



TÉCNICO
LISBOA

Caracterização do limite de enformabilidade à fratura de chapa no modo III da mecânica da fratura

Pedro Nuno Clemente Leonardo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Carlos Manuel Alves da Silva

Eng. João Pedro Gosa Magrinho

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Carlos Manuel Alves da Silva

Vogais: Prof. Paulo António Firme Martins

Prof. Ivo Manuel Ferreira de Bragança

Novembro de 2019

Dedicada aos meus pais

Resumo

Esta dissertação foca-se na caracterização dos limites de enformabilidade à fratura para processos de forjamento de chapa. Assim, uma metodologia baseada no sistema digital de correlação de imagens para determinação dos limites de fratura nos modos I (tensão) e II (corte no plano) é estendida à abertura de fissuras no modo III da mecânica da fratura (corte fora do plano).

Neste sentido, foram desenvolvidos ensaios de compressão longitudinal de chapa com diferentes condições de atrito nas extremidades dos provetes para obtenção das trajetórias de deformação experimentais até à fratura no modo III da mecânica da fratura, pela primeira vez diretamente a partir de chapa. No que diz respeito à caracterização dos modos I e II da mecânica da fratura, foram utilizados quatro tipos de ensaios convencionais.

Os três limites de enformabilidade à fratura dos processos de forjamento de chapa foram primeiro representados no plano das extensões principais e depois transformados para o plano da triaxialidade com recurso ao critério de plasticidade de Hill.

Um novo critério de dano de dano dúctil desacoplado foi introduzido e implementado com sucesso no programa de elementos finitos *i-form 3d* para prever a localização de início das fissuras decorrentes de esforços de corte fora do plano.

Palavras-chave: Forjamento de Chapa, Limites de Enformabilidade à Fratura, Modo III da Mecânica da Fratura, Dano, Compressão Longitudinal de Chapa, Experimentação, Método de Elementos Finitos.

Abstract

This master thesis is focused on the characterization of the fracture limits in sheet-bulk forming. The approach extends to crack opening in mode III (out-of-plane shearing), a digital image correlation-based methodology for determining the fracture forming limits in mode I (tension) and mode II (in-plane shearing).

For this purpose, a sheet lengthwise compression test with different end constraints is developed and utilized to obtain the strain loading paths up to fracture in mode III, for the first time directly from sheets. Regarding the characterization of modes I and II of fracture mechanics, four types of conventional tests were used.

The three fracture forming limits of sheet-bulk forming are first characterized in principal strain space and then transformed into the space of effective strain vs. stress triaxiality by using Hill's yield plasticity criterion.

A new uncoupled ductile damage criterion is introduced and successfully implemented in the finite element computer program *i-form 3d* to predict the location where the out-of-plane shearing cracks are triggered.

Keywords: Sheet-Bulk Forming, Fracture Forming Limits, Mode III of Fracture Mechanics, Ductile Damage, Sheet Lengthwise Compression, Experimentation, Finite Element Method.

Agradecimentos

Em primeiro lugar tenho de agradecer aos meus dois orientadores, professor Carlos Silva e engenheiro João Magrinho por toda a ajuda, disponibilidade e apoio. De facto, estou seguro de que não podia ter escolhido melhores pessoas para orientar o meu trabalho. Os seus conhecimentos, paciência, curiosidade e boa disposição foram fundamentais no desenrolar desta dissertação. Ensinaram-me muito. Um grande, grande obrigado por todo o tempo e dedicação investidos em mim e na dissertação que aqui apresento.

Agradeço ao professor Ivo Bragança pela disponibilidade, pelos conselhos e por toda a ajuda prestada, especialmente nos ensaios experimentais.

Agradeço ao professor Paulo Martins pela colaboração na escrita do artigo científico focado nos conteúdos desta dissertação. Obrigado pela disponibilidade, simpatia e esclarecimento de dúvidas.

Agradeço ao senhor Carlos Farinha por todo o trabalho realizado no âmbito desta dissertação, nomeadamente no fabrico da ferramenta de compressão e dos provetes experimentais. Obrigado também pelos ensinamentos que me transmitiu sobre a utilização de vários equipamentos do laboratório.

Agradeço ao engenheiro Ricardo Baptista, responsável pelo laboratório de Tecnologia Mecânica do IST, pela disponibilidade e ajuda prestada.

Agradeço à Área Científica de Tecnologia Mecânica do Instituto Superior Técnico pelas facilidades e meios concedidos que tornaram possível a realização desta dissertação.

Agradeço aos meus colegas do curso de Engenharia Mecânica que me acompanharam durante estes anos de faculdade e que sempre me apoiaram e motivaram. Obrigado pela amizade, companheirismo e espírito de entreajuda.

Agradeço a todos os meus amigos pela compreensão demonstrada e motivação transmitida. Obrigado particularmente por todos os momentos de convívio e amizade.

Agradeço ao meu irmão Tiago por ser o meu melhor amigo e grande apoio para tudo nesta vida. Obrigado também por me fazeres rir tanto.

Por último, resta-me agradecer aos meus pais, que para além de me terem dado todas as oportunidades para poder ter sucesso e seguir os meus sonhos, fazem de mim uma pessoa melhor todos os dias. São os meus dois grandes exemplos. Obrigado por todo o tempo e dinheiro investidos na minha formação académica, mas sobretudo obrigado pela educação que me deram e pelos valores transmitidos. Obrigado por tudo.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	iv
Agradecimentos.....	v
Índice	vi
Índice de figuras	viii
Índice de tabelas	xii
Nomenclatura	xiii
Siglas e Acrónimos	xiii
Símbolos	xiv
1. Introdução	1
2. Estado da Arte.....	3
2.1. Forjamento de chapa.....	3
2.1.1. Classificação das operações.....	6
2.1.2. Condições tribológicas	8
2.2. Enformabilidade.....	9
2.2.1. Enformabilidade no modo I.....	11
2.2.2. Enformabilidade no modo II.....	13
2.2.3. Enformabilidade no modo III.....	14
2.3. Critérios de dano	20
3. Trabalho Experimental	23
3.1. Caracterização mecânica	23
3.1.1. Ensaio de tração	23
3.1.2. Ensaio de compressão de discos empilhados	26
3.2. Caracterização da enformabilidade à fratura no modo I e II	27
3.2.1. Ensaio de tração	28
3.2.2. Ensaio de double notched tension.....	28
3.2.3. Ensaio de corte	29
3.2.4. Ensaio de staggered double notched tension	30
3.3. Caracterização da enformabilidade à fratura no modo III	30
3.4. Equipamentos.....	38

3.4.1.	Máquinas de ensaios.....	38
3.4.2.	Sistemas de medição	40
3.4.3.	Ferramenta	42
4.	Desenvolvimento Teórico.....	43
4.1.	Software.....	43
4.2.	Modelo numérico	44
4.3.	Análises de sensibilidade	46
4.4.	Novo critério de dano	48
5.	Resultados e Discussão.....	49
5.1.	Enformabilidade à fratura nos modo I e II	49
5.2.	Enformabilidade à fratura no modo III	52
5.2.1.	Validação numérico-experimental	54
5.2.2.	Análises de dano	55
5.2.3.	Representação no plano das extensões principais.....	57
5.3.	Limites de enformabilidade à fratura para forjamento de chapa.....	60
6.	Conclusões e Trabalho Futuro.....	63
	Referências	65
	Anexo A – Desenhos técnicos da ferramenta de compressão	69

Índice de figuras

Figura 2.1 - Esquema representativo das categorias de deformação plástica em metais.	4
Figura 2.2 - Componentes fabricados por forjamento de chapa (Mori e Nakano, 2015).....	4
Figura 2.3 - Classificação das operações de forjamento de chapa (Merklein et al., 2011b).	6
Figura 2.4 - (a) Representação esquemática da produção de um componente através de estampagem e compressão da parede para aumento de espessura; (b) Componente final produzido (Suzumura et al., 2002).....	7
Figura 2.5 - (a) Processo de produção de uma roda dentada com multi-etapas; (b) Roda dentada produzida (Hayabuchi et al., 2012).	7
Figura 2.6 - Ensaio para determinação das condições tribológicas em processos de forjamento de chapa (Vierzigmann et al., 2010).	8
Figura 2.7 - Modos de abertura de fissuras da mecânica da fratura: (a) Modo I; (b) Modo II; (c) Modo III (Martins et al., 2014).....	9
Figura 2.8 - Representação dos limites de enformabilidade à fratura nos modos I, II e III da mecânica da fratura (a) no plano das extensões principais e (b) no plano da triaxialidade (Adaptado de Isik et al., 2016).....	10
Figura 2.9 - Representação esquemática da CLE (Adaptado de Rodrigues e Martins, 2010).....	11
Figura 2.10 – Círculo de Mohr de extensões relativo a esforços de corte no plano.....	13
Figura 2.11 - Círculo de Mohr de extensões relativo a esforços de corte fora do plano.	15
Figura 2.12 - Ensaio das calças: (a) geometria de 2 pernas; (b) geometria de 3 pernas; (c) configuração da deformação das pernas do provete em regime estacionário de rasgamento em metais (Mai e Cotterell, 1984).	16
Figura 2.13 – Ensaio experimental de arrastamento da ferramenta sobre a chapa para aumento localizado de espessura: (a) representação esquemática do ensaio e (b) fotografia do setup experimental com identificação dos principais componentes (Isik et al., 2016).	18
Figura 2.14 – Modelo numérico do ensaio de arrastamento da ferramenta sobre a chapa para aumento de espessura: (a) representação esquemática do modelo e (b) detalhes da malha após o movimento longitudinal da ferramenta (Isik et al., 2016).	18
Figura 2.15 – Fratura no modo III da mecânica da fratura: (a) fotografias das fraturas na chapa nas vista frontal (em cima) e lateral (em baixo) para uma profundidade de indentação de $i = 0.25$ mm, (b) representação esquemática da propagação da fratura e (c) representação das trajetórias de deformação no plano da triaxialidade para os ensaios com uma profundidade de indentação de $i = 0.15$ mm e $i = 0.25$ mm (Isik et al., 2016).	19

Figura 2.16 – (a) Representação esquemática da ligação de chapas antes (esquerda) e depois (direita) do processo de ligação; (b) Representação da compressão do pino de uma das chapas sobre a cavidade da outra chapa (Silva et al., 2017).....	20
Figura 2.17 – Fraturas no modo III da mecânica da fratura observadas nos provetes ensaiados no trabalho de Silva et al (2017).....	20
Figura 2.18 – Representação esquemática do crescimento dos <i>voids</i> para esforços de (a) tensão e (b) corte no plano.....	21
Figura 3.1 - Proвете de tração antes (acima) e após (abaixo) o ensaio.	24
Figura 3.2 – Gráfico tensão-extensão verdadeiras relativos aos ensaios de tração para as três orientações em relação à direção de laminagem.	24
Figura 3.3 - Proвете de CDE antes (esquerda) e após (direita) o ensaio.....	26
Figura 3.4 – Curvas tensão-extensão verdadeiras do alumínio AW7075-T651 resultantes dos ensaios de tração (T) e de compressão de discos empilhados (CDE).	27
Figura 3.5 - Proвете de DNT antes (acima) e após (abaixo) o ensaio.....	29
Figura 3.6 - Proвете de corte antes (acima) e após (abaixo) o ensaio.	29
Figura 3.7 - Proвете de SDNT antes (acima) e após (abaixo) o ensaio.	30
Figura 3.8 – (a) Ensaio de compressão longitudinal de chapa; (b) Sistema digital de correlação de imagens em funcionamento para um ensaio de compressão longitudinal de chapa.	32
Figura 3.9 – (a) Provetes de largura $w_0 = 10\text{ mm}$ para ensaios CCF, CCLF e CCL; (b) Provetes de largura $w_0 = 20\text{ mm}$ para ensaios CCL.	32
Figura 3.10 - (a) Ferramenta de compressão em utilização durante um ensaio de compressão longitudinal de chapa; (b) Ferramenta de compressão vista em corte (imagem produzida em <i>Solidworks</i>).	33
Figura 3.11 – (a) Fotografia dos componentes da ferramenta de compressão; (b) Representação esquemática de montagem da ferramenta em vista explodida; Numeração dos componentes: (1) Bloco cônico; (2) Disco central; (3) Parafuso ISO 4762 M8x30; (4) Parafuso ISO 4762 M4x30; (5) Disco superior furado; (6) Disco superior plano.	34
Figura 3.12 – Fotografias (a) da parte inferior do bloco cônico da ferramenta de compressão e (b) das superfícies superior (esquerda) e inferior (direita) do disco superior furado.	34
Figura 3.13 – (a) Representação esquemática do setup experimental; (b) Representação esquemática da ferramenta de compressão antes (cima) e após (baixo) o ensaio de compressão longitudinal de chapa.....	35
Figura 3.14 – Metodologia para determinação da CLFCFP a partir dos ensaios de compressão longitudinal de chapa usando o sistema digital de correlação de imagens: (a) Fotografias de um provete com a zona de interesse pintada com o padrão aleatório branco e preto; (b) Gráfico esquemático dos	

resultados no plano das extensões principais; (c) Gráfico esquemático dos resultados no plano da triaxialidade.	36
Figura 3.15 – Provete de instabilidade após ensaio.	38
Figura 3.16 – Máquina de ensaios universal INSTRON 4507: (a) fotografia e (b) principais características técnicas do equipamento.	39
Figura 3.17 –Máquina de ensaios hidráulica INSTRON Satec 1200: (a) fotografia e (b) principais características técnicas do equipamento.	40
Figura 3.18 - Sistema digital de correlação de imagens em funcionamento durante um ensaio de DNT.	41
Figura 3.19 – Microscópio Mitutoyo TM505B: (a) fotografia e (b) principais características técnicas do equipamento.	41
Figura 3.20 – Microscópio eletrônico de varrimento Hitachi S-2400: (a) fotografia e (b) principais características técnicas do equipamento.	42
Figura 3.21 - (a) Fotografia da ferramenta horizontal de duplo efeito; (b) Ferramenta horizontal de duplo efeito modelada em <i>SolidWorks</i> com numeração dos componentes: (1) base; (2) teto; (3) coluna; (4) apoio lateral; (5) cutelo para suporte do apoio lateral; (6) encostador; (7) tirante; (8) guia; (9) carro porta-ferramentas; (10) cunha atuadora vertical; (11) carro de rolamentos STAR Runner block 1651-45 (Magrinho, 2015).	42
Figura 4.1 – Representação esquemática das geometrias das ferramentas e do provete relativas ao modelo numérico inserido no <i>i-form 3d</i>	44
Figura 4.2 – Malha inicial (esquerda) e final (direita) para o ensaio de compressão longitudinal de chapa com extremidades livres e largura $w_0 = 10 \text{ mm}$	45
Figura 4.3 - Trajetórias de deformação numéricas para várias geometrias de provete e condições de atrito.	47
Figura 5.1 - Imagens do sistema digital de correlação de imagens com as distribuições das extensões principais 1 e 2: (a) Provete de T; (b) Provete de DNT; (c) Provete de C; (d) Provete de SDNT.	49
Figura 5.2 - Representação gráfica da CLF e da CLFC, das trajetórias de deformação e dos pontos de fratura experimentais referentes aos modos I e II da mecânica da fratura para a chapa de alumínio AW7075-T651 no plano das extensões principais.	51
Figura 5.3 - Superfícies de fratura: (a) Provete de T; (b) Provete de DNT; (c) Provete de C; (d) Provete de SDNT.	51
Figura 5.4 – Fotografias das superfícies de fratura obtidas através do microscópio eletrônico para uma ampliação de 1500x: (a) Provete de T; (b) Provete de DNT; (c) Provete de C; (d) Provete de SDNT.	52

Figura 5.5 – (a) Distribuições experimentais das extensões principais 1 e 2 de fratura para um provete de largura $w_0 = 20 \text{ mm}$ referente a um ensaio de CCL (b) Fotografias do respetivo provete após o ensaio.	53
Figura 5.6 – (a) Distribuições experimentais das extensões principais 1 e 2 de fratura para um provete de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ referente a um ensaio de CCL (b) Fotografias do respetivo provete após o ensaio.	53
Figura 5.7 – (a) Distribuições experimentais das extensões principais 1 e 2 de fratura para um provete de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ referente a um ensaio de CCLF (b) Fotografias do respetivo provete após o ensaio.	53
Figura 5.8 – (a) Distribuições experimentais das extensões principais 1 e 2 de fratura para um provete de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ referente a um ensaio de CCF (b) Fotografias do respetivo provete após o ensaio.	53
Figura 5.9 - Comparação da evolução de força com o deslocamento entre os elementos finitos (EF) e os resultados experimentais (Exp.) para as diferentes condições: (a) CCL, $w_0=20 \text{ mm}$; (b) CCL, $w_0=10 \text{ mm}$; (c) CCLF, $w_0=10 \text{ mm}$; (d) CCF, $w_0=10 \text{ mm}$	55
Figura 5.10 – Distribuição de dano obtida nas simulações numéricas para o provete de $w_0 = 10 \text{ mm}$ relativo ao ensaio CCL no instante da fratura: (a) critério de McClintock (modo I); (b) critério normalizado de Cockroft-Latham; (c) critério normalizado do trabalho plástico de corte (modo II); (d) novo critério de dano dúctil proposto para solicitações de corte fora do plano e fratura no modo III.	56
Figura 5.11 – Distribuição de dano obtida nas simulações numéricas para o instante de fratura utilizando o novo critério de dano dúctil proposto para solicitações de corte fora do plano e fratura no modo III: (a) CCL, $w_0=20 \text{ mm}$; (b) CCL, $w_0=10 \text{ mm}$; (c) CCLF, $w_0=10 \text{ mm}$; (d) CCF, $w_0=10 \text{ mm}$	57
Figura 5.12 - Representação gráfica da CLFCFP, das trajetórias de deformação e dos pontos de fratura experimentais referentes ao modo III da mecânica da fratura para a chapa de alumínio AW7075-T651 no plano das extensões principais.	58
Figura 5.13 - Superfícies de fratura: (a) CCL, $w_0=20 \text{ mm}$; (b) CCL, $w_0=10 \text{ mm}$; (c) CCLF, $w_0=10 \text{ mm}$; (d) CCF, $w_0=10 \text{ mm}$	59
Figura 5.14 – Fotografias das superfícies de fratura obtidas através do microscópio eletrónico para uma ampliação de 1500x: (a) CCL, $w_0=20 \text{ mm}$; (b) CCL, $w_0=10 \text{ mm}$; (c) CCLF, $w_0=10 \text{ mm}$; (d) CCF, $w_0=10 \text{ mm}$	59
Figura 5.15 – Representação gráfica das curvas limite de enformabilidade à fratura nos modos I (CLF), II (CLFC) e III (CLFCFP) e dos pontos de fratura experimentais para a chapa de alumínio AW7075-T651 no plano das extensões principais.	60
Figura 5.16 - Representação gráfica das curvas limite de enformabilidade à fratura nos modos I (CLF), II (CLFC) e III (CLFCFP), das trajetórias de deformação numéricas (curvas a traço fino contínuo) e dos pontos de fratura experimentais para a chapa de alumínio AW7075-T651 no plano da triaxialidade.	61

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Ensaios de enformabilidade para determinação dos limites de enformabilidade no modo I da mecânica da fratura em chapas metálicas (Magrinho et al., 2018b).	12
Tabela 2.2 - Ensaios de enformabilidade para determinação do limite de enformabilidade à fratura no modo I da mecânica da fratura na massa (Magrinho et al., 2018a).	13
Tabela 2.3 - Ensaios de enformabilidade para determinação do limite de enformabilidade à fratura no modo II da mecânica da fratura em chapas metálicas (Magrinho et al., 2018b).	14
Tabela 2.4 - Ensaios de enformabilidade para determinação dos limites de enformabilidade no modo III da mecânica da fratura na massa (Magrinho et al., 2018a).	15
Tabela 3.1 - Composição química da liga de alumínio AW7075-T651 (% peso) (de acordo com a norma EN 573-3).	23
Tabela 3.2 – Equações características do alumínio AW7075-T651 para cada orientação em relação à direção de laminação.	25
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas da chapa de alumínio AW7075-T651 obtidas a partir dos ensaios de tração.	25
Tabela 3.4 – Ensaios de enformabilidade à fratura nos modos I e II aplicados à chapa de alumínio AW7075-T651.	28
Tabela 3.5 - Ensaios de enformabilidade à fratura no modo III aplicados à chapa de alumínio AW7075-T651.	31
Tabela 3.6 - Resultados dos ensaios de instabilidade.	38
Tabela 4.1 - Parâmetros de anisotropia da chapa de alumínio AW7075-T651 para aplicação do critério de Hill.	45
Tabela 4.2 - Resultados da análise de convergência relativos à variação do número de elementos da malha.	46
Tabela 4.3 - Resultados da análise de convergência relativos à variação do incremento de tempo entre <i>steps</i> para a malha de 12000 elementos.	46
Tabela 4.4 - Geometria dos provetes e condições de atrito testadas nas análises de sensibilidade... ..	47
Tabela 5.1 - Equações dos limites de enformabilidade à fratura.	61

Nomenclatura

Siglas e Acrónimos

AA - Aluminium Association

AW – Aluminium Wrought

CCF – Compressão longitudinal de Chapa com extremidades Fixas

CCL – Compressão longitudinal de Chapa com extremidades Livres

CCLF – Compressão longitudinal de Chapa com extremidades Livre e Fixa

CDE – Compressão de Discos Empilhados

CLE – Curva Limite de Estampagem

CLF – Curva Limite de Fratura

CLFC – Curva Limite de Fratura ao Corte

CLFCFP – Curva Limite de Fratura ao Corte Fora do Plano

DCE – Double Cup Extrusion

DIC – Digital Image Correlation

DL – Direção de Laminagem

DNT – Double Notched Tension

EF – Elementos Finitos

FLD – Forming Limit Diagram

ISO – International Organization for Standardisation

IST – Instituto Superior Técnico

SDNT – Staggered Double Notched Tension

SEM – Scanning Electron Microscope

Símbolos

Símbolos latinos

A – Alongamento após fratura

A – Área

C – Corte

D – Dano

D_{crit} – Dano crítico

d – Deslocamento

E – Módulo de elasticidade

e – Extensão nominal

F – Força

h – Altura do provete

i – Profundidade de indentação

K – Parâmetro da lei de encruamento de Ludwik-Hollomon

k – Tensão de corte máxima do material

l – Comprimento do provete

m – Fator de atrito

n – Coeficiente de encruamento

R – Raio

r – Fator de anisotropia

\bar{r} – Anisotropia normal

S – Tensão nominal

T – Tração

t – Espessura do provete

w – Largura do provete

W_e – Trabalho essencial de fratura

w_e – Trabalho essencial de fratura específico

W_{ne} – Trabalho não essencial de fratura

W_p – Trabalho plástico total

Símbolos gregos

α_{DL} – Ângulo de orientação relativamente à direção de laminagem

ε – Extensão verdadeira

$\bar{\varepsilon}$ – Extensão efetiva

$\bar{\varepsilon}_f$ – Extensão efetiva de fratura

ε_1 – Extensão principal 1

ε_{1f} – Extensão principal 1 de fratura

ε_2 – Extensão principal 2

ε_{2f} – Extensão principal 2 de fratura

ε_3 – Extensão principal 3
 ε_{3f} – Extensão principal 3 de fratura
 γ – Distorção
 γ_f – Distorção de fratura
 σ – Tensão verdadeira
 $\bar{\sigma}$ – Tensão efetiva
 σ_m – Tensão média
 σ_1 – Tensão na direção principal 1
 σ_2 – Tensão na direção principal 2
 σ_3 – Tensão na direção principal 3
 σ_e – Tensão de cedência
 σ_R – Tensão de rotura
 τ – Tensão de corte
 \emptyset – Diâmetro
 μ – Coeficiente de atrito
 Δr – Anisotropia planar
 Δt – Incremento de tempo

1. Introdução

Atualmente, qualquer processo de fabrico na indústria é constantemente melhorado, principalmente no sentido de se reduzir a utilização de recursos com o objetivo de diminuir os custos de fabrico. No entanto, existem outros fatores preponderantes para esta melhoria contínua, nomeadamente a necessidade de se fabricar novos tipos de peças com novas geometrias e especificações, bem como o aumento da qualidade dos produtos, traduzida, por exemplo, na redução do peso dos componentes, redução do número total de componentes, melhoria das propriedades mecânicas e aumento da precisão geométrica e dimensional.

Assim, um processo de fabrico que surgiu face à necessidade de obtenção de peças mais leves de geometria complexa, com boa precisão e com baixos custos foi o forjamento de chapa (na terminologia inglesa designado por *sheet-bulk forming*) que substitui as complicadas operações multi-estágio, bem como certas operações de maquinagem e corte fino (Silva et al., 2015b).

No que diz respeito à enformabilidade dos materiais, esta pode ser definida como o nível máximo de deformação que se pode atingir durante um processo tecnológico de deformação plástica, sem que se verifique o fenómeno de estricção ou de fratura (Rodrigues e Martins, 2010). O limite de enformabilidade à estricção é caracterizado pela curva limite de estampagem (CLE) e os limites de enformabilidade à fratura são definidos pela curva limite de fratura (CLF) relativa ao modo I da mecânica da fratura, pela curva limite de fratura ao corte (CLFC) relativa ao modo II da mecânica da fratura e ainda pela curva limite de fratura ao corte fora do plano (CLFCFP) relativa ao modo III da mecânica da fratura.

Enquanto que nas tecnologias de fabrico que envolvem deformação plástica na massa apenas ocorrem fraturas do material nos modos I ou III da mecânica da fratura e nos métodos de fabrico usuais que envolvem deformação plástica de chapa apenas se verificam fraturas do material nos modos I ou II da mecânica da fratura, no processo de forjamento de chapa, verifica-se que o material pode fraturar por qualquer um dos três modos de fratura, sendo o único processo onde tal acontece (Martins et al., 2014; Isik et al., 2016).

Deste modo, o forjamento de chapa apresenta-se como a única tecnologia de fabrico onde estando a matéria-prima em forma de chapa se obtêm fraturas no material no modo III da mecânica da fratura e, como tal, é importante a obtenção de um método experimental preciso e fácil de implementar para determinação do limite de enformabilidade neste modo de fratura, sendo este o principal objetivo desta dissertação. De salientar que o ensaio deverá reproduzir as solicitações e os estados de tensões que ocorrem nos processos de forjamento de chapa.

Para além da caracterização do limite de enformabilidade à fratura de chapa no modo III da mecânica da fratura, esta dissertação tem também como objetivos o desenvolvimento de uma nova ferramenta de compressão; a correta adaptação e utilização de uma metodologia baseada na utilização do sistema digital de correlação de imagens para obtenção das deformações ao longo dos ensaios; construção de um modelo numérico adequado para simulação do novo ensaio; e o desenvolvimento de um novo

critério de dano, adequado para a caracterização de processos de forjamento de chapa onde a falha ocorre no modo III da mecânica da fratura.

Esta dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos, sendo a presente introdução o primeiro.

No segundo capítulo, Estado da Arte, primeiramente é feita uma apresentação do processo de forjamento de chapa, nomeadamente, definição do processo, vantagens e desvantagens, classificação das operações e condições tribológicas. De seguida é feita uma abordagem à enformabilidade, sendo apresentados os conceitos fundamentais dos diferentes limites de enformabilidade, bem como enunciados os principais ensaios para determinação dos mesmos, tanto para massa como para chapa. São também apresentados os principais ensaios em chapa onde se verificam fraturas do material correspondentes ao modo III da mecânica da fratura. Por último, é feita uma pequena apresentação de alguns critérios de dano habitualmente utilizados para os diferentes modos de fratura.

No terceiro capítulo, Trabalho Experimental, primeiramente é feita a caracterização mecânica do material. Depois, são descritos os ensaios realizados que permitiram caracterizar a enformabilidade do material nos modos I e II da mecânica da fratura. Em terceiro lugar, são apresentados os novos ensaios de compressão longitudinal de chapa, bem como todo o seu desenvolvimento e respetiva metodologia, que permitiram determinar a CLFCFP pela primeira vez diretamente a partir de chapa. Por último, são apresentados os equipamentos mais relevantes utilizados no decorrer da dissertação.

No quarto capítulo, Desenvolvimento Teórico, primeiramente é apresentado o software utilizado. Em segundo lugar, é descrito o modelo numérico utilizado na modelação dos novos ensaios de compressão longitudinal de chapa, seguindo-se a apresentação das análises de sensibilidade que permitiram determinar as condições a ensaiar experimentalmente. Por último, é então proposto um novo critério de dano dúctil desacoplado a aplicar em processos de forjamento de chapa, onde a fratura ocorre por esforços de corte fora do plano da chapa (modo III da mecânica da fratura).

O quinto capítulo, Resultados e Discussão, inicia-se com a apresentação dos resultados relativos aos ensaios de enformabilidade à fratura nos modos I e II da mecânica da fratura. De seguida, faz-se a apresentação dos resultados relativos aos novos ensaios de compressão longitudinal de chapa, onde a fratura ocorre por esforços de corte fora do plano e que permitiram caracterizar a enformabilidade à fratura no modo III para o alumínio AW7075-T651, bem como a apresentação dos resultados numéricos focados no dano. Por último, apresentam-se os três limites de enformabilidade numa única representação gráfica, tanto no plano das extensões principais, como no plano da triaxialidade.

Finalmente, no sexto capítulo, Conclusões e Trabalho Futuro, são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado e apontadas algumas propostas de investigações a implementar futuramente.

2. Estado da Arte

Este capítulo encontra-se dividido em três partes. Primeiramente é feita uma apresentação genérica do processo de forjamento de chapa, nomeadamente definição, vantagens e desvantagens, classificação das operações e condições tribológicas. De seguida, aborda-se a enformabilidade, sendo apresentados os conceitos fundamentais dos diferentes limites de enformabilidade, bem como enunciados os principais ensaios para determinação dos mesmos, tanto para massa como para chapa. São também apresentados os principais ensaios em chapa onde se verificam fraturas do material correspondentes ao modo III da mecânica da fratura. Finalmente, é feita uma apresentação de alguns critérios de dano habitualmente utilizados para os diferentes modos de fratura.

2.1. Forjamento de chapa

Tal como referido na Introdução, atualmente, na indústria, existe a necessidade de se reduzir a utilização de recursos. Assim, como forma de minorar a utilização de matéria-prima, o design de estruturas mais leves tem sido largamente explorado. No caso particular da indústria automóvel e dos transportes em geral, o design para redução de peso tem também em vista as reduções das emissões de gases poluentes dos veículos cuja fonte de energia é um combustível fóssil e a compensação do peso adicional das baterias dos novos veículos elétricos (Merklein et al., 2012). O resultado deste design consiste, na prática, na produção de veículos com um menor número de componentes, bem como o fabrico de componentes individuais de menor peso (estruturas leves), o que implica, muitas vezes, o aumento da complexidade das suas geometrias (Merklein et al., 2011a).

Como tal, o processo de forjamento de chapa surgiu da necessidade de se produzirem componentes leves com geometrias complexas e muito precisas a baixo custo, evitando as operações de multi-estágio e certas operações de maquinagem e corte fino (Silva et al., 2015b). Merklein et al. (2010) foram pioneiros na identificação deste processo e na desmistificação da ideia de que a complexidade e precisão de um componente estão associados a um custo elevado, apesar de anteriormente já se terem verificado na indústria alguns casos de aplicação do conceito de forjamento de chapa no fabrico de componentes específicos, embora sem a perceção de que se estava perante um novo processo em evolução (Sieczkarek et al., 2014).

A tecnologia de forjamento de chapa é resumidamente caracterizada por um conjunto de processos de deformação plástica em chapa dos quais resultam intencionalmente escoamentos tridimensionais de material, combinando assim características de deformação plástica de chapa com características de deformação plástica na massa (Merklein et al., 2012). Isto é, o conceito principal do forjamento de chapa consiste na correta implementação em chapa de processos bem conhecidos e estudados de deformação plástica na massa.

Deste modo, o forjamento de chapa deve ser inserido numa nova categoria de deformação plástica de metais localizada entre a deformação plástica de chapa convencional e a deformação plástica na massa

(Figura 2.1), até porque se apresenta como o único tipo de processo de fabrico onde as fraturas podem ocorrer em qualquer um dos três modos de abertura de fissuras (Isik et al., 2016).

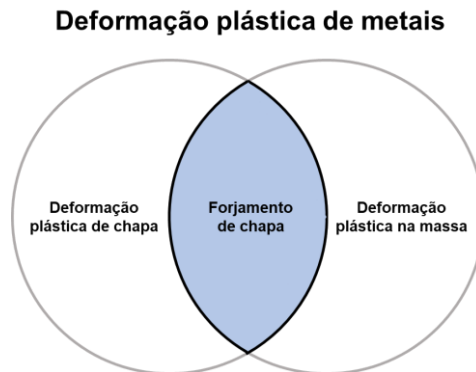


Figura 2.1 - Esquema representativo das categorias de deformação plástica em metais.

A principal diferença do forjamento de chapa para os processos convencionais de deformação plástica de chapa prende-se com o facto de existir um estado tridimensional de tensões, em vez do habitual estado de tensão plana na chapa (Isik et al., 2016). Ou seja, com a introdução de tensões na direção da espessura da chapa, o forjamento de chapa possibilita a deformação de zonas da chapa fora do seu plano, o que permite a obtenção de peças com geometrias mais complexas. De salientar também que ao contrário dos habituais processos de deformação plástica de chapa, o forjamento de chapa é caracterizado por elevadas pressões de contacto e por variações da área superficial dos componentes (Vierzigmann et al., 2011).

O processo de forjamento de chapa utiliza-se principalmente para a produção de componentes com elevado rácio de área de superfície por espessura e com detalhes posicionados fora do plano da chapa (por exemplo, dentes, nervuras ou mesmo saliências sólidas) (Silva et al., 2015b). Exemplos de componentes fabricados por forjamento de chapa são apresentados na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Componentes fabricados por forjamento de chapa (Mori e Nakano, 2015).

Tal como todos os processos de deformação plástica, o forjamento de chapa também é um processo que pode ser implementado individualmente (para fabrico completo de uma peça) de duas formas diferentes: de um modo em que a deformação total pretendida é obtida através de uma única atuação da ferramenta na peça ou de um modo incremental. Se o processo for incremental, o tempo de processamento será necessariamente mais elevado, no entanto há uma redução drástica da área de

contacto da ferramenta com a peça e, como tal, as forças envolvidas no processo são consideravelmente menores, o que se traduz em tempos de vida úteis das ferramentas maiores e possibilidade de utilização de máquinas-ferramenta de menor capacidade no que diz respeito à carga máxima exercida.

Para além da implementação individual, este processo pode também ser implementado na sequência de outros processos convencionais de deformação plástica de chapa como a estampagem, de forma a controlar melhor o escoamento do material com vista à obtenção da geometria pretendida (Mori e Nakano, 2015).

Sendo o forjamento de chapa um processo de deformação plástica, apresenta as vantagens características deste tipo de processos, nomeadamente um ótimo aproveitamento de material (não existe desperdício), melhoramento das propriedades mecânicas do material (devido ao encruamento que ocorre durante a deformação), manutenção da microestrutura e maior eficiência do que os processos de maquinagem, tanto a nível de tempo como de custos, considerando produções em massa (Merklein et al., 2011a).

Para além disso, há um aumento dos níveis de deformação críticos, já que nos processos usuais de deformação de chapa (onde os estados de tensão são maioritariamente de tração) a enformabilidade é delimitada pela CLE (curva limite de estampagem) e no forjamento de chapa (onde os estados de tensão são essencialmente de compressão), sem ocorrência de estricção ou engelhamento, a enformabilidade é delimitada pelas curvas limite de enformabilidade à fratura em que as extensões críticas são superiores (em módulo).

O forjamento de chapa permite muitas vezes reduzir a cadeia de fabrico, já que requer um menor número de passos para o fabrico de um determinado componente, traduzindo-se assim num processo economicamente e ambientalmente mais viável. Neste sentido, existem resultados bastante promissores no que toca a substituir processos como a estampagem convencional ou evitar a necessidade de operações de maquinagem (Mori e Nakano, 2015). Ainda outra vantagem face à estampagem convencional é a obtenção de peças com uma distribuição de espessura mais facilmente controlável, eliminando-se os excessos de espessura indesejados em determinadas zonas, mas promovendo o aumento de espessura para as zonas críticas da peça, dependendo simplesmente da geometria das ferramentas utilizadas (Mori e Nakano, 2015).

No entanto, como para qualquer processo, também o forjamento de chapa apresenta algumas desvantagens. Sendo este um processo maioritariamente caracterizado por estados compressivos de tensão, uma das desvantagens é o maior desgaste das ferramentas e, conseqüentemente, um menor tempo de vida útil das mesmas, quando comparado com as utilizadas nos processos convencionais de deformação de chapa, já que as forças e pressões de contacto são bastante superiores. Outra das desvantagens é a necessidade da utilização de máquinas-ferramenta com maiores capacidades (carga máxima mais elevada e grande capacidade e precisão no controlo de forças e deslocamentos) que normalmente são mais complexas e com custos substancialmente superiores. Também existe uma

diminuição da maquinabilidade dos componentes produzidos, decorrente dos elevados níveis de encruamento que se atingem no processo (Mori e Nakano, 2015).

2.1.1. Classificação das operações

Ao longo dos anos, várias tentativas de classificações das operações de forjamento de chapa têm sido propostas, sendo apresentadas de seguida as duas últimas.

Merklein et al. (2011b) apresentaram um trabalho sobre os avanços feitos em forjamento de chapa, onde as várias técnicas existentes são classificadas de acordo com o movimento da ferramenta e com a variação da espessura da chapa (Figura 2.3). No que diz respeito ao movimento da ferramenta, este pode ser de translação ou de rotação. Quanto à variação da espessura da chapa, as operações podem ser divididas em três categorias distintas: redução da espessura da chapa; aumento da espessura da chapa; e aumento ou redução da espessura da chapa. Deste modo, as tecnologias de fabrico associados ao forjamento de chapa são as operações de *upsetting*, *ironing*, *forging*, *coining*, *flow forming*, *orbital forming*, e *boss forming* (de acordo com a terminologia inglesa).

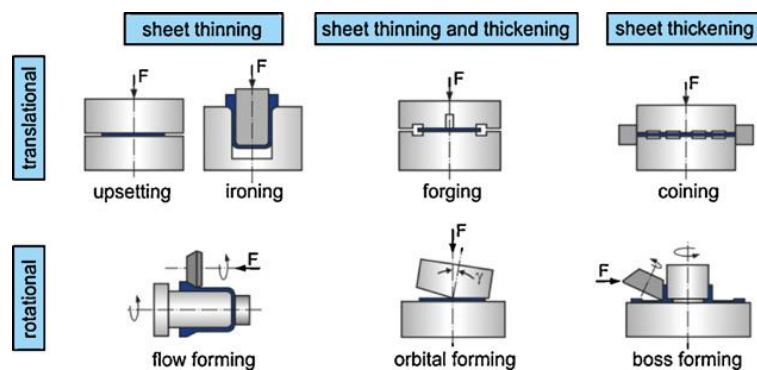


Figura 2.3 - Classificação das operações de forjamento de chapa (Merklein et al., 2011b).

Posteriormente, surgiu o sistema de classificação proposto por Mori e Nakano (2015) focado na geometria do componente. Segundo esta classificação, as operações estão divididas nas seguintes categorias: aumento localizado de espessura; diminuição localizada de espessura; formação de arestas pontiagudas; aumento de enformabilidade; fabrico de engrenagens; e fabrico de placas com geometrias complexas.

De seguida são apresentados dois exemplos de componentes que recorrem a duas operações distintas de forjamento de chapa no seu fabrico, nomeadamente, uma operação que promove um aumento localizado de espessura e uma operação que induz uma redução localizada de espessura.

No que diz respeito ao primeiro exemplo (representado na Figura 2.4), Suzumura et al. (2002) utilizaram uma operação de aumento localizado de espessura como complemento de uma operação de estampagem, de forma a aumentar a espessura da parede de um componente. Isto resultou, na prática, na combinação do movimento do punção exterior com o movimento do punção interior. Neste trabalho, o punção interior é responsável pela operação de estampagem, enquanto que o punção exterior

executa a compressão da parede (na direção axial do componente) que resulta no seu aumento de espessura.

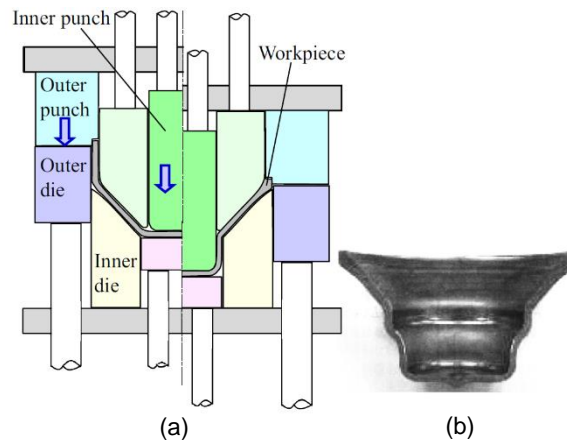


Figura 2.4 - (a) Representação esquemática da produção de um componente através de estampagem e compressão da parede para aumento de espessura; (b) Componente final produzido (Suzumura et al., 2002).

Os trabalhos realizados com operações de forjamento de chapa que permitem uma redução de espessura localizada também foram desenvolvidos para a produção de rodas dentadas. Assim, como segundo exemplo, o trabalho realizado por Hayabuchi et al. (2012) sugere a produção de uma roda dentada através de um processo que utiliza apenas uma ferramenta, o que aumenta a precisão alcançada, pois não existe transferência do componente entre operações, como representado esquematicamente na Figura 2.5.

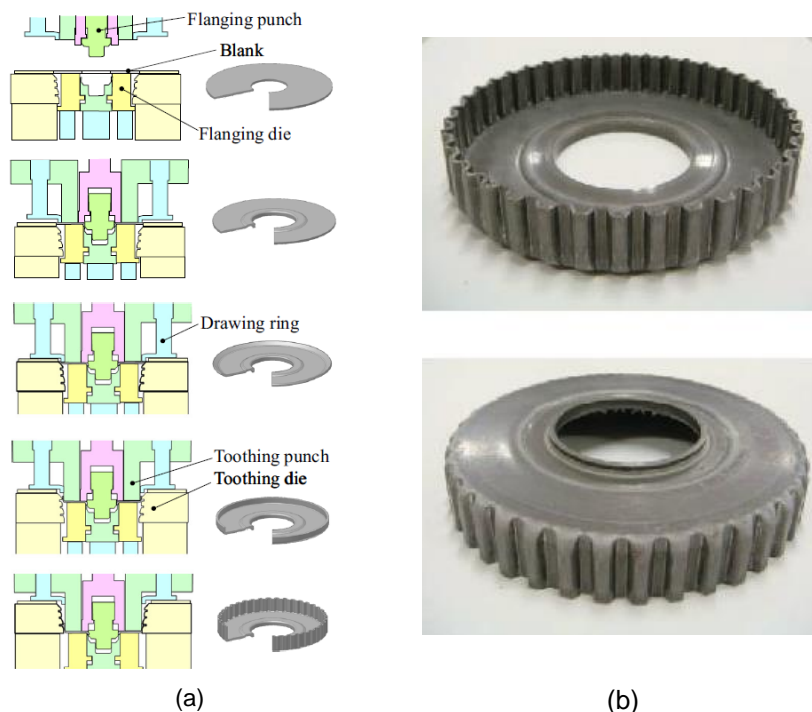


Figura 2.5 - (a) Processo de produção de uma roda dentada com multi-etapas; (b) Roda dentada produzida (Hayabuchi et al., 2012).

Na operação de produção da roda dentada destaca-se o facto de existirem várias etapas. Em primeiro lugar é fabricada a parede interior do componente, seguindo-se a parede exterior e, por último, a parede exterior adquire a forma dentada através da operação de *ironing*. A última operação deve-se à pequena folga existente entre o punção e a ferramenta, correspondente à espessura da parede exterior do componente produzido. O movimento do componente resulta da força do punção exercida na parte inferior do mesmo, que origina solicitações de tração (na direção axial) e compressão na parede do componente (na direção da espessura).

2.1.2. Condições tribológicas

As condições tribológicas são relevantes na maioria dos processos de deformação plástica, quer na massa, quer em chapa. Também no forjamento de chapa, o estudo e controlo destas condições é importante, até porque se verificam valores de pressão muito elevados. No estudo tribológico, Zhang et al. (2009) e Groche et al. (2009) afirmam que as condições tribológicas têm grande influência na qualidade dos componentes e na durabilidade das ferramentas envolvidas. Condições tribológicas adequadas garantem a separação peça-ferramenta e reduzem as forças de atrito, logo permitem a estabilização do processo e promovem uniformidade na qualidade da peça a produzir, pelo que a utilização de lubrificantes no forjamento de chapa é fundamental (Vierzigmann et al., 2011).

No que diz respeito aos ensaios usados para determinação das condições de atrito nos processos de forjamento de chapa, Vierzigmann et al. (2010) apresentam uma metodologia composta por três testes diferentes (Figura 2.6), nomeadamente o *strip drawing test*, o teste de extrusão de dupla taça (DCE – *double cup extrusion*) adaptado à aplicação em chapas e o teste de extrusão de pino (*pin extrusion test*). O teste a realizar é escolhido com base na magnitude relativa das cargas impostas durante o processo, ou seja, para cargas reduzidas, médias ou elevadas, respetivamente, de acordo com a geometria e cargas características do teste.

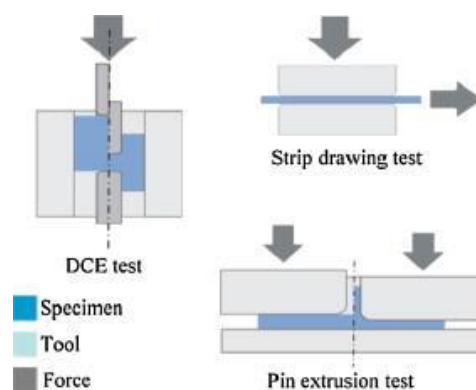


Figura 2.6 - Ensaios para determinação das condições tribológicas em processos de forjamento de chapa (Vierzigmann et al., 2010).

Para modelação do atrito entre a peça e a ferramenta, como prática comum, utiliza-se a lei de Coulomb para tensões normais reduzidas, enquanto que para tensões normais mais elevadas, tais como as que ocorrem em forjamento de chapa, utiliza-se a lei de Prandtl (Merklein et al., 2012).

2.2. Enformabilidade

A enformabilidade consiste no nível máximo de deformação que se pode atingir durante um processo tecnológico de deformação plástica, sem que se verifiquem defeitos no material, nomeadamente estrição ou fratura (Rodrigues e Martins, 2010). Assim, a definição dos limites de enformabilidade é muito importante para a caracterização dos materiais e obtenção dos valores máximos de deformação que se podem atingir durante o processo de fabrico de uma peça. Deste modo, evita-se a falha das peças e possibilita-se a otimização dos processos de fabrico (Martins et al., 2014).

A estrição consiste numa redução drástica da secção resistente da peça numa determinada zona e ocorre em processos onde existem esforços de tração em pelo menos uma direção. A estrição pode ser difusa e/ou localizada e no que diz respeito à enformabilidade, esta é delimitada por uma única curva no plano das extensões principais: curva limite de estampagem (CLE) (Rodrigues e Martins, 2010).

Uma fratura consiste numa separação do material e pode ser originada tanto na superfície da peça, como no seu interior. A causa desta separação de material é a acumulação de dano nas regiões onde os valores de deformação se tornam críticos devido à deformação plástica do material. As fraturas dependem das circunstâncias a que o material está exposto, do tipo de esforços a que este é submetido durante a deformação, bem como da microestrutura do material (Silva et al., 2015a). No âmbito da enformabilidade à fratura dos materiais metálicos, existem três modos de abertura de fraturas, sendo que a cada um deles corresponde um determinado tipo de solicitações. Assim, a fratura pode ocorrer devido a esforços de tração (modo I da mecânica da fratura), devido a esforços de corte no plano da chapa (modo II da mecânica da fratura) ou ainda como consequência de esforços de corte fora do plano (modo III da mecânica da fratura) (Martins et al., 2014). A Figura 2.7 apresenta esquematicamente os três modos de abertura de fissuras.

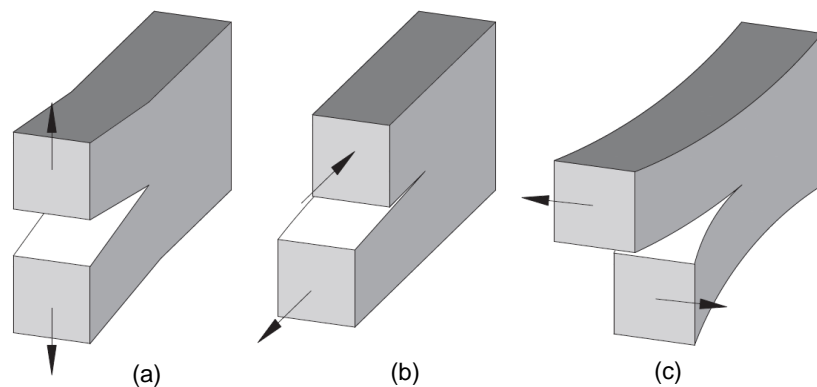


Figura 2.7 - Modos de abertura de fissuras da mecânica da fratura: (a) Modo I; (b) Modo II; (c) Modo III (Martins et al., 2014).

A cada modo de abertura de fissuras está associada uma curva que define o limite de enformabilidade. Desta forma, a curva limite de fratura (CLF), a curva limite de fratura ao corte (CLFC) e a curva limite de fratura ao corte fora do plano (CLFCFP) dizem respeito aos limites de enformabilidade à fratura nos modos I, II e III da mecânica da fratura, respetivamente.

A forma mais comum para representar os limites de enformabilidade dos materiais metálicos é através do diagrama limite de enformabilidade (FLD – *Forming Limit Diagram*). Este diagrama fornece uma representação gráfica das regiões no plano das extensões principais a partir das quais se dá o início da estricção (CLE) ou da fratura (CLF, CLFC e CLFCFP). Os valores de extensão situados na área abaixo das curvas correspondem aos valores admissíveis de deformação para os quais não ocorre estricção ou fratura, enquanto que os valores de extensão situados na área acima das curvas correspondem aos valores de deformação para os quais ocorre a falha do material.

A outra forma de apresentar os limites de enformabilidade é através do plano da triaxialidade. Este espaço foi apresentado por Vujovic e Shabaik (1986) há mais de 30 anos como um critério para os limites de enformabilidade em processos de deformação plástica na massa de componentes metálicos baseado na magnitude da componente hidrostática e na tensão efetiva do estado de tensões.

O plano da triaxialidade é frequentemente utilizado para representação de casos de fratura na massa submetidas a estados de tensão tridimensionais, já que este tipo de casos não pode ser representado no plano das extensões principais, pois este plano requer que a falha ocorra numa superfície livre sob condições de tensão plana para uma boa modelação da fratura (Silva et al., 2015a).

Na Figura 2.8, a título exemplificativo, são apresentados os limites de enformabilidade à fratura nos modos I, II e III da mecânica da fratura no plano das extensões principais e no plano da triaxialidade obtidos no trabalho de Isik et al. (2016).

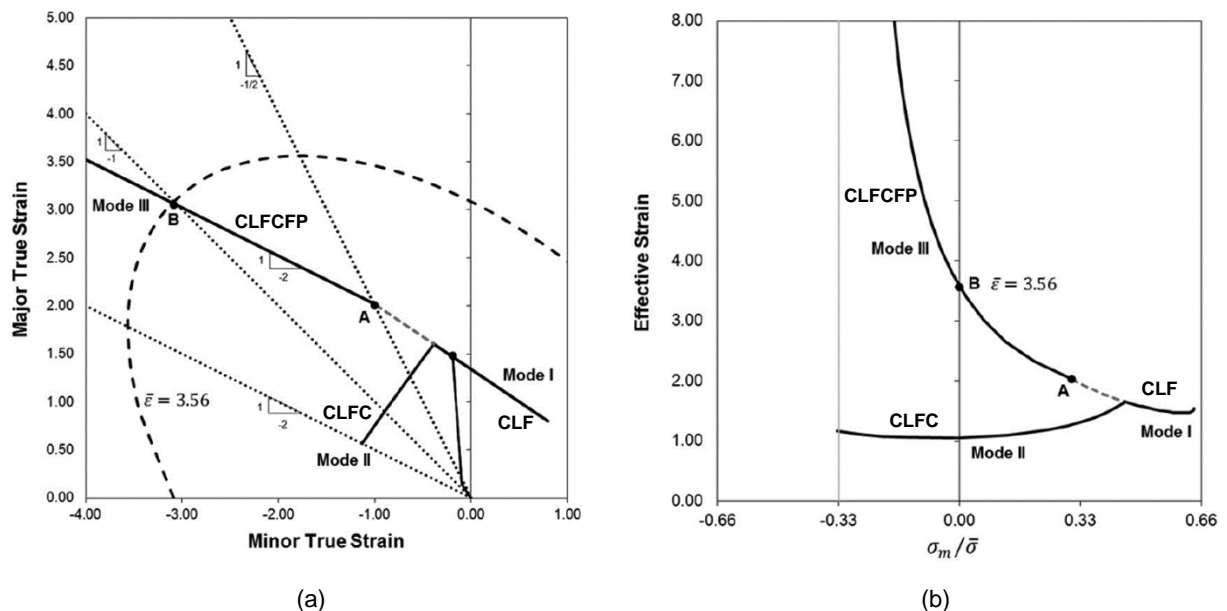


Figura 2.8 - Representação dos limites de enformabilidade à fratura nos modos I, II e III da mecânica da fratura (a) no plano das extensões principais e (b) no plano da triaxialidade (Adaptado de Isik et al., 2016).

Nos processos de deformação plástica na massa, a fratura do material pode ocorrer sob esforços de tração ou de corte fora do plano, a que correspondem os modos I e III da mecânica da fratura. Relativamente aos processos convencionais de deformação plástica de chapa, a fratura do material pode ocorrer devido a esforços de tração ou de corte no plano, a que correspondem os modos I e II da

mecânica da fratura (Martins et al., 2014). Por sua vez, em forjamento de chapa, a fratura pode ocorrer em qualquer um dos três modos da mecânica da fratura, nomeadamente no modo III, o que é uma novidade para processos em chapa (Isik et al., 2016).

2.2.1. Enformabilidade no modo I

Para qualquer processo de deformação plástica de chapa, se existirem esforços de tração em pelo menos uma direção, pode verificar-se o fenómeno da estrição antes da fratura. Neste sentido, a curva limite de estampagem (CLE) consiste numa representação gráfica do limite de enformabilidade à estrição, dividindo a zona das deformações admissíveis da zona das deformações para as quais ocorre a estrição.

A CLE é obtida de forma empírica, sendo um processo algo complexo, já que, muitas vezes, é difícil identificar o momento e a zona em que se inicia o fenómeno da estrição. Esta curva é bastante utilizada na indústria em geral, uma vez que para processos convencionais de deformação plástica de chapa, como a estampagem, correspondem estados de tensão de tração e, conseqüentemente, ocorrem fenómenos de estrição que limitam os mesmos. A estrição é indesejada, pois implica a existência de zonas com espessura demasiado reduzida na peça.

A CLE não é considerada uma propriedade do material, porque depende do histórico de deformação do material. Uma representação esquemática da CLE é apresentada de seguida na Figura 2.9.

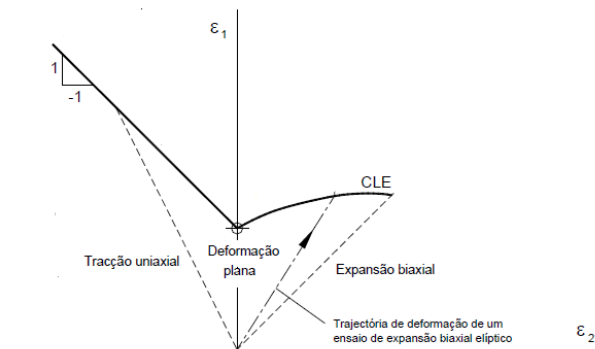


Figura 2.9 - Representação esquemática da CLE (Adaptado de Rodrigues e Martins, 2010).

No que diz respeito à enformabilidade à fratura, interessa definir a curva limite de fratura (CLF). Esta curva consiste na representação gráfica do limite de enformabilidade à fratura no modo I da mecânica da fratura, onde a falha ocorre devido aos esforços de tração aplicados no material.

Dos vários resultados experimentais que se encontram na literatura, sabe-se que independentemente do histórico de carregamentos numa chapa metálica, a fratura ocorre para uma extensão verdadeira na direção da espessura aproximadamente constante:

$$\varepsilon_{3f} = \ln(t_f/t_0) = \text{const} \quad (2.1)$$

onde t_0 é a espessura inicial e t_f a espessura final no momento da fratura.

Da condição de incompressibilidade:

$$\varepsilon_{1f} + \varepsilon_{2f} + \varepsilon_{3f} = 0 \quad (2.2)$$

Assim, das expressões (2.1) e (2.2), resulta que a equação associada à CLF pode ser definida como uma reta de declive '-1' no plano das extensões principais, marcando presença no 1º e 2º quadrantes (ver Figura 2.8a):

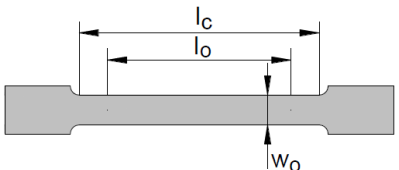
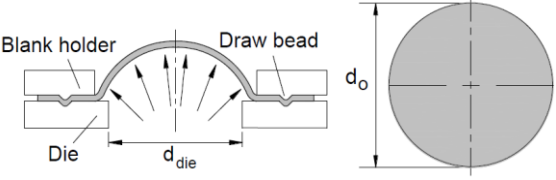
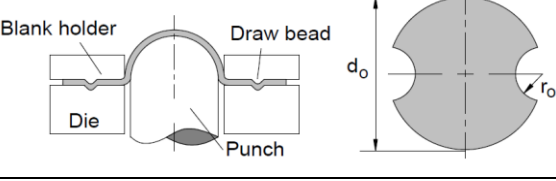
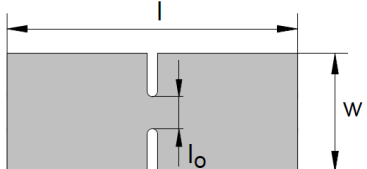
$$\varepsilon_{1f} = -\varepsilon_{2f} - \varepsilon_{3f} = -\varepsilon_{2f} - const \quad (2.3)$$

Isto significa que a CLF representa o limite máximo de redução de espessura e conclui-se que a CLF deve ser considerada uma propriedade do material, devido ao facto da redução crítica de espessura ser constante e independente do histórico de deformação do material antes da fratura (Martins et al., 2014).

Para determinar os parâmetros típicos de um material relativos à sua enformabilidade no modo I da mecânica da fratura, existem vários ensaios que se realizam tanto em chapa, como na massa.

Recentemente, Magrinho et al. (2018b) realizaram vários ensaios de enformabilidade em chapa para obtenção dos limites de enformabilidade numa liga de aço de alta resistência. No seu trabalho, para determinação da CLE e CLF, utilizaram-se os resultados dos ensaios de tração, *Bulge* (circular e elíptico), *Nakajima* e *double notched tensile test*, cujas representações esquemáticas e estados de tensão e deformação são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Ensaio de enformabilidade para determinação dos limites de enformabilidade no modo I da mecânica da fratura em chapas metálicas (Magrinho et al., 2018b).

Ensaio	Representação Esquemática	Estado de tensão	Estado de deformação
Tração		$\sigma_1 > 0$ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$	$\varepsilon_1 > 0$ $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{\varepsilon_1}{2}$
<i>Bulge</i>		$\sigma_1 \geq \sigma_2 > 0$ $\sigma_3 = 0$	$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 > 0$ $\varepsilon_3 < 0$
<i>Nakajima</i>		$\sigma_1 > \sigma_2 \geq 0$ $\sigma_3 = 0$	$\varepsilon_1 \geq 0$ $-\frac{\varepsilon_1}{2} < \varepsilon_2 < \varepsilon_1$ $\varepsilon_3 < 0$
<i>Double Notched Tension</i>		$\sigma_1 > 0$ $\sigma_2 < 0$ $\sigma_3 = 0$	$\varepsilon_1 > 0$ $\varepsilon_2 = 0$ $\varepsilon_3 < 0$

Também recentemente, Magrinho et al. (2018a) realizaram vários ensaios de enformabilidade na massa para obtenção dos limites de enformabilidade do aço AISI 1045 laminado a frio com recurso a um sistema digital de correlação de imagens. Neste trabalho, para determinação da CLF, recorreu-se aos ensaios de compressão com provetes de diferentes geometrias: *tapered*, *flanged* e *hemispherical*, cujas representações esquemáticas são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Ensaio de enformabilidade para determinação do limite de enformabilidade à fratura no modo I da mecânica da fratura na massa (Magrinho et al., 2018a).

Ensaio	<i>Tapered</i>	<i>Flanged</i>	<i>Hemispherical</i>
Representação Esquemática			

2.2.2. Enformabilidade no modo II

A curva limite de fratura ao corte (CLFC) consiste na representação gráfica do limite de enformabilidade à fratura no modo II da mecânica da fratura, onde a falha ocorre devido aos esforços de corte no plano da chapa.

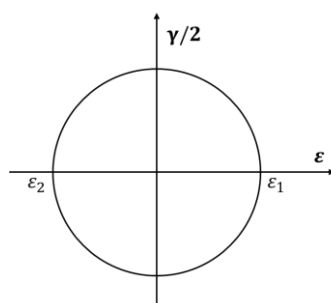


Figura 2.10 – Círculo de Mohr de extensões relativo a esforços de corte no plano.

Considerando o círculo de Mohr de extensões para as condições nas quais a fratura ocorre devido a esforços de corte no plano (Figura 2.10), é possível chegar à expressão:

$$\varepsilon_{1f} - \varepsilon_{2f} = \gamma_f \quad (2.4)$$

Considerando que a distorção máxima no plano é constante, tem-se que:

$$\varepsilon_{1f} = \varepsilon_{2f} + const \quad (2.5)$$

Deste modo, a CLFC, é representada no plano das extensões principais por uma reta de declive '+1'. A CLFC está presente unicamente no 2º quadrante do plano das extensões principais e interceta a CLF, fazendo um ângulo de 90º, num ponto de transição entre os modos de fratura (ver Figura 2.8a).

Novamente, também a CLFC pode ser considerada uma propriedade do material, devido ao facto dos valores críticos de distorção no plano serem constantes e independentes do histórico de deformação do material antes da fratura.

Para determinação da CLFC relativa à enformabilidade no modo II da mecânica da fratura, apenas existem ensaios em chapa, já que a fratura no modo II não ocorre para casos de deformação plástica na massa. Neste sentido, a título exemplificativo, no trabalho de Magrinho et al. (2018b), os autores obtiveram a CLFC através dos resultados dos ensaios de corte e *staggered double notched tension*, cujas representações esquemáticas e estados de tensão e deformação são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Ensaio de enformabilidade para determinação do limite de enformabilidade à fratura no modo II da mecânica da fratura em chapas metálicas (Magrinho et al., 2018b).

Ensaio	Representação Esquemática	Estado de tensão	Estado de deformação
Corte		$\sigma_1 = -\sigma_2$ $\sigma_3 = 0$	$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ $\varepsilon_3 = 0$
<i>Staggered Double Notched Tension</i>		$\sigma_1 > -\sigma_2$ $\sigma_3 = 0$	$\varepsilon_1 > -\varepsilon_2$ $\varepsilon_3 < 0$

2.2.3. Enformabilidade no modo III

Relativamente à enformabilidade à fratura no modo III, o escoamento tridimensional do material é a principal causa da existência de distorções fora do plano que acabam por ser críticas e dar origem a fissuras, logo este é um modo de abertura de fissuras típico da deformação plástica na massa (Merklein et al., 2012). No entanto, como já foi referido, em processos de forjamento de chapa também já se verificou a fratura do material no modo III da mecânica da fratura (Isik et al., 2016).

A curva limite de fratura ao corte fora do plano (CLFCFP) consiste na representação gráfica do limite de enformabilidade à fratura no modo III da mecânica da fratura, onde a falha ocorre devido aos esforços de corte fora do plano aplicados no material.

Considerando o círculo de Mohr de extensões para as condições nas quais a fratura ocorre devido a esforços de corte fora do plano (Figura 2.11), é possível chegar à expressão:

$$\varepsilon_{1f} - \varepsilon_{3f} = \gamma_f \quad (2.6)$$

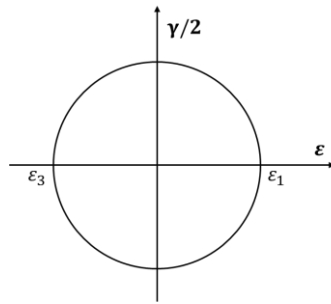


Figura 2.11 - Círculo de Mohr de extensões relativo a esforços de corte fora do plano.

Da condição de incompressibilidade enunciada na expressão (2.2), pode escrever-se:

$$\varepsilon_{3f} = -\varepsilon_{1f} - \varepsilon_{2f} \quad (2.7)$$

Das expressões (2.6) e (2.7) e considerando que a distorção máxima fora do plano é constante, tem-se que:

$$\varepsilon_{1f} = -\frac{1}{2}\varepsilon_{2f} + const \quad (2.8)$$

Deste modo, a CLFCFP, é representada no plano das extensões principais por uma reta de declive '-1/2', estando presente unicamente no 2º quadrante (ver Figura 2.8a).

Tal como as curvas características dos modo I e II da mecânica da fratura, também a CLFCFP pode ser considerada uma propriedade do material.

Para determinação da CLFCFP relativa à enformabilidade no modo III da mecânica da fratura, apenas existiam, até a elaboração desta dissertação, ensaios na massa, como por exemplo os ensaios de compressão de provetes cilíndricos e de corte usados no trabalho de Magrinho et al., 2018a, cujas representações esquemáticas são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Ensaios de enformabilidade para determinação dos limites de enformabilidade no modo III da mecânica da fratura na massa (Magrinho et al., 2018a).

Ensaio	Cilíndrico	Corte
Representação Esquemática		

Nesta dissertação pretende-se caracterizar experimentalmente, pela primeira vez, o limite de enformabilidade à fratura no modo III da mecânica da fratura a partir do desenvolvimento de um novo ensaio de enformabilidade de chapa. Como tal, de seguida são apresentados os principais trabalhos realizados em materiais metálicos sob a forma de chapa, em que a fratura ocorre precisamente pelo modo III da mecânica da fratura, ou seja, devido a distorções críticas fora do plano da chapa. No

entanto, vale a pena referir que estes ensaios nunca foram utilizados para caracterizar o respetivo limite de enformabilidade.

Ensaio das calças

O ensaio das calças (designado em inglês por *trousers test*), representado na Figura 2.12, baseia-se na aplicação de forças em sentidos contrários e perpendiculares ao plano da chapa em cada uma das pernas do provete, de forma a originar a abertura de fissuras e a sua propagação a partir dos rasgos previamente estabelecidos no fabrico do provete. O provete pode ter duas geometrias distintas, apresentando duas ou três pernas. Quanto às variáveis deste ensaio, P corresponde à magnitude da força de rasgamento, t corresponde à espessura da chapa e B corresponde à largura das pernas.

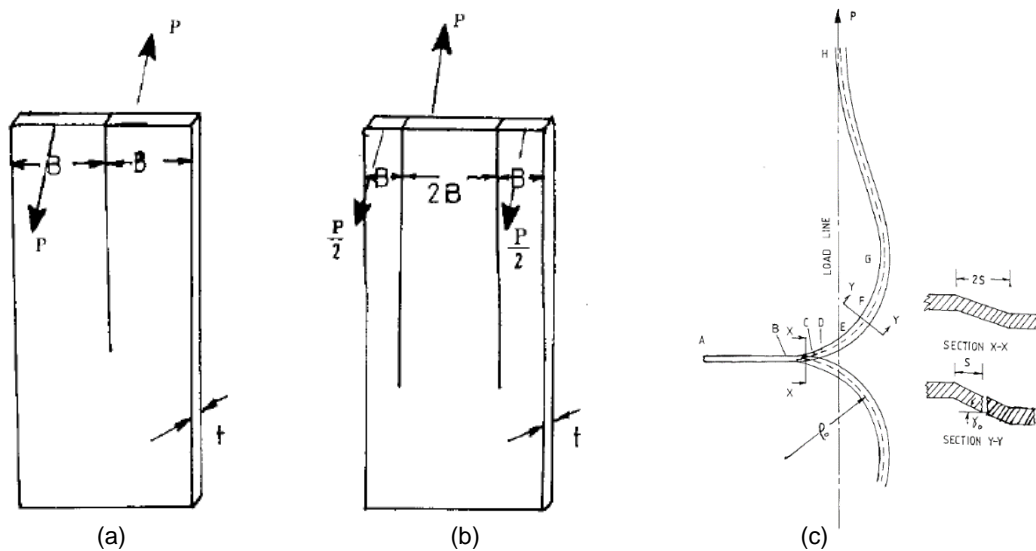


Figura 2.12 - Ensaio das calças: (a) geometria de 2 pernas; (b) geometria de 3 pernas; (c) configuração da deformação das pernas do provete em regime estacionário de rasgamento em metais (Mai e Cotterell, 1984).

Rivlin e Thomas (1953) foram os autores a implementar o teste das calças pela primeira vez. Utilizaram-no no seu trabalho para ensaios em materiais poliméricos, nomeadamente elastómeros, e desde aí que tem sido utilizado em chapas finas de diferentes materiais elásticos para determinação do trabalho essencial de fratura específico (w_e) no modo III da mecânica da fratura. O uso recorrente deste teste para materiais elásticos prende-se com o facto de nestes materiais, todo o trabalho externo aplicado no provete ser convertido em trabalho essencial de fratura, uma vez que a zona de deformação plástica corresponde à zona onde ocorre o processo de fratura. Assim, não existe dissipação de energia para a restante área das pernas do provete, logo o cálculo do trabalho essencial de fratura específico é bastante simples (Mai e Cotterell, 1984).

Na fratura de um material dúctil, o trabalho plástico total (W_p) é constituído por duas componentes, o trabalho essencial de fratura (W_e), que diz respeito à quantidade de energia de facto utilizada para abertura e propagação da fratura, e o trabalho não essencial de fratura (W_{ne}), que está relacionado com a energia gasta em deformações do material na zona adjacente à fratura. Apenas o trabalho essencial de fratura específico, ou seja, trabalho essencial de fratura por unidade de área, pode ser considerado

uma propriedade do material (Mai e Cotterell, 1984), já que não depende do volume do provete, da geometria do provete utilizado, nem da configuração da carga imposta.

Na prática, no caso dos materiais metálicos dúcteis, as pernas dos provetes apresentam maior resistência à flexão e, como tal, verificam-se deformações plásticas adicionais que correspondem a trabalho plástico não essencial de fratura, o que significa que esta parcela tem de ser subtraída ao trabalho plástico total de modo a se obter o valor do trabalho essencial de fratura. Assim, apenas muitos anos mais tarde da primeira utilização do ensaio das calças é que, no trabalho de Mai e Cotterell (1984), se recorreu a este ensaio para determinação do trabalho essencial de fratura específico no modo III da mecânica da fratura em chapas finas de um material metálico dúctil. Esta foi também a primeira vez que se realizou um ensaio para materiais metálicos dúcteis sob a forma de chapa, onde o material fratura devido aos esforços de corte fora do plano.

Neste trabalho de Mai e Cotterell (1984), utilizando o ensaio das calças, determinou-se o trabalho essencial de fratura específico no modo III da mecânica da fratura para dois materiais diferentes, aço de baixa liga Lyten e liga de alumínio AA5251. Isto foi conseguido através de uma extrapolação para a largura de perna igual a zero, partindo de uma tendência linear entre a força de rasgamento por unidade de espessura e a largura das pernas que se obteve dos ensaios experimentais.

Contudo, este trabalho não fornece qualquer tipo de informação acerca da caracterização do limite de enformabilidade à fratura no modo III da mecânica da fratura através da sua representação no plano das extensões principais ou no plano da triaxialidade.

Ensaio de arrastamento

Isik et al. (2016) foram os primeiros a verificar a existência de fraturas de chapa metálica no modo III da mecânica da fratura para processos de forjamento de chapa. No seu trabalho, Isik et al. (2016) recorreram a resultados teóricos e experimentais para representação dos limites de enformabilidade de chapas de alumínio AA1050-H111 de 1 mm de espessura. Para além disso, desenvolveram um ensaio experimental de arrastamento incremental com uma ferramenta de indentação e simularam-no numericamente no programa comercial de elementos finitos *Simufact.forming 12*.

Nessa investigação, os limites de enformabilidade à fratura nos modos I e II da mecânica da fratura foram representados no plano das extensões principais e no plano da triaxialidade a partir de resultados obtidos noutros trabalhos anteriormente publicados pelos autores. Os ensaios que permitiram a obtenção destes resultados foram os ensaios de tração, corte e *Bulge* (circular e elítico). Relativamente ao limite de enformabilidade no modo III da mecânica da fratura, como não existem ensaios em chapa para o determinar e como as geometrias dos provetes usados na massa para determinação deste limite não podem ser fabricados a partir de chapa, os autores estimaram a posição do limite de enformabilidade à fratura no modo III da mecânica da fratura recorrendo a algumas hipóteses teóricas. As representações gráficas destes limites já foram apresentadas na Figura 2.8.

O ensaio proposto tenta simular uma operação de forjamento de chapa de aumento localizado de espessura numa placa de alumínio através do arrastamento incremental de uma ferramenta de indentação (Figura 2.13a). A ferramenta   feita de aço rápido de elevada dureza e a sua ponta tem a forma de meio cilindro deitado na horizontal de raio $R = 10$ mm e largura $w = 10$ mm. A chapa   fixa   mesa de trabalho, de forma a não haver escorregamento ou levantamento da mesma durante o processo. O sistema de fixa o   acoplado   mesa de trabalho com parafusos e consiste numa placa encostadora (*blank holder*) com um rasgo longitudinal para permitir o movimento linear da ferramenta aquando da sua atua o na chapa, tal como se pode observar na Figura 2.13b.

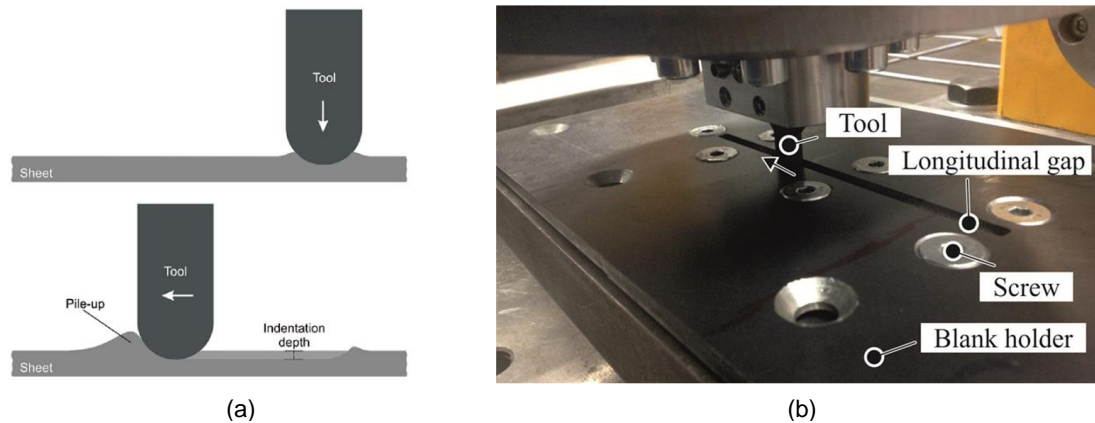


Figura 2.13 – Ensaio experimental de arrastamento da ferramenta sobre a chapa para aumento localizado de espessura: (a) representa o esquemática do ensaio e (b) fotografia do setup experimental com identifica o dos principais componentes (Isik et al., 2016).

Foram realizados vários ensaios na chapa com três profundidades de indenta o diferentes ($i = 0.15, 0.20, 0.25$ mm) com o objetivo de se investigar a sua influência no processo.

O ensaio   composto por duas etapas diferentes: em primeiro lugar, a ferramenta   posicionada perpendicularmente   superfície da chapa e move-se nesta dire o até   profundidade de indenta o pretendida; depois, em segundo lugar, a mesa de trabalho move-se longitudinalmente provocando a aço de arrastamento da ferramenta sobre a chapa.

Os autores também realizaram trabalho numérico, cujo modelo numérico utilizado está representado na Figura 2.14.

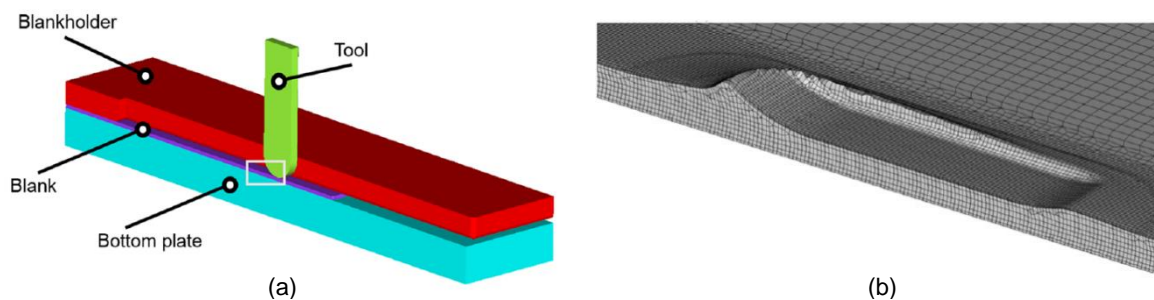


Figura 2.14 – Modelo numérico do ensaio de arrastamento da ferramenta sobre a chapa para aumento de espessura: (a) representa o esquemática do modelo e (b) detalhes da malha após o movimento longitudinal da ferramenta (Isik et al., 2016).

A chapa foi modelada como um objeto deformável elasto-plástico, sendo metade da sua geometria discretizada por cerca de 95500 elementos hexaédricos, já que se trata de um caso de simetria longitudinal. A ferramenta e a placa encostadora foram modeladas como corpos rígidos e o atrito resultante do contacto entre as superfícies da ferramenta e da chapa foi modelado de acordo com a lei de Coulomb com $\mu = 0.1$.

Os resultados experimentais revelaram dois tipos distintos de deformação: no ensaio com a profundidade de indentação menor, a deformação devido ao arrastamento da ferramenta ocorreu sem fraturas do material, enquanto que nos outros dois ensaios com profundidades de indentação maiores, a deformação atingiu valores críticos e, conseqüentemente, ocorreu a fratura do material. Os resultados numéricos demonstraram-se de acordo com os resultados experimentais.

Em sùmula, as observações experimentais, as simulações numéricas e a análise das trajetórias de deformação ao longo do tempo no plano da triaxialidade (Figura 2.15c) permitiram concluir que grandes profundidades de indentação são responsáveis por fraturas transversais na área superior da ranhura que acabam por se propagar numa direção inclinada ao longo da espessura da chapa à medida que a ferramenta se desloca longitudinalmente (Figuras 2.15a e 2.15b). Estas fraturas correspondem a fissuras do material no modo III da mecânica da fratura. Os autores concluem ainda que esta capacidade das chapas falharem num modo de fratura característico da deformação plástica na massa justifica a razão pela qual o forjamento de chapa deve ser considerado como uma nova categoria de deformação plástica de metais (Isik et al., 2016).

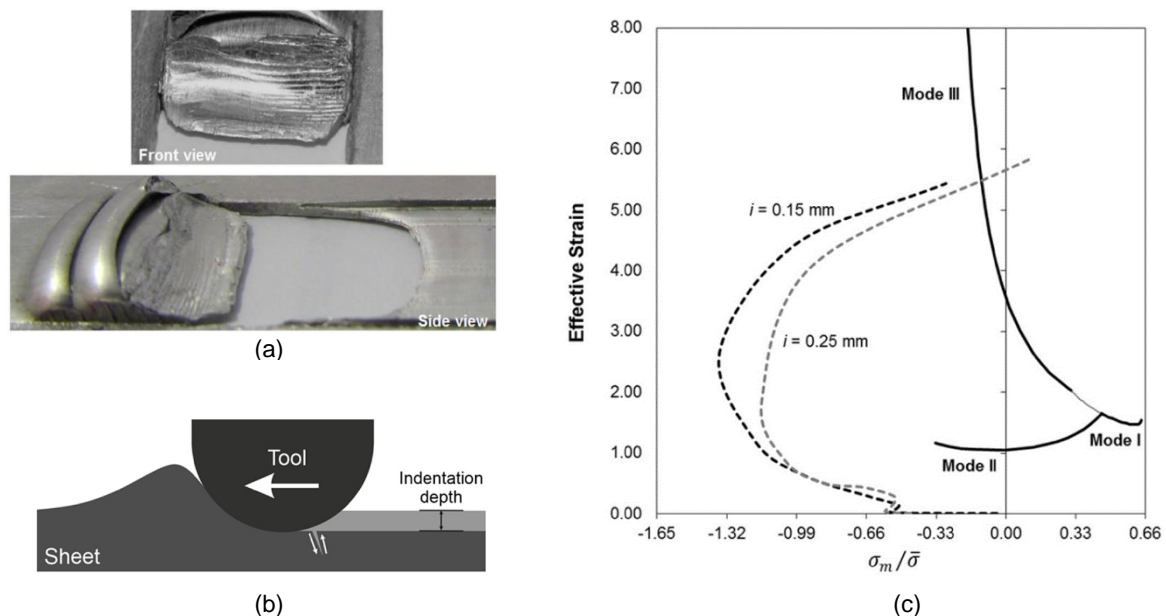


Figura 2.15 – Fratura no modo III da mecânica da fratura: (a) fotografias das fraturas na chapa nas vista frontal (em cima) e lateral (em baixo) para uma profundidade de indentação de $i = 0.25$ mm, (b) representação esquemática da propagação da fratura e (c) representação das trajetórias de deformação no plano da triaxialidade para os ensaios com uma profundidade de indentação de $i = 0.15$ mm e $i = 0.25$ mm (Isik et al., 2016).

Ensaio de ligação de chapas

Recentemente, Silva et al. (2017) realizaram um estudo sobre a viabilidade da ligação de chapas através de um processo de forjamento de chapa, onde duas chapas perpendiculares e alinhadas longitudinalmente são unidas através da compressão de pinos previamente maquinados numa das chapas sobre cavidades na outra chapa. A representação esquemática do processo de ligação é apresentada na Figura 2.16.

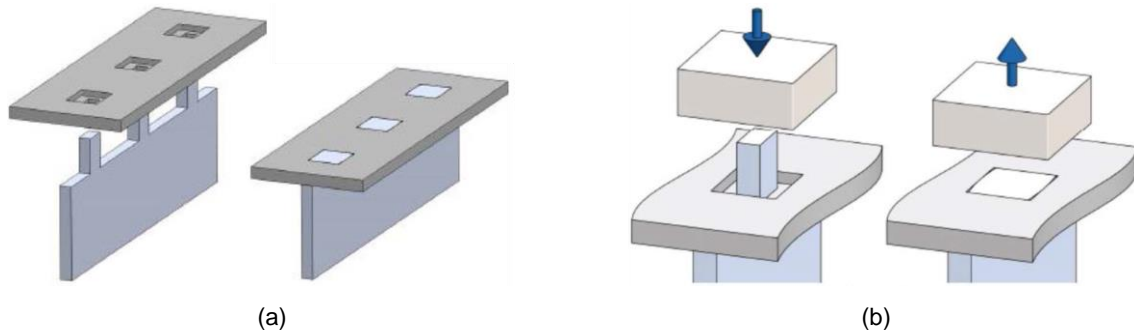


Figura 2.16 – (a) Representação esquemática da ligação de chapas antes (esquerda) e depois (direita) do processo de ligação; (b) Representação da compressão do pino de uma das chapas sobre a cavidade da outra chapa (Silva et al., 2017).

Neste trabalho, foram realizados vários ensaios de compressão para pinos de diferentes alturas. Os provetes estavam encastrados numa das extremidades e livres na outra. Após a realização dos ensaios, observou-se o aparecimento de fraturas no modo III da mecânica da fratura (ver Figura 2.17), no lado correspondente à espessura do pino. A fratura ocorreu a partir de determinados deslocamentos de compressão, onde a deformação imposta excedia os limites de enformabilidade do material.

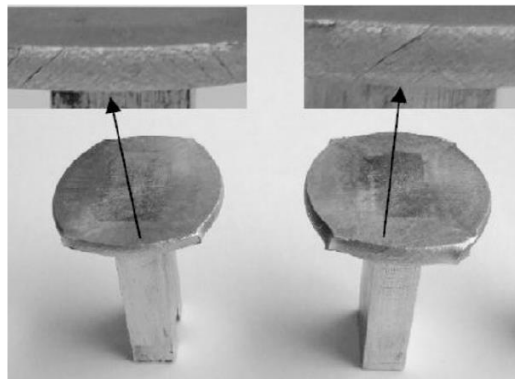


Figura 2.17 – Fraturas no modo III da mecânica da fratura observadas nos provetes ensaiados no trabalho de Silva et al (2017).

2.3. Critérios de dano

Um critério de dano tem como objetivo a avaliação da acumulação de deformações plásticas do material até aos valores críticos de fratura. Genericamente, um critério de dano pode ser definido da seguinte forma:

$$D_{crit} = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} g d\bar{\epsilon} \quad (2.9)$$

onde g é uma função que corrige o valor acumulado da extensão efetiva.

Existem diversos critérios de dano e a utilização de cada critério varia consoante o modo de abertura de fissuras e os esforços a que o material é sujeito. Para o modo I da mecânica da fratura, existe o critério de dano dúctil desacoplado D^I , baseado na equação seguinte proposta por Atkins e Mai (1985),

$$\ln\left(\frac{l}{d}\right) \approx \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (2.10)$$

Esta equação relaciona as dilatações dos *voids* com a triaxialidade $\sigma_m/\bar{\sigma}$, onde l corresponde ao espaçamento entre *voids* e d ao diâmetro dos mesmos (Figura 2.18a). Assim, surge o critério de dano de McClintock (Ayada et al., 1987) que é expresso da seguinte forma,

$$D_{crit}^I = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (2.11)$$

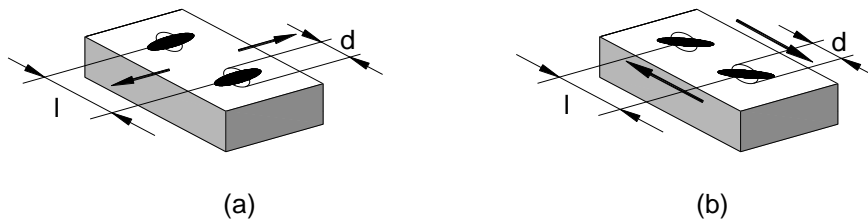


Figura 2.18 – Representação esquemática do crescimento dos *voids* para esforços de (a) tensão e (b) corte no plano.

Mais recentemente e seguindo uma metodologia semelhante, Christiansen et al. (2019) propuseram um critério de dano dúctil desacoplado D^{II} para o modo II da mecânica da fratura, onde a abertura e crescimento dos *voids* ocorre por efeitos de dilatação e distorção (Figura 2.18b). Para isso, basearam-se no trabalho de McClintock et al. (1966) onde se relaciona o espaçamento entre *voids* l e o diâmetro dos *voids* d com a tensão média σ_m , a distorção γ e o coeficiente de encruamento n ,

$$\ln\left(\frac{l}{d}\right) = \ln\sqrt{1+\gamma^2} + \frac{\gamma}{2(1-n)} \sinh\left(\frac{(1-n)\sigma_m}{\tau}\right) \quad (2.12)$$

Passando a expressão acima para a forma integral, bem como aproximando-se o primeiro termo do lado direito da equação por $\ln\sqrt{1+\gamma^2} \cong \frac{\gamma}{3}$ para distorções $\gamma < 2$ e simplificando o segundo termo $\sinh\left(\frac{(1-n)\sigma_m}{\tau}\right) \approx \frac{(1-n)\sigma_m}{\tau}$ para valores da tensão média e tensões de corte da mesma magnitude tem-se:

$$\ln\left(\frac{l}{d}\right) \approx \int_0^{\gamma} \frac{1}{3} d\gamma + \int_0^{\gamma} \frac{\sigma_m}{2\tau} d\gamma \quad (2.13)$$

A partir desta relação, Christiansen et al. (2019) obtiveram então a expressão para o critério de dano dúctil desacoplado para fraturas formadas por esforços de corte no plano apresentada de seguida,

$$D_{crit}^{II} = \int_0^{\gamma} \frac{\tau}{\bar{\sigma}} d\gamma + \int_0^{\gamma} \frac{3}{2} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\gamma \quad (2.14)$$

onde o primeiro termo do lado direito da equação corresponde à acumulação do trabalho plástico de corte normalizado integrado na distorção $\int \tau d\gamma$ e o segundo termo contabiliza a influência da triaxialidade $\sigma_m/\bar{\sigma}$ na abertura de fissuras por esforços de corte no plano.

Para o modo III da mecânica da fratura, o critério de dano mais utilizado é o critério de Cockcroft-Latham (Cockcroft e Latham, 1968),

$$D_{CL} = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (2.15)$$

baseado apenas na razão entre a tensão principal σ_1 e a tensão efetiva $\bar{\sigma}$.

Tendo em consideração que os processos de forjamento de chapa resultam da implementação de operações típicas de deformação plástica na massa em componentes de chapa, promovendo um escoamento tridimensional do material, resulta que o forjamento de chapa é um processo de deformação plástica onde o material pode fraturar por qualquer um dos três modos de fratura. Aliás, é o único tipo de processos onde tal pode ocorrer (Isik et al., 2016). Deste modo, é de extrema importância a existência de ensaios em chapa capazes de caracterizar os limites de enformabilidade nos três modos de fratura.

Dado que nos processos convencionais de deformação plástica de chapa, a fratura do material ocorre no modo I ou II da mecânica da fratura, já existem vários ensaios capazes de os caracterizar de forma simples e rigorosa. No entanto, como a fratura do material no modo III da mecânica da fratura em chapa não é habitual, ainda não existe nenhum ensaio em chapa que permita caracterizar o limite de enformabilidade neste modo de fratura.

Tanto o ensaio das calças, como o ensaio de arrastamento ou ainda o ensaio de ligação de chapas são ensaios em chapa onde ocorre fratura no modo III da mecânica da fratura, no entanto nunca foram utilizados para caracterizar o respetivo limite de enformabilidade. Para além disso, os dois primeiros são algo complexos e incapazes de simular as solicitações a nível de esforços que ocorrem na realidade nos processos de forjamento de chapa.

Assim, o principal objetivo desta tese é preencher esta lacuna e estabelecer um novo ensaio de chapa e uma nova metodologia para determinação do limite de enformabilidade à fratura no modo III da mecânica da fratura. O ensaio também deve ser de fácil implementação e capaz de reproduzir solicitações no material semelhantes às que ocorrem na realidade, na indústria, nos processos de forjamento de chapa. Para isso, muito contribuíram as observações registadas no trabalho de Silva et al. (2017).

De referir que esta dissertação envolve também o desenvolvimento de um novo critério de dano, capaz de caracterizar as distribuições de dano para materiais que falham por fraturas no modo III da mecânica da fratura decorrentes de esforços de corte fora do plano da chapa.

3. Trabalho Experimental

Este capítulo encontra-se dividido em quatro partes. Primeiramente, é feita a caracterização mecânica do material. Depois, são descritos os ensaios realizados para caracterização da enformabilidade da chapa nos modos I e II da mecânica da fratura. Em terceiro lugar, são apresentados os novos ensaios de compressão longitudinal de chapa, bem como todo o seu desenvolvimento e respetiva metodologia, que permitiram determinar a curva limite de fratura ao corte fora do plano (CLFCFP) pela primeira vez diretamente a partir de chapa. Por último, são apresentados os equipamentos mais relevantes utilizados no decorrer da dissertação.

3.1. Caracterização mecânica

O material utilizado em todos os ensaios, cujos resultados são apresentados nesta dissertação, foi uma liga de alumínio AW7075-T651 (Al Zn5,5MgCu) sob a forma de chapa com 5 mm de espessura. O tratamento T651 diz respeito a um tipo de tratamento térmico que começa com uma têmpera, seguindo-se um processo de alívio de tensões por alongamento e, por fim, um processo de envelhecimento num ambiente controlado. De seguida, na Tabela 3.1, é apresentada a composição química do material de acordo com a ficha técnica do fornecedor (*Poly Lanema*).

Tabela 3.1 - Composição química da liga de alumínio AW7075-T651 (% peso)
(de acordo com a norma EN 573-3).

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Mínimo	-	-	1.2	-	2.1	0.18	5.1	-	-
Máximo	0.4	0.5	2	0.3	2.9	0.28	6.1	0.2	Resto

A caracterização mecânica é essencial para se conhecer o comportamento do material quando sujeito a um processo de deformação plástica, ou seja, permite prever a resposta do material de acordo com as solicitações a que este é submetido. Neste sentido, no que diz respeito à caracterização mecânica da chapa de alumínio AW7075-T651 de 5 mm de espessura, realizaram-se, no âmbito desta dissertação, vários ensaios, nomeadamente ensaios de compressão de discos empilhados e ensaios de tração. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente.

3.1.1. Ensaios de tração

Os ensaios de tração (T) foram realizados de acordo com a norma ASTM E8/E8M (2016) na máquina de ensaios universal INSTRON 4507 (ver secção 3.4.1) e os respetivos provetes foram cortados da chapa de alumínio AW7075-T651 de 5 mm em três direções diferentes relativamente à direção de laminação (DL) (0°, 45° e 90°), de forma a se avaliar a influência da anisotropia. As dimensões dos provetes são apresentadas na Tabela 3.4. A velocidade do ensaio imposta foi de 5 mm/min, a taxa de aquisição de dados foi de 50 ms e o sistema digital de correlação de imagens (ver secção 3.4.2)

funcionou com uma taxa de 5 fotografias por segundo. Na figura 3.1 são apresentadas fotografias do provete de tração antes e após o ensaio.



Figura 3.1 - Provete de tração antes (acima) e após (abaixo) o ensaio.

Foram realizados 3 ensaios para cada ângulo de orientação (α_{DL}) em relação à direção de laminagem, o que resultou num total de 9 ensaios de tração. Para cada caso, começou-se por obter o gráfico da força (F) em função do deslocamento (d). Os valores de força foram medidos pela célula de carga da máquina de ensaios e os valores de deslocamento foram obtidos com recurso ao sistema digital de correlação de imagens. A partir dos resultados de força e deslocamento e usando as expressões $S = F/A_0$ e $e = d/l_{ref}$ obtiveram-se os valores de tensão (S) e extensão (e) nominais, respetivamente, onde A_0 corresponde à área inicial da secção transversal do provete e l_{ref} corresponde ao comprimento de referência. Por fim, utilizando as expressões $\sigma = S(1 + e)$ e $\varepsilon = \ln(1 + e)$ obteve-se o gráfico da tensão verdadeira (σ) em função da extensão verdadeira (ε).

Já que para cada ângulo de orientação em relação à direção de laminagem, os resultados dos ensaios são praticamente coincidentes, ou seja, evidenciam repetibilidade, de seguida, na Figura 3.2, é apresentado um gráfico da tensão verdadeira em função da extensão verdadeira para três provetes representativos, correspondentes a 0° , 45° e 90° relativamente à direção de laminagem.

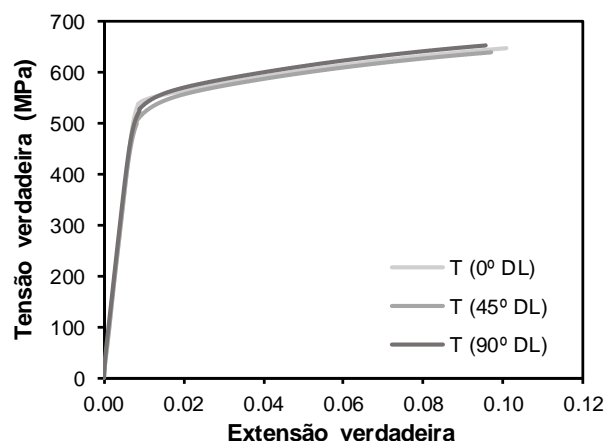


Figura 3.2 – Gráfico tensão-extensão verdadeiras relativos aos ensaios de tração para as três orientações em relação à direção de laminagem.

O gráfico acima representado demonstra uma grande proximidade das curvas tensão-extensão verdadeiras, ainda assim, optou-se por definir uma equação característica tensão-extensão através de uma aproximação segundo o modelo de Ludwik-Hollomon para cada ângulo de orientação dos provetes. O modelo de Ludwik-Hollomon pressupõe uma equação do tipo $\sigma = K(\varepsilon + \varepsilon_0)^n$, onde K é um

parâmetro da lei de encruamento de Ludwik-Hollomon, n é o coeficiente de encruamento e ε_0 o valor de pré-extensão. As equações características do alumínio AW7075-T651 para cada orientação em relação à direção de laminagem são apresentadas abaixo na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Equações características do alumínio AW7075-T651 para cada orientação em relação à direção de laminagem.

Orientação	Equação característica
0° DL	$\sigma = 852.5 \times (\varepsilon + 0.023)^{0.1305}$
45° DL	$\sigma = 777.0 \times \varepsilon^{0.0861}$
90° DL	$\sigma = 794.3 \times \varepsilon^{0.0857}$

Através da análise das equações características apresentadas acima, é possível verificar que apenas para uma orientação de 0° DL é que foi necessário definir um valor de pré-extensão para se obter uma boa aproximação à curva original.

A Tabela 3.3 apresenta os valores do módulo de elasticidade, tensão de cedência, tensão de rotura, alongamento após fratura e coeficiente de anisotropia do alumínio AW7075-T651 para cada ângulo de orientação dos provetes. A última linha da tabela apresenta um valor médio para cada propriedade mecânica (\bar{x}) calculado da seguinte forma,

$$\bar{x} = \frac{x_0 + 2x_{45} + x_{90}}{4} \quad (3.1)$$

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas da chapa de alumínio AW7075-T651 obtidas a partir dos ensaios de tração.

Orientação	Módulo de Elasticidade, E (GPa)	Tensão de cedência, σ_e (MPa)	Tensão de rotura, σ_R (MPa)	Alongamento após fratura, A (%)	Anisotropia, r
0° DL	73.30	538.51	586.76	15.94	0.533
45° DL	71.18	509.01	579.31	14.08	0.672
90° DL	71.24	525.56	593.30	14.09	0.774
Média	71.72	520.52	584.67	14.55	$\bar{r} = 0.663$

O coeficiente de anisotropia r é definido como o quociente entre as extensões verdadeiras segundo a largura (ε_2) e segundo a espessura (ε_3) do provete e foi obtido avaliando o declive da reta ε_2 em função de ε_3 entre a cedência e a rotura.

Existem dois tipos de anisotropia para materiais resultantes de processos de laminagem, a anisotropia normal e a anisotropia planar. A anisotropia normal (\bar{r}) é um indicador do grau de anisotropia segundo a direção da espessura do material e o valor de $\bar{r} = 0.663$ demonstra que a anisotropia normal é relevante e, por isso, deve ser tida em consideração. A anisotropia planar (Δr) é um indicador do grau de anisotropia existente no plano da chapa e foi obtida através da expressão,

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} = -0.018 \quad (3.2)$$

O valor de Δr é próximo de zero, o que indica que não existem variações significativas do comportamento do provete de chapa em função da orientação do mesmo relativamente à direção de laminagem.

3.1.2. Ensaio de compressão de discos empilhados

O ensaio de compressão de discos empilhados (CDE) é utilizado como alternativa aos típicos ensaios de tração e expansão hidráulica para caracterizar mecanicamente chapas. Este ensaio consiste na utilização de discos circulares, fabricados a partir da chapa, e que posteriormente são empilhados de forma a criar um provete com um rácio h_0/\varnothing_0 semelhante aos rácios que se verificam para os provetes cilíndricos dos ensaios de compressão normalizados, onde h_0 e \varnothing_0 dizem respeito à altura e diâmetro iniciais do provete, respetivamente.

No caso desta dissertação, a sua utilização visa a obtenção da curva tensão-extensão verdadeiras para extensões superiores às extensões de estricção dos ensaios de tração, já que no novo ensaio desenvolvido neste trabalho as extensões de fratura são relativamente elevadas. Os ensaios de CDE foram realizados segundo a norma ASTM E9 (2018).

Para os ensaios de CDE recorreu-se à máquina de ensaios hidráulica INSTRON Satec 1200 (ver secção 3.4.1) e os provetes consistem em três discos empilhados de 15 mm de diâmetro e 5 mm de espessura. Os discos foram obtidos a partir da chapa de alumínio e maquinados no torno mecânico para obtenção da geometria pretendida. A velocidade do ensaio imposta foi de 5 mm/min e a taxa de aquisição de dados foi de 200 ms. Na figura 3.3 são apresentadas fotografias do provete de CDE antes e após o ensaio.



Figura 3.3 - Provette de CDE antes (esquerda) e após (direita) o ensaio.

Foram produzidos 3 provetes idênticos e, como tal, levou-se a cabo 3 ensaios de compressão de discos empilhados entre pratos planos. Foi também realizado um ensaio em vazio para obtenção da curva do deslocamento em função da força necessária para corrigir o deslocamento medido inicialmente pela célula de carga da máquina de ensaios para cada provete, já que a máquina de ensaios apresenta folgas e deformações elásticas que influenciam o deslocamento medido, daí a necessidade de uma calibração.

Para cada provete, começou-se por traçar o gráfico força-deslocamento. De seguida, calculou-se a tensão e a extensão verdadeiras através das expressões $\sigma = \frac{F}{A}$ e $\varepsilon = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right)$, onde A é a área da secção transversal do provete e h a altura do mesmo em cada instante. Pela lei da conservação de volume, a área foi calculada usando a fórmula $A = \frac{A_0 \times h_0}{h}$.

Dado que as curvas tensão-extensão verdadeiras dos três provetes apresentam repetibilidade, de seguida, na Figura 3.4, é apresentado um gráfico com a curva referente a um único provete representativo dos ensaios CDE, juntamente com as curvas obtidas nos ensaios de tração.

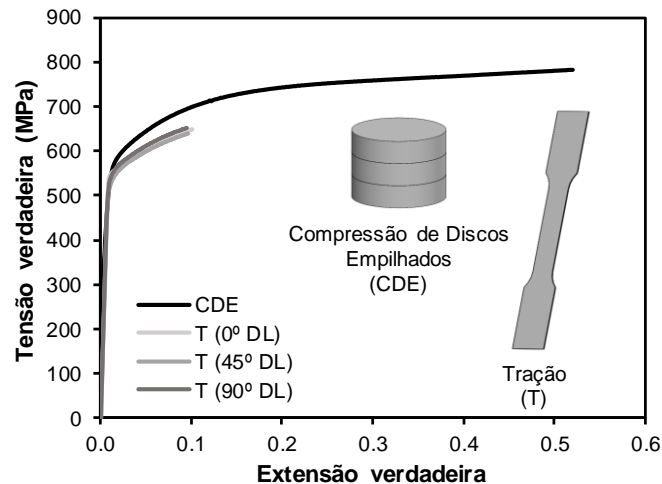


Figura 3.4 – Curvas tensão-extensão verdadeiras do alumínio AW7075-T651 resultantes dos ensaios de tração (T) e de compressão de discos empilhados (CDE).

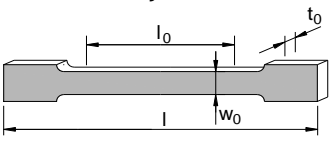
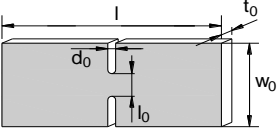
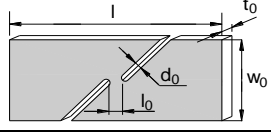
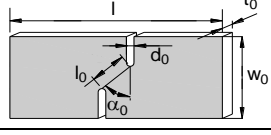
Após a cedência, ou seja, em regime plástico, a curva relativa ao ensaio de CDE apresenta valores de tensão ligeiramente superiores relativamente às curvas dos ensaios de tração, devido à força suplementar de atrito entre o provete e os pratos planos de compressão. É também de referir que a extensão de fratura para o ensaio de CDE é muito superior às extensões de estricção que se verificam nos ensaios de tração como era expectável.

3.2. Caracterização da enformabilidade à fratura no modo I e II

A Tabela 3.4 apresenta os ensaios com as respetivas representações esquemáticas e dimensões utilizados no âmbito desta dissertação para determinação das curvas de enformabilidade à fratura correspondentes aos modos I e II da mecânica da fratura para chapa de alumínio AW7075-T651.

Os ensaios foram agrupados em duas categorias diferentes de acordo com o modo de fratura a que estão associados. Deste modo, a categoria I contém os ensaios de tração e os *double notched tension*, cujos resultados foram usados para determinar a curva limite de fratura (CLF) correspondente ao modo I da mecânica da fratura. A categoria II contém os ensaios de corte e os *staggered double notched tension*, cujos resultados foram utilizados para obter a curva limite de fratura ao corte (CLFC) correspondente ao modo II da mecânica da fratura. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente.

Tabela 3.4 – Ensaios de enformabilidade à fratura nos modos I e II aplicados à chapa de alumínio AW7075-T651.

Cat.	Ensaio	l_0 (mm)	w_0 (mm)	t_0 (mm)	l (mm)	d_0 (mm)	α_{DL} (°)	α_0 (°)
I	Tração - T 	50	12.5	5	200	-	0, 45, 90	-
	Double Notched Tension - DNT 	10, 15	50	5	150	3	0	-
II	Corte - C 	4.72	38.10	5	200	1.63	0	-
	Staggered Double Notched Tension – SDNT 	7	50	5	200	3	0	80

3.2.1. Ensaios de tração

Os ensaios de tração (T) apresentados na secção 3.1.1 no âmbito da caracterização mecânica do material também permitiram a obtenção de resultados válidos para a caracterização da sua enformabilidade, nomeadamente no modo I da mecânica da fratura.

Interessa acrescentar que imediatamente antes da realização dos ensaios, os provetes foram devidamente limpos e pintados na zona de interesse com um padrão de fundo branco e salpicos pretos com recurso a tintas de spray, de forma a possibilitar a leitura das deformações do material por parte do sistema digital de correlação de imagens.

3.2.2. Ensaios de double notched tension

Os ensaios de *double notched tension* (DNT) foram realizados de acordo com o procedimento seguido no trabalho de Cotterell e Reddel (1977) na máquina de ensaios universal INSTRON 4507 e a deformação dos provetes foi medida com recurso ao sistema digital de correlação de imagens. Os provetes foram cortados da chapa de alumínio AW7075-T651 de 5 mm segundo a direção de laminagem e as dimensões dos provetes foram apresentadas na Tabela 3.4. A velocidade do ensaio imposta foi de 5 mm/min, a taxa de aquisição de dados foi de 50 ms e o sistema digital de correlação

de imagens funcionou com uma taxa de 5 fotografias por segundo. Os provetes foram limpos e pintados imediatamente antes dos ensaios. Na figura 3.5 são apresentadas fotografias do provete de DNT antes e após o ensaio.

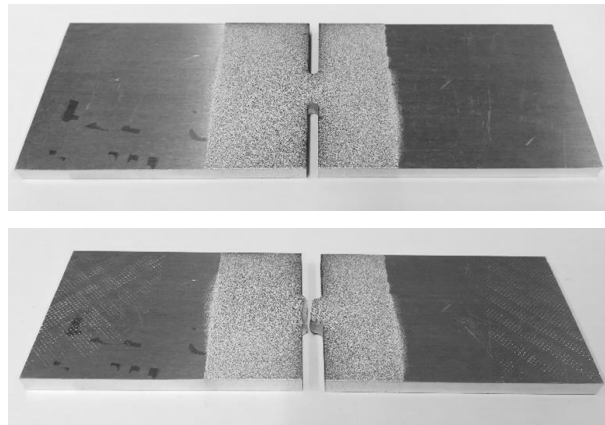


Figura 3.5 - Provede de DNT antes (acima) e após (abaixo) o ensaio.

Os ensaios de DNT foram realizados com o intuito de se obterem pontos de fratura em deformação plana, sendo diferentes dos obtidos através dos ensaios de tração, de forma a permitir o cálculo da CLF correspondente ao limite de enformabilidade à fratura no modo I da mecânica da fratura. Assim, foram realizados 4 ensaios de DNT, dois deles com ligamento de 10 mm e os outros dois com ligamento de 15 mm.

3.2.3. Ensaios de corte

Os ensaios de corte (C) foram realizados segundo a norma ASTM B831 (2005) na máquina de ensaios universal INSTRON 4507 e a deformação dos provetes foi medida com recurso ao sistema digital de correlação de imagens. Os provetes foram cortados da chapa de alumínio AW7075-T651 de 5 mm segundo a direção de laminagem e as dimensões dos provetes foram apresentadas na Tabela 3.4. A velocidade do ensaio imposta foi de 5 mm/min, a taxa de aquisição de dados foi de 100 ms e o sistema digital de correlação de imagens funcionou com uma taxa de 10 fotografias por segundo. Os provetes foram limpos e pintados imediatamente antes dos ensaios. Na figura 3.6 são apresentadas fotografias do provete de corte antes e após o ensaio.

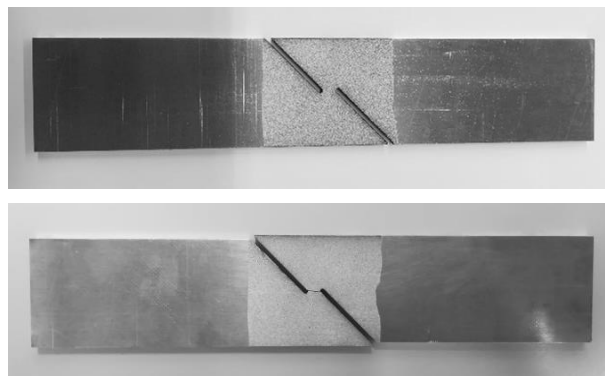


Figura 3.6 - Provede de corte antes (acima) e após (abaixo) o ensaio.

Foram realizados 2 ensaios de corte que tiveram como objetivo caracterizar o limite de enformabilidade à fratura no modo II da mecânica da fratura do alumínio AW7075-T651 em conjunto com os ensaios de *staggered double notched tension*.

3.2.4. Ensaios de *staggered double notched tension*

Os ensaios de *staggered double notched tension* (SDNT) foram realizados de acordo com o procedimento seguido no trabalho de Cotterell et al. (1982) na máquina de ensaios universal INSTRON 4507 e a deformação dos provetes foi medida com recurso ao sistema digital de correlação de imagens. Os provetes foram cortados da chapa de alumínio AW7075-T651 de 5 mm segundo a direção de laminagem e as dimensões dos provetes foram apresentadas na Tabela 3.4. A velocidade do ensaio imposta foi de 5 mm/min, a taxa de aquisição de dados foi de 100 ms e o sistema digital de correlação de imagens funcionou com uma taxa de 10 fotografias por segundo. Na figura 3.7 são apresentadas fotografias do provete de SDNT antes e após o ensaio.

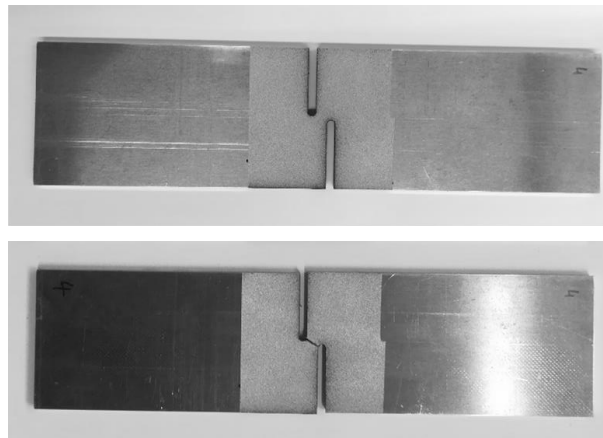


Figura 3.7 - Proвете de SDNT antes (acima) e após (abaixo) o ensaio.

Foram realizados 2 ensaios de SDNT de forma a se obterem trajetórias de deformação e pontos de fratura diferentes daqueles resultantes dos ensaios de corte, possibilitando assim a determinação da CLFC correspondente ao limite de enformabilidade à fratura no modo II da mecânica da fratura do alumínio AW7075-T651.

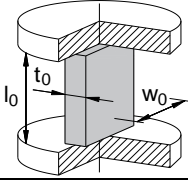
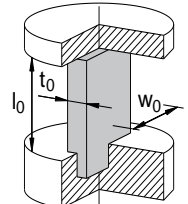
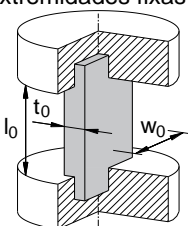
3.3. Caracterização da enformabilidade à fratura no modo III

A caracterização do limite de enformabilidade à fratura no modo III a partir de ensaios em chapa é o grande contributo desta dissertação. Como tal, de seguida, são apresentados os novos ensaios propostos, bem como os respetivos desenvolvimento experimental e metodologia.

A Tabela 3.5 apresenta os ensaios propostos, denominados de ensaios de compressão longitudinal de chapa, com as respetivas representações esquemáticas e dimensões usadas neste trabalho para

determinar a curva limite de enformabilidade à fratura correspondente ao modo III da mecânica da fratura para chapa de alumínio AW7075-T651.

Tabela 3.5 - Ensaio de enformabilidade à fratura no modo III aplicados à chapa de alumínio AW7075-T651.

Ensaio	l_0 (mm)	w_0 (mm)	t_0 (mm)
Compressão longitudinal de chapa com extremidades livres – CCL 	15	10, 20	5
Compressão longitudinal de chapa com extremidades livre e fixa – CCLF 	15	10	5
Compressão longitudinal de chapa com extremidades fixas – CCF 	15	10	5

No que diz respeito ao desenvolvimento destes ensaios de compressão longitudinal de chapa, o primeiro aspeto a definir foi a mecânica de deformação do ensaio. Neste sentido, o trabalho de Silva et al. (2017) no âmbito de um estudo de ligação de chapas foi a principal inspiração, já que os ensaios nele realizados serviram de base para a definição do novo ensaio, quer em termos de solicitações impostas, quer em termos da geometria dos provetes. Assim, a mecânica de deformação do ensaio de compressão longitudinal de chapa baseia-se na compressão de um provete de chapa de geometria paralelepipedica na direção do seu comprimento (Figura 3.8a).

As dimensões dos provetes são variadas e foram definidas de acordo com vários aspetos. A espessura t_0 da chapa de alumínio AW7075-T651 é de 5 mm e foi definida em concordância com a espessura dos provetes de fratura do trabalho de Silva et al. (2017). O comprimento l_0 é de 15 mm e foi definido através dos ensaios de instabilidade correspondendo ao comprimento crítico. Já as larguras w_0 dos provetes a ensaiar são de 10 e 20 mm e foram definidas através de análises de sensibilidade recorrendo a simulações numéricas (ver secção 4.3). Os provetes foram cortados da chapa de alumínio AW7075-T651 com 5 mm de espessura segundo a direção de laminação.



Figura 3.8 – (a) Ensaio de compressão longitudinal de chapa; (b) Sistema digital de correlação de imagens em funcionamento para um ensaio de compressão longitudinal de chapa.

As simulações numéricas foram também importantes na definição das condições de atrito a impôr nas extremidades dos provetes a ensaiar. Deste modo, no âmbito dos ensaios experimentais de compressão longitudinal de chapa e relativamente às condições de fronteira, foram testadas três condições distintas: provetes com ambas as extremidades encastradas (fixas); provetes com ambas as extremidades livres; e provetes com uma das extremidades encastrada e a outra livre.

Assim, nos ensaios de compressão longitudinal de chapa testaram-se quatro condições diferentes: provete de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ com ambas as extremidades livres (CCL, $w_0 = 10 \text{ mm}$); provete de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ com ambas as extremidades fixas (CCF, $w_0 = 10 \text{ mm}$); provete de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ com uma extremidade fixa e outra livre (CCLF, $w_0 = 10 \text{ mm}$); e provete de largura $w_0 = 20 \text{ mm}$ com ambas as extremidades livres (CCL, $w_0 = 20 \text{ mm}$). Para cada condição efetuaram-se 4 ensaios, o que resultou num total de 16 ensaios. A Figura 3.9 apresenta todos os provetes a ensaiar.



Figura 3.9 – (a) Provetes de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ para ensaios CCF, CCLF e CCL;
(b) Provetes de largura $w_0 = 20 \text{ mm}$ para ensaios CCL.

Para medição das deformações do provete, nomeadamente, das extensões principais, definiu-se que se iria utilizar o sistema de correlação digital de imagem (Figura 3.8b) e, como tal, daí surgiram algumas condicionantes. Primeiro, a área do provete em análise pelo sistema digital de correlação de imagens deveria ser a maior possível, de forma a permitir uma melhor avaliação e medição das deformações, sendo também esta uma das razões para a utilização de uma chapa espessa com 5 mm de espessura,

onde o comprimento do provete é o máximo possível, ou seja, o comprimento crítico de 15 mm. Segundo, o sistema digital de correlação de imagens possui duas câmaras estáticas que apontam sempre na mesma direção do início ao fim do ensaio, pelo que surgiu a necessidade de se utilizar a ferramenta horizontal de duplo efeito (ver secção 3.4.3), já que esta possibilita que o centro do provete focado pelas câmaras se mantenha aproximadamente na mesma posição à medida que as extremidades são comprimidas. Terceiro, a distância entre as duas câmaras e o facto das direções das objetivas não serem perpendiculares à área do provete em análise fazem com que o provete tenha de estar bem visível, o que condicionou a geometria das ferramentas de compressão.

Para estes novos ensaios, foi necessário projetar uma nova ferramenta de compressão com vários requisitos: montagem na ferramenta horizontal de duplo efeito; capacidade de promover diferentes condições de atrito às extremidades dos provetes; capacidade de acomodar devidamente os provetes de diferentes dimensões; suportar os esforços decorrentes da deformação do provete; permitir uma fácil extração do provete deformado depois do ensaio; e possibilitar o maior campo de visão possível para uma melhor utilização do sistema digital de correlação de imagens. Tendo em conta todos estes requisitos, foi então projetada e fabricada a ferramenta de compressão apresentada na Figura 3.10.

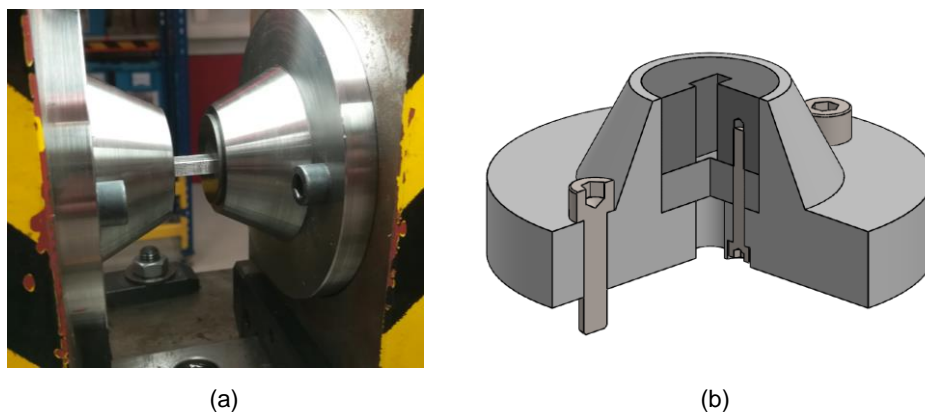


Figura 3.10 - (a) Ferramenta de compressão em utilização durante um ensaio de compressão longitudinal de chapa; (b) Ferramenta de compressão vista em corte (imagem produzida em *Solidworks*).

A ferramenta de compressão projetada é composta por 6 componentes, apresentados na Figura 3.11, sendo o material constituinte o aço C 265.

O bloco cónico (1) é o componente de maiores dimensões e é aparafusado à ferramenta horizontal de duplo efeito através de dois parafusos ISO 4762 M8x30 (3). Este bloco tem uma base plana de forma a estar perfeitamente apoiado na cavidade de encaixe da ferramenta de duplo efeito. A parte cónica do bloco foi assim projetada para permitir um maior campo de visão ao sistema digital de correlação de imagens na zona do provete, mas capaz de suportar as forças de carregamento envolvidas, logo o diâmetro superior é o menor possível e o diâmetro inferior o maior possível, sendo a altura projetada para acomodar os discos central e superior. Na base do bloco cónico existe um furo central com 10 mm de diâmetro (ver Figura 3.12a) projetado com vista à desmontagem do provete após o ensaio, permitindo a passagem de um punção que exerce pressão na parte inferior do disco central (2), empurrando-o para fora do bloco cónico juntamente com o disco superior e o provete. De referir que esta desmontagem é apenas necessária para a condição em que o provete está encastrado. Em redor

do furo central, existem ainda dois furos passantes para dois parafusos ISO 4762 M4x30 (4), cujo objetivo é fixar o disco superior (e consequentemente o disco central) ao bloco cônico, impedindo deslocamentos durante os ensaios.

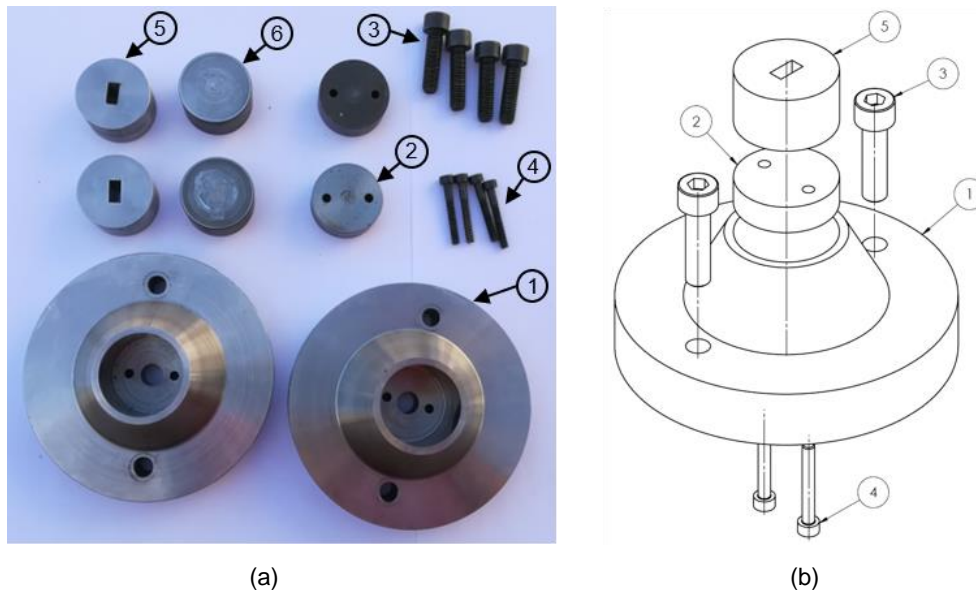


Figura 3.11 – (a) Fotografia dos componentes da ferramenta de compressão; (b) Representação esquemática de montagem da ferramenta em vista explodida; Numeração dos componentes: (1) Bloco cônico; (2) Disco central; (3) Parafuso ISO 4762 M8x30; (4) Parafuso ISO 4762 M4x30; (5) Disco superior furado; (6) Disco superior plano.

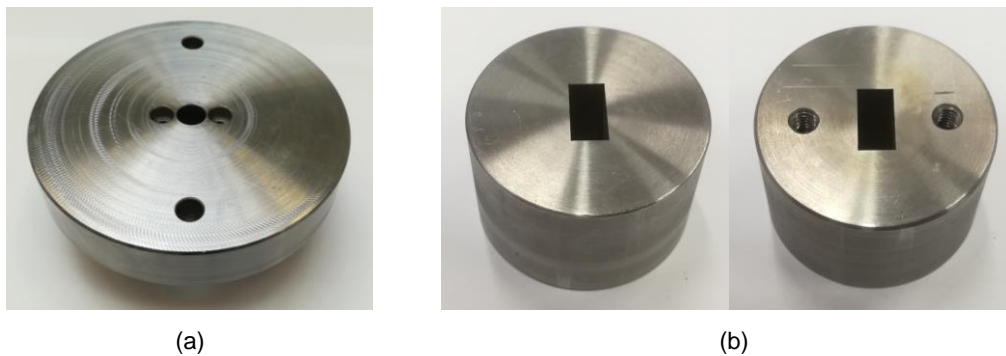


Figura 3.12 – Fotografias (a) da parte inferior do bloco cônico da ferramenta de compressão e (b) das superfícies superior (esquerda) e inferior (direita) do disco superior furado.

No que diz respeito ao disco central, este também apresenta dois furos passantes e, para além de ser importante na desmontagem da ferramenta e extração do provete como já foi referido, também serve de superfície encostadora para a extremidade dos provetes encastrados.

O disco superior pode ser plano (6) ou furado (5), sendo utilizado de acordo com a condição de atrito a ensaiar: plano para extremidade do provete livre e furado para extremidade fixa. No caso do disco superior furado, o furo é passante e as dimensões em termos de largura e espessura são de 10 e 5 mm, respetivamente, de forma a acomodar perfeitamente o provete cuja extremidade ficará encastrada. Ambos os discos superiores têm na sua base dois furos cegos roscados (ver Figura 3.12b) por motivos de fixação ao bloco cônico através de dois parafusos, como explicado anteriormente.

Os desenhos técnicos da ferramenta encontram-se no anexo A da presente dissertação.

O setup experimental é então composto por diversos equipamentos e ferramentas, estando representado esquematicamente na Figura 3.13.

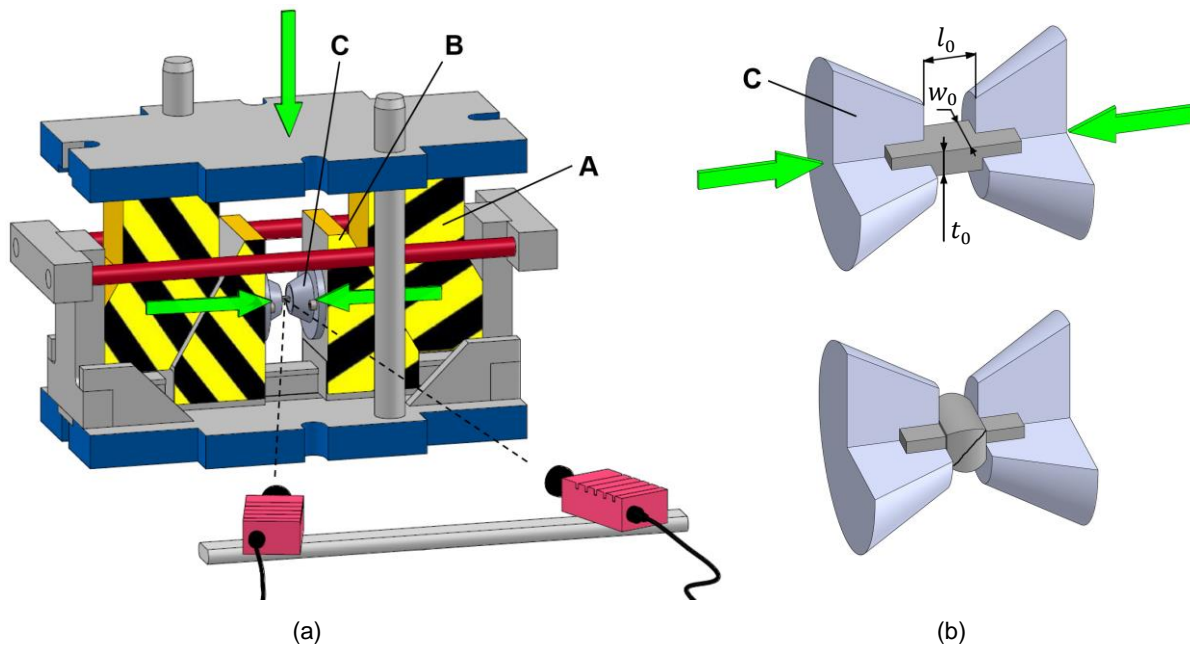


Figura 3.13 – (a) Representação esquemática do setup experimental; (b) Representação esquemática da ferramenta de compressão antes (cima) e após (baixo) o ensaio de compressão longitudinal de chapa.

Antes de cada ensaio de compressão longitudinal de chapa, o provete a ensaiar é limpo e a região de interesse é pintada a spray com um padrão aleatório de salpicos pretos sobre um fundo branco uniforme (Figura 3.14a) essencial para a leitura correta das deformações por parte do sistema digital de correlação de imagens. Depois o provete é devidamente posicionado na ferramenta de compressão, que por sua vez está montada na ferramenta horizontal de duplo efeito. O lado do provete que corresponde à espessura é que está virado para as câmaras, já que é aí que é expectável o aparecimento da fratura, tal como foi observado no trabalho experimental realizado por Silva et al. (2017). Para além disso, as análises das distribuições de dano também evidenciaram valores de dano mais elevados do lado da espessura para qualquer uma das quatro condições em teste.

A ferramenta horizontal de duplo efeito está montada na máquina de ensaios hidráulica INSTRON Satec 1200 e converte o movimento vertical desta e, conseqüentemente, das cunhas atuadoras verticais (A) num movimento horizontal de aproximação dos carros porta-ferramentas (B). Em cada um destes carros porta-ferramentas é fixada uma parte da ferramenta de compressão (C), cujos discos superiores podem ser planos ou furados consoante se pretenda que a extremidade do provete esteja livre ou encastrada. Deste modo, o sistema de compressão aplica, à mesma velocidade, mas em sentidos contrários, forças longitudinais em ambas as extremidades do provete até à ocorrência da falha, sendo que a parte central do provete permanece aproximadamente no mesmo sítio ao longo do ensaio.

Os valores de força e deslocamento da máquina de ensaios hidráulica INSTRON Satec 1200 foram registados através do software *Bluehill 2*. No entanto, com a utilização da ferramenta horizontal de duplo efeito, foi necessário calcular o coeficiente de conversão da força vertical para a força horizontal. Para isso, realizaram-se 2 ensaios de CDE na ferramenta horizontal de duplo efeito e calculou-se o coeficiente de conversão de forma a que os gráficos de força-deslocamento fossem coincidentes com os obtidos para os 3 ensaios de CDE usados na caracterização mecânica do material. O valor obtido para este coeficiente foi de 0.605, ou seja, a força exercida na horizontal corresponde a 60.5% da força que se exerce na vertical.

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de Tecnologia Mecânica do IST à temperatura ambiente. A velocidade vertical imposta pela máquina de ensaios hidráulica foi de 2.5 mm/min, a taxa de aquisição de dados foi de 200 ms e o sistema digital de correlação de imagens funcionou com uma taxa de 5 fotografias por segundo.

No que diz respeito à metodologia para determinação do limite de enformabilidade à fratura no modo III da mecânica da fratura, as evoluções das extensões principais ε_1 e ε_2 (daqui para a frente também designadas como trajetórias de deformação experimentais) são obtidas com recurso ao sistema digital de correlação de imagens e representadas no plano das extensões principais até aos valores de fratura. As trajetórias de deformação e os pontos de fratura estão representados esquematicamente na Figura 3.14b como linhas sólidas e marcadores pretos, respetivamente. As medições são executadas numa área do provete onde é expectável o aparecimento da fratura e como esta se propaga instantaneamente e é acompanhada por um alívio súbito de tensões, torna-se impossível para o sistema digital de correlação de imagens a continuação da monitorização das deformações após a fratura, mas tornando fácil a identificação do instante de fratura.

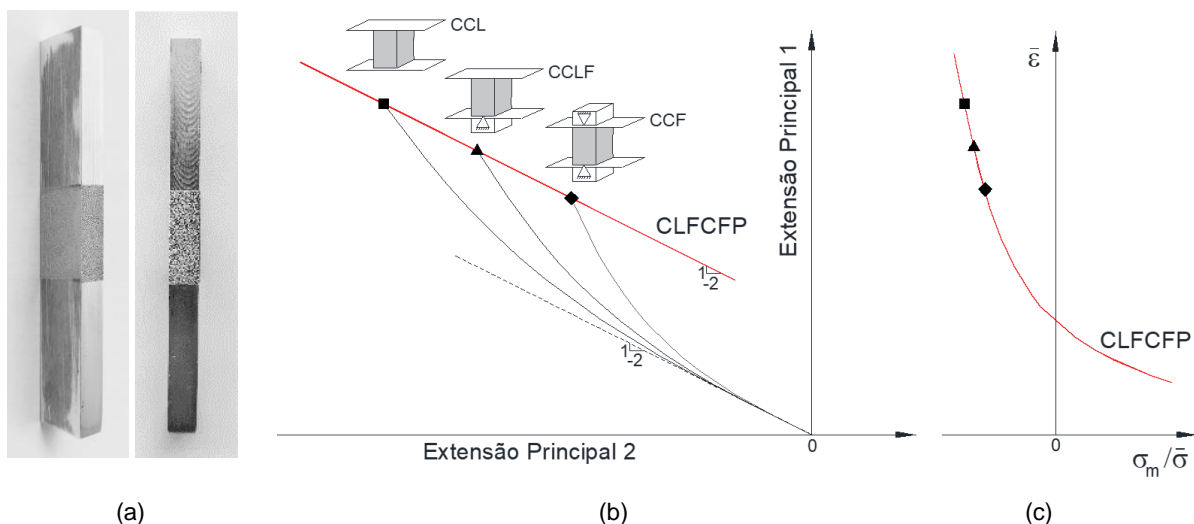


Figura 3.14 – Metodologia para determinação da CLFCFP a partir dos ensaios de compressão longitudinal de chapa usando o sistema digital de correlação de imagens: (a) Fotografias de um provete com a zona de interesse pintada com o padrão aleatório branco e preto; (b) Gráfico esquemático dos resultados no plano das extensões principais; (c) Gráfico esquemático dos resultados no plano da triaxialidade.

Os diferentes marcadores da Figura 3.14b correspondem a diferentes condições de ensaio e a linha reta a vermelho que passa sobre esses marcadores corresponde ao limite de enformabilidade no

modo III da mecânica da fratura que se pretende determinar e que está associado a esforços de corte fora do plano. Interessa referir que os gráficos da Figura 3.14 são apenas exemplificativos da metodologia a aplicar para determinação da curva limite de fratura ao corte fora do plano (CLFCFP), sendo que os resultados experimentais reais são apresentados na secção 5.2.

Para a passagem da CLFCFP do plano das extensões principais (Figura 3.14b) para o plano da triaxialidade (Figura 3.14c) é necessário determinar a extensão efetiva $\bar{\varepsilon}$, a tensão média σ_m e a tensão efetiva $\bar{\sigma}$ para todos os pontos de fratura obtidos experimentalmente. Para esse efeito, assumiu-se que a deformação plástica dos provetes nos ensaios de compressão longitudinal de chapa ocorreu sobre condições de carregamento proporcionais e com β constante, sendo este definido da seguinte forma:

$$\beta = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (3.3)$$

Considerando a aplicação do critério de plasticidade de Hill (Hill, 1948) para anisotropia planar nula ($\Delta r \cong 0$) e tendo em conta que as fraturas são iniciadas nas superfícies livres dos provetes, onde existe tensão plana $\sigma_3 = 0$, a extensão efetiva na fratura $\bar{\varepsilon}_f$ é definida pela seguinte expressão:

$$\bar{\varepsilon}_f = \frac{1 + \bar{r}}{\sqrt{(1 + 2\bar{r})}} \sqrt{\varepsilon_{1f}^2 + \varepsilon_{2f}^2 + \frac{2\bar{r}}{(1 + \bar{r})} \varepsilon_{1f} \varepsilon_{2f}} \quad (3.4)$$

Na expressão acima, $(\varepsilon_{1f}, \varepsilon_{2f})$ são os valores das extensões de fratura e \bar{r} é a anisotropia normal.

Para obtenção dos valores da triaxialidade $\sigma_m/\bar{\sigma}$, é primeiro necessário escrever a tensão efetiva $\bar{\sigma}$ da seguinte forma:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \frac{2r}{(1 + \bar{r})} \sigma_1 \sigma_2} \quad (3.5)$$

e, de seguida, aplicar as equações constitutivas de Hill, de forma a se chegar à seguinte expressão para cálculo da triaxialidade $\sigma_m/\bar{\sigma}$:

$$\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} = \frac{\sqrt{1 + 2\bar{r}}}{3} \frac{(1 + \beta)}{\sqrt{1 + \frac{2\bar{r}}{(1 + \bar{r})} \beta + \beta^2}} \quad (3.6)$$

Assim, as expressões (3.4) e (3.6) são aquelas que permitem a transformação da CLFCFP do plano das extensões principais para o plano da triaxialidade.

Foram realizados ensaios de instabilidade em primeiro lugar com o objetivo de se determinar o comprimento l_0 crítico dos provetes para as diferentes larguras w_0 dos mesmos. Este comprimento crítico corresponde ao comprimento máximo sem que ocorra o fenómeno da instabilidade e foi essencial na definição da geometria dos provetes, já que a utilização do sistema digital de correlação de imagens requer que a área do provete em análise seja a maior possível para uma fácil captação das deformações.

Para os ensaios de instabilidade, os provetes têm ambas as extremidades livres, já que estas são as condições de atrito que mais favorecem o fenómeno de instabilidade. Foram realizados um total de 8 ensaios de instabilidade. Primeiro ensaiaram-se provetes de comprimento l_0 de 15 mm e, como estes

não instabilizaram, depois ensaiaram-se provetes onde o comprimento foi aumentado em 2.5 mm. Os resultados são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Resultados dos ensaios de instabilidade.

Provete	Largura w_0 (mm)	Comprimento l_0 (mm)	Resultado
INST_w10_l15	10	15	Não instabilizou
INST_w10_l17.5	10	17.5	Instabilizou
INST_w20_l15	20	15	Não instabilizou
INST_w20_l17.5	20	17.5	Instabilizou

Analisando os resultados da Tabela 3.6, concluiu-se que o comprimento l_0 crítico é de 15 mm, já que se trata do comprimento máximo para o qual não ocorre instabilidade, tanto para a largura w_0 de 10 mm, como para a de 20 mm. Para cada condição, foram feitos dois ensaios como forma de confirmação do resultado, tendo-se verificado repetibilidade. Na Figura 3.15, a título demonstrativo, é apresentado um provete que instabilizou na sequência do ensaio.

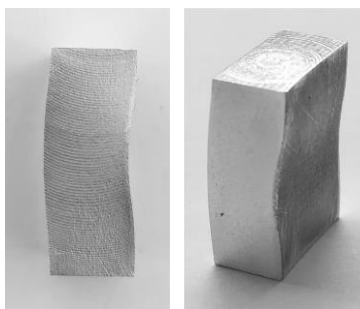


Figura 3.15 – Provete de instabilidade após ensaio.

3.4. Equipamentos

No âmbito desta dissertação foram utilizados diversos equipamentos, nomeadamente para o fabrico, ensaio e medição dos provetes. Os equipamentos mais relevantes são apresentados nas secções seguintes, no entanto, é também de referir a utilização de equipamentos como a guilhotina de corte de chapa, o serrote de fita elétrica, o torno mecânico, a fresadora e a máquina de eletroerosão a fio para fabrico dos provetes e da ferramenta desenvolvida, bem como o recurso a equipamentos de medição usuais como é o caso do paquímetro digital e do micrómetro.

3.4.1. Máquinas de ensaios

Para a realização dos vários ensaios de caracterização mecânica e enformabilidade, foram usados dois equipamentos diferentes: a máquina de ensaios universal INSTRON 4507 e a máquina de ensaios hidráulica INSTRON Satec 1200.

A máquina de ensaios universal INSTRON 4507 é um equipamento para ensaios mecânicos que se encontra no Laboratório de Caracterização Mecânica de Materiais do IST e que foi utilizado para os ensaios de tração, *double notched tension*, corte e *staggered double notched tension*.

A máquina de ensaios universal é um equipamento bastante flexível, já que permite a realização de ensaios onde as solicitações mecânicas impostas aos provetes podem ser de tração, compressão ou até flexão. A aquisição dos valores de força é efetuada através de uma célula de carga, enquanto que a aquisição dos valores de deslocamento é realizada com recurso a um transdutor de deslocamento. Associado à máquina de ensaios universal e ligado à célula de carga e ao transdutor de deslocamento, existe um computador com uma placa de aquisição de dados que regista e trata todos os valores das diferentes variáveis relativas aos ensaios através do software *Bluehill 3*.

Na figura 3.16 é apresentada uma fotografia do equipamento, tal como uma tabela com as suas principais características técnicas.



(a)

Principais características técnicas	
Capacidade máxima (kN)	200
Velocidade máxima de ensaio (mm/min)	500
Velocidade mínima de ensaio (mm/min)	0.001
Dimensões gerais (mm)	2260 x 1300 x 700

(b)

Figura 3.16 – Máquina de ensaios universal INSTRON 4507: (a) fotografia e (b) principais características técnicas do equipamento.

A máquina de ensaios hidráulica INSTRON Satec 1200 é um equipamento para ensaios mecânicos que se encontra no Laboratório de Tecnologia Mecânica do IST e que foi utilizado para os ensaios de CDE e para os ensaios de compressão longitudinal de chapa.

No que diz respeito às medições da força e deslocamento, estas são efetuados com recurso a uma célula de carga e a um transdutor de deslocamento, respetivamente. Associado à máquina de ensaios hidráulica, existe um computador que através do software *Bluehill 2* regula os parâmetros dos ensaios e recolhe os dados a eles associados.

Na figura 3.17 é apresentada uma fotografia do equipamento, tal como uma tabela com as suas principais características técnicas.



(a)

Principais características técnicas	
Capacidade máxima (kN)	1200
Capacidade de medição da célula de carga (kN)	1200
Resolução do transdutor de deslocamento (mm)	0.001
Dimensões gerais (mm)	4636 x 1500 x 940

(b)

Figura 3.17 –Máquina de ensaios hidráulica INSTRON Satec 1200: (a) fotografia e (b) principais características técnicas do equipamento.

3.4.2. Sistemas de medição

No que diz respeito a sistemas de medição, são apresentados de seguida três equipamentos diferentes: o sistema digital de correlação de imagens, o microscópio Mitutoyo TM505B e o microscópio eletrónico de varrimento Hitachi S-2400.

O sistema de digital de correlação de imagens (DIC – *digital image correlation*) utilizado em todos os ensaios realizados nesta dissertação (exceto os ensaios de CDE) é da Dantec Dynamics, modelo Q-400 3D e está equipado com um foco de luz e duas câmaras de 6 megapixéis de resolução e lentes focais de 50.2 mm com uma abertura de f/11.

Este sistema permitiu a aquisição dos dados relativos às deformações dos provetes, nomeadamente os valores das extensões principais, ao longo dos ensaios até aos instantes de fratura sem qualquer contacto com o material, o que representa uma enorme vantagem face aos sistemas de medição tradicionais. As extensões são calculadas automaticamente pelo sistema através de uma correlação das imagens referentes aos vários instantes de deformação com as imagens correspondentes ao instante anterior (processo incremental). O algoritmo de correlação foi executado através do software INSTRON 4D.

Na Figura 3.18, é apresentada uma fotografia do equipamento em funcionamento durante um ensaio de DNT.



Figura 3.18 - Sistema digital de correlação de imagens em funcionamento durante um ensaio de DNT.

O microscópio da marca Mitutoyo, modelo TM505B, é um equipamento de medição que se encontra no Laboratório de Caracterização Mecânica de Materiais do IST. Este equipamento foi utilizado para medição de várias dimensões iniciais e finais associadas aos provetes de tração, *double notched tension*, corte e *staggered double notched tension*.

Na figura 3.19 é apresentada uma fotografia do equipamento, tal como uma tabela com as suas principais características técnicas.



(a)

Principais características técnicas	
Fonte de luz	Elétrica
Ampliação (x)	20
Curso máximo (mm)	50
Precisão (mm)	0.001

(b)

Figura 3.19 – Microscópio Mitutoyo TM505B: (a) fotografia e (b) principais características técnicas do equipamento.

O microscópio eletrónico de varrimento Hitachi S-2400 é um equipamento que se encontra no Laboratório de Microscopia Eletrónica do IST, capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. Este microscópio foi utilizado para o estudo e análise de características estruturais e topográficas, permitindo a definição do modo de fratura para cada tipo de provete e condições testadas.

Na figura 3.20 é apresentada uma fotografia do equipamento, tal como uma tabela com as suas principais características técnicas.



(a)

Principais características técnicas	
Fonte de radiação	Feixe de eletrões
Ampliação (x)	5000
Dimensões máximas da amostra (mm)	40 x 40 x 40

(b)

Figura 3.20 – Microscópio eletrônico de varrimento Hitachi S-2400: (a) fotografia e (b) principais características técnicas do equipamento.

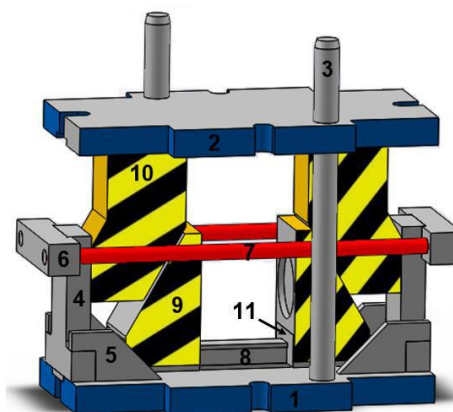
3.4.3. Ferramenta

A única ferramenta apresentada nesta secção é a ferramenta horizontal de duplo efeito. Trata-se de um equipamento para ensaios mecânicos de compressão desenvolvido na Área Científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial do IST. Esta ferramenta encontra-se no Laboratório de Tecnologia Mecânica do IST e foi utilizada para os ensaios de compressão longitudinal de chapa.

Na figura 3.20 é apresentada uma fotografia do equipamento, tal como uma imagem da sua modelação no software *SolidWorks* com os componentes numerados.



(a)



(b)

Figura 3.21 - (a) Fotografia da ferramenta horizontal de duplo efeito; (b) Ferramenta horizontal de duplo efeito modelada em *SolidWorks* com numeração dos componentes: (1) base; (2) teto; (3) coluna; (4) apoio lateral; (5) cutelo para suporte do apoio lateral; (6) encostador; (7) tirante; (8) guia; (9) carro porta-ferramentas; (10) cunha atuadora vertical; (11) carro de rolamentos STAR Runner block 1651-45 (Magrinho, 2015).

4. Desenvolvimento Teórico

O desenvolvimento teórico engloba todo o trabalho numérico realizado no software *i-form 3d*, bem como o desenvolvimento analítico do novo critério de dano. O capítulo divide-se em quatro partes. Primeiramente, é apresentado o software utilizado. Em segundo lugar, é descrito o modelo numérico utilizado na modelação dos novos ensaios de compressão longitudinal de chapa. De seguida, são apresentadas as análises de sensibilidade que permitiram determinar as condições a ensaiar experimentalmente. Por último, é então proposto um novo critério de dano dúctil desacoplado a aplicar em processos de forjamento de chapa, onde a fratura ocorre por esforços de corte fora do plano da chapa (modo III da mecânica da fratura).

4.1. Software

O desenvolvimento do novo ensaio de compressão longitudinal de chapa para determinação do limite de enformabilidade à fratura no modo III da mecânica da fratura foi iniciado com um conjunto de simulações numéricas, onde foram testadas várias geometrias do provete, bem como diferentes condições de atrito. O objetivo consistiu na determinação das combinações entre as geometrias do provete e as condições de atrito que ofereciam resultados diferentes ao nível dos pontos de fratura no plano das extensões principais, de forma a possibilitar a obtenção da curva limite de fratura ao corte fora do plano (CLFCFP). Estas simulações foram executadas no software de elementos finitos *i-form 3d* que se baseia no princípio rígido-plástico de Markov do mínimo trabalho plástico modificado de forma a incluir a incompressibilidade do material e o contacto entre corpos deformáveis como estrangimentos adicionais,

$$\Pi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV + \frac{1}{2} K \int_V \dot{\epsilon}_v^2 dV - \int_{S_t} T_i u_i dS + \int_{S_f} \left(\int_0^{|u_r|} \tau_f du_r \right) dS + \frac{1}{2} K_1 \sum_{c=1}^{N_c} (g_n^c)^2 + \frac{1}{2} K_2 \sum_{c=1}^{N_c} (g_t^c)^2 \quad (4.1)$$

onde, nos primeiros três termos, $\bar{\sigma}$ refere-se à tensão efetiva, $\dot{\epsilon}$ é a velocidade de extensão efetiva, $\dot{\epsilon}_v$ é a velocidade de extensão volumétrica, K é uma grande constante positiva que impõe a incompressibilidade do volume V , T_i e u_i correspondem às trações e velocidades na superfície S_T . O quarto termo diz respeito ao atrito na interface S_f entre os provetes e o sistema de compressão, sendo τ_f e u_r a tensão de corte de atrito e a velocidade relativa de escorregamento entre as superfícies, respetivamente. Os últimos dois termos correspondem ao tratamento do contacto entre superfícies deformadas do provete (caso exista). N_c é o número de pares de contacto e os símbolos g_n^c e g_t^c são as velocidades normal e tangencial nas superfícies de contacto, penalizadas por elevadas constantes K_1 e K_2 para evitar penetração.

4.2. Modelo numérico

No que diz respeito ao modelo numérico, começou-se por definir as geometrias das ferramentas e do provete. As ferramentas foram modeladas como placas quadrangulares rígidas de 50 mm de lado e 5 mm de espessura. As dimensões foram superiores ao necessário de forma a se assegurar que o provete deformado não excederia as fronteiras da ferramenta. A placa nº 1 corresponde à placa de baixo, onde o provete está assente, enquanto que a placa nº 2 corresponde à placa de cima que se desloca a uma velocidade vertical descendente de 1 mm/s. Este valor de velocidade foi definido de modo a facilitar os cálculos e porque a lei do material não depende da velocidade. Relativamente ao provete, a sua modelação foi executada tendo em conta apenas 1/4 da sua geometria, devido às condições de simetria em relação ao plano 'xz' e 'yz'. O provete corresponde a uma peça deformável e foi discretizado por elementos hexaédricos. Em termos geométricos, o comprimento l_0 foi de 15 mm e a espessura t_0 de 5 mm para todos os casos. A largura w_0 corresponde à única dimensão variável.

A representação esquemática do modelo numérico é apresentada abaixo na Figura 4.1.

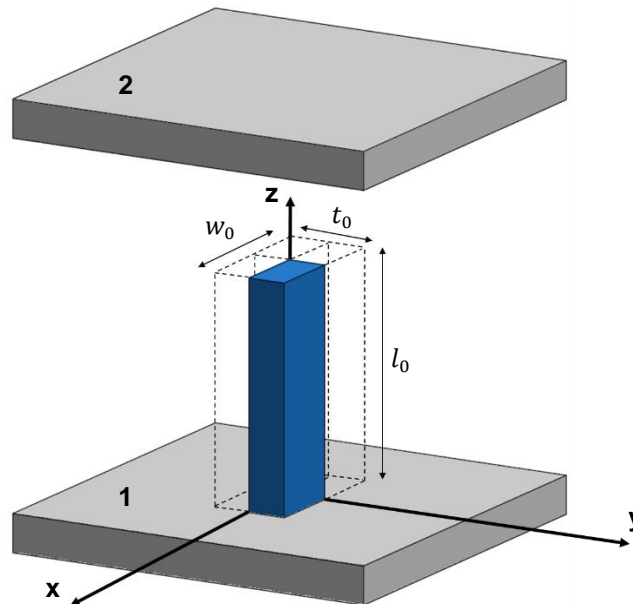


Figura 4.1 – Representação esquemática das geometrias das ferramentas e do provete relativas ao modelo numérico inserido no *i-form 3d*.

O material é o alumínio AW7075-T651 e a curva de comportamento do material tensão-extensão inserida no *i-form 3d* é a resultante dos ensaios de compressão de discos empilhados (CDE), já que este ensaio permite a caracterização do material até elevados níveis de deformação, sendo também o ensaio que apresenta solicitações de esforços mais semelhantes ao novo ensaio de compressão longitudinal de chapa proposto nesta dissertação. Foi usado o critério de Hill como critério de plasticidade e contabilizada a anisotropia da chapa através da inserção dos parâmetros F, G, H, L, M e N calculados de acordo com as fórmulas apresentadas na Tabela 4.1. Os fatores de anisotropia da chapa r_0 , r_{45} e r_{90} foram calculados com base nos ensaios de tração apresentados na secção 3.1.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros de anisotropia da chapa de alumínio AW7075-T651 para aplicação do critério de Hill.

Parâmetro	Fórmula	Valor
F	$F = \frac{r_0}{(1 + r_0) r_{90}}$	0.4493
G	$G = 1 - H$	0.6523
H	$H = \frac{r_0}{1 + r_0}$	0.3477
L	-	3.0000 (valor estabelecido por defeito no <i>i-form 3d</i>)
M	-	3.0000 (valor estabelecido por defeito no <i>i-form 3d</i>)
N	$N = \frac{(r_0 + r_{90}) (2r_{45} + 1)}{2(1 + r_0) r_{90}}$	1.2907

O critério de dano utilizado nas simulações foi o novo critério de dano dúctil desacoplado apresentado de seguida na secção 4.4 (expressão (4.2)).

Relativamente às condições fronteira entre as ferramentas e o provete, existem as condições de encastrado e de simplesmente apoiado que correspondem, respetivamente, aos casos onde a extremidade do provete está fixa ou livre. Para simular estas condições usou-se uma lei de atrito constante (Lei de Prandtl) $\tau_f = mk$, onde k corresponde ao valor da tensão de corte máxima do material e o fator de atrito $m = 1$ foi usado para o caso de encastramento, enquanto que para a face livre escolheu-se um fator de atrito $m = 0.1$, baseado no acerto de força numérico-experimental.

De seguida, na Figura 4.2, é apresentada uma imagem com dois estados distintos da malha, um correspondente à malha não deformada e outro correspondente à malha completamente deformada para o caso do ensaio de compressão longitudinal de chapa com extremidades livres e provete de largura de 10 mm.

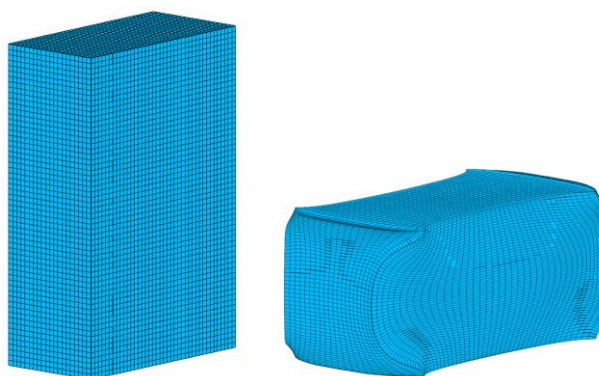


Figura 4.2 – Malha inicial (esquerda) e final (direita) para o ensaio de compressão longitudinal de chapa com extremidades livres e largura $w_0 = 10 \text{ mm}$.

As simulações foram realizadas num computador com processador Intel Core i7-7700HQ de 4 núcleos e 16 GB de RAM, demorando um tempo médio de computação de 20 minutos. Não foi necessário redefinir a malha.

A dimensão da malha e o incremento de tempo entre *steps* interferem diretamente com a precisão dos resultados e com o tempo de computação, ou seja, quanto maior o número de elementos da malha e

menor o incremento de tempo, mais precisos são os resultados, mas maior é o tempo de computação. Neste sentido, tanto para o número de elementos da malha do provete, como para o incremento de tempo entre *steps* foi feita uma análise de convergência com o objetivo de se determinar os valores adequados destas variáveis para as simulações, garantindo assim a obtenção de resultados válidos e com um baixo erro associado no menor tempo possível.

Para isso, avaliou-se a variação dos valores das extensões principais no ponto central da face $t_0 \times l_0$ do provete de largura w_0 de 10 mm com extremidades fixas para um deslocamento de compressão de 10 mm. Primeiramente foi realizada a análise de convergência relativa à malha (cujos resultados são apresentados na Tabela 4.2) e só depois de determinado o número de elementos adequado é que se realizou a análise de convergência relativa ao incremento de tempo (cujos resultados são apresentados na Tabela 4.3). Os valores foram considerados aceitáveis para um erro relativo inferior a 1%, não se tendo em conta o tempo de computação, já que este nunca tomou valores exagerados. De referir que o erro relativo é calculado em relação aos valores de extensão da última linha de cada tabela.

Tabela 4.2 - Resultados da análise de convergência relativos à variação do número de elementos da malha.

Malha (nº de elementos)	ϵ_y	ϵ_z	Erro ϵ_y (%)	Erro ϵ_z (%)
768	0.3767	-0.4999	15.70	5.41
1500	0.4045	-0.4979	9.49	4.99
6144	0.4320	-0.4828	3.33	1.79
12000	0.4425	-0.4778	0.97	0.75
20736	0.4469	-0.4743	-	-

Tabela 4.3 - Resultados da análise de convergência relativos à variação do incremento de tempo entre *steps* para a malha de 12000 elementos.

Δt (s)	ϵ_y	ϵ_z	Erro ϵ_y (%)	Erro ϵ_z (%)
0.50	0.4333	-0.4828	1.69	2.02
0.25	0.4370	-0.4820	0.86	1.84
0.10	0.4425	-0.4778	0.39	0.97
0.05	0.4408	-0.4733	-	-

Analisando os resultados, escolheu-se a malha de 12000 elementos como a indicada para as simulações relativas aos provetes de largura w_0 de 10 mm. No que concerne ao incremento de tempo entre *steps*, determinou-se como adequado um Δt de 0.10 s para todas as simulações efetuadas na dissertação.

4.3. Análises de sensibilidade

As análises de sensibilidade tiveram como objetivo a experimentação de várias geometrias de provetes e de diferentes condições de atrito com o intuito de se obter dispersão dos pontos de fratura no plano das extensões principais que possibilitassem, deste modo, a determinação da curva limite de fratura

ao corte fora do plano (CLFCFP). Para além disso, os resultados destas simulações foram essenciais para a definição do plano de ensaios e para o projeto da ferramenta de compressão, já que estes dependem diretamente da geometria dos provetes.

Sendo assim, realizou-se uma série de simulações numéricas. A nível geométrico, as dimensões do comprimento l_0 e espessura t_0 do provete mantiveram-se inalteradas e tomaram os valores de 15 e 5 mm, respetivamente. No que diz respeito aos valores testados para a largura w_0 e para as condições de atrito, estes são apresentados de seguida na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Geometria dos provetes e condições de atrito testadas nas análises de sensibilidade.

Geometria do provete	Fator de atrito m	
	Placa nº 1	Placa nº 2
w_0 (mm)		
7.5	0.1	0.1
7.5	1	0.1
7.5	1	1
10	0.1	0.1
10	1	0.1
10	1	1
20	0.1	0.1
20	1	0.1
20	1	1
50	0.1	0.1

Após a realização das simulações, começou-se por identificar o elemento central da face $l_0 \times t_0$ após a deformação e avaliaram-se as evoluções das extensões nas direções 'y' e 'z' desse elemento para um deslocamento de compressão de 10 mm. O elemento central foi escolhido por ser aquele que à partida teria maiores valores de deformação. As evoluções das extensões nas direções 'y' e 'z' foram representadas como ε_1 e ε_2 no plano das extensões principais, obtendo-se então as trajetórias de deformação numéricas preliminares apresentadas abaixo na Figura 4.3.

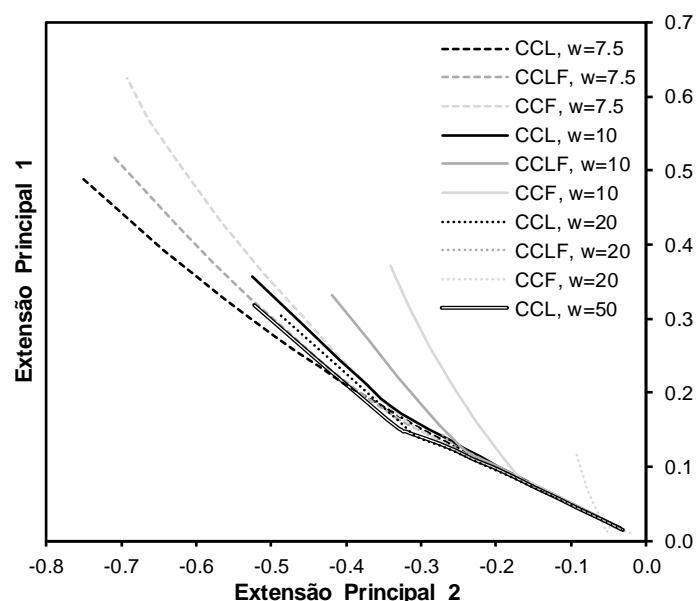


Figura 4.3 - Trajetórias de deformação numéricas para várias geometrias de provete e condições de atrito.

Por último, analisaram-se as diferentes trajetórias de deformação numéricas e escolheram-se, para ensaiar experimentalmente, 4 combinações da geometria dos provetes com as condições de atrito:

1. Provette de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ com ambas as extremidades livres;
2. Provette de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ com ambas as extremidades fixas;
3. Provette de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ com uma extremidade fixa e outra livre;
4. Provette de largura $w_0 = 20 \text{ mm}$ com ambas as extremidades livres;

Foram escolhidas as três condições relativas aos provetes de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ (três condições de atrito distintas), já que estas são aquelas que evidenciam uma maior disparidade ao nível das trajetórias de deformação para a mesma largura, tentando assim garantir uma boa dispersão dos pontos de fratura experimentais. Deste modo, foi também possível avaliar de forma isolada a influência do atrito na dispersão dos pontos de fratura.

A quarta condição de ensaio visa a obtenção de pontos de fratura experimentais adicionais no plano das extensões principais, tentando promover uma maior dispersão dos pontos, bem como avaliar a influência da largura para uma determinada condição de atrito. Nesta última condição de ensaio, as extremidades dos provetes são livres de forma a não se aumentar o número de componentes da ferramenta de compressão, pois o encastramento envolveria o fabrico adicional de discos superiores furados de acordo com as dimensões dos provetes.

4.4. Novo critério de dano

Como já foi referido no Estado da Arte, o critério de dano mais utilizado para o modo III da mecânica da fratura é o critério de Cockcroft-Latham (expressão (2.15)). No entanto, este critério apenas funciona para ensaios de enformabilidade na massa, porque não tem em consideração a tensão σ_3 . Para além disso, os resultados numéricos das simulações relativos à distribuição de dano não são, de todo, condizentes com o que se verifica experimentalmente como será demonstrado em detalhe na secção 5.2.2, pelo que foi necessário definir um novo critério de dano.

Deste modo, propõe-se nesta dissertação, uma generalização do critério de dano apresentado por Christiansen et al. (2019) (expressão (2.14)) para a abertura e crescimento tridimensional de fendas através de esforços de corte fora do plano. Assim, considerando o caso genérico tridimensional, o dano dúctil pode ser visto como uma medida normalizada de acumulação de energia por unidade de volume,

$$D^{III} = \int_0^{\gamma_{ij}} \frac{\tau_{ij}}{\bar{\sigma}} d\gamma_{ij} + \int_0^{\gamma_{ij}} \frac{3\sigma_m}{2\bar{\sigma}} d\gamma_{ij} \quad i, j = 1, 3 \quad i \neq j \quad (4.2)$$

O valor de dano crítico D_{crit}^{III} é obtido através da medição experimental das extensões de corte no momento da fratura. A sua implementação numérica não tem em conta a acumulação de dano negativo devido às dilatações para $\sigma_m < 0$ porque o fecho de *voids* em condições de compressão hidrostática em deformação a frio não se traduz na anulação das fendas, nem na recuperação da resistência do material.

5. Resultados e Discussão

Este capítulo inicia-se com a apresentação dos resultados relativos aos ensaios de enformabilidade à fratura nos modos I e II da mecânica da fratura. De seguida faz-se a apresentação dos resultados relativos aos novos ensaios de compressão longitudinal de chapa, onde a fratura ocorre por esforços de corte fora do plano e que permitiram caracterizar a enformabilidade à fratura no modo III para o alumínio AW7075-T651, bem como a apresentação dos resultados numéricos acerca do dano. Por último, apresentam-se os três limites de enformabilidade numa única representação gráfica, tanto no plano das extensões principais, como no plano da triaxialidade.

5.1. Enformabilidade à fratura nos modo I e II

Os limites de enformabilidade à fratura nos modo I e II, correspondentes à curva limite de fratura (CLF) e curva limite de fratura ao corte (CLFC), do alumínio AW7075-T651 foram determinados através dos resultados dos ensaios de tração (T), *double notched tension* (DNT), corte (C) e *staggered double notched tension* (SDNT) já apresentados na secção 3.2.

Para cada ensaio, o sistema digital de correlação de imagens permitiu medir as deformações nas zonas de interesse (zonas onde é expectável o aparecimento da fratura) desde o instante inicial até ao instante de fratura do ensaio. Deste modo, foi possível obter as distribuições relativas às extensões principais 1 e 2 correspondentes ao instante imediatamente antes da fratura, representadas na Figura 5.1 para um provete representativo de cada ensaio de enformabilidade.

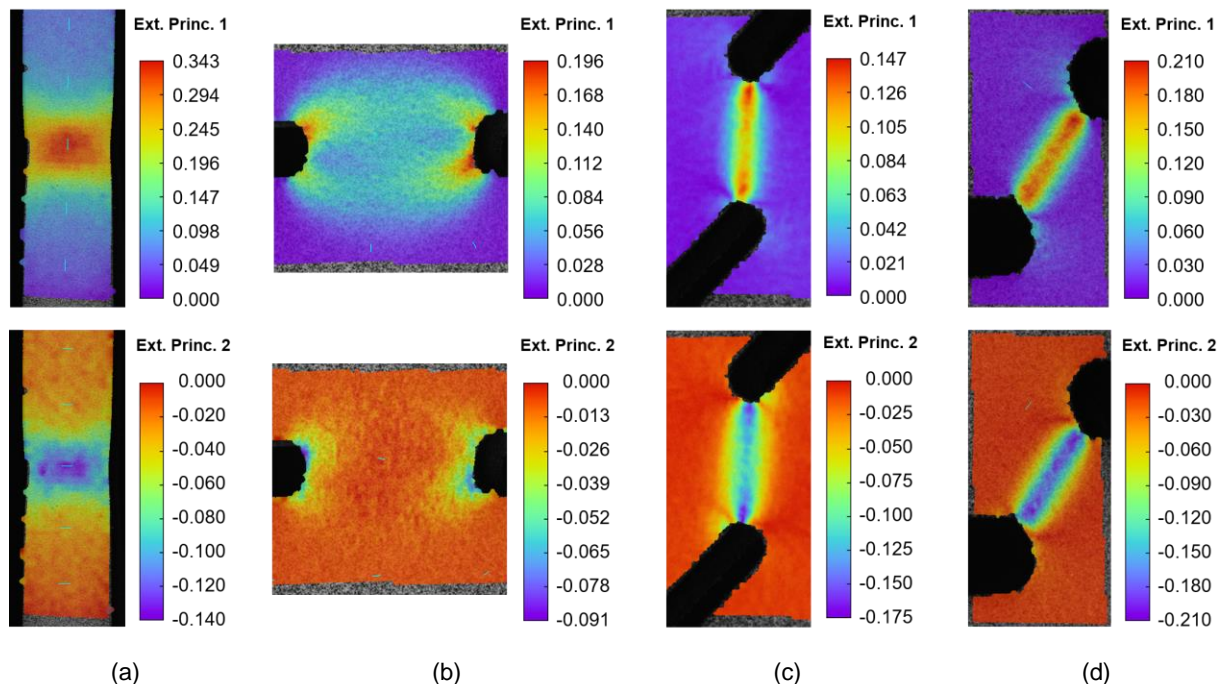


Figura 5.1 - Imagens do sistema digital de correlação de imagens com as distribuições das extensões principais 1 e 2: (a) Provete de T; (b) Provete de DNT; (c) Provete de C; (d) Provete de SDNT.

A partir destes resultados, para cada caso, foi necessário selecionar um ponto representativo na zona de fratura (zona de maiores deformações) de forma a se obter as trajetórias de deformação experimentais, ou seja, as evoluções das extensões principais 1 e 2 no local da fratura desde o instante inicial ao instante final da deformação. Para os ensaios de tração, o ponto selecionado corresponde a um ponto central da zona de maiores deformações, alinhado com o eixo longitudinal a meio da zona de estrição. Para os ensaios de DNT, corte e SDNT o ponto selecionado diz respeito ao ponto central do ligamento, já que corresponde ao ponto com menos influência dos entalhes.

Estas trajetórias foram então obtidas unicamente através das evoluções das extensões principais fornecidas pelo sistema digital de correlação de imagens. Já no que diz respeito à obtenção dos pontos de fratura, estes foram determinados com o recurso a medições das espessuras t_0 , larguras w_0 e ligamentos l_0 iniciais dos provetes, bem como das espessuras t_f , larguras w_f e ligamentos l_f das superfícies de fratura. As medições foram realizadas no microscópio Mitutoyo TM505B (ver secção 3.4.2). O objetivo desta metodologia é o cálculo dos pontos de fratura de uma forma mais precisa, já que devido à enorme concentração de deformação em todo o ligamento/secção no instante de fratura, que para além do mais não é constante, o sistema digital de correlação de imagens fornece valores dependentes da posição do ponto escolhido e que podem não corresponder exatamente aos valores reais. Para além disso, no instante da fratura, a deformação do padrão aleatório não coincide completamente com a deformação do material em estudo, já que existe um ligeiro deslizamento da camada de tinta sobre o metal.

Assim, no que diz respeito à obtenção dos pontos de fratura, para os provetes de tração e DNT, a extensão principal 2 no instante da fratura foi calculada pela fórmula $\varepsilon_{2f} = \ln\left(\frac{w_f}{w_0}\right)$ e $\varepsilon_{2f} = \ln\left(\frac{l_f}{l_0}\right)$, respetivamente. Já para os provetes de corte e SDNT, como o eixo principal 2 não está alinhado com a superfície de fratura, os valores da extensão principal 2 foram obtidos considerando o ponto final das respetivas trajetórias de deformação experimentais, assumindo-se localização sobre condições de deformação plana $d\varepsilon_2 = 0$ (Embury e Duncan, 1981). A extensão principal 1 no instante da fratura foi sempre calculada com recurso à condição de incompressibilidade, ou seja, $\varepsilon_{1f} = -(\varepsilon_{2f} + \varepsilon_{3f})$, onde $\varepsilon_{3f} = \ln\left(\frac{t_f}{t_0}\right)$.

Na Figura 5.2, encontra-se uma representação gráfica, no plano das extensões principais, da CLF e da CLFC, das trajetórias de deformação e dos pontos de fratura experimentais referentes aos modos I e II da mecânica da fratura para a chapa de alumínio AW7075-T651. As trajetórias de deformação experimentais correspondem às linhas que partem da origem do gráfico e apenas está representada uma trajetória representativa por cada tipo de ensaio. Os marcadores correspondem a todos os pontos de fratura obtidos experimentalmente para os diferentes ensaios e a sua cor é condizente com a cor da trajetória de deformação do respetivo ensaio. Por último, as linhas retas espessas de cor preta correspondem à CLF e à CLFC, referentes aos limites de enformabilidade à fratura nos modos I e II da mecânica da fratura, respetivamente.

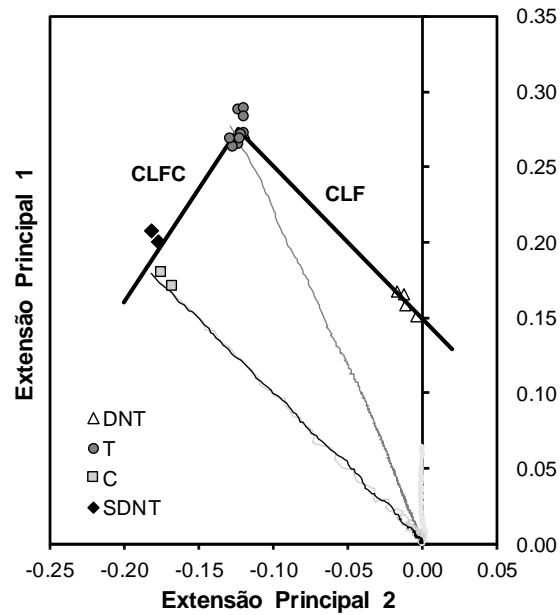


Figura 5.2 - Representação gráfica da CLF e da CLFC, das trajetórias de deformação e dos pontos de fratura experimentais referentes aos modos I e II da mecânica da fratura para a chapa de alumínio AW7075-T651 no plano das extensões principais.

A CLF corresponde a uma linha reta de declive -1.02 determinada através da linha de tendência formada a partir dos pontos de fratura relativos aos ensaios de tração e DNT, onde a fratura ocorre através de esforços de tração (modo I da mecânica da fratura). O declive experimental obtido é extremamente próximo do valor teórico de -1 (Martins et al., 2014).

No que concerne à CLFC, esta corresponde a uma linha reta que passa entre os pontos de fratura associados aos ensaios de corte e SDNT (modo II da mecânica da fratura) e intersesta a CLF na zona dos pontos de fratura dos ensaios de tração. As retas são aproximadamente perpendiculares.

Na Figura 5.3, encontram-se 4 fotografias de superfícies de fratura de provetes relativos aos 4 tipos de ensaios realizados no âmbito da caracterização da enformabilidade à fratura nos modos I e II da mecânica da fratura.

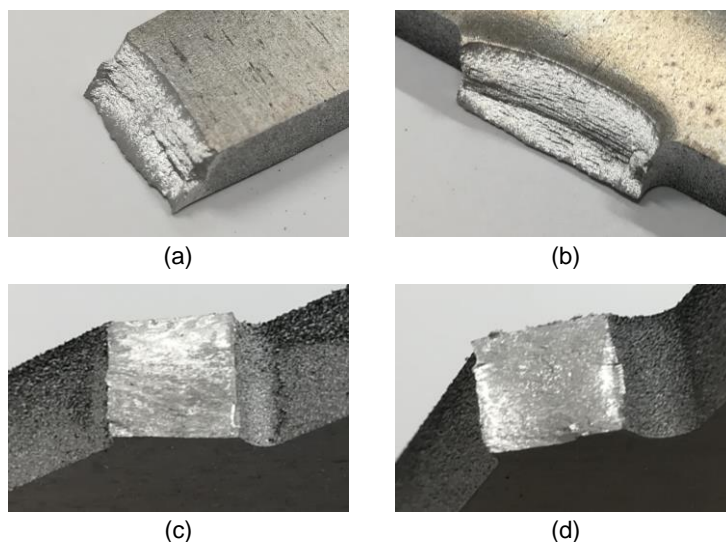


Figura 5.3 - Superfícies de fratura: (a) Provete de T; (b) Provete de DNT; (c) Provete de C; (d) Provete de SDNT.

Estas superficies de fratura foram posteriormente observadas através do microscópio eletrónico de varrimento (SEM - *Scanning Electron Microscope*) Hitachi S-2400 com uma ampliação de 1500x e as fotografias obtidas para cada caso são apresentadas de seguida na Figura 5.4.

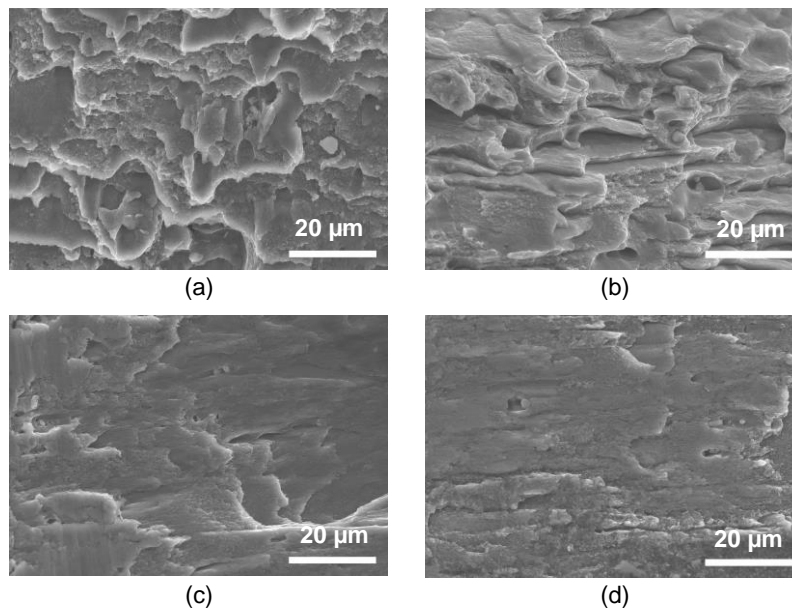


Figura 5.4 – Fotografias das superfícies de fratura obtidas através do microscópio eletrónico para uma ampliação de 1500x: (a) Provete de T; (b) Provete de DNT; (c) Provete de C; (d) Provete de SDNT.

Estas fotografias permitem avaliar as fractografias associadas aos diferentes modos de fratura. As imagens das Figuras 5.4a e 5.4b, relativas aos provetes dos ensaios de tração e DNT, revelam *dimples* circulares típicos de fraturas decorrentes de esforços de tração e, conseqüentemente, compatíveis com a abertura de fissuras no modo I da mecânica da fratura. No que diz respeito às imagens das Figuras 5.4c e 5.4d, relativas aos provetes dos ensaios de corte e SDNT, estas apresentam *dimples* ondulados e alongados numa direção típicos de fraturas decorrentes de esforços de corte no plano e, conseqüentemente, compatíveis com a abertura de fissuras no modo II da mecânica da fratura.

5.2. Enformabilidade à fratura no modo III

O limite de enformabilidade à fratura no modo III, correspondente à curva limite de fratura ao corte fora do plano (CLFCFP), do alumínio AW7075-T651 foi determinado através dos resultados dos ensaios de compressão longitudinal de chapa desenvolvidos especificamente para o efeito, apresentados na secção 3.3.

Para cada ensaio, o sistema digital de correlação de imagens permitiu medir as deformações nas zonas de interesse (zonas onde é expectável o aparecimento da fratura) desde o instante inicial até ao instante de fratura do provete. Deste modo, foi possível obter as distribuições relativas às extensões principais 1 e 2 correspondentes ao instante imediatamente antes da fratura, apresentadas de seguida nas Figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 para um provete representativo de cada uma das quatro condições ensaiadas.

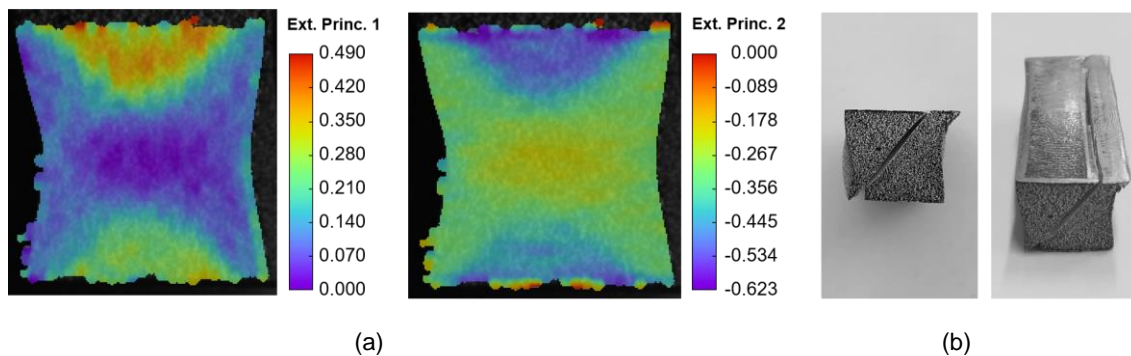


Figura 5.5 – (a) Distribuições experimentais das extensões principais 1 e 2 de fratura para um provete de largura $w_0 = 20 \text{ mm}$ referente a um ensaio de CCL (b) Fotografias do respetivo provete após o ensaio.

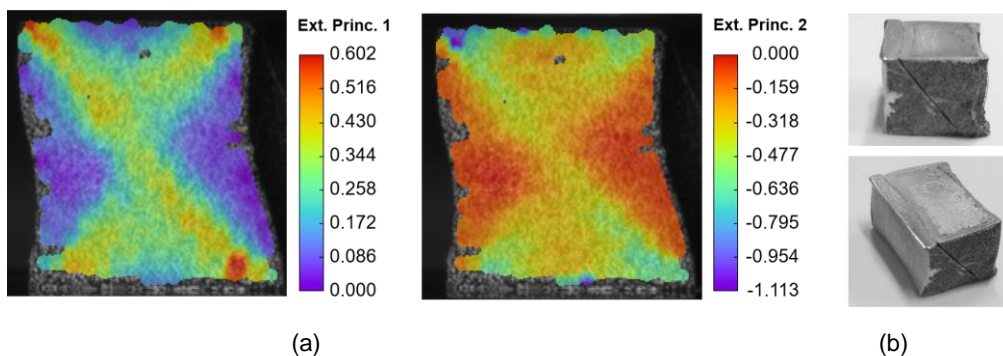


Figura 5.6 – (a) Distribuições experimentais das extensões principais 1 e 2 de fratura para um provete de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ referente a um ensaio de CCL (b) Fotografias do respetivo provete após o ensaio.

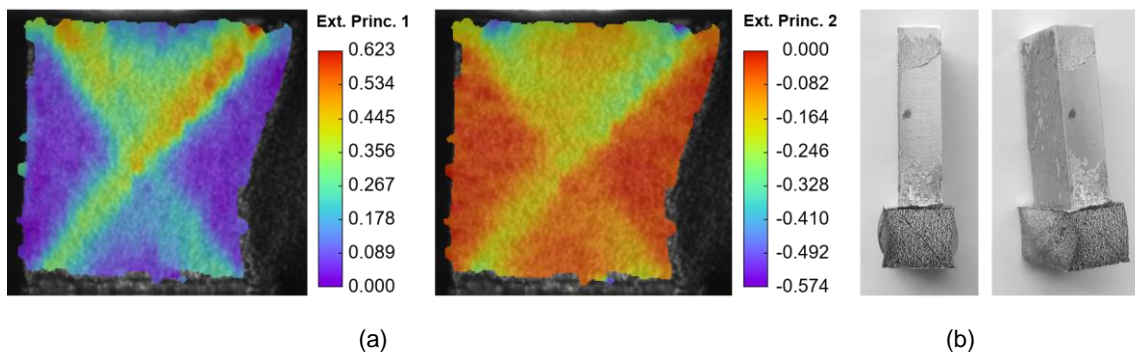


Figura 5.7 – (a) Distribuições experimentais das extensões principais 1 e 2 de fratura para um provete de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ referente a um ensaio de CCLF (b) Fotografias do respetivo provete após o ensaio.

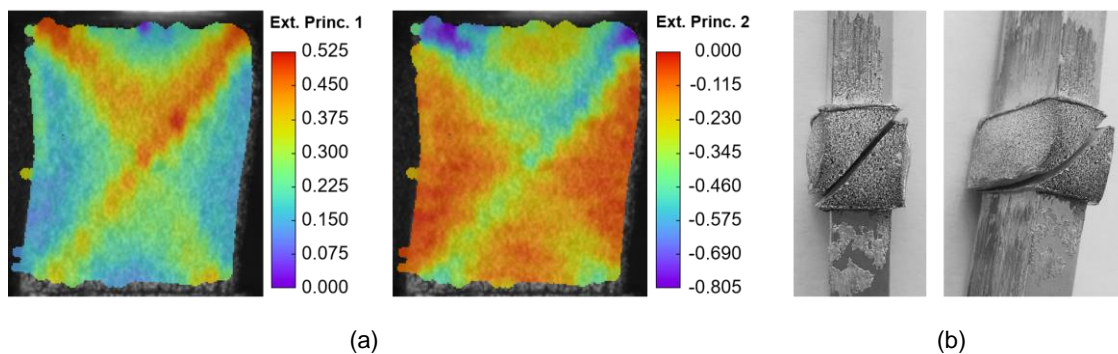


Figura 5.8 – (a) Distribuições experimentais das extensões principais 1 e 2 de fratura para um provete de largura $w_0 = 10 \text{ mm}$ referente a um ensaio de CCF (b) Fotografias do respetivo provete após o ensaio.

A partir destes resultados, para cada caso, foi necessário selecionar um ponto representativo na zona de fratura (zona de maiores deformações) de forma a se obter as trajetórias de deformação experimentais, ou seja, as evoluções das extensões principais 1 e 2 no local da fratura desde o instante inicial ao instante final da deformação.

No entanto, sendo a fratura do alumínio AW7075-T651 instantânea, torna-se impossível a identificação do ponto de início da fratura. Além disso, para alguns provetes, as distribuições das extensões principais não evidenciavam zonas de deformação acentuada bem definidas, tornando o processo de escolha do ponto ainda mais difícil. Neste sentido, foi preciso recorrer-se às simulações numéricas, nomeadamente aos resultados das distribuições de dano, de forma a se escolher o ponto representativo de acordo com as zonas com maior valor de dano.

De referir que as Figuras 5.5b, 5.6b, 5.7b e 5.8b demonstram bem que a fratura dos provetes corresponde a uma fissura decorrente de esforços de corte fora do plano da chapa, ou seja, correspondente ao modo III da mecânica da fratura.

5.2.1. Validação numérico-experimental

A validação numérico-experimental é um processo fundamental para a validação das simulações numéricas tendo em consideração os ensaios experimentais, tendo de haver concordância e semelhança entre ambos os resultados. Este processo foi realizado através da análise da evolução da força com o deslocamento para as 4 condições testadas.

Neste sentido, e havendo repetibilidade, traçaram-se os gráficos de força-deslocamento experimentais para um provete representativo de cada condição, juntamente com a curva numérica respetiva. Os gráficos obtidos para cada condição são apresentados de seguida na Figura 5.9.

Analisando os resultados obtidos pode-se verificar que os valores de força atingidos para o provete de largura $w_0=20$ mm são bastante superiores (quase o dobro) aos registados para os provetes de largura $w_0=10$ mm, já que a secção do provete é o dobro. Estes, por sua vez, são extremamente semelhantes e praticamente coincidentes, o que indica que a variação das condições de atrito não influencia a evolução da força com o deslocamento para o material em estudo, sendo que praticamente toda a força é utilizada na deformação do material.

Para cada condição, existe uma grande semelhança e concordância entre os resultados numéricos e experimentais, pelo que se conclui que o processo de validação numérico-experimental foi efetuado com sucesso.

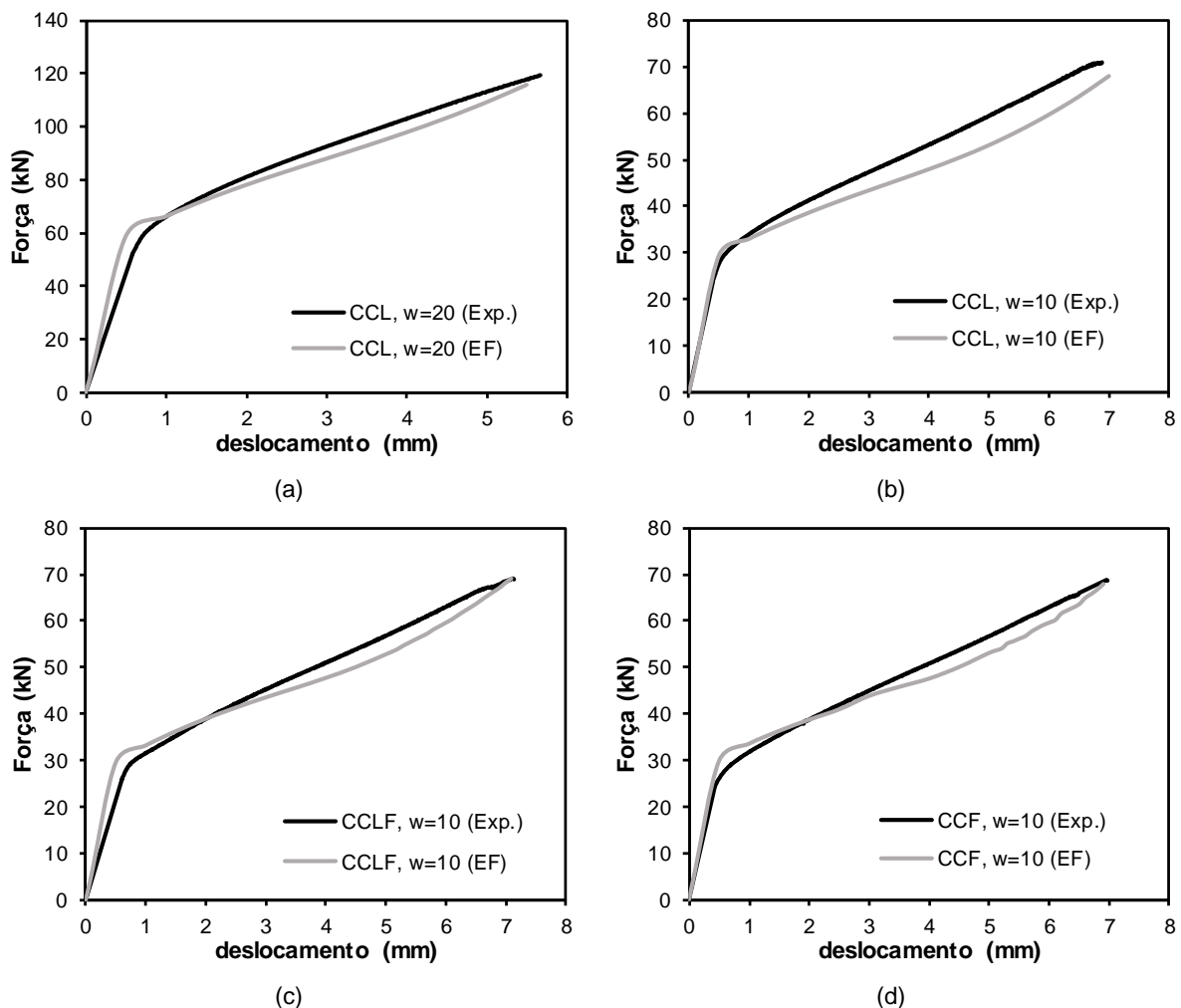


Figura 5.9 - Comparação da evolução de força com o deslocamento entre os elementos finitos (EF) e os resultados experimentais (Exp.) para as diferentes condições: (a) CCL, $w_0=20$ mm; (b) CCL, $w_0=10$ mm; (c) CCLF, $w_0=10$ mm; (d) CCF, $w_0=10$ mm.

5.2.2. Análises de dano

As simulações numéricas tiveram como primeiro objetivo a definição das geometrias dos provetes e condições de atrito a ensaiar, tal como foi explicado na secção 3.3. No entanto, face à incerteza relativamente ao ponto de início das fissuras que ocorreram nos provetes experimentais decorrentes de esforços de corte fora do plano, foi necessário obter as distribuições de dano numericamente. Para isso, recorreu-se ao software *i-form 3d*, de forma a se definir o ponto de início da fissura de acordo com a localização do dano máximo na face correspondente à espessura do provete.

Assim, foram aplicados três critérios de dano para o caso de um provete de largura w_0 de 10 mm e extremidades livres: critério de McClintock (modo I); critério normalizado de Cockroft-Latham (modo III); e critério normalizado do trabalho plástico de corte (modo II). Os resultados ao nível das distribuições de dano para cada um deles são apresentados de seguida nas Figuras 5.10a, 5.10b e 5.10c, respetivamente.

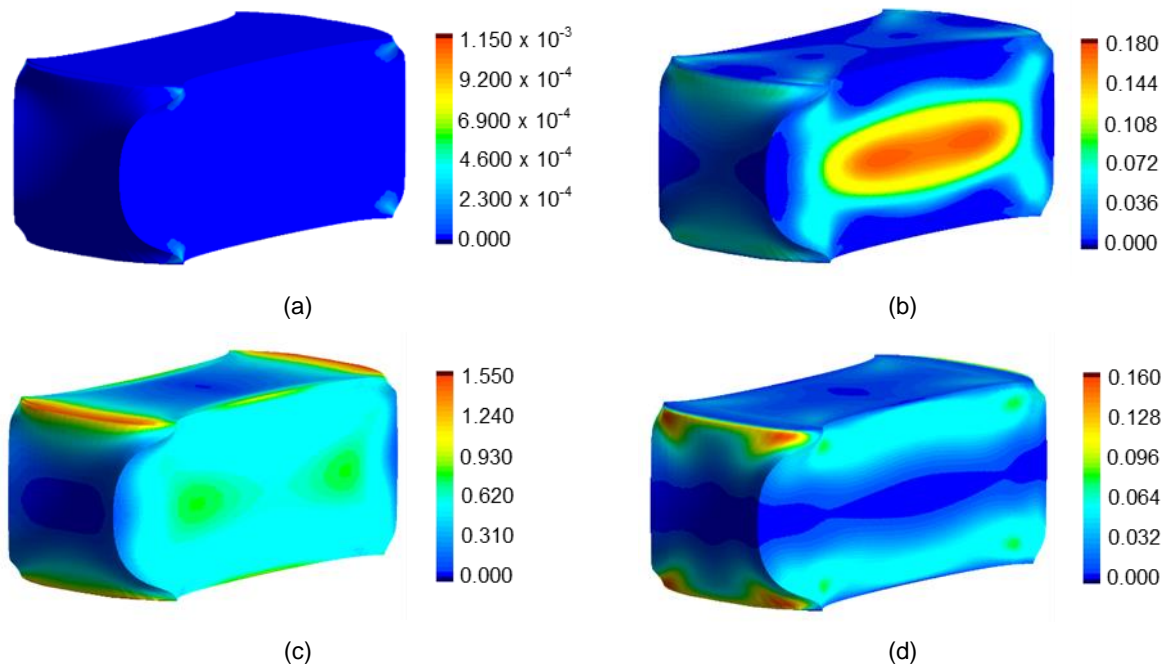


Figura 5.10 – Distribuição de dano obtida nas simulações numéricas para o provete de $w_0 = 10 \text{ mm}$ relativo ao ensaio CCL no instante da fratura: (a) critério de McClintock (modo I); (b) critério normalizado de Cockcroft-Latham; (c) critério normalizado do trabalho plástico de corte (modo II); (d) novo critério de dano dúctil proposto para solicitações de corte fora do plano e fratura no modo III.

Analisando os resultados, percebeu-se que as distribuições de dano não eram, de todo, condizentes com a distribuição das deformações obtidas através do sistema digital de correlação de imagens, não permitindo a determinação da zona de início de fratura (por exemplo, critério normalizado de Cockcroft-Latham e critério normalizado do trabalho plástico de corte por unidade de volume). Aliás, nem permitindo a previsão da acumulação de dano (por exemplo, o critério de McClintock exclusivamente baseado na triaxialidade de tensões). Deste modo, surgiu a necessidade de se desenvolver um novo critério de dano (já apresentado na secção 4.4), mais adequado para a abertura e crescimento tridimensional de fendas através de esforços de corte fora do plano.

O resultado da distribuição de dano utilizando o novo critério é apresentado na Figura 5.10d e verifica-se que as zonas de maior dano correspondem aos cantos da face da espessura, estando assim muito mais próximo das deformações acentuadas em “X” verificadas experimentalmente (ver Figura 5.6). Este novo critério de dano torna-se então numa ferramenta importante de previsão de fissuras e na calibração dos processos de forjamento de chapa.

Aplicando o novo critério de dano dúctil às quatro condições ensaiadas, obtêm-se as seguintes distribuições de dano apresentadas na Figura 5.11. As simulações foram realizadas até ao instante de fratura que foi calibrado pelo deslocamento atingido nos ensaios experimentais de compressão longitudinal de chapa para cada condição.

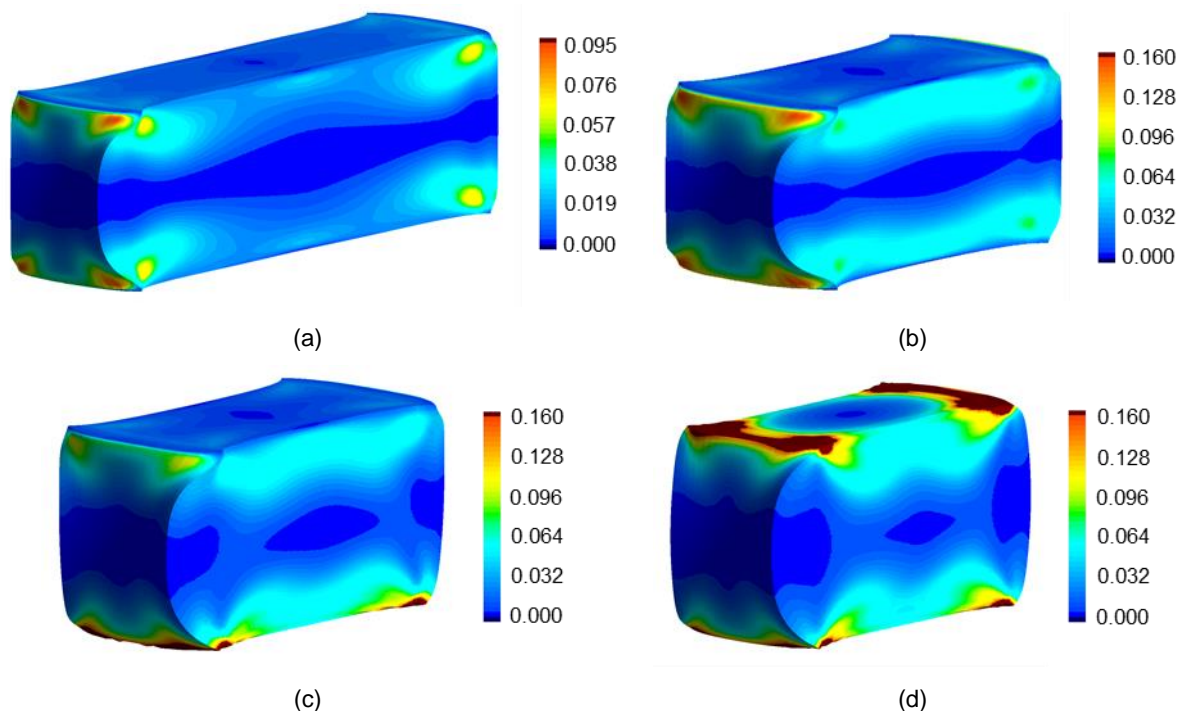


Figura 5.11 – Distribuição de dano obtida nas simulações numéricas para o instante de fratura utilizando o novo critério de dano dúctil proposto para solicitações de corte fora do plano e fratura no modo III:
 (a) CCL, $w_0=20$ mm; (b) CCL, $w_0=10$ mm; (c) CCLF, $w_0=10$ mm; (d) CCF, $w_0=10$ mm.

Para todas as condições, na face da espessura, são os cantos superiores e inferiores que apresentam valores mais elevados de dano, correspondendo então às regiões onde se inicia a fissura por esforços de corte fora do plano. Nos provetes com extremidades encastradas, verifica-se uma grande acumulação de dano nas superfícies junto ao encastramento, já que nestes casos, o fator de atrito, m , aplicado nos pratos de compressão foi 1 (justamente para simular o encastramento), enquanto que nos ensaios experimentais o contacto entre as superfícies laterais e os pratos de compressão ocorreu com um fator de atrito de aproximadamente 0.1, logo o dano não será tão elevado e, conseqüentemente, a fratura ocorre novamente no lado da espessura partindo de um dos cantos.

5.2.3. Representação no plano das extensões principais

A partir das distribuições das extensões principais obtidas através do sistema digital de correlação de imagens para o instante imediatamente antes da fratura e da localização das zonas de dano máximo decorrentes das simulações numéricas para cada uma das condições testadas, foi então possível seleccionar o ponto representativo na face da espessura dos provetes e, conseqüentemente, obter as trajetórias de deformação experimentais. Os pontos de fratura correspondem aos pontos finais de cada uma das trajetórias de deformação experimentais.

Neste sentido, na Figura 5.12, encontra-se uma representação gráfica, no plano das extensões principais, da CLFCFP, das trajetórias de deformação e dos pontos de fratura experimentais referentes ao modo III da mecânica da fratura para a chapa de alumínio AW7075-T651. As trajetórias de deformação experimentais correspondem às linhas finas que partem da origem do gráfico e apenas é

apresentada uma trajetória representativa por cada condição. Os marcadores correspondem aos pontos de fratura obtidos experimentalmente para os diferentes ensaios e a sua cor é condizente com a cor da trajetória de deformação do ensaio respectivo. Por último, a linha reta espessa de cor preta corresponde à CLFCFP, referente ao limite de enformabilidade à fratura no modo III da mecânica da fratura.

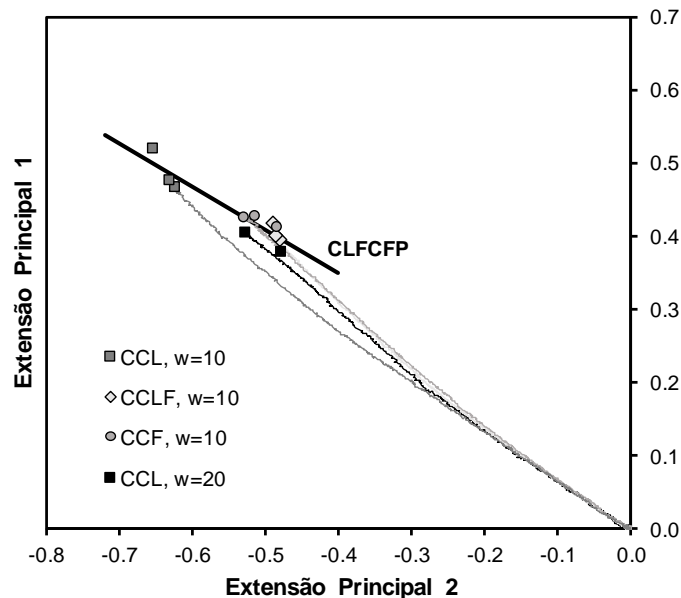


Figura 5.12 - Representação gráfica da CLFCFP, das trajetórias de deformação e dos pontos de fratura experimentais referentes ao modo III da mecânica da fratura para a chapa de alumínio AW7075-T651 no plano das extensões principais.

A CLFCFP corresponde a uma linha reta de declive de -0.59, determinada através da linha de tendência formada a partir dos pontos de fratura. A boa dispersão destes pontos foi fundamental para a obtenção desta curva com a melhor precisão possível, estando definida nesta dissertação para valores de ε_2 desde -0.72 até -0.40. O declive experimental é similar ao declive teórico de -1/2 (Martins et al., 2014).

No que diz respeito ao posicionamento dos pontos de fratura de cada condição, os relativos à condição CCL, $w_0=10$ mm são os pontos de maiores extensões (em módulo) e, portanto, correspondem aos pontos mais à esquerda. À medida que o atrito nas extremidades do provete é maior, ou seja, para as condições de CCLF, $w_0=10$ mm e CCF, $w_0=10$ mm as extensões principais 1 e 2 de fratura são menores (em módulo) e, como tal, os pontos situam-se mais abaixo e para a direita.

A condição CCL, $w_0=20$ mm tinha como objetivo a obtenção de pontos de fratura diferentes dos pontos das outras três condições, no entanto, os resultados demonstram que tal não foi possível. Os pontos de fratura relativos à condição CCL, $w_0=20$ mm são semelhantes aos pontos referentes às condições CCLF, $w_0=10$ mm e CCF, $w_0=10$ mm. Em contrapartida, são diferentes dos pontos de fratura relativos à condição CCL, $w_0=10$ mm, o que indica que a CLFCFP também poderia ter sido obtida utilizando-se uma única condição de atrito (extremidades do provete livres), mas ensaiada para duas geometrias diferentes.

Na Figura 5.13, encontram-se 4 fotografias de superfícies de fratura de provetes relativos às 4 condições testadas no âmbito da caracterização da enformabilidade à fratura no modo III da mecânica da fratura.

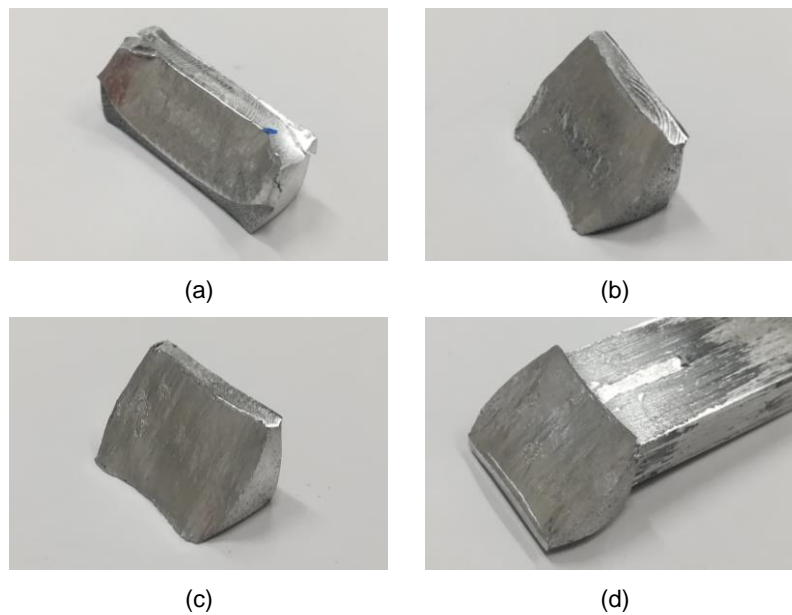


Figura 5.13 - Superfícies de fratura: (a) CCL, $w_0=20$ mm; (b) CCL, $w_0=10$ mm; (c) CCLF, $w_0=10$ mm; (d) CCF, $w_0=10$ mm.

Estas superfícies de fratura foram posteriormente observadas através do microscópio eletrónico de varrimento Hitachi S-2400 com uma ampliação de 1500x e as fotografias obtidas para cada caso são apresentadas de seguida na Figura 5.14.

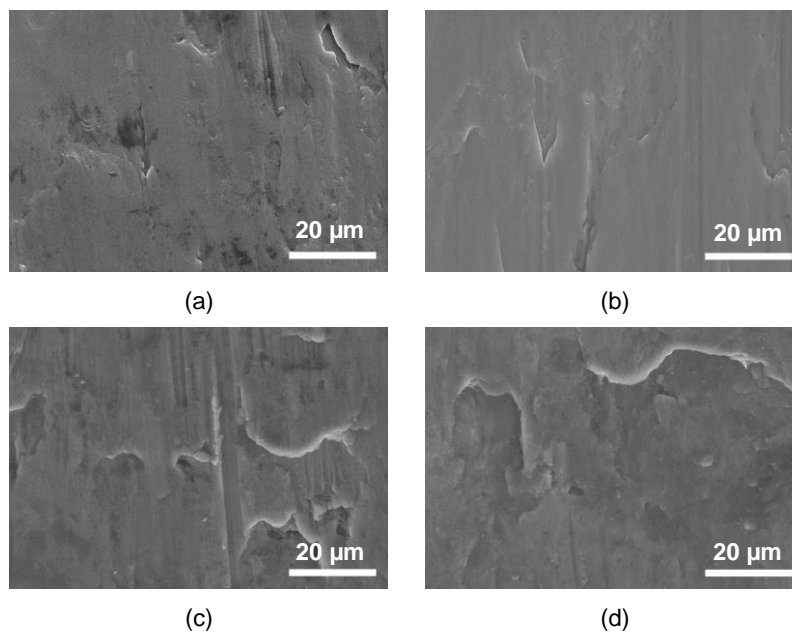


Figura 5.14 – Fotografias das superfícies de fratura obtidas através do microscópio eletrónico para uma ampliação de 1500x: (a) CCL, $w_0=20$ mm; (b) CCL, $w_0=10$ mm; (c) CCLF, $w_0=10$ mm; (d) CCF, $w_0=10$ mm.

Em todas as fotografias, a morfologia da superfície fraturada é suave e típica do deslizamento por corte sob pressão. A superfície fraturada está alinhada com a zona de deformação plástica de corte mais

intensa, porque o alongamento excessivo dos grãos ao longo dessa superfície aumenta significativamente o encruamento e, finalmente, promove a abertura e o crescimento de uma fissura na direção da espessura (modo III da mecânica da fratura).

5.3. Limites de enformabilidade à fratura para forjamento de chapa

Nesta última seção da dissertação, começa-se por se conjugar as curvas limite de enformabilidade à fratura obtidas para os modos I, II e III numa única representação gráfica no plano das extensões principais. Esta é a primeira vez que se representam as três curvas no mesmo gráfico, tendo estas sido obtidas através de diferentes ensaios de chapa. Isto foi necessário, já que para processos de forjamento de chapa, esta pode fraturar por qualquer um dos três modos de fratura, logo é essencial conhecer os respetivos limites de enformabilidade.

O resultado desta conjugação é apresentado na Figura 5.15. As linhas retas a preto correspondem às curvas limite de enformabilidade à fratura e os marcadores correspondem aos diferentes pontos de fratura experimentais.

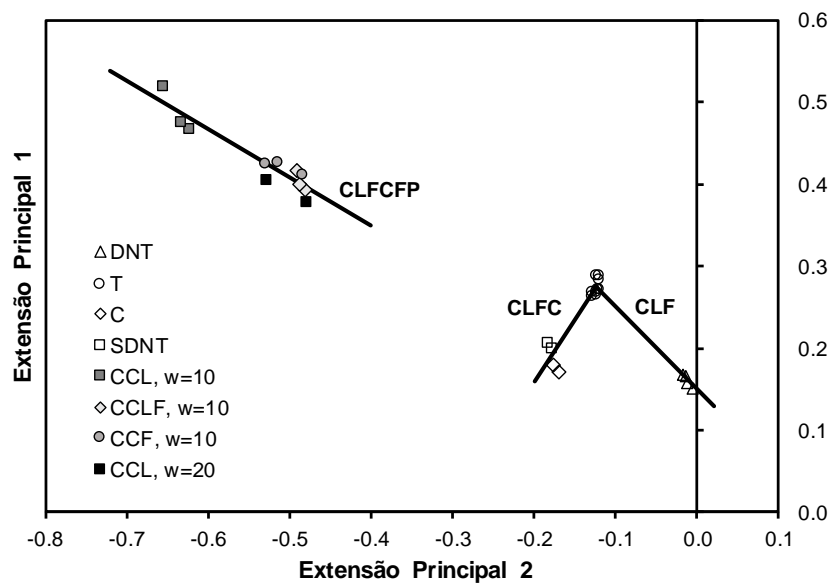


Figura 5.15 – Representação gráfica das curvas limite de enformabilidade à fratura nos modos I (CLF), II (CLFC) e III (CLFCFP) e dos pontos de fratura experimentais para a chapa de alumínio AW7075-T651 no plano das extensões principais.

Analisando o gráfico, conclui-se que os limites de fratura encontram-se divididos em duas ramificações diferentes, uma mais à esquerda composta unicamente pela CLFCFP, onde o corte ocorre fora do plano da chapa, e outra mais à direita composta pela CLF e CLFC, onde as deformações ocorrem ao nível do plano da chapa.

De seguida, na Tabela 5.1, são apresentadas as equações características dos limites de enformabilidade à fratura obtidas experimentalmente para a chapa de alumínio AW7075-T651.

Tabela 5.1 - Equações dos limites de enformabilidade à fratura.

Modo de fratura	Equação característica
Modo I (CLF)	$\varepsilon_1 = -1.02 \times \varepsilon_2 + 0.15$
Modo II (CLFC)	$\varepsilon_1 = 1.50 \times \varepsilon_2 + 0.46$
Modo III (CLFCFP)	$\varepsilon_1 = -0.59 \times \varepsilon_2 + 0.11$

Usando a metodologia descrita na secção 3.3, foi possível passar as curvas limite de enformabilidade à fratura e os pontos de fratura experimentais para o plano da triaxialidade (Figura 5.16). Esta passagem foi necessária, já que o plano das extensões principais é válido apenas para condições de deformação sobre tensão plana, o que não é o habitual para processos de forjamento de chapa, onde existem estados de tensão tridimensionais. O plano da triaxialidade é aplicável para qualquer caso e permite avaliar a enformabilidade do material em função das condições de carregamento.

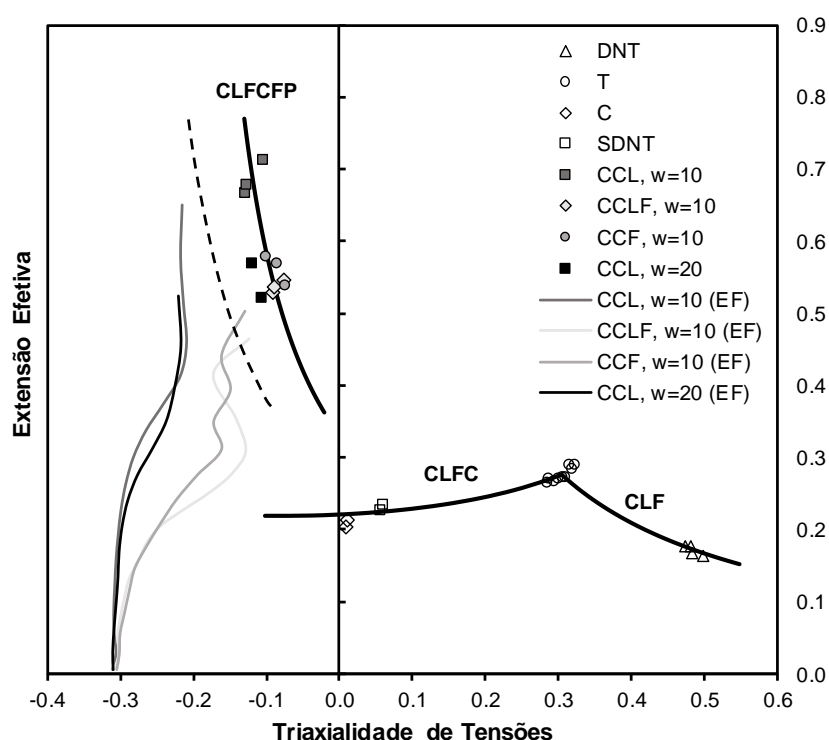


Figura 5.16 - Representação gráfica das curvas limite de enformabilidade à fratura nos modos I (CLF), II (CLFC) e III (CLFCFP), das trajetórias de deformação numéricas (curvas a traço fino contínuo) e dos pontos de fratura experimentais para a chapa de alumínio AW7075-T651 no plano da triaxialidade.

Novamente, também para o plano da triaxialidade, obtiveram-se duas ramificações diferentes relativamente aos limites de enformabilidade à fratura, uma mais acima e à esquerda composta pela CLFCFP e outra mais abaixo e à direita composta pela CLF e CLFC.

As curvas a traço fino contínuo correspondem às trajetórias de deformação numéricas obtidas no software *i-form 3d* para as 4 condições diferentes testadas nos ensaios de compressão longitudinal de chapa. Estas curvas passam pelo lado esquerdo da CLFC sem a cruzarem, dirigindo-se para a CLFCFP correspondente à falha por esforços de corte fora do plano.

Pode-se concluir que os pontos finais das trajetórias de deformação numéricas estão relativamente de acordo com os pontos de fratura experimentais usados para determinação da CLFCFP. O ligeiro afastamento deve-se a duas razões principais: primeiro, a metodologia de transformação para plano da triaxialidade descrita na secção 3.3 assume um carregamento proporcional com $\beta = d\varepsilon_2/d\varepsilon_1 = \varepsilon_2/\varepsilon_1$ constante, enquanto que as trajetórias de deformação experimentais não são lineares na parte final (Figura 5.12). Segundo, os elementos finitos calculam os valores da extensão efetiva, extensão média e tensão efetiva em volume, ou seja, no centro de cada elemento, em vez de os calcularem à superfície do provete, onde as medições experimentais foram realizadas. Estas duas razões justificam o desfasamento entre a CLFCFP determinada por interpolação dos elementos finitos (curva a tracejado) e a CLFCFP obtida através dos pontos de fratura experimentais e depois transformada para o plano da triaxialidade segundo a metodologia descrita na secção 3.3.

6. Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado, bem como as propostas de trabalho futuro.

Este documento propõe um novo ensaio em chapa e uma nova metodologia para determinação do limite de enformabilidade à fratura para esforços de corte fora do plano da chapa, correspondente ao modo III da mecânica da fratura. A necessidade deste novo ensaio surgiu do facto de nos processos de forjamento de chapa o material poder fraturar por qualquer um dos três modos de fratura, já existindo vários ensaios de enformabilidade em chapa para os modos I e II, mas não existindo nenhum ensaio em chapa capaz de caracterizar o limite de enformabilidade no modo III da mecânica da fratura.

Os novos ensaios de compressão longitudinal de chapa foram projetados no sentido de se determinar a CLFCFP para o alumínio AW7075-T651, onde as solicitações a nível de esforços são semelhantes às que ocorrem realmente nos processos de forjamento de chapa. Os resultados apresentados nesta dissertação demonstram que, de facto e pela primeira vez, foi possível o cálculo do limite de enformabilidade à fratura no modo III a partir de chapa.

Conclui-se também que os ensaios de enformabilidade à fratura devem ser agrupados em três categorias diferentes, consoante o modo de fratura a que estão associados, devendo ser aplicados de forma independente para determinação do respetivo limite para cada uma destas categorias.

Provou-se difícil, ou mesmo impossível, conjugar os três limites de enformabilidade à fratura numa única ramificação cobrindo tanto as condições de deformação sobre tensão plana, como os estados tridimensionais de tensão que se encontram habitualmente nos processos de forjamento de chapa.

A metodologia utilizada para transformação dos limites de fratura do plano das extensões principais para o plano da triaxialidade pode ser implementada com sucesso para processos de forjamento de chapa, através da utilização de ensaios que induzam trajetórias de deformação proporcionais ou praticamente proporcionais.

Por fim, conclui-se que o novo critério de dano dúctil desacoplado pode ser utilizado para obter a localização de início das fissuras associadas a esforços de corte fora do plano. Este critério foi aplicado com sucesso nas simulações numéricas relativas aos ensaios de compressão longitudinal de chapa.

Para trabalho futuro, seria interessante repetir os ensaios de compressão longitudinal de chapa com um material mais dúctil, onde a fratura ocorresse de forma progressiva, possibilitando assim a identificação do ponto de início da fissura por parte do sistema digital de correlação de imagens. Utilizando um material diferente, seria também importante perceber se a fratura continuaria sempre a ocorrer para a face correspondente à espessura, ou se o material também fraturaria na face correspondente à largura do provete.

Outra das variações a implementar no futuro para os ensaios de compressão longitudinal de chapa seria a utilização de novas geometrias para os provetes, de forma a se perceber se seria possível uma

maior dispersão dos pontos de fratura, bem como a união ou maior aproximação da CLFCFP às curvas de enformabilidade à fratura dos modos I e II. Também serviria para validar os resultados obtidos nesta dissertação, já que os limites de enformabilidade são uma propriedade do material, não dependendo das geometrias dos provetes.

Futuramente, o ensaio de compressão longitudinal de chapa poderá também ser usado para determinação da tenacidade à fratura no modo III, utilizando-se, por exemplo, provetes com uma nova geometria.

Por último, seria também interessante aplicar o novo critério de dano a outros provetes ou peças relativas a processos de forjamento de chapa e comprovar a aptidão deste critério na caracterização do dano.

Referências

- ASTM B831 (2005), Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products, *ASTM International*, West Conshohocken, USA.
- ASTM E8/E8M (2013), Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, *ASTM International*, West Conshohocken, USA.
- ASTM E9 (2018), Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, *ASTM International*, West Conshohocken, USA.
- Atkins, A.G., Mai, Y.W. (1985), Elastic and plastic fracture: metals, polymers, ceramics, composites, biological materials, Ellis Horwood, Chichester, UK.
- Ayada, M., Higashino, T., Mori, K. (1987), Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials, *ICTP 1987 - Proceedings of the 2nd International Conference on Technology of Plasticity*, Stuttgart, Germany, 1, 553-558.
- Christiansen, P., Nielsen, C.V., Bay, N., Martins, P.A.F. (2019), Internal shear cracking in bulk metal forming, *Journal of Materials: Design and Applications*, 233, 603-614.
- Cockroft, M.G., Latham, D.J. (1968), Ductility and workability of metals, *Journal Institute of Metals*, 96, 33-39.
- Cotterell, B., Lee, E., Mai, Y.W. (1982), Mixed mode plane stress ductile fracture, *International Journal of fracture*, 20(4), 243-250.
- Cotterell, B., Reddel, J.K. (1977), The essential work of plane stress ductile fracture, *International Journal of Fracture*, 13(3), 267-277.
- Embury, J.D., Duncan, J.L. (1981), Formability maps, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 11, 505-521.
- Groche, P., Stahlmann, J., Hartel, J., Köhler, M. (2009), Hydrodynamics effects of macroscopic deterministic surface structures in cold forging processes, *Tribology International*, 42, 1173-1179.
- Hayabuchi, H., Iwata, D., Hori, H., Mori, T., Mori, T. (2012), Stroke press that makes possible inline production, *J Jpn Soc Technol Plast*, 53 (623), 1036–1040 (in Japanese).
- Hill, R. (1948), A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals, *Proceedings Royal Society London Series A*, 193, 281-297.
- Isik, K., Wernicke, S., Silva, M.B., Martins, P.A.F., Tekkaya, A.E. (2016), Failure by fracture in sheet–bulk metal forming, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 51(5), 387-394.
- Magrinho, J.P. (2015), Caracterização do limite de engelhamento para chapa metálica, Tese de Mestrado, IST.

- Magrinho, J.P., Silva, M.B., Alves, L.M., Atkins, A.G., Martins, P.A.F. (2018a), New methodology for the characterization of failure by fracture in bulk forming, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 53(4), 242-247.
- Magrinho, J.P., Silva, M.B., Martins, P.A.F. (2018b), Forming limits of an advanced high strength steel, *38th SENAFOR*.
- Mai, Y.W., Cotterell, B. (1984), The essential work of fracture for tearing of ductile metals, *International Journal of Fracture*, 24, 229-236.
- Martins, P.A.F., Bay, N., Tekkaya, A.E., Atkins, A.G. (2014), Characterization of fracture loci in metal forming, *International Journal of Mechanical Sciences*, 83, 112-123.
- McClintock, F.A., Kaplan, S.M., Berg, C.A. (1966), Ductile fracture by hole growth in shear bands, *International Journal of Fracture Mechanics*, 2, 614-627.
- Merklein, M., Allwood, J.M., Behrens, B.A., Brosius, A., Hagenah, H., Kuzman, K., Mori, K., Tekkaya, A.E., Weckenmann, A. (2012), Bulk forming of sheet metal, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 61, 725-745.
- Merklein, M., Koch, J., Opel, S., Schneider, T. (2011a), Fundamental investigations on the material flow at combined sheet and bulk metal forming processes, *Annals of the CIRP*, 60(1), 283–286.
- Merklein, M., Tekkaya, A.E., Brosius, A., Opel, S., Koch, J. (2011b) Overview on Sheet-Bulk Metal Forming Processes, *Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity*, 1109–1114.
- Merklein, M., Koch, J., Schneider T., Opel S., Vierzigman, U. (2010), Manufacturing of complex function components with variants by using a new metal forming process – sheet-bulk metal forming, *International Journal of Material Forming*, 3, 347-350.
- Mori, K., Nakano, T. (2015), State-of-the-art of plate forging in Japan, *Production Engineering*, 10, 81-91.
- Nakano, T. (2001), Compound technology of sheet metal forming and cold forging, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, 42, 388-392.
- Rivlin, R.S., Thomas, A.G. (1953), Rupture of rubber. I. Characteristic energy for tearing, *Journal of Polymer Science*, 10, 291-318.
- Rodrigues, J.M.C., Martins, P.A.F. (2010), *Tecnologia Mecânica*, Editora Escolar.
- Sieczkarek, P., Isik, K., Khalifa, N., Martins, P.A.F., Tekkaya, A.E. (2014), Mechanics of sheet-bulk indentation, *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 2387-2394.
- Silva, C.M.A., Alves, L.M., Nielsen, C.V., Atkins, A.G., Martins, P.A.F. (2015a), Failure by fracture in bulk metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 215(1), 287–298.

Silva, C.M.A., Bragança, I.M.F., Alves, L.M., Martins, P.A.F. (2017), Two-stage joining of sheets perpendicular to one another by sheet-bulk forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 253, 109-120.

Silva, C.M.A., Silva, M.B., Alves, L.M., Martins, P.A.F. (2015b), A new test for determining the mechanical and fracture behavior of materials in sheet-bulk metal forming, *Journal Materials: Design and Applications*, 0, 1–11.

Suzumura, T., Mine, K., Hirayama, I., Ishihara, S. (2002), An experimental study of new redrawing method utilizing axial compressive force and frictional force, *Kiuchi M et al (eds) Proceedings of the 7th international conference on technology for plasticity (vol 2)*, Yokohama, 1093–1098.

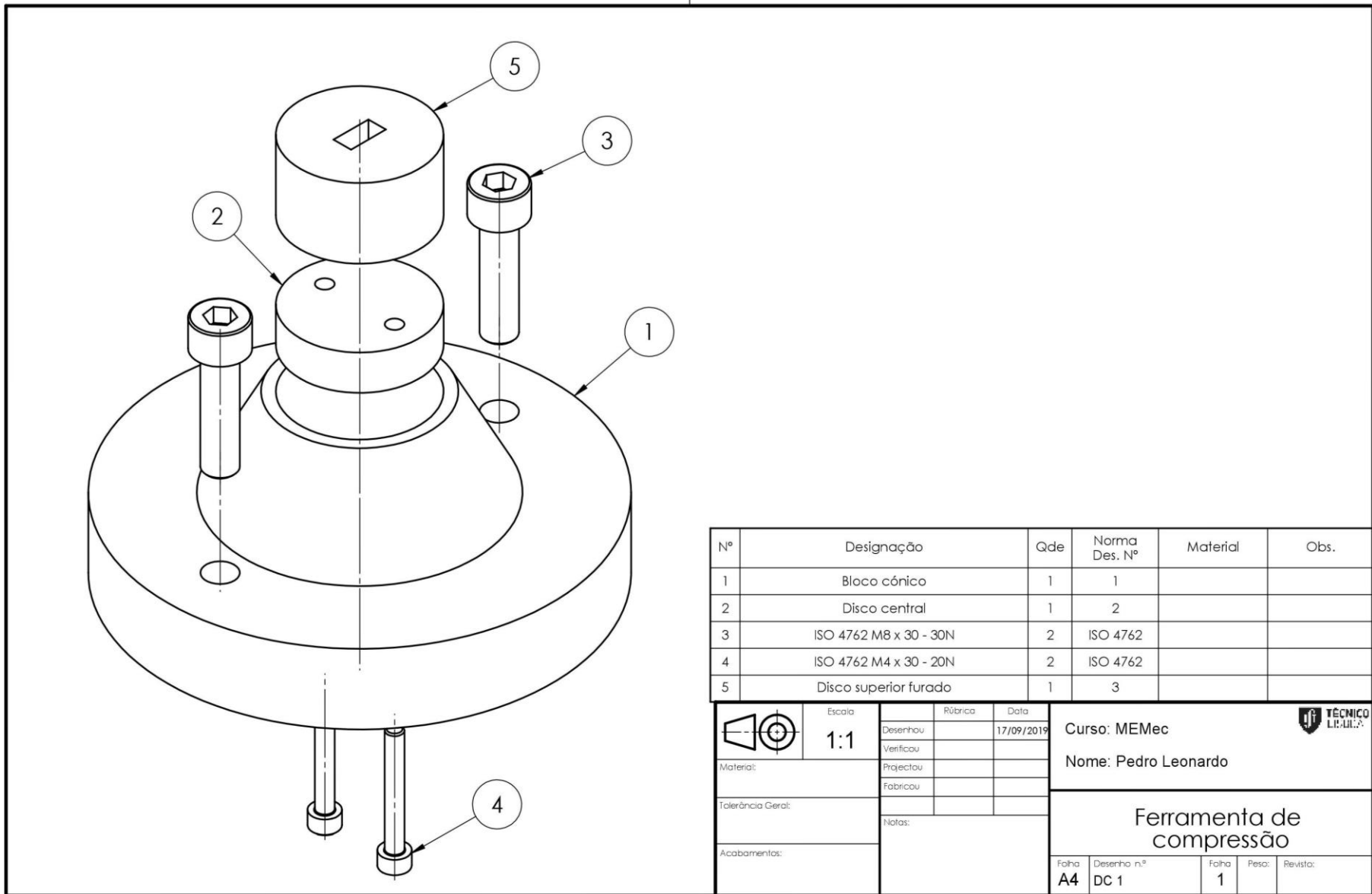
Vierzigmann, U., Merklein, M., Engel, U. (2010), Tailored surfaces in sheet-bulk metal forming, *Proceedings of the 4th ICTMP International Conference on Tribology in Manufacturing Processes*, 2, 541-550.

Vierzigmann, U., Merklein, M., Engel, U. (2011), Friction Conditions in Sheet-Bulk Metal Forming, *Procedia Engineering*, 19, 377-382.

Vujovic, V., Shabaik, A.H. (1986), A new workability criterion for ductile metals, *J. Eng. Mater. Technol.*, 108(3), 245-249.

Zhang, Q., Felder, E., Bruschi, S. (2009), Evaluation of friction condition in cold forging by using T-shape compression test, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 5720-5729.

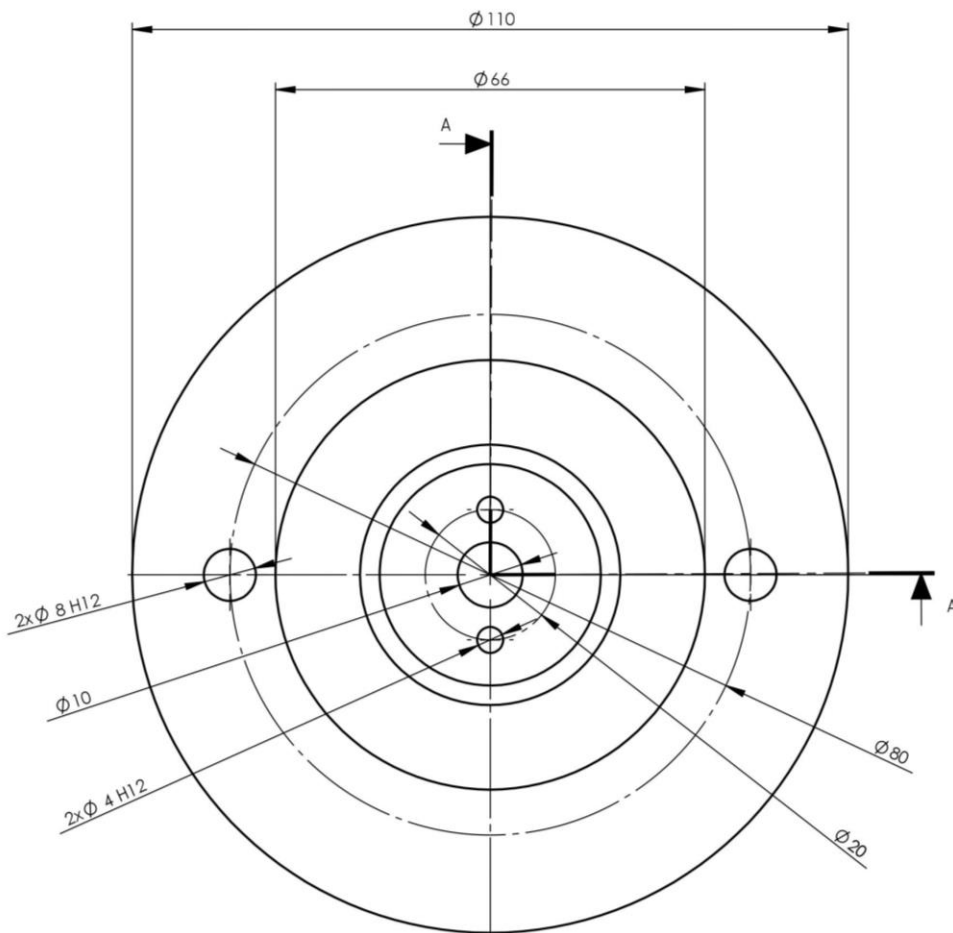
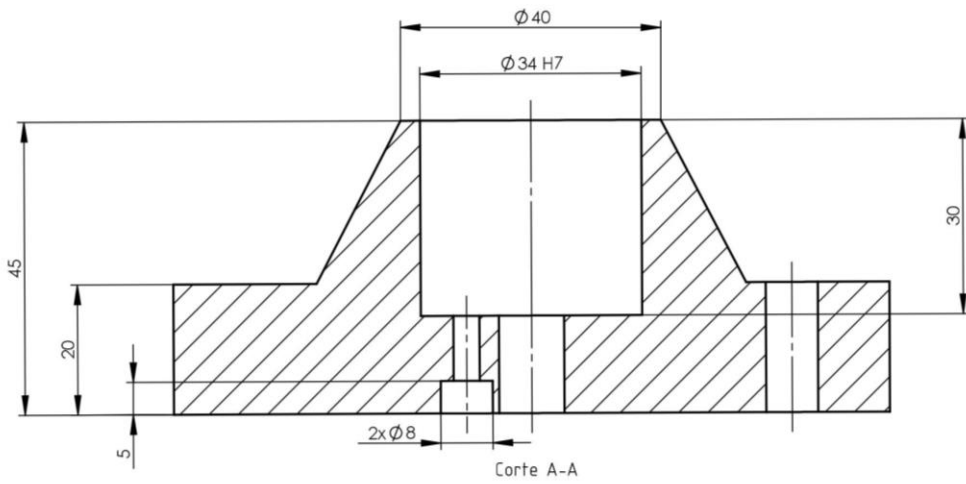
Anexo A – Desenhos técnicos da ferramenta de compressão




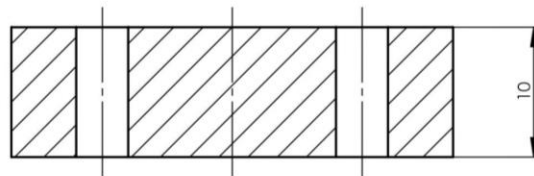
Nº	Designação	Qde	Norma Des. Nº	Material	Obs.
1	Bloco cónico	1	1		
2	Disco central	1	2		
3	ISO 4762 M8 x 30 - 30N	2	ISO 4762		
4	ISO 4762 M4 x 30 - 20N	2	ISO 4762		
5	Disco superior furado	1	3		

	Escala	Rúbrica	Data
	1:1	Desenhou	17/09/2019
	Material:	Verificou	
	Tolerância Geral:	Projectou	
Acabamentos:	Fabricou		
Notas:			

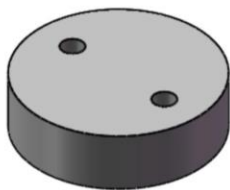
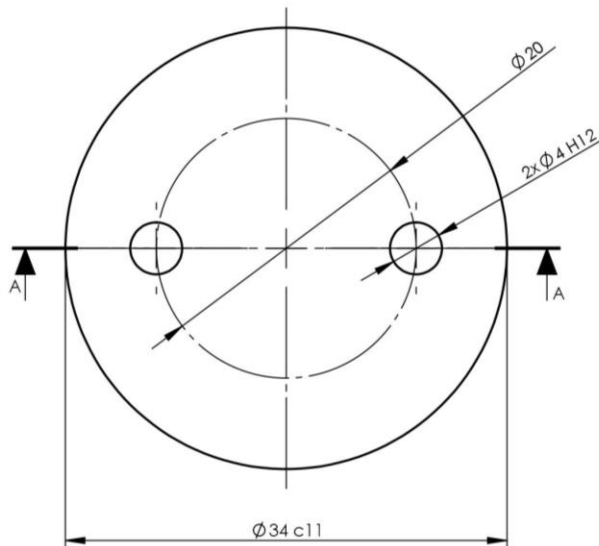
Curso: MEMec				
Nome: Pedro Leonardo				
Ferramenta de compressão				
Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	Revisto:
A4	DC 1	1		



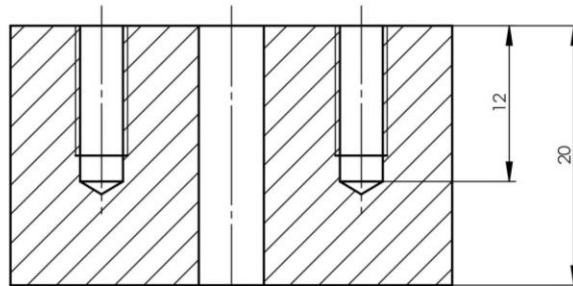
	Escala 1:1	Rúbrica _____	Data 17/09/2019	 Curso: MEMec Nome: Pedro Leonardo			
	Material: _____	Desenhou _____	Verificou _____				
	Tolerância Geral: _____	Projectou _____	Fabricou _____				
	Acabamentos: _____	Notas: _____					
Bloco c�nico			Folha A4	Desenho n.� 1	Folha 1	Peso: _____	Revisto: _____



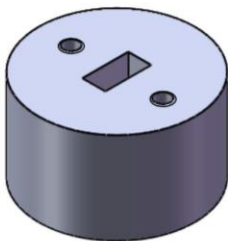
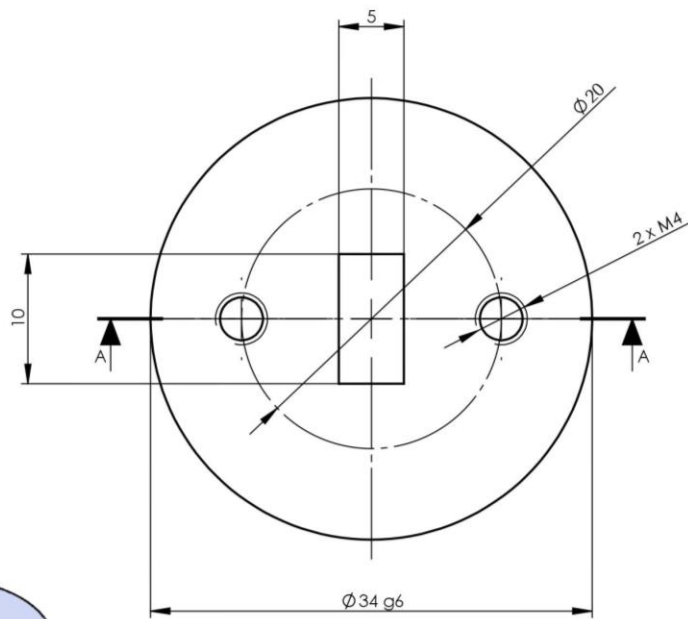
Corte A-A



	Escala 2:1	Rúbrica _____	Data 17/09/2019	Curso: MEMec Nome: Pedro Leonardo	
	Material: _____	Desenhou _____	Verificou _____		
Tolerância Geral: _____	Notas: _____			Disco central	
Acabamentos: _____	Folha A4	Desenho n.º 2	Folha 1		



Corte A-A



	Escala	Rúbrica	Data	Curso: MEMec Nome: Pedro Leonardo				
	2:1	Desenhou	17/09/2019					Disco superior furado
Material:	Verificou			Folha	Desenho n.º	Folha	Peso:	
Tolerância Geral:	Projectou			A4	3	1		
Acabamentos:	Fabricou			Notas: Furo retangular centrado				

