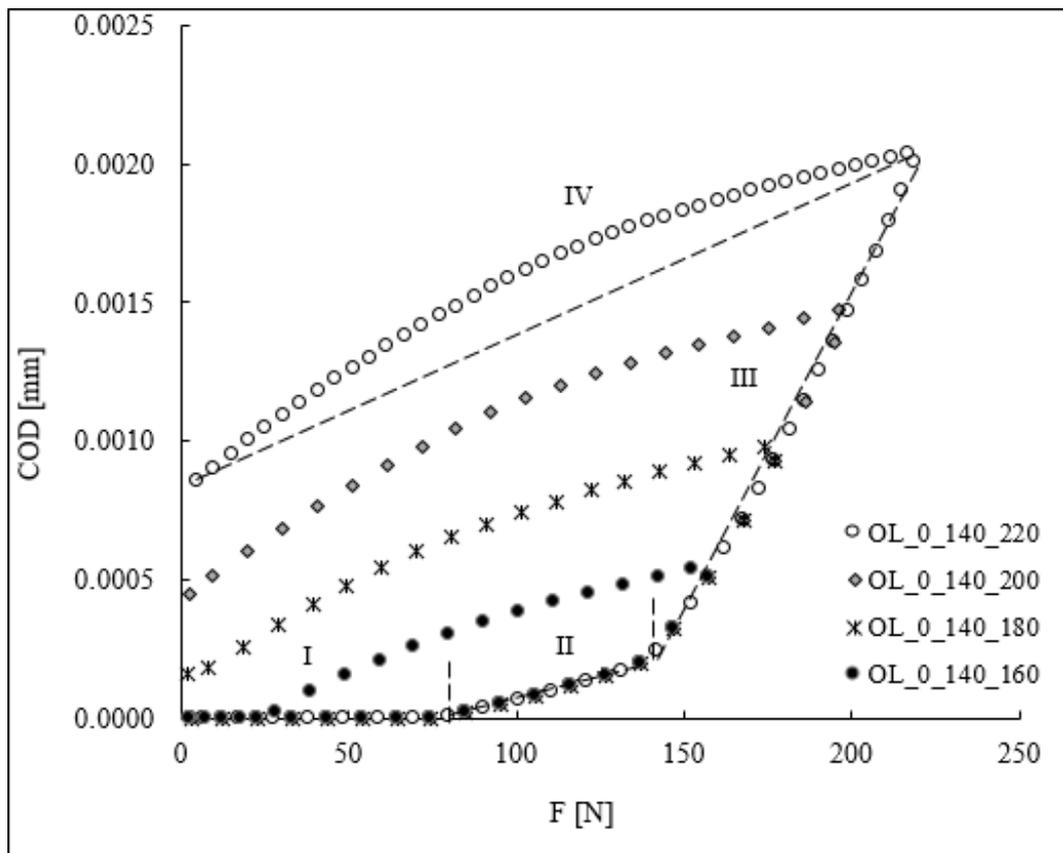


Figura 5.8. Efeito do F_{ol} no COD.

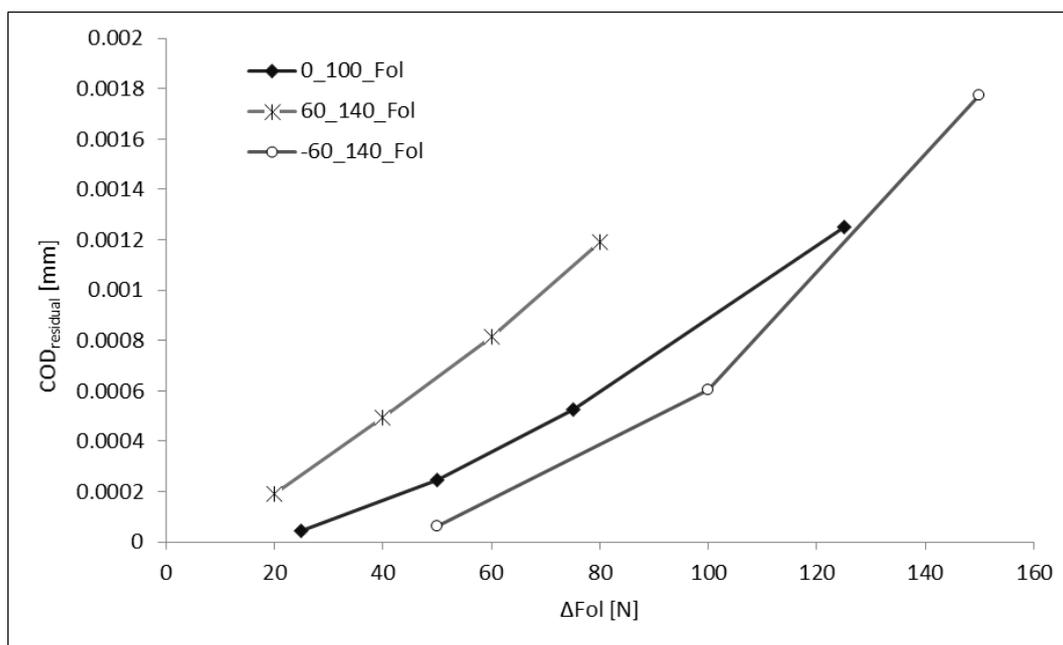


Figura 5.9. Efeito de ΔF_{ol} no COD residual.

O aumento de COD na região III foi também estudado, estando os resultados apresentados na Figura 5.10. Esta figura mostra o aumento de COD em função da amplitude de sobrecarga imposta. Nota-se claramente que há uma tendência crescente entre os pontos, ou seja, à medida que a sobrecarga é de maior amplitude, a variação do COD ($COD_{F_{OL}} - COD_{F_{máx}}$) também vai aumentar, quase numa relação linear. Como se pode também observar, o fator de correlação entre os dados e a linha de tendência é substancialmente elevado.

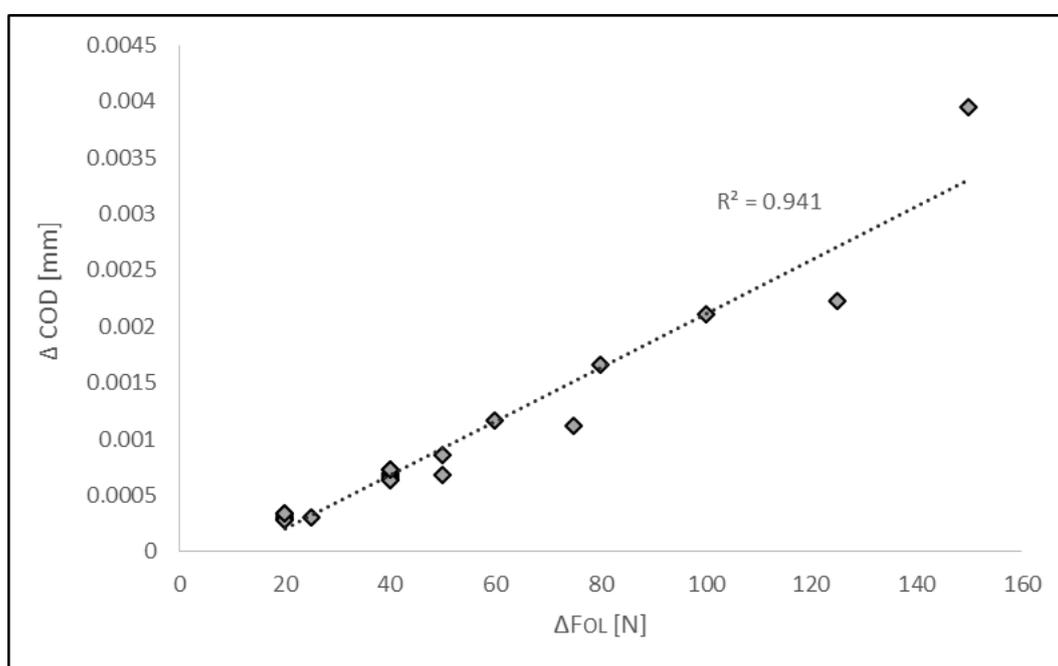


Figura 5.10. Correlação entre ΔCOD e ΔF_{OL} .

Na Figura 5.11 é apresentado o COD do caso LH_0_140_0_180 medido na zona de transição de carregamento (60° e 61° propagações). Nota-se que, após a variação de carga, há um aumento significativo do *Blunting*, o que explica a redução de fecho observada na Figura 5.5 após variação de carga.

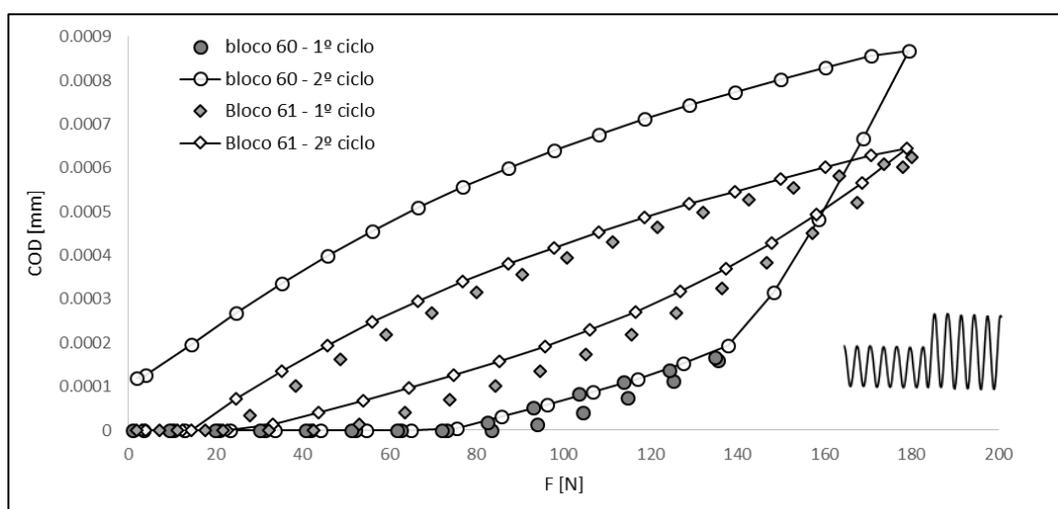


Figura 5.11. COD no caso LH_0_140_0_180 (zona de transição).

Por último, fez-se uma experiência para perceber qual o efeito que as variações de carga do tipo *High-Low* têm no *Blunting*. O caso estudado foi o HL_0_140_0_120. Fez-se uma medição do COD no 2º ciclo da propagação 120, procedeu-se à variação de carregamento e voltou-se a medir o COD, desta vez no 2º ciclo da propagação 121. O resultado apresenta-se na Figura 5.12. Observa-se claramente que, para uma dada carga, o *Blunting* é menor após de proceder à variação de carga (*High-Low*). Isso explica o aumento de fecho observado imediatamente após a variação de carga. De facto, a aproximação das faces da fenda aumenta a efetividade das cunhas plásticas.

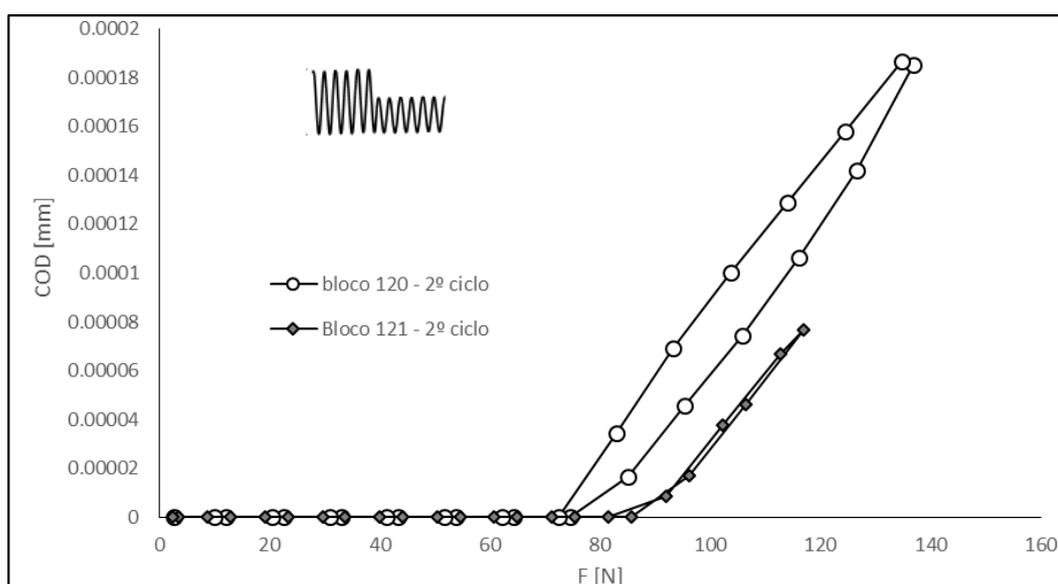


Figura 5.12. Influência da variação *High-Low* no *Blunting*.

5.2. Parâmetros Não Lineares de Extremidade de Fenda

Na Figura 5.13 são apresentados os pontos de Gauss que se optou por estudar e as correspondentes propagações a que estes estão associados.

De seguida, na Tabela 5.1, pode-se observar os valores obtidos para a energia dissipada e deformação plástica no caso HL_0_140_0_120. Note-se que à medida que a propagação de fenda vai avançando a energia dissipada por ciclo e a deformação plástica tendem a aumentar.

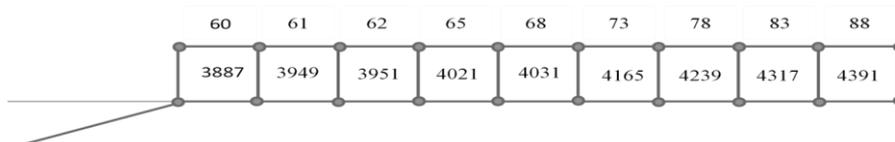


Figura 5.13. Pontos de Gauss em estudo.

Tabela 5.1: Energia Dissipada e Deformação Plástica em HL_0_140_0_120.

	Propagação de Fenda	Energia Dissipada $\left[\frac{N \times mm}{mm^3}\right]$	Deformação Plástica
3887	60	0.369754641	0.000770185
3949	61	0.281123388	0.000523775
3951	62	0.284010126	0.000656684
4021	65	0.349589087	0.000872496
4031	68	0.452569002	0.001136247
4165	73	0.664119157	0.001555836
4239	78	0.839432165	0.001801447
4317	83	1.006491126	0.002159132
4391	88	1.148332464	0.002346179

A Figura 5.14 mostra a energia dissipada à frente da extremidade de fenda em função da fama do fator de intensidade de tensões para os casos HL_0_140_0_120, HL_0_200_0_180 e HL_0_200_0_140.

A linha representada é a curva mestra, obtida em ensaios sem fecho de fenda. Para mais detalhes consultar a referência Sousa (2014). Quando os valores de energia aqui obtidos são representados em função de ΔK , os pontos estão claramente à direita da curva mestra. Isso indica que para os níveis de carga em questão seriam de esperar energias dissipadas mais altas. Porém, quando os valores de energia são representados em função de ΔK_{ef} vê-se que estes se sobrepõem à curva mestra, adquirindo a mesma tendência desta. Isso indica que o conceito de fecho de fenda é válido no caso de blocos de carga do tipo *High-Low*. Além disso, isso indica que não é necessário o modelo de fecho parcial proposto por Paris (1999) e Kujawski (2002) e utilizado por Borrego (2001) para explicar as variações de da/dN observadas em blocos de carga. Este modelo propõe que o efeito do contacto das faces da fenda em da/dN é menos relevante quando acontece remotamente relativamente à extremidade da fenda. Esse fenómeno de fecho parcial acontece em especial em situações de sobrecargas e de blocos de carga do tipo *High-Low*.

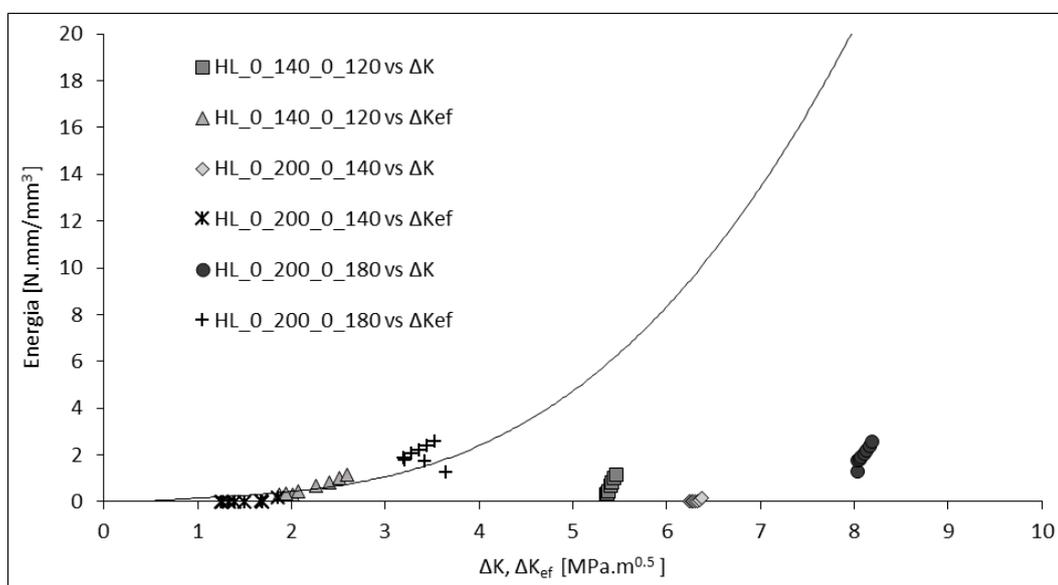


Figura 5.14. Efeito de ΔK e ΔK_{ef} na energia dissipada.

6. CONCLUSÕES

Ao chegar ao fim desta dissertação pode-se afirmar que todos os objetivos inicialmente propostos foram cumpridos. Existiam vários aspetos que até então não tinham sido muito explorados, como é o caso do arredondamento da extremidade de fenda, e que esta tese serviu para dar mais um passo rumo ao esclarecimento dos mesmos. As conclusões a retirar são as seguintes:

- Em casos *High-Low* após variação de carga observa-se um aumento imediato do nível de fecho seguido de um decréscimo progressivo ao valor estável correspondente ao 2º bloco de carga.
- Em casos *High-Low*, quando a variação de carga é muito elevada verifica-se a ocorrência de fecho parcial, ou seja, fecho numa posição remota relativamente à extremidade da fenda.
- De entre os dois parâmetros de fecho de fenda usados, $PICC_{Node1}$ e $PICC_{Contact}$, este último foi o que apresentou melhores resultados uma vez que engloba todo o contacto das faces da fenda e não apenas a análise da extremidade da fenda, o que é bastante importante devido ao fecho parcial.
- Os valores de abertura de fenda nos casos de deformação plana são bastante inferiores aos valores registados em tensão plana.
- À medida que o degrau de carga é mais elevado, a distância de estabilização também será maior.
- O aumento do degrau de carga afeta também o valor do pico de abertura de fenda, tendo-se observado uma tendência para a estabilização.
- O mecanismo das cunhas plásticas residuais é um dos parâmetros mais importantes no estudo dos efeitos de blocos de carga. Ficou provado que é um parâmetro com bastante influência e que controla o fecho de fenda.

- O arredondamento da extremidade de fenda (*Blunting*) é outro dos mecanismos mais importantes no fecho de fenda. Explica os “picos” verificados nos valores de fecho após variações de blocos de carga.
- Quanto mais próximo for o valor a que foi retirado o *Blunting* do valor de $F_{máx2}$, maior será o COD.
- O *Blunting* é particularmente relevante quando a carga ultrapassa a carga base.
- No caso de sobrecargas, se estas forem suficientemente elevadas, geram valores de COD_{residual} superiores a zero e podem eliminar por completo o efeito das cunhas plásticas.
- Para uma dada carga, o *Blunting* é menor após se proceder à variação de carga (*High-Low*).
- Analisando os parâmetros não lineares de extremidade de fenda e baseando estas conclusões no estudo feito com ΔK e ΔK_{ef} , pode-se afirmar que o conceito de fecho de fenda é válido no caso de blocos de carga do tipo *High-Low*. Além disso, a relevância do contacto das faces da fenda no nível de fecho não parece ser afetada pelo facto de se ter fecho parcial.

No seguimento deste trabalho seria interessante aprofundar o conceito de arredondamento da extremidade da fenda. Seria também importante estabelecer relações entre o COD e os parâmetros de carga e de material, que permitissem a previsão dos valores de fecho em situações de carga variável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antunes FV, Marques GAS, Chegini AG, Correia L. Transient behaviour in the numerical analysis of plasticity induced crack closure. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1-13, 2013.
- Antunes FV, Chegini AG, Correia L, Branco R. Numerical study of contact forces for crack closures analysis. *International Journal of Solids and Structures* 51(6), 1330-1339, 2014.
- ASTM E 647, Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates. American Society for Testing and Materials, 2001.
- Baptista J. Propagação de fendas por fadiga: Efeitos transientes associados a variações de carga, 2014.
- Bichler Ch, Pippan R. Effect of single overloads in ductile metals: A reconsideration. *Engineering Fracture Mechanics* 74, 1344-1359, 2007.
- Borrego LFP. Fatigue crack growth under variable amplitude loading in AlMgSi aluminium alloys. PhD thesis, University of Coimbra, Portugal, 2001.
- Branco C, Ferreira J, Costa J, Ribeiro A. *Projecto de Órgãos de Máquinas*, 2012.
- Carlson RL, Kardomateas GA, Bates PR. The effects of overloads in fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue* 13 (6), 453-460, 1991.
- Chaparro BM, Thuillier S, Menezes L, Manach PY, Fernandes JV. Material parameters identification: Gradient-based, genetic and hybrid optimization algorithms. *Computational Materials Science* 44(2), 339-346, 2008.
- Chermani RG, Shivakumar KN, Newman Jr, JC, AF Blom. Three-dimensional aspects of plasticity-induced fatigue crack closure. *Engineering Fracture Mechanics*, 34(2), 393-401, 1989.

-
- de Matos PFP, Nowell D. On the accurate assessment of crack opening and closing stresses in plasticity-induced fatigue crack closure problems. *Engineering Fracture Mechanics* 74(10):1, 579-601, 2007.
- 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.*
- Firrao D, Roberti R. Interrelation among microstructure, crack-tip blunting, and ductile fracture toughness in mild steels. *Fracture* 84, 1311-1319, 1984.
- 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.
- Handerhan KJ, Garrison Jr WM. A study of crack tip blunting and the influence of blunting behavior on the fracture toughness of ultra high strength steels. *Acta Metallurgica et Materialia*, 40(6), 1337-1355, 1992.
- Irwin GR. *Fracture in: Encyclopedia of Physics, S. Flugge, Vol. VI, Springer Verlag, 551-590, 1958.*
- Kujawski D. Utilization of partial crack closure for fatigue crack growth modeling. *Engineering Fracture Mechanics* 69, 1315-1324, 2002.
- Lee SY, Liaw PK, Choo H, Rogge RB. A study on fatigue crack growth behavior subjected to a single tensile overload Part I. An overload induced transient crack growth micromechanism. *Acta Materialia* 59, 485-494, 2011.
- McClung RC, Sehitoglu H. On the finite element analysis of fatigue crack closure-1: Basic modelling issues. *Engineering Fracture Mechanics*, 33(2), 237-252, 1989.
- McDiarmid DL, Choy W, Lee TM. The effect of mean stress on delay in fatigue crack growth load stepdown. *International Journal of Fatigue*, 6, 101-105, 1984.
- Newman Jr, JC. A finite element analysis of fatigue crack closure. *Mechanisms of crack growth, ASTM STP 590, 281-301, 1976.*

- Ng'Ang'a SP, James MN. 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 PC, Erdogan J. Critical analysis of crack growth propagation laws. *Journal of Basic Engineering* 85D, 528-534, 1963.
- Paris PC, Tada H, Donald JK. Service Load fatigue damage – a historical perspective. *International Journal of Fatigue*, 21, s35-s46, 1999.
- Pineau AG, Pelloux RM. Influence of strains induced martensitic transformations on fatigue crack growth rates in stainless steels. *Metallurgical Transactions* 5, 1103-1112, 1974.
- Pommier S, M Freitas. Effect on fatigue crack growth of interactions between overloads. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 25, 709-722, 2002.
- Pommier S, Risbet M. Time derivate equations for mode I fatigue crack growth in metals. *International Journal of Fatigue*, 27(10-12), 1297-1306, 2005.
- Ritchie RO, Suresh S, Moss CM. Near-threshold fatigue crack growth in 2(1/4)Cr-1 Mo pressure vessel steel in air and hydrogen. *Journal of Engineering Materials and Technology* 102, 293-299, 1980.
- Sehitoglu H, McDiarmid DL. The effect of load step-down on fatigue crack arrest and retardation. *International Journal of Fatigue*, 2, 55-60, 1980.
- Sousa T. Propagação de fendas por fadiga: Influência do contacto nos parâmetros de extremidade de fenda, 2014.
- Suresh S, Ritchie RO. On the influence of fatigue underloads on cyclic crack growth at low stress intensities. *Materials Science and Engineering* 51, 61-69, 1981.
- Suresh S, Ritchie RO. A geometric model for fatigue crack closure induced by fracture surface roughness. *Metallurgical Transactions* 13A, 1627-1631, 1982.
- 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.

- 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.
- Tzou JL, Suresh S, Ritchie RO. Fatigue crack propagation in oil environments. I-crack growth in silicone and paraffin oils. *Acta Metallurgica* 33, 105-116, 1985.
- Ward-Close CM, Blom AF, Ritchie RO. Mechanisms associated with transient fatigue crack growth under variable amplitude loading: an experimental and numerical study. *Engineering Fracture Mechanics*, 32, 613-638, 1989.
- Wei L-W, James MN. Numerical modelling of plasticity-induced crack closure for interfacial cracks in bi-material specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 71, 309-327, 2004.