

Mauro Daniel Carvalho Cruz

**EFEITO DAS
PROPRIEDADES ELASTOPLÁSTICAS
NA PROPAGAÇÃO DE FENDAS POR FADIGA**

**Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Produção e Projeto**

Julho / 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Efeito das propriedades elastoplásticas na propagação de fendas por fadiga

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

Effect of elastoplastic parameters in fatigue cracks propagation

Autor

Mauro Daniel Carvalho Cruz

Orientadores

Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes

Professor Doutor Pedro André Dias Prates

Júri

Presidente	Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Pedro André Dias Prates Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra
Vogal	Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2018

*“Raise your standards.
What changes people is when their shoulds become their musts.”*
Anthony Robbins

Aos meus pais e irmão.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado finda um percurso de 5 longos anos (2013–2018). Deixo aqui registado o meu mais sincero agradecimento:

Ao Professor Doutor Fernando Antunes,
pela confiança em mim, pela disponibilidade e partilha de conhecimentos, pelo entusiasmo, encorajamento e ainda boa disposição ao longo deste último semestre.

Ao Professor Doutor Pedro Prates,
pela simpatia, paciência e total dedicação no acompanhamento contínuo deste trabalho final.

**Ao Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Coimbra,**
pela disponibilização do fantástico programa de elementos finitos DD3IMP.

À Professora Doutora Marta Oliveira,
pela disponibilização do template.

Aos meus amigos, sem precisar de mencionar nomes,
pelo companheirismo, apoio e amizade. Vocês foram um verdadeiro incentivo.

À minha família, em especial aos meus pais, irmão, avó, tia e Snoopy,
porque sem o vosso esforço, amor e força, nos bons e maus momentos, nada disto teria sido possível. Se esta conquista é minha, é igualmente vossa.

∞

À Fundação para a Ciência e Tecnologia e ao Programa Operacional Temático Fatores de Competitividade (COMPETE), participado pelo fundo comunitário Europeu FEDER (Projeto PTDC/EMS–PRO/1356/2014; COMPETE: T449508144–00019113).



Resumo

A fadiga é o modo de falha prematura mais severo e comum em componentes mecânicos durante o tempo de serviço. No âmbito da análise de propagação de fendas, é utilizada, recorrentemente, a relação entre a velocidade de propagação de fendas por fadiga e a gama do fator de intensidade de tensões ($da/dN-\Delta K$), apesar das limitações reconhecidas no parâmetro ΔK . O comportamento elastoplástico do material é determinante para da/dN , porém não tem sido possível desenvolver estudos paramétricos experimentais ou numéricos. Por outro lado, a utilização do $CTOD$ (deslocamento de abertura de extremidade de fenda) plástico, em substituição de ΔK , permite fazer previsões de da/dN e assim desenvolver estudos paramétricos centrados nas constantes do material.

Na presente dissertação pretendem-se realizar vários estudos de sensibilidade, nomeadamente, estudar o efeito dos parâmetros do material no *ratcheting strain* cíclico ($\delta\varepsilon$), na gama de deformação plástica cíclica ($\Delta\varepsilon_p$) e na gama plástica de $CTOD$ ($\Delta CTOD_p$). Além disso, pretende-se verificar se existe correlação entre $\Delta\varepsilon_p$ e $\delta\varepsilon$ em provetes não fissurados, e se é possível transpor diretamente as tendências observadas em provetes não fissurados para provetes com fenda. Finalmente, pretende-se estudar a variação de $\Delta CTOD_p$ em função dos vários parâmetros e o efeito dos parâmetros no fenómeno de fecho de fenda.

Constatou-se que, para materiais com encruamento cinemático puro, a tensão limite de elasticidade (Y_0) é, em todos os estudos realizados, o parâmetro mais significativo. Para materiais com encruamento isotrópico + cinemático (misto), o parâmetro mais relevante é a tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}). Existe uma evidente diferença de sensibilidade entre parâmetros, para cada estudo feito. Nalguns casos, a ordem de parâmetros mais significativos, entre estudos diferentes, é a mesma.

Palavras-chave: Fadiga, Propagação de fendas, *Ratcheting strain*, Gama de deformação plástica, Gama plástica de $CTOD$, Encruamento cinemático puro, Encruamento misto, parâmetros de comportamento elastoplástico.

Abstract

Fatigue is the most severe and common type of premature failure in mechanical components at service. For this reason, its study has been developed with great seriousness. In the analysis of crack propagation, the relationship between the fatigue crack propagation velocity and the stress intensity factor range ($da/dN-\Delta K$) is recurrently used, despite its known limitations. The elastoplastic behavior of materials is crucial for da/dN , yet it hasn't been possible to develop experimental or numerical parametric studies. On the other hand, using the plastic component of $CTOD$ (Crack Tip Opening Displacement), instead of ΔK , allows making previsions on da/dN and making parametric studies about material's parameters.

The main objective of this thesis is to carry out sensitivity studies, namely: to study the effect of the material's parameters on the cyclic ratcheting strain ($\delta\varepsilon$), on the cyclic plastic deformation range ($\Delta\varepsilon_p$) and on the plastic range of $CTOD$ ($\Delta CTOD_p$). Also, it is intended to verify if there is a correlation between $\Delta\varepsilon_p$ and $\delta\varepsilon$ on non-fissured materials and if the results of fissured and non-fissured materials are similar. At last, it is intended to study the trend of $\Delta CTOD_p$ as a function of the material's parameters and their effect on crack closure phenomenon.

It was found that, for materials with pure cinematic hardening, the most significant parameter is the yield stress (Y_0). For materials with isotropic + kinematic hardening, the most relevant parameter is the isotropic saturation stress (Y_{SAT}). There is a clear difference of sensitivity between parameters, for each study. In some cases, the most important parameters are the same for different studies.

Keywords Fatigue, Crack propagation, Ratcheting strain, Plastic deformation range, $CTOD$ plastic range, Pure kinematic hardening, Isotropic + kinematic hardening, Parameters of elastoplastic behaviour.

Índice

Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia, Siglas e Subscritos.....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas.....	xvii
Siglas de Terminologia Anglo–Saxónica.....	xviii
Subscritos	xviii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da Dissertação	3
2. Teoria da Plasticidade.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. Modelos de Comportamento Elastoplástico	6
2.3. Critério de Plasticidade	7
2.4. Leis de Encruamento	8
3. Efeito dos Parâmetros do Material no <i>Ratcheting Strain</i> Cíclico	11
3.1. Conceito de <i>Ratcheting Strain</i> Cíclico.....	11
3.2. Identificação dos Parâmetros	13
3.3. Procedimento Numérico	14
3.3.1. Programa e Modelo de Elementos Finitos	14
3.3.2. Tratamento de Dados	14
3.3.3. Metodologia	15
3.4. Materiais e Condições de Carregamento	16
3.5. Resultados Numéricos.....	18
3.5.1. Materiais com Encruamento Cinemático Puro.....	18
3.5.2. Materiais com Encruamento Isotrópico + Cinemático (Misto).....	21
4. Efeito dos Parâmetros do Material na Gama de Deformação Plástica Cíclica.....	25
4.1. Resultados Numéricos.....	25
4.1.1. Materiais com Encruamento Cinemático Puro.....	25
4.1.2. Materiais com Encruamento Isotrópico + Cinemático (Misto).....	27
4.2. Relação entre a Gama de Deformação Plástica Cíclica e o <i>Ratcheting Strain</i> Cíclico.....	28
5. Teoria da Fadiga.....	29

5.1.	Modos de Falha	29
5.2.	Fenómeno de Fadiga	30
5.3.	Limitações das Curvas da/dN-ΔK e Soluções	32
5.4.	Parâmetros Não Lineares da Extremidade de Fenda	33
5.4.1.	Deslocamento de Abertura da Extremidade de Fenda	34
5.5.	Estudo da Propagação de Fendas com base no CTOD	35
6.	Efeito dos Parâmetros do Material no ΔCTOD _p	37
6.1.	Procedimento Numérico	37
6.1.1.	Programa de Elementos Finitos	37
6.1.2.	Metodologia	38
6.1.3.	Determinação de ΔCTOD _p e CS	39
6.1.4.	Geometria, Material e Carregamento	40
6.1.5.	Modelo de Elementos Finitos	41
6.2.	Resultados Numéricos	42
6.2.1.	Materiais com Encruamento Cinemático Puro	42
6.2.2.	Materiais com Encruamento Isotrópico + Cinemático (Misto)	43
6.3.	Estudo de Tendências Paramétricas	47
7.	Conclusões	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	APÊNDICE A – Curvas CS-Δn no <i>Ratcheting Strain</i> Cíclico, segundo o Carregamento 2: F _{MAX} = 150 e F _{MIN} = -100 [N]	59
	APÊNDICE B – Outras Curvas δε-Δn Paramétricas	63
	APÊNDICE C – Gráficos CS-n na Gama de Deformação Plástica Cíclica, segundo o Carregamento 2: F _{MAX} = 150 e F _{MIN} = -100 [N]	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação geométrica dos critérios de plasticidade de Tresca e von Mises no espaço das tensões principais. Adaptado de Grilo (2011).	6
Figura 2.2 – Representação do comportamento plástico, para encruamento isotrópico, de materiais em tração–compressão. Do lado esquerdo as superfícies de cedência, inicial e expandida. Do lado direito a curva tensão–deformação correspondente. Adaptado de Prates (2014).	8
Figura 2.3 – Representação do comportamento plástico, para encruamento cinemático, de materiais em tração–compressão. Do lado esquerdo as superfícies de cedência, inicial e transladada. Do lado direito a curva tensão–deformação correspondente. Adaptado de Prates (2014).	9
Figura 3.1 – (a) Curva tensão–deformação (σ – ϵ) exemplo de um único ciclo de histerese; (b) Curva cíclica tensão–deformação (σ – ϵ) exemplo de um carregamento cíclico completo.	11
Figura 3.2 – (a) Curva tensão–deformação (σ – ϵ) exemplo do efeito de encruamento; (b) Curva ratcheting strain–variação de ciclo ($\delta\epsilon$ – Δn) correspondente.....	12
Figura 3.3 – (a) Curva tensão–deformação (σ – ϵ) exemplo do efeito de amaciamento; (b) Curva ratcheting strain–variação de ciclo ($\delta\epsilon$ – Δn) correspondente.....	12
Figura 3.4 – (a) Curva tensão–deformação (σ – ϵ) exemplo do efeito de encruamento seguido por amaciamento; (b) Curva ratcheting strain–variação de ciclo ($\delta\epsilon$ – Δn) correspondente.	13
Figura 3.5 – Representação do modelo numérico dos ensaios simulados.....	14
Figura 3.6 – Exemplo de uma curva ratcheting strain–parâmetro ($\delta\epsilon$ – P) para um certo Δn (a, b e c são constantes do polinómio de tendência).	15
Figura 3.7 – Curvas $\delta\epsilon$ – Δn dos materiais 1, 2 e 3: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N]; (c) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	18
Figura 3.8 – Curvas CS– Δn no ratcheting strain para o material 1: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	19
Figura 3.9 – Curvas CS– Δn no ratcheting strain para o material 3: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	19

Figura 3.10 – Curvas CS– Δn no ratcheting strain para o material 2: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	20
Figura 3.11 – Curvas $\delta\varepsilon$ – Δn dos parâmetros do material 1 e segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: (a) para um incremento de 15%; (b) para um decréscimo de 15%.	20
Figura 3.12 – Curvas $\delta\varepsilon$ – Δn dos materiais 4, 5 e 6: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N]; (c) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	21
Figura 3.13 – Curvas CS– Δn no ratcheting strain para o material 4: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	22
Figura 3.14 – Curvas CS– Δn no ratcheting strain para o material 5: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	22
Figura 3.15 – Curvas CS– Δn no ratcheting strain para o material 6: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	22
Figura 3.16 – Curvas $\delta\varepsilon$ – Δn dos parâmetros do material 4 e segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: (a) para um incremento de 15%; (b) para um decréscimo de 15%.	23
Figura 4.1 – Gráficos CS– n na gama de deformação plástica para o material 1: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	25
Figura 4.2 – Gráficos CS– n na gama de deformação plástica para o material 2: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	26
Figura 4.3 – Gráficos CS– n na gama de deformação plástica para o material 3: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	26
Figura 4.4 – Gráficos CS– n na gama de deformação plástica para o material 4: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	27
Figura 4.5 – Gráficos CS– n na gama de deformação plástica para o material 5: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].	27

Figura 4.6 – Gráficos CS–n na gama de deformação plástica para o material 6: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].....	27
Figura 4.7 – Relação entre a gama de deformação plástica e o ratcheting strain.....	28
Figura 5.1 – Ilustração das etapas características de fratura por fadiga. Adaptado de Rodrigues (2016).....	30
Figura 5.2 – Curva típica da/dN– ΔK	31
Figura 5.3 – Zonas da extremidade de fenda, parâmetros e curvas tensão–deformação. Adaptado de Sousa (2014).	33
Figura 5.4 – Ilustração das diferentes interpretações de CTOD explicadas: (a) e (b). Adaptado de Rodrigues (2016).....	34
Figura 6.1 – Curva típica CTOD–F.	39
Figura 6.2 – Geometria do provete M(T) e detalhe da fenda [mm].	40
Figura 6.3 – Condições de fronteira e de carregamento.	41
Figura 6.4 – Malha de Elementos Finitos.	42
Figura 6.5. – Gráfico CS–P no $\Delta CTOD_p$ para o material 1.....	42
Figura 6.6. – Gráfico CS–P no $\Delta CTOD_p$ para o material 4.....	43
Figura 6.7. – Gráfico CS–P no $\Delta CTOD_p$ para o material 5.....	44
Figura 6.8. – Gráfico CS–P no $\Delta CTOD_p$ para o material 6.....	45
Figura 6.9. – Gráfico CS provetes fissurados versus CS provetes não fissurados.....	46
Figura 6.10 – Curvas de tendência $\Delta CTOD_p$ –P: (a) P corresponde a Y_0 ; (b) P corresponde a Y_{SAT} ; (c) P corresponde a C_Y ; (d) P corresponde a E.....	48
Figura 6.11. – Curva $\Delta CTOD_p$ –1/E.	48
Figura 6.12 – Curvas CTOD–F: (a) para Y_0 ; (b) para Y_{SAT} ; (c) para C_Y ; (d) para E.....	49
Figura A.0.1 – Curvas CS– Δn no ratcheting strain para o material 1 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].....	59
Figura A.0.2 – Curvas CS– Δn no ratcheting strain para o material 2 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].....	59
Figura A.0.3 – Curvas CS– Δn no ratcheting strain para o material 3 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].....	60
Figura A.0.4 – Curvas CS– Δn no ratcheting strain para o material 4 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].....	60
Figura A.0.5 – Curvas CS– Δn no ratcheting strain para o material 5 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].....	60

Figura A.0.6 – Curvas $CS-\Delta n$ no ratcheting strain para o material 6 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].	61
Figura B.0.1 – Curvas $\delta\varepsilon-\Delta n$ para os parâmetros do material 2 e segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: (a) para um incremento de 15%; (b) para um decréto de 15%.	63
Figura B.0.2 – Curvas $\delta\varepsilon-\Delta n$ para os parâmetros do material 2 e segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: (a) para um incremento de 15%; (b) para um decréto de 15%.	63
Figura B.0.3 – Curvas $\delta\varepsilon-\Delta n$ para os parâmetros do material 5 e segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: (a) para um incremento de 15%; (b) para um decréto de 15%.	64
Figura B.0.4 – Curvas $\delta\varepsilon-\Delta n$ para os parâmetros do material 5 e segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: (a) para um incremento de 15%; (b) para um decréto de 15%.	64
Figura C.0.1 – Gráfico $CS-n$ na gama de deformação plástica para o material 1 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].	65
Figura C.0.2 – Gráfico $CS-n$ na gama de deformação plástica para o material 2 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].	65
Figura C.0.3 – Gráfico $CS-n$ na gama de deformação plástica para o material 3 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].	66
Figura C.0.4 – Gráfico $CS-n$ na gama de deformação plástica para o material 4 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].	66
Figura C.0.5 – Gráfico $CS-n$ na gama de deformação plástica para o material 5 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].	66
Figura C.0.6 – Gráfico $CS-n$ na gama de deformação plástica para o material 6 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros dos materiais com encruamento cinemático puro.	17
Tabela 3.2 – Parâmetros dos materiais com encruamento isotrópico + cinemático (misto).	17
Tabela 6.1 – Ficheiros de entrada e saída do programa DD3IMP.	37
Tabela 6.2. – Modelos de propagação de fenda.	47

SIMBOLOGIA, SIGLAS E SUBSCRITOS

Simbologia

A	Área inicial
a	Comprimento da fenda
a_0	Comprimento inicial da fenda
b, p	Constantes da relação polinomial entre da/dN e $\Delta CTOD_p$
C, m	Constantes da Lei de Paris Erdogan obtidas experimentalmente
c	Constante da relação linear entre da/dN e $\Delta CTOD_p$
CS	Coefficiente de sensibilidade
C_X	Velocidade de saturação cinemática
C_Y	Velocidade de saturação isotrópica
da/dN	Velocidade de propagação de fenda
E	Módulo de elasticidade
F (cap. 2)	Função do critério de plasticidade
F	Força aplicada
F_B	Força aplicada no ponto de início de abertura de fenda
F_{MAX}	Valor máximo da força aplicada
F_{MIN}	Valor mínimo da força aplicada
K	Fator de intensidade de tensão
K_{1C}	Tenacidade à fratura
K_{MAX}	Valor máximo do fator de intensidade de tensão
K_{MIN}	Valor mínimo do fator de intensidade de tensão
L_0	Comprimento inicial
m	Declive
n	Ciclo de carregamento
n (cap. 6)	Expoente de encruamento

P	Parâmetro
P_{ref}	Parâmetro de referência
R	Razão de tensões
r_{pc}	Raio da zona plástica inversa
U	Percentagem efetiva de carga
Wc	Valor crítico da densidade de energia acumulada
\mathbf{X}	Tensor das tensões inversas
x, y, z	Coordenadas do espaço cartesiano
X_{SAT}	Tensão de saturação cinemática
Y (cap. 2)	Tensão de escoamento
Y (cap. 5)	Fator geométrico
Y_0	Tensão limite de elasticidade
Y_{SAT}	Tensão de saturação isotrópica
$\Delta CTOD$	Gama de deslocamento de abertura da extremidade de fenda
$\Delta CTOD_p$	Gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda
$\Delta CTOD_{p_{ref}}$	Gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda de referência
$\Delta \varepsilon_{p_{ref}}$	<i>Ratcheting strain</i> cíclico de referência
ΔK	Gama do fator de intensidade de tensão
ΔK_{lf}	Limiar de propagação de fenda por fadiga
ΔL	Deslocamento
Δn	Variação de ciclo
$\delta \varepsilon$	<i>Ratcheting strain</i> cíclico
$\Delta \varepsilon_p$	Gama de deformação plástica cíclica
$\delta \varepsilon_{ref}$	<i>Ratcheting strain</i> de referência
$\bar{\varepsilon}^p$	Deformação plástica equivalente
E	Deformação total real
ε_f	Deformação de falha
ε^p	Tensor de deformação plástica

$\bar{\sigma}$	Tensão equivalente
$\boldsymbol{\sigma}$	Tensor desviador das tensões de Cauchy
σ	Tensão real
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais de Cauchy
σ_{conv}	Tensão convencional
σ_{ced_c}	Tensão de cedência cíclica
$\partial\Delta CTOD_p/\partial P$	Derivada parcial da curva de tendência de $\Delta CTOD_p$ em função de P
$\partial\Delta\varepsilon_p/\partial P$	Derivada parcial da curva de tendência de $\Delta\varepsilon_p$ em função de P
$\partial\delta\varepsilon/\partial P$	Derivada parcial da curva de tendência de $\delta\varepsilon$ em função de P
π	Plano desviador

Siglas

<i>DEMUC</i>	Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra
<i>FCTUC</i>	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
<i>MEF</i>	Método de Elementos Finitos
<i>MFLE</i>	Mecânica da Fratura Linear Elástica

Siglas de Terminologia Anglo–Saxónica

<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>CJP</i>	Christopher James Patterson (Modelo)
<i>COD</i>	<i>Crack Opening Displacement</i> (Deslocamento de abertura de fenda)
<i>CTOD</i>	<i>Crack Tip Opening Displacement</i> (Deslocamento de abertura da extremidade de fenda)
<i>DD3IMP</i>	<i>Deep Drawing 3–Dimesional IMPLICIT</i>
<i>DIC</i>	<i>Digital Image Correlation</i>

Subscritos

<i>conv</i>	Convencional
<i>e</i>	Elástico
<i>MAX</i>	Máximo
<i>MIN</i>	Mínimo
<i>p</i>	Plástico
<i>ref</i>	Referência

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A mecânica da fratura é a área da mecânica que se dedica ao estudo da resistência dos materiais à falha consequente da propagação de fendas e fissuras, e tem como principal objetivo a melhoria do desempenho de todo e qualquer componente mecânico. Ao longo das últimas décadas, o avanço no desenvolvimento associado a esta vertente tem sido notório.

A falha de um componente é sinónimo da incapacidade do mesmo exercer a função que lhe foi inicialmente atribuída e depende, essencialmente, da geometria do componente, das propriedades do material constituinte, das características de carregamento a que está sujeito e da qualidade de manutenção. A fadiga é o modo de falha prematura mais severo e recorrente em componentes mecânicos durante o tempo de serviço (Branco, Ferreira, Costa & Ribeiro, 2012). Caracteriza-se pela degradação progressiva das propriedades do material devido ao aparecimento e/ou crescimento de fendas até à eventual rotura, sequelas de um carregamento cíclico, e é favorecida pela existência de zonas de concentração de tensões.

A fadiga afeta seriamente a vida útil do material, que é um aspeto de grande relevância na realização do projeto estrutural de um elemento mecânico sujeito a cargas cíclicas (Hardrath, 1970). A vida útil é, recorrentemente, determinada através de curvas $da/dN-\Delta K$, em que da/dN e ΔK simbolizam, respetivamente, a velocidade de propagação de fenda e a gama do fator de intensidade de tensão. O mecanismo de propagação de fendas depende de fenómenos não lineares e irreversíveis, que ocorrem na extremidade de fenda. No entanto, o fator de intensidade de tensão (K) tem carácter elástico, o que parece ser contraditório. Para além disso, a utilização do fator de intensidade de tensão apresenta algumas limitações na previsão do comportamento de fendas curtas.

Posto isto, e perante a incapacidade de várias teorias propostas darem resposta ao problema, surge a alternativa de utilizar parâmetros não lineares capazes de quantificar a

deformação plástica ocorrida na extremidade de fenda. Nesta dissertação recorre-se ao deslocamento de abertura da extremidade de fenda, *CTOD* (*Crack Tip Opening Displacement*), partindo dos pressupostos de que a propagação de fendas está intimamente relacionada com a deformação plástica na sua extremidade e que esta deformação pode ser quantificada pelo parâmetro em questão.

1.2. Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é o estudo do efeito das propriedades elastoplásticas na propagação de fendas por fadiga. Como objetivos específicos podem identificar-se:

- I. Estudar a sensibilidade do *ratcheting strain* e da gama de deformação plástica cíclicos à variação dos parâmetros do material, nomeadamente em materiais com encruamento cinemático puro e encruamento isotrópico + cinemático (misto);
- II. Comparar as sensibilidades do *ratcheting strain* com as da gama de deformação plástica obtidas no estudo anterior;
- III. Em provetes fissurados, estudar a sensibilidade no *CTOD*, mais concretamente no $\Delta CTOD_p$, à variação dos parâmetros do material;
- IV. Verificar se existe correlação entre as sensibilidades obtidas em provetes lisos e fissurados (resultados obtidos em I e III, respetivamente);
- V. Fazer estudos paramétricos do efeito dos parâmetros do material em $\Delta CTOD_p$, procurando estabelecer relações entre da/dN e os parâmetros do material.

1.3. Estrutura da Dissertação

No seguimento deste capítulo introdutório, a presente dissertação encontra-se subdividida em mais seis capítulos. A estrutura é apresentada em seguida:

- ♦ **Capítulo 2**, designado de Teoria da Plasticidade. São introduzidos todos os conceitos e definições sobre o comportamento elastoplástico dos materiais considerados relevantes pelo autor para a compreensão dos capítulos seguintes. Faz-se a identificação dos parâmetros que caracterizam o comportamento elastoplástico do material;
- ♦ **Capítulo 3**, denominado de Efeito dos Parâmetros do Material no *Ratcheting Strain* Cíclico. São apresentados o conceito de *ratcheting strain* cíclico, o procedimento numérico seguido neste estudo, os materiais e condições de carregamento abordados e, por fim, os resultados obtidos com a respetiva análise;
- ♦ **Capítulo 4**, intitulado de Efeito dos Parâmetros do Material na Gama de Deformação Plástica Cíclica, onde são demonstrados e comentados os resultados das sensibilidades;
- ♦ **Capítulo 5**, nomeado Teoria da Fadiga. São explicadas todas as noções sobre fadiga de materiais consideradas essenciais pelo autor para a compreensão do capítulo seguinte;
- ♦ **Capítulo 6**, de nome Efeito dos Parâmetros do Material no *CTOD*. São apresentados o procedimento numérico cumprido, os materiais fissurados e as condições de carregamento impostas e, finalmente, os resultados acompanhados pela correspondente análise;
- ♦ **Capítulo 7**, constituído pelas conclusões retiradas desta dissertação e propostas de ideias para trabalhos futuros.

2. TEORIA DA PLASTICIDADE

2.1. Introdução

Através de um ensaio de tração uniaxial identifica-se, no início do carregamento, uma relação linear entre a tensão e a deformação, regida pela lei de Hooke. Esta relação é válida apenas em regime elástico e tem como limite superior a tensão limite de elasticidade. Este regime caracteriza-se por um comportamento reversível de deformação após a remoção da carga aplicada. A deformação elástica resulta da estiragem das ligações interatómicas (Moura & Carlos, 2006). Contudo, são várias as situações em que os materiais se encontram sujeitos a estados de tensão e/ou deformação multiaxial, pelo que a definição do limite do regime elástico se torna uma tarefa mais complexa.

Quando o limite elástico é excedido o material ingressa no regime plástico. A deformação intrínseca a este regime permanece após a supressão da carga aplicada. Assim, o corpo permanecerá deformado e com propriedades mecânicas diferentes das iniciais. A deformação plástica consiste na rotura das ligações interatómicas, seguida da deslocação dos planos de escorregamento e posterior formação de novas ligações (Barlat *et al.*, 2013).

Uma forma intuitiva de distinguir os dois regimes de deformação acima mencionados passa pela representação geométrica da superfície limite de elasticidade (superfície de cedência ou superfície de plasticidade), à qual correspondem todos os estados de tensão para os quais se prevê o início de deformação plástica. A sua representação é feita no espaço das tensões principais de Cauchy (σ_1 , σ_2 e σ_3), tal como ilustrado na Figura 2.1. A geometria da superfície limite de elasticidade varia consoante o critério de plasticidade adotado, sendo os mais usuais os de Tresca (superfície hexagonal) e von Mises (superfície elíptica). O eixo das representações geométricas de ambos os critérios coincide com a diagonal do espaço (definida pelos pontos que respeitam a condição $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Esta representação tem como pressuposto a tensão hidrostática não influenciar o comportamento plástico, o que justifica a igualdade dimensional entre todas as secções normais a este eixo. A projeção da superfície de plasticidade no plano desviador (π) é perpendicular ao eixo da

superfície e contém a origem das coordenadas (caracterizado pelos pontos que respeitam a condição $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$).

Resumindo, os estados de tensão inseridos no interior da superfície correspondem ao regime elástico. O regime plástico é estabelecido pelo limite da mesma.

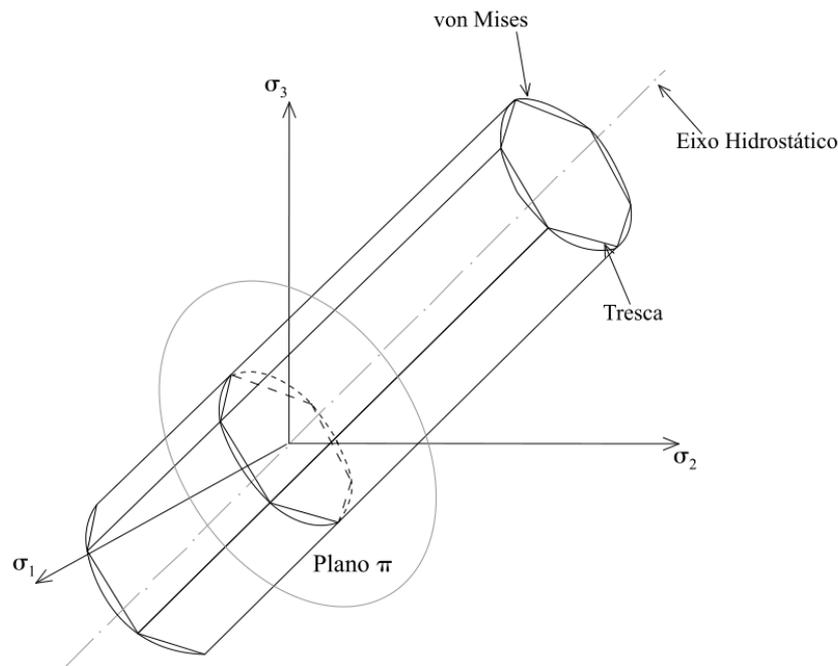


Figura 2.1 – Representação geométrica dos critérios de plasticidade de Tresca e von Mises no espaço das tensões principais. Adaptado de Grilo (2011).

2.2. Modelos de Comportamento Elastoplástico

Existem vários modelos descritivos do comportamento elastoplástico de materiais metálicos, categorizados em cristalográficos ou fenomenológicos.

Nos modelos cristalográficos o material é considerado um corpo cristalino. O seu comportamento é descrito, a nível microscópico, através de informações adquiridas a partir da textura cristalográfica do material e usando modelos de plasticidade de policristais.

Por outro lado, a descrição deste comportamento por modelos fenomenológicos é feita a nível macroscópico, assumindo que o material se faz representar por uma superfície de plasticidade que evolui com a deformação plástica. Estes modelos, quando implementado em ferramentas numéricas, baseadas no Método dos Elementos Finitos, são mais simples e eficientes, comparativamente aos anteriores, que requerem um número de parâmetros

superior e tempos de cálculo mais demorados (Revil–Baudard & Cazacu, 2014). Os modelos fenomenológicos podem ser estabelecidos segundo três componentes:

- I. Critério de plasticidade, que descreve a superfície de plasticidade no espaço das tensões;
- II. Leis de encruamento, que descreve a evolução da superfície de plasticidade com a deformação plástica;
- III. Lei de plasticidade, que sendo associada assume uma condição de normalidade entre a superfície de plasticidade e o incremento de deformação plástica.

2.3. Critério de Plasticidade

A definição da superfície de plasticidade é feita através de um critério de plasticidade, que pode ser formulado por uma função F :

$$F(\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}, \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^p) = \bar{\sigma}(\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}) - Y(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^p) \quad (2.1)$$

em que $\bar{\sigma}(\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}) = \bar{\sigma}$ é a tensão equivalente, que é função do tensor desviador das tensões de Cauchy ($\boldsymbol{\sigma}$) e do tensor das tensões inversas (\mathbf{X}). A parcela $Y(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^p) = Y$ representa a tensão de escoamento e é função da deformação plástica equivalente ($\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$).

Através da Equação 2.1 é possível delinear o limite da superfície, da seguinte forma:

$$F = \bar{\sigma} - Y = 0 \Leftrightarrow \bar{\sigma} = Y \quad (2.2)$$

O regime elástico é estabelecido segundo a condição $\bar{\sigma} < Y$, em que o estado de tensão do material se situa no interior da superfície. Por outro lado, o regime plástico ocorre quando o incremento de deformação plástica é normal à superfície de plasticidade, para um estado de tensão tal que $\bar{\sigma} = Y$.

Ao longo dos anos foram surgindo vários critérios de plasticidade isotrópicos e anisotrópicos. Contrariamente aos materiais anisotrópicos, os materiais isotrópicos caracterizam-se por um comportamento de resposta indiferente às direções impostas nas solicitações mecânicas aplicadas (Yu, Cheng & Chen, 2012). Nesta dissertação foi utilizado o critério de plasticidade isotrópico de von Mises (2012), no qual é postulado que a cedência

ocorre na medida em que a energia elástica atinge o seu valor crítico. Este critério pode ser expresso pela Equação 2.3:

$$(\Sigma_1 - \Sigma_2)^2 + (\Sigma_2 - \Sigma_3)^2 + (\Sigma_1 - \Sigma_3)^2 = 2Y^2 \quad (2.3)$$

em que Σ_1 , Σ_2 e Σ_3 são as componentes principais do tensor das tensões efetivas de Cauchy ($\Sigma = \sigma - X$).

2.4. Leis de Encruamento

Os metais e as suas ligas encruam com a deformação plástica, o que se traduz num aumento da tensão necessária para que seja gerada mais deformação plástica. As leis de encruamento exprimem a evolução da superfície de cedência durante a deformação plástica. Estas leis de encruamento podem ser de dois tipos: isotrópico e cinemático.

As leis de encruamento isotrópico descrevem a expansão homotética da superfície com a deformação plástica (isto é, sem que a sua forma geométrica sofra alterações). Os centros das superfícies original e deformada mantêm-se, então, coincidentes (ver Figura 2.2).

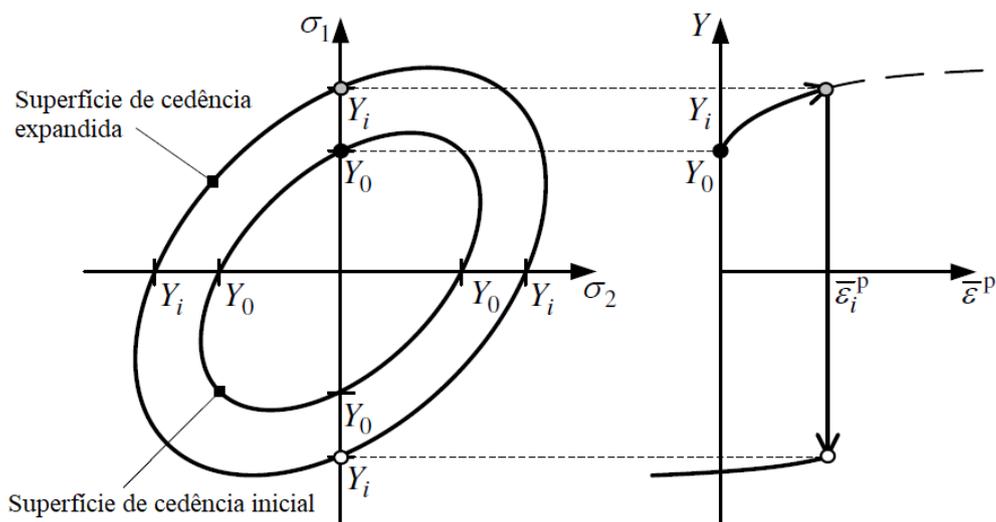


Figura 2.2 – Representação do comportamento plástico, para encruamento isotrópico, de materiais em tração-compressão. Do lado esquerdo as superfícies de cedência, inicial e expandida. Do lado direito a curva tensão-deformação correspondente. Adaptado de Prates (2014).

Para materiais cujo encruamento apresente saturação, a lei de Voce (1948) é mais adequada, uma vez que contempla o parâmetro tensão de saturação (Y_{SAT}). Esta é descrita pela expressão:

$$Y = Y_0 + (Y_{SAT} - Y_0)[1 - \exp(-C_Y \bar{\varepsilon}^p)] \quad (2.4)$$

em que Y_0 , Y_{SAT} e C_Y são parâmetros do material.

As leis de encruamento cinemático descrevem a translação do centro da superfície de cedência no espaço de tensões, o que permite modelar o efeito de *Bauschinger*. Este fenómeno traduz-se numa disparidade dos valores da tensão de cedência à tração e compressão, sendo este último inferior (em valor absoluto), como ilustra a figura 2.3. As leis de encruamento isotrópico não descrevem este fenómeno.

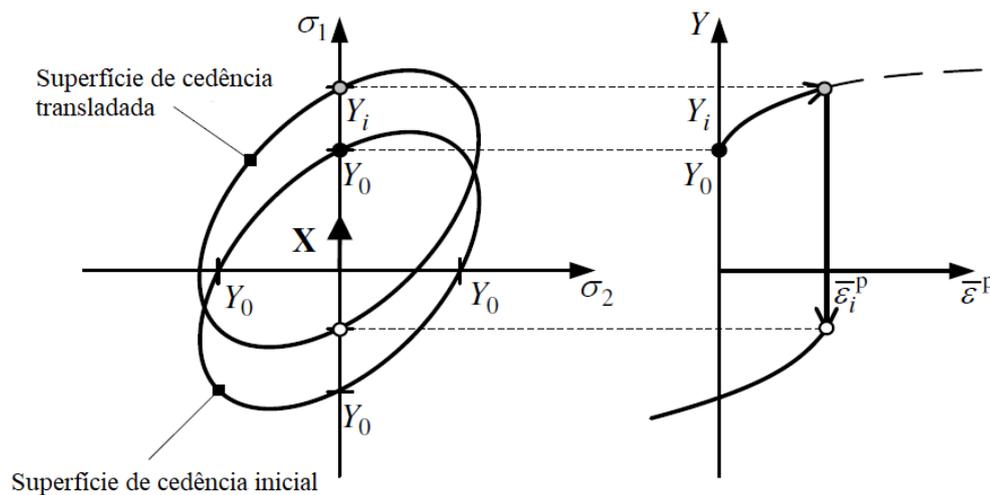


Figura 2.3 – Representação do comportamento plástico, para encruamento cinemático, de materiais em tração–compressão. Do lado esquerdo as superfícies de cedência, inicial e transladada. Do lado direito a curva tensão–deformação correspondente. Adaptado de Prates (2014).

Os modelos de encruamento cinemático podem ser classificados como lineares e não lineares. Os primeiros apresentam a vantagem de serem extremamente eficientes no que diz respeito à sua implementação numérica e computacional, no entanto falham quanto à previsão do comportamento não-linear de materiais reais. Armstrong e Frederick (1966) desenvolveram uma lei não linear, descrita pela expressão:

$$d\mathbf{X} = C_X \left[\frac{X_{SAT}}{\bar{\sigma}} (\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}) - \mathbf{X} \right] d\bar{\varepsilon}^p \quad (2.5)$$

em que C_X e X_{SAT} são parâmetros do material.

3. EFEITO DOS PARÂMETROS DO MATERIAL NO RATCHETING STRAIN CÍCLICO

3.1. Conceito de *Ratcheting Strain* Cíclico

Muitos componentes em engenharia estão sujeitos a carregamento uniaxial cíclico durante o tempo de serviço. Numa fase inicial do carregamento, ocorrem alterações microestruturais com impacto nas propriedades físicas e no comportamento de resposta do material face às solicitações de carga, o que se traduz nos efeitos de encruamento e/ou amaciamento e, conseqüentemente, no fenómeno de *ratcheting strain* ou fluência cíclica que, segundo Tong, Zhao e Lin (2013), é um mecanismo de propagação de fendas por fadiga.

Na situação de carregamento uniaxial, os ciclos de histerese apresentam-se em aberto (ver Figura 3.1a), com gamas de deformação plástica ($\Delta\varepsilon_p$) bem definidas. Tal é resultado da diferença de comportamento não-linear do material em condições de tração e compressão, e ainda das características do carregamento. Este é definido por uma carga (força) de amplitude constante e de valor médio diferente de zero. Todos estes fatores mencionados resultam na ocorrência de *ratcheting strain*.

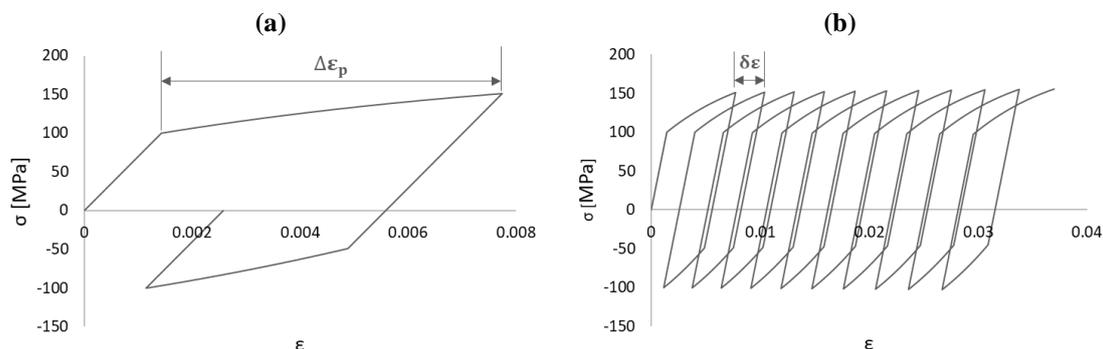


Figura 3.1 – (a) Curva tensão–deformação (σ – ε) exemplo de um único ciclo de histerese; (b) Curva cíclica tensão–deformação (σ – ε) exemplo de um carregamento cíclico completo.

O *ratcheting strain* pode ser entendido como o acumular de deformação plástica axial desde o início até ao final do carregamento. A acumulação de deformação entre dois ciclos consecutivos designa-se por *ratcheting strain* cíclico. Este pode ser indicado numa

curva cíclica tensão–deformação pelo símbolo $\delta\varepsilon$ (ver Figura 3.1b), consistindo no incremento dos valores de deformação (ε) correspondentes aos valores máximos de tensão de tração entre dois ciclos consecutivos. A evolução de $\delta\varepsilon$ com o número de ciclos indica se o material apresenta um efeito de encruamento, amaciamento ou ambos alternadamente, ou se é ciclicamente estável.

O efeito de encruamento corresponde ao aumento da resistência do material à deformação plástica. Materiais com encruamento cíclico são menos suscetíveis de deformar plasticamente ao longo dos ciclos de carga. Pelo contrário, o efeito de amaciamento contribui para uma diminuição da resistência à deformação plástica, pelo que o material se torna mais vulnerável a deformar.

Para clarificar o conceito da influência do encruamento e amaciamento na evolução do *ratcheting strain* cíclico, são exemplificadas as curvas tensão–deformação (σ – ε) e *ratcheting strain*–variação de ciclo ($\delta\varepsilon$ – Δn) para os casos de: encruamento (Figura 3.2 – material 6, carregamento 1), amaciamento (Figura 3.3 – material 1, carregamento 2) e amaciamento após encruamento (Figura 3.4 – material 6, carregamento 2).

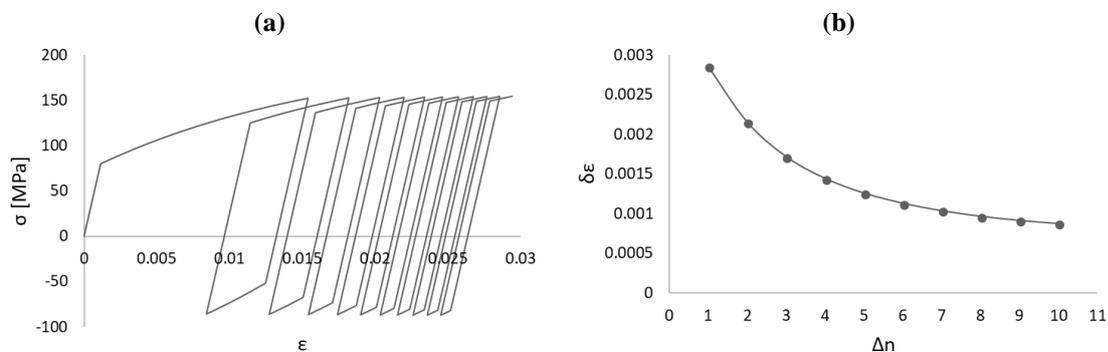


Figura 3.2 – (a) Curva tensão–deformação (σ – ε) exemplo do efeito de encruamento; **(b)** Curva ratcheting strain–variação de ciclo ($\delta\varepsilon$ – Δn) correspondente.

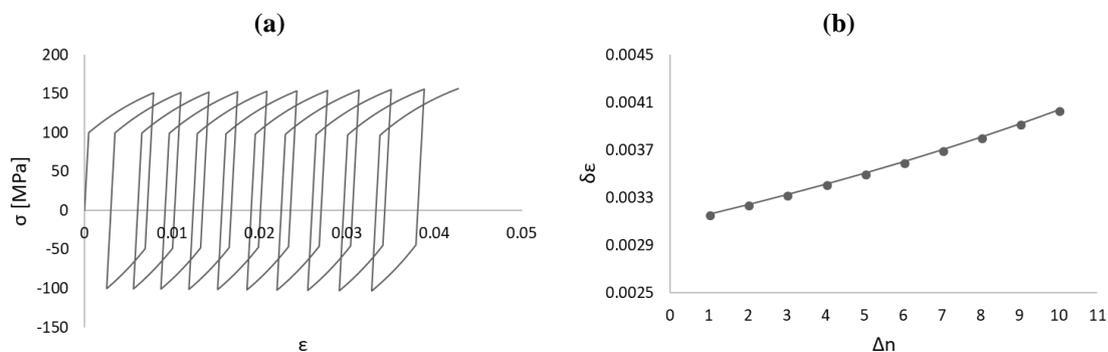


Figura 3.3 – (a) Curva tensão–deformação (σ – ε) exemplo do efeito de amaciamento; **(b)** Curva ratcheting strain–variação de ciclo ($\delta\varepsilon$ – Δn) correspondente.

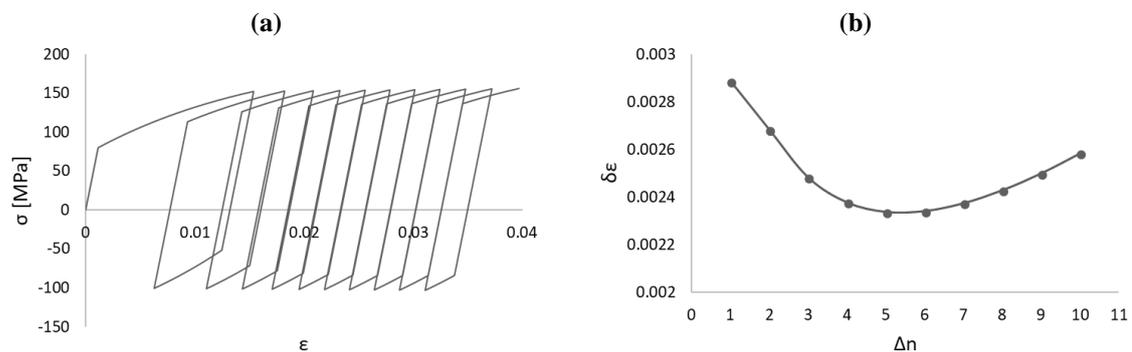


Figura 3.4 – (a) Curva tensão–deformação (σ – ϵ) exemplo do efeito de encruamento seguido por amaciamento; (b) Curva ratcheting strain–variação de ciclo ($\delta\epsilon$ – Δn) correspondente.

3.2. Identificação dos Parâmetros

O objetivo do Capítulo 3 assenta no estudo do efeito da variação dos parâmetros que caracterizam o material no comportamento plástico cíclico do mesmo, com base no *ratcheting strain*. Como referido no Capítulo 2, existem várias leis de encruamento e cada uma apresenta o seu conjunto de parâmetros. Este estudo centra-se em materiais com encruamento cinemático puro e encruamento isotrópico + cinemático, ou misto, com base no critério de plasticidade de von Mises.

Para o encruamento isotrópico é utilizada a lei de Voce (ver Equação 2.4), que inclui os parâmetros:

- ◆ Y_0 , tensão limite de elasticidade;
- ◆ Y_{SAT} , tensão de saturação isotrópica;
- ◆ C_Y , velocidade de saturação isotrópica.

Para o encruamento cinemático é abordada a lei de Armstrong & Frederick (ver Equação 2.5), que estabelece os parâmetros:

- ◆ X_{SAT} , tensão de saturação cinemática;
- ◆ C_X , velocidade de saturação cinemática.

No decorrer do estudo de materiais com encruamento cinemático puro são analisados os parâmetros: Y_0 , X_{SAT} , C_X e ainda E , que representa o módulo de elasticidade. No caso de materiais com encruamento misto são considerados todos os parâmetros: Y_0 , Y_{SAT} , C_Y , X_{SAT} , C_X e E . Neste contexto, fez-se variar cada um dos parâmetros do material com incrementos e decrementos de 15%. Após terminadas as devidas simulações e respetivo tratamento de dados (explicados em 3.3), prosseguiu-se à comparação entre os valores do

ratcheting strain obtidos, possibilitando tirar conclusão quanto aos parâmetros do material cuja variação de valor teve maior impacto em $\delta\varepsilon$.

3.3. Procedimento Numérico

3.3.1. Programa e Modelo de Elementos Finitos

Este estudo paramétrico foi elaborado com recurso ao programa de elementos finitos DD3IMP, *Deep Drawing 3-Dimensional IMPLICIT*, desenvolvido pelo Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. Os ensaios uniaxiais de tração-compressão em controlo de carga foram modelados e simulados através deste programa. Relativamente ao modelo numérico do ensaio, é utilizado um único elemento finito sólido hexaédrico de 8 nós, com $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ de dimensões iniciais, elemento com condições de simetria em três planos ortogonais: $x = 0$, $y = 0$ e $z = 0$. A força é prescrita nos 4 nós da face do elemento inserida no plano $x = 1 \text{ mm}$, segundo uma direção paralela ao eixo $0x$. A Figura 3.5 esquematiza este modelo numérico.

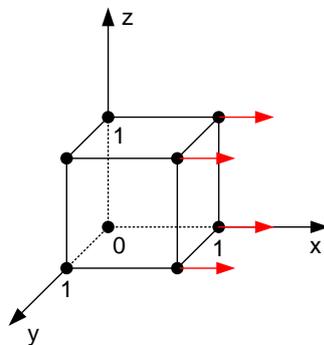


Figura 3.5 – Representação do modelo numérico dos ensaios simulados.

A informação relativa aos parâmetros do material e às solicitações aplicadas são fornecidas ao programa através dos ficheiros de entrada “DD3_mater1.dat” e “DD3_phase.dat”, respetivamente.

3.3.2. Tratamento de Dados

Após efetuada cada simulação é necessário fazer o tratamento dos dados providos pelo programa DD3IMP e exportados no ficheiro de saída “Load_displ.res”.

Assim, utilizou-se o *software Microsoft Office Excel* (2016) para obter as curvas tensão–deformação, os valores do *ratcheting strain* e ainda dos coeficientes de sensibilidade.

O coeficiente de sensibilidade, CS , é um parâmetro adimensional utilizado para quantificar a influência da variação de qualquer parâmetro nos valores do *ratcheting strain*. A respectiva expressão matemática é:

$$CS = \frac{|\partial\delta\varepsilon/\partial P|}{\delta\varepsilon_{ref}/P_{ref}} \quad (3.1)$$

na qual $\delta\varepsilon_{ref}$ e P_{ref} representam os valores do *ratcheting strain* cíclico e do parâmetro a estudar, respetivamente, do material base de referência. Na mesma Equação (3.1), $|\partial\delta\varepsilon/\partial P|$ simboliza o módulo da derivada parcial da curva de tendência de $\delta\varepsilon$ em função de P e expressa a evolução da curva $\delta\varepsilon$ – P (ver Figura 3.6). Uma vez que o valor do *ratcheting strain* não é constante no decorrer do ensaio, variando com o número de ciclos de carga, conclui-se que os valores de $\delta\varepsilon_{ref}$ e $|\partial\delta\varepsilon/\partial P|$ dependem da variação de ciclo (Δn) em questão. Deste modo, apesar do valor de P_{ref} permanecer inalterado, é necessário calcular o valor de CS para cada variação de ciclo.

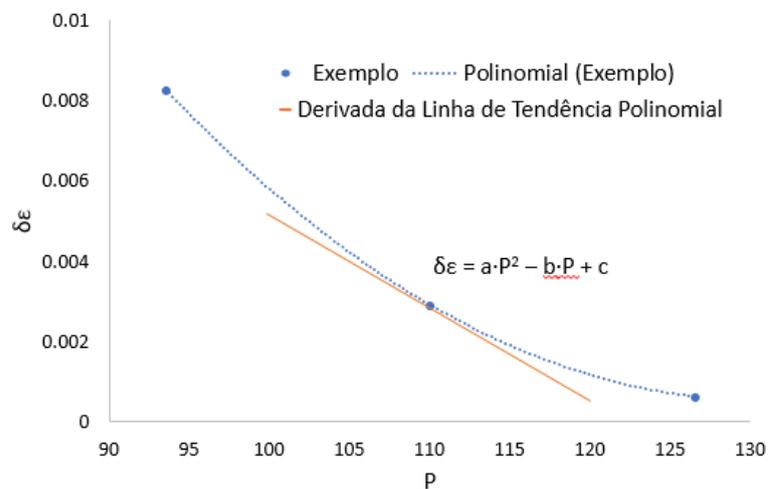


Figura 3.6 – Exemplo de uma curva *ratcheting strain*–parâmetro ($\delta\varepsilon$ – P) para um certo Δn (a , b e c são constantes do polinómio de tendência).

3.3.3. Metodologia

Sucintamente, o procedimento seguido na realização do presente estudo paramétrico divide-se nas seguintes etapas:

- I. Simulação dos ensaios dos materiais de referência, para cada carregamento;
- II. Simulação dos ensaios (para cada material e carregamento) com variação individual dos parâmetros;
- III. Obtenção da curva tensão–deformação e dos valores do *ratcheting strain* cíclico, pelo tratamento de dados, para cada simulação efetuada;
- IV. Comparação, pelos valores do coeficiente de sensibilidade, da influência da variação de cada parâmetro no valor do *ratcheting strain* cíclico.

3.4. Materiais e Condições de Carregamento

Neste trabalho, foram analisados seis materiais, três dos quais descritos com encruamento cinemático puro e os restantes com encruamento isotrópico + cinemático (misto). Os carregamentos aplicados nos ensaios numéricos de tração–compressão uniaxial consistem em 11 ciclos de histerese (n), ou seja, 10 variações de ciclo consecutivas (Δn), por cada simulação, originando 10 valores de *ratcheting strain* cíclico distintos por ensaio.

Cada material foi sujeito a três carregamentos diferentes:

- Carregamento 1: $F_{MAX} = 150\text{ N}$ e $F_{MIN} = -85\text{ N}$ ($R = -0,567$)
- Carregamento 2: $F_{MAX} = 150\text{ N}$ e $F_{MIN} = -100\text{ N}$ ($R = -0,667$)
- Carregamento 3: $F_{MAX} = 150\text{ N}$ e $F_{MIN} = -125\text{ N}$ ($R = -0,833$)

O controlo de carga é feito através do programa DD3IMP pela introdução dos valores mínimo e máximo da carga (F). A tensão convencional (σ_{conv}) pode ser calculada pela expressão:

$$\sigma_{conv} = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

em que o valor da área inicial (A) submetida ao carregamento é de 1 mm^2 (subentendido em 3.3.1) e o da força (F) varia entre o seu valor mínimo, F_{MIN} , e máximo, F_{MAX} . No entanto, após o tratamento de dados, optou-se por apresentar todos os resultados de acordo com os valores de tensão e deformação reais, estabelecidos pelas Equações 3.3 e 3.4:

$$\sigma = \sigma_{conv} \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = \sigma_{conv} \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) \quad (3.4)$$

em que ΔL representa o deslocamento e L_0 o comprimento inicial do elemento finito. Este último tem o valor de 1 mm (subentendido igualmente em 3.3.1).

As Tabelas 3.1 e 3.2 listam toda a informação paramétrica sobre os materiais estudados. A sua escolha teve por objetivo abordar os vários parâmetros com valores pequenos e grandes, relativamente a um valor mediano.

Tabela 3.1 – Parâmetros dos materiais com encruamento cinemático puro.

Materiais com encruamento cinemático puro		
Material 1	Material 2	Material 3
$Y_0 = 100 \text{ MPa}$	$Y_0 = 90 \text{ MPa}$	$Y_0 = 100 \text{ MPa}$
$X_{SAT} = 100 \text{ MPa}$	$X_{SAT} = 130 \text{ MPa}$	$X_{SAT} = 90 \text{ MPa}$
$C_X = 100$	$C_X = 75$	$C_X = 150$
$E = 210\,000 \text{ MPa}$	$E = 70\,000 \text{ MPa}$	$E = 70\,000 \text{ MPa}$

Tabela 3.2 – Parâmetros dos materiais com encruamento isotrópico + cinemático (misto).

Materiais com encruamento isotrópico + cinemático (misto)		
Material 4	Material 5	Material 6
$Y_0 = 85 \text{ MPa}$	$Y_0 = 80 \text{ MPa}$	$Y_0 = 80 \text{ MPa}$
$X_{SAT} = 85 \text{ MPa}$	$X_{SAT} = 95 \text{ MPa}$	$X_{SAT} = 80 \text{ MPa}$
$C_X = 85$	$C_X = 90$	$C_X = 75$
$E = 210\,000 \text{ MPa}$	$E = 70\,000 \text{ MPa}$	$E = 70\,000 \text{ MPa}$
$Y_{SAT} = 110 \text{ MPa}$	$Y_{SAT} = 100 \text{ MPa}$	$Y_{SAT} = 120 \text{ MPa}$
$C_Y = 110$	$C_Y = 150$	$C_Y = 60$

3.5. Resultados Numéricos

3.5.1. Materiais com Encruamento Cinemático Puro

Através da Figura 3.7 é possível fazer uma comparação entre as curvas $\delta\varepsilon-\Delta n$ correspondentes a cada material com encruamento cinemático puro (materiais 1, 2 e 3 da Tabela 3.1), para cada carregamento efetuado.

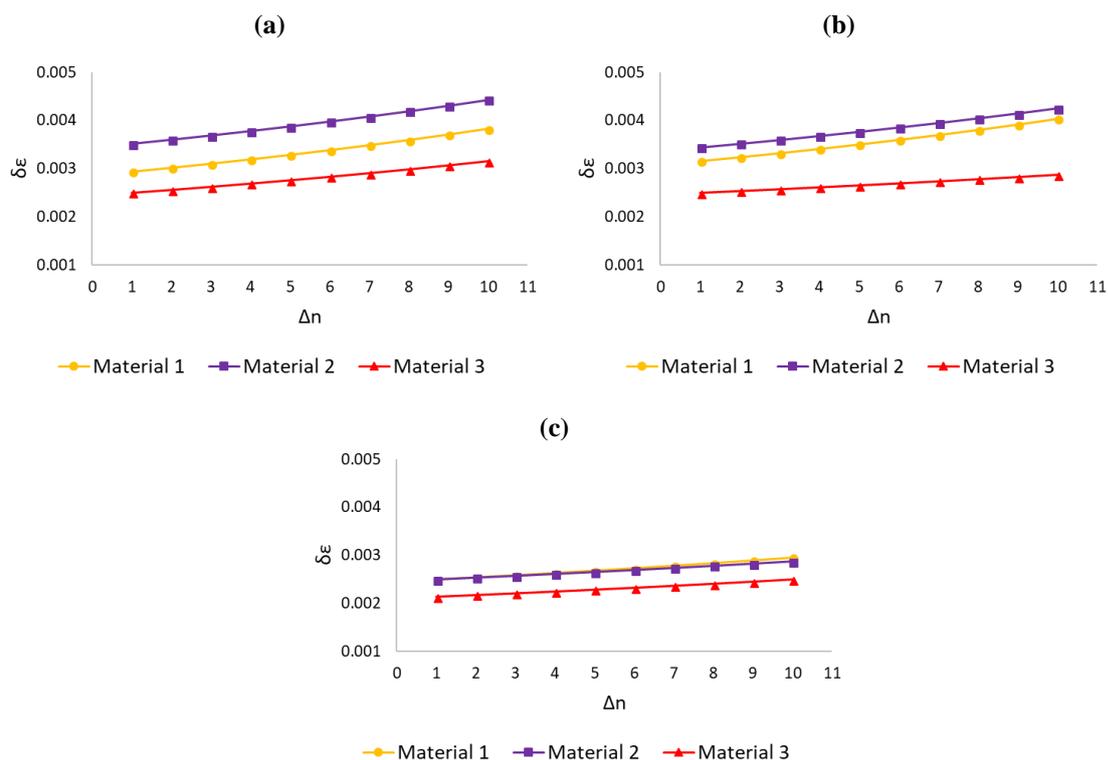


Figura 3.7 – Curvas $\delta\varepsilon-\Delta n$ dos materiais 1, 2 e 3: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N]; **(c)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

Os três materiais apresentam um efeito de amaciamento, independentemente da carga aplicada, uma vez que o valor de *ratcheting strain* cíclico aumenta no decorrer do ensaio.

As Figuras 3.8–3.10 ilustram as curvas $CS-\Delta n$ para os materiais 1, 2 e 3 da Tabela 3.1, segundo os carregamentos 1 e 3 (ver resultados para o carregamento 2 no APÊNDICE A). Os resultados apresentados permitem identificar os parâmetros com maior influência no *ratcheting strain* cíclico.

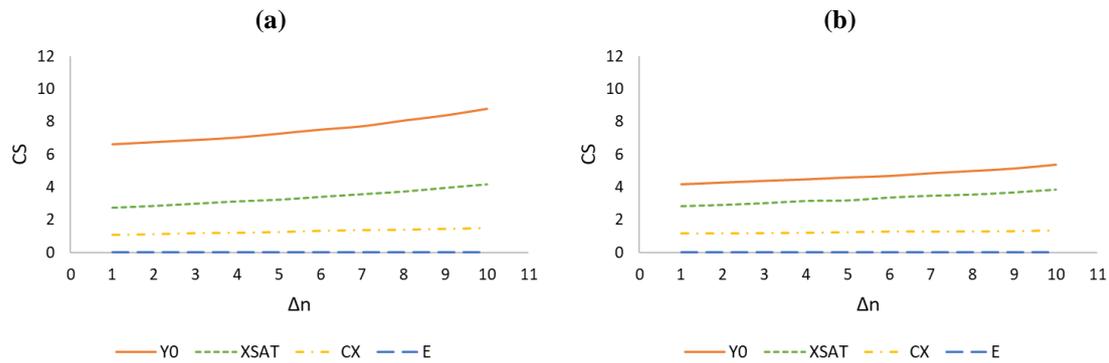


Figura 3.8 – Curvas $CS-\Delta n$ no ratcheting strain para o material 1: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

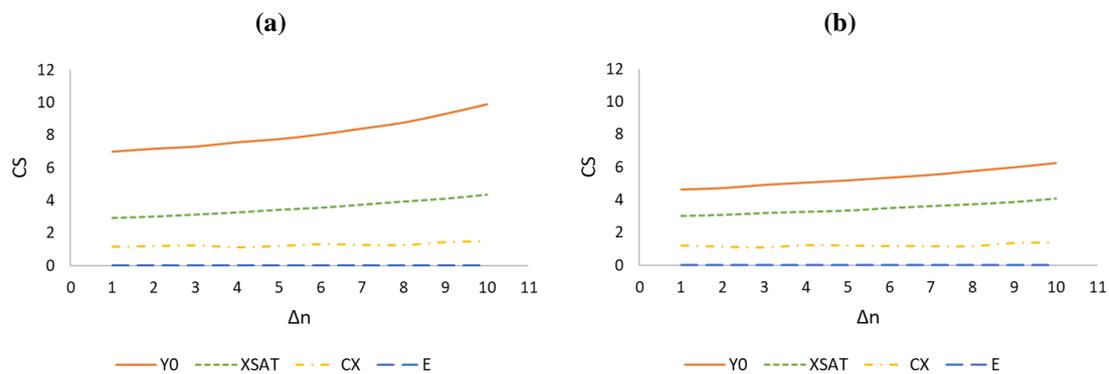


Figura 3.9 – Curvas $CS-\Delta n$ no ratcheting strain para o material 3: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

O parâmetro com maior coeficiente de sensibilidade aos valores do *ratcheting strain* cíclico, para os materiais 1 e 3, independentemente do carregamento, é a tensão limite de elasticidade (Y_0), seguido pela tensão de saturação cinemática (X_{SAT}), pela velocidade de saturação cinemática (C_X) e por fim, pelo módulo de elasticidade (E), que praticamente não interfere nos valores de $\delta\varepsilon$.

É possível notar que os valores do CS tendem a aumentar com Δn , principalmente para Y_0 e X_{SAT} . Este aumento é tanto maior quanto menor o valor em módulo da força mínima do carregamento (F_{MIN}). Além disso, deve salientar-se que o *ratcheting strain* cíclico é, em geral, muito sensível à variação dos parâmetros do material. De facto, na Figura 3.9a, pode ver-se que a sensibilidade de $\delta\varepsilon$ relativamente a Y_0 atinge um valor máximo próximo de 10, isto é, uma variação de 1% em Y_0 pode provocar uma variação de cerca de 10% em $\delta\varepsilon$.

De salientar que os valores do CS diminuem consideravelmente quando o valor em módulo da força mínima (F_{MIN}) é aumentado, particularmente para Y_0 .

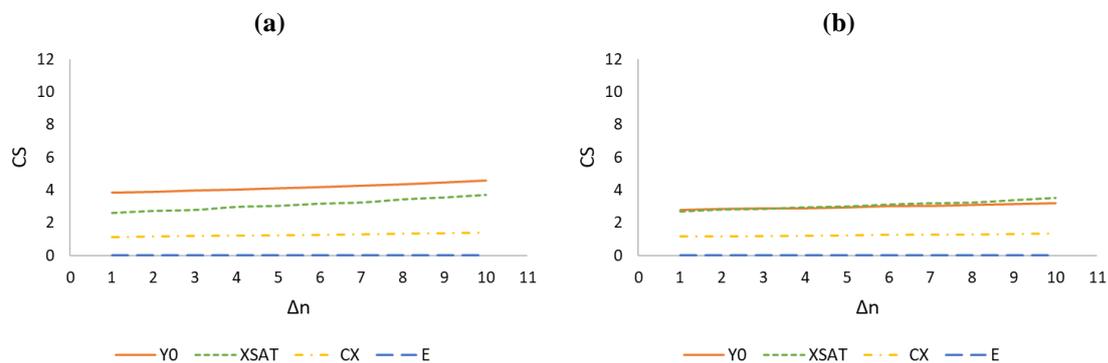


Figura 3.10 – Curvas $CS-\Delta n$ no ratcheting strain para o material 2: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

Para o material 2, o parâmetro com maior influência no *ratcheting strain* varia consoante a carga aplicada. Para o carregamento 1, o parâmetro mais influente é Y_0 , seguido por X_{SAT} e C_X . Para o carregamento 3, ao fim de 5 ciclos de carga (quando $\Delta n = 4$), o parâmetro com maior CS deixa de ser Y_0 , passando a ser X_{SAT} . Isto acontece uma vez que:

- ♦ Os valores de CS diminuem significativamente quando o módulo da força mínima aumenta e em maior proporção para Y_0 do que para X_{SAT} ;
- ♦ A inclinação da curva de CS é superior para X_{SAT} quando comparada com a de Y_0 , o que significa que os valores do CS tendem a aumentar com Δn de modo mais acentuado para X_{SAT} do que para Y_0 .

Por observação da Figura 3.11, conclui-se que o incremento de qualquer um dos parâmetros de um material com encruamento cinemático puro resulta num decréscimo dos valores do *ratcheting strain* cíclico (ver Figura 3.11a). Pelo contrário, o decremento leva a um aumento dos valores de $\delta\varepsilon$ (ver Figura 3.11b). A curva correspondente a $\delta\varepsilon$ do material de referência encontra-se sobreposta pela do módulo de elasticidade (E).

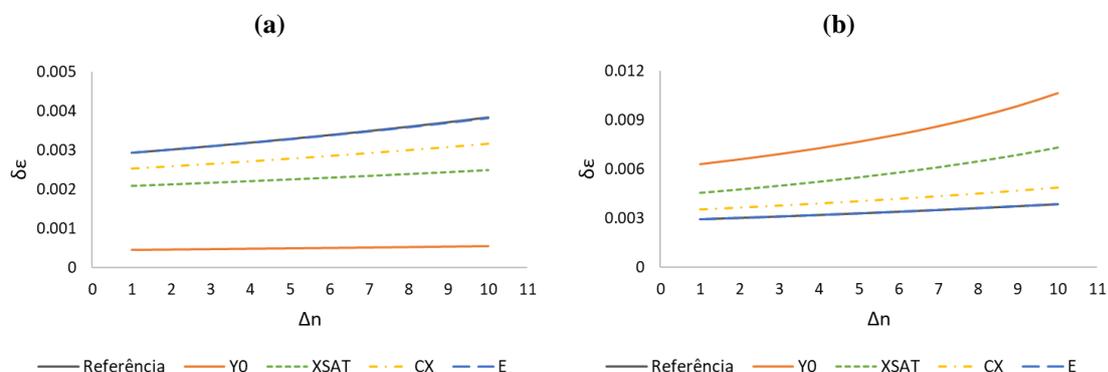


Figura 3.11 – Curvas $\delta\varepsilon-\Delta n$ dos parâmetros do material 1 e segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: **(a)** para um incremento de 15%; **(b)** para um decremento de 15%.

3.5.2. Materiais com Encruamento Isotrópico + Cinemático (Misto)

Relativamente aos materiais com encruamento misto (materiais 4, 5 e 6 da Tabela 3.2), é possível fazer uma comparação entre as curvas $\delta\varepsilon$ - Δn ilustradas na Figura 3.12, para os vários carregamentos.

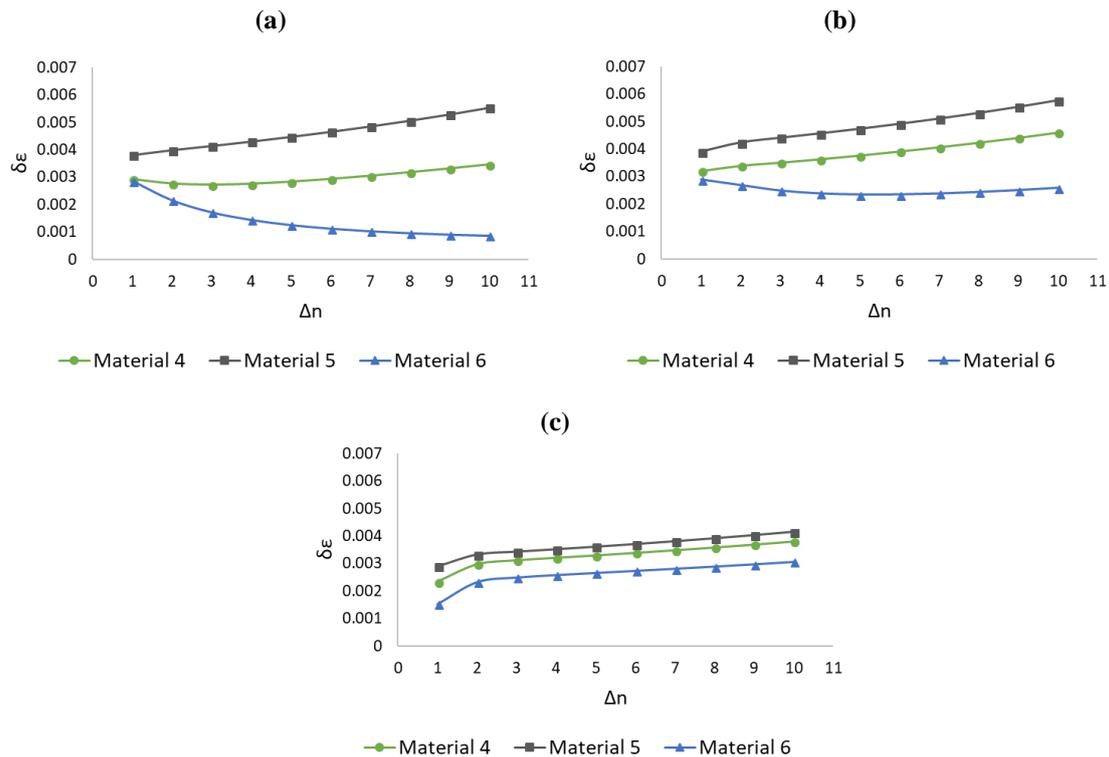


Figura 3.12 – Curvas $\delta\varepsilon$ - Δn dos materiais 4, 5 e 6: (a) segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; (b) segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N]; (c) segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

Os três materiais com encruamento misto comportam-se de modo distinto para cada carregamento.

Segundo o carregamento 1, o material 4 encrua e amacia posteriormente. O material 5 exhibe apenas amaciamento enquanto que o material 6 denota um comportamento de encruamento. Durante o carregamento 2, os materiais 4 e 5 amaciam ao passo que o material 6 apenas apresenta amaciamento ao fim de alguns ciclos marcados por um ligeiro encruamento. Por fim, todos os materiais amaciam no decorrer do carregamento 3.

As Figuras 3.13–3.15 ilustram as curvas $CS-\Delta n$ para os materiais 4, 5 e 6 da Tabela 3.2, segundo os carregamentos 1 e 3. Os resultados para o carregamento 2 podem ser consultados no APÊNDICE A.

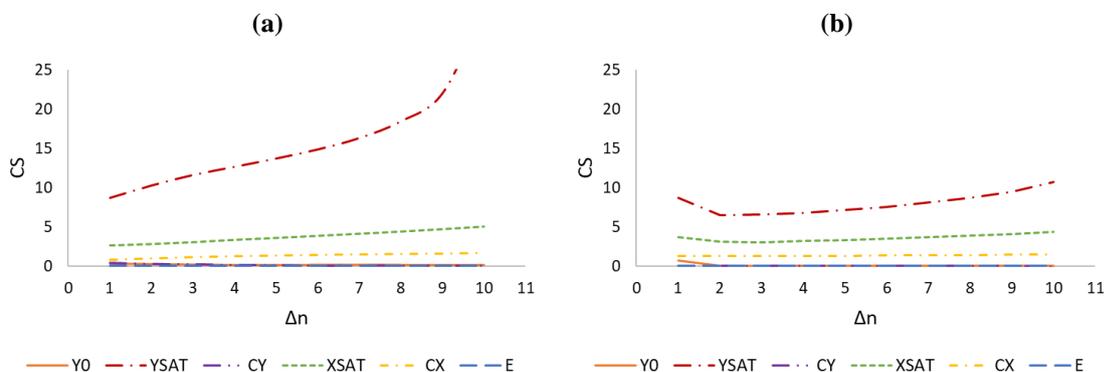


Figura 3.13 – Curvas $CS-\Delta n$ no ratcheting strain para o material 4: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

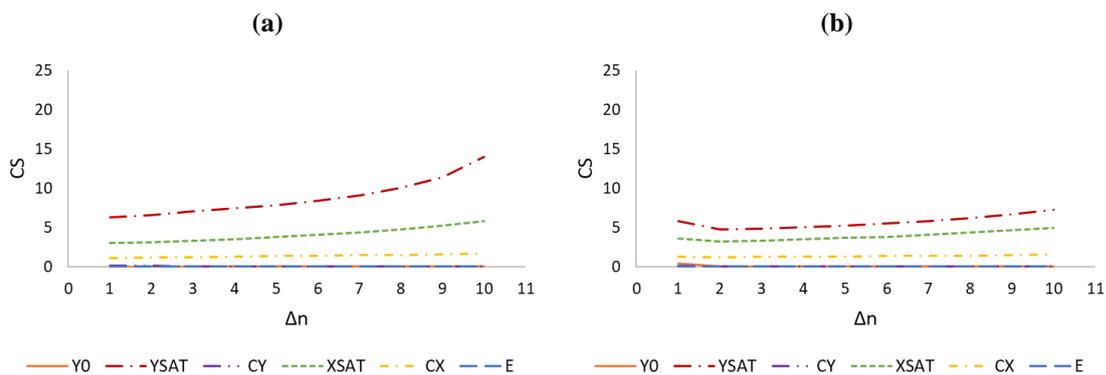


Figura 3.14 – Curvas $CS-\Delta n$ no ratcheting strain para o material 5: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

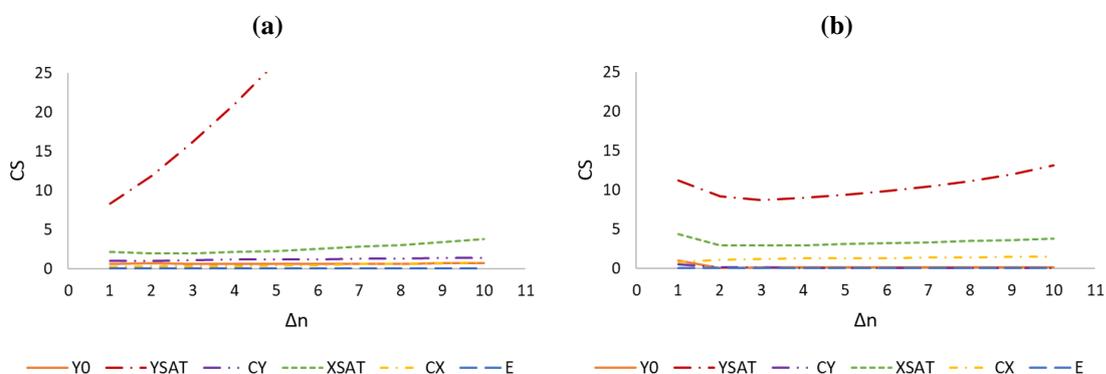


Figura 3.15 – Curvas $CS-\Delta n$ no ratcheting strain para o material 6: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

De acordo com os resultados obtidos, para qualquer carregamento, o parâmetro com maior influência no *ratcheting strain* cíclico é Y_{SAT} , seguido por X_{SAT} e C_X . Os parâmetros menos influentes são Y_0 , C_Y e E . Para o material 6, segundo o carregamento 1, a sensibilidade de $\delta\varepsilon$ relativamente a Y_{SAT} chega a atingir valores de 80 para a décima variação de ciclo, ou seja, alterar 1% em Y_{SAT} pode provocar uma variação de 80% em $\delta\varepsilon$.

É possível perceber que os valores do *CS* para os parâmetros Y_{SAT} , X_{SAT} e C_X tendem a aumentar com Δn . Os restantes parâmetros apresentam valores do *CS* aproximadamente constantes. O aumento de *CS* com Δn é tanto maior quanto menor o valor em módulo da carga mínima (F_{MIN}). Por fim, os valores do *CS* diminuem substancialmente quando o valor em módulo da carga mínima (F_{MIN}) é aumentado, sobretudo para os parâmetros Y_{SAT} , X_{SAT} e C_X .

Por observação da Figura 3.16, constata-se que o incremento do valor de qualquer um dos parâmetros que definem um material com encruamento misto leva a um decréscimo dos valores do *ratcheting strain* cíclico (ver Figura 3.16a), para qualquer carregamento. Pelo contrário, o decréscimo do valor de qualquer parâmetro causa uma variação positiva dos valores de $\delta\varepsilon$ (ver Figura 3.16b). Novamente, a curva correspondente ao $\delta\varepsilon$ do material de referência é praticamente coincidente com a curva análoga ao módulo de elasticidade (E).

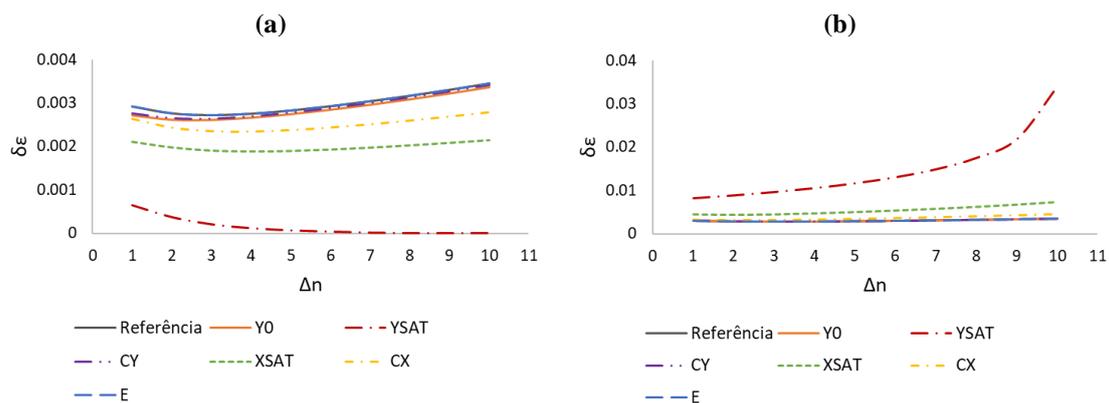


Figura 3.16 – Curvas $\delta\varepsilon$ – Δn dos parâmetros do material 4 e segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: **(a)** para um incremento de 15%; **(b)** para um decréscimo de 15%.

É possível consultar resultados semelhantes aos da Figura 3.11 e 3.16 para outros materiais e carregamentos no APÊNDICE B.

4. EFEITO DOS PARÂMETROS DO MATERIAL NA GAMA DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA CÍCLICA

O presente capítulo destina-se ao estudo do efeito da variação dos parâmetros do material na gama de deformação plástica cíclica ($\Delta\varepsilon_p$), recorrendo aos materiais, condições de carregamento e ensaios especificados no Capítulo 3 (ver 3.3 e 3.4). Os coeficientes de sensibilidade foram calculados através de uma equação idêntica à Equação 3.1, em que se substituíram $\delta\varepsilon_{ref}$ e $|\partial\delta\varepsilon/\partial P|$ por $\Delta\varepsilon_{p_{ref}}$ e $|\partial\Delta\varepsilon_p/\partial P|$, respetivamente. Pretende-se conferir se os parâmetros com maior coeficiente de sensibilidade para a gama de deformação plástica cíclica coincidem com os do estudo do *ratcheting strain* cíclico.

Foram analisados apenas os valores de $\Delta\varepsilon_p$ à tração (ver Figura 3.1a), por suposição de semelhança de resultados dos coeficientes de sensibilidade dos parâmetros à compressão. Consideraram-se exclusivamente os quinto e décimo ciclos de carga.

4.1. Resultados Numéricos

4.1.1. Materiais com Encruamento Cinemático Puro

As Figuras 4.1–4.3 mostram a distribuição dos valores do coeficiente de sensibilidade (CS) na gama de deformação plástica ($\Delta\varepsilon_p$) nos ciclos 5 e 10, para os materiais 1, 2 e 3 da Tabela 3.1, com encruamento cinemático puro, segundo os carregamentos 1 e 3. Os resultados equivalentes ao carregamento 2 podem ser consultados no APÊNDICE C.

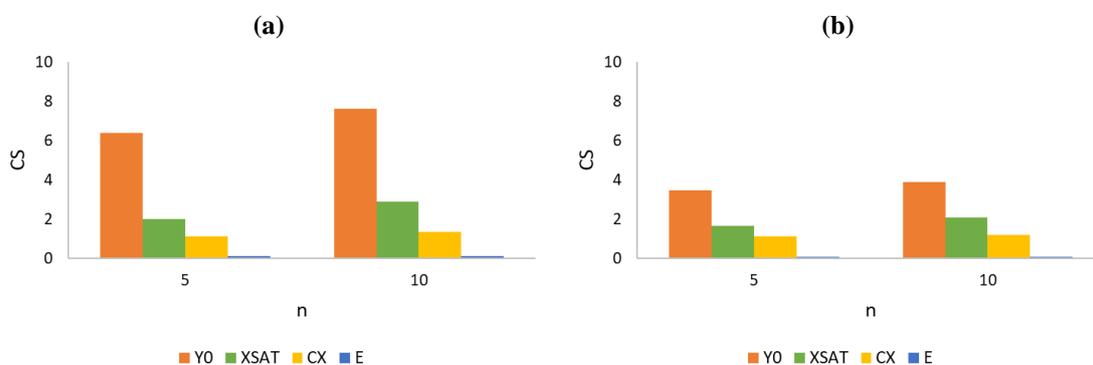


Figura 4.1 – Gráficos CS - n na gama de deformação plástica para o material 1: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

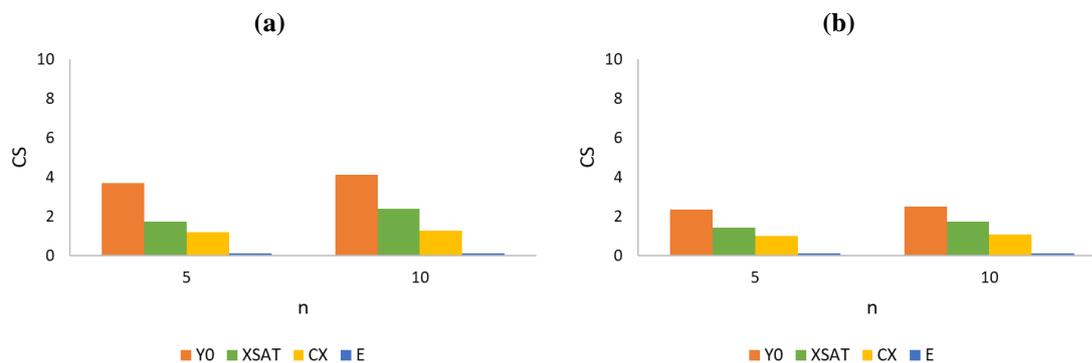


Figura 4.2 – Gráficos CS–n na gama de deformação plástica para o material 2: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

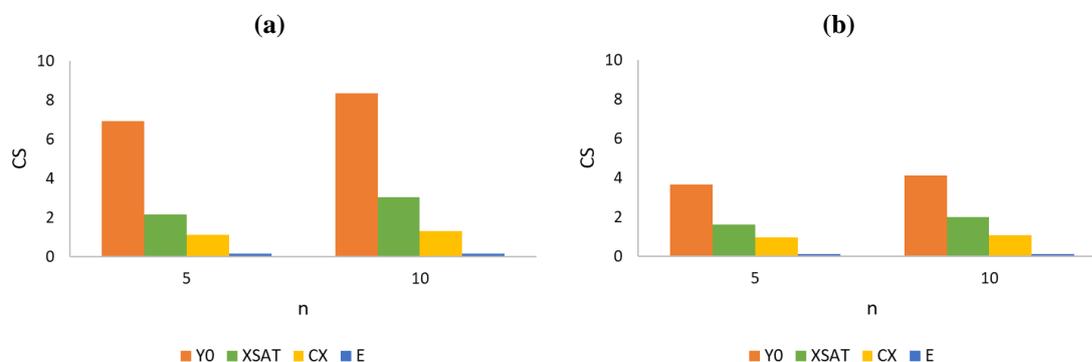


Figura 4.3 – Gráficos CS–n na gama de deformação plástica para o material 3: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

Os parâmetros com maior influência na gama de deformação plástica cíclica, para qualquer material e carregamento, quer no quinto quer no décimo ciclos, são a tensão limite de elasticidade (Y_0), seguida pela tensão de saturação cinemática (X_{SAT}), pela velocidade de saturação cinemática (C_X) e pelo módulo de elasticidade (E), cuja variação tem um impacto pouco significativo em $\Delta\varepsilon_p$. Este resultado não é surpreendente uma vez que E se trata de um parâmetro elástico.

Pode-se concluir que os parâmetros com maiores valores de CS na gama de deformação plástica cíclica, para materiais com encruamento cinemático puro, são exatamente os mesmos que no *ratcheting strain* cíclico.

4.1.2. Materiais com Encruamento Isotrópico + Cinemático (Misto)

As Figuras 4.4–4.6 apresentam os resultados do coeficiente de sensibilidade (CS) na gama de deformação plástica, nos quinto e décimo ciclos, para os materiais 4, 5 e 6, com encruamento isotrópico + cinemático (misto), de acordo com os carregamentos 1 e 3. Os resultados análogos ao carregamento 2 encontram-se no APÊNDICE C.

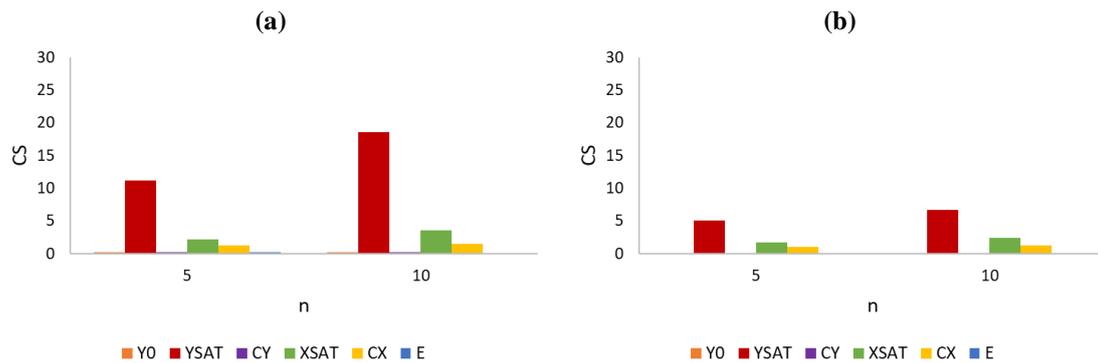


Figura 4.4 – Gráficos CS - n na gama de deformação plástica para o material 4: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

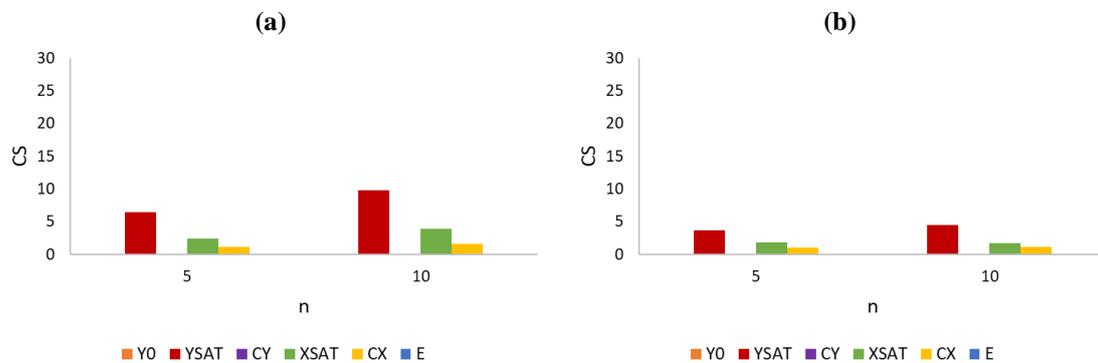


Figura 4.5 – Gráficos CS - n na gama de deformação plástica para o material 5: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

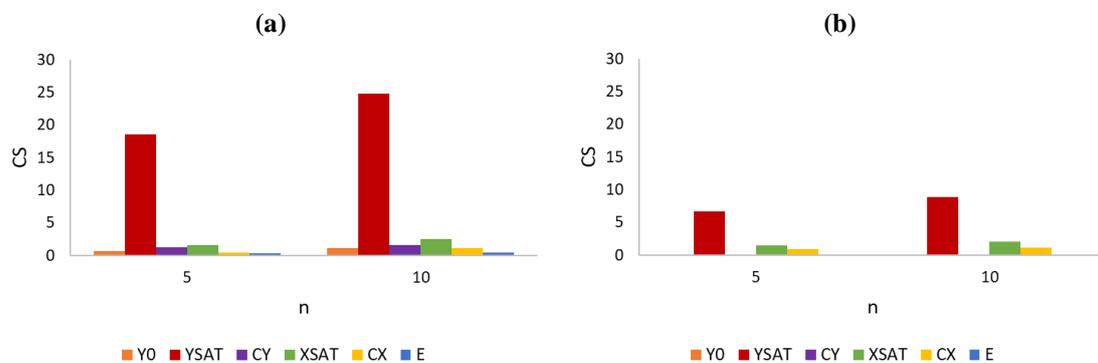


Figura 4.6 – Gráficos CS - n na gama de deformação plástica para o material 6: **(a)** segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]; **(b)** segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N].

Conclui-se que os parâmetros cuja variação tem maior impacto na gama de deformação plástica cíclica são a tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}), a tensão de saturação cinemática (X_{SAT}) e a velocidade de saturação cinemática (C_X). A tensão limite de elasticidade (Y_0), a velocidade de saturação isotrópica (C_Y) e o módulo de elasticidade (E) apresentam uma influência reduzida. Estas conclusões coincidem para os três materiais em estudo, independentemente da carga aplicada e do respetivo ciclo.

Pode-se confirmar que, para os materiais com encruamento misto, os parâmetros com maior influência na gama de deformação plástica cíclica são precisamente os mesmos do estudo do *ratcheting strain* cíclico.

4.2. Relação entre a Gama de Deformação Plástica Cíclica e o *Ratcheting Strain* Cíclico

É interessante perceber se existe alguma relação ou tendência entre os valores da gama de deformação plástica cíclica ($\Delta\epsilon_p$) e do *ratcheting strain* cíclico ($\delta\epsilon$). Na Figura 4.7 representam-se os valores de $\Delta\epsilon_p$ versus $\delta\epsilon$ para todos os parâmetros estudados, tipos de encruamento e carregamentos aplicados. Por observação da mesma constata-se que, de facto, existe uma tendência ou gama de valores bem definida. O aumento do *ratcheting strain* cíclico é acompanhado pelo aumento da deformação plástica cíclica. Tong *et al.* (2013) também verificaram que o *ratcheting strain* estava relacionado com a deformação plástica acumulada.

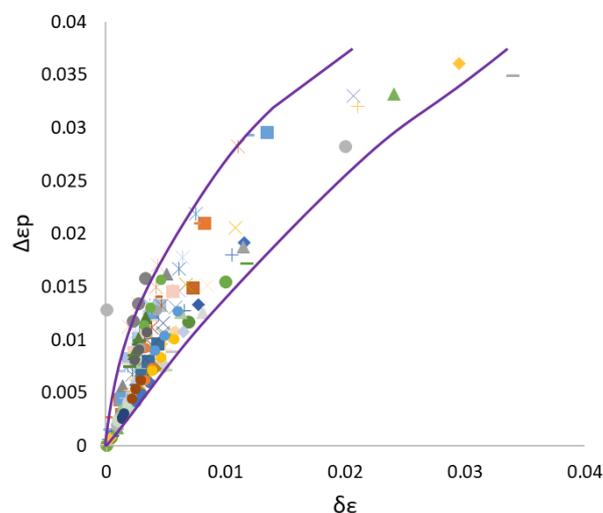


Figura 4.7 – Relação entre a gama de deformação plástica e o ratcheting strain.

5. TEORIA DA FADIGA

5.1. Modos de Falha

A falha de um elemento mecânico pode ser entendida como um evento que se traduz na incapacidade do mesmo cumprir a função que lhe foi destinada. A forma como esta acontece depende de fatores como: a geometria do componente, as propriedades do material constituinte, o tipo de solicitações a que se encontra sujeito, as condições do ambiente envolvente, o tempo de uso e os cuidados de manutenção. Os modos de falha podem categorizar-se como:

- I. **Independentes do tempo de serviço:** este em nada afeta a probabilidade de ocorrência da falha. É originado por cargas de magnitude excessiva ou picos de solicitação, levando à rotura ou empenamento. Servem de exemplo a fratura, dúctil ou frágil, e a flambagem;
- II. **Dependentes do tempo de serviço:** este influencia a possibilidade de existir uma falha. O desgaste e o envelhecimento, que acompanham o componente, avolumam a degradação e eventual perda de propriedades, até que ocorra rotura. São exemplo: a fratura por corrosão, o desgaste, a fluência e a fadiga.

O fenómeno de fadiga é responsável por 80% a 90% dos casos de falha prematura em componente mecânicos, durante o tempo de serviço (Branco, Ferreira, Costa & Ribeiro, 2012), o que fundamenta o interesse e a importância do seu estudo.

5.2. Fenómeno de Fadiga

A fadiga é um tipo de falha mecânica causada por um carregamento cíclico de amplitude de tensão ou deformação constante, ou variável, que promove a propagação gradual de uma ou várias fendas até à rotura do componente por fratura, frequentemente súbita. A fratura resulta da incapacidade da secção residual (ainda não abrangida pela fenda) resistir aos níveis de tensão aplicados, por apresentar uma dimensão substancialmente reduzida. A magnitude das solicitações cíclicas é normalmente muito inferior à necessária para que se verifique rotura em carregamento estático.

O fenómeno de rotura, associada à fadiga uniaxial, embasa na seguinte sequência de fases:

- I. **Iniciação:** geralmente ocorre à superfície de zonas com elevada concentração de tensões, naturalmente mais suscetíveis de deformar plasticamente. Dá-se a nucleação e posterior crescimento microscópico da fenda, seguidos pelo aparecimento de linhas de escorregamento com elevada densidade de deslocações, de carácter irreversível e orientadas 45° relativamente à direção de carga. A presença de barreiras microestruturais é responsável pelo crescimento lento da fenda;
- II. **Propagação:** a formação de planos de deslizamento, junto à extremidade da fenda, leva a que esta se difunda perpendicularidade à direção da carga, o que aumenta gradualmente a velocidade de propagação;
- III. **Fratura final:** ao atingir uma dimensão crítica, a fenda propaga-se de modo instável e acelerado até à rotura do componente.

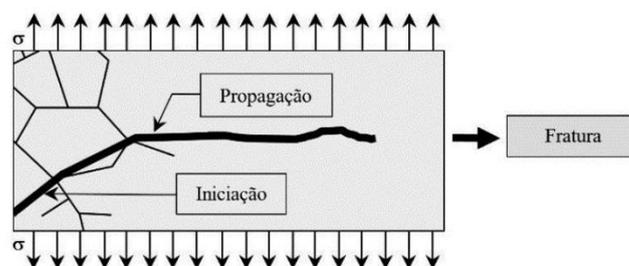


Figura 5.1 – Ilustração das etapas características de fratura por fadiga. Adaptado de Rodrigues (2016).

Irwin (1958) iniciou o estudo da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE), essencial para a compreensão e quantificação da propagação de fendas. Esta abordagem assume que todo e qualquer componente possui fendas e defende que a magnitude das tensões (σ) na frente da extremidade da fenda pode ser formulada em função do fator de intensidade de tensão (K). Este parâmetro quantifica a intensidade de tensão originada pela existência da fenda e pode ser expresso matematicamente como:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (5.1)$$

em que Y representa o efeito da geometria do componente e a o comprimento da fenda. Quando K atinge o seu valor máximo ou crítico (K_{1C}), também conhecido como tenacidade à fratura, ocorre rotura instável do material. Num carregamento cíclico, a gama do fator de intensidade de tensão (ΔK) é estabelecida por:

$$\Delta K = K_{MAX} - K_{MIN} \quad (5.2)$$

onde K_{MAX} e K_{MIN} simbolizam, respetivamente, os valores máximo e mínimo do fator de intensidade de tensão durante um ciclo de carregamento.

As curvas $da/dN-\Delta K$ estudam a propagação de fendas por fadiga, segundo a metodologia MFLE. Estas curvas relacionam a taxa de crescimento de uma fenda (da/dN) com a gama do fator de intensidade de tensão (ΔK).

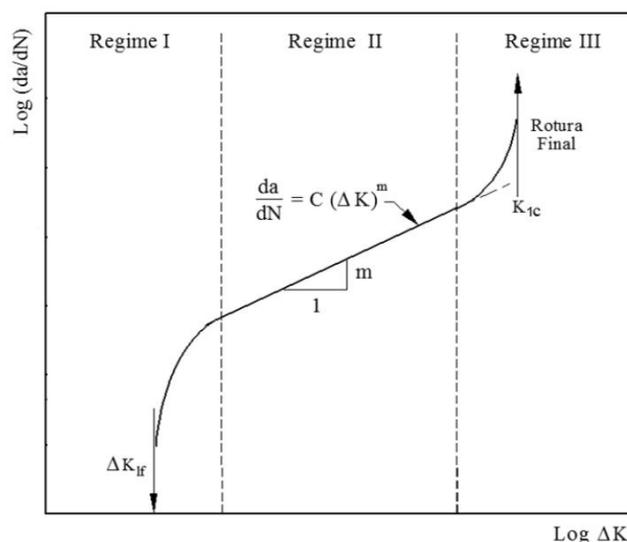


Figura 5.2 – Curva típica $da/dN-\Delta K$.

Os três regimes típicos do comportamento de propagação de fenda encontram-se devidamente identificados na Figura 5.2:

- ♦ **Regime I:** associado à fase de iniciação de crescimento da fenda. O valor limite inferior traduz o limiar de propagação de fendas por fadiga, ΔK_{If} , abaixo do qual não há propagação.
- ♦ **Regime II:** relativo à fase de propagação da fenda, em que apresenta um crescimento estável. A relação linear entre a taxa de crescimento e a gama do fator de intensidade de tensão, numa escala logarítmica, é descrita por uma expressão sugerida por Paris e Erdogan (1963), conhecida como Lei de Paris Erdogan:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (5.3)$$

que apresenta duas constantes (C e m) obtidas experimentalmente, que dependem do material, da razão de tensões e das condições ambientais;

- ♦ **Regime III:** quando K_{MAX} atinge um valor próximo da tenacidade à fratura (K_{1C}), verifica-se uma aceleração instável do crescimento da fenda que só termina com a fratura final do material.

5.3. Limitações das Curvas $da/dN-\Delta K$ e Soluções

As curvas $da/dN-\Delta K$ assumem que a propagação de fendas é controlada pelo campo linear elástico (Rice, 1967). No entanto, o mecanismo de propagação de fendas depende de fenómenos não lineares e irreversíveis. Neste sentido e uma vez que o fator de intensidade de tensão (K) é um parâmetro de carácter elástico, coloca-se a questão se será o mais adequado para o estudo da propagação de fendas por fadiga.

Existe uma extensa literatura centrada nas curvas $da/dN-\Delta K$, pelo que não devem ser desconsideradas. De facto, estas apresentam um conjunto de vantagens: ΔK pode ser facilmente calculado numericamente, existindo inúmeros trabalhos focados em geometrias distintas; ΔK é muito prático, permitindo que os investigadores se centrem na determinação experimental de da/dN ; a linearidade da curva $da/dN-\Delta K$ no regime II é muito apreciada. Contudo, é possível identificar algumas limitações, como: a incapacidade

de prever a influência da tensão média (com peso acrescido na velocidade de propagação de fendas, em especial nos regimes I e II) e da história de carga, a incoerência dimensional e ainda a dificuldade de determinação do valor do limiar de propagação de fendas (ΔK_{lf}).

Têm sido apresentados diferentes modelos para tentar contornar estas limitações, nomeadamente os conceitos de “fenómeno de fecho de fenda”, “fecho de fenda parcial”, *T-stress* e ainda o modelo CJP. Não tendo resolvido o problema, a incapacidade de responder a algumas questões resultou num interesse de investigação de parâmetros não lineares eficientes para quantificar a deformação plástica na extremidade de fenda.

5.4. Parâmetros Não Lineares da Extremidade de Fenda

A Figura 5.3 ilustra a extremidade de uma fenda, onde é possível identificar três zonas distintas na sua frente (Paul & Tarafder, 2013), nomeadamente:

- I. **Zona plástica cíclica:** onde surge um ciclo de histerese cuja forma e tamanho dependem da razão de tensões e do valor de ΔK . Os parâmetros normalmente associados a esta zona são a gama de deformação plástica cíclica ($\Delta \varepsilon_p$), o raio da zona plástica inversa (r_{pc}), a dissipação de energia plástica total por ciclo e, finalmente, o deslocamento de abertura da extremidade de fenda (*CTOD*);
- II. **Zona plástica monótona:** onde ocorre deformação plástica durante o carregamento e descarga elástica após o mesmo;
- III. **Zona elástica:** existe apenas deformação elástica pura.

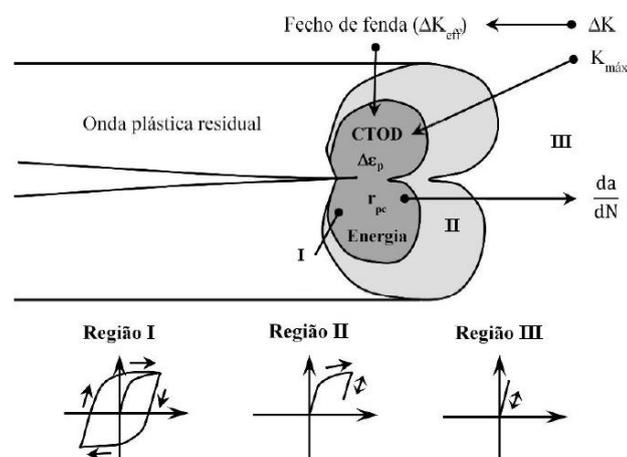


Figura 5.3 – Zonas da extremidade de fenda, parâmetros e curvas tensão–deformação. Adaptado de Sousa (2014).

5.4.1. Deslocamento de Abertura da Extremidade de Fenda

Wells (1961) observou a ocorrência de arredondamento da extremidade de fenda, devido à deformação plástica, tendo verificado um acréscimo proporcional da tenacidade do material. Assim, propôs o deslocamento de abertura da extremidade de fenda (*CTOD*) como um parâmetro relevante na caracterização do comportamento à fratura de materiais dúcteis. O *CTOD* consiste na distância física entre as duas superfícies de fratura de uma fenda, medido próximo da extremidade de fenda.

Existem duas interpretações diferentes, mas equivalentes, deste parâmetro, desde que o arredondamento da extremidade de fenda apresente um formato semicircular:

Figura 5.4 (a) Deslocamento normal ao plano da fenda relativamente à posição original da extremidade de fenda;

Figura 5.4 (b) Distância entre dois pontos definidos pela intersecção das faces de fenda com duas linhas (+45° e -45°) com origem na extremidade de fenda.

Em estudos numéricos segundo o modelo de elementos finitos, o deslocamento de abertura de fenda é, usualmente, definido de acordo com a primeira definição. O primeiro nó atrás da extremidade de fenda é normalmente considerado para medição do *CTOD*.

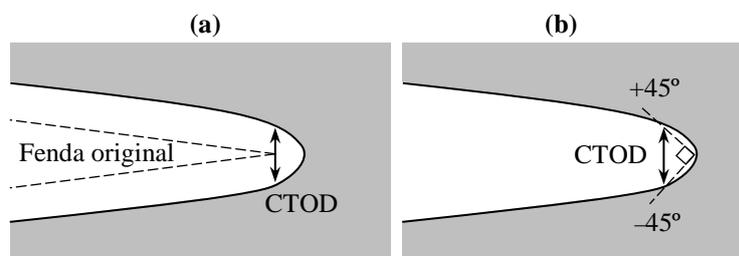


Figura 5.4 – Ilustração das diferentes interpretações de CTOD explicadas: **(a)** e **(b)**. Adaptado de Rodrigues (2016).

A determinação do valor de *CTOD* deve ser feita com o máximo de rigor. A sobrestimativa do seu valor crítico pode conduzir a uma propagação instável e, conseqüentemente, a uma falha catastrófica. Por sua vez, a respetiva subestimativa, embora permita a conservação, limita em demasia o tamanho de defeitos, resultando em serviços de manutenção desnecessários.

Pelloux (1970) provou, através do método de microfractografia, que o conceito de *CTOD* permite a previsão da taxa de crescimento da fenda a partir do espaçamento das estrias de fadiga. Bates e Santhanam (1980) relacionaram matematicamente o deslocamento de abertura de fenda com a deformação na extremidade do entalhe. Mais tarde, Nicholls (1994) propôs uma relação polinomial entre a taxa de crescimento de fenda e o *CTOD*:

$$\frac{da}{dN} = b(CTOD)^{1/p} \quad (5.4)$$

Tvergaard (2004) e, recentemente, Pippin e Grosinger (2013) indicaram uma relação linear entre da/dN e a gama de *CTOD* para materiais com elevada ductilidade:

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta CTOD) \quad (5.5)$$

A medição experimental do *CTOD* revela-se uma tarefa difícil, pelo que, é, geralmente, efetuada em zonas ligeiramente afastadas da extremidade de fenda. Existem duas técnicas bastante utilizadas: a *Digital Image Correlation* (DIC) e a *Compliance*. Devido à dificuldade associada à medição experimental do *CTOD*, como referido anteriormente, é usual recorrer a programas de simulação numérica para a realização dos mais variados estudos.

5.5. Estudo da Propagação de Fendas com base no CTOD

Antunes (2016) propôs uma nova abordagem em trabalhos orientados para o estudo da propagação de fendas, por fadiga, onde substitui a utilização do parâmetro gama do fator de intensidade de tensão (ΔK) pela gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda ($\Delta CTOD_p$), com o intuito de obter curvas da/dN em função deste último parâmetro mencionado. Esta abordagem baseia-se nos pressupostos:

- I. A propagação de fendas por fadiga está relacionada com a deformação plástica na ponta da fenda;
- II. O $\Delta CTOD_p$ é capaz de quantificar o nível desta deformação plástica.

O grupo de investigação tem vindo a desenvolver diferentes estudos centrados no *CTOD*, nomeadamente:

- ◆ Estudo da propagação de fendas nas ligas de alumínio 6082-T6 (Rodrigues, 2016);
- ◆ Estudo do limiar de fadiga (Loureiro, 2016);
- ◆ Estudo da propagação de fendas nas ligas de alumínio 7050 e 2050-T8 (Serrano, 2017);
- ◆ Efeito dos parâmetros numéricos no valor de *CTOD* e nas previsões de da/dN (Simões, 2017);
- ◆ Estudo da propagação de fendas no aço inoxidável 304L (Ferreira, 2017).

Porém, não foram ainda feitos estudos centrados no efeito dos parâmetros do material. De facto, o *CTOD* abriu uma janela de oportunidade para estudar numericamente o efeito destes parâmetros na velocidade de propagação de fendas por fadiga. Deste modo, é possível aproveitar as vantagens do método dos elementos finitos, nomeadamente, a possibilidade de desenvolver estudos paramétricos em que se isola o efeito de cada um dos parâmetros e de identificar os mecanismos subjacentes aos efeitos observados. Este estudo alarga a análise de provetes lisos, feita nos Capítulos 2–4, a provetes fissurados. Pretende-se verificar se as conclusões obtidas para provetes lisos se mantêm em provetes fissurados. Os provetes fissurados envolvem propagação de fenda e o fenómeno de fecho de fenda, pelo que a sua complexidade é ainda maior do que a observada nos provetes lisos. Salientar ainda que experimentalmente não é fácil fazer estudos paramétricos centrados no efeito dos parâmetros, pois não se conseguem fazer variar facilmente os parâmetros do material.

6. EFEITO DOS PARÂMETROS DO MATERIAL NO $\Delta CTOD_p$

6.1. Procedimento Numérico

6.1.1. Programa de Elementos Finitos

O estudo do efeito da variação dos parâmetros do material no CTOD foi feito recorrendo a simulações numéricas baseadas no método de elementos finitos. Em suma, a estrutura é dividida em vários elementos de forma geométrica e dimensão finita e é utilizada a solução de cada um para obter o comportamento do todo (Rosa, 2002). Estas simulações foram realizadas com recurso ao programa DD3IMP e diferem claramente, em termos de complexidade, das realizadas inicialmente para o *ratcheting strain* cíclico e para a gama de deformação plástica cíclica. É necessário ter uma malha bastante refinada na zona da extremidade da fenda para simular, adequadamente, os campos de deformação e tensão, e é necessário fazer propagação de fenda.

Tabela 6.1 – Ficheiros de entrada e saída do programa DD3IMP.

Ficheiros	Designação	Caracterização
Entrada	mesh.dat	Malha de elementos finitos
	mater1.dat	Propriedades do material
	phase.dat	Condições de solicitação
	GaussPoints.dat	Pontos de Gauss onde se pretende obter a curva tensão–deformação
	bcon.dat	Condições de fronteira
	input.dat	Parâmetros de controlo do método numérico
	tool.dat	Ferramenta que garante a aplicação da solicitação e a simulação do contacto das faces de fenda

Saída	#1_enti1.res	Resultados das forças aplicadas para cada incremento de fenda
	bloco100.ufo	Informação global no bloco 100
	Fcont.dd3	Forças de contacto para a carga mínima
	NosFenda2.dat	Coordenadas dos nós ao longo do plano de simetria para os diferentes níveis de solicitação
	Gpoint	Valores nos pontos de Gauss selecionados no ficheiro de entrada em cada um dos elementos antes de executar o <i>software</i>

Inicialmente, é necessário fornecer ao *software* toda a informação relativa aos parâmetros numéricos e físicos através de ficheiros de entrada. O programa é então executado, realizando 100 propagações de fenda com 5 ciclos de carregamento entre cada propagação. Por fim, são exportados os ficheiros de saída que contêm todos os dados associados às simulações decorridas. Na Tabela 6.1 são identificados e caracterizados todos os ficheiros de entrada e de saída. O deslocamento de abertura da extremidade de fenda e a carga aplicada são obtidos através dos ficheiros de saída “NosFenda2.dat” e “#1_enti1.res”, respetivamente.

6.1.2. Metodologia

A metodologia de trabalho aplicada no presente estudo paramétrico assemelha-se com a seguida nos Capítulos 3 e 4. Primeiramente, foram aplicados incrementos e decrementos de 15% em cada parâmetro do material. Após decorridas as simulações, quer para o material de referência quer para o material com a variação de parâmetro, procedeu-se ao tratamento de dados para a determinação dos valores de $\Delta CTOD_p$ e do coeficiente de sensibilidade (CS), parâmetro que reflete o efeito da variação paramétrica nos valores de $\Delta CTOD_p$.

6.1.3. Determinação de $\Delta CTOD_p$ e CS

A Figura 6.1 ilustra uma curva típica de $CTOD$ versus carga (F).

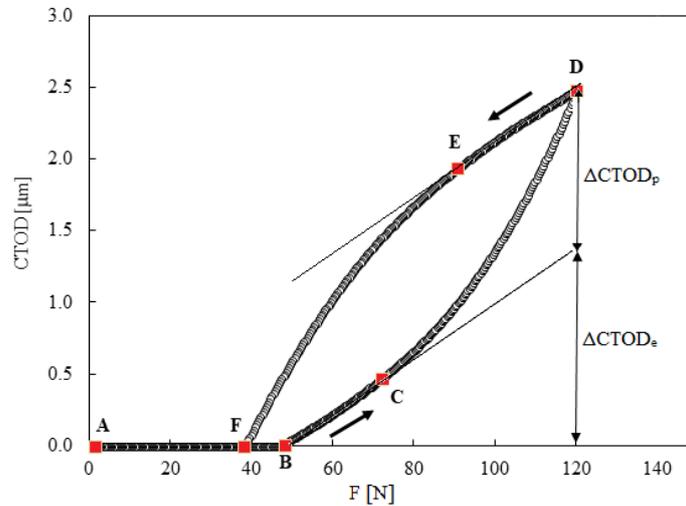


Figura 6.1 – Curva típica $CTOD$ - F .

Existe uma gama de força em que a fenda permanece fechada ($A \rightarrow B$). No momento da abertura de fenda (B), o $CTOD$ assume um valor diferente de zero. A reta que une B e C define uma linearidade entre a força e o $CTOD$, isto é, a fenda apresenta um comportamento linear elástico. O cálculo da componente elástica do $CTOD$ é feito pela Equação 6.1:

$$CTOD_e = m(F - F_B) \quad (6.1)$$

em que m , F e F_B simbolizam o declive da reta que une B e C , a força no ponto de medição e a força remota no ponto de início de abertura de fenda, respetivamente.

O programa DD3IMP apenas fornece valores do deslocamento de abertura de fenda, ou seja, da componente total de $CTOD$. O cálculo da componente plástica do $CTOD$ baseia-se na expressão:

$$CTOD_p = CTOD - CTOD_e \quad (6.2)$$

Após atingido o ponto de carga máxima (D), os valores de $CTOD$ diminuem com a redução gradual da carga aplicada ($D \rightarrow F$). Existe uma fase de carácter linear ($D \rightarrow E$) e outra não linear ($E \rightarrow F$). De F até ao ponto de carga mínima (A), a fenda mantém-se fechada. O valor da carga no ponto de abertura de fenda (B) é ligeiramente superior ao de F , onde ocorre o fecho de fenda.

Resumidamente, ambas as fases de carga e descarga apresentam, inicialmente, um comportamento linear elástico (B→C e D→E) seguido por um comportamento não linear plástico (C→D e E→F). O comportamento elástico é idêntico nas fases de carga e descarga, ou seja, o declive de valores de $CTOD$ em função de F é igual de B a C e de D a E. A distância vertical entre as retas tangentes à deformação elástica permite-nos determinar a componente plástica de $\Delta CTOD$ (ver Figura 6.1).

O cálculo do coeficiente de sensibilidade foi feito através da Equação 6.3:

$$CS = \frac{|\partial \Delta CTOD_p / \partial P|}{\Delta CTOD_{p_{ref}} / P_{ref}} \quad (6.3)$$

na qual $\Delta CTOD_{p_{ref}}$ e P_{ref} representam os valores da gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda e do parâmetro a estudar, respetivamente, do material de referência. O símbolo $|\partial \Delta CTOD_p / \partial P|$ representa o módulo da derivada parcial da curva de tendência de $\Delta CTOD_p$ em função de P e expressa a evolução da curva $\Delta CTOD_p - P$.

6.1.4. Geometria, Material e Carregamento

Utilizou-se um provete com uma fenda no centro, designado M(T), com uma geometria 3D de acordo com a norma ASTM E647 (2015). As dimensões encontram-se representadas na Figura 6.2, com uma espessura de 0,2 mm e um comprimento de fenda inicial (a_0) igual a 5 mm. O provete referido foi seleccionado por ser normalizado.

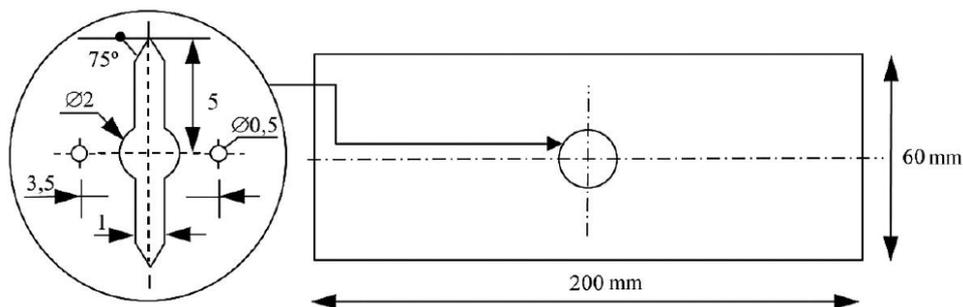


Figura 6.2 – Geometria do provete M(T) e detalhe da fenda [mm].

A deformação plástica que ocorre na extremidade de fenda por ação de carregamento cíclico possui uma forte correlação com o fenómeno de fecho de fenda induzido por deformação plástica. Posto isto, torna-se fulcral modelar corretamente o comportamento elastoplástico do material, através das mesmas leis utilizadas nos estudos

dos Capítulos 3 e 4, nomeadamente a lei de Voce para o encruamento isotrópico (ver Equação 2.4) e a lei de Armstrong & Frederick para o encruamento cinemático (ver Equação 2.5).

Relativamente aos materiais, foram seleccionados os materiais 1 (com encruamento cinemático puro), 4, 5 e 6 (com encruamento misto), também utilizados nos estudos dos Capítulos 3 e 4, sujeitos ao mesmo carregamento, nomeadamente: $F_{MAX} = 150\text{ N}$ e $F_{MIN} = 1,5\text{ N}$ ($R = -0,01$).

6.1.5. Modelo de Elementos Finitos

O provete é geometricamente simétrico (ver Figura 6.2). Por este motivo considerou-se apenas uma fração equivalente a 1/8 do mesmo, nas simulações, de forma a reduzir o peso numérico associado sem que as previsões obtidas sejam afetadas. As condições de fronteira estabelecidas e o carregamento imposto encontram-se ilustrados na Figura 6.3.

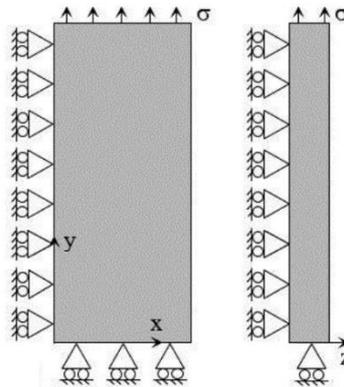


Figura 6.3 – Condições de fronteira e de carregamento.

A malha usada (ver Figura 6.4) possui 6639 elementos isoparamétricos de 8 nós (lineares), perfazendo um total de 13586 nós. Para garantir uma maior exatidão de resultados com um peso numérico das simulações aceitável definiu-se um refinamento superior na zona da extremidade de fenda ($8\mu\text{m}$), já que se trata da zona com maior interesse neste estudo, e um menor refinamento na zona mais afastada da fenda. A malha 3D foi obtida através da extrusão da malha 2D na direção da espessura (com apenas uma camada de elementos).

Nas simulações executadas, uma propagação de fenda com $8\mu\text{m}$ equivale a cinco ciclos de carga e ocorre sempre à carga mínima, reduzindo eventuais problemas de convergência. Na totalidade são efetuadas 100 propagações, correspondendo a um incremento total de fenda de $800\mu\text{m}$.

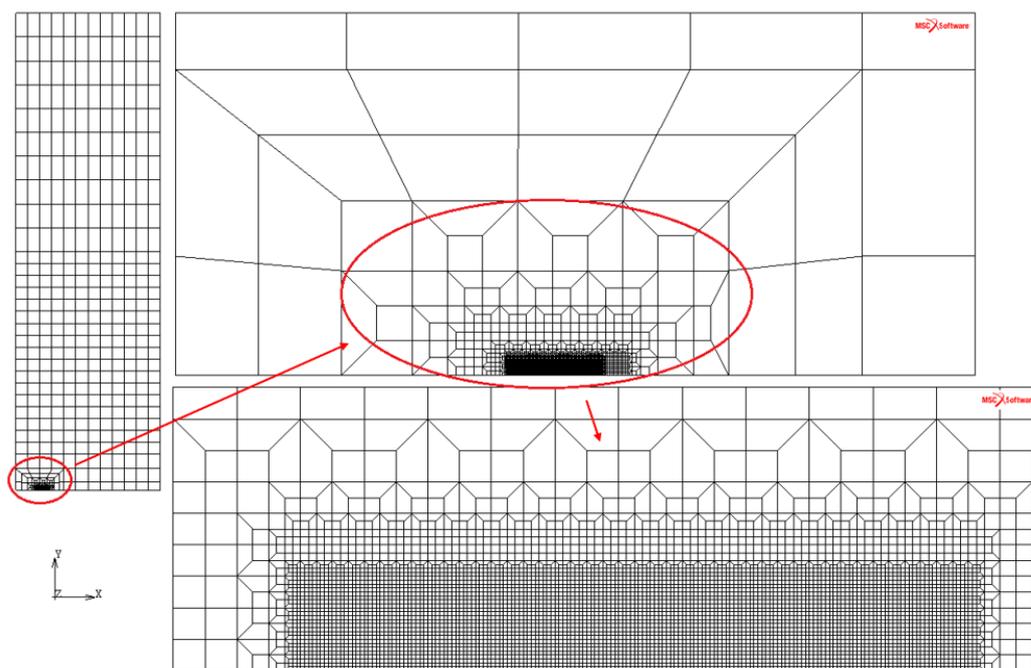


Figura 6.4 – Malha de Elementos Finitos.

6.2. Resultados Numéricos

6.2.1. Materiais com Encruamento Cinemático Puro

Os resultados do coeficiente de sensibilidade (CS) de cada parâmetro (P) à variação de $\Delta CTOD_p$, para o material 1, encontram-se representados na Figura 6.5.

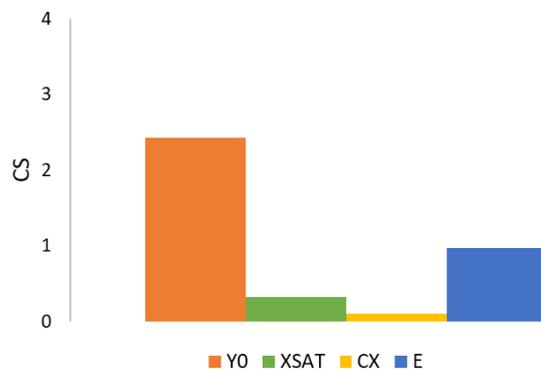


Figura 6.5. – Gráfico CS-P no $\Delta CTOD_p$ para o material 1.

Conclui-se que os parâmetros com maior influência na gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda, para o material 1, são a tensão limite de elasticidade (Y_0) e o módulo de elasticidade (E). A tensão de saturação cinemática (X_{SAT}) apresenta um valor mais baixo de CS e a velocidade de saturação cinemática (C_X) praticamente não influencia os valores de $\Delta CTOD_p$.

Os parâmetros com maior impacto em $\Delta CTOD_p$ são os mesmos que obtidos nos estudos do *ratcheting strain* cíclico e da gama de deformação plástica cíclica, com a exceção do parâmetro módulo de elasticidade (E), que apresenta uma influência bastante significativa no presente estudo.

6.2.2. Materiais com Encruamento Isotrópico + Cinemático (Misto)

Para o material 4, os resultados do coeficiente de sensibilidade (CS) de cada parâmetro (P) à variação de $\Delta CTOD_p$ encontram-se representados na Figura 6.6.

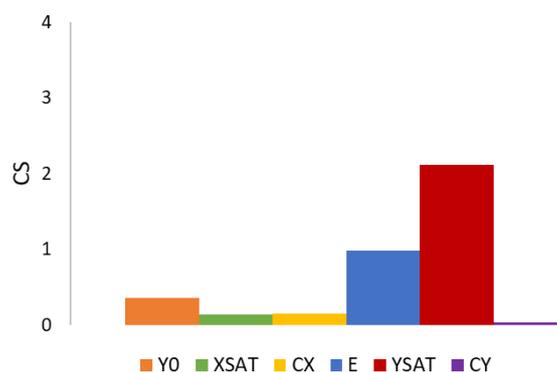


Figura 6.6. – Gráfico CS-P no $\Delta CTOD_p$ para o material 4.

A observação da Figura 6.6 permite concluir que a tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}) e o módulo de elasticidade (E) são os parâmetros com maior influência na gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda, para o material 4. À tensão limite de elasticidade (Y_0), à tensão de saturação cinemática (X_{SAT}) e à velocidade de saturação cinemática (C_X) correspondem valores menores de coeficiente de sensibilidade. A velocidade de saturação isotrópica (C_Y) apresenta um valor de CS bastante pequeno.

Comparativamente aos resultados obtidos nos estudos do *ratcheting strain* cíclico e da gama de deformação plástica cíclica, os obtidos no presente estudo são aproximadamente semelhantes. O parâmetro com maior impacto no $\Delta CTOD_p$ é a tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}). A tensão de saturação cinemática (X_{SAT}) e a velocidade de saturação cinemática (C_X) apresentam valores de CS relativamente baixos. A velocidade de saturação isotrópica (C_Y) tem uma influência muito pequena em $\Delta CTOD_p$.

Os parâmetros que apresentam uma clara distinção de resultados (do presente capítulo, para os Capítulos 3 e 4) são a tensão limite de elasticidade (Y_0) e o módulo de elasticidade (E). Nos estudos anteriores, ambos os parâmetros apresentam valores de CS relativamente baixos, à semelhança de C_Y . No entanto, no estudo deste capítulo, Y_0 apresenta uma influência ligeiramente superior e E destaca-se como o segundo parâmetro com maior impacto em $\Delta CTOD_p$.

A Figura 6.7 representa os resultados do coeficiente de sensibilidade (CS) de cada parâmetro (P) à variação de $\Delta CTOD_p$, para o material 5.

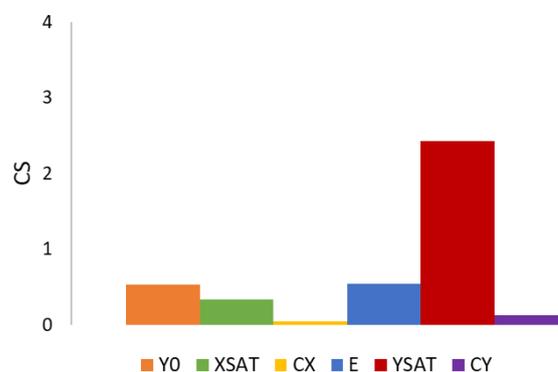


Figura 6.7. – Gráfico CS-P no $\Delta CTOD_p$ para o material 5.

Conclui-se que, no material 5, o parâmetro que mais influencia a gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda é a tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}). Os parâmetros tensão limite de elasticidade (Y_0), módulo de elasticidade (E) e tensão de saturação cinemática (X_{SAT}) também apresentam valores de coeficiente de sensibilidade significativos, no entanto, muito inferiores ao de Y_{SAT} . Os parâmetros menos significativos são as velocidades de saturação isotrópica (C_Y) e cinemática (C_X).

Comparando estes resultados com os obtidos nos estudos do *ratcheting strain* cíclico e na gama de deformação plástica cíclica, para o material 5, existem algumas semelhanças e diferenças. De facto, os parâmetros Y_{SAT} , X_{SAT} e C_Y apresentam uma relevância semelhante. Os parâmetros que mais diferem em termos de influência são: Y_0 e E , que no presente estudo destacam-se com valores de coeficiente de sensibilidade médios, num enquadramento geral; C_X , que pouco afeta $\Delta CTOD_p$, contrariamente a $\delta\varepsilon$ e a $\Delta\varepsilon_p$.

Os resultados do coeficiente de sensibilidade (CS) de cada parâmetro (P) à variação de $\Delta CTOD_p$, para o material 6, encontram-se representados na Figura 6.8.

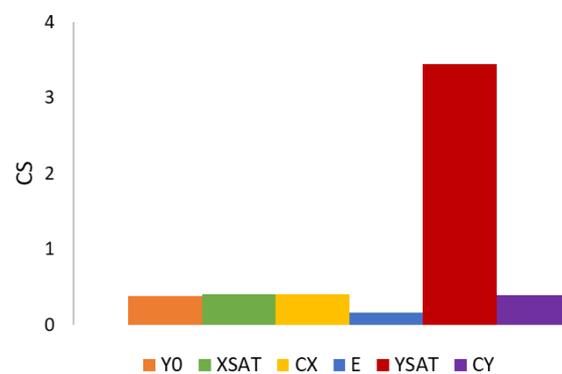


Figura 6.8. – Gráfico CS-P no $\Delta CTOD_p$ para o material 6.

Os resultados obtidos para o material 6 apresentam algumas surpresas. Enquanto que, nos materiais anteriormente estudados, o módulo de elasticidade (E) apresentava valores médio ou altos de CS , no material 6, este representa o parâmetro com menor influência em $\Delta CTOD_p$. A velocidade de saturação isotrópica (C_Y) apresenta valores semelhantes a Y_0 , X_{SAT} e C_X , muito baixos quando comparados com o de Y_{SAT} que, mais uma vez, demonstra ser o parâmetro mais importante no estudo de sensibilidade na gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda.

Tal como nos resultados obtidos nos Capítulos 3 e 4, para o material 6, o parâmetro mais significativo é Y_{SAT} , tanto X_{SAT} como C_X apresentam valores de CS médios, e E apresenta pouca relevância. A diferença consiste em Y_0 e C_Y , que no presente estudo ($\Delta CTOD_p$) têm uma influência maior do que em $\delta\varepsilon$ e $\Delta\varepsilon_p$.

É complicado perceber o porquê da diferença de resultados do parâmetro módulo de elasticidade (E), que, de um modo geral, tanto se pode apresentar como um parâmetro muito relevante (material 4) ou como praticamente irrelevante (material 6). Independentemente do material, a tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}) é o parâmetro mais influente na gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda. Na figura 6.8, por exemplo, pode-se ver que uma variação de 1% em Y_{SAT} provoca uma variação de 3,5% em $\Delta CTOD_p$.

A figura 6.9 estabelece a relação entre os valores do coeficiente de sensibilidade de cada parâmetro dos materiais 1 (da Tabela 3.1), 4, 5 e 6 (da Tabela 3.2) no estudo do *ratcheting strain* (Capítulo 3), para o ciclo 5 e segundo o carregamento 2 ($F_{MAX} = 150 N$ e $F_{MIN} = -100 N$), ou seja, em provetes lisos, e os valores do coeficiente de sensibilidade de cada parâmetro dos mesmos materiais no estudo do $\Delta CTOD_p$, isto é, para provetes fissurados. Genericamente, há uma tendência para o aumento da sensibilidade nos provetes fissurados com o aumento da sensibilidade nos provetes não fissurados, com a exceção do módulo de elasticidade, que tem uma influência bastante baixa nos provetes não fissurados.

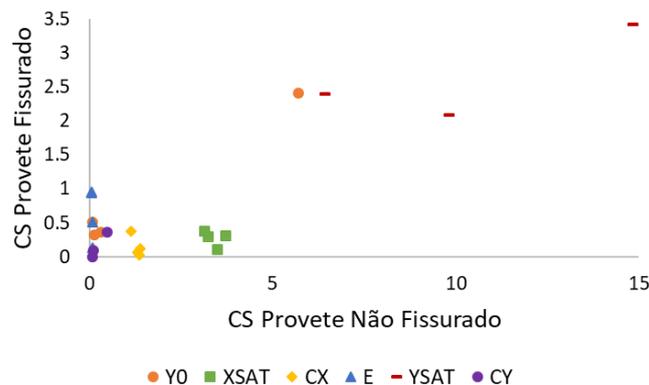


Figura 6.9. – Gráfico CS provetes fissurados versus CS provetes não fissurados.

6.3. Estudo de Tendências Paramétricas

Este subcapítulo destina-se ao estudo da variação dos valores da gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda, para gamas de variação paramétrica mais alargadas. Pretende-se tentar perceber de que forma variam os parâmetros, isto é, a sua tendência (linear, exponencial, polinomial, etc).

Existem várias e distintas referências de modelos de propagação de fenda na literatura, tal como indicado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2. – Modelos de propagação de fenda.

Schwalbe (1974)	$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta K^2}{4\pi(1+n)\sigma_{ced}^2} \left(\frac{2\sigma_{ced}}{\varepsilon_f \cdot E} \right)^{1+n}$
Jablonski, Carisella e Pelloux (1977)	$\frac{da}{dN} = \frac{0.0338(1-\nu^2)\Delta K^2}{\varepsilon_f \sigma_{cedc} E}$
Chand e Garg (1985)	$\frac{da}{dN} = \frac{2.2(U\Delta K)^2}{\pi n \sigma_{ced}^n E^{n+1} \varepsilon_f^{1+n}}$
	$\frac{da}{dN} = \frac{0.15(U\Delta K)^2 \sigma_{ced}}{n \times E \times K_{1c}^2 (1+R)^{3.8}}$
Skelton, Vilhelmsen e Webster (1998)	$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta K^2 (1-\nu)}{2\pi \times E \times Wc}$

Na Tabela 6.2, σ_{cedc} é a tensão de cedência cíclica, ε_f é a deformação de fratura, n é um expoente de encruamento, E é o módulo de elasticidade, K_{1c} é a tenacidade à fratura, R é a razão de tensões e Wc representa o valor crítico da densidade de energia acumulada.

Foram estudados os parâmetros: tensão limite de elasticidade (Y_0), tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}), velocidade de saturação isotrópica (C_Y) e o módulo de elasticidade (E). Foi utilizado, novamente, o provete referido em 6.1.4 com a discretização por elementos finitos explicada em 6.1.5. O material de referência utilizado neste estudo paramétrico é: $Y_0 = 100$, $X_{SAT} = 100$, $C_X = 100$, $E = 100\,000$, $Y_{SAT} = 100$ e $C_Y = 100$ [MPa]. O carregamento aplicado consiste em: $F_{MAX} = 150\,N$ e $F_{MIN} = 1,5\,N$ ($R = -0,01$).

A Figura 6.10 mostra as linhas de tendência dos valores de $\Delta CTOD_p$ versus parâmetro (P). Os pontos triangulares amarelos representam a percentagem efetiva de carga (U) versus parâmetro (P). A Figura 6.11 apresenta a curva $\Delta CTOD_p$ versus o inverso do módulo de elasticidade ($1/E$). A Figura 6.12 apresenta as curvas $CTOD$ versus carga (F) para os vários valores de cada parâmetro.

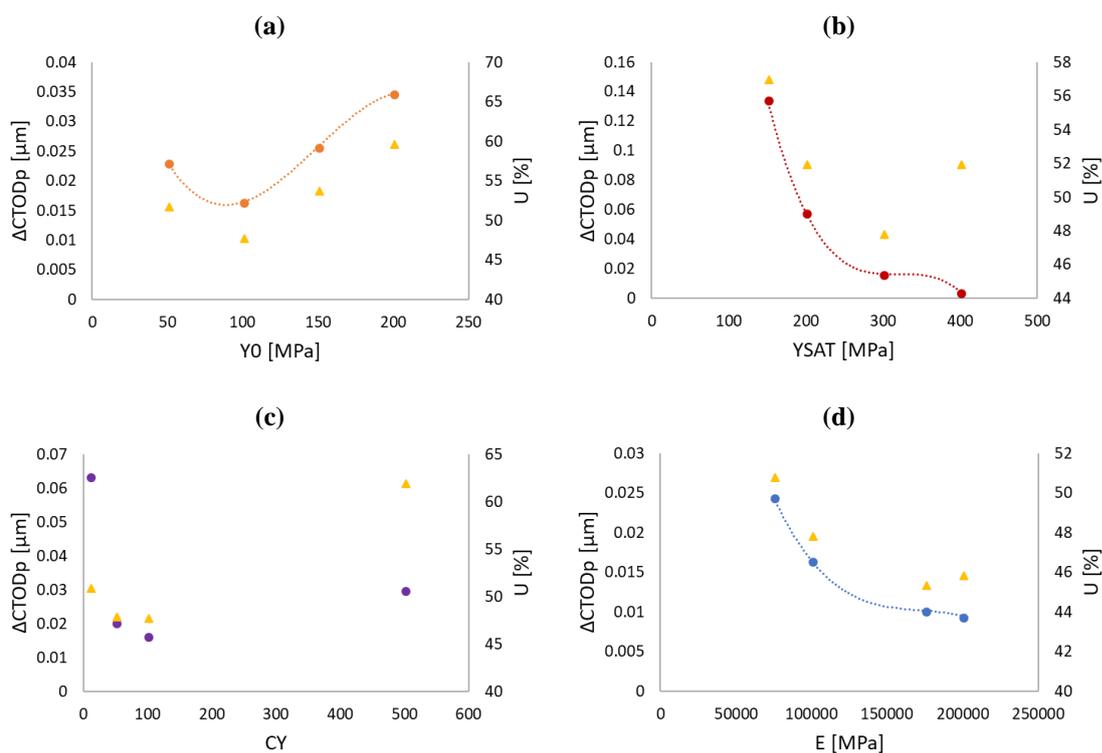


Figura 6.10 – Curvas de tendência $\Delta CTOD_p$ - P : (a) P corresponde a Y_0 ; (b) P corresponde a Y_{SAT} ; (c) P corresponde a C_Y ; (d) P corresponde a E .

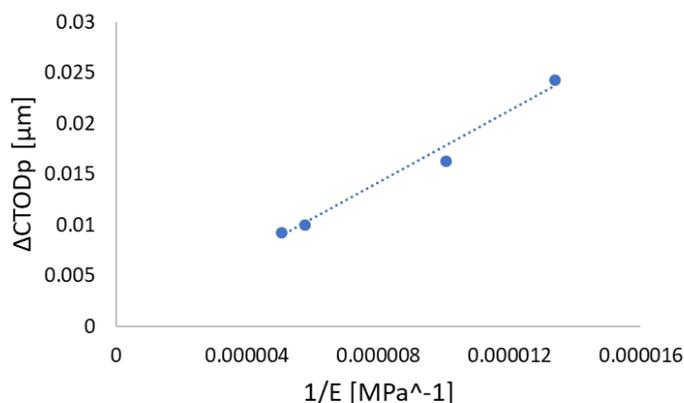


Figura 6.11. – Curva $\Delta CTOD_p$ - $1/E$.

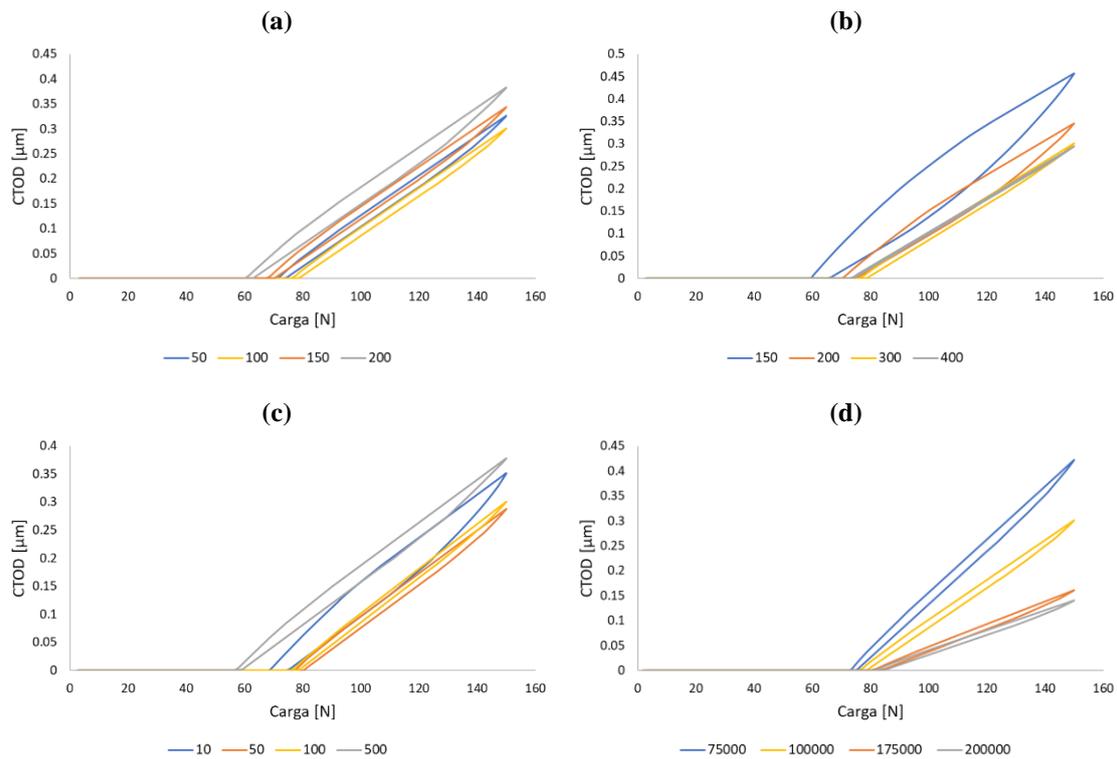


Figura 6.12 – Curvas CTOD–F: **(a)** para Y_0 ; **(b)** para Y_{SAT} ; **(c)** para C_v ; **(d)** para E .

Por observação das Figura 6.10 e 6.12 conclui-se que o reduzido número de pontos e a complexidade das curvas apresentadas impedem de afirmar com clareza o tipo de tendência dos valores de $\Delta CTOD_p$, para cada parâmetro. No entanto, a Figura 6.11 apresenta uma relação linear entre $\Delta CTOD_p$ e o inverso do módulo de elasticidade ($1/E$). Ainda assim, pode afirmar-se que o aumento do módulo de elasticidade (E) faz reduzir $\Delta CTOD_p$ e, assim, da/dN , o que vai de acordo com os modelos de propagação de fenda da Tabela 6.2. O aumento da tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}) que é, recorde-se, um parâmetro muito relevante, faz diminuir $\Delta CTOD_p$. Comparando as evoluções da percentagem efetiva de carga (U) e da gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda ($\Delta CTOD_p$), com os vários parâmetros, pode ainda concluir-se que o efeito das propriedades do material no $\Delta CTOD_p$ está muito relacionado com o fenómeno de fecho de fenda.

7. CONCLUSÕES

Uma vez terminada a presente dissertação, pode afirmar-se que os objetivos inicialmente propostos foram cumpridos.

Do estudo do efeito dos parâmetros no *ratcheting strain* cíclico (Capítulo 3), pode retirar-se as conclusões seguintes. Para materiais com encruamento cinemático puro:

- ♦ Apresentam efeito de amaciamento, independentemente dos parâmetros que o caracterizam e do carregamento aplicado;
- ♦ O *ratcheting strain* cíclico apresenta maior sensibilidade ao parâmetro tensão limite de elasticidade (Y_0) e menor ao módulo de elasticidade (E);
- ♦ A sensibilidade do *ratcheting strain* cíclico aos parâmetros tende a aumentar com a variação de ciclos, sobretudo aos parâmetros tensão limite de elasticidade (Y_0) e tensão de saturação cinemática (X_{SAT}). Este aumento é tanto maior quanto menor o valor, em módulo, da carga mínima (F_{MIN});
- ♦ A sensibilidade para Y_0 diminui quando o valor, em módulo, da carga mínima (F_{MIN}) aumenta;
- ♦ Os valores do *ratcheting strain* cíclico decrescem com o incremento dos parâmetros.

Para os materiais com encruamento isotrópico + cinemático (misto):

- ♦ Apresentam efeito de encruamento, amaciamento ou encruamento seguido de amaciamento consoante os parâmetros que o caracterizam e o carregamento aplicado;
- ♦ O *ratcheting strain* cíclico apresenta maior sensibilidade ao parâmetro tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}) e menor ao módulo de elasticidade (E);
- ♦ A sensibilidade do *ratcheting strain* cíclico aos parâmetros tende a aumentar com a variação de ciclos, sobretudo aos parâmetros tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}), tensão de saturação cinemática (X_{SAT}) e velocidade de saturação cinemática (C_X). Este aumento é tanto maior quanto menor o valor, em módulo, da carga mínima (F_{MIN});

- ♦ As sensibilidades, em especial dos parâmetros Y_{SAT} e X_{SAT} , diminuem quando o valor, em módulo, da carga mínima (F_{MIN}) aumenta;
- ♦ Os valores do *ratcheting strain* cíclico decrescem com o incremento dos parâmetros.

Do estudo do efeito dos parâmetros na gama de deformação plástica cíclica (Capítulo 4), pode retirar-se as seguintes conclusões:

- ♦ Para materiais com encruamento cinemático puro, os parâmetros do material que apresentam maior coeficiente de sensibilidade são a tensão limite de elasticidade (Y_0), seguida pela tensão de saturação cinemática (X_{SAT}), pela velocidade de saturação cinemática (C_X) e, por fim, pelo módulo de elasticidade (E), parâmetro menos influente. Estes resultados são semelhantes para qualquer combinação de parâmetros que caracterizam o material, independentemente do carregamento aplicado e do ciclo de carga;
- ♦ Para materiais com encruamento isotrópico + cinemático (misto), os parâmetros do material que apresentam maior coeficiente de sensibilidade são a tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}), seguida pela tensão de saturação cinemática (X_{SAT}) e pela velocidade de saturação cinemática (C_X). Os restantes parâmetros, nomeadamente, a tensão limite de elasticidade (Y_0), a velocidade de saturação isotrópica (C_Y) e o módulo de elasticidade (E), apresentam uma influência muito reduzida. Estes resultados são iguais para qualquer combinação de parâmetros que caracterizam o material, independentemente do carregamento aplicado e do ciclo de carga;
- ♦ Comparativamente ao estudo do *ratcheting strain* cíclico, pode-se identificar uma semelhança de resultados, ou seja, para cada tipo de encruamento, os parâmetros com maior influência são os mesmos, independentemente do carregamento aplicado e do ciclo de carga;

Do estudo do efeito dos parâmetros no $\Delta CTOD_p$, gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda (Capítulo 6), pode retirar-se as seguintes conclusões:

- Para materiais com encruamento cinemático puro, o parâmetro mais significativo é a tensão limite de elasticidade (Y_0), seguida pelo módulo de elasticidade (E), pela tensão de saturação cinemática (X_{SAT}) e, por fim, pela velocidade de saturação cinemática (C_X);
- Para materiais com encruamento isotrópico + cinemático (misto), o parâmetro mais significativo é a tensão de saturação isotrópica (Y_{SAT}), independentemente da combinação de parâmetros que caracterizam o material. O módulo de elasticidade (E) tanto se pode apresentar como um parâmetro muito relevante (material 4) ou como praticamente irrelevante (material 6). Os restantes parâmetros apresentam uma influência média/baixa em $\Delta CTOD_p$.

Do estudo de tendências paramétricas, ainda no Capítulo 6, pode concluir-se que a variação da gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda em função dos parâmetros é algo complexa e ainda que os parâmetros do material influenciam o fenómeno de fecho de fenda, que se observou ser determinante para os valores de $\Delta CTOD_p$.

Como trabalho futuro propõe-se:

- Estudar a influencia do carregamento e dos parâmetros no efeito de amaciamento e/ou encruamento de materiais com encruamento isotrópico + cinemático (misto);
- Estudar mais extensivamente o efeito dos parâmetros de materiais com encruamento cinemático puro no $\Delta CTOD_p$, gama plástica de deslocamento de abertura da extremidade de fenda (por exemplo, através dos materiais 2 e 3 da presente dissertação);
- Tentar compreender o porquê da diferença de resultados da influência do parâmetro módulo de elasticidade (E) no $\Delta CTOD_p$;
- Estudar em maior detalhe a variação dos valores de $\Delta CTOD_p$ (linear, exponencial, polinomial, etc) para gamas de variação paramétrica mais alargadas (maior número de pontos) e tentar estabelecer um modelo de propagação de fenda;

- Estudar o efeito dos parâmetros no $\Delta CTOD_p$ desconsiderando o fenómeno de fecho de fenda e comparar os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antunes F. V., Rodrigues S. M., Branco R., Camas D. (2016). A numerical analysis of CTOD in constant amplitude fatigue crack growth. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 85, 45–55.
- Armstrong P. J., & Frederick C. O. (1966). A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. GEGB Report RD/B/N 731.
- ASTM E647-15e1. (2015). Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- Barlat F., Aretz H., Yoon J.W., Karabin M.E., Brem J.C., & Dick R.E. (2005). Linear transformation-based anisotropic yield functions. *International Journal of Plasticity*, 21, 1009–1039.
- Bates R. C., & Santhanam T. (1980). Relationship between notch tip strain and crack-opening displacement. *Materials Science and Engineering*, 46, 159–165.
- Branco C., Ferreira J., Costa J., & Ribeiro A. (2012). Projecto de Órgãos de Máquinas.
- Chand S., & Garg S.B.L. (1985). Crack propagation under constant amplitude loading EFM, 21(1), 1–30.
- Ferreira M. (2017). Análise da propagação de fendas por fadiga baseada no CTOD para o aço inoxidável 304L. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Grilo T. J. (2011). Estudo de modelos constitutivos anisotrópicos para chapas metálicas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal.
- Hardrath H. F. (1970). Fatigue and Fracture Mechanics. AIAA paper No. 70–512, April.
- Irwin G. R. (1958). *Fracture in: Encyclopedia of Physics*, S. Flugge, Vol. VI, Springer Verlag, 551–590.
- Jablonski D.A., Carisella J.V., & Pelloux R.M. (1977). Fatigue crack propagation at elevated temperatures in solid solution strengthened superalloys, *Mettalurgical transactions A*, Vol. 8A, 1893–1900.
- Moura B., & Carlos A. G. (2006). *Mecânica dos Materiais*. 4ª Edição, Fundação Calouste Gulbenkian.
- Nicholls, D. J. (1994). The relation between crack blunting and fatigue crack growth rates. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 17(4), 459–467.

- Paris P. C., & Erdogan F. (1963). *Journal of Basic Engineering*, Trans. ASME, *American Society of Mechanical Engineers*.
- Paul S. K., & Tarafder S. (2013). Cyclic plastic deformation response at fatigue crack tips. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 101, 81–90.
- Pelloux, R. M. (1970). Crack Extension by alternating shear. *Engineering Fracture Mechanics*, 1, 170–174.
- Pippan, R., & Grosinger, W. (2013). Fatigue crack closure: From LCF to small scale yielding. *International Journal of Fatigue*, 46, 41–48.
- Prates P. (2014). Inverse Methodologies for Identifying Constitutive Parameters of Metal Sheets. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Rice J. R. (1967). Mechanisms of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue. Fatigue Crack Propagation. ASTM STP 415, *American Society for Testing and Materials*, 247–309.
- Rodrigues S. (2016). Propagação de fendas por fadiga: Estudo numérico de CTOD. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Rosa E. Da. (2002). Análise de Resistência Mecânica. *Mecânica da Fratura e Fadiga*, 407.
- Schwalbe K.H. (1974). Comparison of several fatigue crack propagation laws with experimental results, *EFM*, 6325–341.
- Serrano S. (2017). Análise de Propagação de Fendas por fadiga baseada no CTOD para a liga 2050–T8 AA. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Simões R. (2017). Análise de Propagação de Fendas por fadiga com base no CTOD: Efeito dos Parâmetros Numéricos. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Skelton R.P., Vilhelmsen, & Webster G.A. (1998). Energy criteria and cumulative damage during fatigue crack growth, *International Journal of Fatigue*, 20(9), 641–649.
- Sousa T. (2014). Propagação de fendas por fadiga: Influência do contacto nos parâmetros de extremidade de fenda. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Tong J., Zhao L. G., & Lin B. (2013). Ratchetting strain as a driving force for fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue*, 46, 49–57.
- Tvergaard V. (2004). On fatigue crack growth in ductile materials by crack–tip blunting. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 52(9), 2149–2166.
- Voce E. (1948). The relationship between stress and strain for homogeneous deformation. *Journal of the Institute of Metals*, 74, 537–562.

- von Mises R. (1913). Mechanik der festen korper im plastic–deformablen zustand. *Nachrichten vos der koniglichen gellenschaft des winssenschaften zu Gottingen, Mathematisch–physikalische klasse*, 582–592.
- Wells A. A. (1961). Unstable crack propagation in metals: cleavage and fast fracture. *Proceedings of the Crack Propagation Symposium*, Vol. 1, Paper 84, Cranfield, UK.
- Yu X., Cheng W., & Chen J. (2012). A yield criterion for isotropic porous media for the meso–scale range. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 59, no. 1, 57–61.

APÊNDICE A – CURVAS CS- Δn NO *RATCHETING STRAIN* CÍCLICO, SEGUNDO O CARREGAMENTO 2: $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N]

As Figuras A.0.1–A.0.3 ilustram as curvas CS – Δn para os materiais com encruamento cinemático puro (materiais 1, 2 e 3, da Tabela 3.1), segundo o carregamento 2: $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

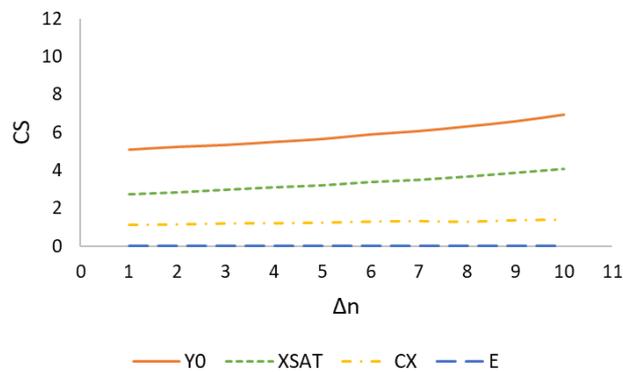


Figura A.0.1 – Curvas CS- Δn no ratcheting strain para o material 1 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

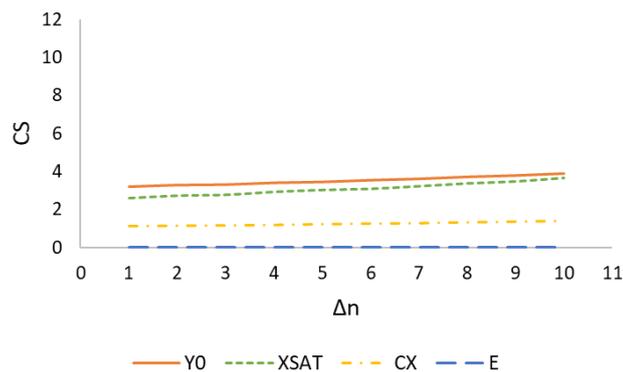


Figura A.0.2 – Curvas CS- Δn no ratcheting strain para o material 2 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

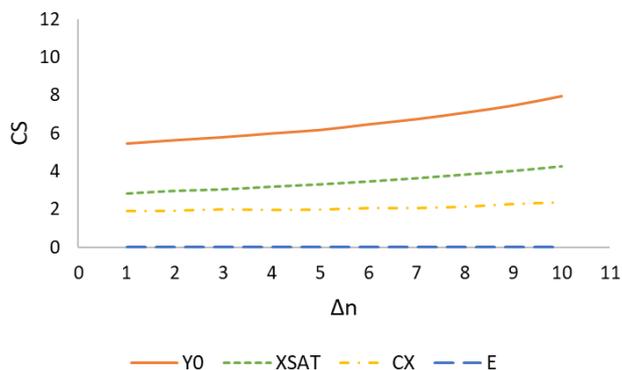


Figura A.0.3 – Curvas CS- Δn no ratcheting strain para o material 3 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

As Figuras A.0.4–A.0.6 representam as curvas $CS - \Delta n$ para os materiais com encruamento misto (materiais 4, 5 e 6 da Tabela 3.2), segundo o carregamento 2: $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

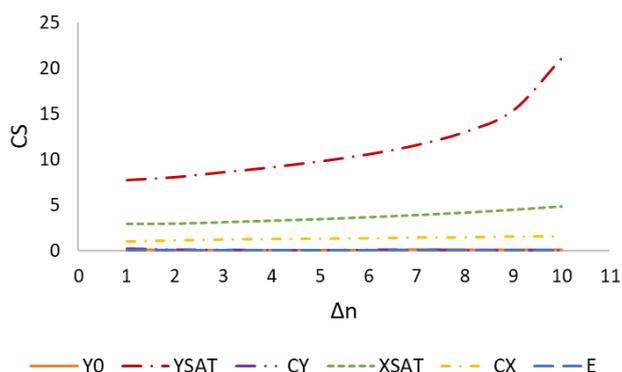


Figura A.0.4 – Curvas CS- Δn no ratcheting strain para o material 4 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

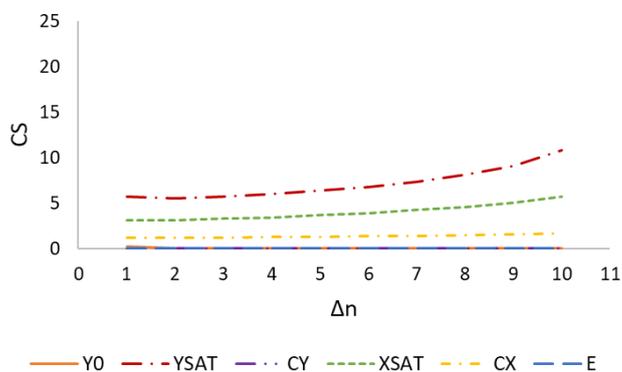


Figura A.0.5 – Curvas CS- Δn no ratcheting strain para o material 5 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

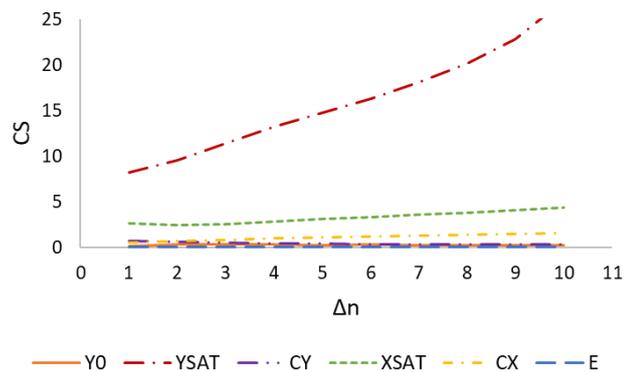


Figura A.0.6 – Curvas CS- Δn no ratcheting strain para o material 6 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

Todos estes resultados corroboram o que se encontra explicado em 3.5.

APÊNDICE B – OUTRAS CURVAS $\delta\varepsilon$ - Δn PARAMÉTRICAS

As figuras B.0.1–B.0.4, apresentadas de seguida, ilustram mais exemplos de curvas $\delta\varepsilon - \Delta n$ paramétricas, com incrementos e decrementos de 15%, nomeadamente para os materiais 2 (com encruamento cinemático puro) e 5 (com encruamento isotrópico + cinemático) e segundo os carregamentos 1 ($F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]) e 3 ($F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -125$ [N]).

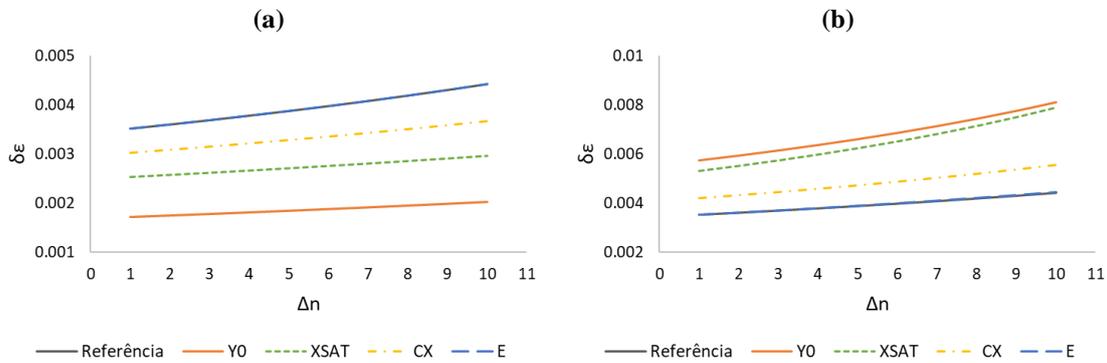


Figura B.0.1 – Curvas $\delta\varepsilon$ - Δn para os parâmetros do material 2 e segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: **(a)** para um incremento de 15%; **(b)** para um decremento de 15%.

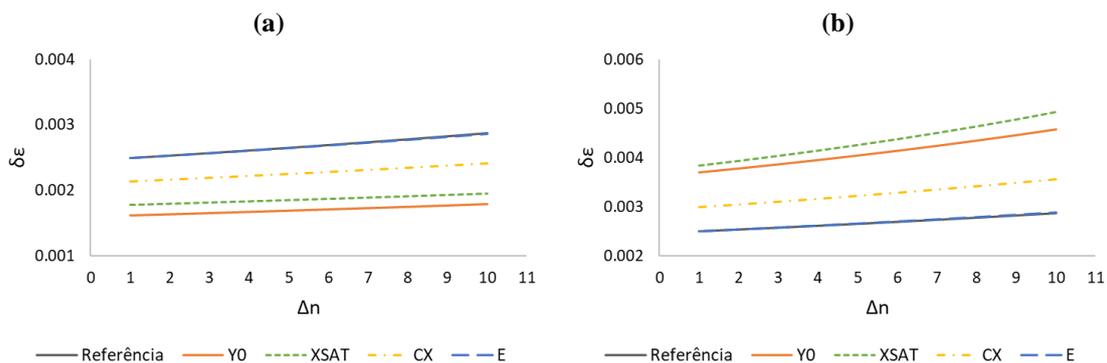


Figura B.0.2 – Curvas $\delta\varepsilon$ - Δn para os parâmetros do material 2 e segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: **(a)** para um incremento de 15%; **(b)** para um decremento de 15%.

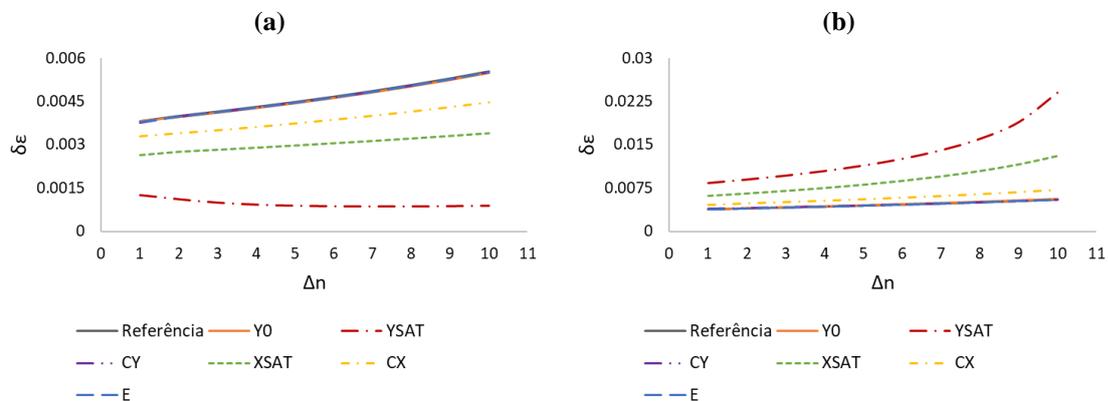


Figura B.0.3 – Curvas $\delta\epsilon$ – Δn para os parâmetros do material 5 e segundo o carregamento 1, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: **(a)** para um incremento de 15%; **(b)** para um decréscimo de 15%.

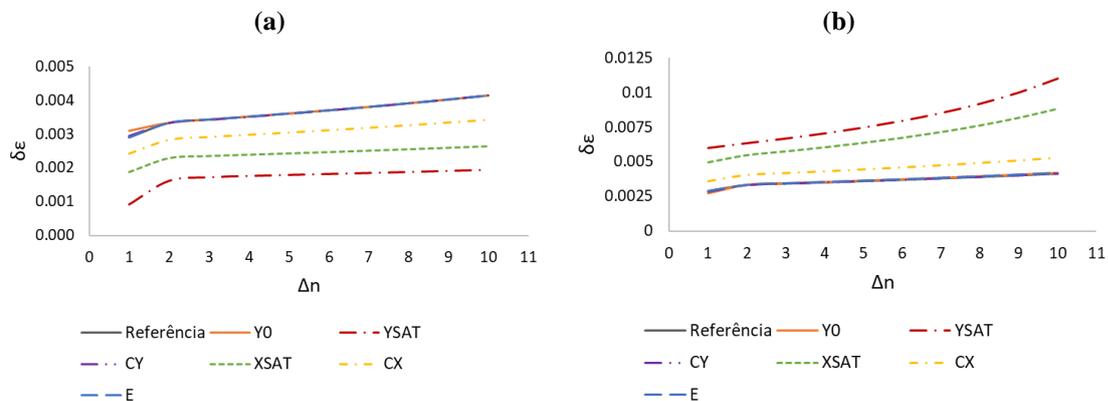


Figura B.0.4 – Curvas $\delta\epsilon$ – Δn para os parâmetros do material 5 e segundo o carregamento 3, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -85$ [N]: **(a)** para um incremento de 15%; **(b)** para um decréscimo de 15%.

Estes resultados confirmam que o incremento de qualquer um dos parâmetros que definem um material, seja com encruamento cinemático puro seja com encruamento misto, leva a um decréscimo dos valores do *ratcheting strain* cíclico. Pelo contrário, diminuir o valor de qualquer parâmetro suscita um acréscimo dos valores de $\delta\epsilon$.

APÊNDICE C – GRÁFICOS CS–n NA GAMA DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA CÍCLICA, SEGUNDO O CARREGAMENTO 2: $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N]

O APÊNDICE C destina-se à apresentação dos resultados obtidos para todos os materiais (com encruamento cinemático puro e encruamento misto) segundo o carregamento 2: $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

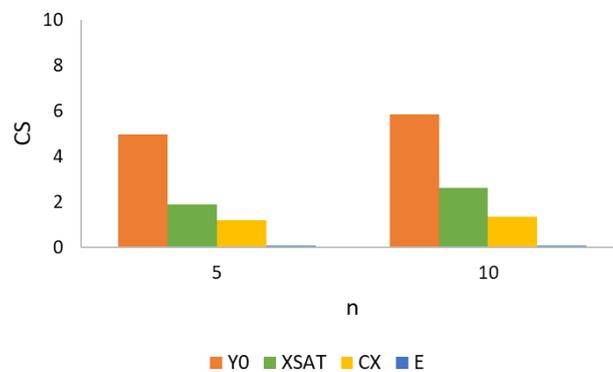


Figura C.0.1 – Gráfico CS–n na gama de deformação plástica para o material 1 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

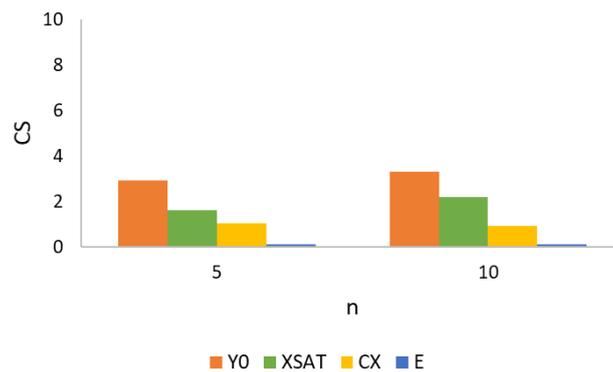


Figura C.0.2 – Gráfico CS–n na gama de deformação plástica para o material 2 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

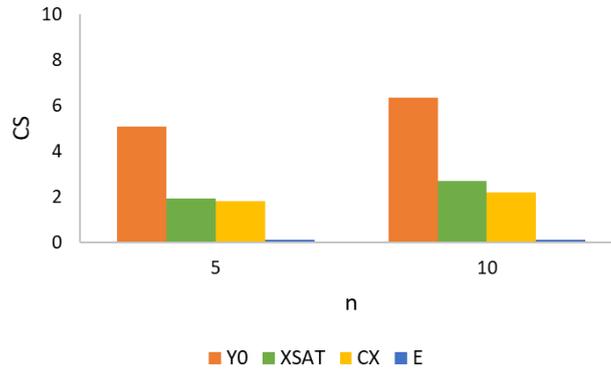


Figura C.0.3 – Gráfico CS–n na gama de deformação plástica para o material 3 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

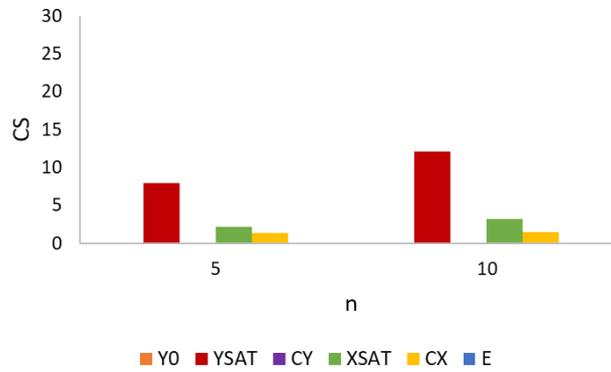


Figura C.0.4 – Gráfico CS–n na gama de deformação plástica para o material 4 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

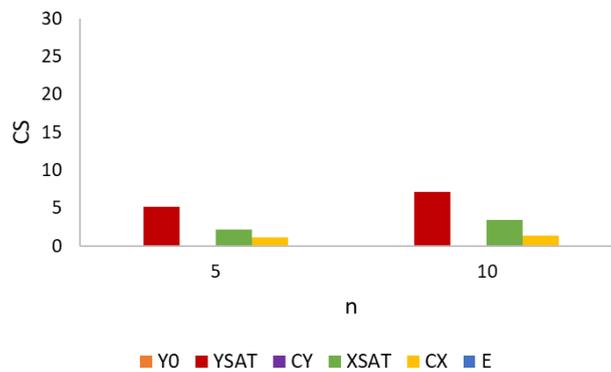


Figura C.0.5 – Gráfico CS–n na gama de deformação plástica para o material 5 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].

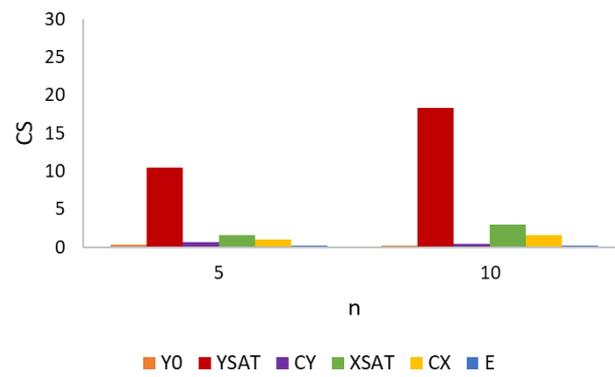


Figura C.0.6 – Gráfico CS-n na gama de deformação plástica para o material 6 e segundo o carregamento 2, $F_{MAX} = 150$ e $F_{MIN} = -100$ [N].