



TÉCNICO
LISBOA



Simulação da Propagação de uma Fissura na Fuselagem de uma Aeronave

João Diogo Candeias

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Aeroespacial

Orientadores: Prof. Luis Filipe Galvão dos Reis

Prof. Ricardo Miguel Gomes Simões Baptista

Júri

Presidente: Prof. Filipe Szolnoky Ramos Pinto Cunha

Orientador: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Vogal: Prof. Ricardo António Lamberto Duarte Cláudio

Janeiro 2021

Declaro que este documento é uma obra original da minha autoria e que atende a todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da *Universidade de Lisboa*.

Agradecimentos

Ao finalizar uma etapa particularmente importante na minha vida, quero expressar os meus mais sinceros agradecimentos às pessoas que me apoiaram e contribuíram para elaborar a minha Dissertação de Mestrado.

Em primeiro lugar aos meus orientadores, Senhores Professores Luís Filipe Galvão dos Reis e Ricardo Miguel Gomes Simões Baptista pela incansável orientação científica, pelos comentários e sugestões nas sucessivas revisões do documento, pela exigência e pelo rigor com que sempre pautaram as suas decisões e, por último, pelo permanente estímulo e acompanhamento que, muitas vezes, foram determinantes para seguir em frente com maior motivação.

Agradeço ainda a alguns amigos e colegas que contribuíram para a concretização deste trabalho através da amizade, do apoio e dos incentivos manifestados.

Por fim, agradeço o apoio incondicional do meu pai, da minha mãe, da minha irmã e toda a família pela compreensão que, continuamente, manifestaram e pela coragem que sempre me transmitiram ao longo deste percurso académico.

Resumo

O trabalho apresentado nesta dissertação insere-se na área da avaliação da integridade estrutural de uma aeronave, nomeadamente através do estudo da “Simulação da Propagação de uma Fenda na Fuselagem de uma Aeronave” sob diferentes condições de carregamento, no âmbito do Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Aeroespacial.

O trabalho realizado tem como objetivos: avaliar a resistência mecânica de um componente na presença de uma fissura sob um carregamento biaxial no plano (Número de ciclos realizados); avaliar o crescimento de uma fissura no plano para diferentes tipos de solicitações (variação de fase; variação de frequência); avaliar qual/ quais o(s) critério(s) mais adequado(s) à previsão do comportamento de uma fissura para um dado carregamento; validação de um algoritmo de análise numérica de propagação de fissuras no contexto do comportamento mecânico dos materiais.

A simulação da propagação de fissuras em condições biaxiais no plano, visa representar as condições de carregamento da fuselagem de uma aeronave. A previsão do comportamento da fissura pode ter um impacto enorme tanto nas condições de extensão de vida da aeronave como a nível económico.

A realização da simulação de propagação de fissura sob as diferentes condições de carregamento iniciou-se com a modelação e o design de um provete cruciforme. Analisam-se carregamentos biaxiais com variação do rácio biaxial, fase e frequência, através da avaliação do campo de tensões na frente de fenda, com especial ênfase nos fatores intensidade de tensão. Tecem-se conclusões sobre a influência dos parâmetros estudados no crescimento e na direção de propagação de uma fenda.

Palavras-chave

Propagação de Fendas, Provetes Cruciformes, Carregamentos Biaxiais, Fator Intensidade Tensão, Análise Numérica, Mecânica da Fratura

Abstract

The work presented in this dissertation is within the area of the assessment of the structural integrity of an aircraft, namely through the study of the “Simulation of the Propagation of a Crack in the Fuselage of an Aircraft” under different loading conditions, regarding the Integrated Master Course in Aerospace Engineering.

The work carried out aims to: evaluate the mechanical resistance of a component in the presence of a crack under a biaxial loading in the plane (Number of cycles performed); to evaluate the growth of a crack in the plane for different types of sequences (phase variation; frequency variation; to evaluate which criteria are more suitable to predict the behavior of a crack for a certain load; validation of a numerical analysis algorithm for crack propagation in the context of the mechanical behavior of materials.

A simulation of crack propagation in biaxial conditions in the plane, aims to represent the loading conditions of an aircraft's fuselage. Predicting crack behavior can have a huge impact on both the aircraft's life span and economic conditions.

The simulation of the crack propagation under different conditions of initial loading is done with the modeling and design of a cruciform specimen. Biaxial loads are analyzed with the variation of biaxial ratio, phase and frequency, through the evaluation of the stress field in the crack front, with special emphasis on the stress intensity factors. Conclusions are taken about the influence of the studied parameters on the growth and the direction of propagation of a crack.

Keywords

Crack Propagation, Cruciform Specimen, Biaxial Loads, Numerical Analysis, Frature of Mechanics, Stress Intensity Factor.

Índice

Resumo	vii
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xvi
Lista de Abreviações.....	xvii
Lista de Símbolos.....	xviii
Lista de Software	xx
1 Capítulo – Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura	4
2 Capítulo – Revisão Bibliográfica	5
2.1 Modos de falha estrutural.....	5
2.2 Revisão geral de fadiga	7
2.2.1 Design de vida infinita (Infinite-Life)	9
2.2.2 Design de vida segura (Safe-Life).....	10
2.2.3 Design de tolerância do dano.....	10
2.3 Requisitos de aeronavegabilidade	12
2.4 Inspeções não destrutivas	13
2.5 Mecânica da Fratura (MF).....	16
2.5.1 Distribuição de Tensões numa fenda.....	17
2.5.2 Modos de Carregamento.....	18
2.5.3 Fator Intensidade de Tensões.....	19
2.5.4 Crescimento de Fendas	21
2.5.5 Estado Biaxial de Tensões e Carregamentos	22
2.5.6 Critérios de Direção de Propagação	25
3 Capítulo – Material e metodologia	29
3.1 Material e provete	29
3.2 Metodologia da Análise Numérica	31
3.2.1 Introdução ao software Abaqus® e MatLab.....	32
3.2.2 Modelação do Provete Cruciforme e da fenda inicial.....	32

3.2.3	Seleção do material, da Malha e do tipo dos Elementos	33
3.2.4	Condições Fronteira e Carregamentos	34
3.2.5	Algoritmo Para o Estudo da Propagação da fenda	37
4	Capítulo – Resultados da Análise Numérica	41
4.1	Carregamentos proporcionais (em fase)	41
4.2	Carregamentos desfasados	44
4.3	Carregamentos com variação de frequência	50
5	Capítulo – Análise de Resultados	59
5.1	Carregamentos proporcionais em fase	59
5.2	Carregamentos desfasados	63
5.3	Carregamentos com variação de frequência	67
5.3.1	Duplicação da frequência	67
5.3.2	Carga estática	69
6	Conclusões do estudo e desenvolvimentos futuros	71
	Bibliografia	73

Lista de Figuras

Figura 1– Caracterização do processo de fadiga [1] [4]	1
Figura 2 - Aeronaves Comet e Boeing 737-200.....	2
Figura 3 – Exemplos de modos de Fratura Estrutural: a) Estabilizador vertical -American Airlines Flight 587 b) Fluência – Southwest Airlines c) Buckling: cilindro de teste sujeito a força compressiva	6
Figura 4 - Exemplos de modos de Fratura Estrutural: a) Corrosão da Fuselagem - Aloha Airlines Flight 243; b) Deformação excessiva – Airbus A380 Simulation	7
Figura 5 - Comportamento mecânico dos materiais[6]	8
Figura 6 - Conceito geral de (propagação da) fenda	9
Figura 7 - Representação Esquemática do aumento do tamanho de fenda até valores críticos em função do tempo de serviço de uma aeronave – Design de Tolerância ao Dano [66]	11
Figura 8 - Condições de Aeronavegabilidade[48]	13
Figura 9 – Intervalo de tempo entre as NDI a realizar: crescimento de fenda em função dos ciclos de carregamento [22].	15
Figura 10 - Equipamento acústico de detenção de fendas. Método indireto a) e direto b)	16
Figura 11 - Comportamento real e ideal da tensão na fenda.....	17
Figura 12 – Campo de tensões na frente de fenda[56].....	18
Figura 13 – Modos de Carregamento a) I b) II c) III.....	19
Figura 14 – Diagrama dos diferentes regimes de propagação: crescimento de fenda em função do logaritmo da variação do fator intensidade de tensão.	21
Figura 15 – Exemplos de provetes cruciformes. a) estudo experimental [36] b) estudo numérico [37]......	23
Figura 16 – Carregamentos proporcionais - Adaptado de [38]......	23
Figura 17 – Carregamentos fora de fase - Adaptado de [38].....	24
Figura 18 – Carregamentos com variação de frequência - Adaptado de [38].	25
Figura 19 - Esquema ilustrativo da frente de fenda	26
Figura 20 – Exemplo de variação de $KI * a$ e $KII * b$ com a direção de propagação e para um carregamento proporcional.....	27
Figure 21 - Exemplo de variação de $KI * a$ e $KII * b$ com a direção de propagação e para um carregamento não-proporcional.	27
Figura 22 – a) Geometria e dimensões do provete cruciforme [30];.....	31
Figura 23 - Modelação do Provelte Cruciforme: a)	33
Figura 24 – a) Malha do provete. b) Malha na frente de fenda.....	34
Figura 25 – Valores de $L1(t)$ e $L2t$ ao longo de um ciclo de carregamento: variação da amplitude de carga, carregamentos proporcionais.	35
Figura 26 – Valores de $L1te L2t$ ao longo de um ciclo de carregamento: variação da fase para a) 90° ou b) 180° , carregamentos desfasados ou fora de fase.....	36
Figura 27 – Valores de $L1(t)$ e $L2t$ ao longo de um ciclo de carregamento: variação da frequência para a) 2 ou b) 0	36
Figura 28 - Condições de fronteira e cargas aplicadas no provete	37
Figura 29 – Algoritmo numérico para o estudo da propagação de fendas[53]......	38
Figura 30 – Malha e comportamento das tensões na frente de fenda[31]	39
Figura 31 – Curva de propagação da fenda: $\beta=0^\circ$; $\phi=0^\circ$, MTS.....	42
Figura 32 – Variação dos fatores de intensidade de tensão $KI * e KII *:$ $\beta = 0^\circ$; $\phi = 0^\circ$	42

Figura 33 – Curva de propagação com variação do rácio biaxial: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0^\circ$; MTS	43
Figura 34 – Variação dos fator intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta = 45^\circ$; $\lambda = 0,5$; $\phi = 0^\circ$...	43
Figura 35 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=45^\circ$; $\lambda=0.5$; $\phi=0^\circ$	43
Figura 36 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=45^\circ$; $\lambda=1,5$; $\phi=0^\circ$	44
Figura 37 – Curvas de propagação: $\beta=15,30^\circ, 45^\circ$; $\phi=90^\circ$; MTS	45
Figura 38 – Curva de propagação: $\beta=15,30^\circ, 45^\circ$; $\phi=90^\circ$; MSS.....	45
Figura 39 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=15^\circ$; $\phi=90^\circ$	46
Figura 40 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=30^\circ$; $\phi=90^\circ$	46
Figura 41 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=45^\circ$; $\phi=90^\circ$	47
Figura 42 – Curva de propagação: $\beta=15,30^\circ, 45^\circ$; $\phi=180^\circ$; MTS	47
Figura 43 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=15^\circ$; $\phi=180^\circ$	48
Figura 45 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=30^\circ$; $\phi=180^\circ$	48
Figura 47 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=45^\circ$; $\phi=180^\circ$	48
Figura 48 – Curva de Propagação	49
Figura 49 – a) Curva de Propagação (MTS) e b) Variação do fator intensidade de tensão $KI *$: $\beta=45^\circ$; $\lambda=0.5$; $\phi=90^\circ$	49
Figura 50 - a) Curva de Propagação (MTS) e b) Variação do fator intensidade de tensão $KI *$: $\beta=45^\circ$; $\lambda=1.5$; $\phi=90^\circ$	50
Figura 51 – a) Curva de Propagação para carregamentos com frequência duplicada no eixo horizontal: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0^\circ$, MTS.....	51
Figura 52 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$ com o dobro da frequência no eixo horizontal : $\beta=45^\circ$; $\phi=0^\circ$	51
Figura 54 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$ com o dobro da frequência no eixo horizontal : $\beta=30^\circ$; $\phi=0^\circ$	52
Figura 56 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$ com o dobro da frequência no eixo horizontal : $\beta=15^\circ$; $\phi=0^\circ$	52
Figura 57 – a) Curva de Propagação para carregamentos com frequência duplicada no eixo horizontal: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0^\circ$, MSS	53
Figura 58 – a) Curva de Propagação para carregamentos com frequência duplicada no eixo horizontal: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=45^\circ$, MTS.....	54
Figura 59 - Curva de Propagação e Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=45^\circ$; $\phi=45^\circ$	54
Figura 61 - Curva de Propagação e Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=30^\circ$; $\phi=45^\circ$	55
Figura 63 - Curva de Propagação e Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=15^\circ$; $\phi=0^\circ$	55
Figura 64 – a) Curva de Propagação para carregamentos com frequência duplicada no eixo horizontal: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=45^\circ$, MSS	56
Figura 65 – Curva de Propagação para carregamentos com frequência nula no eixo horizontal: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0^\circ$, MTS	57
Figura 66 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=45^\circ$; $\phi=0^\circ$	57
Figura 68 - Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=30^\circ$; $\phi=0^\circ$	57
Figura 70 – Variação dos fatores intensidade de tensão $KI * e KII *$: $\beta=15^\circ$; $\phi=0^\circ$	58
Figura 71 – Curva de Propagação para carregamentos com frequência nula no eixo horizontal: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0^\circ$, MSS.....	58
Figura 72 – Crescimento de fenda em função dos ciclos de carregamentos aplicados.....	60
Figura 73 - Gráficos de variação SIF $KI * e KII *$ [30].....	61
Figura 74 - Gráficos de variação SIF $KI * e KII *$ [30].....	64
Figura 75 - Gráficos de variação SIF $KI * e KII *$ [30].....	64
Figura 76 - Gráficos de variação SIF $KI * e KII *$ [30].....	65

Figura 77 - Gráficos de variação SIF $KI * e KII * [30]$	66
Figura 78 - Gráficos de variação SIF $KI * e KII * [30]$	67
Figura 79 – Direção da propagação da fenda vertical [55]	70

Lista de Tabelas

Tabela 1: Aplicações aeronáuticas das ligas de Alumínio	29
Tabela 2: Características mecânicas da liga Al 7075 -T6 [49]	30
Tabela 3: Diversos tipos de carregamentos apresentados.....	41

Lista de Abreviações

NTSB	National Transportation Safety Board
FEM	Método dos Elementos Finitos
EUA	Estados Unidos da América
MTS	Tensão Tangencial Máxima
MSS	Tensão de Corte Máxima
MF	Mecânica da Fratura
EASA	Agência Europeia de Segurança e Aviação
NDI	Inspeções Não Destrutivas
FAA	Federação Americana da Aviação
DTD	Design de Tolerância ao Dano
MFEP	Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
SIFs	Fator Intensidade de Tensão
IADS	Sistema Internacional de Nomenclatura de Alumínios
EF	Elementos Finitos

Lista de Símbolos

K_I	Fator Intensidade Tensão – K_I
K_{II}	Fator Intensidade Tensão – K_{II}
K_{III}	Fator Intensidade Tensão – K_{III}
Y	Fator Geométrico Característico da Fenda
σ	Tensão Nominal Aplicada
$2a$	Comprimento de fenda
(r, θ)	Sistema de Coordenadas Polar
σ_{ij}	Tensor das Tensões
k	Constante
f_{ij}	Função Adimensional
g_{ij}	Função Adimensional
A_{im}	Função Adimensional de Amplitude
K_c	Tenacidade à Fratura
C	Constante do material – Lei de Paris
m	Constante do material – Lei de Paris
w	Frequência Radial do Carregamento
Φ	Desfasamento entre Cargas
λ	Rácio Biaxial
β	Inclinação Inicial da Fenda
$K_{I\text{máx}}$	Fator intensidade Tensão Máximo – $K_{I\text{máx}}$
$\Delta K_{I\text{máx}}$	Máxima Variação do Fator Intensidade Tensão – $\Delta K_{I\text{máx}}$
$\Delta K_{II\text{máx}}$	Máxima Variação do Fator Intensidade Tensão – $\Delta K_{II\text{máx}}$
K_I^*	Fator Intensidade Tensão Virtual – K_I^*
K_{II}^*	Fator Intensidade Tensão Virtual – K_{II}^*

Lista de Software

ABAQUS	Programa de Simulação Numérica: Elementos Finitos
MATLAB	Programa de Simulação Numérica

1 Capítulo – Introdução

Este capítulo inicia-se com um breve enquadramento aos conteúdos abordados na elaboração da Dissertação de Mestrado, sobre o tema “Simulação da Propagação de uma Fenda na Fuselagem de uma Aeronave”, realizada no âmbito do Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Aeroespacial. É ainda constituído pelos objetivos e pela estrutura deste trabalho.

1.1 Enquadramento

O estudo e a análise da integridade estrutural de componentes mecânicos são áreas de grande importância na engenharia. Nas últimas décadas, estas têm sido amplamente desenvolvidas devido à evolução do conhecimento e dos estudos inerentes aos métodos numéricos, bem como à mecânica da fratura e à fadiga. Para assegurar que estes componentes são viáveis e eficientes ao longo da sua vida útil é indispensável assegurar que não ocorrem falhas.

Para isso, deve ter-se em consideração que a durabilidade dos componentes desempenha um papel fundamental numa fase inicial de um projeto de engenharia. Um dos principais problemas nestes projetos deve-se à fratura por fadiga dos componentes estruturais. Prevê-se que 80 a 90% das falhas de componentes sejam inerentes ao fenómeno de fadiga [1], em consequência da acumulação de dano associada aos tipos de carregamentos a que são submetidos [2].

Para que se possa compreender este fenómeno é necessário desenvolver o conhecimento atual da Mecânica da Fratura. Esta é uma das áreas da Resistência de Materiais que se foca no estudo de componentes que contêm fendas. Nesta dissertação, os termos fenda e fissura de fadiga são sinónimos e são utilizados de forma intermutável. É importante compreender as diversas etapas envolvidas no processo de aparecimento de uma fenda de fadiga. Este inicia-se com a nucleação seguido do crescimento microscópico da fenda e posterior propagação até à rotura final, ilustrado na figura 1.

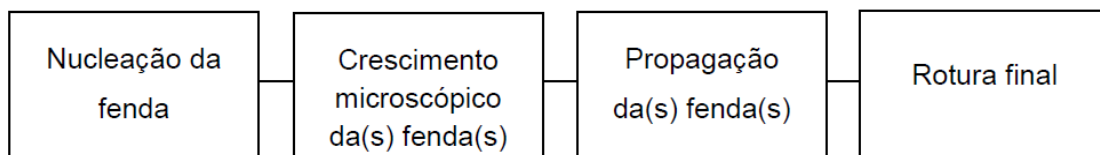


Figura 1 – Caracterização do processo de fadiga [1] [4]

Tal como se verifica noutras áreas da Engenharia, os acidentes de aviação estão associados à evolução do conhecimento e ao aperfeiçoamento das condições de segurança. Os acidentes dos aviões *Comet* e o acidente da aeronave *Boeing 737-200 da Aloha Airlines* merecem algum destaque e podem visualizar-se na figura 2.



Figura 2 - Aeronaves Comet e Boeing 737-200

O *Comet I* foi o primeiro avião a jacto comercial. Desenvolvido pela *Havilland Aircraft Company* do Reino Unido foi projetado para voar a altas altitudes e entrou em serviço em 1951. Em 1952 e 1954, ocorreu a desintegração e a queda de diversos aviões *Comet* devido ao gradiente de pressões a que a fuselagem estava sujeita. Estes acidentes provocaram inúmeras mortes e tiveram consequências drásticas na reputação da companhia aérea. Após estes acontecimentos os aviões *Comet* foram retirados de serviço e diversas entidades mundialmente reconhecidas tais como a *National Transportation Safety Board* (NTSB) dos EUA iniciaram investigações para descobrir as suas causas. Estas investigações revelaram que os acidentes tiveram origem na propagação de fissuras com valores de dano críticos e, conseqüentemente, a cabine de pressurizada desintegrou-se. Concluiu-se que os *Comet*, apesar de terem sido amplamente testados, não tinham sido projetados no que diz respeito à capacidade de resistência à propagação de fendas (crack arrest capability) [3].

Deste modo, adotaram-se filosofias de projeto para tolerância ao dano (*fail-safe design*) que consistem na incorporação de diversas técnicas para minimizar as perdas originadas pela falha de um componente ou estrutura. Nesta filosofia de projeto para tolerância ao dano assume-se que os componentes são capazes de suportar dano e continuar a ser operados em segurança até a estrutura atingir valores de acumulação de dano críticos. Isto implica a realização de inspeções rigorosas e periódicas que permitam detetar quando as fendas atingem valores críticos, evitando assim a rotura dos componentes.

Algumas décadas depois, em 1988, o acidente do avião *Boeing 737-200* operado pela *Aloha Airlines* teve novamente um grande impacto na evolução do conhecimento da propagação de fissuras. Apesar deste incidente ter causado números de mortes inferiores aos dos aviões *Comet*, também resultou em novas investigações para descobrir as causas do acidente. Descobriu-se que houve problemas na parte de cima da cabine, que conduziram à desintegração da estrutura. Estas investigações revelaram que a existência de fenómenos de dano críticos da fuselagem se deveu à iniciação de fendas de fadiga em vários locais (*multiple-site damage*).

Assim, começou a adotar-se uma nova filosofia de projeto para vida garantida (*safe-life design*) que visa garantir que o componente não desenvolva falhas durante o seu tempo de vida útil. Esta filosofia foca-se em evitar a iniciação de fendas de fadiga e pode requerer que os componentes sejam

substituídos, no caso de haver fissuras [3].

Estas contribuições resultaram em melhorias significativas na segurança das aeronaves. Atualmente adotam-se ambas as filosofias de projeto. Relativamente à tolerância ao dano (*fail-safe*) é fundamentalmente utilizada em componentes estruturais principais como a fuselagem da aeronave, em que a sua substituição é bastante complexa. Já o projeto para vida garantida (*safe life*) utiliza-se em componentes estruturais secundários tais como o trem de aterragem, que podem ser substituídos.

Um dos métodos mais utilizados para o estudo do comportamento dos componentes e das propriedades dos materiais é o método dos elementos finitos (FEM), que permite simular a realidade através de modelos matemáticos [4]. Perante a constante evolução da capacidade de processamento dos computadores, nas décadas de 1960 e 1970 surgiram alguns programas comerciais de elementos finitos, tais como o Abaqus®, que permitem o estudo detalhado da propagação de fendas. Estes programas são utilizados em projetos de engenharia devido ao facto de serem uma poderosa ferramenta computacional que permite a redução de custos de projeto, o estudo de novos materiais e de geometrias mais complexas.

Os componentes aeroespaciais (metálicos) estão sujeitos a carregamentos multiaxiais complexos tais como os carregamentos biaxiais proporcionais, não proporcionais, em fase e fora de fase. [5].

Embora tenham sido realizados inúmeros esforços no sentido de compreender detalhadamente a propagação de fendas sob carregamentos uniaxiais, poucos estudos foram realizados sob condições de carregamento biaxiais e multiaxiais. [8].

Diversas entidades, tais como a Agência Europeia para a Segurança da Aviação e a Administração Federal de Aviação dos EUA, estabeleceram que estas estruturas devem cumprir diversos requisitos para obter o desejado compromisso entre a segurança e o tempo de serviço de uma aeronave. Devido aos enormes custos e ao tempo necessário para a realização de testes experimentais a utilização de programas comerciais de elementos finitos é uma ferramenta indispensável.

Deste modo é pertinente o desenvolvimento de um algoritmo numérico que permita a simulação da propagação de fissuras em condições biaxiais, o qual poderá representar as condições de carregamento da fuselagem de uma aeronave. Neste contexto, no caso de estudo realizado utiliza-se um provete cruciforme para o estudo aprofundado do crescimento de fenda.

Ao longo desta dissertação abordam-se as diferentes teorias da Mecânica da Fratura para compreender a influência de diversos parâmetros e carregamentos na propagação de fissuras, com especial ênfase nos critérios de tensão tangencial máxima e tensão de corte máxima, MTS e MSS, respetivamente.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como propósito analisar a propagação de fissuras em condições biaxiais no plano, que podem representar as condições de carregamento da fuselagem de uma aeronave. Neste contexto efetua-se a modelação e o design de um provete cruciforme e analisam-se diversos carregamentos biaxiais (proporcionais, não proporcionais, em fase e fora de fase). Realizam-se análises de variação de frequência, estuda-se a existência do efeito da não proporcionalidade e correlaciona-se com dados presentes na literatura.

1.3 Estrutura

Este documento é constituído por 6 capítulos.

O capítulo 1 introduz e enquadra o tema desta dissertação bem como a apresentação da estrutura do documento.

O capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica, que fundamenta este trabalho e serve de suporte teórico ao presente estudo. Apresentam-se as diversas teorias da mecânica da fratura linear elástica, associadas ao estudo da propagação de fissuras, com especial ênfase nos fatores de intensidade de tensão.

O capítulo 3 referente aos materiais e metodologias divide-se em duas seções. A primeira é dedicada à seleção e dimensionamento da geometria do provete bem como à escolha e caracterização do material em estudo. Na segunda seção apresentam-se as metodologias e critérios (MTS e MSS) de propagação do caso de estudo. Aborda-se a metodologia utilizada para a modelação do provete, aplicação dos diversos carregamentos e outros conceitos essenciais relacionados com a análise numérica, no software Abaqus® e MatLab.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na análise numérica. Dedicar-se à apresentação dos resultados da propagação de fendas de fadiga obtidos através da utilização do algoritmo escolhido.

O capítulo 5 é dedicado à análise e discussão dos resultados obtidos. São realizadas comparações com outras soluções teóricas e experimentais idênticas presentes na literatura.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões do estudo e tecem-se algumas propostas relativas a desenvolvimentos futuros.

2 Capítulo – Revisão Bibliográfica

2.1 Modos de falha estrutural

A ocorrência de falhas ou rotura de componentes na engenharia aeroespacial é um fenómeno de extrema importância sendo fundamental o seu estudo, motivo que conduziu à realização desta tese. Para cumprir os requisitos de aeronavegabilidade é necessário que as aeronaves sejam projetadas de forma a garantir que qualquer falha seja reparada ou o componente retirado de serviço antes de ocorrer rotura. [9].

Deste modo, este capítulo é dedicado ao estudo dos principais modos de falha estrutural a que os diversos componentes estão sujeitos. Nas figuras 3 e 4 observam-se alguns exemplos deste tipo de modo de falhas de componentes na indústria aeroespacial.

- **Deformação excessiva:** é causada pelas forças aplicadas e pode originar mudanças geométricas indesejadas no componente. Se a deformação for elástica, causada por carregamentos de baixa amplitude, pode ser recuperável quando a carga deixa de ser aplicada. No entanto, a deformação pode ser plástica, quando é causada por carregamentos em que a força aplicada excede um dado valor consoante o componente e o tipo de material. Nestes casos os componentes podem recuperar apenas parcialmente a sua forma. Por vezes, quando a deformação é controlada pode constituir uma medida adicional de segurança [10].
- **Fluência:** está associada ao deslizamento lento do material quando sujeito a uma força estática grande. Quando esta carga é retirada alguma parte da deformação é recuperada ao longo do tempo. No entanto, algumas partes do componente podem não regressar à forma original. É especialmente importante em materiais metálicos, que operam durante longos períodos, a altas temperaturas e estão sujeitos a grandes cargas [10].
- **Instabilidade (*Buckling*):** é a mudança repentina da forma de um componente estrutural quando sujeito a uma carga. É possível calcular-se a carga crítica de diversas estruturas. Se a estrutura estiver sujeita a uma carga superior à carga crítica sofre instabilização, e dobra. Esta forma de falha estrutural é particularmente importante em componentes como a parte superior das asas de uma aeronave, que se encontram sujeitas a cargas predominantemente de compressão [11].

- **Corrosão:** é um processo químico em que ocorre a deterioração de um material. Existem diversos tipos de corrosão: uniforme; por picada; intersticial; intergranular; galvânica; seletiva; induzida por velocidade; por fissuras [12].

A temperatura (ambiente) também influencia este processo. A ação conjunta da corrosão e das diversas cargas aplicadas ao longo do tempo num componente, bem como a propagação de fissuras, tornam o processo de corrosão um dos modos de falha estrutural mais relevante e particularmente perigoso [12].

- **Fadiga:** Está associado a cargas cíclicas e é um dos fatores que mais limita o tempo de serviço de uma aeronave. Resistir a este processo é um dos desafios principais para garantir a aeronavegabilidade e serão discutidos nos próximos subcapítulos algumas teorias de design associadas à fadiga.

A fratura final ocorre quando um componente se separa em duas ou mais partes. Apesar de isto poder acontecer devido a uma força extrema, está normalmente associado ao processo de fabrico dos componentes ou à acumulação de dano durante o seu tempo de serviço.

Contudo, existem inúmeros fatores que podem contribuir para a fratura final. Desde as propriedades do material, as cargas (estáticas ou cíclicas) que o componente está sujeito, a sua geometria, a temperatura (ambiente) e até devido a qualquer um destes processos descritos nesta seção.



Figura 3 – Exemplos de modos de Fratura Estrutural: (esquerda) Estabilizador vertical - American Airlines Flight 587; (centro) Fluência – Southwest Airlines; (direita) Buckling: cilindro de teste sujeito a força compressiva



Figura 4 - Exemplos de modos de Fratura Estrutural: (esquerda) Corrosão da Fuselagem - Aloha Airlines; (direita) Deformação excessiva – Airbus A380 Simulation

2.2 Revisão Geral de Fadiga

Inerente à possibilidade de as estruturas conterem fendas de tamanhos reduzidos e ao risco destas fissuras poderem continuar a propagar-se por fadiga até à rotura final é fácil perceber-se a importância do estudo do fenómeno da propagação de fissuras.

Para isso, deve-se compreender detalhadamente o conceito de fenda presente no capítulo da Mecânica da Fratura, bem como as metodologias de cálculo que foram desenvolvidas no âmbito do estudo da sua propagação. Sabendo que uma grande parte das falhas estruturais de componentes mecânicos é originada pela propagação de fissuras percebe-se a importância do fenómeno de fadiga apresentado, para garantir a integridade estrutural dos componentes durante o seu tempo de serviço. Deste modo, deve compreender-se o conceito de fenda e como variam os campos de tensões na zona correspondente à frente de fenda.

De uma forma geral, a propagação de fissuras divide-se em duas etapas que envolve a formação de fissuras e posterior propagação, sendo que este estudo tem como objetivo principal o estudo da propagação. Por sua vez, a etapa de propagação pode conduzir à rotura final do componente. Esta rotura pode caracterizar-se como dúctil ou frágil consoante a deformação plástica a que está associada. Na figura 5 apresenta-se um esquema onde se pode visualizar diversos tipos de rotura. No caso A a fratura associada é dúctil, em B é moderadamente dúctil e em C é frágil.

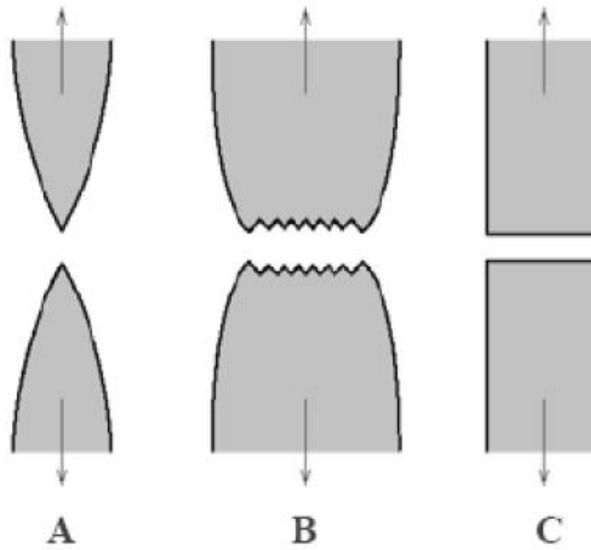


Figura 5 - Comportamento mecânico dos materiais [6]

Antes de se prosseguir para o estudo das teorias de integridade estrutural desenvolvidas com o objetivo de modelar a propagação de fendas deve entender-se um pouco melhor o conceito de fenda esquematizado na figura 6. Pode visualizar-se um componente que contém uma fenda em propagação, sendo que a propagação depende das cargas aplicadas, do tamanho de fenda e da geometria do componente. O fator intensidade de tensão K_I , obtido através da equação (1), é um dos conceitos fundamentais a ter em consideração no estudo da mecânica da fratura, em especial relativamente à mecânica da fratura linear elástica, que é apresentada em detalhe no capítulo da Mecânica da Fratura (MF).

$$K_I = Y\sigma(\pi a)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Onde Y representa o fator geométrico característico da fenda, σ a tensão remotamente (ou nominal) aplicada e a o comprimento de fenda. O fator intensidade de tensões é um dos conceitos fundamentais a ter em consideração no estudo da mecânica da fratura linear elástica.

A figura 6 representa o conceito geral de propagação de uma fenda, onde a simboliza variação do comprimento de fenda, σ os carregamentos aplicados e Y depende da geometria do componente, sendo que no caso representado $Y=1.12$.

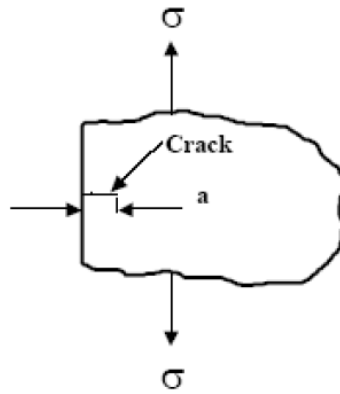


Figura 6 - Conceito geral de (propagação da) fenda [6]

No entanto, é imprescindível o desenvolvimento de teorias de integridade estrutural para garantir que os componentes tenham uma longa durabilidade.

Com esse objetivo, deve realizar-se uma escolha adequada do material constituinte de cada componente consoante as suas aplicações. Também é importante que as estruturas sejam projetadas de forma a minimizar as tensões aplicadas bem como a implementação de rigorosos programas de inspeção. Além disso, estes componentes devem ser capazes de providenciar alguma capacidade de resistir à propagação de fendas, através de mecanismos de múltiplos caminhos de carga e a utilização de material de retenção de fissuras em zonas críticas [10].

Como foi referido anteriormente, alguns acidentes de aeronaves conduziram à utilização e ao constante desenvolvimento de diversas teorias de design por parte de investigadores e especialistas. Para aperfeiçoar estas teorias desenvolveram-se métodos sofisticados dedicados ao estudo do dano acumulado, permitindo assim uma maior precisão ao avaliar a força residual e a vida à fadiga dos componentes. As teorias de design serão apresentadas de seguida, tendo em linha de conta os requisitos de aeronavegabilidade necessários para avaliar a integridade estrutural, regulados pela Agência Europeia de Segurança e Aviação (EASA) e pela Administração Federal Aviação (FAA), na União Europeia e nos Estados Unidos, respetivamente.

2.2.1 Design de Vida Infinita (Infinite-Life)

Inicialmente a fadiga era um fenómeno de difícil interpretação, pelo que a filosofia de projeto adotada se focava em manter os componentes sobre tensões abaixo do limite da tensão de rotura. Contudo, à medida que foram surgindo novas falhas graves, diversos autores dedicaram-se ao estudo do que poderia estar a causar este tipo de acidentes e concluíram que tais falhas se deviam à incompreensão da fadiga e que a teoria de design de vida infinita tinha algumas limitações. Deste modo, visto que a tensão de rotura máxima dos componentes vai diminuindo ao longo do seu tempo de serviço, chegará a um ponto em que a nucleação e posterior propagação de fissuras atingirá um tamanho crítico e os

componentes têm de ser retirados de serviço [10]. Por esta razão, deixaram de se utilizar este tipo de teorias de vida infinita e passaram a adotar-se outras filosofias que permitiam solucionar este problema.

2.2.2 Design de Vida Segura (Safe-Life)

Nesta teoria tem-se em consideração o dano provocado pela fadiga, no entanto apenas considera a parte inicial do processo de fadiga, a fase de nucleação de fendas. Relativamente ao crescimento das fissuras esta teoria é um pouco limitada, porque se foca no conceito de que os componentes devem ser seguros durante o seu período de serviço. A aplicação desta teoria obriga à necessidade de realizar testes para verificar o estado de um componente. Caso o estado não seja considerado adequado o componente tem que ser reparado ou substituído.

Não obstante estes cuidados, esta teoria conduziu a alguns designs de aeronaves inadequados, fundamentalmente na década de 1960. No entanto, a teoria de design de vida segura ainda continua a ser utilizada em alguns componentes, sendo exemplo disso o trem de aterragem e alguns componentes de helicópteros [13].

Para aperfeiçoar esta teoria é necessário considerar-se que existem algumas fendas na aeronave cuja existência não foi detetada. Deste modo, os diversos componentes devem ser projetados para serem tolerantes ao dano. Neste contexto, surgiram outras teorias para corrigir os erros inerentes ao design de vida segura.

2.2.3 Design de Tolerância do Dano

A teoria de design de tolerância ao dano é uma filosofia relativamente recente que permite corrigir os erros inerentes às teorias anteriores. Traduz-se na capacidade de as estruturas da aeronave conseguirem sustentar cargas de fadiga, corrosão ou outros tipos de falhas estruturais. A acumulação de dano está englobada nesta teoria pelo que os defeitos dos componentes que podem originar uma falha grave devem ser detetados e reparados em tempo útil [14].

Esta teoria é uma melhoria da teoria de design de falha segura apresentada de seguida. Neste caso, contrariamente aos anteriores, considera-se que os componentes contêm fendas devido aos processos de fabrico ou devido à fadiga e que estas fendas tendem a crescer durante o período de serviço de uma aeronave. Deste modo, é imprescindível a realização de inspeções periódicas para monitorizar o crescimento de fenda e impedir que se propaguem em demasia. Apresenta-se na figura 7 um esquema do aumento do tamanho de fenda, até valores críticos, em função do tempo de serviço de uma aeronave. Este tipo de inspeções e o intervalo de tempo entre inspeções aborda-se no capítulo seguinte.

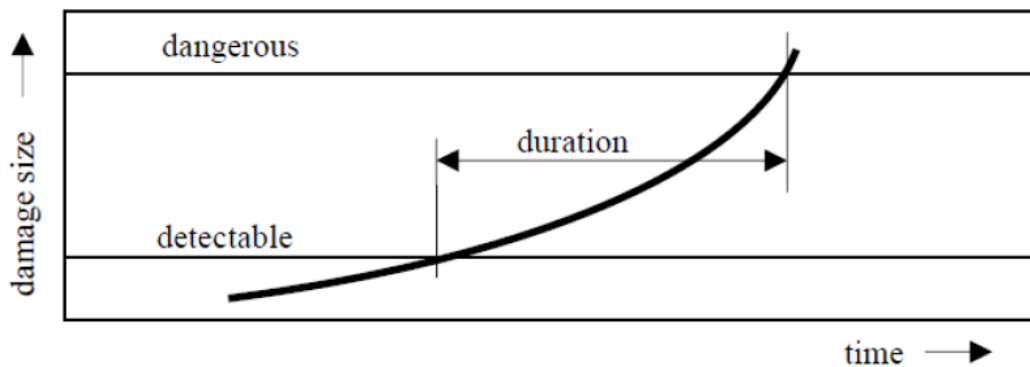


Figura 7 - Representação Esquemática do aumento do tamanho de fenda até valores críticos em função do tempo de serviço de uma aeronave – Design de Tolerância ao Dano [66]

Com a utilização desta teoria os engenheiros e especialistas responsáveis deixam de assumir uma estrutura perfeita, como acontecia na teoria de design de vida segura. Assim, no design de tolerância ao dano assume-se que o componente possui defeitos e ainda que estes defeitos podem evoluir e aumentar o seu tamanho ou mesmo conduzir o componente à rotura [15].

Deste modo, consegue-se obter alguma vantagem nas previsões de vida à fadiga bem como uma melhoria do programa de inspeções. As estruturas de tolerância ao dano podem ser divididas em dois grupos:

- **Crescimento de fenda lento** (*slow crack growth*)

Aqui assume-se que as estruturas contêm defeitos, inclusive fendas, e que estas se propagam a um ritmo baixo e estável. As fissuras não devem atingir um tamanho crítico antes de serem inspecionadas e reparadas. A segurança dos componentes é garantida pelo crescimento de fenda lento durante o seu período de serviço [15].

- **Design de falha segura** (*fail-safe*)

A teoria de design de falha segura é uma outra técnica para melhorar a tolerância ao dano das estruturas. Geralmente, as estruturas onde se utiliza esta teoria são complexas e compostas por vários componentes. O objetivo desta teoria passa por utilizar vários caminhos de carga e criar zonas de retenção de crescimento de fissuras. Para além disso, estas estruturas devem cumprir certos requisitos de força residual de forma a garantir que as fendas não se propagam instavelmente.

Segundo esta teoria, para as estruturas serem seguras devem cumprir-se alguns critérios e ter em consideração alguns aspetos: obter o diagrama da força residual em função da dimensão da fissura; o tamanho máximo de fenda permitido; a taxa de crescimento da fenda; a dimensão de possíveis fendas

existentes na estrutura que não foram detetadas na última inspeção; bem como o intervalo de tempo entre inspeções [16].

Apesar dos inúmeros contributos e progressos realizados para estimar o tempo de vida dos componentes ainda existem algumas dificuldades em colmatar determinado tipo de situações. Por isso, é imprescindível a realização das NDI e o cumprimento dos requisitos de aeronavegabilidade apresentados no capítulo seguinte. Pelas razões expostas ao longo deste capítulo, de forma a aumentar a vida dos componentes e melhorar a segurança das aeronaves é necessário o estudo aprofundado da mecânica da fratura, que será objeto de estudo nesta dissertação.

2.3 Requisitos de Aeronavegabilidade

A aeronavegabilidade traduz-se na propriedade ou capacidade duma aeronave navegar com segurança no espaço aéreo. Para garantir que os requisitos de segurança sejam cumpridos é necessário que as aeronaves obtenham um certificado de aeronavegabilidade. Consoante os diversos países ou estados em que a aeronave opere irá necessitar de diferentes autorizações das diversas autoridades responsáveis pela aviação. Para que esses certificados sejam válidos devem-se realizar inspeções periódicas, garantindo que o avião seja retirado de serviço ou alvo de manutenção antes da ocorrência de um acidente [17].

A figura 8 apresenta esquematicamente algumas das condições necessárias à aeronavegabilidade, desde os testes a realizar antes e depois de voar, as diretrizes de aeronavegabilidade e de manutenção das aeronaves, e também o controlo da vida dos diversos componentes. Este último é o principal foco deste trabalho.



Figura 8 - Condições de Aeronavegabilidade [48]

Como mencionado anteriormente nas diversas teorias de design apresentadas é imprescindível uma correta avaliação do dano acumulado nos componentes, daí a importância deste tipo de estudos que permitam aprofundar o conhecimento do fenómeno da propagação de fendas, de forma a evitar tamanhos de fenda críticos que possam resultar numa catástrofe.

Nestas circunstâncias, para desenvolver uma estrutura tolerante ao dano certas especificações devem ser cumpridas. As leis relacionadas com os requisitos de aeronavegabilidade podem ser encontradas nos documentos FAR e CS. São reguladas pela FAA e EASA e correspondem às leis dos EUA e da Europa, respetivamente. Por exemplo, para um avião com um peso máximo de decolagem inferior a 12500 lbs, deve optar-se pelas normas FAR-25 ou CS-25, consoante os requisitos utilizados. Relativamente aos requisitos de tolerância ao dano abordados nesta tese aparecem nas seções FAR-25.571 e CS-25.571 destes documentos [18-20].

2.4 Inspeções não Destrutivas

Embora vários estudos da especialidade demonstrem que as falhas estruturais catastróficas em componentes aeroespaciais sejam raras [10] aquelas que ocorrem com maior frequência estão associadas a enormes perdas de prestígio das companhias aéreas bem como um grande prejuízo financeiro e, por vezes, a perda de vidas [21]. Geralmente, estas falhas estão relacionadas com o aparecimento de defeitos durante o processo de fabrico dos componentes. A acumulação de dano ao longo do seu tempo de serviço pode levar ao aparecimento de fendas de fadiga, e em alguns casos

poderá conduzir à rotura final [10].

Assim, o design de tolerância ao dano (DTD) e a realização de inspeções não destrutivas (NDI) regulares são tarefas imprescindíveis para garantir a aeronavegabilidade, dada a sua importância para a prevenção de falhas com consequências danosas e por vezes irreversíveis.

As inspeções não destrutivas permitem identificar os componentes que devem ser trocados ou reparados através de uma análise de integridade estrutural. Existem diversas técnicas, que serão explicadas mais detalhadamente de seguida, contudo é importante ter em consideração que estas inspeções têm limitações e alguns componentes podem conter fendas que não foram detetadas em tempo considerado fundamental, colocando-se em risco a segurança das aeronaves, da tripulação e dos passageiros [20].

O DTD complementa as NDI ao prevenir a ocorrência de fraturas, através de configurações estruturais e de materiais que permitam reduzir o fenómeno da propagação de fissuras. A tolerância ao dano traduz-se na capacidade de uma estrutura resistir aos diversos carregamentos a que um dado componente é sujeito, desde o seu fabrico até ao final do seu tempo de serviço. Este conceito é especialmente importante em componentes como a fuselagem da aeronave, cuja ocorrência de falhas poderá resultar numa catástrofe.

Deste modo, a combinação de inspeções de qualidade efetuadas com alguma frequência, bem como a utilização de materiais mais resistentes permite aumentar o tempo de serviço de vida útil de um componente. No entanto, os custos associados à qualidade e melhoria destes fatores também devem ter-se em consideração, tanto no processo de fabrico como na manutenção dos diversos componentes, motivo pelo qual a ponderação dos vários fatores tem que ser cuidadosamente realizada por especialistas [20].

Como foi mencionado anteriormente, as inspeções não destrutivas, NDI, desempenham um papel crucial na prevenção de falhas estruturais. Deste modo, sabendo que as cargas cíclicas a que um componente está sujeito durante o seu tempo de serviço é extremamente sensível ao dano acumulado é fácil perceber a necessidade destas inspeções. Estas devem realizar-se durante o processo de fabrico de forma a averiguar a existência de imperfeições que possam causar fratura antes do previsto ou sirvam como fontes para a nucleação de fendas [10].

Assim, o período entre cada inspeção deve ser cuidadosamente selecionado de forma a detetar o dano antes das fendas atingirem tamanhos críticos ou ocorrer fratura [22]. Neste contexto, na figura 9 observa-se o aumento do tamanho da fenda em função do tempo ou dos carregamentos cíclicos aplicados na estrutura, evidenciando assim a importância das inspeções regulares.

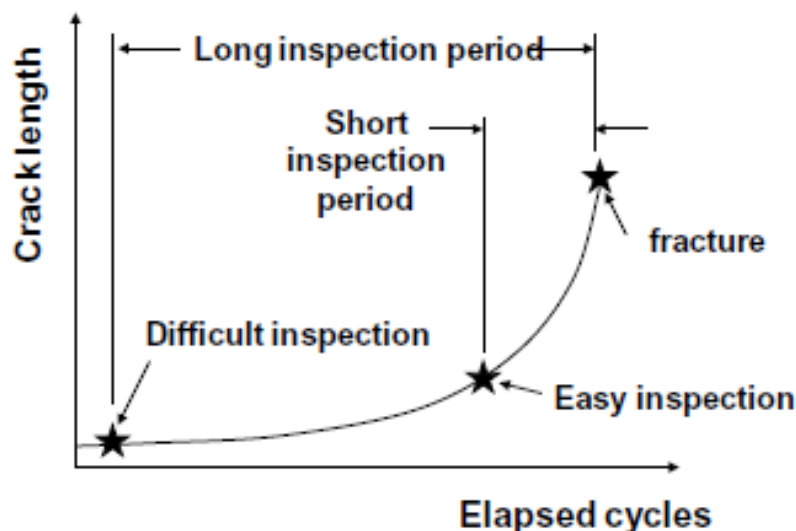


Figura 9 – Intervalo de tempo entre as NDI a realizar: crescimento de fenda em função dos ciclos de carregamento [22].

Para além dos períodos entre inspeções para se garantir o sucesso das NDI têm de se ter em consideração outros fatores. A seleção da técnica adequada para cada aplicação, a calibração das máquinas de testes, as condições e propriedades do material são exemplos disso. As limitações destas técnicas não devem ser desprezadas pelo que é habitual desenvolverem-se métodos estatísticos para estabelecer a probabilidade de deteção de fendas consoante o tipo de inspeção e a sua aplicação. Apesar de existirem inúmeros tipos de inspeções, inclusive métodos destrutivos que fomentam elevados custos de produção, os principais métodos não destrutivos utilizados podem ser de dois tipos [16]:

- **Métodos diretos:**

Inspeções visuais realizadas com luzes, lupas e espelhos adequados. Apenas são possíveis em componentes de fácil acesso.

Líquido penetrante embebido nas zonas críticas dos componentes. Ao ser retirado facilita a localização de fissuras e também só é possível em componentes de fácil acesso.

Líquido composto por partículas magnéticas que cobrem o componente, que é posteriormente exposto a um intenso campo eletromagnético, que é fortemente perturbado pela presença de fendas, permitindo assim a sua localização.

Raio-X: com um aparelho portátil de raio-X é possível inspecionar os componentes e detetar a presença de fissuras, visto que estas absorvem menos radiação do que as restantes zonas.

- **Métodos indiretos:**

Ultrassónicos: um dispositivo emite uma onda de alta frequência através do material. A onda é refletida para um recetor que permite detetar eventuais defeitos ou fendas do material.

Corrente parasita (eddy current): utiliza-se uma bobine para induzir correntes em componentes metálicos e verificar a sua integridade. Na presença de fissuras o valor da indução oscila, permitindo assim a sua localização.

Emissão acústica: permite medir a intensidade das ondas de tensão emitidas devido aos fenómenos de plasticidade na frente de fenda. É um método difícil de implementar por ser economicamente dispendioso e complicado interpretar a leitura do sinal.

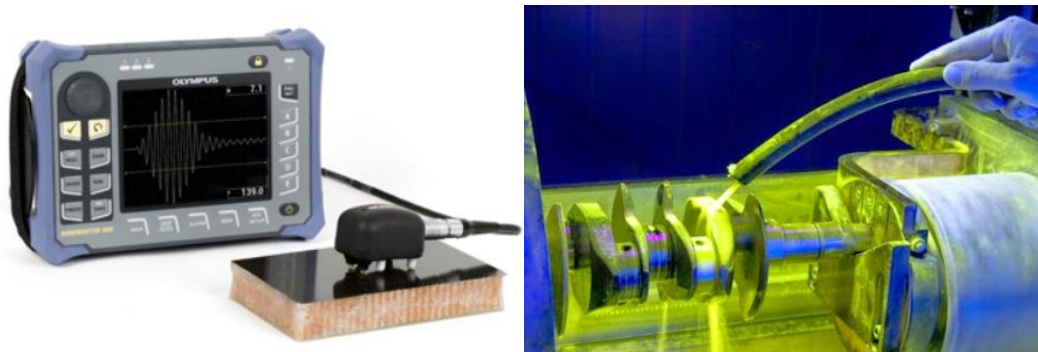


Figura 10 - Equipamento acústico de deteção de fendas: (esquerda) Método indireto; (direita) Método direto

Apesar de atualmente todos estes métodos serem aplicados na indústria (aeroespacial), a inspeção a olho nu, geralmente assistida com lupas e lanternas, continua a representar grande parte das inspeções realizadas devido a ser uma prática comum e ao seu baixo custo [20]. Contudo, a inspeção a olho nu não tem grande utilidade na deteção de fendas de tamanhos reduzidos, pelo que em alguns casos tem de se optar por outros métodos mais dispendiosos e de implementação demorada. Portanto, o desafio principal engloba a seleção e aplicação do melhor método de inspeção para cada necessidade e especificidade do caso de estudo, bem como o delineamento adequado do intervalo de tempo entre as diferentes inspeções.

2.5 Mecânica da Fratura (MF)

Na MF há que ter o cuidado de selecionar uma das duas abordagens mais adequadas, consoante as considerações físicas do caso em estudo: a Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) ou a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP). Esta dissertação de mestrado irá focar-se na MFLE.

A MFLE consiste num procedimento analítico que relaciona a intensidade e a distribuição das tensões na região da frente de fenda com a tensão nominal aplicada no componente. Assim, permite o estudo de vários modelos, bem como a análise da propagação de fissuras sujeitas a diversos carregamentos

com diversos tamanhos, geometrias e inclinações de fenda. Para que seja possível aplicar esta teoria é necessário que a zona de plastificação na zona da frente de fenda seja reduzida e o material envolvente tenha um comportamento linear elástico. Aborda-se mais detalhadamente a influência da plastificação nos próximos capítulos.

Relembrando que uma grande parte das falhas de componentes aeroespaciais estruturais são causados pela propagação de fendas, o estudo e a análise da intensidade e distribuição das tensões na zona da frente de fenda são fatores de extrema importância para a segurança de qualquer componente estrutural.

2.5.1 Distribuição de Tensões numa fenda

Tal como foi referido anteriormente é importante compreender a distribuição do campo de tensões numa fenda, em especial na zona da frente de fenda. Quando um componente que contenha uma fenda está sujeito a um carregamento externo tem um comportamento comparável com um entalhe da geometria. Este entalhe, ou frente de fenda, tem dimensões muito reduzidas quando comparadas com o material envolvente sendo que se tornam zonas propícias à existência de altas concentrações de tensões. A singularidade presente neste local origina a formação de uma zona plástica, como se pode visualizar na figura 11. Contudo, na teoria da MFLE este comportamento não é tido em consideração e a tensão é dada por uma fenda ideal segundo o modelo linear elástico. Consequentemente, esta teoria revela algumas limitações porque não tem em consideração a influência desta zona que poderá estar no domínio plástico [24].

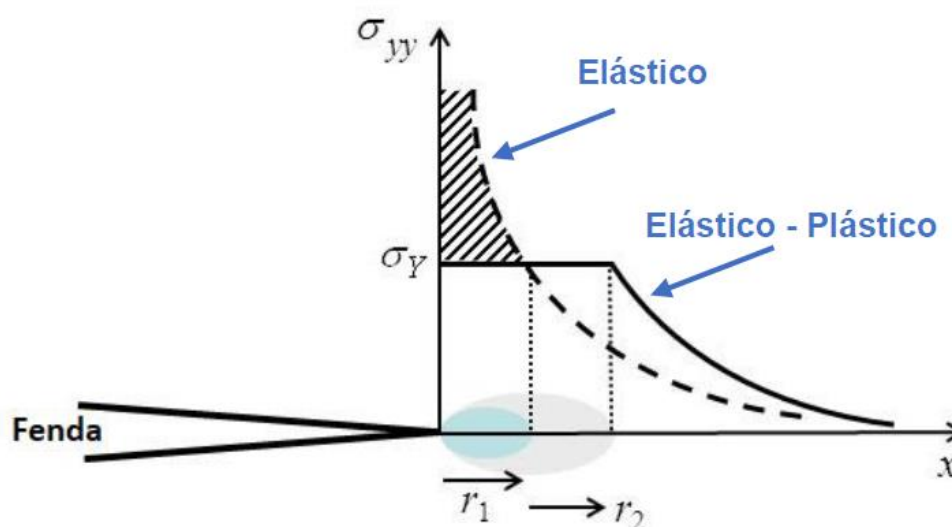


Figura 11 - Comportamento real e ideal da tensão na fenda [4].

Conforme mencionado e se pode verificar na figura 12, ao realizar esta simplificação não se tem em consideração alguma informação relativa à frente de fenda quando se despreza a influência plástica. Contudo, essa simplificação permite o cálculo das expressões analíticas das tensões da frente de fenda.

Deste modo, pressupondo-se aplicável a MFLE, os autores Irwin [25] [26][27] foram os primeiros a publicar as expressões analíticas que permitem o cálculo das tensões analíticas na frente de fenda.

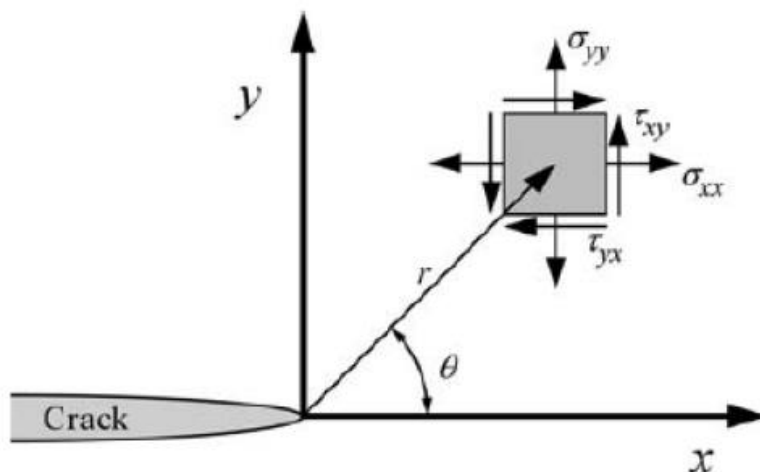


Figura 12 – Campo de tensões na frente de fenda [4]

Na figura 12, considerando o sistema de coordenadas polar (r, θ) com origem na frente de fenda, a expressão analítica do campo de tensões, de qualquer corpo contendo uma fissura em domínio elástico, é dada pela fórmula seguinte:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}}\right) f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^m(\theta) \quad (2)$$

Nesta expressão σ_{ij} representa o tensor das tensões, k uma constante e f_{ij}, g_{ij} são funções adimensionais. A_m é uma função adimensional relacionada com a amplitude e também é dependente de θ , para cada um dos diferentes termos. Deve salientar-se que a expressão contém um termo dominante e singular proporcional a $1/(r^{\frac{1}{2}})$. Quando $r \rightarrow 0$, na frente de fenda, este termo tende para o infinito enquanto os outros aproximam-se de zero, evidenciando a singularidade existente referida anteriormente.

2.5.2 Modos de Carregamento

Na MF, a rotura dos componentes surge associada ao crescimento das fendas pelo que é fundamental ter um conhecimento aprofundado deste fenómeno. Consoante o tipo e a direção da carga aplicada a uma fissura surgem três modos distintos de propagação da fenda. Considerando a terminologia da MF,

classificam-se como modos de carregamento e podem visualizar-se na figura 13.

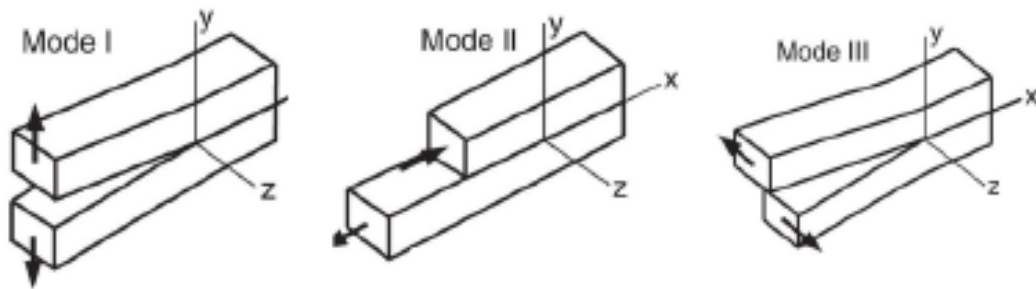


Figura 13 – Modos de Carregamento [23]: (esquerda) I; (centro) II; (direita) III

- **Modo I – Modo de abertura:** a propagação das superfícies da fissura procede-se na direção perpendicular ao plano de carregamento e é causada pelas tensões de tração normais aplicadas;
- **Modo II – Modo de deslizamento:** a propagação das superfícies da fenda ocorre na direção paralela ao plano de carregamento e tem origem nas tensões de corte, no plano, aplicadas na extremidade da fissura;
- **Modo III – Modo de rasgamento:** é caracterizado por carregamentos tangentes fora do plano da fissura, na direção da espessura do corpo, e é originado por tensões de corte fora do plano.

Uma fenda pode estar sujeita a qualquer um destes carregamentos, bem como uma combinação de dois ou três. Para cada um destes carregamentos e os seus respetivos modos podem deduzir-se os fatores de intensidade de tensão, *stress intensity factors* (SIFs), que serão detalhadamente apresentados num próximo capítulo. Estes fatores são particularmente importantes porque permitem prever qual a direção de propagação de uma fenda.

Tendo em consideração que se pretende estudar a propagação de fissuras em condições de biaxialidade no plano, as quais podem representar as condições de carregamento de uma estrutura aeroespacial, nomeadamente a fuselagem de uma aeronave, abordam-se com especial ênfase os modos de carregamento I e II.

2.5.3 Fator Intensidade de Tensões

O fator de intensidade de tensões, K , é o parâmetro que quantifica a intensidade do campo de tensões de uma fenda. Tal como se referiu anteriormente mencionado, este valor pode atingir o seu valor crítico (também conhecido como Tenacidade à Fratura do material), K_c , conduzindo à rotura do componente. A intensidade deste fator depende de vários fatores, nomeadamente o valor e o tipo de carregamento aplicado ao componente ou provete em estudo.

Relembrando a eq 5, compreende-se que cada modo de carregamento aplicado irá originar uma singularidade na frente de fenda. Isto significa que a cada modo de carregamento está associado um fator intensidade de tensão, K_I, K_{II}, K_{III} . Contudo, este trabalho foca-se no estudo bidimensional da MFLE sob carregamentos cíclicos pelo que se limitará ao estudo do primeiro e segundo modo de carregamento.

O estado de tensão correspondente à singularidade associada à frente de fenda e aos diversos modos de carregamentos K_I e K_{II} , em coordenadas polares (r, θ) , é dada pelas seguintes expressões.

$$\sigma_{\theta\theta}(t, \theta) = \frac{K_I(t)}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{3}{4} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + \frac{K_{II}(t)}{\sqrt{2\pi r}} \left[-\frac{3}{4} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{3}{4} \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (3)$$

$$\tau_{r\theta}(t, \theta) = \frac{K_I(t)}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{1}{4} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4} \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + \frac{K_{II}(t)}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{1}{4} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{3}{4} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (4)$$

Destas equações, cancelando a influencia do raio, é possível extrair a variação dos fatores intensidade de tensão com a direção de propagação θ :

$$K_I^*(t, \theta) = \sigma_{\theta\theta}(t, \theta) \sqrt{2\pi r} = K_I(t) \left[\frac{3}{4} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + K_{II}(t) \left[-\frac{3}{4} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{3}{4} \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (5)$$

$$K_{II}^*(t, \theta) = \tau_{r\theta}(t, \theta) \sqrt{2\pi r} = K_I(t) \left[\frac{1}{4} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4} \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + K_{II}(t) \left[\frac{1}{4} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{3}{4} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (6)$$

Visto que estas equações e as anteriores são dimensionalmente equivalentes, define-se K_I^* e K_{II}^* como os fatores de intensidade de tensão virtuais. Isto permite prever qual será o ângulo de propagação da fenda. Para isso é necessário aplicar critérios que serão explicados nas próximas seções. Alguns autores relacionam K_I^* e K_{II}^* com um aumento virtual e infinitesimal da fenda inclinada um ângulo, θ , relativamente à fenda inicial [29]. Deve ainda salientar-se que valores negativos de K_I^* não têm significado físico. Isto acontece porque valores negativos de K_I^* traduzem um campo de tensões circunferencial compressivo o que causaria com que as faces da fenda fechassem pelo que não devem ser tidos em consideração [30].

O valor dos SIF em análises numéricas de propagação de fendas depende de inúmeros parâmetros como a geometria e dimensões do provete. A geometria e dimensão da fenda também têm um grande impacto no valor dos SIF. Deste modo, para este cálculo ser o mais próximo da realidade possível o Abaqus deve retirar os valores ao longo da propagação da fenda e em ambas as frentes de fenda.

Devido aos carregamentos e condições fronteira aplicados, a fenda inicial do provete sofre maior dano correspondente ao primeiro modo de carregamento, K_I . O segundo modo, K_{II} , também é considerado neste estudo. Assim, para cada análise realizada recolhem-se 2 valores de contorno de K_I e K_{II} a cada incremento, durante um ciclo.

Para calcular a vida de fadiga através da lei de Paris apresentada no capítulo que aborda o crescimento de fendas utiliza-se a fórmula de Tanaka da equação 7.

$$K_{eq} = \sqrt[4]{K_I^4 + 8K_{II}^4} \quad (7)$$

Onde K_{eq} representa o valor equivalente do SIF, considerando a influência de ambos os modos de propagação da fenda.

Antes de se aprofundar o estudo da direção de propagação das fendas é necessário compreender os diversos tipos de carregamento aplicados e o crescimento de fendas, cujos temas são apresentados nos próximos capítulos.

2.5.4 Crescimento de Fendas

É importante compreender as diversas etapas envolvidas no processo de aparecimento de uma fenda de fadiga. Este processo inicia-se com a nucleação, seguido do crescimento microscópico da fenda e posterior propagação até à rotura final.

Quando um material é sujeito a cargas cíclicas é possível observar intrusões e extrusões na sua superfície, iniciando-se a nucleação de fissuras. Uma vez atingido um tamanho considerado suficientemente grande, a fenda propaga-se perpendicularmente às tensões aplicadas.

Como esta dissertação se foca no estudo da propagação de fissuras é importante conhecer-se as três regiões de propagação com características distintas. De acordo com a MFLE, a taxa ou velocidade a que uma fissura se propaga, usualmente em (mm/ciclo), está relacionada com a variação dos fatores de intensidade de tensão, tal como se pode verificar no seguinte diagrama.

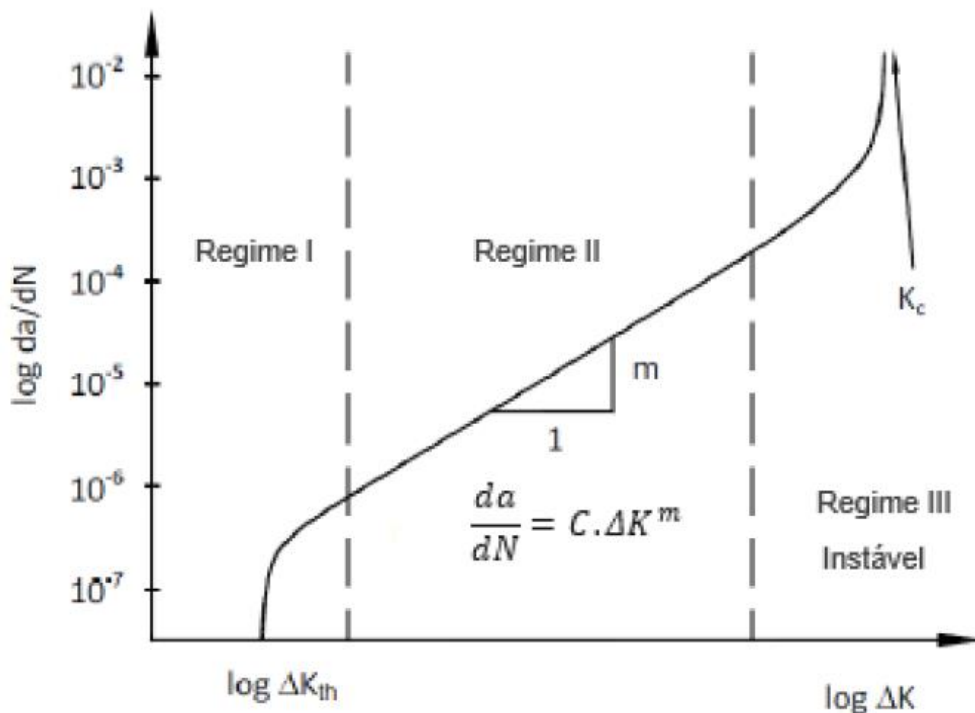


Figura 14 – Diagrama dos diferentes regimes de propagação: crescimento de fenda em função do logaritmo da variação do fator intensidade de tensão.

- Na primeira região a taxa de propagação é extremamente dependente da variação dos SIFs. Nesta zona pode não ocorrer propagação ou esta ser muito reduzida. Isto acontece quando o valor crítico, ΔK_{th} não é atingido. Esta região é fundamentalmente caracterizada pela influência da microestrutura do material, da tensão média e pelas condições (ambientais) em que se encontra.
- Na segunda região verifica-se um crescimento contínuo e certas combinações de tensão média, frequência e condições (ambientais) tendem a ter uma grande influência na propagação. A velocidade de propagação revela uma relação linear entre os SIFs e o crescimento da fenda. Esta relação é descrita pela Lei de Paris da equação 8:

$$\frac{da}{dn} = C\Delta K^m \quad (8)$$

Sendo que C e m são constantes do material e ΔK é descrito pela seguinte equação 9:

$$\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (9)$$

$\Delta\sigma$ representa a variação de tensões aplicadas, Y é o fator de forma e a é o comprimento da fenda.

- Na terceira região a velocidade de propagação continua a aumentar instavelmente até se atingir um valor crítico de tensão K_c dependente do material em estudo. Seguindo-se a rotura do componente. Esta zona é também fortemente influenciada pela microestrutura e a tensão média. É ainda importante ter em consideração a influência da redução de espessura do componente nesta região. Em oposição às outras duas regiões, neste caso as condições (ambientais) não têm tanto impacto na velocidade de propagação da fenda.

2.5.5 Estado Biaxial de Tensões e Carregamentos

Com a finalidade de estudar as diversas condições de carregamento a que uma fuselagem poderá estar sujeita devem realizar-se testes experimentais e/ou numéricos. Neste contexto, para estudar a propagação de fissuras em condições biaxiais, opta-se pelos provetes cruciformes devido à sua geometria ser apropriada para este tipo de testes biaxiais [2] e foi utilizado e desenvolvido nas últimas décadas por diversos autores [8], tanto a nível da engenharia aeroespacial como em outras áreas da engenharia.

Este tipo de provetes, com diversas alterações de geometria, foi utilizado durante décadas pelo Centro Aeroespacial Alemão [34]. Visto que ainda não estão bem definidas as normas de design dos provetes cruciformes foram utilizados diversos tipos de provetes tais como os que se podem visualizar na figura 15. Do lado esquerdo mostra o design proposto por Brown and Miller [35]. As modificações nos braços do provete, bem como uma eventual redução de espessura na zona central do provete, onde a fenda se propaga, permite obter resultados de propagação mais precisos devido às concentrações de tensões nesta zona.

Contudo, este estudo foca-se na simulação numérica da propagação de fendas, em condições biaxiais no plano, optando-se por uma geometria simples, 2d, pelas razões apresentadas no capítulo dos Materiais e Provede, como a figura do lado direito. Deste modo, como se pretende realizar um estudo numérico em condições biaxiais opta-se por uma geometria bidimensional semelhante à apresentada na figura 15, de acordo com o programa NESC, mas com raio de curvatura entre os braços do provede.

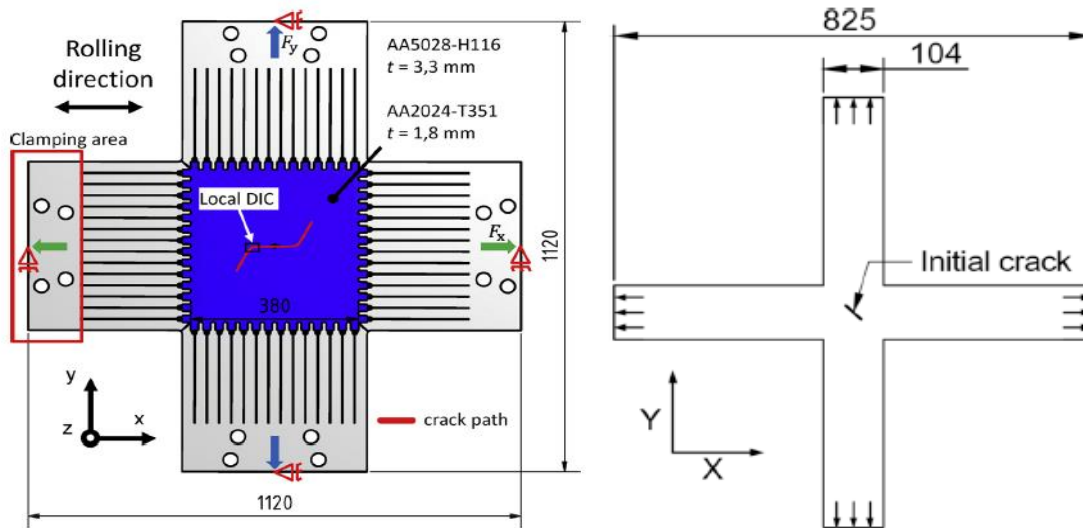


Figura 15 – Exemplos de provedes cruciformes: (esquerda) estudo experimental [36]; (direita) estudo numérico [37].

2.5.5.1 Carregamentos Proporcionais e não Proporcionais

Para compreender a propagação de uma fissura em condições de biaxialidade no plano é importante conhecer quais os carregamentos cíclicos a que esta está sujeita. Sendo que na realidade os carregamentos são uma combinação de carregamentos proporcionais, não proporcionais, em fase, fora de fase e com variação de frequência é importante perceber os fundamentos de cada um deles.

Este capítulo irá incidir sobre os carregamentos proporcionais e os não proporcionais. Para facilitar a sua compreensão deve observar-se a figura 16.

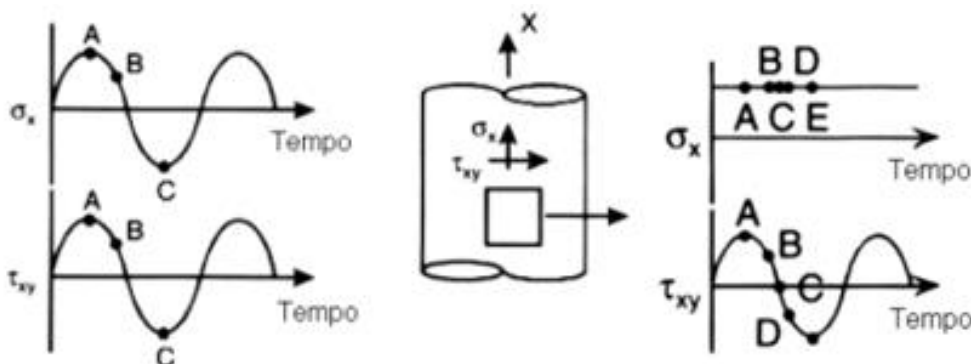


Figura 16 – Carregamentos proporcionais (esquerda) e não proporcionais (direita) - Adaptado de [2].

O conceito de carregamento proporcional está ilustrado do lado esquerdo, onde facilmente se percebe que apesar de as tensões normais e as tensões de corte variarem ao longo do tempo, a razão entre elas permanece constante ao longo de cada ciclo. Contudo, em muitas situações a razão entre as tensões normais e as tensões de corte não permanece constante. Para isso, basta que uma delas seja constante e a outra variável, tal como se verifica no lado direito da figura 16. Estes tipos de carregamentos são conhecidos como não proporcionais e podem ser mais complexos do que parecem. Os carregamentos não proporcionais fora de fase e com variação de frequência são casos especiais que serão apresentados de seguida.

2.5.5.2 Carregamentos em fase e fora de fase

Neste capítulo abordam-se os carregamentos em fase e fora de fase. Os carregamentos em fase são proporcionais, enquanto que os carregamentos fora de fase podem ser proporcionais ou não proporcionais. Em semelhança com a seção anterior, apresenta-se a figura 17 deste tipo de carregamentos.

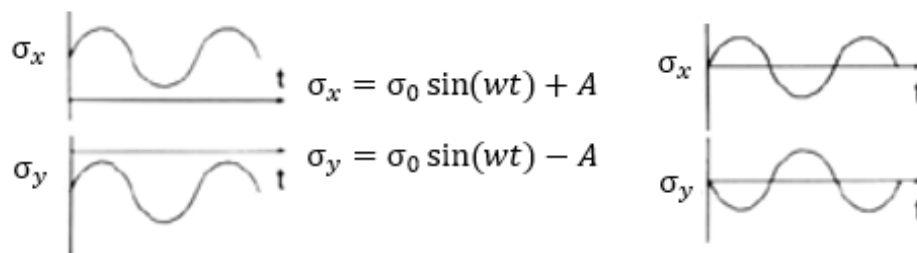


Figura 17 – Carregamentos em fase (esquerda) e desfasados (direita) - Adaptado de [2]

Nos gráficos do lado esquerdo pode observar-se um carregamento em fase. A variação das tensões em ambos os eixos é semelhante e o carregamento é proporcional. Nesta situação pode observar-se que uma das tensões é positiva e a outra negativa devido à constante A , no entanto o carregamento continua a ser caracterizado pelas tensões estarem na mesma fase.

Relativamente aos gráficos do lado direito visualiza-se um carregamento fora de fase de 180° devido às diferentes funções trigonométricas que regem o comportamento das tensões axiais. Este carregamento encontra-se totalmente fora de fase, mas o desfazamento introduzido pode variar. Os valores de desfazamento mais comuns são: 30°, 45°, 60° ou 90°, recorrendo às equações:

$$\sigma_x = \sigma_0 \cos(\omega t) \quad (10)$$

$$\sigma_y = \sigma_0 \cos(\omega(t + t_0)) \quad (11)$$

Onde t_0 , ou instante inicial, permite introduzir o desejado desfazamento entre curvas.

2.5.5.3 Carregamentos com Variação de Frequência

Os carregamentos com variação de frequência não são proporcionais. Apesar de a frequência ser um fator de carregamento pouco estudado, sabe-se que influencia a propagação de fissuras pelo que será objeto de estudo neste documento. Exemplifica-se na figura 18 a variação das tensões aplicadas ao longo do tempo neste tipo de carregamentos.

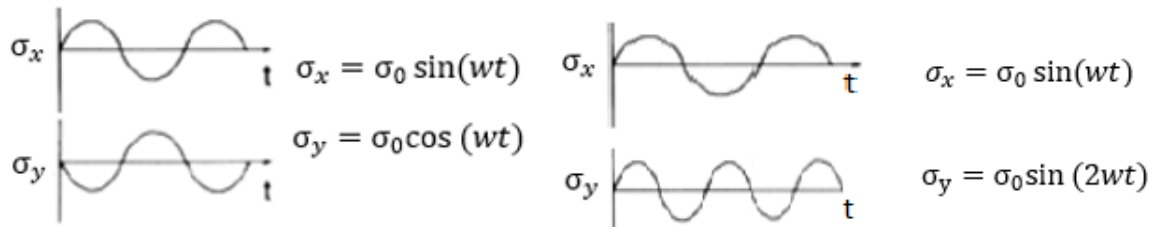


Figura 18 – Carregamentos com frequência unitária (esquerda) e com variação de frequência (direita)
- Adaptado de [2].

Do lado esquerdo observa-se um carregamento com a mesma frequência: Por sua vez, do lado direito no segundo carregamento aplica-se o dobro da frequência num dos eixos. Verifica-se que a razão da variação das tensões comporta-se de forma diferente consoante cada um dos casos.

Combinando os diversos tipos de carregamentos (proporcionais, não proporcionais, em fase, fora de fase, com variação de frequência) é possível criar combinações de carregamentos que se podem aproximar das cargas reais aplicadas na fuselagem de uma aeronave.

2.5.6 Critérios de Direção de Propagação

É imprescindível uma adequada compreensão dos diversos critérios de propagação abordados para o entendimento da análise numérica desenvolvida nos capítulos seguintes. Na figura 19 observa-se um esboço relativo ao comportamento dos SIFs associados ao fenómeno de propagação de fenda virtual, a partir da fenda original, que permitem prever qual a direção de propagação da fenda quando sujeita a certas combinações de carregamentos. Para isso, é imprescindível a utilização das equações 3 e 4 (em coordenadas polares), que permitem quantificar o campo de tensões da frente de fenda. Como foi explicado, cancelando a influência do raio obtem-se as equações 5 e 6 que permitem calcular o valor dos fatores intensidade de tensão virtuais, permitindo assim calcular o respetivo ângulo de propagação.

Para este cálculo pode aplicar-se diversos critérios, sendo que este documento se foca no estudo dos critérios MTS e MSS. O critério MTS corresponde à maximização das tensões normais, enquanto que o MSS corresponde à maximização das tensões de corte. Deve ainda referir-se que a nomenclatura utilizada para o critério MTS está geralmente associada às tensões tangenciais em coordenadas polares, sendo que no contexto de um provete cruciforme a tensão tangencial máxima refere-se as tensões de tração normais máximas.

Como se pode visualizar na figura 19, a frente de fenda propaga-se com um ângulo θ relativamente à sua inclinação inicial. O valor do ângulo θ pode ser calculado de acordo com o critério MTS ou MSS. No primeiro caso, θ corresponde à direção que maximiza $K_I^*(t, \theta)$ ao mesmo tempo que $K_{II}^*(t, \theta) = 0$. Já no segundo critério a direção de propagação satisfaz a maximização de:

$$\Delta K_{II}^* = \max K_{II}^*(t, \theta) - \min K_{II}^*(t, \theta) \quad (12)$$

onde $\max K_{II}^*(t, \theta)$ e $\min K_{II}^*(t, \theta)$ representam o valor máximo e mínimo de K_{II}^* ao longo de todo o ciclo de carregamento.

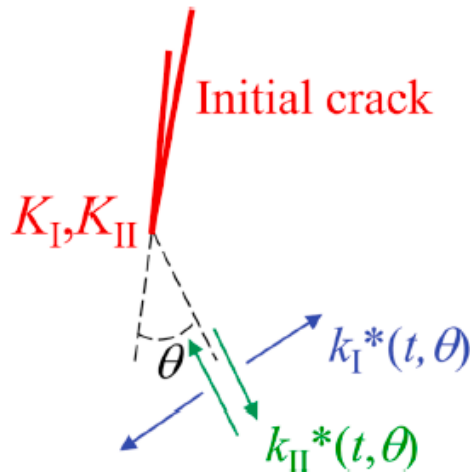


Figura 19 - Esquema ilustrativo da frente de fenda [30]

Em geral, sob carregamento proporcional, uma fenda propaga-se na direção onde o campo de tensão normal (K_I^*) é máximo. Para além disso, esta direção coincide com o valor de K_{II}^* igual a zero e está também de acordo com o critério de máximo ΔK_I^* (figura 20). Podem ser encontrados na literatura diversos critérios que comprovam este comportamento, tais como o critério da tensão tangencial máxima [39], MTS, o critério de máxima densidade de energia de deformação máxima [40] o critério da taxa máxima de libertação de energia [40]. Diversos autores demonstraram que os ângulos de propagação previstos por estes critérios, nestas condições, eram semelhantes.

Por outro lado, também se verifica que uma fenda pode propagar-se controladamente no mesmo plano segundo o modo II de propagação sob certas condições de carregamento.

Contudo, isso não é o caso geral e irá assumir-se que a propagação é controlada pelo modo I para simplificar o estudo, pelo que não serão abordados outros tipos de propagação.

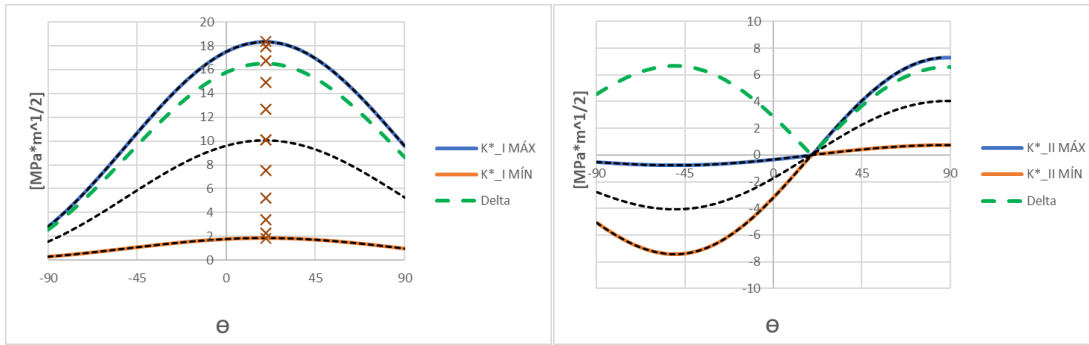


Figura 20 – Exemplo de variação de $K_I^*(a)$ e $K_{II}^*(b)$ com a direção de propagação θ para um carregamento proporcional.

Relativamente aos carregamentos não proporcionais, contrariamente aos proporcionais a razão entre os fatores intensidade de tensão K_I e K_{II} não é constante ao longo do ciclo (figura 20 e 21). Deste modo, de uma forma geral pode dizer-se que a direção correspondente ao valor máximo de K_I^* também varia ao longo do ciclo. Com o objetivo de interpretar esta variação dos SIFs diversos autores desenvolveram estudos para prever qual a direção de propagação da fissura. Hourlier [41] observou três potenciais direções de propagação: a direção correspondente ao valor máximo de K_I^* , a direção correspondente ao valor máximo de ΔK_I^* e ainda a direção onde o crescimento de fenda é máximo [42] investigou uma outra direção de propagação correspondente ao valor mínimo de ΔK_{II}^* , que corresponde ao critério MTS. Por último, Highsmith [42] inspecionou que o ângulo de propagação duma fissura geralmente se encontra entre os critérios das direções de $K_I^*_{máx}$ e $\Delta K_I^*_{máx}$.

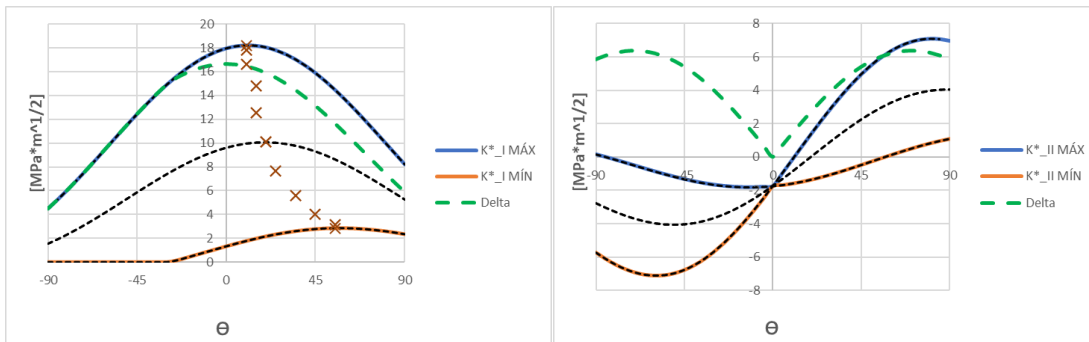


Figure 21 - Exemplo de variação de $K_I^*(a)$ e $K_{II}^*(b)$ com a direção de propagação θ para um carregamento não-proporcional.

3 Capítulo – Material e Metodologia

Esta dissertação tem como objetivo principal a validação de um algoritmo de análise numérica de propagação de fissuras no contexto do comportamento mecânico, mais concretamente a nível da MF. Como foi referido no capítulo anterior, o fator de intensidade de tensões, SIF, é o parâmetro mais importante a considerar neste estudo e que permite quantificar a distribuição de tensões na frente de fenda.

Deste modo, para que se possa validar um algoritmo de propagação de fissuras é imprescindível a seleção do material, bem como a escolha das dimensões e configurações de um provete adequado, para o estudo pretendido. Opta-se pela escolha de uma liga de Alumínio e um provete cruciforme, dada as suas vastas importâncias na indústria aeroespacial [44], apresentados nas seções seguintes.

3.1 Material e Provete

O material selecionado para este trabalho foi uma liga de Alumínio, Al7075, composta maioritariamente por alumínio e zinco, devido ao seu bom comportamento mecânico (dureza e resistência) quando sujeito a esforços de fadiga, bem como a sua importância na indústria aeronáutica [45], como se pode visualizar algumas das suas aplicações na tabela 1. A sua densidade é relativamente baixa quando comparada com materiais com propriedades mecânicas semelhantes [46]. A importância destas ligas na indústria aeroespacial deve-se à sua resistência estrutural, bem como a resistência à corrosão e à manutenção das suas propriedades mecânicas durante o período de serviço dos diversos componentes [47]. Alguns dos compostos mais comuns das ligas de alumínio são: cobre, magnésio, zinco, silício, ferro, titânio e o crómio.

Tabela 1: Aplicações aeronáuticas das ligas de alumínio

Liga	Aplicações
2014-T6	Estruturas de aviões
7075-T6	Fuselagens de aeronaves
6070-T6, 2024-T361	Estruturas aeronáuticas
7175	Trem de Aterragem e painéis do extradorso da asa
7055	Painéis do intradorso das asas

Estas ligas dividem-se em duas classes distintas: os alumínios para enformação plástica e os alumínios de fundição. No contexto mecânico, as ligas de alumínio são classificadas de acordo com a International Alloy Designation System, IADS, e a sua nomenclatura é composta por quatro dígitos. Estes números permitem identificar o elemento principal da liga, algumas alterações características destas ligas e o grau de pureza das ligas. Podem ainda dividir-se consoante o seu tratamento. Por exemplo, relativamente ao tratamento térmico, quando o 1º dígito é 1,3,4 ou 5 as ligas não são tratáveis termicamente, enquanto que quando o 1º dígito é 2,6 ou 7 as ligas são termicamente tratáveis [48], Pode encontrar-se neste documento mais detalhes relativamente à nomenclatura destas ligas. Antes de apresentar o provete selecionado para este estudo é importante apresentar quais as características mecânicas destas ligas.

Tabela 2: Características mecânicas da liga Al 7075 -T6 [49]

Material	Densidade [kg/m^3]	Tensão Nominal [MPa]	Tensão Corte [MPa]	Tenacidade [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Módulo de Elasticidad e ao Corte [GPa]
Al7075-T6	2800	523	330	29	72	28

Para analisar o fenómeno da propagação de fissuras, para além da seleção do material, é imprescindível a escolha de um provete adequado. Opta-se pela utilização de um provete cruciforme, visto que a sua geometria é propícia para testes de fadiga biaxiais [50] e foi utilizado e desenvolvido nas últimas décadas por diversos autores [8], tanto a nível da engenharia aeroespacial como em outras áreas da engenharia. Pode visualizar-se na figura 22 a configuração utilizada.

Neste estudo pretende-se estudar em detalhe a etapa de propagação de uma fenda e não todo o processo de fadiga caracterizado anteriormente. Deste modo, é criada uma fissura na zona central do provete com uma dimensão de $2a = 36\text{mm}$. Assim, exclui-se a fase final de rotura e a fase inicial do processo de iniciação de fendas e é possível obter resultados satisfatórios quanto ao crescimento de fenda regido pela Lei de Paris, bem como ao ângulo de propagação da fissura, segundo os critérios MTS e MSS. A fissura poderá estar alinhada ou desalinhada com a direção horizontal para o estudo desejado, visto que se pretende estudar a direção de diversas inclinações de fenda inicial. Para facilitar a compreensão, à direita da figura 22, pode visualizar-se um esquema da fenda inicial no centro do provete onde angulo B correspondente à inclinação da fissura e o ângulo theta que corresponde à direção da propagação na frente de fenda. Esta geometria está de acordo com o programa internacional NESIC [30].

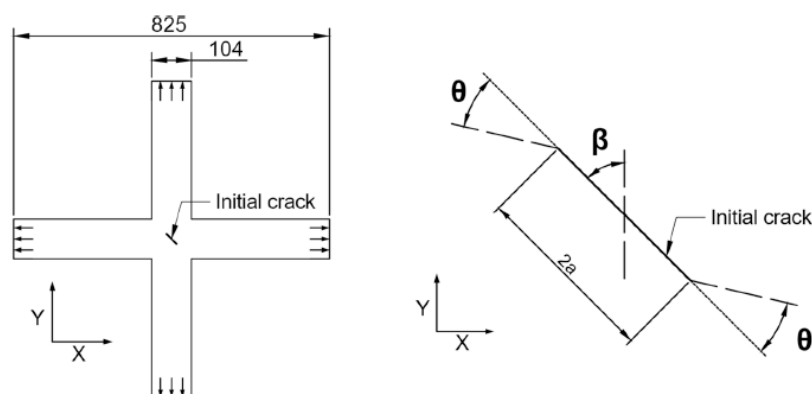


Figura 22 – (esquerda) Geometria e dimensões do provete cruciforme [30];
(direita) Zona central do provete onde se encontra centrada a fenda inicial [30].

Durante as últimas décadas realizaram-se inúmeros esforços no sentido de otimizar a geometria e os resultados obtidos nestes provetes. Nesses esforços procurava-se que o valor de tensão máximo estivesse localizado no centro do provete e que as forças aplicadas nos braços do provete diminuíssem e fossem uniformemente reduzidas.

No entanto, aqui pretende-se realizar um estudo em condições de biaxialidade no plano, pelo que se utiliza um provete com espessura reduzida ao invés da redução de espessura estudada por diversos autores. Ou seja, este provete tem dimensões de espessura bastante inferiores ao tamanho global do provete, mas não tem variação de espessura na sua zona central, permitindo assim uma simplificação do estudo. A simetria destes provetes e o facto de se pretender realizar uma análise numérica os fenómenos de flexão e Buckling podem desprezar-se [37].

Assumindo-se condições predominantes de tensão plana e sabendo que os elementos 2d têm vantagem no contexto do estudo da mecânica da fratura, a simplificação para um provete bidimensional permite obter um único valor de fator de intensidade de tensões na frente de fenda, ao contrário do que aconteceria nos provetes otimizados com redução de espessura em que a distribuição do fator de intensidade de tensões varia ao longo da espessura [37]. Assim, este estudo simplificado da propagação permite obter bons resultados para os parâmetros em estudo nesta dissertação.

3.2 Metodologia da Análise Numérica

Este capítulo é dedicado à descrição da metodologia do estudo numérico desenvolvido neste trabalho, que é baseado numa análise de elementos finitos, no software ABAQUS®, onde são extraídos os fatores intensidade de tensão e outros parâmetros da MF. Descreve-se também as etapas de modelação do provete e da sua fenda inicial, bem como os seus materiais, o tipo de malha, as condições de fronteira e os carregamentos analisados. É apresentado o algoritmo de propagação de

fissuras desenvolvido por Ricardo Baptista et al [52]. O código do algoritmo utilizado nesta dissertação foi criado no MatLab e recorre à utilização dos programas comerciais Abaqus e do Python.

3.2.1 Introdução ao software Abaqus® e MatLab

Nesta seção é apresentada uma breve explicação do software Abaqus®, desenvolvido pela SIMULIA Dassault Systemes S.A, e do MatLab, desenvolvido pela MathWorks Inc.

Como foi referido anteriormente, a utilização de programas comerciais de elementos finitos é uma poderosa ferramenta computacional que permite uma redução de custos associados ao estudo detalhado de inúmeros fenômenos, nomeadamente da propagação de fissuras.

Nas próximas seções explicam-se as principais tarefas realizadas no Abaqus. Geralmente, estas tarefas dividem-se em 3 etapas distintas: o pré-processamento, a solução e o pós-processamento. Nesta dissertação, o pré-processamento engloba a modelação do provete, a criação da fenda inicial, a definição do material e a escolha da malha utilizada. Na etapa da solução são calculados os campos de tensões e deformações e extraídos os fatores intensidade de tensões. Por último, na fase do pós-processamento definem-se as condições de fronteira e os carregamentos aplicados para o cálculo e são tratados os dados obtidos pelo programa. É importante uma análise cuidada destes resultados para garantir a coerência e validade dos resultados obtidos.

O MatLab é um software de alta performance e simples de programar. Está direcionado para o cálculo numérico e é bastante intuitivo. Neste software é possível realizar cálculo com matrizes, construir gráficos de forma rápida através de expressões matemáticas e também o processamento de sinais. Nesta dissertação utiliza-se um algoritmo de propagação de fissuras por Ricardo Baptista et al [52] que interage com o Abaqus de forma a facilitar o estudo da propagação, através da extração dos fatores de intensidade de tensão e da elaboração de diversos gráficos com as expressões da mecânica da fratura inseridas no programa. Neste algoritmo é possível alterar as cargas, as dimensões e inclinação da fenda, e também as dimensões do provete, como será explicado no capítulo do Algoritmo para o Estudo da Propagação da Fenda.

3.2.2 Modelação do Provete Cruciforme e da fenda inicial

Na elaboração deste estudo é imprescindível a elaboração de um modelo de EF. Para isso, utiliza-se o provete cruciforme e o material selecionado anteriormente. Nas próximas seções são também apresentadas as condições de fronteira e os carregamentos aplicados nas simulações. Deve haver o maior rigor possível na elaboração deste método para que os resultados sejam o mais próximo possível da realidade. Para isso, deve ter-se em consideração a necessidade de utilizar um maior refinamento da malha em algumas zonas do provete, tais com as frentes de fenda, permitindo assim um cálculo mais preciso dos fatores intensidade de tensão.

A fim de realizar uma análise de elementos finitos modela-se o provete cruciforme apresentado. O procedimento realizado obtém-se através de passos simples, no Abaqus, e pode visualizar-se na figura

23 o provete cruciforme modelado neste software e na imagem à direita uma ampliação da zona central do provete onde se encontra a fissura inicial. Nesta figura a linha vermelha corresponde à fenda e os pontos vermelhos à frente de fenda. Para modelar esta fenda foi necessário desenhar uma linha alinhada ou inclinada (entre 0 e 45°) com a horizontal e indicar ao programa onde está localizada a fenda e quais as duas frentes de fenda, entre outros passos.

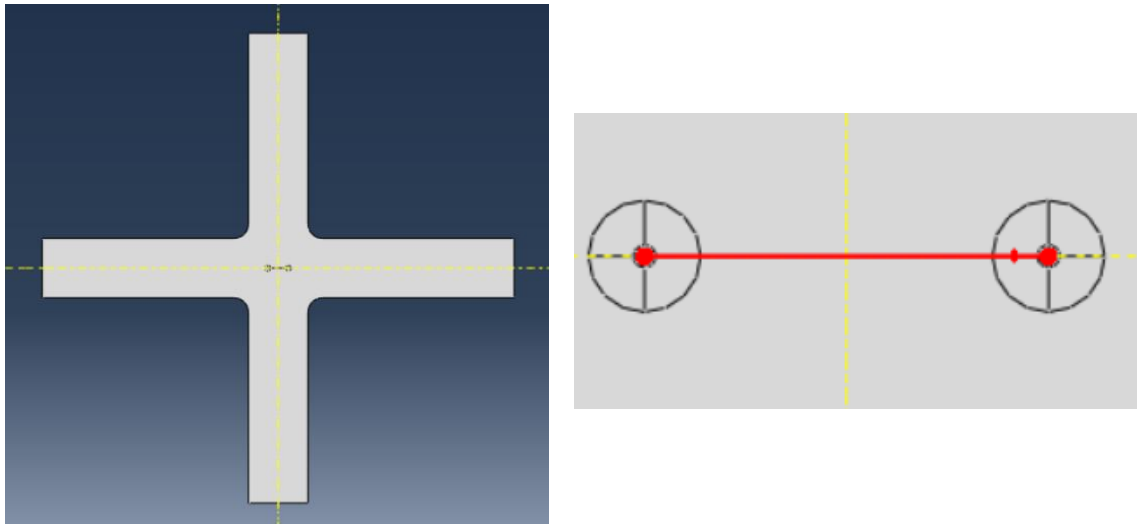


Figura 23 – Modelação do Provete Cruciforme: (esquerda)

Provete cruciforme Abaqus; (direita) Fenda inicial inserida no centro do provete.

3.2.3 Seleção do material, da Malha e do tipo dos Elementos

O material utilizado no provete é isotrópico, tipo estrutural, e tem um comportamento linear elástico. Foi necessário inserir no Abaqus alguns valores de propriedades mecânicas, tais como o módulo de Young e o coeficiente de Poisson. Na tabela 3 foram apresentadas as propriedades deste material.

A seleção da malha de elementos finitos do provete e da fenda tem um grande impacto nos resultados obtidos. Deste modo, a escolha do tipo de elementos, a forma como são distribuídos e o seu número são dos parâmetros mais importantes a considerar, especialmente na zona onde está localizada a fenda e existem grandes concentrações de tensões. Nesta zona é necessário ter elementos diferentes e em maior número para que os resultados obtidos sejam válidos e precisos.

Na figura 24, pode visualizar-se a malha do provete. O tamanho dos elementos global é de 1.8mm e a biblioteca de elementos do Abaqus utilizada foi a hexaédrica. Para a malha do provete foi necessário alterar a ordem geométrica dos elementos para quadráticos, de forma a obter melhores resultados [52] Do lado direito da figura 24, pode visualizar-se a malha personalizada utilizada na frente de fenda, a linha vermelha corresponde à zona onde está a fenda. Na frente de fenda os elementos escolhidos são triangulares e a técnica aplicada é a padrão (livre) dentro do círculo interior. Nesta zona central os elementos foram colapsados existindo uma duplicação de nós na frente da fenda. Estes nós, em torno da frente da fenda, também são deslocados do centro das arestas para $\frac{1}{4}$ do seu comprimento total,

de forma a recriar a singularidade de tensões existente na frente da fenda. Entre o círculo interior e o círculo exterior a forma dos elementos é hexaédrica e estruturada, criando uma malha regular à volta da frente da fenda, essencial para a correta extração dos fatores de intensidade de tensões. Fora desta zona central os elementos são quadráticos e livres, em vez de estruturados como na zona central.

Na presente dissertação onde é considerada uma análise estática e cíclica, os elementos usados são do tipo *CPS4R*. Esta nomenclatura tem o significado de '4-node bilinear, reduced integration with hourglass control' e este tipo de elementos são bastante utilizados neste tipo de análises estruturais.

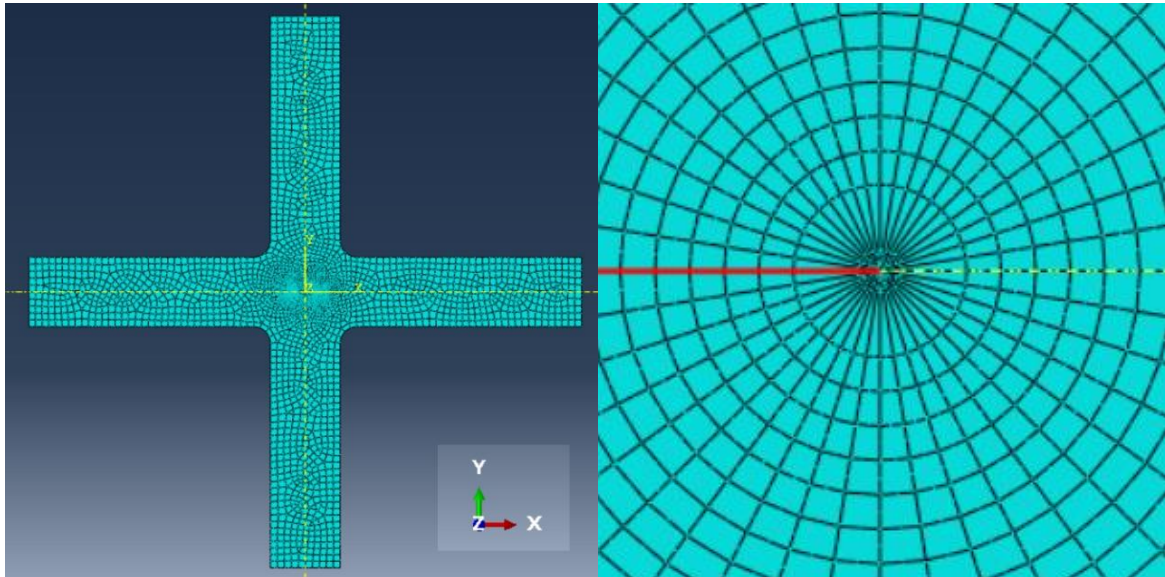


Figura 24 – (esquerda) Malha global do provete; (direita) Malha na frente de fenda

3.2.4 Condições Fronteira e Carregamentos

Esta seção é dedicada às condições fronteira e aos carregamentos aplicados na análise numérica da simulação da propagação de fissuras num provete cruciforme, no Abaqus. Estes parâmetros são indispensáveis para qualquer análise de elementos finitos.

As condições de fronteira têm a finalidade de limitar os movimentos do provete cruciforme. Neste estudo o deslocamento no eixo x na face/aresta do braço esquerdo do provete é nulo. O deslocamento na face/aresta do braço inferior relativo ao eixo dos y também é nulo. Relativamente aos outros deslocamentos e rotações nem nestas nem em outras faces/arestas são aplicadas mais condições de fronteira.

Quanto aos carregamentos aplicados no provete, como foi referido anteriormente, nesta dissertação estudam-se diversos carregamentos (proporcionais, não proporcionais, em fase, fora de fase, com e sem variação de frequência). No braço do lado direito é aplicada uma carga no eixo dos x e no braço superior uma carga na direção do eixo y . A carga é aplicada na direção normal à aresta do provete, ou seja, na mesma direção em que o deslocamento foi restringido no braço oposto do provete.

Estas cargas são aplicadas em diferentes passos ou *Load Steps*. Em cada passo são extraídos os SIF na fenda, sendo aplicado o princípio da sobreposição para o cálculo dos SIF em função do carregamento aplicado:

$$K_I(t) = K_{I,1} \cdot L_1(t) + K_{I,2} \cdot L_2(t) \quad (13)$$

$$K_{II}(t) = K_{II,1} \cdot L_1(t) + K_{II,2} \cdot L_2(t) \quad (14)$$

onde $K_{I,1}$ e $K_{I,2}$ representam o SIF em modo I para o primeiro e segundo *Load Step* e $K_{II,1}$ e $K_{II,2}$ representam o SIF em modo II para o primeiro e segundo *Load Step* respetivamente. $L_1(t)$ e $L_2(t)$ representam os carregamentos aplicados na direção horizontal e vertical e são calculados como:

$$L_i(t) = \sigma_{med} + \sigma_a \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (15)$$

onde σ_{med} representa a tensão média nominal (remotamente aplicada), σ_a a tensão alternada (amplitude de tensão) nominal, ω a frequência radial do carregamento e ϕ o desfasamento entre cargas. A razão de tensões entre direções, ou rácio biaxial λ pode ser calculado por:

$$\lambda = \frac{L_1(t)}{L_2(t)} \quad (16)$$

De seguida apresentam-se os gráficos da variação das cargas aplicadas ao eixo horizontal (azul) e vertical (laranja) ao longo de um ciclo de carregamento. Em cada um destes gráficos alterou-se um dos parâmetros de carregamento, razão de tensões entre eixos, diferença de fase entre eixos e frequência de carga em cada eixo.

Inicialmente apresenta-se o gráfico (esquerda) da figura 25 onde a frequência e razão de carga são unitárias e a diferença de fase nula. Neste caso o valor de $L_1(t)$ e de $L_2(t)$ coincidem. No gráfico do lado direito da figura 25 altera-se a amplitude de carga no eixo horizontal para metade. É possível observar-se que neste gráfico $L_1(t)$ toma valores diferentes de $L_2(t)$ mas a diferença de fase entre os carregamentos permanece nula. Estes carregamentos são ambos proporcionais.

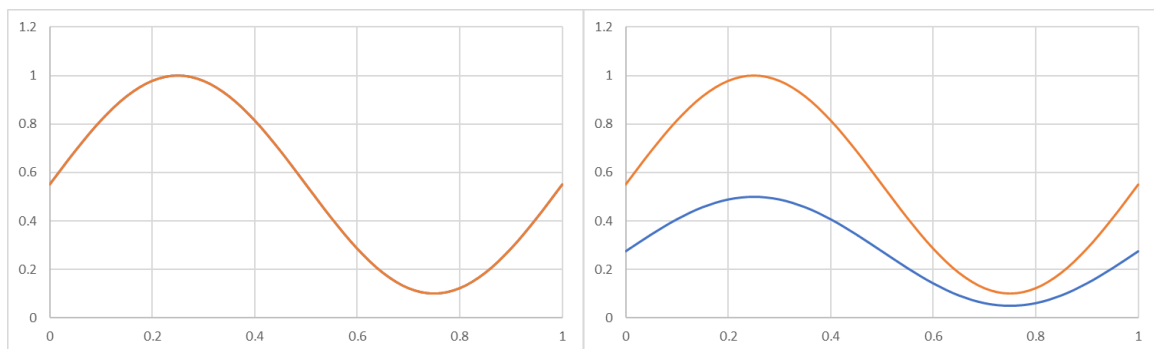


Figura 25 – Valores de $L_1(t)$ e $L_2(t)$ ao longo de um ciclo de carregamento: variação da amplitude de carga, carregamentos proporcionais.

Na figura 26 é possível visualizar-se a variação de $L_1(t)$ e $L_2(t)$ ao longo de um ciclo de carregamento. O resultado das expressões apresentada para o cálculo destes valores com diferença de fase de 90° e 180° altera-se e provoca mudanças na posição relativa entre o carregamento aplicado ao eixo horizontal e vertical, como se pode observar nos gráficos do lado esquerdo e direito, respetivamente. Ambos os carregamentos são desfasados.

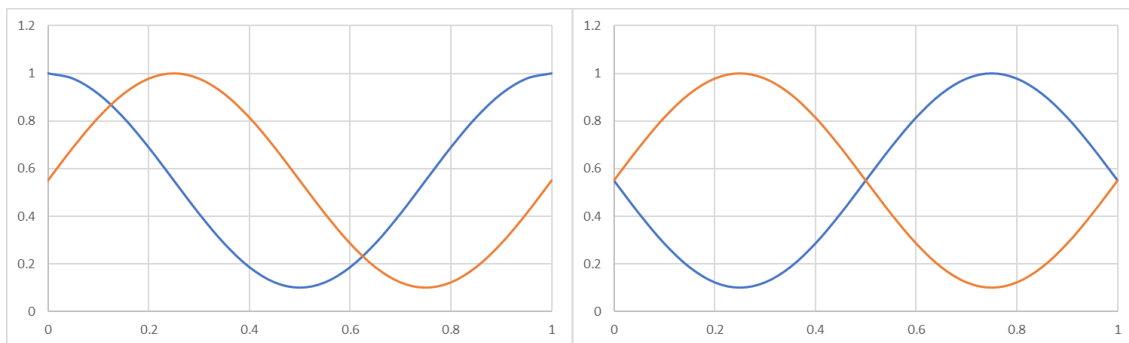


Figura 26 – Valores de $L_1(t)$ e $L_2(t)$ ao longo de um ciclo de carregamento: variação da fase para: (esquerda) 90° ou (direita) 180° , carregamentos desfasados ou fora de fase

Para finalizar esta seção apresentam-se ainda os gráficos da figura 27 obtidos através da variação da frequência para o dobro e também com frequência nula (carga estática) no eixo horizontal. Ao aplicar frequência nula na carga do eixo horizontal $L_1(t)$, esta permanece constante. Uma vez que a relação entre a carga mínima e a carga máxima aplicada foi de 0.1, a carga média aplicada foi diferente de zero. Este carregamento corresponde à aplicação de uma carga estática no eixo horizontal e a um verdadeiro carregamento não proporcional. A aduplicação da frequência da carga horizontal traduz-se também numa perda de proporcionalidade entre $L_1(t)$ e $L_2(t)$, embora as amplitudes se mantenham constantes. De notar que alterar a fase destes carregamentos em 90° ou 180° não terá qualquer influência no resultado de propagação de fadiga.

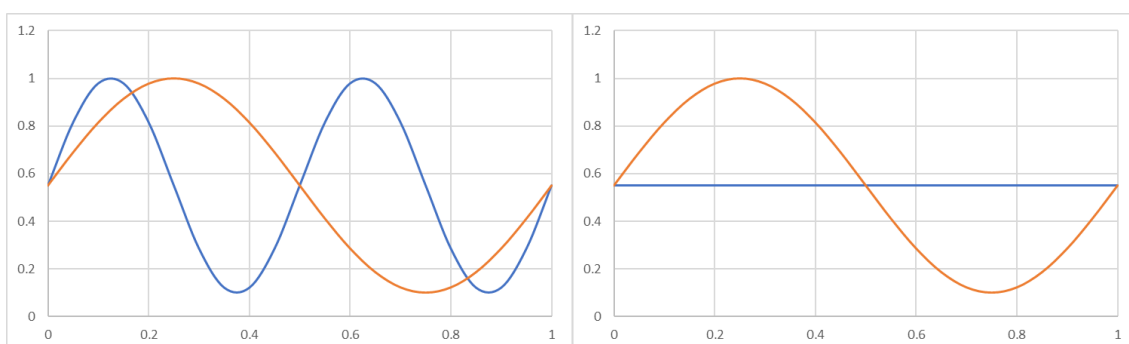


Figura 27 – Valores de $L_1(t)$ e $L_2(t)$ ao longo de um ciclo de carregamento: variação da frequência para: (esquerda) 2 ou (direita) 0

Na figura 28 pode visualizar-se a representação no Abaqus das condições de fronteira e das cargas aplicadas no provete cruciforme. Com a aplicação das condições de fronteira e dos carregamentos o provete sofre deformações e a fenda propaga-se.

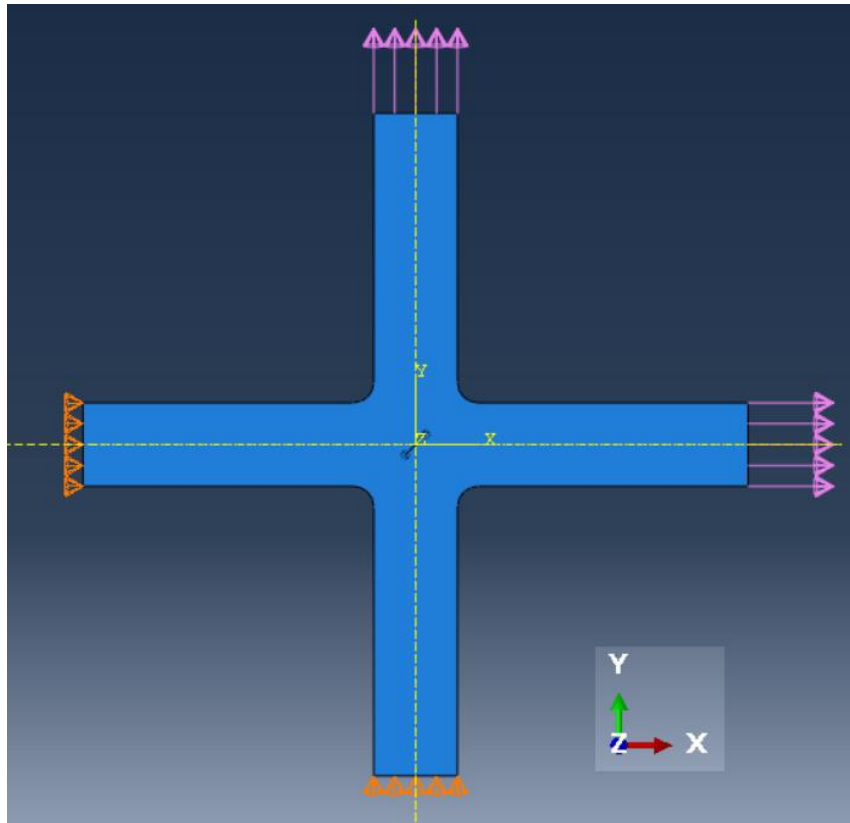


Figura 28 - Condições de fronteira e cargas aplicadas no provete

3.2.5 Algoritmo Para o Estudo da Propagação da fenda

O crescimento de fendas é uma das principais causas de falha estrutural dos componentes. Deste modo, em qualquer projeto estrutural é imprescindível a determinação do caminho e da taxa de propagação da(s) fenda(s). Esta seção dedica-se a explicar o algoritmo de propagação de fissuras utilizado nesta dissertação. Este tipo de estudos numéricos assume especial importância devido aos resultados serem próximos da realidade e ao seu custo ser reduzido, relativamente à realização de testes experimentais.

Este algoritmo de simulação de propagação de fissuras foi desenvolvido por [52], e baseia-se nos critérios MTS e MSS apresentados na revisão bibliográfica. Permite prever qual a direção de propagação da fissura através do cálculo do fator intensidade de tensões e de outros parâmetros da mecânica da fratura. Funciona por incrementos, ou seja, realiza os cálculos correspondentes a cada propagação de fenda iterativamente. O MatLab e o Abaqus são os programas mais importantes na realização deste algoritmo. É ainda programada no MatLab a criação de um script de Python.

Este algoritmo surge para ultrapassar algumas dificuldades computacionais associadas ao estudo da propagação utilizando apenas o Abaqus. Neste software não é possível inserir todos os parâmetros da Lei de Paris necessários neste estudo de propagação de fissuras, pelo que diversos autores que realizaram estudos semelhantes a este dedicaram-se a desenvolver alternativas para contornar estes problemas [52].

Inicialmente o algoritmo calcula os diversos parâmetros da mecânica da fratura consoante os carregamentos aplicados na fenda inicial. De seguida, utiliza-se a Lei de Paris para determinar a taxa de propagação e prever a direção do próximo incremento da fenda. Este processo é repetido a cada incremento de fenda até um comprimento de fenda limite definido pelo utilizador ou até que este pare o programa. Para facilitar a compreensão deste algoritmo deve visualizar-se o esquema da figura 29.

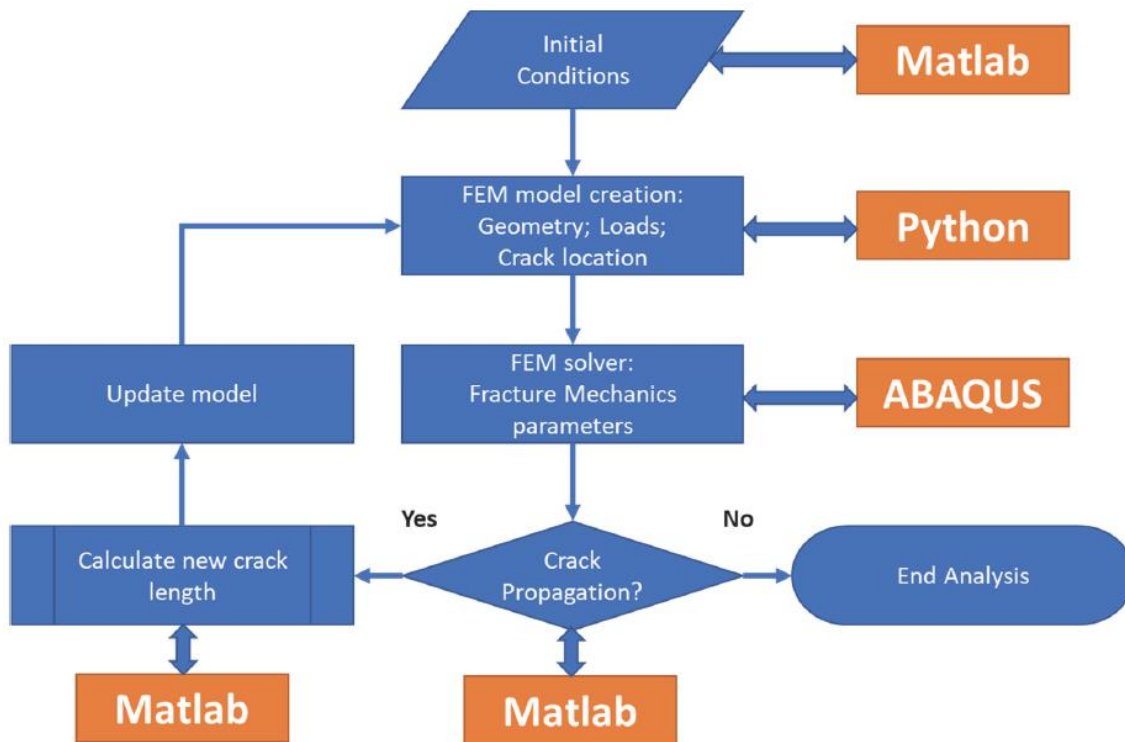


Figura 29 – Algoritmo numérico para o estudo da propagação de fendas [52].

As condições iniciais como as dimensões do provete, a dimensão e inclinação da fenda, o tipo de carregamento e também a escolha do critério (MTS ou MSS) podem modificar-se no MatLab. Após correr o programa com as condições iniciais desejadas cria-se um script de Python que envia o modelo de elementos finitos selecionado para o Abaqus. No Abaqus obtêm-se as soluções dos resultados de diversos parâmetros da mecânica da fratura. De seguida estes parâmetros são enviados para o MatLab para que este possa verificar se a propagação acaba ou se há um novo incremento do tamanho de

fenda. Caso a fenda se continue a propagar o MatLab calcula o seu novo comprimento e atualiza o ficheiro de python do modelo de elementos finitos para enviar para o Abaqus. O ciclo repete-se até que a fenda se deixe de propagar, por ordem do utilizador do programa ou quando o comprimento de fenda atinge o limite estipulado de 70mm.

Antes apresentar os critérios utilizados para definir a direção de propagação das fendas estudadas apresenta-se a figura 30 onde se pode visualizar a propagação da fenda ao fim de vários ciclos de carga. Neste caso a fenda propaga-se em modo I. Nesta figura pode visualizar-se a malha na zona próxima da frente de fenda e o comportamento ou magnitude dos fatores intensidade de tensão nesta zona, sendo que as cores vermelhas representam valores de tensão superiores e estão localizadas na frente de fenda.

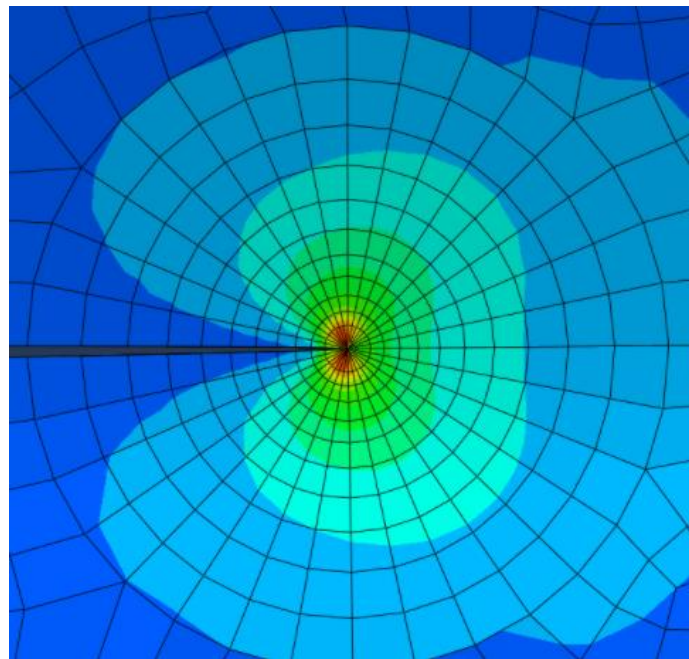


Figura 30 – Malha e comportamento das tensões na frente de fenda [31]

4 Capítulo – Resultados da Análise Numérica

Este capítulo dedica-se à apresentação dos resultados da propagação de fendas de fadiga obtidos através da utilização do algoritmo apresentado. É constituído por três seções e em cada uma delas apresentam-se os resultados obtidos através dos gráficos dos fatores intensidade de tensão e da aplicação do critério MTS/MSS no algoritmo numérico utilizado. Na primeira seção apresentam-se as soluções obtidas quando o provete cruciforme está sujeito a carregamentos proporcionais (em fase). De seguida apresentam-se os resultados de carregamentos desfasados realizados e, por fim, alguns resultados com variação de frequência (não proporcionais). Num dos casos de estudo aplica-se uma carga com o dobro da frequência e no outro uma carga estática, ambas no eixo horizontal.

Na tabela 3 pode consultar-se quais os carregamentos (proporcionais, não proporcionais, com variação de frequência ou de fase), inclinações de fenda, e quais os critérios estudados (MTS ou MSS) para cada caso de estudo. A discussão, validação e comparação dos resultados obtidos é realizada no respetivo capítulo de discussão de resultados, sendo que as seções seguintes se limitam a apresentar as soluções de propagação encontradas.

Tabela 3: Diversos tipos de carregamentos apresentados

Carregamento	Frequência	β	λ	Fase	Critério MTS	Critério MSS
Proporcional	1	0	0.5 ; 1 ; 1,5	0	Sim	Não
		45°	0.5 ; 1 ; 1,5			
Desfasado	1	15°;30°;45°	1	90°	Sim	Sim
		15°;30°;45°	1	180°	Sim	Sim
		45°	0.5; 1,5	180°	Sim	Não
Frequência	2	15°;30°;45°	1	0	Sim	Sim
		15°;30°;45°	1	45°	Sim	Sim
	0	15°;30°;45°	1	0	Sim	Sim

4.1 Carregamentos Proporcionais (em fase)

Esta seção exibe os resultados numéricos considerados relevantes para o estudo da propagação de fissuras sob condições de carregamento proporcionais em fase. A validação e discussão destes resultados será realizada no capítulo da análise e discussão de resultados.

Apresenta-se de seguida na figura 31 os resultados da propagação para fissuras alinhadas com a horizontal ($\beta=0^\circ$). Pode observar-se o caminho da propagação correspondente às três simulações. A diferença entre estas simulações reside na razão de carga aplicada nos diversos casos: $\lambda=0.5$; $\lambda=1$;

$\lambda=1.5$. O gráfico de propagação obtido é igual nestes casos, pelo que apenas é apresentado uma vez. Ao longo das próximas seções, nestes gráficos, a linha preta simboliza a fenda inicial e as linhas coloridas correspondem à simulação da propagação da fissura. Na figura 32 encontra-se o gráfico da variação dos SIFs K_I^* e K_{II}^* máximo e mínimo, elaborado no Excel. Este tipo de gráficos permite discutir qual a direção de propagação da fissura, de acordo com o critério MTS. Visto que a propagação é idêntica nos diversos casos os gráficos obtidos para as diversas razões de carga também são semelhantes como seria de esperar pelo que também só se apresenta o gráfico da razão de carga unitária.

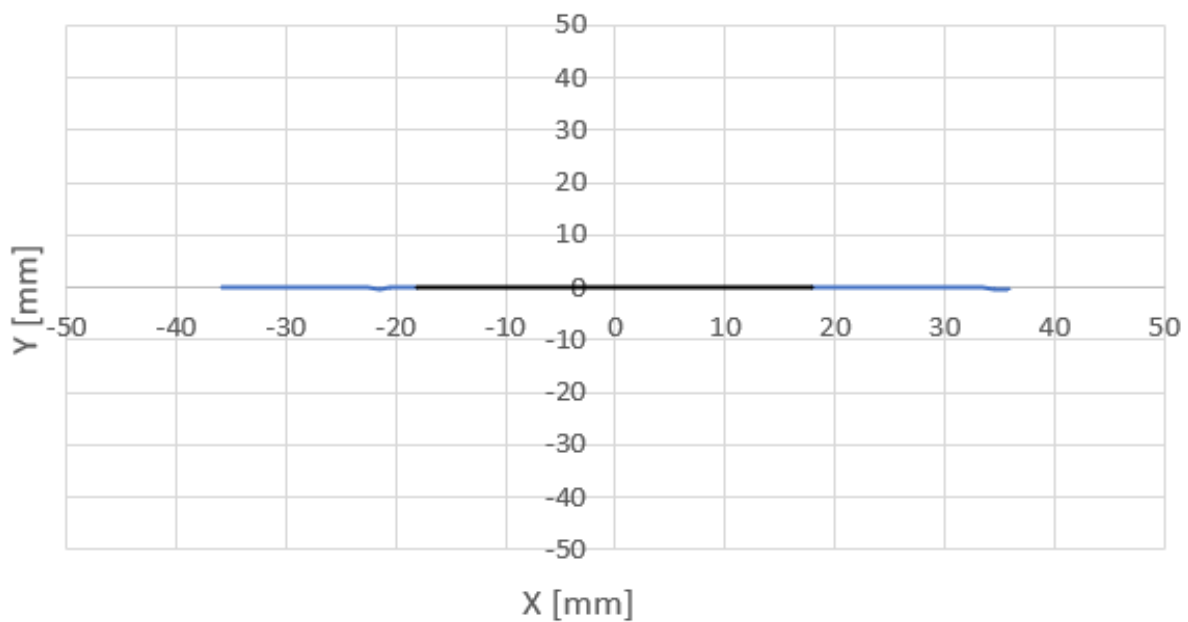


Figura 31 – Curva de propagação da fenda: $\beta=0^\circ$; $\phi=0^\circ$, MTS

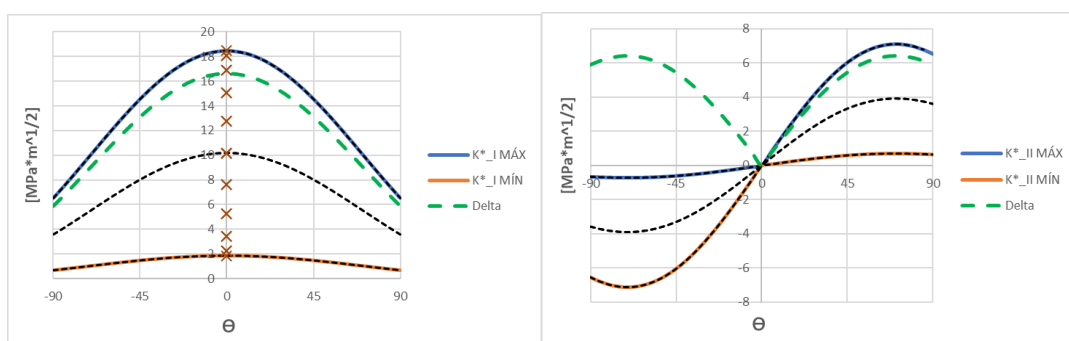


Figura 32 – Variação dos fatores de intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta = 0^\circ$; $\phi = 0^\circ$

Nos casos em que a fissura está inclinada 45° com a horizontal as curvas de propagação sob as diversas razões de carga aplicadas são diferentes e pode observar-se na figura 33 os seus caminhos de propagação para as três razões de carga.

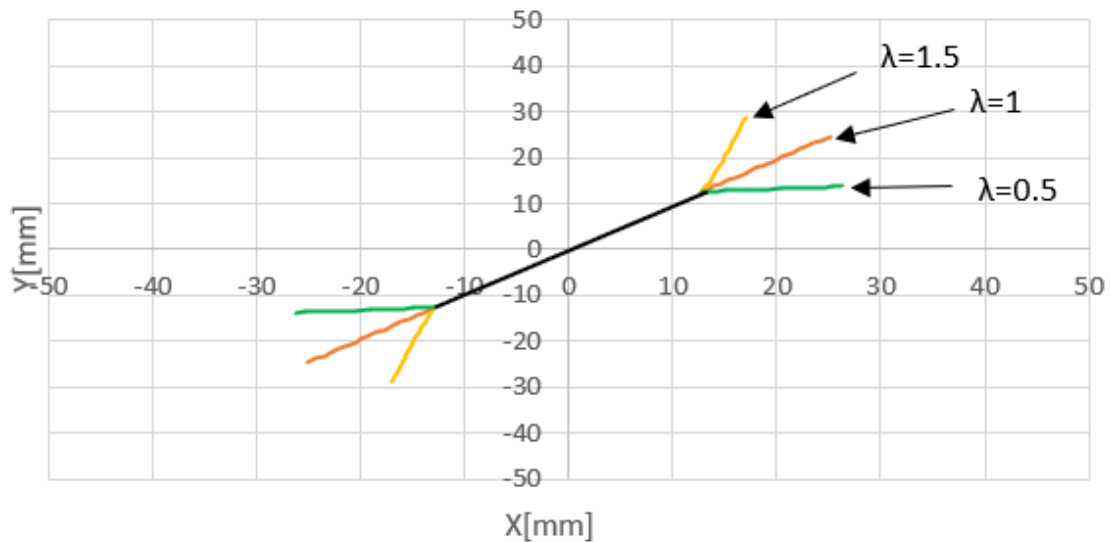


Figura 33 – Curva de propagação com variação do rácio biaxial: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0^\circ$; MTS

No caso em que a inclinação inicial da fenda é de 45° apresentam-se os gráficos correspondentes aos valores máximos e mínimos de K_I^* e K_{II}^* nos três carregamentos, correspondentes às propagações estudadas. Na figura 34 os gráficos de variação dos SIFs obtidos para a razão de carga $\lambda = 0,5$.

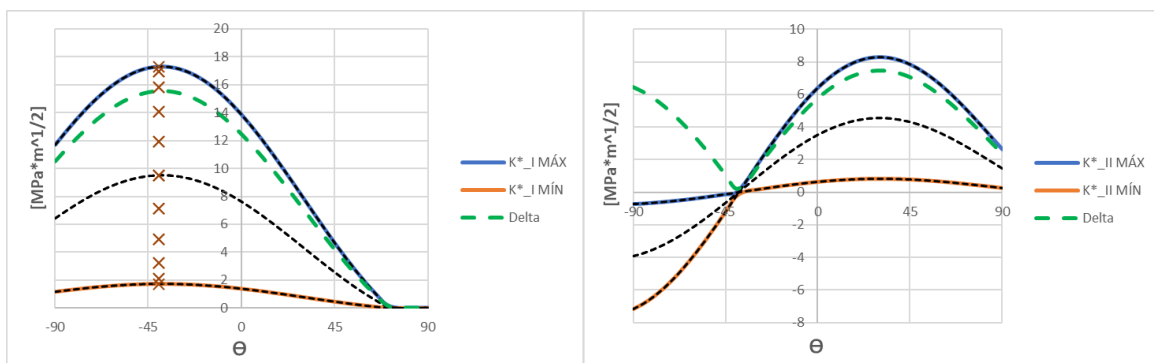


Figura 34 – Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta = 45^\circ$; $\lambda = 0,5$; $\phi = 0^\circ$.

Para a razão de carga unitária, os gráficos da variação de K_I^* e K_{II}^* que permitem obter a previsão do ângulo de propagação das fendas na figura 35.

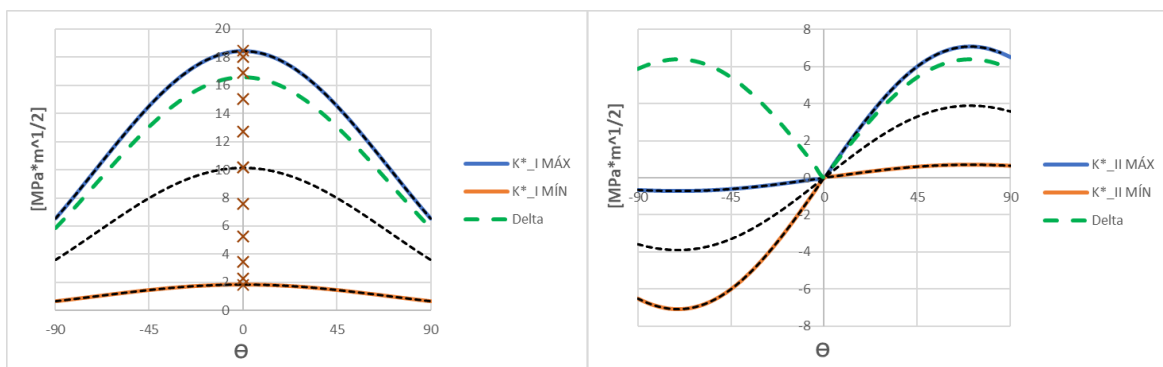


Figura 35 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=45^\circ$; $\lambda=0.5$; $\phi=0^\circ$

Finalmente, antes de avançar para a apresentação dos resultados com diferença de fase, apresentam-se também os gráficos da variação dos SIFs, K_I^* e K_{II}^* , para a razão de carga $\lambda = 1,5$, na figura 36, respetivamente.

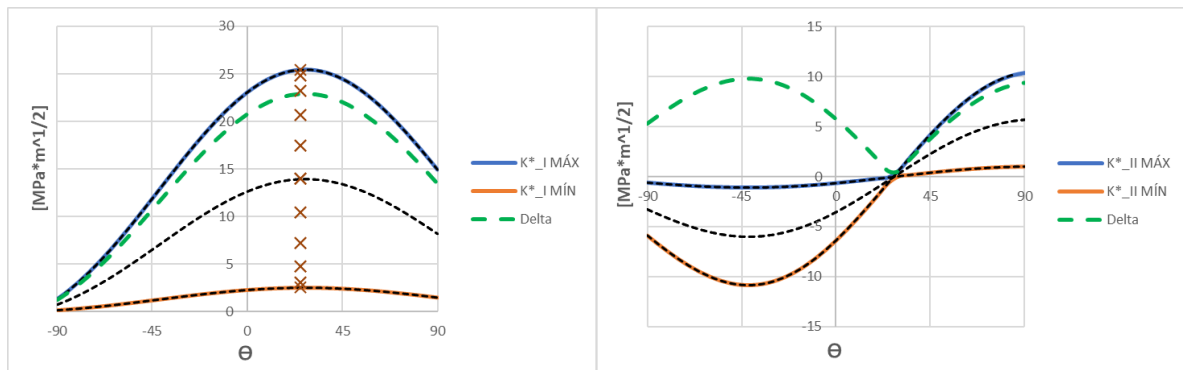


Figura 36 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=45^\circ$; $\lambda=1,5$; $\phi=0^\circ$.

4.2 Carregamentos Desfasados

Esta seção exibe os resultados numéricos da propagação de fissuras quando os carregamentos aplicados nos braços do provete cruciforme estão desfasados. Inicialmente apresentam-se os resultados para carregamentos desfasados em 90° para as inclinações de fenda $\beta=15^\circ$; $\beta=30^\circ$; e $\beta=45^\circ$. De seguida, apresentam-se as soluções dos resultados desfasados em 180° para as mesmas inclinações de fenda. Também se estudam as propagações desfasadas em 180° e onde se varia a razão de carga aplicada para $\lambda=0.5$ e $\lambda=1.5$, quando a inclinação da fenda inicial é de 45° .

Deste modo, inicia-se o estudo de propagações defasadas em 90° . Para isso, começa-se por apresentar as curvas de propagação obtidas no algoritmo numérico utilizado na figura 37, de acordo com o critério MTS. Pode observar-se os diversos caminhos de propagação, consoante as diferentes condições iniciais da fenda em análise. A linha azul corresponde ao carregamento aplicado quando a fenda inicial está inclinada em 45° . As linhas laranjas e azuis aos carregamentos em que a fenda está inclinada em 30° e 15° .

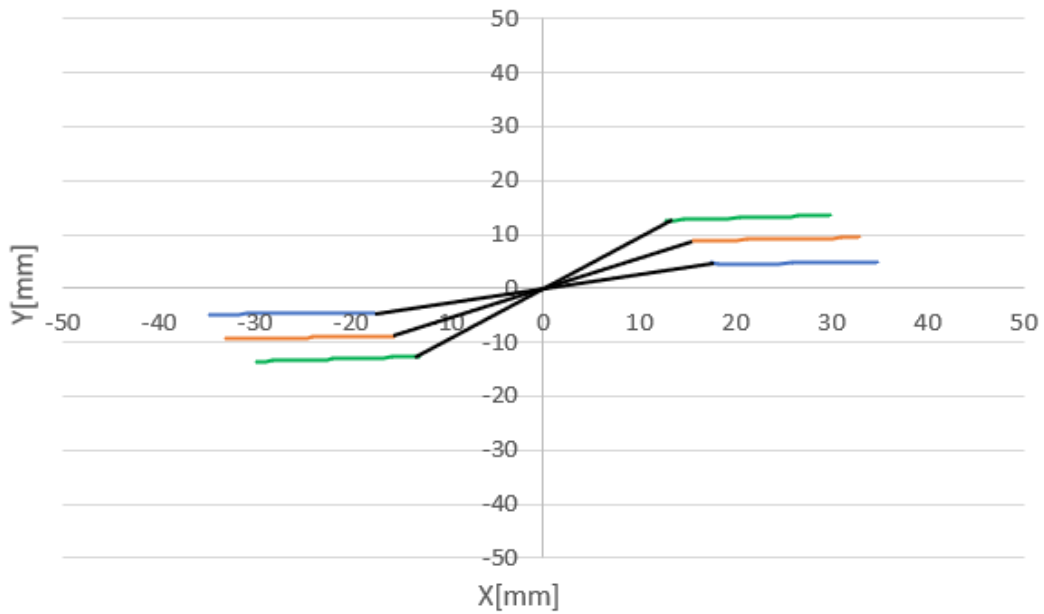


Figura 37 – Curvas de propagação: $\beta=15,30^{\circ},45^{\circ}$; $\phi=90^{\circ}$; MTS

Na figura 38 é possível observar os resultados da propagação obtidos no algoritmo de simulação, de acordo com o critério MTS. Tal como no caso anterior, as linhas coloridas correspondem às curvas de propagação obtidas para as mesmas inclinações de fenda estudadas.

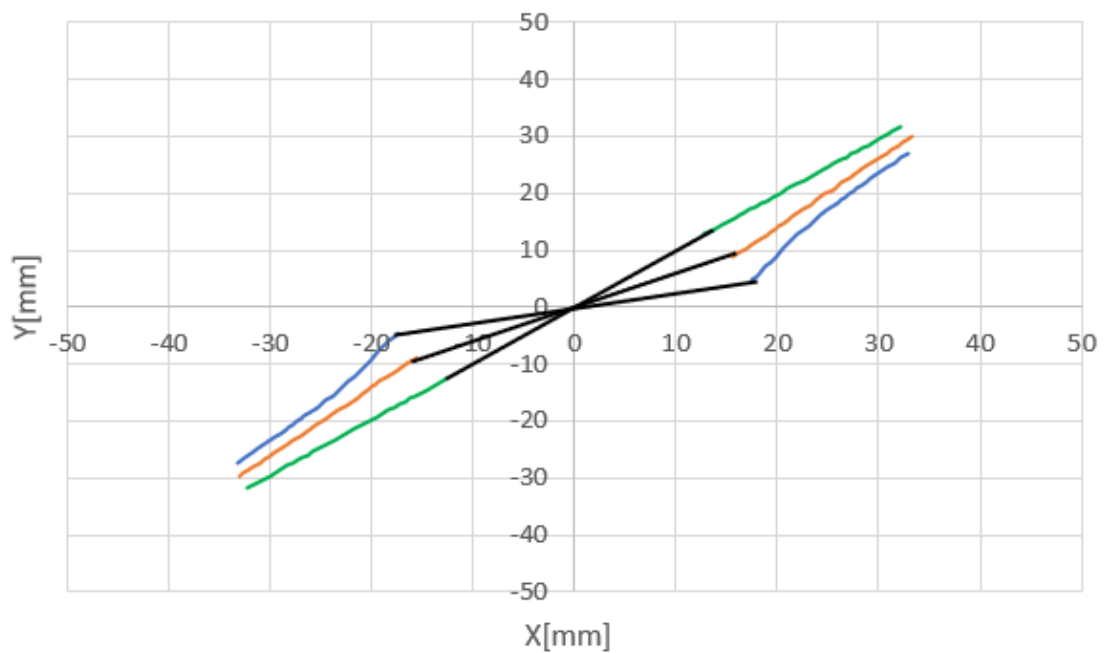


Figura 38 – Curva de propagação: $\beta=15,30^{\circ},45^{\circ}$; $\phi=90^{\circ}$; MSS

Após apresentar as curvas de propagação obtidas no algoritmo para as diversas inclinações de fenda é imprescindível mostrar os gráficos da variação dos fatores intensidade de tensão obtidos para cada um destes casos.

Na figura 39 encontram-se os gráficos da variação do fator intensidade tensão K_I^* , K_{II}^* máximo e mínimo, quando a inclinação da fenda inicial é de 15° .

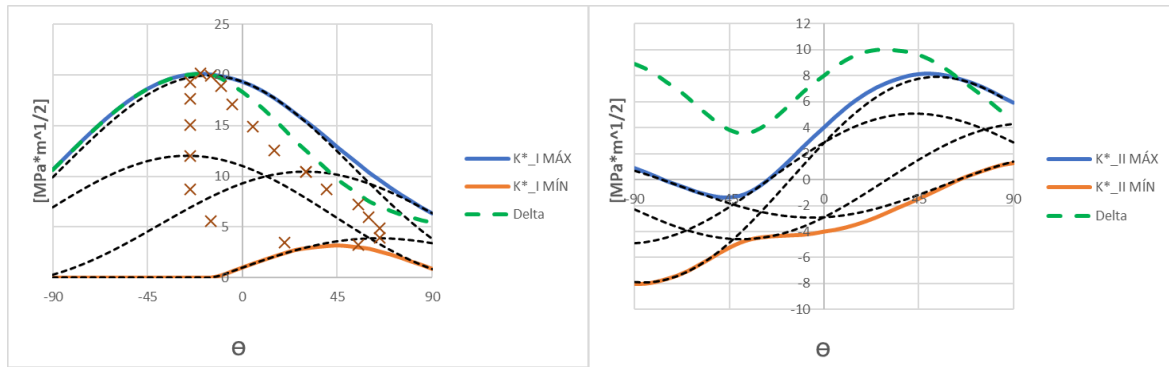


Figura 39 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=15^\circ$; $\phi=90^\circ$.

Os resultados numéricos dos SIFs obtidos num ciclo de carregamento, para uma fenda inclinada em 30° com a horizontal, pode observar-se nos gráficos da figura 40.

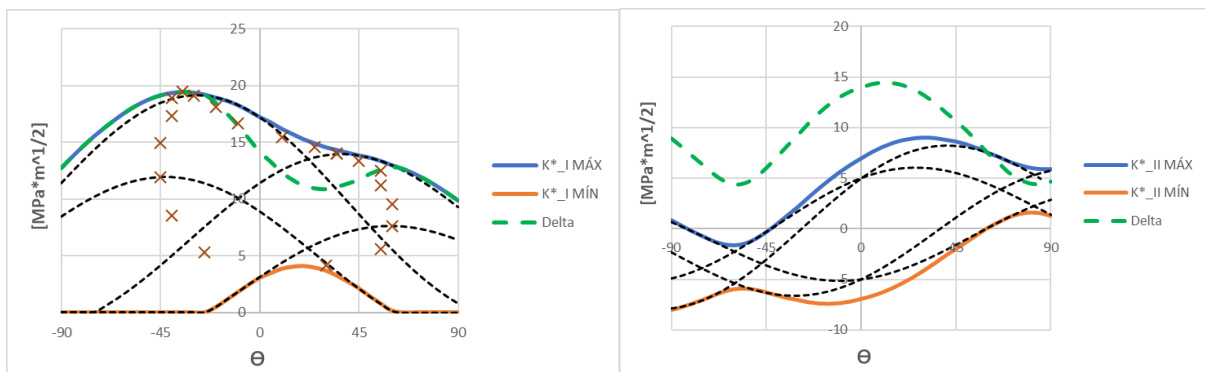


Figura 40 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=30^\circ$; $\phi=90^\circ$.

Para uma fenda inclinada em 45° com a horizontal, de forma semelhante às inclinações iniciais de fenda apresentadas anteriormente, apresentam-se os gráficos da figura 41, correspondentes aos resultados obtidos da variação dos valores de K_I^* , K_{II}^* , com desfasamento aplicado de 90° .

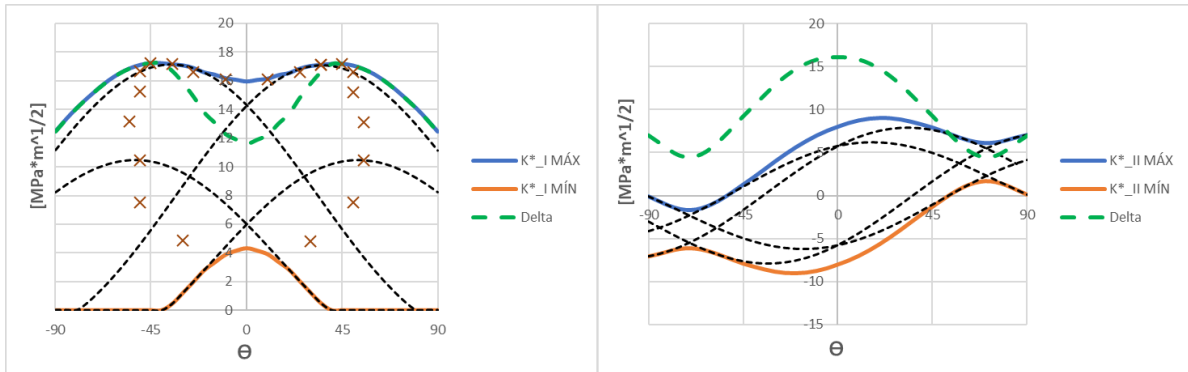


Figura 41 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=45^\circ$; $\phi=90^\circ$.

Nas próximas figuras desta seção apresentam-se os resultados numéricos da simulação da propagação de fendas quando sujeitas a cargas desfasadas em 180° . Na análise de resultados discute-se a influência da variação de fase nas curvas de propagação obtidas para os carregamentos simulados.

Na figura 42 apresentam-se os resultados obtidos através do algoritmo de propagação de fendas para as diversas inclinações de fenda inicial simuladas, de acordo com o critério MTS. Pode observar-se o caminho da propagação destas fendas.

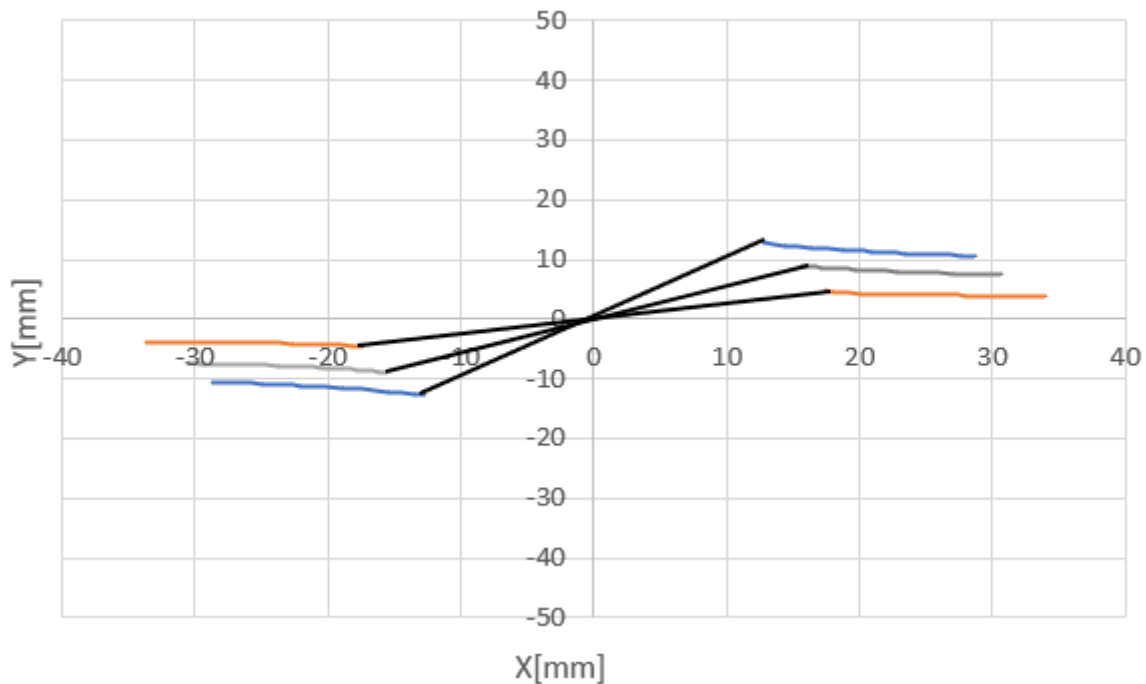


Figura 42 – Curva de propagação: $\beta=15,30^\circ,45^\circ$; $\phi=180^\circ$;MTS

Na figura 43 encontra-se os gráficos da variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* , K_{II}^* que permitem prever o ângulo de propagação da fenda.

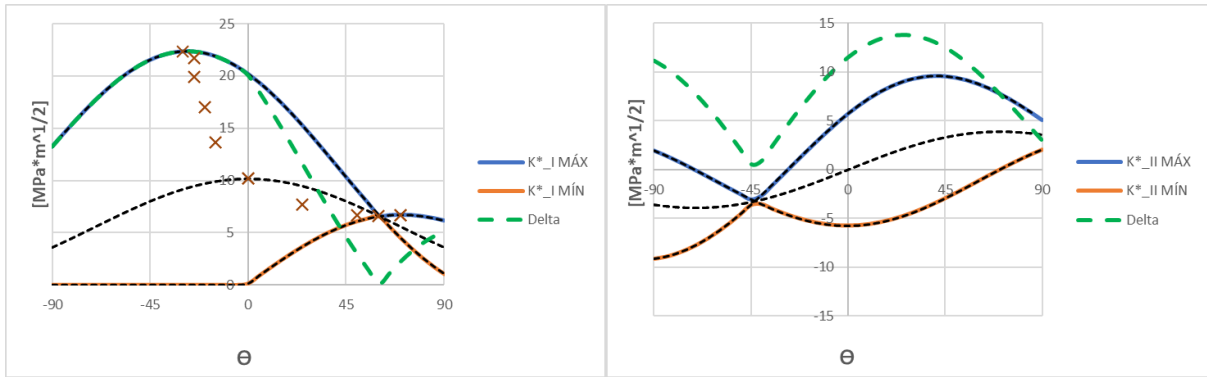


Figura 43 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=15^\circ$; $\phi=180^\circ$

Analogamente, os resultados da simulação de propagação para fendas inclinadas em 30° com a horizontal. Para um desfasamento de 180° os gráficos da variação do fator intensidade tensão K_I^* , K_{II}^* encontra-se na figura 44.

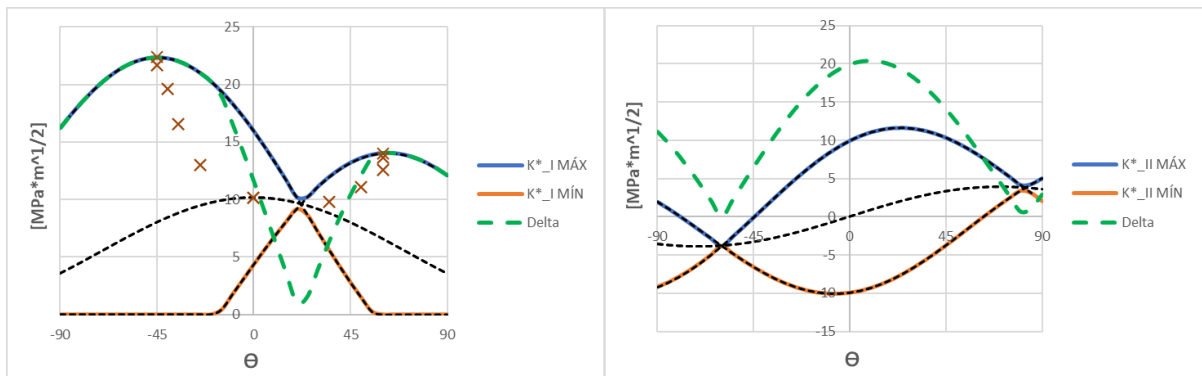


Figura 44 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=30^\circ$; $\phi=180^\circ$

De seguida, apresentam-se os resultados da propagação de fissuras inclinadas em 45° com a horizontal. Na figura 45 encontram-se os gráficos da variação do fator intensidade tensão K_I^* , K_{II}^* quando a razão de carga é unitária, tal como nos casos anteriores apresentados nesta seção.

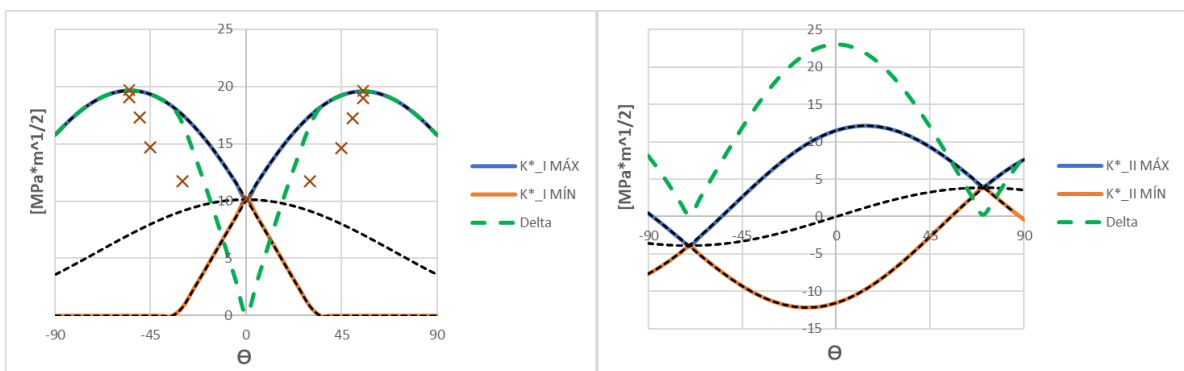


Figura 45 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=45^\circ$; $\phi=180^\circ$

Como foi mencionado, para estudar a da influência da variação de fase, para além do critério MTS apresentado foram também realizadas simulações de acordo com o critério MSS para os diversos casos de desfasamento em 180° . Na figura 46 apresentam-se os resultados obtidos no algoritmo das curvas de propagação, para as inclinações iniciais de fenda ($\beta = 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ$).

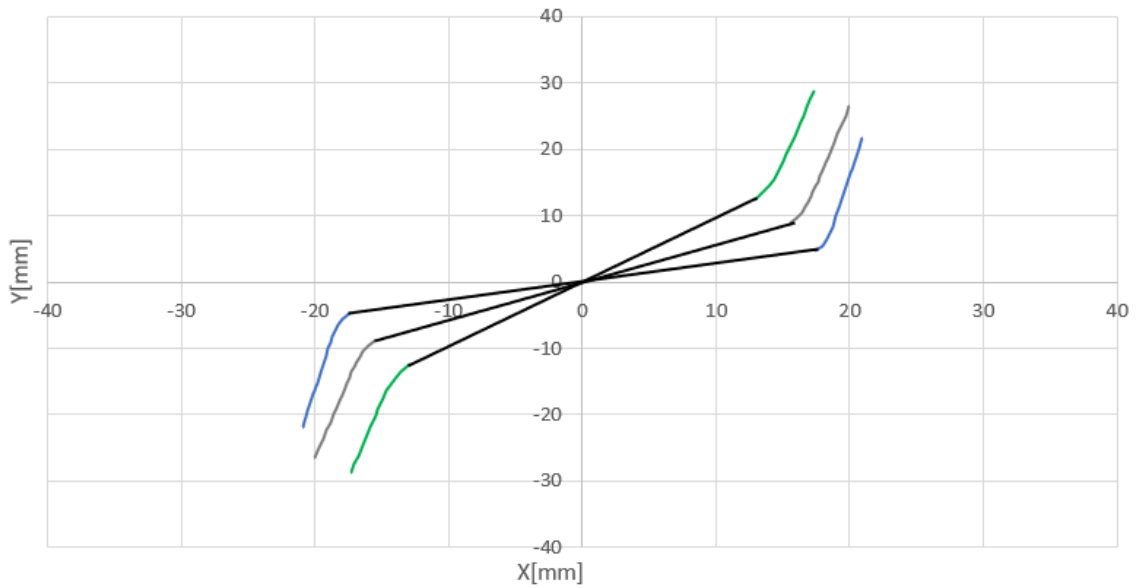


Figura 46 – Curva de propagação: $\beta=15,30^\circ,45^\circ$; $\phi=180^\circ$; MSS

Para finalizar o estudo do desfasamento em 180° , a figura 47 apresenta os resultados do caminho de propagação de fissuras inclinadas em 45° com a horizontal, desfasadas e sujeitas a uma razão de carga de $\lambda=0.5$. Do lado direito da figura, observa-se o gráfico da variação apenas do fator intensidade de tensão K_I^* , visto considerar-se o critério mais adequado para este estudo como será explicado na discussão da análise numérica.

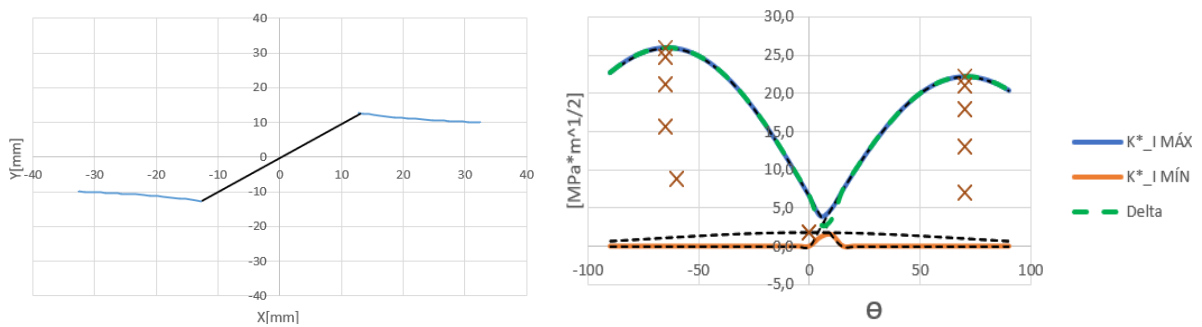


Figura 47 – a) Curva de Propagação (MTS) e b) Variação do fator intensidade de tensão K_I^* : $\beta=45^\circ$; $\lambda=0.5$; $\phi=90^\circ$

Na figura 48 apresentam-se as soluções numéricas da propagação de fendas inclinadas em 45° com a horizontal, desfasadas e sujeitas a uma razão de carga, $\lambda=1.5$. À direita observa-se o gráfico da variação do fator intensidade de tensão K_I^* para este caso de estudo.

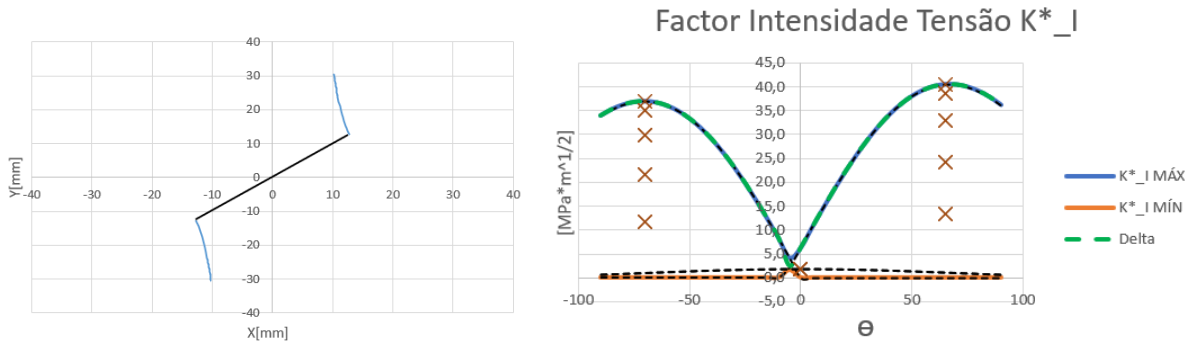


Figura 48 - a) Curva de Propagação (MTS) e b) Variação do fator intensidade de tensão K_I^* : $\beta=45^\circ$; $\lambda=1.5$; $\phi=90^\circ$

4.3 Carregamentos com Variação de Frequência

Nesta seção apresentam-se alguns dos resultados obtidos e considerados relevantes para o estudo do efeito da frequência dos carregamentos. Para isso exibem-se os gráficos de propagação e de variação do fator intensidade de tensão K_I^* e/ou K_{II}^* para os diversos carregamentos e inclinações de fenda. A frequência altera-se no eixo horizontal e estuda-se o efeito de uma carga estática com frequência nula e também o efeito de uma carga com o dobro da frequência.

Para o estudo da influência da variação de frequência considera-se pertinente duplicar a frequência num dos eixos (horizontal), mantendo as outras condições iguais às aplicadas anteriormente noutros carregamentos de forma a ser possível comparar os diversos resultados. Deste modo, na figura 49 apresenta-se o gráfico das propagações para as mesmas inclinações de fenda ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$). Na figura 50 o gráfico da variação dos fatores intensidade tensão K_I^* para uma inclinação de fenda de 45° . É também apresentado no gráfico no lado direito desta figura a variação do SIF K_{II}^* .

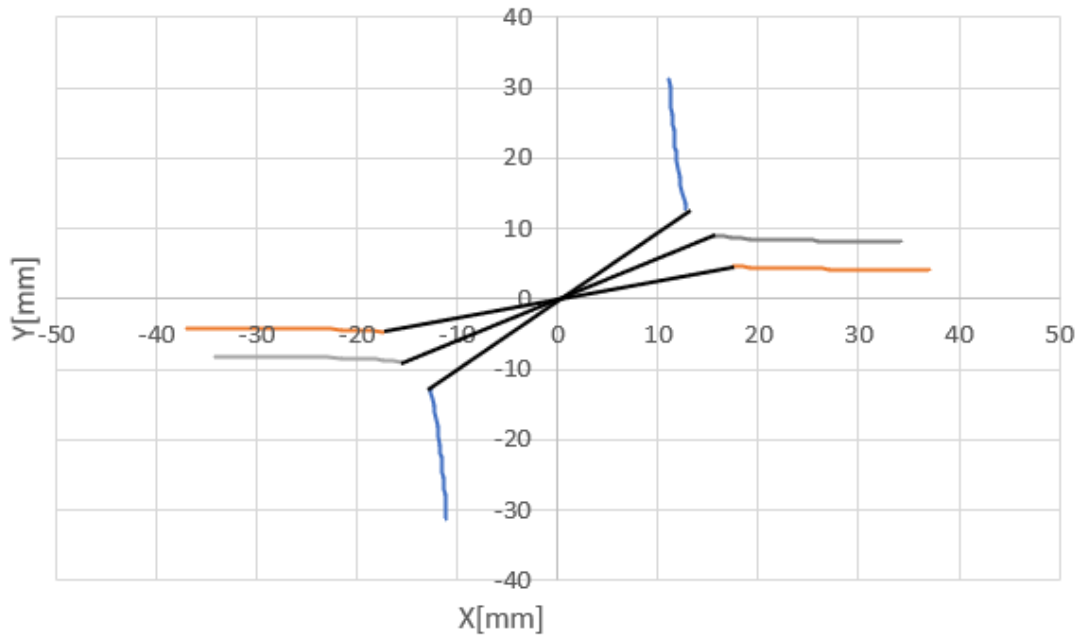


Figura 49 – a) Curva de Propagação para carregamentos com frequência duplicada no eixo horizontal: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0^\circ$, MTS

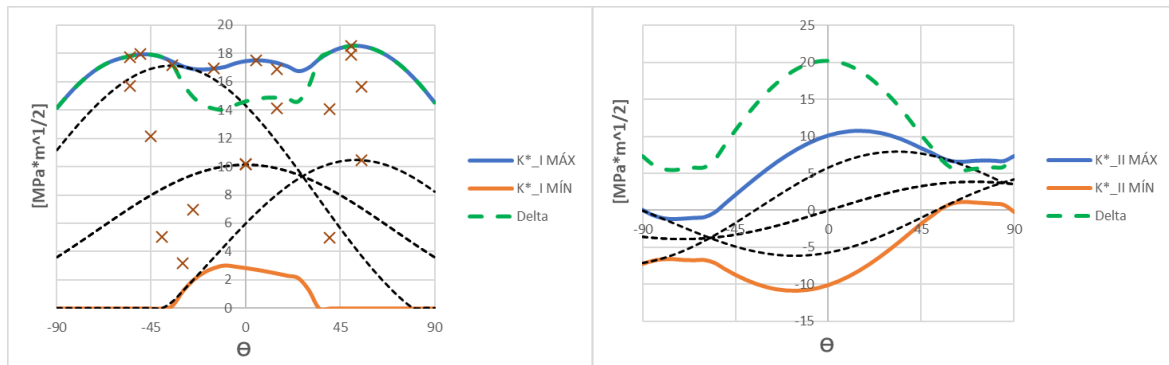


Figura 48 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* com o dobro da frequência no eixo horizontal : $\beta=45^\circ$; $\phi=0^\circ$

Na figura 51 observa-se o gráfico da variação do fator intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* para este caso de estudo com a inclinação da fenda inicial de 30° com a horizontal.

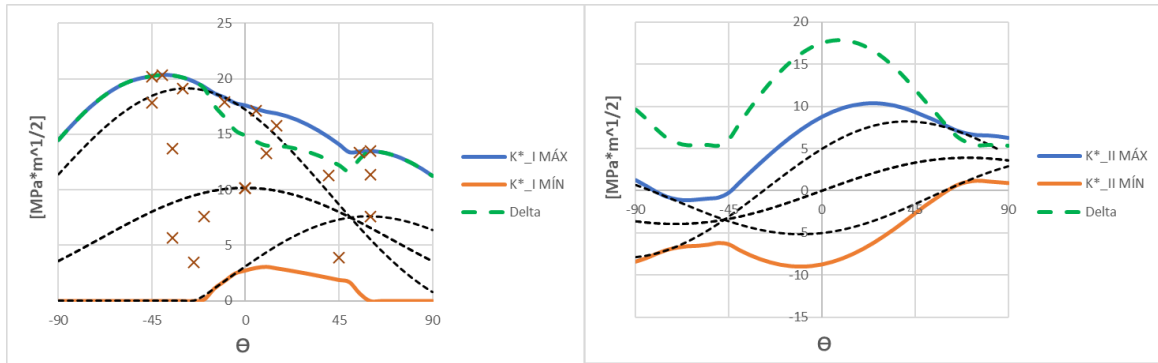


Figura 49 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* com o dobro da frequência no eixo horizontal : $\beta=30^\circ$; $\phi=0^\circ$

Para o caso de uma fenda inclinada $\beta = 15^\circ$ com a horizontal e 90° de desfasamento, apresentam-se os respectivos gráficos na figura 52, tal como no caso anterior das fendas com uma inclinação inicial diferente apresentadas nesta seção.

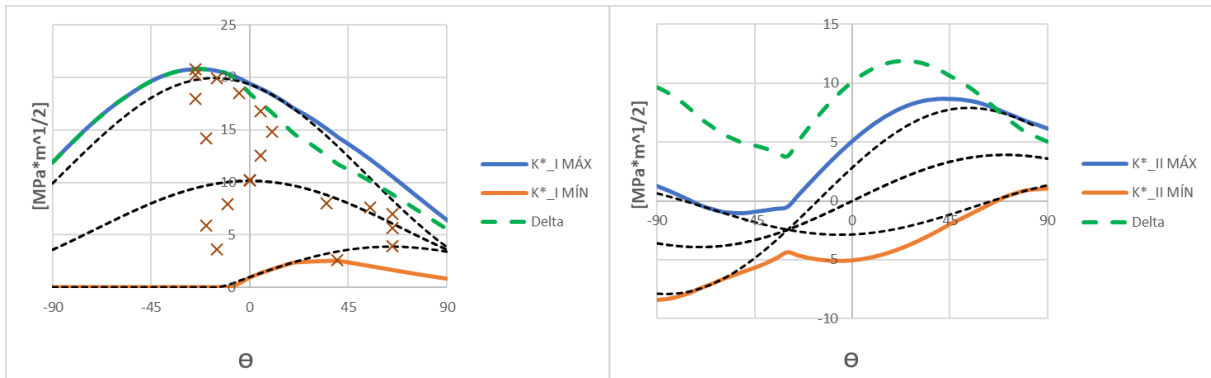


Figura 50 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* com o dobro da frequência no eixo horizontal: $\beta=15^\circ$; $\phi=0^\circ$

Apresentam-se ainda os resultados das curvas de propagação obtidos no algoritmo através da simulação de acordo com o critério MTS. Estudaram-se as mesmas inclinações de fenda inicial e as condições de carregamento mantiveram-se iguais para se poder avaliar e comparar os resultados obtidos com os diferentes critérios. Na figura 53 é possível visualizar-se um gráfico elaborado no excel com as diversas curvas de propagação obtidas para as inclinações de fenda de $\beta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$, representadas a vermelho, amarelo e azul, respetivamente. As linhas pretas correspondem à fenda inicial do provete.

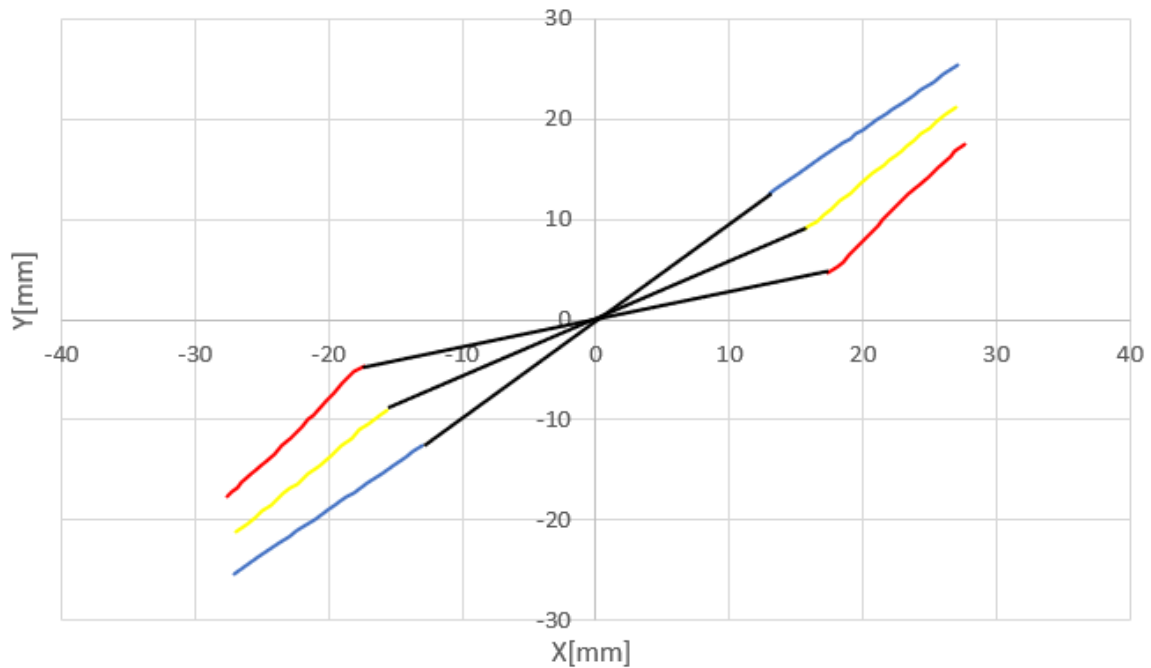


Figura 51 – a) Curva de Propagação para carregamentos com frequência duplicada no eixo horizontal: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0^\circ$, MSS

Para completar o estudo dos carregamentos com o dobro da frequência no eixo horizontal foram efetuadas outras simulações em que se alterou a diferença de fase do carregamento. Para uma diferença de fase de 90° e 180° não se obtiveram diferenças significativas nos resultados pelo que se dispensa a apresentação destes resultados. Contudo, para um desfasamento de 45° é possível observar algumas alterações na direção de propagação obtida, segundo os diversos critérios, para as mesmas inclinações de fenda.

Deste modo, para estudar o impacto da variação de frequência e da diferença de fase de 45° , na figura 54, apresenta-se os resultados das curvas de propagação para as mesmas inclinações de fenda inicial. A azul a propagação da fenda inicial inclinada em 45° , a cinzento inclinada em 30° e a laranja em 15° relativamente ao eixo horizontal.

Os gráficos na figura 55 apresentam a variação de K_I^* e K_{II}^* esta inclinação de fenda, do lado esquerdo e direito respetivamente.

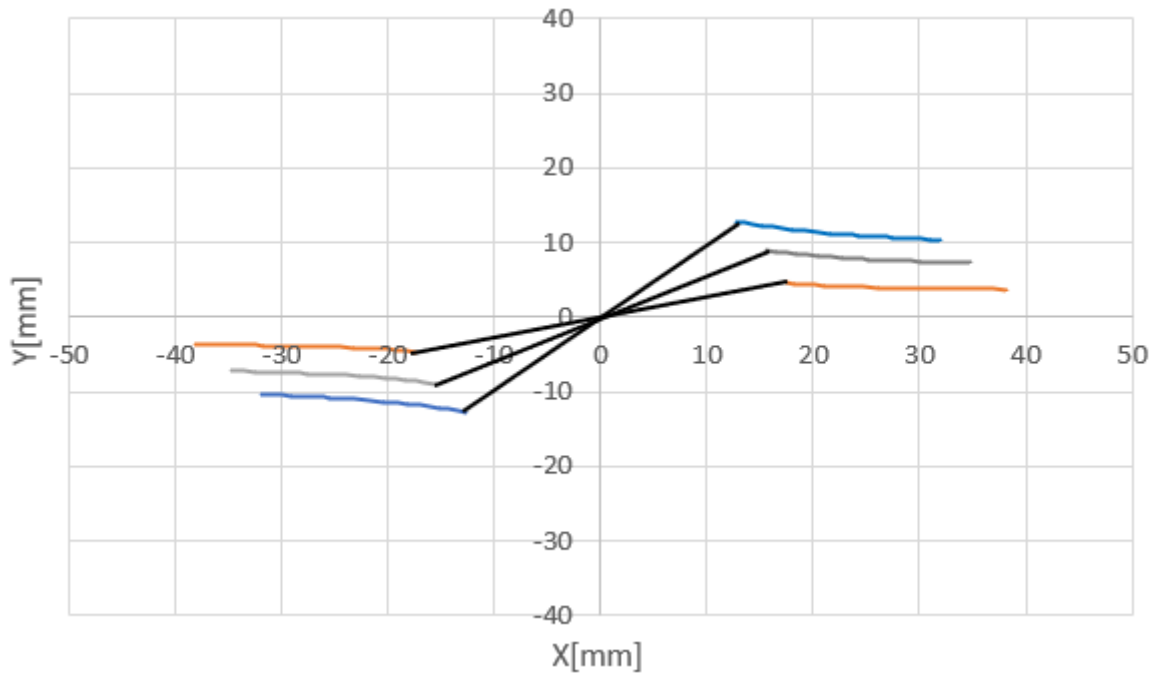


Figura 52 – a) Curva de Propagação para carregamentos com frequência duplicada no eixo horizontal: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=45^\circ$, MTS

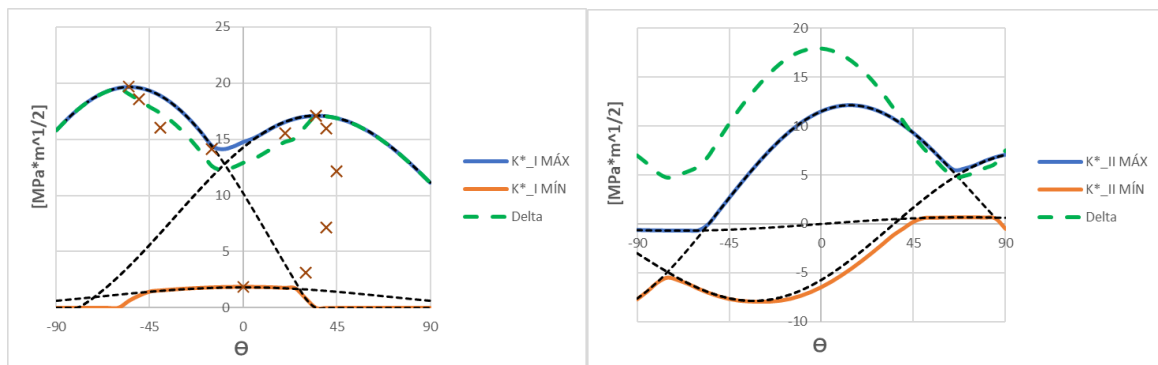


Figura 53 - Curva de Propagação e Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=45^\circ$; $\phi=45^\circ$

Analogamente, a figura 56 representa os resultados da simulação de propagação para fendas inclinadas em 30° com a horizontal. Os respectivos gráficos obtidos na simulação da propagação para a variação dos SIFs, K_I^* e K_{II}^* correspondente a esta situação de carregamento.

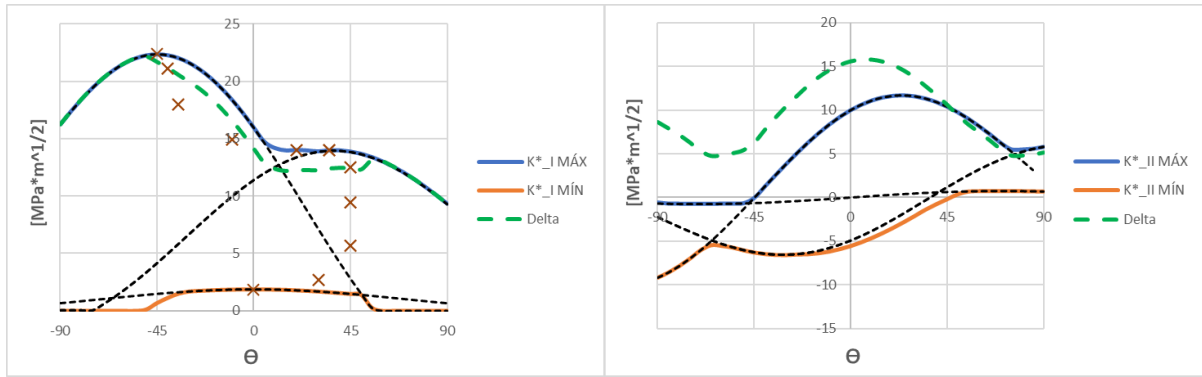


Figura 56 - Curva de Propagação e Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=30^\circ$; $\phi=45^\circ$

Do mesmo modo, para um desfasamento de 45° e uma inclinação da fenda inicial de 15° , apresenta-se a figura 57 onde se pode observar-se os respetivos gráficos de variação dos fatores intensidade de tensão.

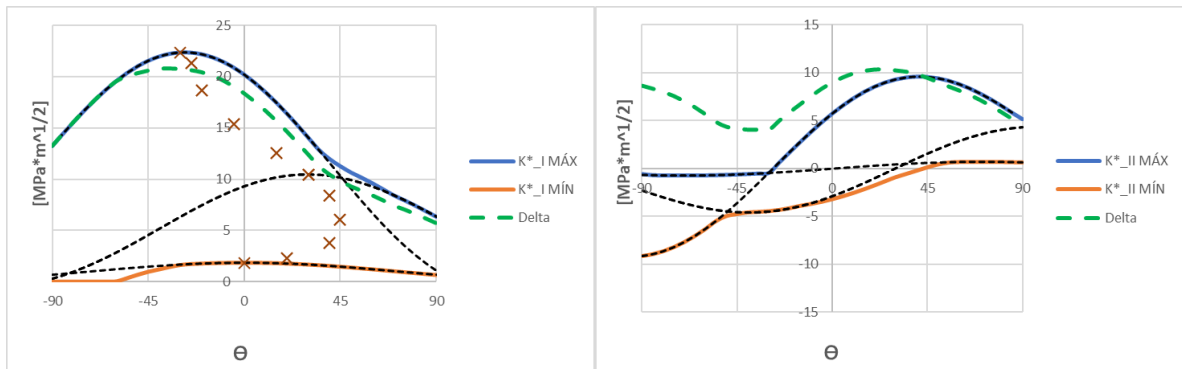


Figura 57 - Curva de Propagação e Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=15^\circ$; $\phi=0^\circ$

Antes de avançar para o estudo dos carregamentos onde uma das cargas aplicadas é estática seguem-se os gráficos da propagação, na figura 58, para as mesmas condições do caso anterior, segundo critério de MSS, e também os gráficos da variação de K_{II}^* para as mesmas três inclinações de fenda ($\beta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) estudadas, sem desfasamento e com frequência dupla. A azul a propagação da fenda inicial inclinada em 45° , a verde inclinada em 30° e a vermelha em 15° relativamente ao eixo horizontal.

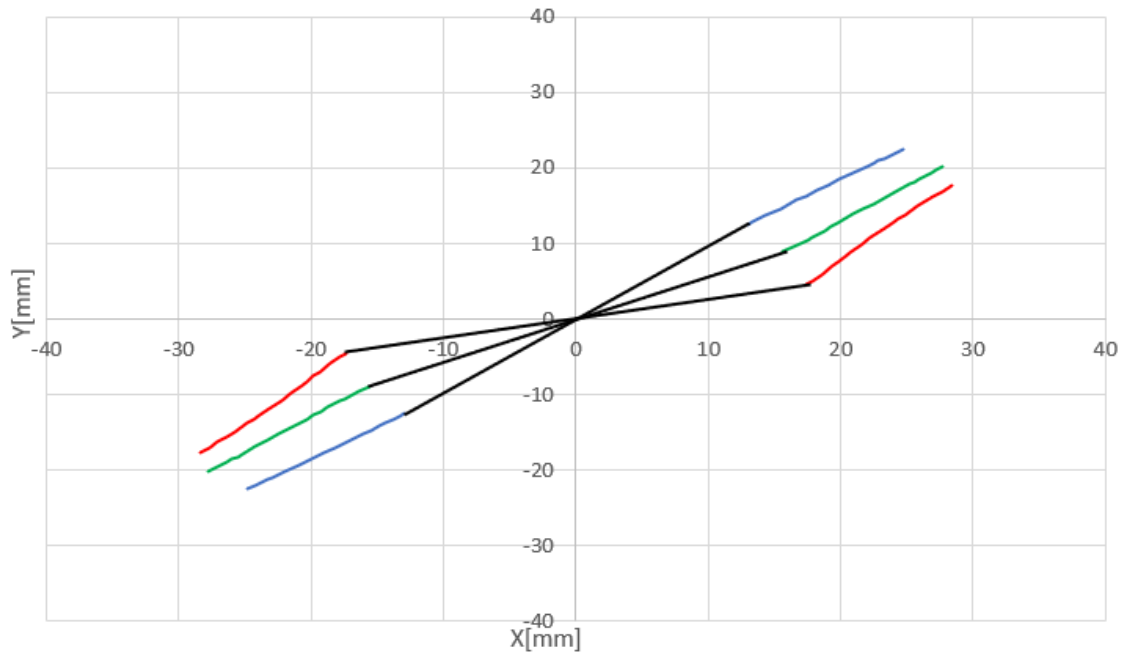


Figura 58 – a) Curva de Propagação para carregamentos com frequência duplicada no eixo horizontal: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=45^\circ$, MSS

As soluções obtidas quando o provete cruciforme está sujeito a uma carga estática (frequência nula) no eixo horizontal são apresentadas de seguida.

Para o estudo da influência da frequência nula estudam-se carregamentos semelhantes aos casos anteriores, para as mesmas inclinações de fenda, tal como nas seções anteriores. Deste modo, pode discutir-se e comparar-se os resultados obtidos com os de outros artigos semelhantes, que encontrados na literatura sob condições de carregamento idênticas e que permitem avaliar a validade do estudo realizado, bem como realizar algumas comparações com resultados experimentais realizados por outros autores.

Assim, para finalizar a apresentação dos resultados numéricos obtidos apresenta-se na figura 59 as curvas de propagação obtidas para as inclinações de fenda simuladas segundo o critério MSS. A azul a propagação da fenda inicial inclinada em 45° , a cinzento inclinada em 30° e a laranja em 15° relativamente ao eixo horizontal.

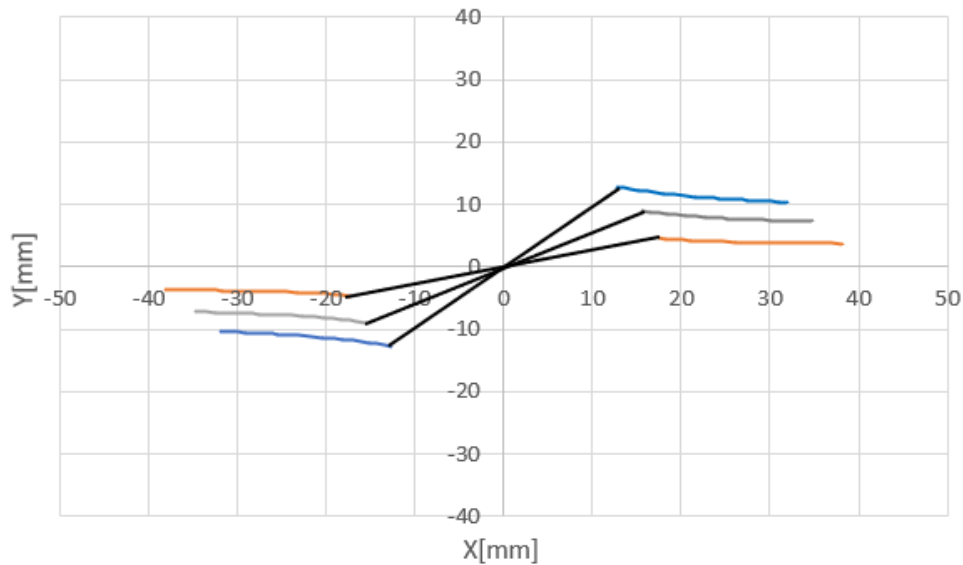


Figura 59 – Curva de Propagação para carregamentos com frequência nula no eixo horizontal:
 $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0^\circ$, MTS

Na figura 60 os gráficos da variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* , K_{II}^* para esta inclinação de fenda de 45° .

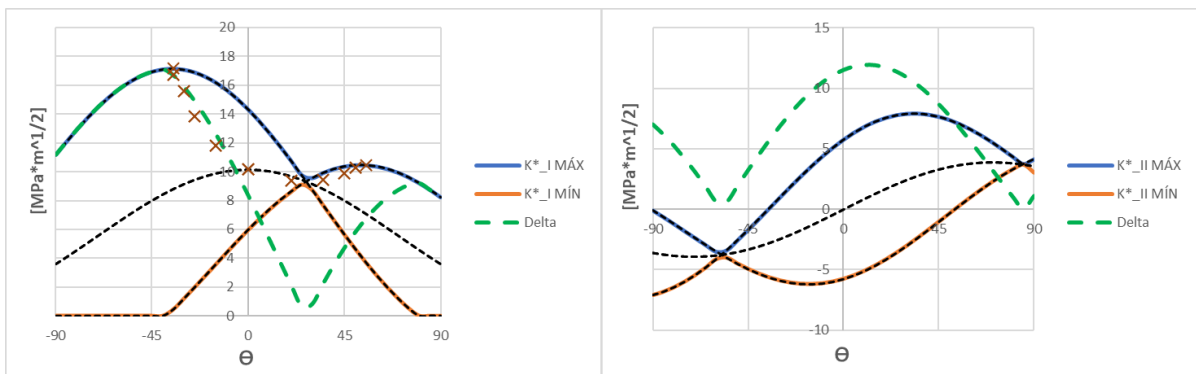


Figura 60 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=45^\circ$; $\phi=0^\circ$

Apresenta-se de seguida na figura 61 os resultados quando a inclinação inicial da fenda é de $\beta = 30^\circ$, e apresentam-se os gráficos associado à variação dos SIFs.

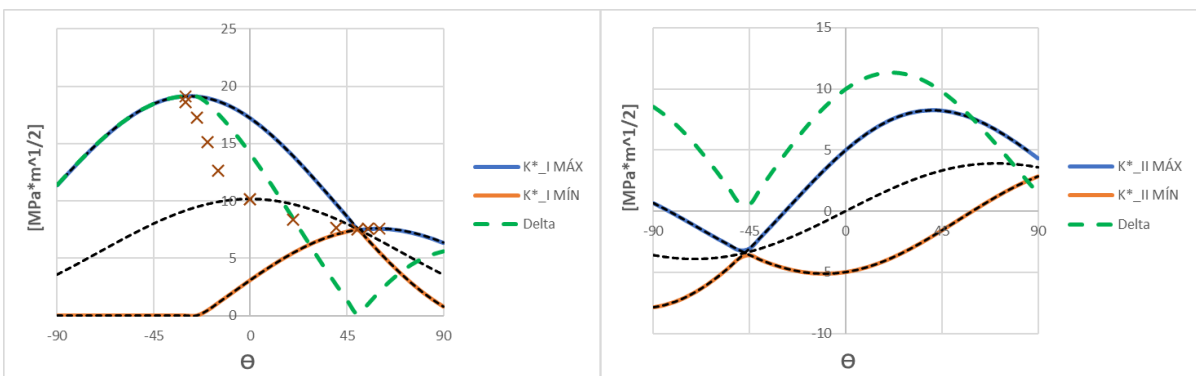


Figura 61 - Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=30^\circ$; $\phi=0^\circ$

Analogamente, para o caso em que a inclinação inicial da fenda com a horizontal é de 15° apresenta-se os respectivos gráficos com carga estática no eixo das abcissas. Na figura 62 apresentam-se estes gráficos da variação dos valores mínimos e máximos dos fatores intensidade de tensão do primeiro e segundo modo de carregamento.

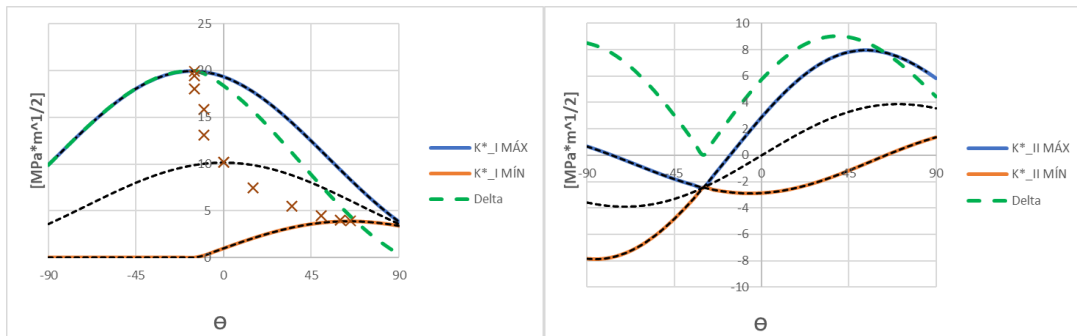


Figura 62 – Variação dos fatores intensidade de tensão K_I^* e K_{II}^* : $\beta=15^\circ$; $\phi=0^\circ$

Antes de se avançar para a discussão dos resultados obtidos para as diversas inclinações de fenda anteriores ao aplicar uma carga estática no eixo horizontal e os outros parâmetros mantidos iguais pode observar-se na figura 63. Nesta figura observa-se as curvas de propagação obtidas para as três inclinações de fenda, através da aplicação do critério MSS no algoritmo numérico, discutida no próximo capítulo. A verde a propagação da fenda inicial inclinada em 45°, a azul inclinada em 30° e a vermelho em 15° relativamente ao eixo horizontal.

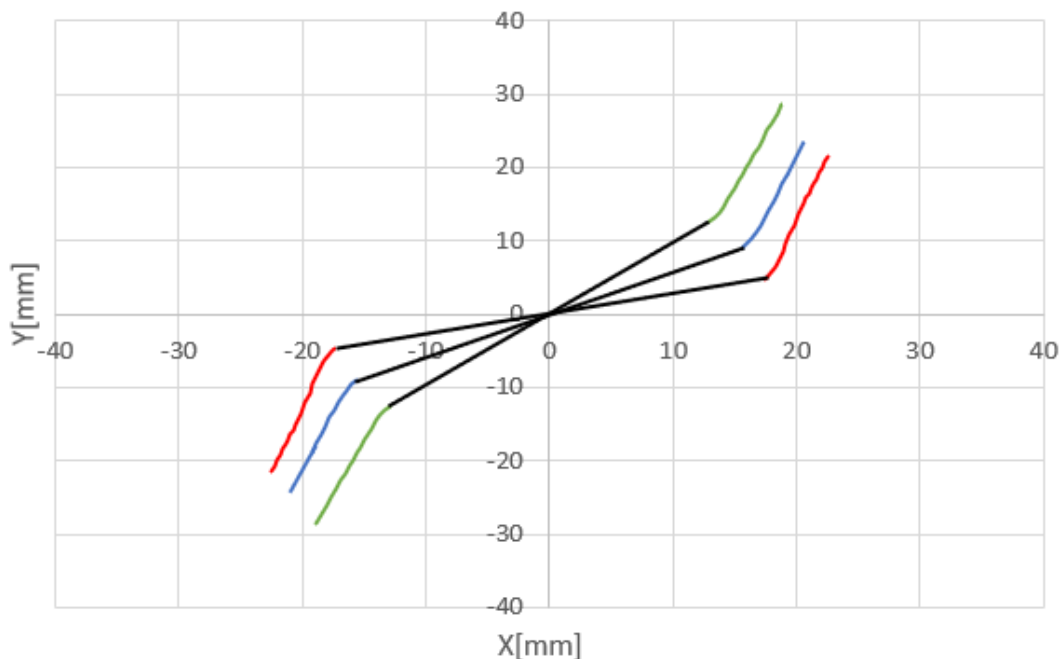


Figura 63 – Curva de Propagação para carregamentos com frequência nula no eixo horizontal:
 $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0^\circ$, MSS

5 Capítulo – Análise de Resultados

Neste capítulo, é realizada a discussão das soluções da análise numérica apresentadas anteriormente. Discutem-se os gráficos dos SIFs obtidos, bem como a sua influência no crescimento e na direção de propagação das fendas, e também os resultados numéricos através da utilização do algoritmo, segundo os critérios MTS ou MSS. Divide-se em três seções, tal como o capítulo referente aos resultados numéricos. Inicialmente discutem-se os resultados proporcionais (em fase) seguidos dos resultados desfasados e por fim as soluções com variação de frequência num dos eixos.

Para esta análise de resultados utilizam-se os conceitos introduzidos ao longo desta dissertação, em especial da mecânica da fratura. É realizada a validação e comparação dos resultados obtidos neste algoritmo de propagação com outras soluções teóricas e resultados experimentais encontrados na literatura no âmbito destes critérios do estudo da propagação de fendas aplicados. Este estudo foca-se nos critérios MTS e MSS apresentados, bem como nos gráficos de variação dos fatores intensidade de tensão do capítulo anterior, que permitem prever a direção de propagação das fendas mais próxima da realidade possível.

5.1 Carregamentos Proporcionais em Fase

Esta seção é dedicada à discussão dos resultados da propagação sob carregamentos proporcionais, sem diferença de fase. Para o estudo destes carregamentos recorreram-se a várias simulações no algoritmo de propagação e selecionaram-se as fendas alinhadas com a horizontal e inclinadas em 45° apresentadas anteriormente. Para cada uma destas inclinações são testadas diversas razões de carga, λ .

Nos carregamentos estudados nesta seção o valor do ângulo de propagação esperado quando o valor de K_{II}^* é nulo coincide com o valor de K_I^* máximo. Posto isto, da teoria apresentada anteriormente, sabe-se que a fenda vai crescer no mesmo plano da fenda inicial e que se verifica um modo de carregamento puro, do tipo I.

Os caminhos de propagação das fissuras alinhadas com a horizontal foram representados num único gráfico com uma curva de propagação correspondente às três razões de carregamento aplicadas: ($\lambda=0,5$; $\lambda=1$; $\lambda=1,5$). Neste caso, a alteração das razões das cargas aplicadas não modifica o caminho de propagação da fenda pelo que apenas se apresentou um gráfico. Estes resultados estão de acordo com o esperado da distribuição teórica dos SIF para uma placa infinita.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}(\cos^2\beta + \lambda\sin^2\beta) \quad (17)$$

$$K_{II} = \sigma\sqrt{\pi a}(1 - \lambda)\sin\beta\cos\beta \quad (18)$$

onde σ representa a tensão nominal e λ a razão entre a carga aplicada no eixo horizontal e no eixo vertical. Sendo β a inclinação inicial da fenda, K_{II} será sempre nulo para uma fenda horizontal. Como tal não existe tendência para que uma fenda horizontal altere a sua direção de propagação, independentemente do carregamento aplicado.

Deste modo, segundo o critério MTS utilizado, os gráficos de variação dos fatores intensidade tensão apresentados também são iguais, pelo que apenas se apresenta uma curva de propagação para os três carregamentos aplicados. Na figura 31, verifica-se que o ângulo de propagação é nulo e coincide com o valor de $K_I^*_{m\acute{a}x}$, e também coincide com o valor de $\Delta K_I^*_{m\acute{a}x}$ e $K_{II} = 0$.

Quanto ao crescimento da fissura, neste estudo os valores do crescimento de fenda são variáveis e pré-definidos no programa em função do número de ciclos, como se explicou anteriormente. Pode visualizar-se na figura 64 a forma como a fenda horizontal cresce ao longo dos ciclos de carregamentos aplicados. Torna-se evidente nesta figura que à medida que a fenda se propaga a sua taxa de crescimento aumenta, calculada através da Lei de Paris. Evidenciando-se assim a importância da realização de inspeções não destrutivas e da existência de um projeto tolerante ao dano que seja adequado aos diversos componentes das aeronaves, para evitar a ocorrência de falhas dentro do seu período de operação.

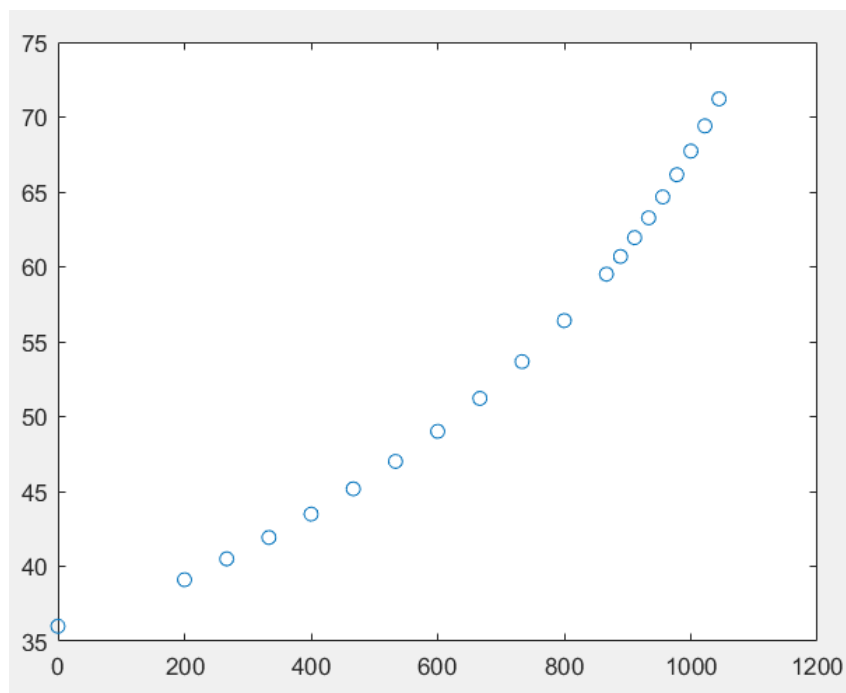


Figura 64 – Crescimento de fenda em função dos ciclos de carregamentos aplicados

Com o objetivo de validar o algoritmo de propagação comparou-se com os resultados numéricos semelhantes obtidos por Garcia et al [30], e também com os resultados experimentais desenvolvidos por E.U. Lee e R.E. Taylor [55] para os dois casos anteriores em que a razão de carga é $\lambda=0.5$ e $\lambda=1$. Pode verificar-se nestes artigos que a propagação da fenda está alinhada com a horizontal em ambos os casos de carregamento, segundo o critério MTS. Relativamente à aplicação do critério MSS para prever a direção de propagação da fenda, que corresponde ao valor do ângulo que maximiza ΔK_{II}^* , os resultados da direção de propagação apresentam resultados diferentes e que não correspondem a uma

correta avaliação da direção de propagação da fenda.

Pode visualizar-se na figura 65 os respectivos gráficos da variação dos fatores intensidade de tensão K_I e K_{II} publicados por Garcia et al, onde a direção de propagação (θ) observada é nula, e coincide com os resultados obtidos na presente dissertação.

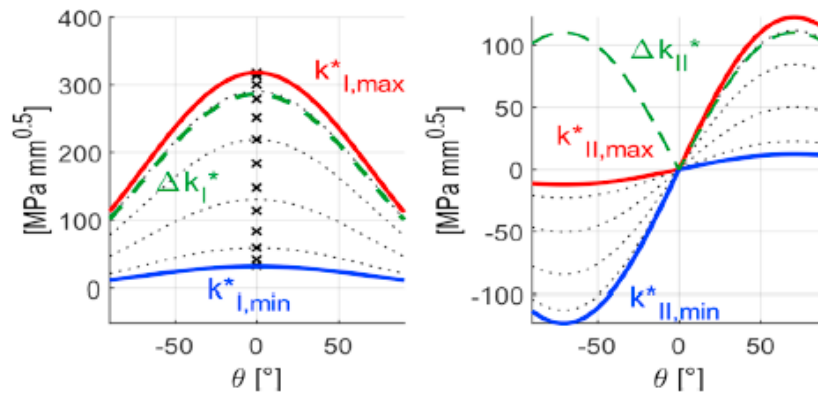


Figura 65 - Gráficos de variação SIF K_I^* e K_{II}^* para os diversos rácios biaxiais [30]: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0^\circ$

Ainda relativamente ao estudo dos carregamentos proporcionais foram apresentados os gráficos de propagação das fendas e da variação de K_I^* e K_{II}^* para fendas iniciais inclinadas. Nesta fenda inicial, na figura 33, inclinada em 45° com a horizontal, os caminhos de propagação correspondentes às três mesmas razões de carga aplicadas são diferentes, ao contrário do caso anterior. É de esperar que os gráficos dos fatores intensidade de tensão associados a cada carregamento também sejam diferentes para que as curvas de propagação obtidas segundo os diversos critérios sejam válidas.

Quando a razão de carregamento é unitária o ângulo de propagação correspondente é nulo como no caso da fissura alinhada com a horizontal, no entanto o valor absoluto de K_I^* neste caso é bastante superior. Ao variar a razão de tensões aplicada para $\lambda=0.5$ ou $\lambda=1.5$, como se pode visualizar na figura 33, a propagação obtida é diferente. Nestas três simulações de propagação de fendas inclinadas em 45° com a horizontal o valor do ângulo de propagação de acordo com os critérios $K_{I,max}^*$ e $\Delta K_{I,max}^*$ tem o mesmo valor e, tal como no caso anterior, também coincide com a direção onde $K_{II}^* = 0$. Contudo, é importante referir que o módulo do ângulo de propagação obtido para uma razão de carga $\lambda = 1.5$ é inferior ao que se obtém para uma razão de carga de $\lambda = 0.5$, como se pode observar nas figuras 34,36. Por inspeção dos gráficos dos SIFs destas propagações é possível perceber-se que ao aumentar o módulo da razão de carga a fenda tende a desalinhar-se mais da sua direção de propagação inicial. Nestas figuras é possível verificar-se que, quando as razões de carga são inferiores a um a fenda tende a desviar a sua direção de propagação no sentido negativo, enquanto que quando este valor aumenta a sua direção de propagação muda para o sentido positivo. Quando se reduz o valor da tensão aplicada no eixo horizontal a fenda passa a propagar-se na perpendicular ao eixo de maior tensão, rodando no

sentido negativo. Ao aumentar o valor da carga no eixo vertical o valor da direção de propagação da fenda diminui, rodando mais ou menos no sentido positivo, consoante o rácio biaxial aplicado. Os resultados obtidos para os carregamentos proporcionais correspondem às expectativas teóricas e experimentais encontradas na literatura, que serviram de suporte para a elaboração deste documento. Estes resultados foram semelhantes aos obtidos por Lee et al [55]. Assim, os resultados obtidos nos carregamentos proporcionais servem de base para demonstrar a validade do critério MTS e do algoritmo utilizado nesta dissertação, bem como da análise dos gráficos dos fatores intensidade de tensão obtidos no Excel. Na figura 66 pode visualizar-se os resultados experimentais obtidos por Misak et al[57] em carregamento o rácio biaxial unitário (do lado direito) e $\lambda=1,5$ (do lado esquerdo). É possível verificar-se que as direções de propagação obtidas neste documento são semelhantes aos resultados de Misak et al.[57]

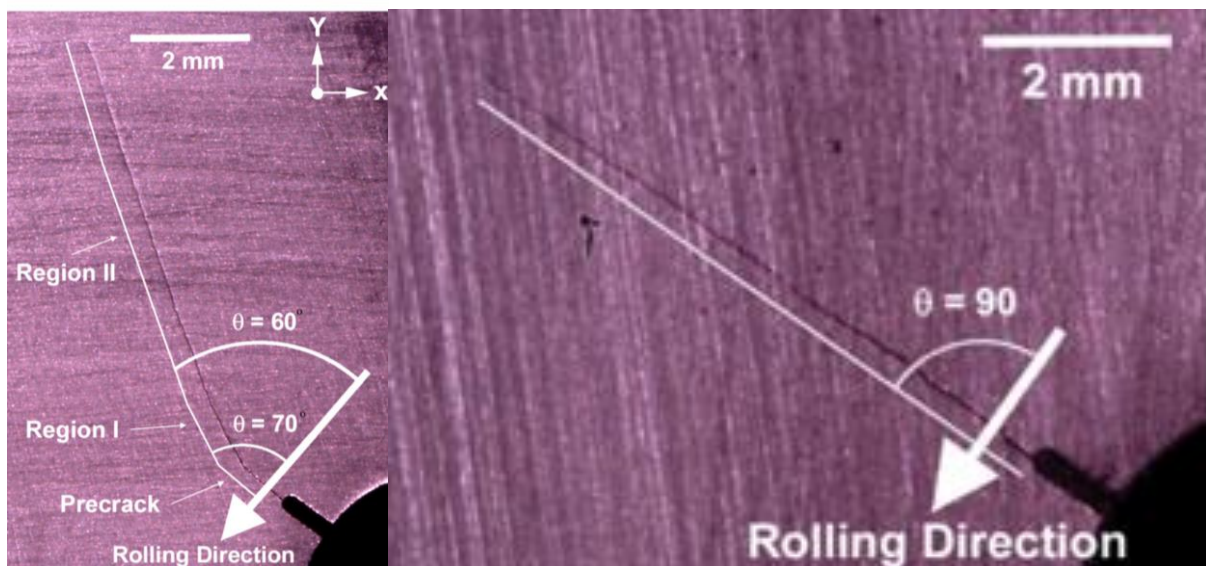


Figura 66 – Curva de propagação obtida por Misak et al[57] a) $\lambda=1,5$ b) $\lambda=1$.

Relativamente aos resultados de acordo com o critério MSS, como se pode observar nos respetivos gráficos de variação de K_{II}^* , o valor do ângulo que maximiza a tensão de corte máxima é bastante distinto dos resultados encontrados, segundo o critério MTS. É também diferente dos resultados das curvas de propagação experimentais presentes na literatura que serviram de base ao presente documento, pelo que se dispensou a apresentação dos resultados obtidos no algoritmo numérico para os carregamentos proporcionais.

Nas próximas seções estudam-se os carregamentos desfasados, seguidos dos carregamentos com variação de frequência no eixo horizontal.

5.2 Carregamentos Desfasados

Esta seção dedica-se à discussão das soluções numéricas de propagação de fendas sob condições de carregamento fora de fase apresentados anteriormente. Estuda-se a influência do desfasamento de 90° e de 180° para as inclinações de fenda ($\beta = 15^\circ; \beta = 30^\circ; \beta = 45^\circ$), tal como na seção anterior. São ainda realizadas duas simulações adicionais com diferença de fase de 180° , onde se altera a razão de tensões para $\lambda=0.5$ e $\lambda=1.5$, com o objetivo de estudar a influência da variação das razões de carga em carregamentos fora de fase.

Para analisar a influência dos critérios de propagação utilizados neste tipo de carregamentos fora de fase são realizadas duas simulações por cada combinação de carregamento/inclinação de fenda. Numa delas utiliza-se o critério MTS e na outra o critério MSS, exceto nas simulações onde se varia a razão das tensões aplicadas onde apenas se utiliza o método MTS, por se considerar o mais adequado nestes casos, como é explicado de seguida. É importante realçar que os ângulos obtidos com este critério não correspondem aos resultados obtidos segundo o critério MTS.

Deste modo, inicia-se pelos carregamentos defasados em 90° , com o objetivo de estudar a influência da variação do ângulo inicial da fenda no caminho de propagação. Como é possível observar nos gráficos da variação dos fatores intensidade de tensão correspondentes às inclinações de fenda de ($\beta = 15^\circ; \beta = 30^\circ; \beta = 45^\circ$), nos respetivos gráficos relativos à variação do fator intensidade de tensão K_I^* . Nestes gráficos, o módulo do valor do ângulo de propagação aumenta à medida que se aumenta o valor da inclinação inicial da fenda.

Relativamente aos gráficos da variação do fator intensidade de tensão K_{II}^* , é possível observar-se que o valor correspondente ao valor de máximo de ΔK_{II}^* , que permite prever o ângulo de propagação da fenda, segundo o critério MSS, diminui à medida que se aumenta a inclinação inicial da fenda.

Deste modo, para validar os resultados apresentados comparam-se os gráficos da variação dos fatores intensidade tensão com os resultados numéricos desenvolvidos por Garcia et al [30]. Os gráficos obtidos da variação dos valores máximos e mínimos de K_I^* e K_{II}^* para uma inclinação de fenda de 15° e de 45° encontram-se na figura 67 e 68, respetivamente. Ao comparar estes gráficos com os apresentados para as mesmas condições de carregamento percebe-se que são muito semelhantes aos apresentados neste estudo e que os valores dos ângulos de propagação obtidos por estes autores coincidem com os resultados das figuras 39 e 41 (secção 4).

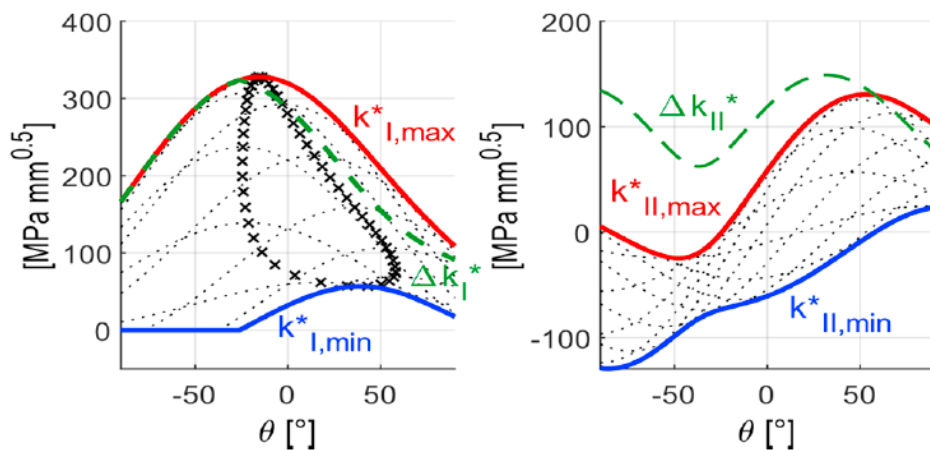


Figura 67 - Gráficos de variação SIF K_I^* e K_{II}^* [30]: $\beta=15^\circ$; $\phi=90^\circ$

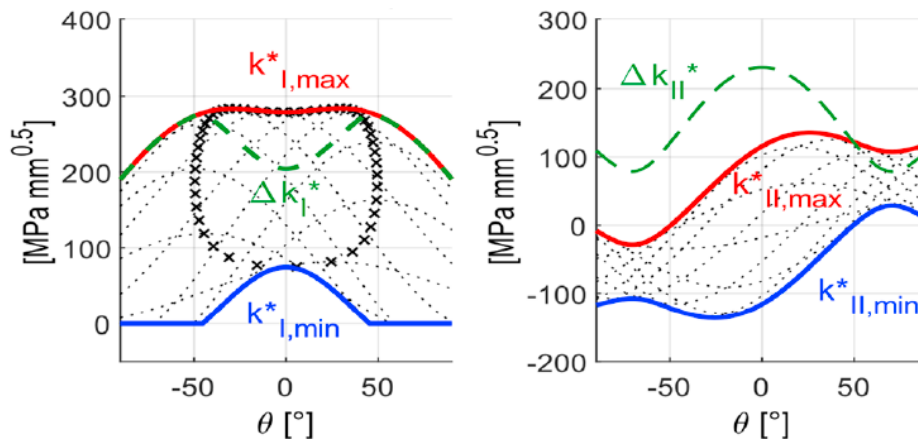


Figura 68 - Gráficos de variação SIF K_I^* e K_{II}^* [30]: $\beta=45^\circ$; $\phi=90^\circ$

Nas três simulações realizadas no algoritmo numérico para cada critério, ao aplicar cargas desfasadas em 90° , à medida que a fenda cresce é possível verificar-se que a fenda tende a alinhar-se com a direção horizontal, segundo o critério MTS. Contudo, à medida que a fenda cresce, segundo o critério MSS, as fendas alinham-se com a direção de 45° . Isto acontece em ambos os casos porque o ângulo de propagação diminui com o crescimento de fenda. Nos gráficos dos fatores intensidade tensão apresentados não é possível observar este tipo de comportamento, porque correspondem ao primeiro incremento de fenda simulado.

Quanto aos carregamentos desfasados em 180° , para as soluções com as diversas inclinações de fenda apresentadas e com razão de carga unitária, é possível concluir-se que os valores do módulo do ângulo de propagação, de acordo com K_I^* e ΔK_I^* também vão aumentando à medida que a inclinação inicial da fenda aumenta. Quanto aos ângulos de propagação de acordo com ΔK_{II}^* máximo estes ângulos diminuem com o aumento da inclinação inicial da fenda. É também possível observar-se que os ângulos de propagação obtidos com um desfasamento de 180° são superiores aos obtidos para um

desfasamento de 90° , para ambos os fatores intensidade de tensão. Antes de avançar para o estudo do desfasamento em carregamentos com razões de carga diferentes da unitária deve realçar-se que para as diversas inclinações de fenda dos carregamentos desfasados em 90° e 180° estudados, os resultados obtidos do ângulo de propagação segundo os critérios que maximizam os parâmetros ΔK_I^* e K_I^* são iguais. Isto deve-se ao facto de os valores mínimos de K_I^* serem nulos. Como foi referido isto acontece devido às limitações físicas explicadas anteriormente para valores de K_I^* negativos, sendo que os valores (negativos) foram anulados.

Ainda relativamente aos carregamentos desfasados em 180° , para uma inclinação da fenda inicial de 45° foram também realizadas as simulações da propagação de fissuras para uma razão de carga de $\lambda = 0.5$ e $\lambda = 1.5$. É fácil perceber-se que, tal como nos carregamentos proporcionais estudados, existe tendência de simetria no ângulo de propagação obtido para estas razões de carga, pelo que se torna evidente que a razão de carga é um dos fatores mais importantes a ter em consideração no estudo direção do ângulo de propagação. Seria de esperar que caso as razões de carga apresentadas correspondessem a valores de razão de carga inversas os módulos dos ângulos de propagação seriam iguais, mas simétricos.

Salienta-se ainda que, nos resultados desfasados em 180° com variação de carga apresentam ângulos de propagação superiores, relativamente aos resultados obtidos para carregamentos semelhantes sem diferença de fase. Podem comparar-se os resultados obtidos nos gráficos dos SIFs desta dissertação para uma inclinação inicial de fenda de 30° e um desfasamento de 180° com os resultados da figura 69, onde se pode conferir que os fatores intensidade de tensão variam da mesma forma em ambos os estudos.

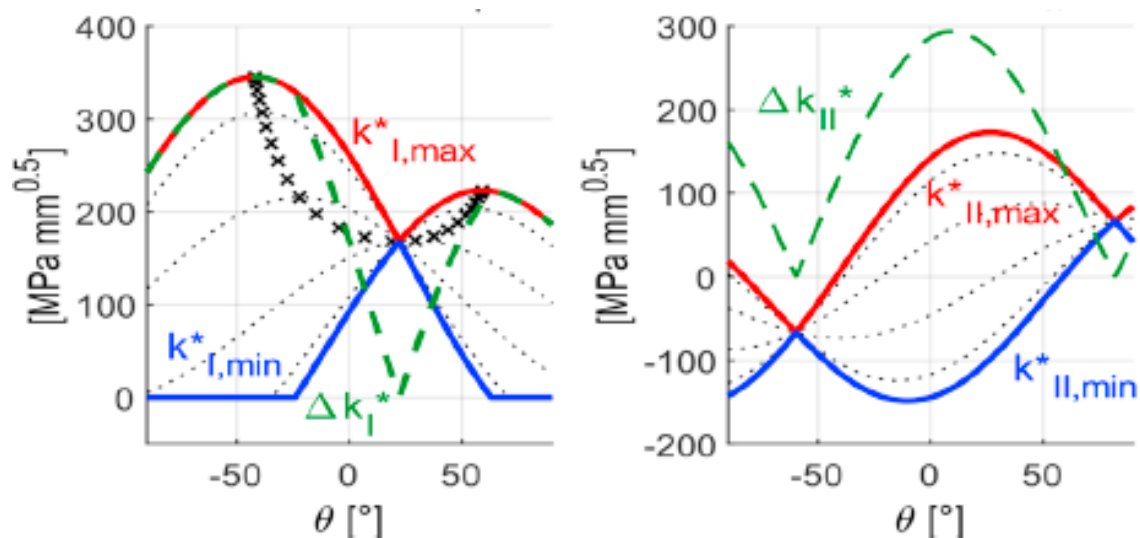


Figura 69 - Gráficos de variação SIF K_I^* e K_{II}^* [30]: $\beta=30^\circ$; $\phi=180^\circ$

Com o objetivo de validar e comparar os resultados obtidos apresenta-se a figura 70 onde se pode visualizar as curvas de propagação das fendas. Estas soluções numéricas foram desenvolvidas por Garcia et al [30] e mostram as propagações correspondentes às diversas inclinações de fenda apresentadas neste trabalho com uma diferença de fase de 90° e de 180° , nas figuras 37 e 38, respetivamente. Como se pode observar os resultados obtidos neste trabalho coincidem com os apresentados nestas figuras. É importante referir que no estudo de Garcia et al [30] a fenda inicial estava alinhada com a vertical ao contrário deste estudo, no entanto, devido à simetria do provete e das condições de fronteira aplicadas podem comparar-se os resultados obtidos por inspeção dos respetivos gráficos de propagação.

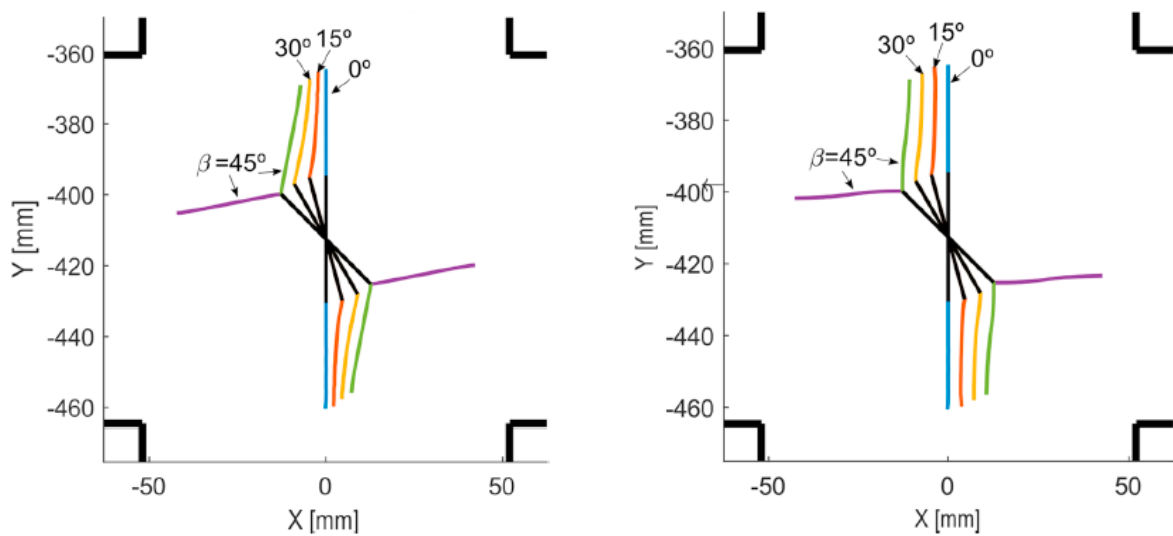


Figura 70 - Gráficos de variação SIF K_I^* e K_{II}^* [30] : $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ a) $\phi=180^\circ$ b) $\phi=90^\circ$.

Assim, pode concluir-se que os resultados de propagação obtidos segundo o critério MTS deste algoritmo correspondem os resultados encontrados na literatura. As propagações de acordo com o critério do máximo ΔK_{II}^* apresentam uma redução no desvio do ângulo de propagação quando as inclinações de fenda inicial são superiores. E ainda, os ângulos de propagação obtidos são superiores para um desfaseamento de 180° do que um desfaseamento de 90° . Na figura 71 pode visualizar-se os resultados desenvolvidos por Garcia et al [30] segundo o critério MTS, que permitem perceber que nos resultados em fase o ângulo de propagação é muito inferior às outras situações em que se aplicaram cargas desfasadas.

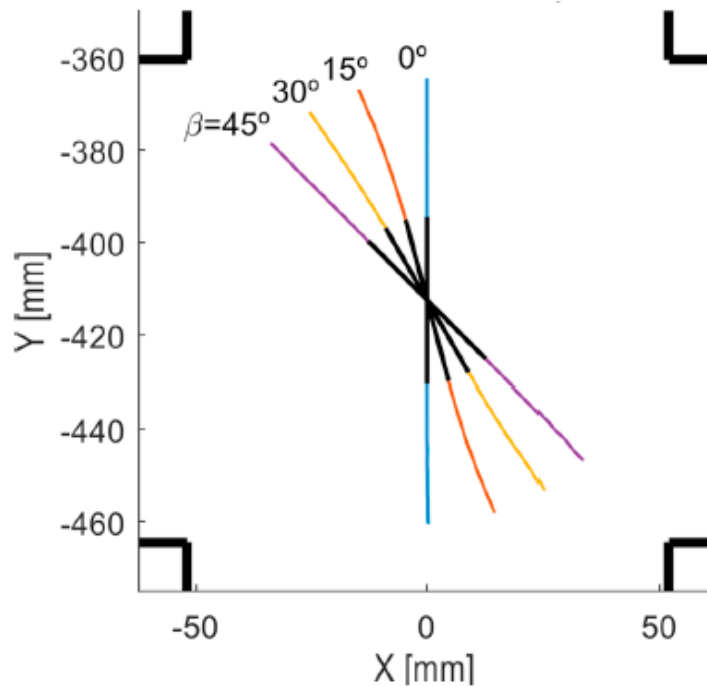


Figura 541 - Gráficos de variação SIF K_I^* e K_{II}^* [30]: $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\phi=0$.

5.3 Carregamentos com Variação de Frequência

Nesta seção discutem-se os resultados de propagação de fissuras sob condições de carregamento num dos eixos com frequência dupla e, de seguida, com frequência nula para avaliar o efeito da variação de frequência no crescimento de fendas. Para o estudo destes carregamentos recorreram-se a várias simulações no algoritmo de propagação e selecionaram-se novamente as fendas inclinadas com a horizontal em $45^\circ, 30^\circ, 15^\circ$ e onde também se modificou a fase para 45° , como apresentado anteriormente.

Para analisar a influência das diversas condições iniciais do carregamento e dos diversos critérios de propagação utilizados com variação de frequência são realizadas duas simulações por cada combinação de carregamento/inclinação de fenda. Numa delas utiliza-se o critério MTS e na outra o critério MSS. Foram também apresentados os gráficos da variação dos fatores intensidade de tensão K_I e K_{II} para cada um dos casos em estudo.

5.3.1 Duplicação da Frequência

Quando a frequência no eixo horizontal é duplicada, para as diversas inclinações iniciais da fenda testadas os carregamentos aplicados sem diferença de fase apresentaram-se os resultados da propagação e dos fatores intensidade de tensão obtidos no Excel e no MatLab/Abaqus. Deve referir-se

que se testou a influência da variação de fase para 90° e 180° e não houve alterações significativas relativamente ao carregamento sem diferença de fase.

Como é possível verificar-se nas curvas de propagação obtidas no Excel, de acordo com o máximo de K_I^* ou ΔK_I^* , o ângulo de propagação é menor quando a inclinação inicial da fenda simulada é superior. No algoritmo numérico obtiveram-se os mesmos resultados que no ficheiro Excel.

Relativamente ao ângulo de propagação segundo o critério MSS, ou máximo ΔK_{II}^* , verifica-se que ao diminuir a inclinação da fenda inicial o ângulo de propagação obtido aumenta, para as diversas inclinações de fenda simuladas (15°,30°,35°), ao contrário do que acontecia segundo o critério MTS. Salienta-se ainda que a direção de propagação segundo o critério MTS aproxima-se da horizontal, enquanto que segundo o critério MSS esta direção tende a coincidir com a inclinação de $\beta=45^\circ$. Neste contexto, a comparação com outros resultados encontrados na literatura e realizada quando se aplica uma carga estática num dos eixos.

Os módulos dos ângulos de propagação segundo o critério MTS são superiores aos do critério MSS para esta situação de carregamento. Os ângulos de propagação são semelhantes e mais próximos dos resultados obtidos na seção anterior, com desfasamento e sem variação de frequência, com diferença de fase de 180° do que os resultados quando a diferença de fase é de 90°.

Quanto aos carregamentos com frequência dupla foram ainda realizadas simulações de propagação quando a diferença de fase é de 45° no eixo horizontal. Estudaram-se as mesmas inclinações de fenda (15°,30°,45°), tal como no caso anterior sem desfasamento, e apresentaram-se os resultados de propagação e dos gráficos dos SIFs.

De um modo geral, os resultados obtidos das curvas e dos gráficos de propagação para um desfasamento de 45° e o dobro da frequência foram idênticos aos obtidos no caso anterior, sem desfasamento. É importante realçar que, quando o desfasamento é de 45° os gráficos obtidos para a variação do fator de intensidade do primeiro modo, os critérios da máxima variação e do valor máximo de K_I não indicam o mesmo valor do ângulo de propagação, ao contrário dos exemplos apresentados anteriormente. Como se pode observar, neste caso com desfasamento de 45°, o módulo do ângulo de propagação é ligeiramente superior segundo o critério do máximo ΔK_I^* do que do K_I^* máximo. Neste contexto, diversos autores [30] realizaram estudos com o objetivo de compreender qual seria o critério mais adequado para prever a direção de propagação da fenda e concluíram que o ângulo de propagação está compreendido entre estes critérios.

Deste modo, o módulo do ângulo de propagação de uma fenda sob condições de carregamento com frequência dupla no eixo horizontal e uma diferença de fase de 45° é ligeiramente superior ao caso sem desfasamento e com as mesmas frequências, segundo o critério MTS. Quanto ao critério MSS, ou parâmetro que maximiza ΔK_{II}^* , neste caso de carregamento os ângulos de propagação obtidos foram superiores aos dos carregamentos sem desfasamento e com a mesma frequência. Verificou-se ainda que ângulo de propagação segundo este critério aumenta quando se diminui a inclinação inicial da fenda tal como no caso anterior.

5.3.2 Carga Estática

Quanto aos carregamentos com frequência nula no eixo horizontal (carga estática) e sem diferença de fase estudaram-se as mesmas inclinações de fenda ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$), através dos resultados de propagação do algoritmo numérico e dos gráficos dos SIFs obtidos sob estas condições de carregamento. As soluções do módulo do ângulo de propagação neste caso foram inferiores para as diversas inclinações de fenda, relativamente aos casos em que a frequência é duplicada, segundo o critério MTS. Neste caso, como é possível observar nos respetivos gráficos dos SIFs das figura 60,61 e 62, em que o eixo horizontal tem frequência nula, o critério do máximo ΔK_I^* coincide com o critério do K_I^* máximo, sendo que está é a razão pelo qual os ângulos obtidos são inferiores ao caso de frequência dupla.

Quanto às soluções obtidas no Excel para a variação do fator intensidade tensão K_{II}^* , segundo o critério da máxima tensão tangencial, é possível verificar-se que, à medida que se aumenta a inclinação inicial da fenda o módulo do ângulo de propagação diminui e que, para qualquer inclinação de fenda, tendem a alinhar-se com a mesma direção. Segundo o critério MTS, a fenda passou a propagar-se na direção perpendicular ao eixo da carga dinâmica. Os resultados obtidos para o valor dos ângulos de propagação foram superiores aos casos em que a frequência no eixo horizontal era o dobro do eixo vertical, tanto no caso desfasado em 45° como no caso sem diferença de fase.

Com o objetivo de comparar os resultados com aplicação de uma carga estática apresenta-se a figura 72, onde se pode visualizar o comportamento experimental de uma fenda que pode ser comparada com a fenda com uma inclinação inicial de 45° relativamente à horizontal sujeita à aplicação de uma carga estática neste eixo. Nesta figura pode observar-se o crescimento da fenda ao fim de vários ciclos de carregamento.

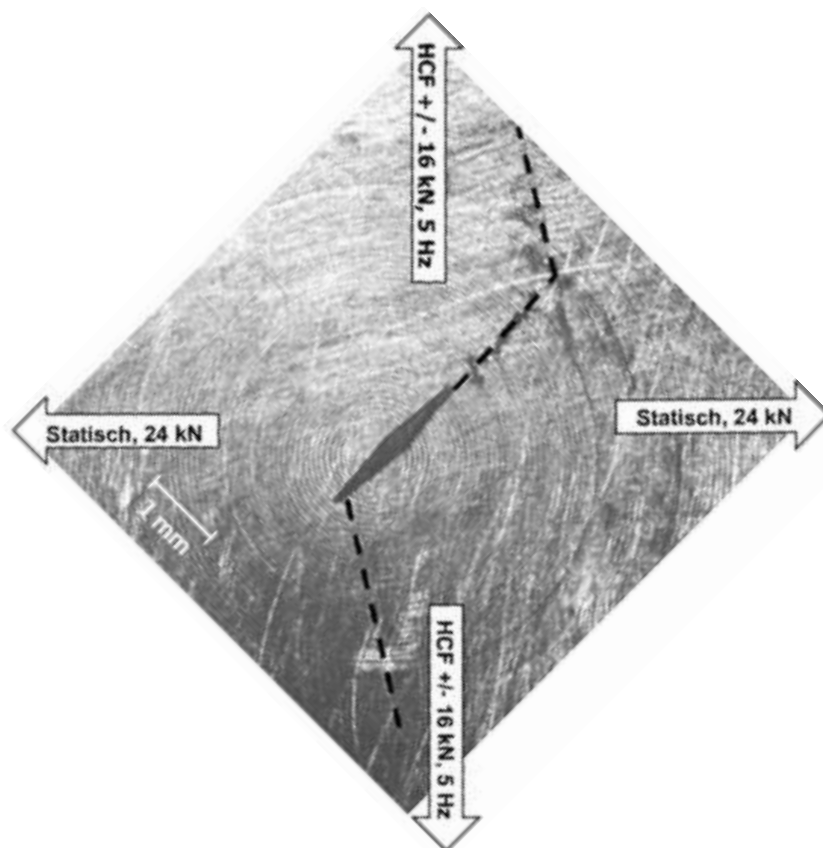


Figura 552 – Direção da propagação da fenda inclinada em 45°, frequência nula no eixo horizontal e diferente rácio biaxial [55].

Como se pode observar nesta figura, a direção de propagação da fenda vertical altera-se ao aplicar este carregamento. Inicialmente a fenda superior propagou-se em modo II, o ângulo de propagação de acordo com MSS é quase zero e a fenda tende a propagar na mesma direção ao fim de algum tempo. No entanto, a fenda inferior e a superior acabam por mudar de direção e propagar em modo I, de acordo com o MTS. No entanto neste exemplo a fenda propaga numa direção perpendicular ao eixo da carga estática. Pode associar-se esta diferença à razão de carga aplicada ser superior à aplicada no algoritmo utilizado, bem como a outros parâmetros como a razão de tensões, dimensões da fenda ou ao material constituinte não apresentar as mesmas propriedades mecânicas. Os resultados experimentais deste documento mostram que há uma variação na direção de propagação da fenda inclinada em 45° com a horizontal, consoante a magnitude da carga estática. Contudo, é possível verificar-se correspondência entre os ângulos de propagação obtidos em ambos os estudos.

6 Conclusões do estudo e desenvolvimentos futuros

A realização da presente dissertação sobre o tema “Simulação da Propagação numa Fissura na Fuselagem de uma Aeronave” constituiu um desafio inigualável que permitiu realçar a importância que o estudo e a análise da integridade dos componentes mecânicos representa nas áreas de engenharia, com vista a evitar incidentes na indústria da aviação.

Neste capítulo é apresentada uma síntese das conclusões do trabalho realizado e são apresentadas propostas de sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

Na análise do fenómeno da propagação de fissuras, para além da seleção do material, assume especial relevo a escolha de um provete adequado. Optou-se pela utilização de uma liga de Alumínio, Al7075-T6, e um provete cruciforme, dada a sua importância na engenharia aeroespacial.

Como nesta tese se pretende realizar um estudo em condições de biaxialidade no plano, optou-se por utilizar um provete com espessura reduzida. Este provete tem dimensões de espessura bastante inferiores ao tamanho global do provete, mas não tem variação de espessura na zona sua zona central, permitindo assim uma simplificação do estudo que resulta em bons resultados para os parâmetros em análise nesta dissertação.

A análise numérica desenvolvida no capítulo 4 apresenta os resultados da propagação de fendas de fadiga obtidos através da utilização do algoritmo apresentado. Este capítulo é constituído por três seções e em cada uma delas apresentam-se os resultados considerados pertinentes para este estudo, acompanhados das respetivas ilustrações. Na primeira seção apresentam-se as soluções obtidas quando o provete cruciforme está sujeito a carregamentos proporcionais (em fase). De seguida apresentam-se os resultados de carregamentos desfasados realizados e, por fim, alguns resultados com variação de frequência num dos eixos. A validação dos resultados da análise numérica é realizada no capítulo de “Discussão de Resultados”, sendo possível extrair as seguintes conclusões:

Relativamente aos carregamentos não proporcionais é possível concluir-se que, contrariamente aos proporcionais, a razão entre os fatores intensidade de tensão K_I e K_{II} não é constante ao longo do ciclo. Deste modo, de uma forma geral pode dizer-se que a direção do ângulo de propagação e também o valor máximo de K_I^* variam ao longo do ciclo.

Os ângulos de propagação obtidos com um desfasamento de 180° são superiores aos obtidos para um desfasamento de 90° , para ambos os fatores intensidade de tensão e segundo ambos os critérios, MTS e MSS. Os resultados segundo o critério MTS correspondem aos resultados presentes na literatura, enquanto que o critério MSS apresenta diferentes direções de propagação.

Quando a frequência no eixo horizontal é duplicada (sem desfasamento), os ângulos de propagação são semelhantes e mais próximos dos resultados obtidos com desfasamento e sem variação de frequência, quando a diferença de fase de 180° do que os resultados quando a diferença de fase é de 90° . Os resultados obtidos das curvas e dos gráficos de propagação para um desfasamento de 45° e o

dobro da frequência foram idênticos aos desfasados em 90° , mas com valores ligeiramente superiores, relativamente aos resultados desfasados sem variação de frequência.

Quanto aos carregamentos com frequência dupla no eixo horizontal e uma diferença de fase de 45° o ângulo de propagação de uma fenda é ligeiramente superior ao caso sem desfasamento e com as mesmas frequências, segundo o critério MTS. Quanto ao critério MSS, neste caso de carregamento os ângulos de propagação obtidos foram superiores aos resultados sem desfasamento e com a mesma frequência.

Quanto aos carregamentos com frequência nula no eixo horizontal (carga estática) e sem diferença de fase, as soluções do módulo do ângulo de propagação neste caso foram inferiores, relativamente aos casos em que a frequência é duplicada, segundo o critério MTS.

De uma forma geral os resultados obtidos correspondem às expectativas teóricas e experimentais encontradas na literatura que serviram de suporte para a elaboração deste documento, segundo o critério MTS. Relativamente ao critério MSS, apesar de os resultados da direção de propagação não coincidem com outros resultados presentes na literatura, no entanto é possível verificar-se que sob certas condições de carregamento apresentados a fenda segue uma direção próxima da indicada por este critério.

Para finalizar, sugerem-se algumas ideias para desenvolver em trabalhos futuros, tais como:

- Ensaiar provetes com dimensões 3d e com otimização de geometria na zona central;
- Avaliar o efeito do material, das dimensões da fenda e também da geometria do provete na propagação;
- Aprofundar o estudo dos carregamentos com variação de frequência e da influência da variação da tensão média dos carregamentos;
- Comparar os resultados numéricos deste trabalho com ensaios experimentais;
- Criar um algoritmo que permita avaliar qual dos critérios deve ser aplicado para cada carregamento;

Bibliografia

- [1] Branco, C., Ferreira, J., Costa, J. & Ribeiro, A. 'Projecto de Órgãos de Máquinas', Fundação Calouste Gulbenkian, 2005.
- [2] Socie, D. & Marquis, G. 'Multiaxial fatigue', SAE International, 2000.
- [3] Wanhill, R., Barter, S. & Molent, L. 'Milestone Case Histories in Aircraft Structural Integrity', In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering (Issue January 2015). Elsevier Ltd. 2015
- [4] Santos, T. 'Estudo numérico da propagação de fendas de fadiga num aço de alta resistência', tese IST, 2017.
- [5] Anderson, P.R.G., & Garrett, G.G. Fatigue crack growth rate variations in biaxial stress fields. International Journal of Fracture, 16(3), R111–R116. 1980
- [6] Reis, L. 'Mechanical Behaviour of Materials', PDF's CMM, IST, 2017.
- [7] Hopper, C. & Miller, K. 'Fatigue crack propagation in biaxial stress fields', J Strain Anal Eng Des., volume 50, páginas 25-39, 1977.
- [8] Neeurukatti, R.K., Datta, S., Chattopadhyay, A., Iyyer, N., Phan, N. 'Fatigue crack propagation under in-phase and out-of-phase biaxial loading', Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, volume 41, capítulo 2, 2017
- [9] Federal Aviation Administration, 'Damage tolerance capability', volume 16, capítulo 1, 1994.
- [10] Grandt, F. 'Damage Tolerant Design and Nondestructive Inspection -Keys to Aircraft Airworthiness', Jr. - The 2nd International Symposium on Aircraft Airworthiness (ISAA 2011).
- [11] Albuquerque, P. 'Structural Loads Handbook', tese IST, 2011.
- [12] Pires, T. 'Proteção à corrosão de estruturas de aço', tese IST, 2018.
- [13] Baker, A. & Wang, J. 'Aircraft Sustainment and Repair', OGMA, 2018.
- [14] Heida, J.H. & Grooteman F.P. 'Airframe Inspection Reliability using Field Inspection Data'. Nationaal Lucht-en Ruimtevaartlaboratorium, 1998.
- [15] 'Damage Tolerance Design Handbook', USAF. [S.I.], 1979.
- [16] BROEK, D. 'The Practical Use of Fracture Mechanics', Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [17] Florio, F. 'Airworthiness: An Introduction to Aircraft Certification', Elsevier. 2010.
- [18] 'Federal Aviation Regulations for Large Aeroplanes' (FAR-25). FAA. [S.I.]. 2009.
- [19] 'Certification Specifications for Large Aeroplanes' (CS-25). EASA. [S.I.]. 2009.
- [20] Lourenço, B. 'Damage Tolerance Design', tese ist, 2010.

- [21] Breitbath, E. & Besel, M. 'Fatigue crack deflection in cruciform specimens subjected to biaxial loading Conditions', *International Journal of Fatigue*, volume 113, páginas 345-350, 2019.
- [22] Grandt, F. "Fundamentals of Structural Integrity – Damage Tolerant Design and Nondestructive Evaluation", John Wiley & Sons, 978-0-471-21459-5, 2003.
- [23] Pereira, R. 'Mechanical behaviour of AZ31B subjected to in-plane biaxial fatigue', tese ist,2016.
- [24] Anderson, T.L. 'Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications', 2ªed. CRC Press- INC, 1995.
- [25] Tada, H., Paris, P.C. & Irwin, G.R. 'The stress analysis of cracks handbook', Paris Productions & (Del Research Corp.), 1985.
- [26] Sneddon, I.N. 'The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in a elastic solid', Royal Society of London, volume 187, 1946.
- [27] Westergaard, H.M. 'Bearing pressures and cracks', *Journal of Applied Mechanics*, volume 49, 1993.
- [28] Williams, M.L. 'The stress distribution at the base of a stationary crack'. *Journal of Applied, Mechanics*, 24 (1). páginas 109-114, 1957.
- [29] Nuismer, R.J. 'An energy release rate criterion for mixed mode fracture', *Int J Fract*, volume 11, capítulo 2, 1975.
- [30] Garcia, D., Qianb, G., Migueleza, H. & Ginerc, E. 'Analysis of the effect of out-of-phase biaxial fatigue loads on crack paths in cruciform specimens using XFEM', *International Journal of Fatigue*, volume 123, páginas 87-95, 2019.
- [31] <https://i.imgur.com/cNaBQih.png>, consultado em 15 dezembro 2020.
- [34] Breitbarth, E., Besel, M. & Reh, S. 'Biaxial testing of cruciform specimens representing characteristics of a metallic airplane fuselage section', *Int J Fatigue*, volume 108, páginas 116-126 2018.
- [35] Brown, M.W. & Miller, K.J. 'Mode I fatigue crack growth under biaxial stress at room and elevated temperature', *Multiaxial fatigue ASTM International*, 1985.
- [37] Breitbarth, E. & Besel, M. 'Fatigue crack deflection in cruciform specimens subjected to biaxial loading Conditions', *Int J Fatigue*, volume 113, páginas 245-350, 2018.
- [39] Erdogan, F. & Sih, G.C. 'On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear' *J Basic Eng*, volume 85, páginas 519-525, 1963.
- [40] Sih, G.C. 'Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems', *Int J Fract*, 305–321, 1974.
- [41] Hourlier, F., D'Hondt, H., Truchon, M. & Pineau, A. 'Fatigue crack path behavior underpolymodal fatigue'. *ASTM International*, volume 55, páginas 969-990, 1985.
- [42] Giner, E., Sabsabi, M. & Fuenmayor, J. 'Direction of crack propagation in a complete contact fretting-fatigue problem'. *Int J Fatigue*, volume 58, páginas 172-180, 2014.
- [44] Silva, A. 'MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO AEROESPACIAL',2017.
- [45] Wolf, C.H., Burgold, A., Henkel, S., Kuna, M. & Biermann, H. 'Crack growth behaviour in biaxial stress fields: Calculation of K-factors for cruciform specimens', *Elsevier*, volume 107, 2020.

- [46] Ficha técnica Al7075-T6, <https://www.gleal.pt/files/products/13.pdf>, consultado: 20 dezembro 2020
- [47] Louro, J. 'Avaliação do dano acumulado gerado por seqüências de carregamentos biaxiais na vida à fadiga no aço 42CrMo4', tese IST, 2010.
- [48] <http://mecanicosdeplanta.com.br/site/aeronavegabilidade/>, consultado: 15 dezembro 2020.
- [49] Johnston, B. 'M. Materiais' 4ª ed, publicado por MrGraw-Hill em 2006]
- [50] Socie, D.F. & Marquis, G.B. 'Multiaxial Fatigue', Society of Automotive Engineers, 2000.
- [52] Baptista, R. M. G. S., Infante, V. and Marques, J. (2019) "Algorithm for automatic fatigue crack growth simulation on welded high strength steels", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 13(48), páginas 257-268.
- [54] Lee, E.U & Taylor, R.E. 'Fatigue behavior of aluminum alloys under biaxial loading', Naval Air Warfare Center Aircraft Division, volume 78, páginas 1555-1564, 2010.
- [55] Giannella, V., Dhondt, G., Kontermann, C. & Citarella, R. 'Combined static-cyclic multi-axial crack propagation in cruciform Specimens', Elsevier, volume 123, páginas 296-307, 2019.
- [56] Oliveira, F. 'Crack Modelling with the eXtended Finite Element Method', tese IST, 2013.
- [57] Misak, H.E., Perel, V.Y., Sabelkin, V. & Mall, S. 'Crack growth behavior of 7075-T6 under biaxial tension-tension fatigue', *Int J Fatigue*, volume 55, páginas 158-165, 2013.