

# **CARACTERIZAÇÃO DOS LIMITES DE ENFORMABILIDADE PARA CHAPA METÁLICA DE COBRE**

**Joana Margarida Esturrado Correia**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

Orientador: Professora Maria Beatriz Cipriano de Jesus Silva

## **Júri**

Presidente: Professor Manuel dos Santos Oliveira Baptista  
Orientador: Professora Maria Beatriz Cipriano de Jesus Silva  
Vogais: Professor Paulo António Firme Martins  
Professor Ivo Manuel Ferreira de Bragança

**Novembro de 2016**



## Resumo

O elevado ritmo de produção dos mercados actuais requer processos de enformação eficientes resultando em produtos de elevada qualidade, que se consigam obter com menores custos em curtos períodos de tempo. Deste modo, o conhecimento das propriedades mecânicas e dos limites de enformabilidade à estrição e à fractura tornam-se essenciais na avaliação das capacidades dos materiais relativamente a estes novos processos. O presente trabalho tem como objectivos principais a caracterização mecânica do cobre e dos seus limites de enformabilidade à estrição (Curva Limite de Enformabilidade – CLE) e à fractura (Curva Limite de Fractura – CLF e Curva Limite de Fractura ao Corte – CLFC).

A caracterização mecânica do cobre será realizada partindo de ensaios de tracção uniaxial e ensaios *Bulge*, seguidamente são apresentados os resultados da tenacidade à fractura obtidos a partir de ensaios de tracção a provetes de duplo entalhe, ensaios de corte e ensaios a provetes de duplo entalhe desalinado. Foram ainda realizados ensaios *Nakajima* para caracterizar os limites de enformabilidade. Para validar os ensaios de estampagem incremental na caracterização dos limites de enformabilidade, foram comparados os resultados obtidos pelos processos convencionais de enformabilidade com os provenientes das três geometrias produzidas por estampagem incremental.

Nesta tese é apresentada uma caracterização mecânica do cobre bem como uma sugestão para os seus limites de enformabilidade à estrição, CLE, e à fractura, CLF e CLFC, confirmando a validade das geometrias obtidas através da estampagem incremental na caracterização destes. Foi ainda possível obter a tenacidade à fractura do material nos modos I e II.

**Palavras-chave:** Cobre, Enformabilidade, Estrição, Fractura, Modos de Fractura, Estampagem Incremental

## **Abstract**

The commanding rhythm of production of the current industry requires efficient forming technologies with the capability to produce high quality products with lower costs at higher velocities. Knowledge of the mechanical properties and formability limits of necking and fracture became, thus, essential to evaluate the capabilities of the material regarding these new forming processes. The present work aims to characterize copper mechanically and determine the Forming Limit Curve (FLC), the Fracture Forming Limit Line (FFL) and in-plane Shear Forming Limit Line (SFFL) for the material.

The mechanical characterization of copper will be achieved by means of tensile and bulge test, subsequently the results for fracture toughness will be presented resulting from double notched, staggered and shear specimens tested under tensile strength. In order to determine copper formability nakajima test were also performed. The results obtained from conventional tests were then compared with the results obtained from three SPIF geometries, with the intent of validating the aptitude of the last ones in characterizing the formability limits.

This work shows copper mechanical characterization and presents the results obtained by means of conventional test and reveals a comparison and conformity with the results obtained by means of SPIF processes.

**Keywords:** Copper, Formability, Forming, Fracture, Fracture odes, Single point incremental forming (SPIF)

# Agradecimentos

Desejo apresentar os meus agradecimentos a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização da presente dissertação.

À professora Beatriz Silva, um agradecimento especial pela oportunidade, constante motivação e disponibilidade, bem como pela sempre presente e preciosa orientação e também pelos conhecimentos transmitidos que tornaram possível a realização desta dissertação.

Ao Kishore Jawale por todo o apoio, disponibilidade e conhecimentos transmitidos no decurso desta tese.

Ao senhor Carlos Farinha e ao João Magrinho pela ajuda e disponibilidade.

À área Científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial do Instituto Superior Técnico pelos meios concedidos que tornaram possível a realização desta dissertação.

Ao Diogo Ruivo por me motivar para trabalhar e à Rita Viegas por me ajudar a tirar do trabalho quando era necessário e mais do que isso pela amizade, apoio e carinho que sempre me mostraram.

Às minhas colegas de casa, Cláudia, Maria e Márcia que sempre me apoiaram e se mostraram disponíveis para me ajudar e para ouvir os desabafos.

Às amigas de Évora, Filipa, Cármen e Inês que sempre me acolheram e motivaram ao longo de todo este percurso.

A todos amigos e colegas, pelo companheirismo, espírito de entreatajuda, conselhos e momentos que me proporcionaram.

Por último, à família, aos meus pais, João e Maria, à minha irmã, Rita e ao meu Avô, pelo apoio incondicional em todos os momentos, por tudo o que fizeram por mim e tudo aquilo que me permitiram fazer.

# Índice

<b>Resumo</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ii</b>
<b>Agradecimentos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abreviaturas</b> .....	<b>ix</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>x</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Estado da Arte</b> .....	<b>3</b>
2.1. Cobre .....	3
2.2. Limites de Enformabilidade.....	4
2.2.1. Outros Limites .....	9
2.3. Determinação dos Limites de Enformabilidade.....	10
2.3.1. Ensaios Convencionais .....	10
2.3.2. Estampagem Incremental .....	16
2.4. Tenacidade à Fractura .....	20
<b>3. Trabalho Experimental</b> .....	<b>22</b>
3.1. Ensaios para a caracterização mecânica da enformabilidade .....	22
3.1.1. Ensaio de Tracção .....	22
3.1.2. Ensaio de Provete de Duplo Entalhe.....	24
3.1.3. Ensaio de Provete de Duplo Entalhe Desalinados .....	24
3.1.4. Ensaio de Corte.....	25
3.1.5. Ensaio Bulge .....	26
3.1.6. Ensaio Nakajima .....	28
3.2. Ensaio de Estampagem Incremental – SPIF .....	29
3.3. Marcação das Grelhas.....	30
3.4. Métodos de Medição.....	32

3.4.1. Medição das Extensões Principais.....	33
3.4.2. Medição das Larguras e da Espessura da Fractura.....	33
<b>4. Resultados e Discussão .....</b>	<b>35</b>
4.1. Propriedades mecânicas dos materiais .....	35
4.2. Ensaio Bulge.....	37
4.3. Tenacidade à Fractura modo I.....	38
4.4. Tenacidade à fractura modo II .....	41
4.5. Tenacidade à fractura modo misto.....	43
4.6. Ensaio Nakajima .....	45
4.7. Ensaio Estampagem Incremental .....	46
4.8. Limites de Enformabilidade.....	49
<b>5. Conclusões e Perspectivas de Trabalho Futuro.....</b>	<b>51</b>
<b>6. Referências .....</b>	<b>52</b>

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Ensaios de enformabilidade baseados nos diagramas limite de enformabilidade (Martins et al., 2014b). .....	12
Tabela 2.2 – Representação esquemática de alguns tipos de deformação .....	14
Tabela 3.1 - Dimensões de referência dos provetes utilizados no ensaio de tração uniaxial segundo a norma ASTM <i>standard</i> E8/E8M – 09 (2010) e respectivo plano de ensaios .....	23
Tabela 3.2 - Dimensões de referência dos provetes de duplo entalhe e plano de ensaios.....	24
Tabela 3.3 - Dimensões de referência dos provetes de duplo entalhe desalinhados e plano de ensaios.....	25
Tabela 3.4 - Dimensões de referência dos provetes utilizados nos ensaios de corte e plano de ensaios.....	25
Tabela 3.5 - Dimensões de referência dos provetes utilizados nos ensaios de bulge (Cristino e Martins, 2013) e plano de ensaios. ....	27
Tabela 3.6 - Dimensões de referência dos provetes utilizados nos ensaios Nakajima e plano de ensaios.....	28
Tabela 3.7 - Dimensões de referência dos provetes utilizados nos ensaios de SPIF e plano de ensaios.....	30
Tabela 3.8 – Grelhas de círculos utilizadas para a marcação electroquímica e ensaios onde estas foram necessárias. ....	32
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do cobre .....	36
Tabela 4.2 – Valores obtidos para a tenacidade à fractura. ....	40
Tabela 4.3 – Valores obtidos para a tenacidade à fractura modo II .....	43
Tabela 4.4 - Valores obtidos para a tenacidade à fractura modo I/II .....	45



## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Esquema dos limites de enformabilidade Silva et al. (2014) .....	4
Figura 2.2 - Modos de fractura: (a) modo I, (b) modo II e (c) modo III (Martins et al., 2014).....	5
Figura 2.3 - Resultados obtidos por Isik et al. (2014) .....	7
Figura 2.4 - Limites de enformabilidade propostos por Soeiro et al. (2014).....	8
Figura 2.5 – Resultados obtidos por Madeira (2014) .....	9
Figura 2.6 - Loci da fractura proposto por Li et al. (2010).....	10
Figura 2.7 – Limites de Fractura propostos por Martins et al. (2014) a) Curva Limite de Fractura b) Curva Limite de fractura ao corte. ....	10
Figura 2.8 - a) Representação dos diferentes modos de deformação no plano das tensões principais b) Representação dos diferentes modos de deformação no plano das extensões principais no plano da chapa.....	11
Figura 2.9- Curva limite de estampagem (CLE) e de fratura (CLF) e representação dos estados de deformação característicos de alguns ensaios experimentais (Rodrigues e Martins, 2010).....	13
Figura 2.10- Processo para a determinação da CLE a) medição da grelha de referência, b) elipse típica de um círculo da grelha de referência e c) procedimento de interpolação (Martins et al., 2014b). ....	15
Figura 2.11 - Procedimento para a obtenção das extensões ao longo da a) espessura, b) largura num ensaio de tração e c) largura de um ensaio Bulge (Martins et al., 2014b). ....	15
Figura 2.12 – Representação Esquemática do Processo de Estampagem Incremental .....	16
Figura 2.13 – Ângulo máximo de estampagem e função de triaxialidade em função do diâmetro da ferramenta para geometrias cónicas e piramidais.....	18
Figura 2.14 - Diagrama com plano das extensões principais obtidas a partir do ensaio SPIF, com diferentes raios de ferramenta (Madeira et al., 2014).....	19
Figura 2.15 - a) Representação esquemática do provete de duplo entalhe, b) Representação esquemática da força em função do deslocamento para os diferentes comprimentos de ligamento e c) Determinação da tenacidade à fratura, $R$ , através da extrapolação da quantidade de energia por unidade de área (Madeira et al., 2014).....	20
Figura 2.16 .....	20
Figura 3.1 - a) Representação esquemática do aparato experimental e b) fotografia mostrando um detalhe de um provete de tração montado entre as amarras de uma máquina INSTRON modelo 4507 (Cristino e Martins, 2013) .....	23
Figura 3.2 - Fotografia da máquina universal de ensaios de expansão biaxial (Cristino e Martins, 2013) .....	26
Figura 3.3 – Equipamento INEGI Hydraulic Bulge Test Machine utilizado na FEUP .....	28
Figura 3.4 – a)Centro de Maquinagem Flexi- Optima 5 estrutura utilizada b) Representação esquemática do aparato experimental .....	29
Figura 3.6 – Fotografia do equipamento utilizado para a marcação electroquímica .....	31
Figura 3.7 – Esquema do método utilizado para a medição das extensões principais (Cristino e Martins, 2013) .....	33

Figura 3.8 – Equipamento do microscópio, PC com programa de aquisição de imagens e microscópio óptico com câmara digital, b) Microscópio utilizado na medição da largura, após fractura. ....	34
Figura 4.1 - Exemplo de Curva Tensão vs Extensão obtida de um ensaio de tracção .....	35
Figura 4.2 – Geometrias ensaiadas no ensaio de expansão biaxial .....	37
Figura 4.3 – Detalhe da zona de fractura nos ensaio bulge circular.....	37
Figura 4.4 – Curvas força vs deslocamento para o cobre com direcção de laminagem de 0° e 90° ....	38
Figura 4.5 – Provetes de duplo ensaio ensaiados a) a = 5 mm, b) a = 10 mm, c) a = 15 mm, d) a = 20 mm, e) a = 25mm .....	39
Figura 4.6 - Regressão linear que determina o valor da tenacidade à fractura para o cobre 0° DL e 90° DL.....	40
Figura 4.7 - Curvas força vs deslocamento para os provetes de corte alinhados com a direcção de laminagem de 0° e 90° .....	41
Figura 4.8 – Provetes de corte Ensaiados a)Fractura na zona esperada, b) e c) duas variações dos defeitos observados na fractura dos provetes de corte.....	42
Figura 4.9 – Regressão linear que determina o valor da tenacidade à fractura para o modo II 0° DL e 90° DL .....	42
Figura 4.10 - Curvas força vs deslocamento para os provetes de corte alinhados com a direcção de laminagem de 0° e 90° dos provetes de duplo entalhe desalinhado .....	43
Figura 4.11 - Provetes de duplo entalhe desalinhado ensaiados a) a = 5 mm, b) a = 15 mm, c) a = 20 mm .....	44
Figura 4.12 - Regressão linear que determina o valor da tenacidade à fractura .....	45
Figura 4.13 - Provetes nakajima após os ensaios.....	46
Figura 4.14 – Detalhe da zona de fractura provete Nakajima .....	46
Figura 4.15 – Geometria cónica produzida.....	47
Figura 4.16 – Geometria piramidal produzida .....	47
Figura 4.17 – Geometria de quarto lóbulos .....	47
Figura 4.18 - Detalhe da zona de raio de concordância da geometria de quatro lóbulos.....	48
Figura 4.19 -Trajectórias de deformação do ensaio SPIF para as três geometrias e limites de enformabilidade obtidos .....	48
Figura 4.20 – Diagrama com limites a CLE, a CLF e a CLFC obtidas para o cobre .....	49

## Abreviaturas

CLE	Curva Limite de Estampagem
CLF	Curva Limite de Fractura
CLFC	Curva Limite de Fractura ao Corte
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DL	Direcção de Laminagem
DNTT	Double Notch Tensile Test
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FFL	Fracture Forming Limit Line
FLC	Forming Limit Curve
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik
IST	Instituto Superior Técnico
MGC	Measuring Amplifier System
PC	Personal Computer
SFFL	In-plane Shear Fracture Forming Limit Line
SPIF	Single Point Incremental Forming

# Nomenclatura

<b>Símbolos latinos</b>	<b>Definição</b>
$a$	Dimensão do eixo maior da elipse
$a$	Comprimento do ligamento
$A$	Alongamento após fractura
$b$	Comprimento do eixo menor da elipse
$c$	Comprimento do ligamento
$D$	Diâmetro da Geometria
$d$	Diâmetro inicial do círculo da grelha
$E$	Módulo de elasticidade
$F$	Força
$h$	Espessura do provete
$h_0$	Espessura inicial do provete
$l_0$	Comprimento inicial do provete
$R$	Raio da Geometria
$R$	Valor da Tenacidade
$r$	Coefficiente de anisotropia
$r_v$	Raio de concordância do vale
$\bar{r}$	Coefficiente de anisotropia normal
$r_{tool}$	Raio da ferramenta
$t$	Espessura da chapa
$t_{red}$	Máxima redução de espessura para cada secção meridional
$w$	Largura do provete de chapa
$w_0$	Largura inicial do provete
$W_e$	Trabalho essencial de fractura
$w_e$	Trabalho essencial de fractura específico
$W_f$	Trabalho total de fractura
$w_f$	Trabalho total de fractura específico
$W_p$	Trabalho não essencial de fractura
$w_p$	Trabalho não essencial de fratura específico

<b>Símbolos gregos</b>	<b>Definição</b>
$\alpha$	Trajectória de carregamento
$\beta$	Trajectória de deformação
$\Delta r$	Anisotropia planar
$\varepsilon$	Extensão verdadeira
$\varepsilon_1$	Extensão principal máxima no plano da chapa

$\varepsilon_2$	Extensão principal mínima no plano da chapa
$\varepsilon_3$	Extensão principal na direcção da espessura
$d\bar{\varepsilon}$	Incremento de extensão efectiva
$\rho$	Densidade
$\sigma$	Tensão
$\sigma_1$	Tensão na direcção principal 1
$\sigma_2$	Tensão na direcção principal 2
$\sigma_3$	Tensão na direcção principal 3
$\sigma_e$	Tensão de cedência

# 1. Introdução

A utilização do cobre na criação de peças para as mais variadas indústrias como a aeroespacial, automóvel, civil e também para a produção de utensílios de cozinha ou como peças de decoração únicas, tem revelado a necessidade da caracterização mecânica experimental deste material. De facto, a falta de informação disponível na literatura, conduz a maiores desperdícios de tempo, de matérias-primas e económicos, tornando essencial o estudo de processos de enformação mais eficientes e adequados para a utilização do cobre.

Os elevados custos associados à produção de pequenos lotes, protótipos e peças customizadas de geometrias simples ou complexas impõem constrangimentos a nível financeiro e de satisfação das necessidades do mercado actual, conduzindo, por isso, a uma necessidade de desenvolvimento e investigação de processos de deformação plástica incremental, e em particular a estampagem incremental de chapa metálica. A natureza da deformação resultante da estampagem incremental de chapa (deformação localizada) permite alcançar maiores deformações do que as conseguidas através de processos de deformação de chapa convencionais, garantindo, deste modo, uma melhoria ao nível da enformabilidade do material por ser possível, sob determinadas condições, não apresentar efeitos de estricção localizada (Silva et al., 2011).

O termo enformabilidade caracteriza o nível máximo de deformação que um material pode atingir num processo tecnológico de deformação plástica, sem que ocorra estricção ou fractura (Rodrigues e Martins, 2011). Assim sendo, a enformabilidade pode ser caracterizada pelos limites à estricção e à fractura. O limite de enformabilidade à estricção é caracterizado pela curva limite de enformabilidade (CLE) e o limite de enformabilidade à fractura é definido através da curva limite de fractura (CLF) e da curva limite de fractura ao corte (CLFC).

A caracterização mecânica de um material e das suas curvas de enformabilidade revela-se de extrema importância na produção de peças metálicas, na medida em que torna muito mais expedito o processo de deformação, diminuindo custos de tempo e matérias-primas. Deste modo, o presente trabalho tem como objectivo caracterizar o cobre mecanicamente e os seus limites de enformabilidade. Além disto, o trabalho visa ainda validar a capacidade de geometrias produzidas por estampagem incremental na determinação dos limites de enformabilidade à fractura para o cobre.

Neste trabalho serão apresentados os ensaios convencionais utilizados na caracterização mecânica do material, ensaios de tracção uniaxial e ensaios bulge, e ainda os necessários à caracterização dos limites de enformabilidade que além deste incluem ensaios de tenacidade à fractura, ensaios de corte e ensaios nakajima. Para a avaliação dos processos de estampagem incremental foram produzidas três geometrias distintas, geometria cónica, piramidal e de quatro lóbulos que visam caracterizar ambos os limites de enformabilidade à fractura. Serão também expostos os métodos de medição utilizados em cada um dos processos e o tratamento de dados.

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, sendo o capítulo 1 esta introdução.

No capítulo 2 – Estado da arte – encontra-se uma breve descrição do cobre, seguida de secção sobre a enformabilidade, na qual são apresentados os seus limites e, posteriormente, o modo como cada um destes é determinado.

No capítulo 3 – Trabalho Experimental - são descritos os ensaios realizados para a caracterização mecânica e para a caracterização dos limites de enformabilidade, onde são apresentados os parâmetros utilizados, as máquinas e os métodos de obtenção de dados. Este capítulo termina com a descrição dos métodos e equipamentos de medição utilizados para a obtenção das extensões principais.

No capítulo 4 – Resultados e Discussão – em primeiro lugar são expostos e discutidos os resultados obtidos das propriedades mecânicas do cobre. Seguidamente são apresentados os valores obtidos para a tenacidade à fractura, a partir dos provetes de duplo entalhe. Por últimos são apresentados os resultados para os limites de enformabilidade obtidos através dos ensaios de tracção uniaxial, ensaios bulge, nakajima, ensaios de corte e também ensaios de estampagem incremental.

Por último, no capítulo 5 – Conclusões e Perspectivas de Trabalho Futuro – são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado e apontadas sugestões de possíveis estudos a realizar em trabalhos futuros.

## 2. Estado da Arte

Neste capítulo é apresentado o cobre, descrevendo as suas principais características e aplicações. De seguida será realizada uma abordagem ao estudo da enformabilidade, com ênfase na análise dos seus limites (Curva limite de estampagem - CLE, curva limite de fractura - CLF e curva limite de fractura ao corte - CLFC) e determinação destes, da mecânica da fractura e da deformação plástica. Posteriormente serão indicados os métodos para a determinação destes limites em ensaios de ensaios convencionais, descrevendo alguns dos principais parâmetros que influenciam a enformabilidade e em estampagem incremental, expondo as deformações típicas sofridas pelos materiais nestes.

### 2.1. Cobre

O cobre, material em estudo na presente dissertação, apresenta-se como um dos metais não ferrosos mais importantes devido às suas muito generalizadas aplicações e boas características mecânicas. Este metal (e suas ligas) tem como principais características a elevada resistência mecânica e a elevada ductilidade, propriedades, estas, que o tornam um candidato adequado a operações de enformabilidade.

O cobre apresenta ainda uma elevada densidade, elevada maleabilidade e maquinabilidade, apresentando-se como um material macio. A sua boa condutibilidade eléctrica justifica a elevada aplicação na produção de cabos eléctricos, visto que o cobre apresenta um valor de aquisição mais baixo do que outros metais, como por exemplo a prata. Quanto à sua condutibilidade térmica este material é também conhecido pela sua boa capacidade de condução de calor. Além disto, o cobre é um metal que apresenta uma estrutura cúbica de faces centradas tal como o ouro e prata, sendo também, por isto muito interessante a sua caracterização mecânica, pois é um pouco metais com esta estrutura, não caracterizado.

O cobre é um metal com uma vida útil longa, devida à sua elevada resistência corrosão, mesmo em atmosferas agressivas, e à sua boa resistência às variações de temperatura, sendo por isso utilizado em aplicações de arquitectura e construção civil (canalização, calhas, condutores, juntas de dilatação de edifícios).

Este é um material também muito utilizado na produção de objectos de decoração e utensílios (centros de mesa, taças, panelas) e até mesmo nas áreas de bijuteria e joalheria devido à sua cor atractiva e distinta de outros metais comuns. Este é um material económico, (apesar do seu valor ser superior ao dos alumínio continua a ser inferior a outros como, por exemplo, o ouro), consumido na sua maioria em forma de arame e chapa, sendo que no presente estudo, a forma escolhida foi a de chapa com uma espessura de 0.8 mm.



## 2.2. Limites de Enformabilidade

A utilização do termo enformabilidade tem, normalmente, como finalidade caracterizar o nível máximo de deformação que se pode alcançar durante um processo tecnológico de deformação plástica sem a ocorrência de macrobandas, estricção ou fissura (Rodrigues e Martins, 2010).

A determinação destes limites pode ser realizada à estrição e à fractura e permite quantificar a enformabilidade de chapas. A sua representação gráfica no plano das extensões principais é denominada por diagrama limite de enformabilidade. Neste diagrama é possível encontrar a curva limite de estampagem (CLE), uma curva em forma de V, que define a deformação admissível a partir da qual ocorre o fenómeno de estrição localizada, a curva limite de fractura (CLF) e a curva limite de fractura ao corte (CLFC), curvas estas que estipulam a deformação plástica a partir da qual a surge fractura na chapa.

Keeler (1965) publicou a sua investigação na análise de instabilidade plástica e rotura em provetes deformados por expansão a partir de um punção, estudando a distribuição de extensões. O autor tentou identificar a ocorrência de rotura sem sinais exteriores deste fenómeno estar a ocorrer, em estampagens industriais. Este trabalho consistiu na primeira publicação sobre a CLE, mas debruçando-se apenas sobre o domínio da deformação por expansão. Goodwin (1968), aplicando os conceitos do autor anteriormente referido à análise de deformações por retracção, com o intuito de prever a ocorrência de fractura na parede cilíndrica ou na região de canto do cunho dos provetes, verificou a existência de uma tendência destes valores de extensão, no segundo quadrante do diagrama de extensões alargando o conceito ao domínio da deformação por retracção. Deste modo, foi traçada a primeira CLE completa abrangendo os domínios de expansão e compressão (Figura 2.1 a) e b)).

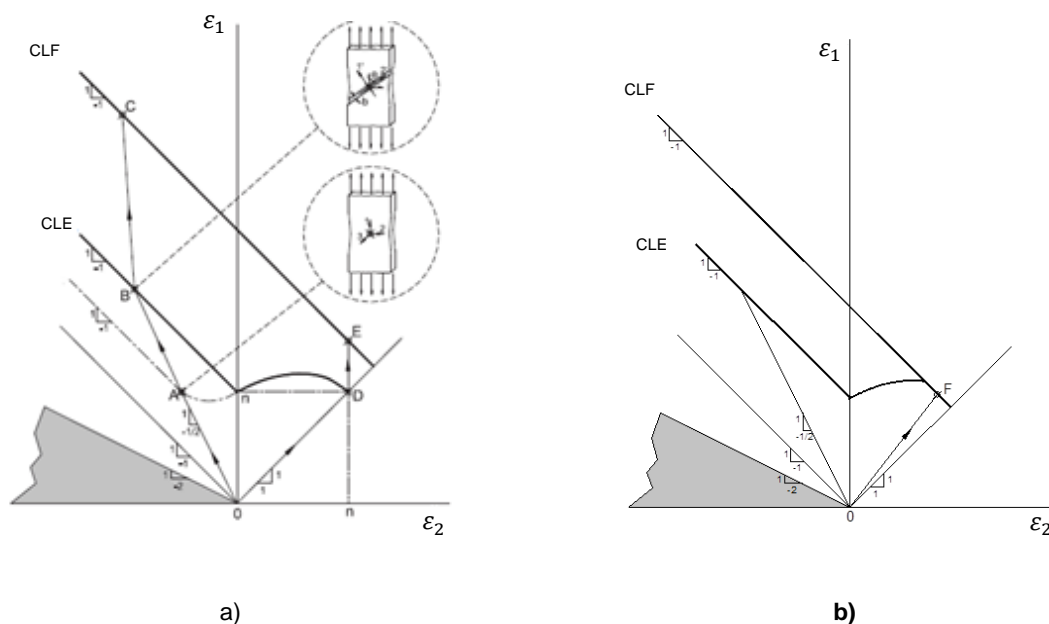


Figura 2.1 - Esquema dos limites de enformabilidade Silva et al. (2014)

A CLE pode ser vista como o limite, a partir do qual a extensão se tornará plana ( $\varepsilon_2 = 0$ ) (Atkins,1985). De facto, com a observação dos valores das extensões, é possível compreender a rápida mudança de direcção do rácio de extensões, após atravessar a curva limite de estampagem (Figura 2.2a)), as trajectórias de deformação OABC (tracção uniaxial) e ODE (expansão biaxial), são exemplo disso.

A CLE é conhecida por variar com as características do material ( como por exemplo o encruamento, a anisotropia, as trajectórias de deformação, a espessura da chapa, entre outras), tornando-a, por isto, uma fonte de informação pouco fiável. De facto, a recorrência a esta curva tem sido abandonada, por três grandes razões, sendo elas:

- As diretrizes utilizadas no design de chapa metálica são, na sua maioria, baseadas na redução de espessura crítica e não na CLE (Isik et al., 2014);

- Apesar da larga gama de utilização da CLE, este método pode não ser o mais apropriado na determinação do início da estrição devido às dificuldades na realização de medições, sendo frequente a existência de CLE's diferente, para diferentes fontes;

- A compreensão de que os programas de elementos finitos que recorrem a modelos de dano dúctil para prever o aparecimento de fractura, requerem dados que provém de teorias concordantes com a relação entre os limites de fractura, dano dúctil e a tenacidade à fractura (Martins et al. 2014).

Deste modo, é cada vez mais comum, recorrer à informação disponibilizada pela fractura.

A mecânica da fractura reconhece três modos de abertura de fissuras (Figura 2.2), que são eles: modo I, onde a abertura da fissura é devido a tensões normais de tracção, modo II, devido a tensões de corte no plano e modo III, devido a tensões de corte na direcção da espessura.

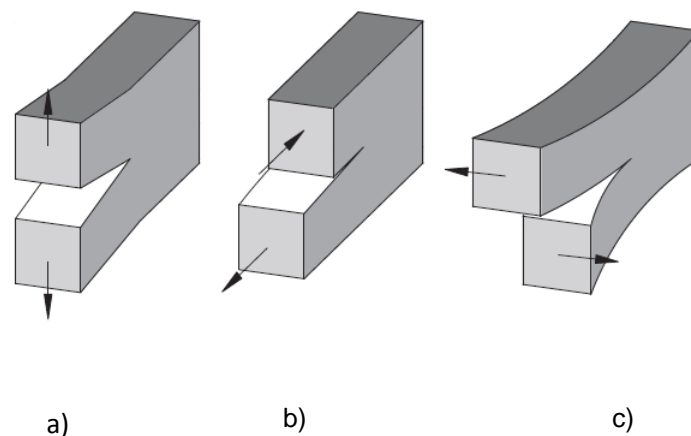


Figura 2.2 - Modos de fractura: (a) modo I, (b) modo II e (c) modo III (Martins et al., 2014).

Embury e Duncan (1981) verificaram, através de ensaios de tracção biaxial, a existência de fractura sem ocorrência de estricção, conduzindo assim a uma necessidade de definir a CLF, visto a CLE não permitir a definição da deformação que seria possível alcançar nestas condições. Isto pode ser observado na figura 2.1b), analisando a trajectória de deformação OF.

A relação entre a fractura com a existência (ou não) de estricção requer então a compreensão e definição de ambos os limites CLE e CLF. Atkins (1996) relacionou a CLF com a redução de espessura crítica e o critério de fractura dúctil de McClintock (1968), propondo a CLF como uma recta de declive “-1”. Muscat-Fenech et al. (1996) propuseram a relação deste limite de enformabilidade com a tenacidade à fractura em modo I, mostrando que a curva limite de fractura tem a si associada a fractura resultante de tensões de tracção, eliminando a influência de tensões de corte na direcção da espessura da chapa.

Silva et al. (2011), concluíram que a CLF é essencial para o estudo e controlo da enformabilidade dos processos de deformação plástica incremental de chapa, comprovando os resultados anteriores propostos por Silva et al. (2008) que propunham que a fractura com supressão de estricção é governada pela curva limite de fractura. O desenvolvimento dos processos de deformação plástica incremental de chapa metálica permitiu o desenvolvimento de resultados conclusivos. Com base nestes, Silva et al. (2011) comprovaram a possibilidade de existência de fractura, sem aparecimento prévio de estricção, tendo identificado as condições favoráveis para tal. Deste modo, é possível, em estampagem incremental atingir-se limites de enformabilidade superiores aos obtidos através de processos convencionais de deformação plástica de chapa (Madeira et al. 2014).

A curva limite de fractura ao corte (CLFC) foi proposta por Isik et al. (2014), complementando o trabalho de Atkins (1996) sobre a CLF (figura 2.3). Este limite define a deformação plástica a partir do qual ocorre fractura imposta pela distorção crítica que resulta da actuação de tensões de corte no plano. Isik et al. (2014) basearam a sua conclusão no trabalho experimental com uma liga de alumínio AA1050-H111 e num estudo analítico com a intenção de compreender as circunstâncias sob as quais ocorre a fractura, tendo em consideração o dano crítico e a deformação plástica. O trabalho experimental consistiu na realização de ensaios de corte e torção com provetes de chapa e posterior medição das extensões na fractura, de modo a que fosse possível definir a CLFC, constatando-se deste modo que a fractura que caracteriza a CLFC se deve a tensões de corte no plano (modo II da mecânica da fractura, figura 2.2b). O seu trabalho analítico propôs este limite como uma recta de declive “+1”, sendo assim perpendicular à CLF e demonstrou que é também numa recta, com a mesma inclinação, que é possível encontrar os valores do dano crítico devido a tensões de corte no plano, o que vai ao encontro da condição de distorção crítica no início da fractura. Assim sendo, é apenas necessária a realização de um tipo de ensaio experimental para a caracterização da curva limite de fractura ao corte, devido à condição de perpendicularidade desta com a CLF.

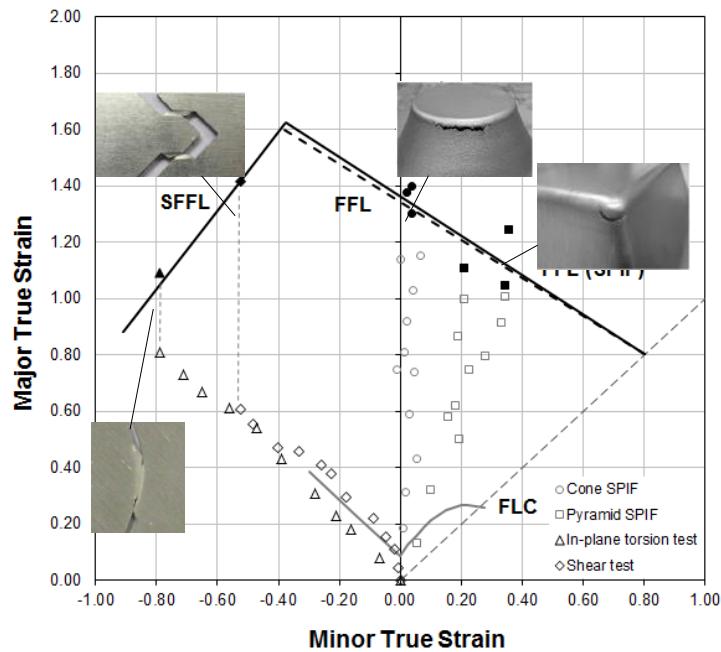


Figura 2.3 - Resultados obtidos por Isik et al. (2014)

Dos resultados publicados por Isik et al. (2014), é possível observar a semelhança entre a CLF definida a partir dos ensaios de estampagem incremental (linha preta contínua na figura 2.3) com um declive de “-0.70” e a CLF obtida a partir dos ensaios convencionais, com um declive de “-0.68” (linha preta a tracejado da figura 2.3).

Da análise dos resultados retira-se que a evolução das extensões da geometria cônica truncada se dá em condições de deformação plana e na geometria piramidal truncada esta evolução se dá tanto em condições de deformação plana (nos lados) como em condições de expansão biaxial (nos cantos). Os marcadores preenchidos indicam os pontos de fractura.

Relativamente aos ensaios realizados com o intuito de caracterizar a CLFC, observa-se que os provetes sujeitos ao teste de torção sofrem uma deformação devido a tensões de corte puro. No entanto os provetes utilizados para o ensaio de corte puro afastam-se um pouco destas condições, sendo possível verificar a existência localizada de uma redução de espessura. A CLFC obtida é caracterizada por equação com declive “1.39”, confirmando a teoria de perpendicularidade.

Embora, teoricamente, um ensaio fosse suficiente para a definição da curva limite de fractura ao corte, os autores optaram pela realização do dois testes, visto os declives experimentais de ambas as curvas não serem exactamente “-1” e “+1”. Quanto ao loci de fractura (designação dada ao conjunto formado pela CLF e CLFC) da figura 2.3, verifica-se que o ângulo formado por estes limites é de 91°, confirmando a perpendicularidade entre os limites.

Recentemente, Isik et al. (2014), Martins et al. (2014a) e Soeiro et al. (2014) propuseram uma nova visão dos limites de enformabilidade para os processos de deformação de chapa metálica por

estampagem incremental. Esta afirma que a deformação plástica e fractura em chapa resultam da competição entre a redução de espessura, resultante de tensões por tracção (modo I da mecânica da fractura) e a distorção crítica provocada por tensões de corte no plano da chapa (modo II) (ver figura 2.4). Esta conclusão tem por base um trabalho analítico e um trabalho experimental. O trabalho analítico baseou-se no desenvolvimento de um modelo teórico para determinar as tensões e deformações que se desenvolvem durante o processo de estampagem incremental de chapa metálica. O trabalho experimental compôs-se da realização de ensaios de estampagem incremental, dos quais resultaram fracturas devido a tensões de corte no plano. Assim sendo, os valores obtidos para as extensões principais foram aplicadas na determinação da CLF dos materiais estudados.

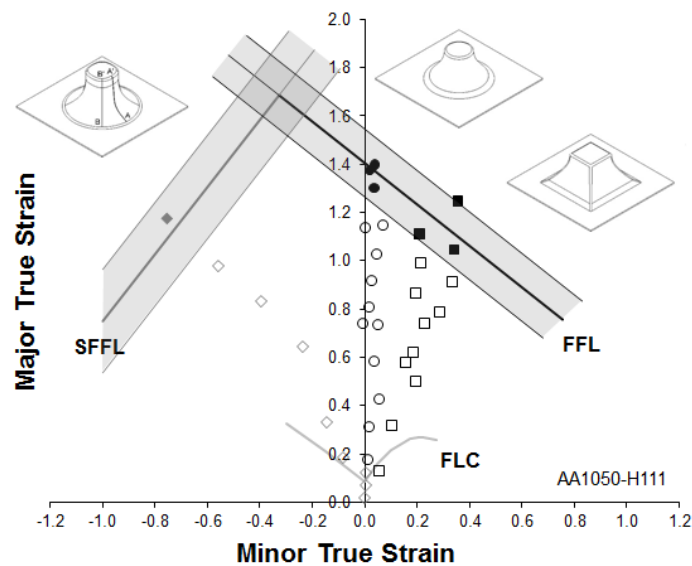


Figura 2.4 - Limites de enformabilidade propostos por Soeiro et al. (2014).

A relação entre a tenacidade à fractura e a curva limite de fractura foi inicialmente estabelecida por Muscat-Fenech et al. (1996) que relacionaram a CLF com a tenacidade à fractura presente no modo I da mecânica da fractura. Esta teoria foi recentemente comprovada por Madeira et al. (2014), que observaram que os valores de extensão obtidos nos provetes de duplo entalhe sujeitos a tracção se encontravam na CLF previamente determinada através de ensaios de deformação de chapa, independentes (figura 2.5).

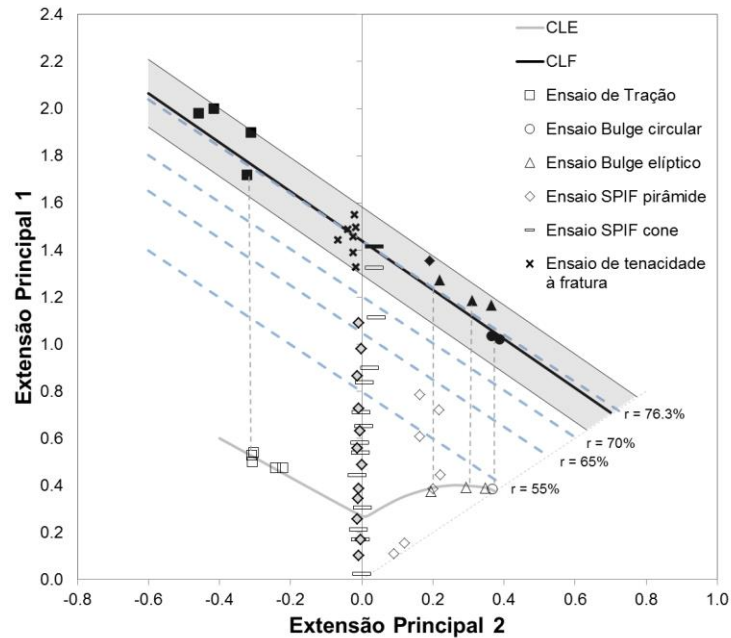


Figura 2.5 – Resultados obtidos por Madeira (2014)

### 2.2.1. Outros Limites

A definição dos limites de enformabilidade é um tema de estudo constante pela comunidade científica. A determinação de limites como a CLF e CLFC enquanto rectas com declives de “-1” e “+1” é algo posto em causa por alguns autores.

Li et al. (2010) apresentaram, de facto, estes limites com um comportamento assintótico (figura 2.6), quando baseado em resultados a partir de ensaios de deformação de chapa e massa. Este estudo tem por base uma equação de dano calculada a partir de, não as extensões do material e da triaxialidade de tensões mas também de um factor chamado de ângulo Lode que está relacionado com o terceiro invariante das tensões desviadoras e considera também que a fractura é um evento súbito que ocorre quando os estados de tensão e extensão atingem valores críticos em zonas do material ainda não deformadas.

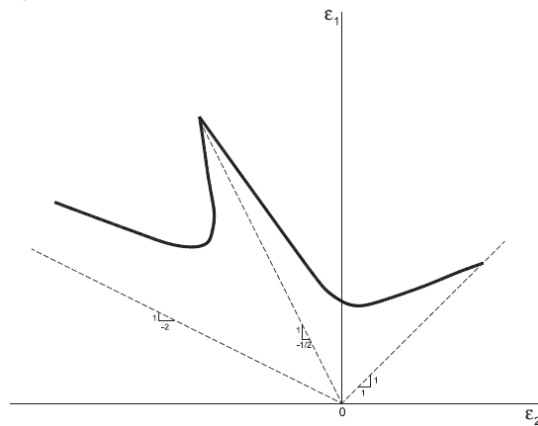


Figura 2.6 - Loci da fractura proposto por Li et al. (2010).

De facto, Martins et al. (2014) reconheciam a possibilidade deste limite apresentar um desvio na linearidade, desvio esse que poderia estar também presente na CLFC (figura 2.7).

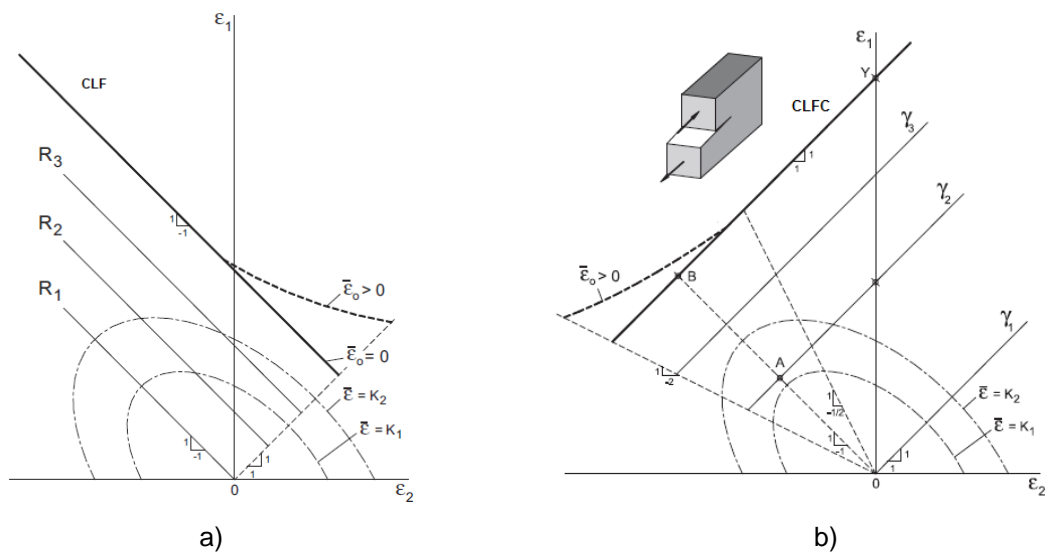


Figura 2.7 – Limites de Fractura propostos por Martins et al. (2014) a) Curva Limite de Fractura b) Curva Limite de fractura ao corte.

## 2.3. Determinação dos Limites de Enformabilidade

### 2.3.1. Ensaios Convencionais

O limites de enformabilidade (CLE, CLF e CLFC) podem também ser determinados a partir de ensaios ditos convencionais, concebidos de modo a obter os valores das extensões principais máxima,  $\epsilon_1$ , e mínima,  $\epsilon_2$ , no plano da chapa, no instante de rotura.

Considerando que  $\alpha$  corresponde à trajetória de carregamento e  $\beta$  à trajetória de deformação através das seguintes equações,

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}; \quad \beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} \quad (2.1; 2.2)$$

a figura 2.8 permite observar os diferentes modos de deformação característicos dos processos de enformação de chapa, no espaço das tensões (figura 2.8 a)) e extensões principais no plano da chapa (figura 2.8b)).

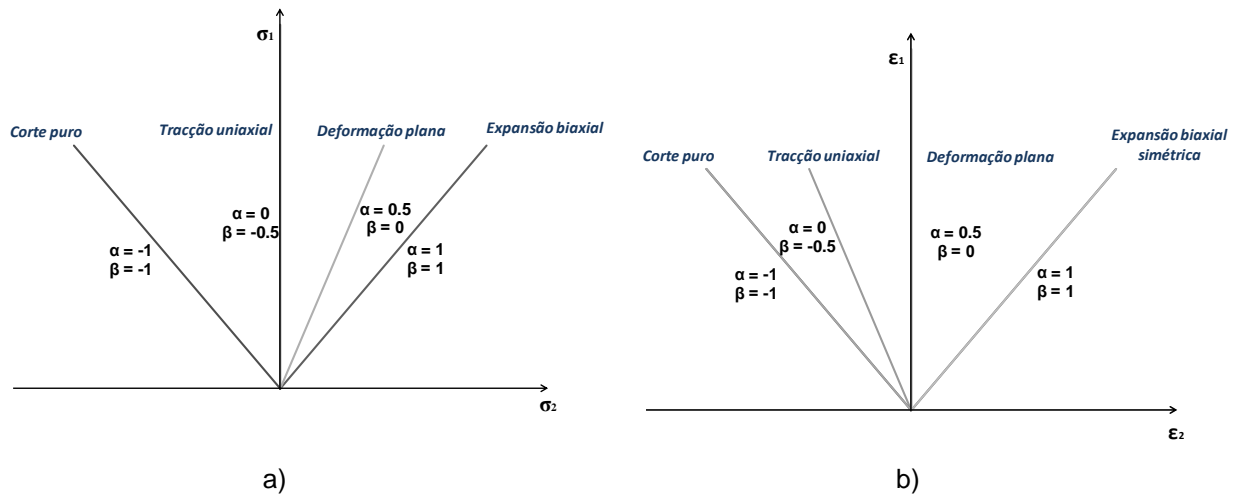
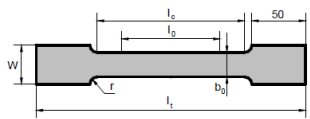
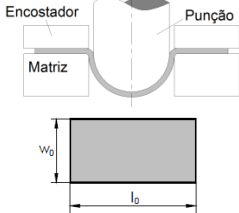
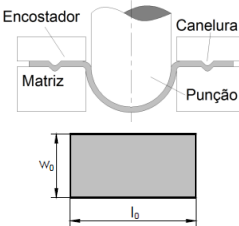
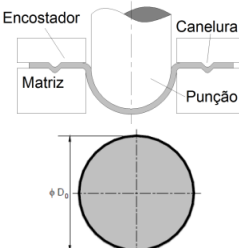
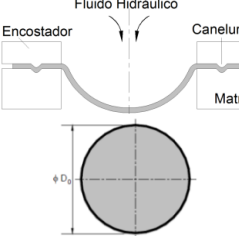
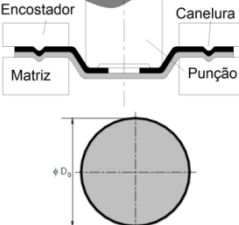


Figura 2.8 - a) Representação dos diferentes modos de deformação no plano das tensões principais b) Representação dos diferentes modos de deformação no plano das extensões principais no plano da chapa.

Na tabela 2.1 são apresentados os modos característicos de deformação de alguns ensaios convencionais, que podem ser classificados como uniaxial, deformação plana e biaxial, dependendo do modo de deformação, estados de extensão e tensão correspondentes a cada um dos ensaios. É também apresentada uma representação esquemática dos testes em questão.



Tabela 2.1- Ensaio de enformabilidade baseados nos diagramas limite de enformabilidade (Martins et al., 2014b).

Modo de deformação	Ensaio	Estado de extensão	Estado de tensão	Representação esquemática
Uniaxial	Tração	$\varepsilon_1 > 0$ $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 < 0$ $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{\varepsilon_1}{2}$	$\sigma_1 > 0$ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$	
Deformação plana (e a região de transição entre o modo de deformação uniaxial e deformação biaxial)	Nakajima	$ \varepsilon_1 > 0 $ $-\frac{\varepsilon_1}{2} < \varepsilon_2 < \varepsilon_1$ $\varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$	$\sigma_1 > 0$ $\sigma_1 > \sigma_2 > 0$ $\sigma_3 = 0$	
	Hecker (variante do ensaio Nakajima, utilizando canelura durante a realização do ensaio)			
Biaxial	Ensaio de expansão hemisférico	$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 > 0$ $\varepsilon_3 < 0$ $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\frac{\varepsilon_3}{2}$	$\sigma_1 = \sigma_2 > 0$ $\sigma_3 = 0$	
	Bulge			
	Marciniak			

Estes ensaios permitem a caracterização da curva limite de estampagem e as curvas limite de fractura. De facto, na figura 2.9, é possível compreender a relação de alguns resultados obtidos a partir da realização dos ensaios listados na tabela 2.1 e a sua representação nos limites anteriormente mencionados.

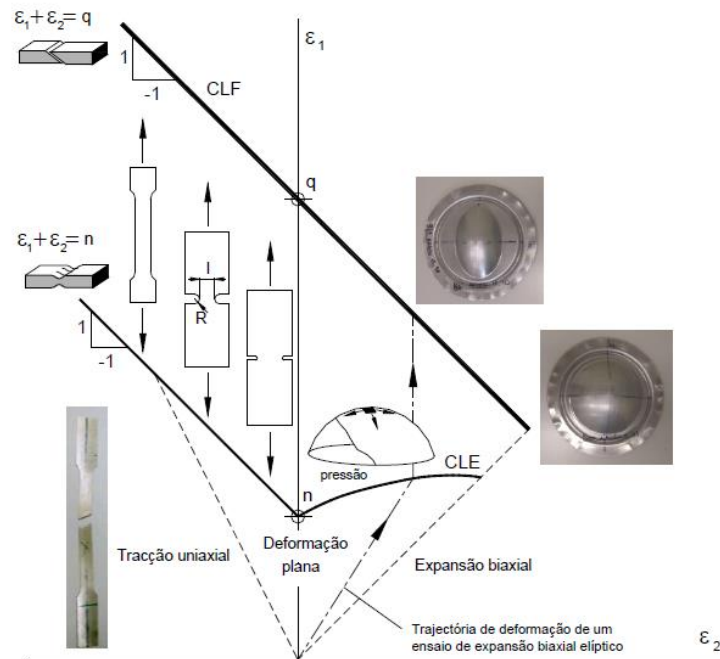


Figura 2.9- Curva limite de estampagem (CLE) e de fractura (CLF) e representação dos estados de deformação característicos de alguns ensaios experimentais (Rodrigues e Martins, 2010).

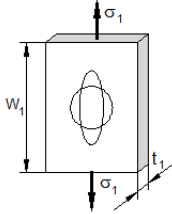
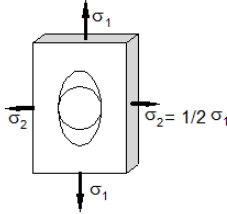
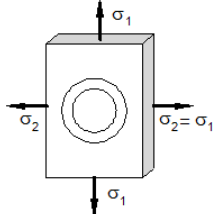
A realização do ensaio de tracção consiste em submeter o provete a uma carga de tracção, continuamente crescente até que se alcance a rotura deste. Ao longo da realização dos ensaio são registadas as variações do comprimento de referência, através de extensómetros directamente aplicados sobre o provete, bem como a força exercida.

O ensaio Nakajima consiste na solitação do provete com um punção hemisférico. Os provetes utilizados neste ensaio apresentam dimensões variadas, por forma a obter diferentes modos de deformação, necessários para a caracterização da CLE. A gama de deformações na direcção da largura,  $\epsilon_2$ , que é possível alcançar neste ensaios é muito próxima da conseguida em ensaios de simulação, embora as trajectórias de deformação obtidas no ensaio Nakajima não sejam tão lineares como as destes últimos, provavelmente devido ao atrito existente entre a chapa e o punção (Rodrigues e Martins, 2010).

O ensaio Bulge (ensaio de expansão biaxial) consiste em bloquear um disco de chapa entre um encostador e uma matriz de geometria circular ou elíptica. Deve ter-se em atenção a relação entre a espessura da chapa e o diâmetro da matriz, de modo a que possam ser desprezadas as tensões de corte e as tensões induzidas pelo momento flector na zona do pólo, com origem na zona do canto da matriz/encostador (Rodrigues e Martins, 2010).

Na tabela 2.2, são apresentadas as representações esquemáticas de alguns tipos de deformação.

Tabela 2.2 – Representação esquemática de alguns tipos de deformação

Uniaxial	Deformação plana	Biaxial
		

A determinação da CLE torna-se deste modo viável, com a utilização de grelhas de círculos electroquimicamente marcados nos provetes antes da realização dos ensaios, tal como foi sugerido por Keeler (1968) e Goodwin (1968). O processo de determinação experimental dos valores das extensões principais na superfície da chapa é realizado partindo de uma grelha de círculos marcada nos provetes antes da sua deformação. Esta grelha servirá de referência para a comparação dos resultados obtidos após a deformação dos provetes (figura 2.10a)).

A forma seleccionada para estas grelhas deve ter em consideração o gradiente de deformação esperado nas regiões críticas resultantes do processo de enformação. O padrão de círculos entrelaçados apresenta a vantagem de cobrir uma maior área para medição, no entanto, introduzem mais dificuldades na realização da medição manual e mesmo na medição automática, por não ser possível a sua leitura automática. Existe ainda, a possibilidade da utilização de grelhas com círculos espaçados (ainda que relativamente próximos), facilitando a leitura da deformação.

A utilização de círculos, em substituição de outras formas geométricas, deve-se ao facto de ser mais fácil identificar, visualmente, as direcções principais nos planos da chapa, visto que os círculos se transformam em elipses, após deformação. Esta observação seria muito mais complexa se fossem utilizadas, por exemplo, formas quadradas. Os círculos, após deformados, apresentam a forma de elipses e as direcções dos eixos maior e menor dessas elipses correspondem às direcções principais locais (figura 2.10b)).

O valor das extensões principais logarítmicas na superfície das chapas, são calculadas a partir das equações,

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{a}{d}\right) ; \quad \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{b}{d}\right) \quad (2.3; 2.4)$$

Onde  $d$  corresponde ao diâmetro dos círculos da grelha de referência não deformada e  $a$  e  $b$  correspondem à maior e menor dimensão da elipse (figura 2.7 b)). O valor da extensão principal normal ao plano da chapa,  $\varepsilon_3$ , é determinado a partir da condição de incompressibilidade,

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (2.5)$$

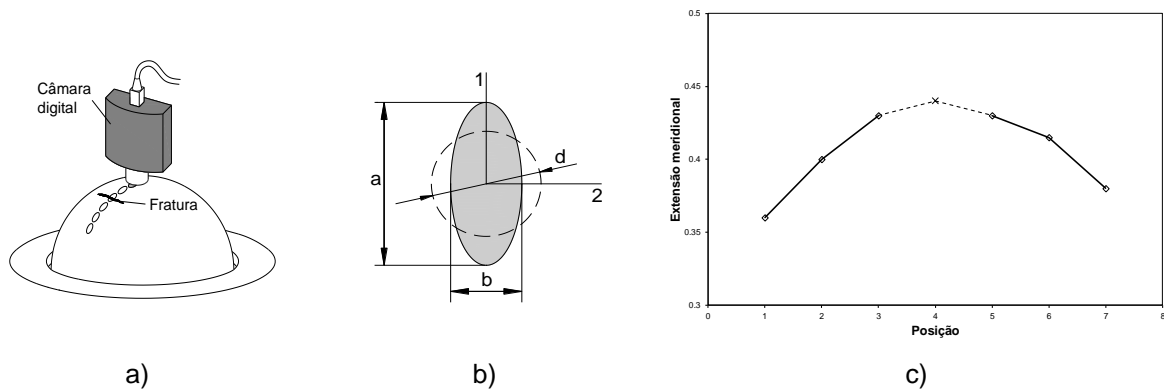


Figura 2.10- Processo para a determinação da CLE a) medição da grelha de referência, b) elipse típica de um círculo da grelha de referência e c) procedimento de interpolação (Martins et al., 2014b).

Este é um processo moroso devido à dificuldade experimental em identificar o exacto instante de início de estricção. Esses pontos são, normalmente, determinados recorrendo à média das extensões medidas em círculos, para os quais a secção de rotura tenha passado o mais próximo possível dos seus centros. Para a medição dos pontos é utilizada uma câmara digital e um *software* que permitem a medição dos eixos das elipses sendo, deste modo, possível criar a curva aproximada que determinar o valor da extensão principal na zona onde se deu o fenómeno de estricção localizada.

A determinação experimental da CLF e da CLFC consiste na medição da espessura antes e após fractura, (figura 2.11a)), de modo a se obter as extensões para os determinados comprimentos de referência, e de medição da largura (figura 2.11b) e c)) da zona de fractura a fim de se obter a extensão na direcção da largura.

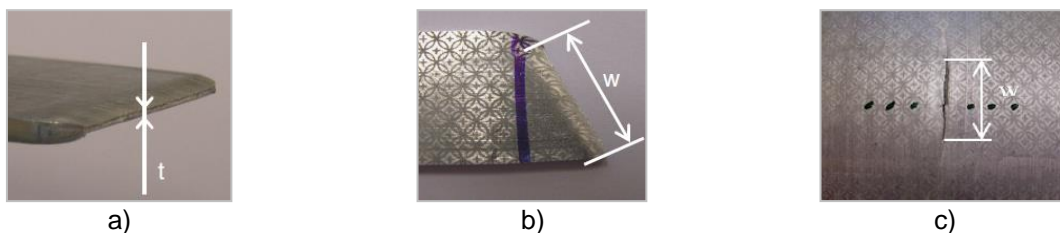


Figura 2.11 - Procedimento para a obtenção das extensões ao longo da a) espessura, b) largura num ensaio de tracção e c) largura de um ensaio Bulge (Martins et al., 2014b).

A medição na espessura após realização do ensaio é realizada directamente no provete e a extensão segundo a espessura é calculada a partir da expressão,

$$\varepsilon_h = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (2.6)$$

onde  $h$  corresponde à espessura final da chapa e  $h_0$  corresponde à espessura inicial desta.

Para a extensão na largura da chapa, esta pode ser realizada directamente na chapa (como por exemplo na figura 2.11c) do ensaio de tracção) ou pode ser necessário recorrer à grelha deformada para a realização desta medição. O cálculo da extensão na largura é realizado partindo da equação,

$$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{w}{w_0}\right) \quad (2.7)$$

Onde  $w$  representa a largura final da zona de fractura e  $w_0$  a largura inicial da chapa utilizada. A terceira das extensões (extensão longitudinal,  $\varepsilon_l$ ), no plano da chapa, com direcção perpendicular à fractura, é obtida por intermédio da equação de incompressibilidade (equação 2.5).

### 2.3.2. Estampagem Incremental

O princípio de funcionamento do processo de estampagem incremental baseia-se na passagem da ferramenta, segundo uma trajectória pré-definida, sobre a chapa que se encontra fixa sobre uma estrutura de apoio. Esta ferramenta de forma esférica ou hemisférica vai, progressivamente, deformar a chapa. Este processo realiza-se num centro de maquinagem CNC ou numa máquina-ferramenta especificamente desenvolvida para o efeito e que permita gerar as trajectórias da ferramenta (figura 2.12).

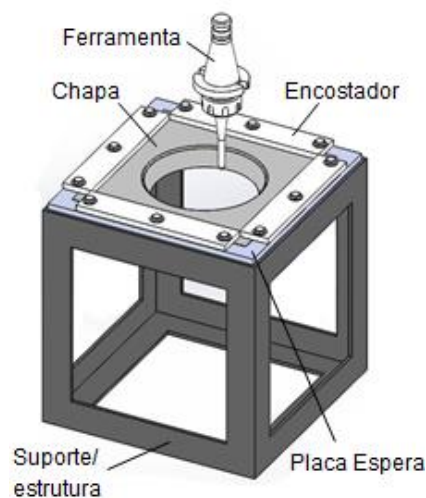


Figura 2.12 – Representação Esquemática do Processo de Estampagem Incremental

As tecnologias de deformação incremental tem vindo a permitir a produção de protótipos e de pequenos lotes em menores espaços de tempo e com uma menor geração de custos, quando comparadas com as tecnologias de deformação convencionais. Esta evolução conduziu a um maior interesse e desenvolvimento dos processos de deformação plástica incremental, como é exemplo a estampagem incremental de chapa, que apresenta diversas vantagens, que são apresentadas de seguida:

- Processo rápido e barato na produção de protótipos e pequenos lotes de peças, desde o seu projecto até à sua produção final;

- Não requer equipamentos ou ferramentas especializados para o efeito, são utilizados equipamentos que permitem efectuar diversos processos de fabrico como centros de maquinagem ou braços robóticos e com ferramentas universais, etc;
- Um processo flexível: as peças são obtidas a partir do seu desenho CAD, o que simplifica a realização de alterações e permite a produção tanto de geometrias simples como de complexas;
- A dimensão das peças produzidas é limitada pela máquina-ferramenta utilizada;
- É possível obter maiores deformações, do que as obtidas por processos convencionais, devido à natureza incremental e deformação localizada do processo.

No entanto, como todos os processos, este apresenta também desvantagens, que são elas:

- Aplicável apenas a pequenos lotes de peças e protótipos;
- Para que seja possível obter formas com ângulos rectos é necessário que a deformação seja realizada progressivamente, através de várias passagens e diferentes trajetórias da ferramenta de deformação;
- É um processo demorado quando comparado com a estampagem convencional;
- Apresenta menor precisão geométrica relativamente a outros processos de deformação incremental de chapa (fluo-torneamento, por exemplo) (Rodrigues e Martins, 2010).

Jeswiet et al. (2005) publicaram o seu estudo sobre os processos de deformação de chapa, afirmando que através do método de *SPIF* (*Single Point Incremental Forming*) é possível obter maiores níveis de enformabilidade do que os obtidos por métodos convencionais, disponibilizando uma lista de vários parâmetros que poderiam influenciar estes limites de enformabilidade. Tal publicação despertou o interesse em estudar os mecanismos de deformação, os limites de enformabilidade e a física do mecanismo de fractura.

Silva et al. (2008) propuseram novo modelo teórico construído com base na análise da membrana, na mecânica do dano e em observações experimentais onde a fractura resultante não é precedida por estrição e a fissura surge e propaga-se devido a tensões de tracção meridionais (modo I). Os autores verificaram que, ao contrário dos processos de deformação de chapa convencionais, neste processo de estampagem incremental, o modo de deformação encontra-se limitado pelo aparecimento de fractura e não o de estrição. Os resultados experimentais obtidos para os níveis de deformação apresentavam-se superiores aos típicos limites de enformabilidade (CLE, tal como já tinha sido referido na secção 2.2).

A enformabilidade pode ser influenciada por vários parâmetros do processo. Entre eles, o diâmetro da ferramenta, o aumento deste conduz a uma distribuição de tensões numa área maior da peça produzida, visto que é também maior a superfície de contacto entre a ferramenta e a peça a ser deformada. Silva et al. (2011) verificaram que o aumento do diâmetro da ferramenta resulta numa diminuição da enformabilidade do material tendo por base os ensaios de estampagem incremental com geometrias cónicas e piramidais truncadas. Os autores concluíram que o aumento do diâmetro da ferramenta leva a uma diminuição do ângulo de estampagem e a um aumento do rácio de

triaxialidade de tensões (equação 2.8). Além disto, os autores apresentaram a influência da relação do diâmetro da ferramenta a espessura da peça (equação 2.9), propondo um limite crítico para esta relação que separa a fractura com ocorrência de estrição da fractura com ausência deste fenómeno (figura 2.13).

$$R = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \quad (2.8)$$

$$\frac{t}{r_{tool}} \quad (2.9)$$

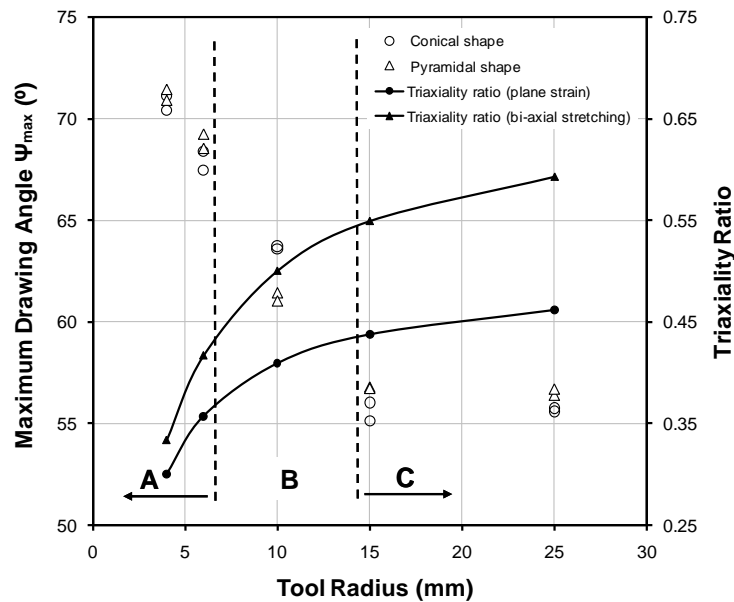


Figura 2.13 – Ângulo máximo de estampagem e função de triaxialidade em função do diâmetro da ferramenta para geometrias cónicas e piramidais

Posteriormente, Madeira et al. (2014) estudaram este patamar a partir da relação entre o raio das geometrias a produzir e o raio das ferramentas utilizadas confirmando a proposta de Silva et al. (2011) de que a influência da espessura (antes e depois da deformação) é o factor determinante para a enformabilidade do material. Madeira e co-autores observaram ainda que o aumento do diâmetro da ferramenta se traduz em menores ângulos de deformação nas peças obtidas (figura 2.14).

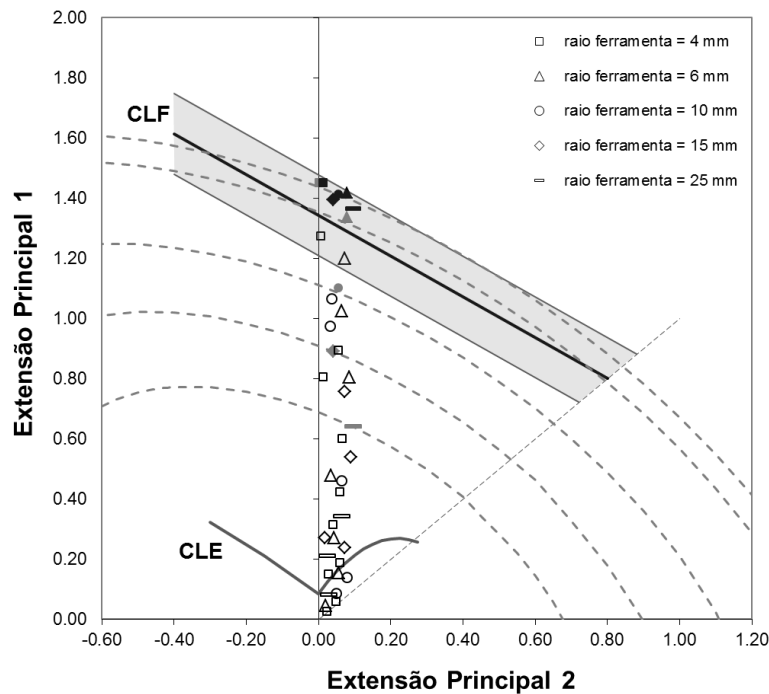


Figura 2.14 - Diagrama com plano das extensões principais obtidas a partir do ensaio SPIF, com diferentes raios de ferramenta (Madeira et al., 2014).

Outro factor de grande influência neste processo tecnológico são as geometrias a produzir pois cada uma tem um tipo de deformação diferente, gerando assim pontos em diferentes zonas do plano de extensões principais. Deste modo, é possível, através do ensaio de estampagem incremental a caracterização dos limites de enformabilidade e do ângulo máximo de estampagem, tal como já tinha sido referido na secção 2.2.

Jeswiet e Young (2005), propuseram a utilização de geometrias obtidas por ensaios de estampagem incremental, para a caracterização de diagramas limite de enformabilidade dos materiais que e observaram que a geometria com cinco lóbulos permitia a obtenção de pontos no segundo quadrante do plano das extensões principais. Numa publicação mais recente, Soeiro et al. (2015), continuando o estudo dos autores anteriormente referidos, propôs a utilização de geometria cónicas na caracterização da CLFC. O seu estudo baseou-se na produção de geométricas com lóbulos e número e formas variadas, na tentativa de obter resultados de fractura no modo II da mecânica da fractura. Foram estudadas quatro geometrias diferentes, uma de cinco lóbulos com uma geometria circular, uma geometria de catorze lóbulos também de geometrias circular e duas de geometria com lóbulos elípticos uma apresentado cinco e outra quatro lóbulos. A geometria proposta pelos autores como mais apropriada na caracterização da CLFC revelou-se a geometria de quatro lóbulos elípticos que resultou na obtenção de pontos no segundo quadrante do plano das extensões principais sem a existência de estricção localizada, concordantes com as CLFC previamente obtidas a partir de ensaios convencionais.



## 2.4. Tenacidade à Fractura

A tenacidade à fractura é definida como a capacidade que um material tem para absorver energia quando deformado no domínio plástico. Esta propriedade permite definir a quantidade de energia que um material pode absorver até a fractura.

A realização de ensaios para a caracterização desta propriedade tem por base a publicação dos autores Cotterell e Reddel (1977). Estes ensaios consistem em traccionar provetes de duplo entalhe com determinadas dimensões de espessura, comprimentos, largura e comprimento do ligamento específicas até que se dê a fractura completa dos provetes. Cotterell e Reddel (1977) basearam-se na teoria de que o trabalho total envolvido na fractura, quando um provete é sujeito a uma força de tracção, é dissipado em duas zonas distintas: uma zona de processo, zona onde ocorre a fractura, e uma zona de deformação plástica que envolve a primeira.

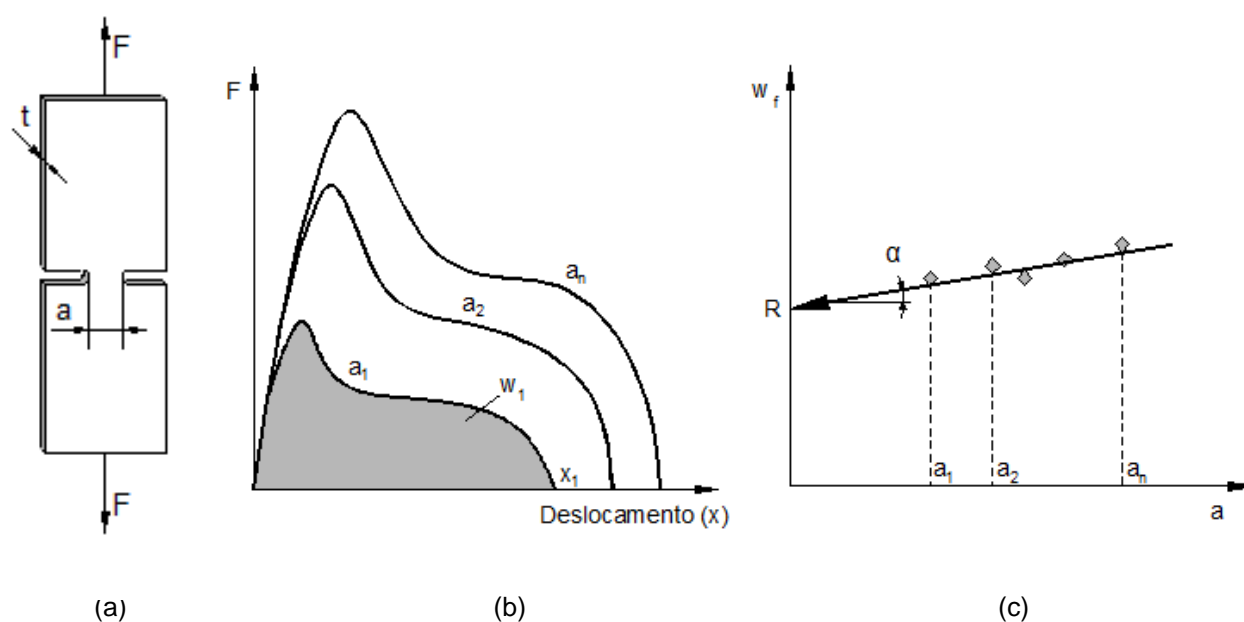


Figura 2.15 - a) Representação esquemática do provete de duplo entalhe, b) Representação esquemática da força em função do deslocamento para os diferentes comprimentos de ligamento e c) Determinação da tenacidade à fratura,  $R$ , através da extrapolação da quantidade de energia por unidade de área (Madeira et al., 2014).

Tal como representado na figura 2.15 a evolução das curvas Força vs Deslocamento é registada para os testes realizados a provetes com diferentes comprimentos de ligamento  $a$ , de modo a que seja possível calcular o trabalho associado à fractura a partir da área abaixo desta curva. Seguidamente é determinada a energia total  $W$ , a partir da equação 2.8.

$$W = \int_0^{x_1} F dx \quad (2.8)$$

Assume-se que a energia total associada à fractura pode ser dividida em duas parcelas distintas. A primeira sendo a energia essencial de fractura,  $W_e$ , associada à geração de nos superfícies de fractura e que se encontra concentrada próximo do plano de fractura e da zona entalhada. O valor desta energia varia proporcionalmente ao comprimento do ligamento  $a$ . A segunda parcela consiste na energia não essencial de fractura,  $W_p$ , e representa a energia dissipada na deformação plástica do provete, na zona que rodeia o local onde ocorre a fractura. Este é considerado não essencial uma vez que este valor não influencia a formação de novas superfícies de fractura. No entanto, o valor de  $W_p$  depende das dimensões e da geometria do provete utilizado, assim como da configuração da carga, não sendo, por isto, uma propriedade intrínseca do material.

Assim sendo, a energia total por unidade de área pode ser expressa pela equação 2.9

$$w = \frac{W}{A} = \frac{W_p}{A} + \frac{W_e}{A} = \frac{W_p}{A} + R \quad (2.9)$$

Onde  $A = a \times t$  é a área do ligamento e  $R$  representa a tenacidade à fractura definida como a quantidade de energia, por unidade de área, que é necessária para criar a nova superfície (Madeira et al., 2014).

Para que seja possível obter o valor de  $R$  é necessário extrapolar o valor da energia total específica para um valor de  $a$  (comprimento do ligamento) próximo de zero. Graficamente, isto corresponde à intercepção da linha recta com declive  $\alpha$  (figura 2.15) com o eixo das ordenadas. Esta recta é obtida a partir da regressão linear dos vários valores de  $w$  para os diferentes comprimentos de ligamento.

## 3. Trabalho Experimental

Este capítulo iniciará-se com a descrição dos ensaios mecânicos realizados e suas características, expondo os equipamentos utilizados bem como os respectivos planos de ensaio. Para cada um dos ensaios apresentados é também referido o modo de preparação dos provetes de cobre utilizados. Por último, serão abordados os equipamentos e técnicas de medição utilizadas.

### 3.1. Ensaios para a caracterização mecânica da enformabilidade

Este capítulo apresenta os ensaios para a caracterização mecânica dos materiais, que são também utilizados para determinar os limites de enformabilidade, bem como o conjunto de procedimentos necessários para obter as propriedades mecânicas. Posteriormente são descritos os ensaios realizados para obter os limites de enformabilidade, nomeadamente o ensaio de corte, o ensaio Bulge, o ensaio Nakajima e o ensaio de estampagem incremental (SPIF). Os ensaios Nakajima e Bulge permitem a obtenção de pontos para a caracterização tanto da CLE como da CLF, já o ensaio de corte permite a obtenção de pontos para a CLFC, os ensaios de *SPIF* são utilizados para a caracterização da CLF e CLFC.

#### 3.1.1. Ensaio de Tracção

A realização do ensaio de tracção permite a determinação de propriedades mecânicas de chapas metálicas, tais como tensão de rotura, coeficiente de encruamento, extensão após fractura, tensão de cedência, coeficiente de anisotropia, tensão limite de elasticidade, módulo de elasticidade e também a lei do comportamento do material.

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios INSTRON modelo 4507 segundo a norma ASTM *standard* E8/E8M – 09 (2010), recorrendo a extensómetros HRDE (High Resolution Digital Extensometer), que medem as deformações longitudinais e transversais, e a dispositivos de fixação (amarras) que impedem o escorregamento do provete garantindo a distribuição da carga ao longo do provete.

Os valores de força e deslocamento são obtidos por intermédio de uma célula de carga, um transdutor de deslocamento e um PC (figura 3.1) equipado com uma placa de aquisição de dados que regista e expõe os valores de carga e deslocamento resultantes do ensaio (Cristino e Martins, 2013).

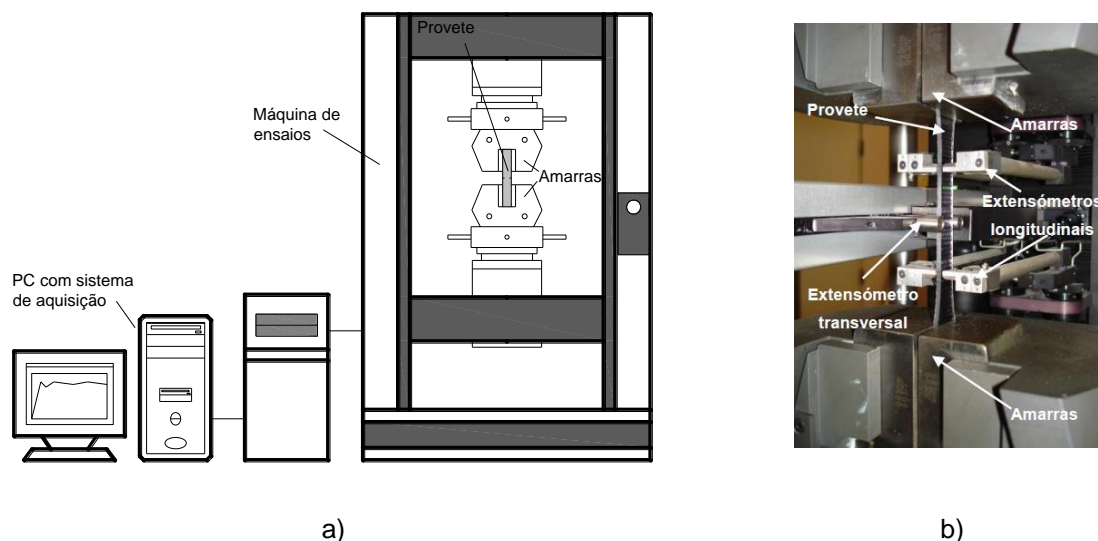


Figura 3.1 - a) Representação esquemática do aparato experimental e b) fotografia mostrando um detalhe de um provete de tração montado entre as amarras de uma máquina INSTRON modelo 4507 (Cristino e Martins, 2013)

A geometria dos provetes utilizados, para a realização dos ensaios, encontra-se apresentada na tabela 3.1, bem como o número de provetes ensaiados.

Tabela 3.1 - Dimensões de referência dos provetes utilizados no ensaio de tração uniaxial segundo a norma ASTM *standard* E8/E8M – 09 (2010) e respectivo plano de ensaios

Número de Provetes ensaiados	Dimensões (mm)	Provete plano
0°	5	
	$b_0 = 13$	
	$l_c = 57$	
45°	4	
	$l_0 = 50$	
	$w = 19$	
90°	5	
	$a = 25$	
	$r = 76$	

Os provetes de cobre utilizados no ensaio foram obtidos de chapas cortadas a 0°, 45° e 90° relativamente à direcção de laminagem e apresentam uma espessura de 0.8 mm. O seu corte foi realizado por electro erosão a fio.

Uma vez obtidos os valores de força e deslocamento, é possível determinar a tensão e a extensão, criando-se assim o gráfico de tensão-extensão. Da lei do comportamento do material é retirado o módulo de elasticidade, a partir do declive da curva tensão-extensão, no regime elástico. A obtenção dos valores de tensão de cedência, tensão de rotura e alongamento são obtidos segundo a norma ASTM E8/E8M – 09 (2010).

As propriedades do material são apresentadas na secção 4.1, da análise de resultados.

### 3.1.2. Ensaio de Provete de Duplo Entalhe

Os ensaios de tenacidade à fractura foram realizados na máquina universal de ensaios INSTRON modelo 4507 (Cotterell and Reddel, 1977). Os dados resultantes do ensaio foram obtidos a partir do mesmo processo que o utilizado para os ensaios de tracção.

Os provetes utilizados para o ensaio de tenacidade à fractura foram provetes de chapa com duplo entalhe, cuja geometria e dimensões é apresentada na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dimensões de referência dos provetes de duplo entalhe e plano de ensaios.

Número de Provetes ensaiados	Dimensões (mm)	Provete plano
0°      10	$l_0 = 150$ $w = 50$ $t = 3$ $a = 5, 10, 15, 20 \text{ e } 25$	
90°      10		

Tal como os provetes utilizados no ensaio de tracção, também estes foram obtidos de chapas cortadas a 0° e 90° relativamente à direcção de laminagem.

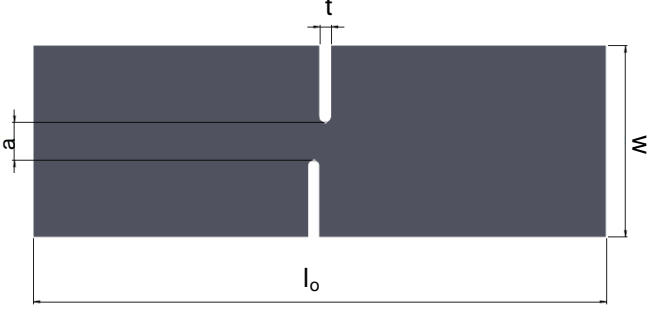
Os dados obtidos ao longo do ensaio são os valores de força e deslocamento, que permitem a criação do gráfico força-deslocamento para cada um dos provetes ensaiados. A partir deste gráfico, é possível calcular o trabalho total, uma vez que este corresponde à área abaixo da curva força vs deslocamento.

### 3.1.3. Ensaio de Provete de Duplo Entalhe Desalinados

Os ensaios de corte foram realizados na máquina de ensaios universal INSTRON modelo 4507.

Os provetes utilizados para o ensaio foram provetes de chapa com duplo entalhe desalinado, cuja geometria e dimensões é apresentada na tabela 3.3. Tal como os provetes anteriormente apresentados também estes foram obtidos de chapas cortadas a 0° e 90° relativamente à direcção de laminagem e apresentam uma espessura de 0.8 mm.

Tabela 3.3 - Dimensões de referência dos provetes de duplo entalhe desalinhados e plano de ensaios

Número de Provetes ensaiados	Dimensões (mm)	Provete plano
0° 10	$l_0 = 150$ $w = 50$ $t = 3$ $a = 5, 10, 15, 20, 25$	
90° 10		

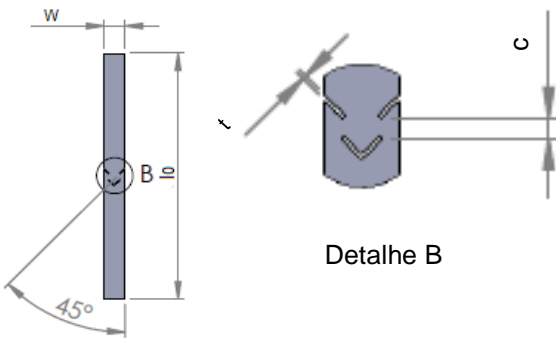
### 3.1.4. Ensaio de Corte

Os ensaios de corte foram realizados na máquina de ensaios universal INSTRON modelo 4507.

Para a realização do ensaio foram utilizados provetes de chapa que apresentam entalhes de geometria constante mas com diferentes comprimentos de ligamentos, na tentativa de se obter assim uma deformação por corte, eliminando os efeitos de torção e outros tipos de deformação.

A geometria dos provetes ensaiados é apresentada na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Dimensões de referência dos provetes utilizados nos ensaios de corte e plano de ensaios.

Número de Provetes ensaiados	Dimensões (mm)	Provete plano
0° 12	$l_0 = 150$ $w = 25$ $t = 1$ $c = 1, 2, 3, 4, 6, 8$	
90° 12		

Os provetes utilizados para a realização destes ensaios foram obtidos através do processo de fresagem, realizado na Faculdade de Engenharia do Porto num centro de maquinaria CNC (figura 3.2) e apresentam uma espessura de 0.8 mm.

### 3.1.5. Ensaio Bulge

Os ensaios de expansão biaxial foram realizados numa máquina universal de ensaios de chapa, com a designação Erichsen Modelo 145/960, (figura 3.2) recorrendo a um transdutor de posição HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) e a um sistema de aquisição de dados MGC.



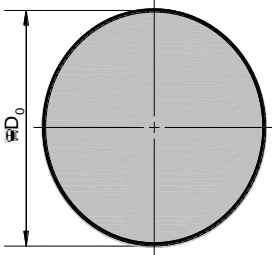

Durante a realização dos ensaios foram impostos valores constantes para a força do encostador e para a velocidade de avanço deste, controlados manualmente. Ao longo da realização do ensaio foram registadas continuamente a altura da zona polar através de um transdutor de posição e o valor de pressão, através de um transdutor de pressão que depois é convertido em força. A aquisição da pressão e da posição são realizados por intermédio de um PC equipado com uma placa de aquisição de dados e de um *software Catman*.



Figura 3.2 - Fotografia da máquina universal de ensaios de expansão biaxial (Cristino e Martins, 2013)

Este ensaio foi realizado com discos de chapa, a sua geometria obtidas encontram-se representadas na tabela 3.5 bem como o plano de ensaios para cada uma das geometrias, cada um dos provetes planos apresentava um diâmetro de 175 mm.

Tabela 3.5 - Dimensões de referência dos provetes utilizados nos ensaios de bulge (Cristino e Martins, 2013) e plano de ensaios.

Número de Provetes ensaiados	Exemplo de Geometria conseguida	Provete Plano
<p>Geometria Circular:</p> <p>D=100 mm</p> <p>3</p>		
<p>Geometria Elíptica:</p> <p>100:80</p> <p>2</p>		
<p>Geometria Elíptica:</p> <p>100:64</p> <p>5</p>		

Os provetes planos foram obtidos a partir de chapas de 0.8 mm, através do processo de electro erosão por fio.



Foram também realizados ensaios de expansão biaxial na FEUP, utilizando o equipamento INEGI Hydraulic Bulge Test Machine da figura 3.3 e um semelhante modo de recolha de dados.



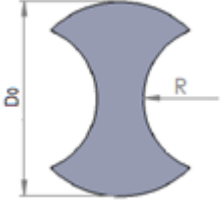
Figura 3.3 – Equipamento INEGI Hydraulic Bulge Test Machine utilizado na FEUP

### 3.1.6. Ensaio Nakajima

Os ensaios Nakajima foram realizados na máquina universal de ensaios de chapa, Erichsen Modelo 145/960 (ver secção 3.2.4). Também o método para a obtenção de dados, nestes testes, foi semelhante ao descrito na secção ensaios bulge (ver secção 3.2.4).

As geometrias e dimensões dos provetes utilizados, para a realização dos ensaios, são apresentadas na tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Dimensões de referência dos provetes utilizados nos ensaios Nakajima e plano de ensaios

Número de Provetes ensaiados	Dimensões (mm)	Provete plano
12 (dois provetes para cada dimensão de R)	$D_0 = 210$ $R = 40, 50, 57.5, 65, 72.5, 80$	

Tal como os provetes planos necessários para os ensaios bulge, também estes apresentam uma espessura de 0.8 mm e foram obtidos através do mesmo processo de maquinação.

### 3.2. Ensaio de Estampagem Incremental – SPIF

O ensaio de estampagem incremental foi realizado no centro de maquinagem Flexi-optima 5 com o um controlador Fagor 8065 (figura 3.5), recorrendo a uma estrutura formada por um suporte, uma placa espera, uma ferramenta de ponta esférica e quatro encostadores, cuja função é impedir que a chapa de desloque durante o processo de estampagem incremental (ver figura 3.5). Para a obtenção da trajectória helicoidal da ferramenta, é utilizado um programa CAD/CAM que contém um pós-processador, permitindo a conversão da informação do programa do PC para a linguagem utilizada pelo controlador do centro de maquinagem.

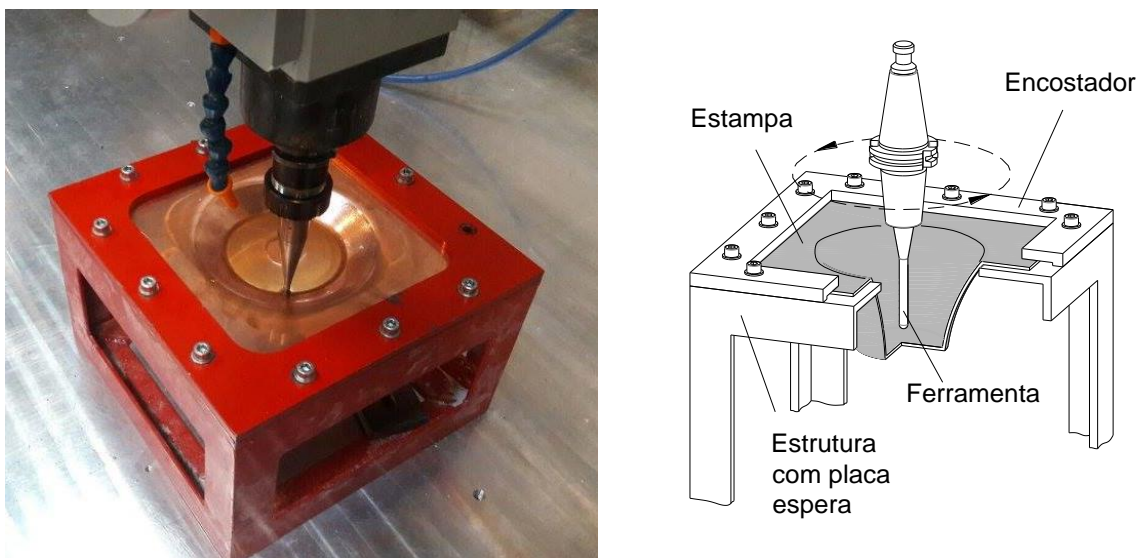


Figura 3.4 – a)Centro de Maquinagem Flexi- Optima 5 estrutura utilizada b) Representação esquemática do aparato experimental


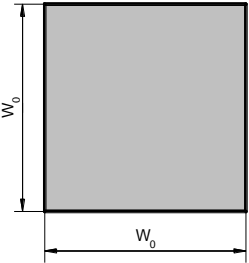
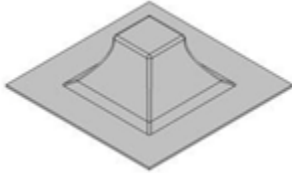

A trajectória da ferramenta é iniciada com um ângulo constante de  $30^\circ$  nos primeiros 10 mm de profundidade, posteriormente, esse ângulo é variado com o aumento da profundidade.

A ferramenta utilizada em todos os processos de estampagem incremental é fabricada em aço inoxidável com ponta esférica e com um diâmetro 12 mm. A deformação do material é imposta pelo deslizamento da ferramenta sobre a superfície deste.

O ensaio de estampagem incremental foi utilizado para a realização de 3 geometrias, sendo elas, cónica, piramidal e de quatro lóbulos. A utilização destas geometrias garante a obtenção de diferentes tipos de deformação como deformação plana, deformação biaxial e corte puro.

As geometrias utilizadas no processo de estampagem incremental são apresentadas na tabela 3.7, sendo que foram obtidas a partir de provetes quadrados com  $W_0 = 250$  mm.

Tabela 3.7 - Dimensões de referência dos provetes utilizados nos ensaios de SPIF e plano de ensaios

Geometrias Obtidas	Número de Provetes Ensaiaados	Modo de Deformação	Provete plano
Geometria Cônica: 	5	Deformação Plana	
Geometria Piramidal: 	5	Deformação Plana e Biaxial	
Geometria de quatro lóbulos: 	5	Deformação Plana e de Corte Puro	

### 3.3. Marcação das Grelhas

A caracterização de CLE é feita a partir da medição de zonas do material próximo da zona de fractura, deste modo, a necessidade de efectuar a medição das extensões principais no plano da chapa, provenientes da deformação do material, e da deformação nas peças produzidas por *SPIF*, obriga à marcação de grelhas na chapa antes da realização dos ensaios. A presença destas grelhas permite a compreensão do comportamento do material através da observação das deformações nelas apresentadas.

Para a marcação destas grelhas recorre-se a um processo simples e de rápida execução que permite uma marcação perfeitamente nítida e que, principalmente, não afecte as propriedades do material, sendo, ao mesmo tempo, resistente ao atrito e lubrificantes a que será sujeita.

As chapas foram marcadas através do método de impressão electroquímica. Para isso, as chapas de cobre foram limpas com álcool etílico, com a intenção de remover todas e quaisquer impurezas presentes na superfície da chapa, que pudessem impedir o ataque electroquímico de forma correcta.

Para a realização deste processo, recorremos a uma folha de marcação que contém nela o perfil que desejamos imprimir na chapa. A folha é humedecida por um electrólito e colocada sobre a chapa, posteriormente, é colocado sobre a folha de marcação um feltro, também ele humedecido com electrólito. Sobre esta montagem, é passado um rolo, que é atravessado por corrente eléctrica, criando assim uma diferença de potencial, promovendo o ataque químico e marcação da chapa. Após esta operação, a chapa é lavada com neutralizante e seca, para travar o prosseguimento do ataque químico. Na figura 3.6 é apresentado o equipamento utilizado para obter a marcação electroquímica das grelhas.

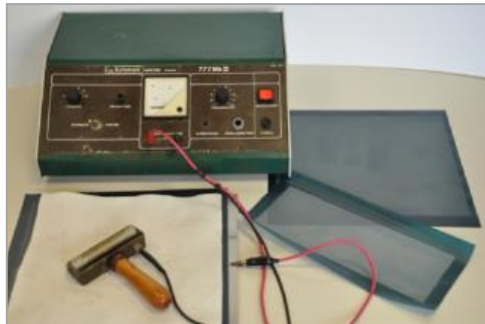
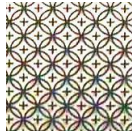


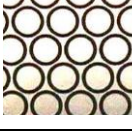
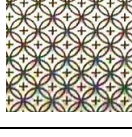
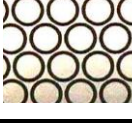


Figura 3.5 – Fotografia do equipamento utilizado para a marcação electroquímica

A escolha do electrólito e do neutralizante é feita com base no material da chapa a marcar. Sendo esta muito importante, por ser um factor crítico na criação de grelhas de boa qualidade, facilitando em muito a sua leitura.

Na tabela 3.7 são apresentados os ensaios realizados, que permitiram a caracterização da CLE e que, por isso, foram sujeitos a esta marcação electroquímica, além destes são expostos também os tipos de grelha escolhidos para os provetes em cada um deles. Para a marcação destas grelhas foram utilizados o electrólito ME5 e o neutralizante MN2.

Tabela 3.8 – Grelhas de círculos utilizadas para a marcação electroquímica e ensaios onde estas foram necessárias.

Ensaio	Tipo de grelha	Fotografia
Tracção	Entrelaçada $d = 2\text{ mm}$	
Bulge	Entrelaçada $d = 2\text{ mm}$	
	Entrelaçada $d = 5\text{ mm}$	
Nakajima	Circular $d = 2.5\text{ mm}$	
SPIF	Entrelaçada $d = 2.5\text{ mm}$	
	Circular $d = 2.5\text{ mm}$	

### 3.4. Métodos de Medição

Após a realização dos ensaios, existe a necessidade de compreender o comportamento de material quando é sujeito às deformações que lhe são impostas. Assim sendo, é necessário proceder à medição das extensões principais sofridas pelo material, bem como à medição das larguras e espessuras finais, apresentadas pelos provetes, que permitirão tirar outros resultados necessários para a classificação de materiais.

### 3.4.1. Medição das Extensões Principais

A determinação experimental dos valores das extensões principais é feita a partir da medição das grelhas previamente marcadas no material. Após a deformação plástica do material, as grelhas que inicialmente apresentavam uma forma circular, tendem a tomar uma forma de elipse. A direcção dos eixos maior e menor destas elipses finais, coincidem com as direcções principais da chapa.

Para os provetes ensaiados, a medição das extensões foi realizada a partir de um sistema computadorizado semiautomático. O equipamento utilizado para a medição dos círculos antes e após deformação foi o 3Com Home Connect, sendo o GPA 3.0 o software utilizado (figura 3.7).

O equipamento referido é formado por uma câmara, que permite a captação de imagem dos círculos (deformados e não deformados) e que envia a informação para o software GPA 3.0.

Em primeira instância, é realizada a medição dos círculos não deformados, com o intuito de calibrar o software, realizando-se cinco medições em cada ponto. Posteriormente, na medição dos círculos deformados (elipses), cada um destes foi também medido cinco vezes. Esta repetição tem como principal objectivo minimizar os possíveis erros que podem surgir, seja por falta de precisão da câmara em captar a imagem, por falta de paralelismo entre o bocal da câmara e a superfície da peça ou mesmo pela falta de definição das elipses marcadas no material. É de referir mais uma vez, a elevada importância da correcta marcação das grelhas no material, pois esta facilita imenso a medição das extensões principais.

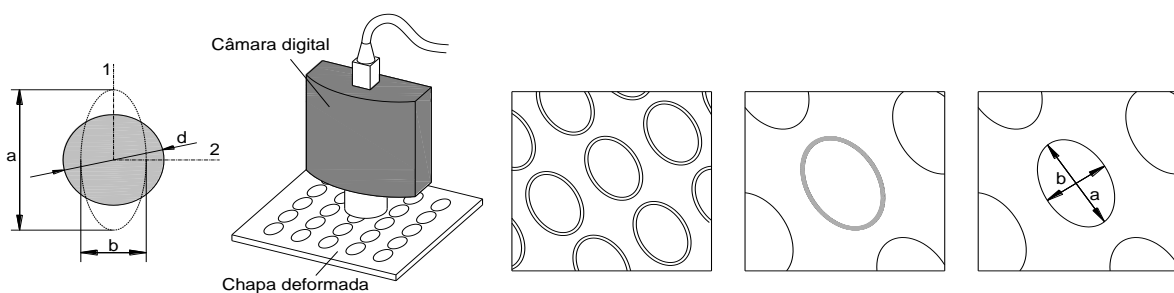


Figura 3.6 – Esquema do método utilizado para a medição das extensões principais (Cristino e Martins, 2013)

### 3.4.2. Medição das Larguras e da Espessura da Fractura

A medição da espessura final, que permite o cálculo da extensão na espessura, na região da fractura foi realizada através de um microscópio óptico com câmara digital incorporada com recurso ao software Motic Images Plus 2.0, este permite a recolha de medidas a partir das fotografias obtidas com a câmara incorporado no microscópio.

Para que fosse possível fazer as medições, os provetes, depois de ensaiados, foram cortados em pequenas amostras que nelas continham as zonas de deformação. Para que fosse possível observar

esta zona ao microscópio. Foram retiradas várias fotografias, de cada uma das amostras, de forma a garantir que toda a zona da fractura era coberta e, assim sendo, medida. O equipamento utilizado é apresentado na figura 3.8a)

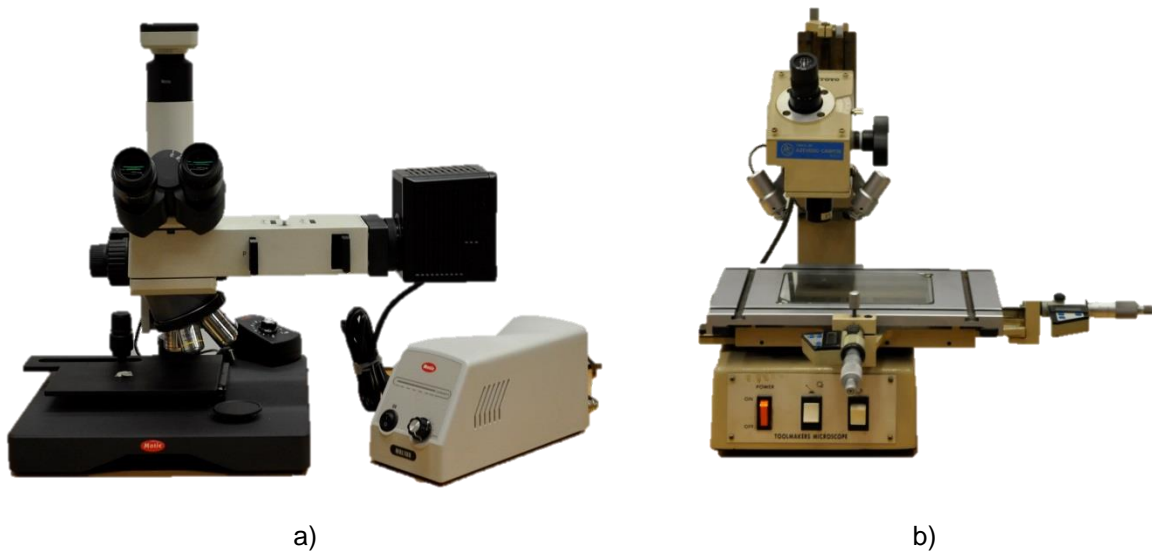


Figura 3.7 – Equipamento do microscópio, PC com programa de aquisição de imagens e microscópio óptico com câmara digital, b) Microscópio utilizado na medição da largura, após fractura.

A medição dos valores de larguras finais dos provetes, utilizada no cálculo das extensões na largura foi realizada com recurso a um microscópio óptico. De cada uma das amostras foram retirados três valores de largura, ao longo da sua espessura, para calcular uma média final de largura. O microscópio é apresentado na figura 3.8b).

## 4. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e a sua discussão. Inicialmente serão abordadas as propriedades mecânicas do material, seguidas dos resultados relativamente à tenacidade à fractura. Por último serão expostos os limites de enformabilidade obtidos pelos ensaios convencionais e sua comparação com os resultantes dos ensaios de estampagem incremental.

### 4.1. Propriedades mecânicas dos materiais

Nesta secção são apresentadas as propriedades mecânicas obtidas através da realização dos ensaios de tracção aos provetes de cobre com 0.8 mm de espessura com um comprimento de referência de 50 mm, tal como foi referido na secção 3.1.1.

A partir da análise de resultados dos ensaios de tracção, foram obtidas as curvas de tensão vs extensão, um exemplo de uma destas curvas obtidas, para o cobre, é apresentado na figura 4.1.

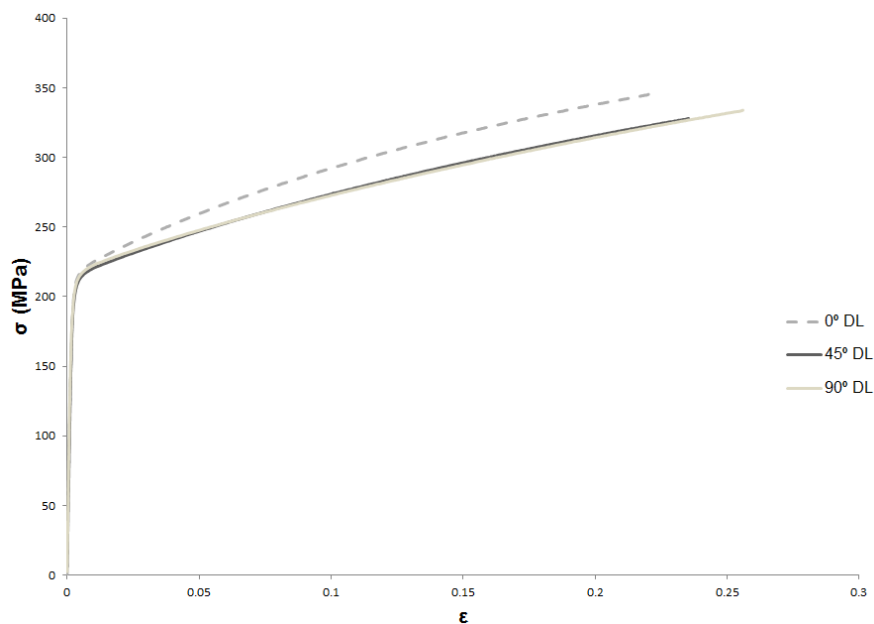


Figura 4.1 - Exemplo de Curva Tensão vs Extensão obtida de um ensaio de tracção

Na figura 4.1 é possível observar que as curvas obtidas a partir de provetes com as três direcções de laminagem diferentes (0°, 45° e 90°), sendo o seu comportamento bastante semelhante. Embora a curva obtida para a direcção de laminagem de 0° se encontre ligeiramente acima e mais curta do que as de 45° e 90°, as três curvas apresentam uma zona linear inicial, zona de deformação elástica e uma zona de deformação plástica uniforme, onde o comportamento da curva deixa de ser linear.

Na tabela 4.1 são apresentados os principais resultados obtidos dos ensaios de tracção, expondo as propriedades mecânicas obtidas para o cobre. Foram calculadas as tensões verdadeiras, o módulo de elasticidade, o alongamento após fractura e os coeficientes de anisotropia médio e planar.



Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do cobre

Direção de laminagem	Módulo de elasticidade, E (GPa)	Tensão cedência $\sigma_e$ (MPa)	Tensão de rotura, $\sigma_r$ (MPa)	Alongamento após fratura, A (%)	Coefficiente de anisotropia normal	Coefficiente de Anisotropia planar
<b>0° DL</b>	109.43	213.24	343.52	24.17	0.79	
<b>45° DL</b>	109.49	207.62	327.49	27.11	1.19	
<b>90° DL</b>	128.96	207.06	326.77	28.20	0.74	
<b>Valor médio</b>	<b>141.3</b>	<b>208.89</b>	<b>331.32</b>	<b>26.65</b>	<b><math>\bar{r}=0.98</math></b>	<b><math>\Delta r=-0.43</math></b>

Da análise da tabela de propriedades mecânicas, podemos concluir o cobre apresenta valores de tensão de cedência da mesma ordem que os aços comuns (Muscat-Fenech, 1996) que apresenta um (Schwindt et al., 2014), sendo no entanto superior ao valor de outros materiais muito utilizados, como a liga de alumínio AA1050-H111 (Isik et al., 2014). O mesmo pode ser concluído para o seu valor de tensão de rotura. Estes valores permitem afirmar, que o cobre suporta uma maior força por unidade de área do que materiais como o alumínio. Relativamente aos valores de alongamento após fractura, o cobre apresenta resultados muito próximos de vários materiais comuns, como os aços, no entanto, quando comparados com o alumínio, o AA1050-H111 (Isik et al., 2014), o cobre apresenta valores de alongamento até atingir fractura mais elevados.

Quanto ao estudo do coeficiente de anisotropia normal médio o seu valor é 0.98, sendo deste modo um valor baixo e muito próximo dos materiais isotrópicos ( $\bar{r}=1$ ). É de referir que valores reduzidos de coeficientes de anisotropia normal médios prevêm um adelgaçamento mais facilitado. Quanto ao valor do coeficiente de anisotropia planar é indicativo de variações das propriedades do material segundo as diferentes direcções de laminagem, uma vez que se apresenta diferente de zero. Esta informação é confirmada pelos valores de anisotropia segundo cada uma das direcções de laminagem visto que, apesar dos valores nas direcções de 0° e 90° se apresentarem bastante próximos, para a direcção de 45° a anisotropia apresenta um valor bastante superior (cerca de 1.5 vezes maior que o valor das direcções de 0° e 90°), chegando mesmo a ser superior à unidade.

Por aproximação matemática à curva tensão vs extensão do material foi possível obter uma equação de Ludwik-Hollomon que define a lei do comportamento do material que é apresentada de seguida (equação 4.1):

$$\sigma = 427.56 \varepsilon^{0.17} \quad 4.1$$

Da equação 4.1 concluímos que o cobre é um material que apresenta um coeficiente de encruamento, algo que se podia prever do gráfico da figura 4.1, ao observarmos a zona de deformação plástica que não se apresenta como uma recta paralela ao eixo das abcissas.

## 4.2. Ensaio Bulge

A realização dos ensaios de expansão biaxial teve também como objectivo a caracterização da lei do material. Tal como mencionado na secção 3.1.5 foram ensaiadas três geometrias diferentes (figura 4.2), todas elas com sucesso. Este é um ensaio comum para obter propriedades do material, uma vez que a maioria dos processos de fabrico impõe às chapas solicitações biaxiais. A aproximação matemática da lei do comportamento do material a partir deste ensaio é calcula por programas de auxílio ao cálculo que ao receberem os valores de pressão exercida pelo equipamento e o deslocamento sofrido pelo material ao deformar. No entanto, nesta tese, os resultados que apresentaram uma melhor aproximação às curvas tensão-extensão foram os ensaios de tracção, tendo, por isso, sido a lei apresentada na secção 4.1.



Figura 4.2 – Geometrias ensaiadas no ensaio de expansão biaxial

Na figura 4.3 é apresentado um detalhe da zona de fractura bem como a direcção que foi utilizada para a mediação da CLE, que como se pode observar atravessa perpendicularmente a zona de fissura que se encontra no centro do provete, tal como esperado. Os resultados da CLE a partir dos ensaios bulge foram obtidos de duas grelhas com diâmetros de círculos diferentes, como referido na tabela 3.7, com intenção de verificar os resultados na determinação deste limite. Os valores resultantes destas duas grelhas apresentaram-se bastante semelhantes não havendo por isso necessidade de os distinguir aquando da apresentação dos limites de enformabilidade na secção 4.8.

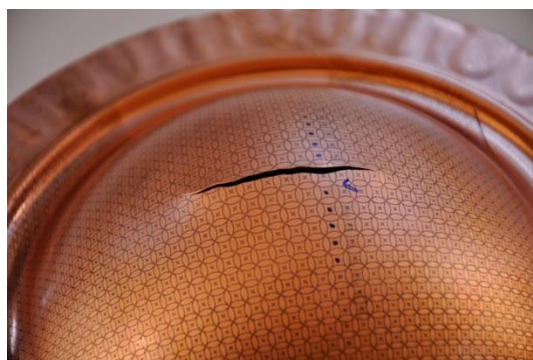


Figura 4.3 – Detalhe da zona de fractura nos ensaio bulge circular

### 4.3. Tenacidade à Fractura modo I

Na presente secção, serão apresentados os resultados obtidos para os valores de tenacidade à fractura para os provetes cobre ensaiados com 0.8 mm de espessura e cortados segundo as direcções laminagem de 0° e 90°.

Os resultados obtidos para os provetes de duplo entalhe são apresentados a partir das curvas força-deslocamento para os diferentes comprimentos de ligamento (figura 4.4), posteriormente será apresentado um gráfico de regressão linear (figura 4.6) que permitiu calcular o valor da tenacidade à fractura, R, através do processo descrito na secção 2.4.

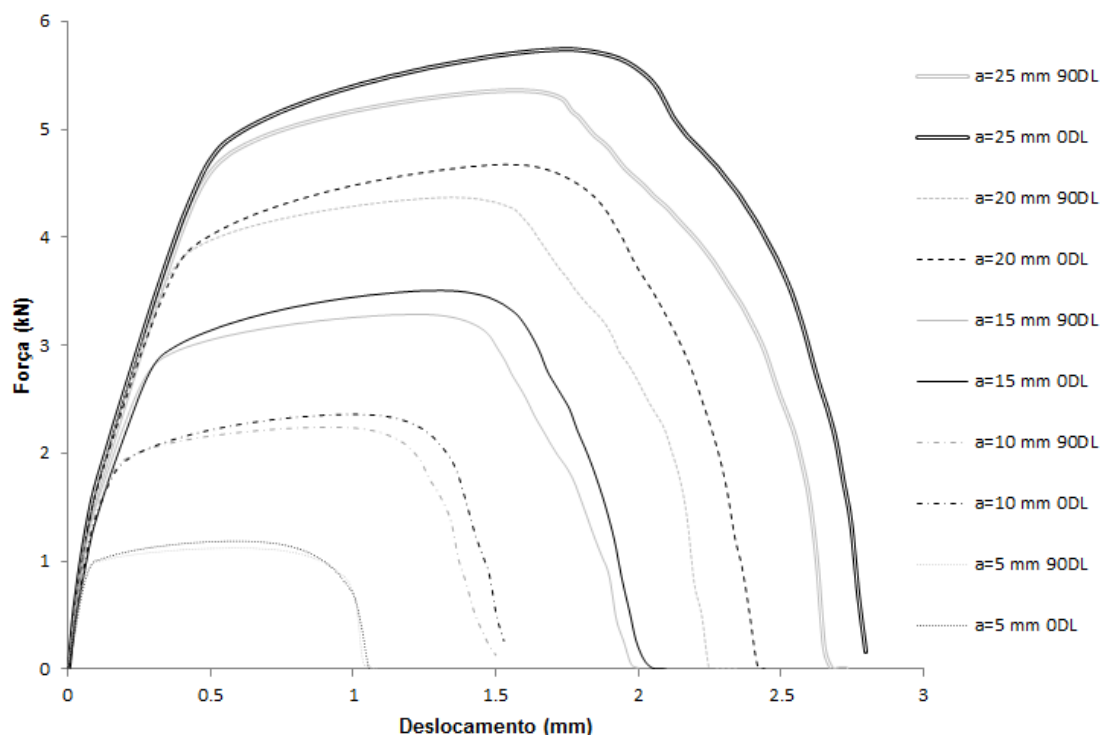


Figura 4.4 – Curvas força vs deslocamento para o cobre com direcção de laminagem de 0° e 90°

No gráfico força vs deslocamento da figura 4.2 é possível observar a influência do comprimento dos ligamentos, isto é, quanto maior o comprimento do ligamento maior é a força necessária para que o provete atinja a fractura e, conseqüentemente, maior é o deslocamento observado. É também possível observar a existência de um domínio elástico (zona inicial linear) e de um domínio plástico (zona final, não linear). A figura 4.5 apresenta os vários provetes com diferentes comprimentos de ligamento depois de ensaiado onde é possível observar uma alteração da tonalidade do material numa área próxima da zona de fractura.

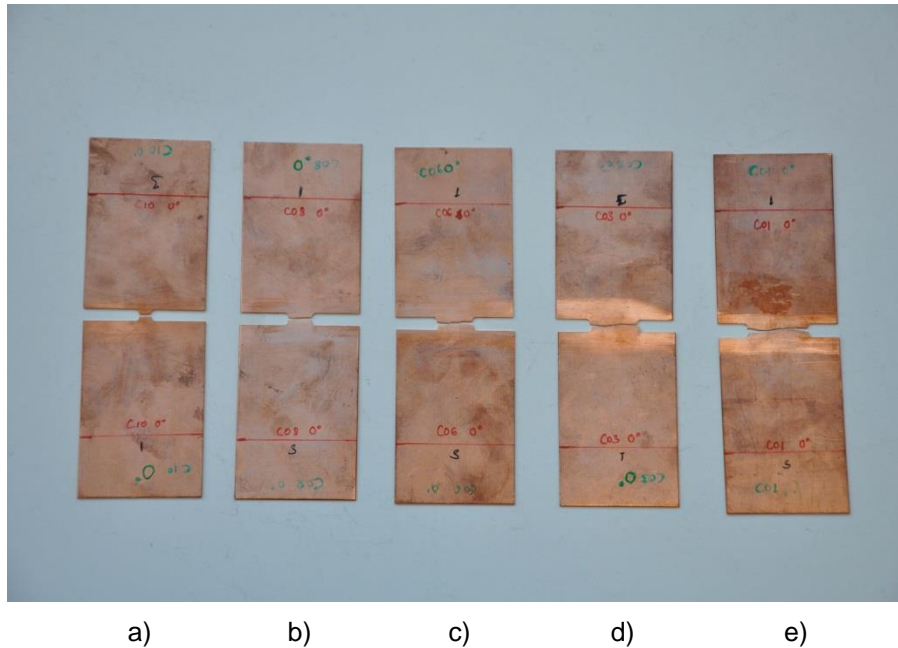


Figura 4.5 – Provetes de duplo ensaio ensaiados a)  $a = 5$  mm, b)  $a = 10$  mm, c)  $a = 15$  mm, d)  $a = 20$  mm, e)  $a = 25$  mm

Da comparação das curvas obtidas para cada uma das direcções de laminagem (figura 4.4) é possível observar que, para a mesma espessura, é necessária uma força maior para a direcção de laminagem de  $0^\circ$  do que para a direcção  $90^\circ$ , sendo que a diferença se torna mais acentuada quanto maior o comprimento do ligamento. O deslocamento é inferior para os provetes alinhados com a direcção de laminagem de  $90^\circ$ , esta diferença está de acordo também com a pequena diferença observada nos valores de anisotropia dos materiais, visto que o valor deste coeficiente na direcção de laminagem de  $90^\circ$  se apresenta ligeiramente inferior, logo era esperado um valor de deslocamento menor.

Na figura 4.6 são apresentados os resultados obtidos do trabalho específico para cada um dos comprimentos do ligamento dos provetes de duplo entalhe de cada uma das direcções de laminagem, calculado a partir das áreas abaixo das curvas do gráfico apresentado na figura 4.4.

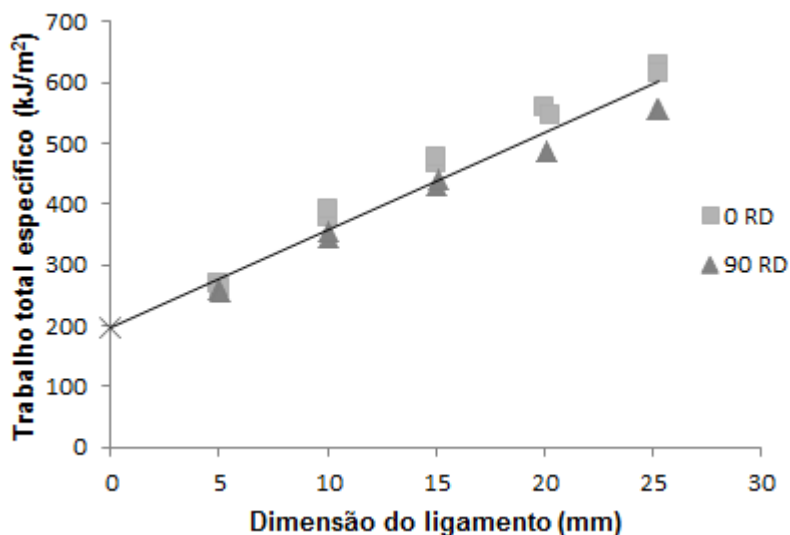


Figura 4.6 - Regressão linear que determina o valor da tenacidade à fratura para o cobre 0° DL e 90° DL

Da análise do gráfico é possível observar que os valores de trabalho específico para os provetes alinhados com a direcção de laminagem de 0° são sempre ligeiramente superiores aos dos provetes alinhados com a direcção de laminagem de 90°, algo esperado pela diferença das áreas obtidas segundo cada uma das direcções (figura 4.2). No gráfico apresenta-se um ponto em forma de x, que indica o cruzamento da regressão linear com o eixo das ordenadas, este é o ponto que identifica o valor da tenacidade à fratura. Deste modo, na tabela 4.2 são apresentados os valores para ambas as direcções de laminagem, bem como a média destes valores.

Tabela 4.2 – Valores obtidos para a tenacidade à fratura.

	0° DL	90° DL	Média
Tenacidade à fratura, R (kJ/m <sup>2</sup> )	198.2	197.5	197.9

Com estes resultados, quantificou-se a energia que o cobre pode absorver até à fratura é de 197.9 kJ/m<sup>2</sup>.

## 4.4. Tenacidade à fractura modo II

A realização dos ensaios de corte permitiu o cálculo da tenacidade à fractura no modo II da fractura da mecânica, para os provetes com 0.8 mm de espessura obtidos a partir de chapa cortada a 0° e 90° relativamente à direcção de laminagem.

As curvas força - deslocamento para os diferentes comprimentos de ligamentos são apresentadas na figura 4.7, a partir das quais é possível calcular o valor trabalho específico necessário para calcular a tenacidade à fractura neste modo.

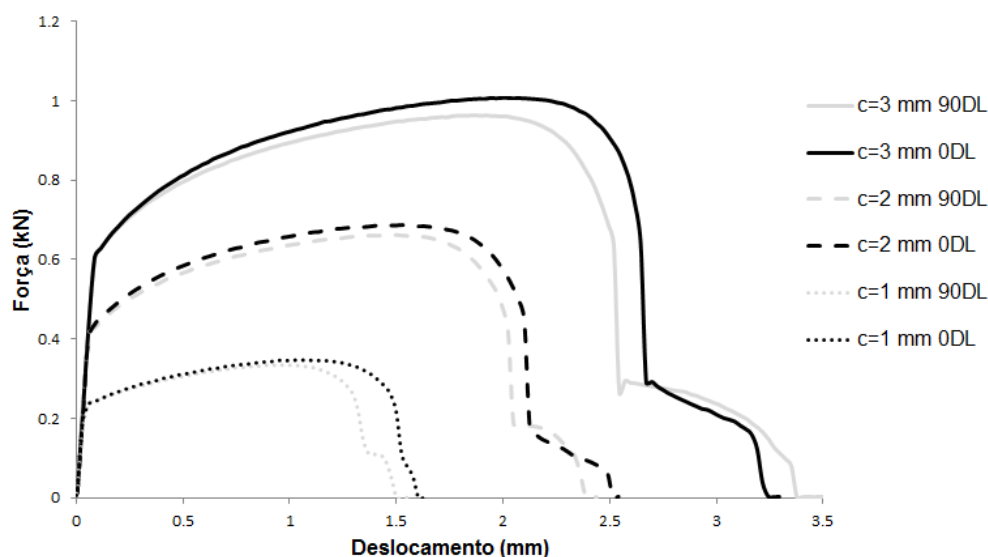


Figura 4.7 - Curvas força vs deslocamento para os provetes de corte alinhados com a direcção de laminagem de 0° e 90°

Da análise da figura 4.7 é possível concluir que também para os provetes de cobre existe diferença nos valores de força e deslocamento obtidos para os provetes alinhados com as diferentes direcções de laminagem, embora seja uma diferença menos acentuada do que a observada nos provetes de duplo entalhe. Além disto, é possível observar a distinção entre a zona de deformação elástica, zona linear inicial, e a zona de deformação plástica, zona final.

A reduzida diversidade de comprimentos de ligamento presentes nas curvas força-deslocamento é devida à inviabilidade dos resultados obtidos para ligamentos de comprimento superior a  $c = 3$  mm. O encruamento do material na zona central dos provetes conduziu a fenómenos de fractura em zonas não esperadas, impossibilitando o estudo para os restantes comprimentos de ligamento (figura 4.8).

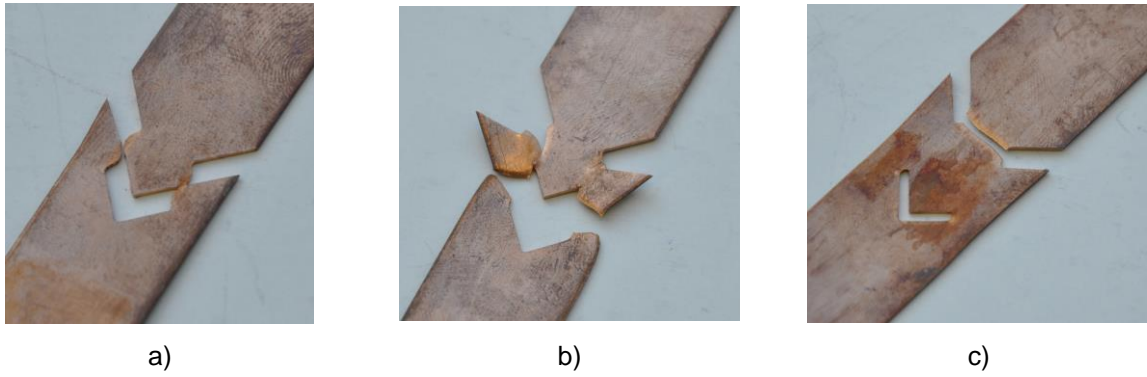


Figura 4.8 – Provetes de corte Ensaçados a)Fractura na zona esperada, b) e c) duas variações dos defeitos observados na fractura dos provetes de corte

No entanto, foi possível calcular a tenacidade à fractura existente neste modo, a partir dos resultados obtidos dos provetes com os três diferentes comprimentos de  $c$ , na figura 4.9 são expostos os resultados obtidos para o trabalho total específico de cada um deles, segundo cada uma das direcções de laminagem,  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

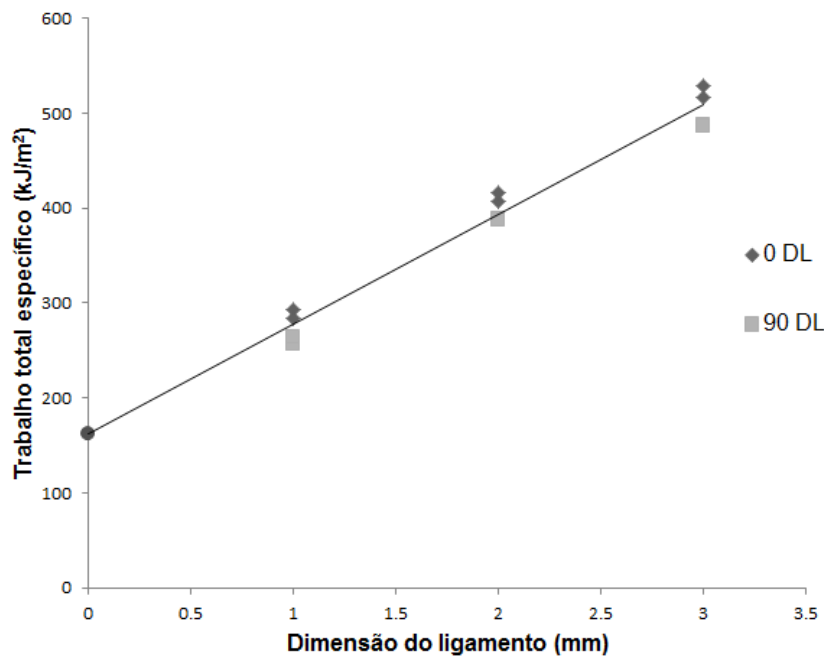


Figura 4.9 – Regressão linear que determina o valor da tenacidade à fractura para o modo II  $0^\circ$  DL e  $90^\circ$  DL

Tal como no modo I, também na figura 4.9 pode ser observado que os valores de trabalho específico para os provetes alinhados com a direcção de laminagem de  $0^\circ$  são ligeiramente superiores aos alinhados com a direcção de laminagem de  $90^\circ$ . O ponto circular apresentado na figura representa a intersecção da recta com o eixo do trabalho específico, identificando o valor de  $R$ . Na tabela 4.3 são apresentado os resultados obtidos para cada uma das direcções, bem como a média calculada a partir destes valores.

Tabela 4.3 – Valores obtidos para a tenacidade à fractura modo II

	0° DL	90° DL	Média
Tenacidade à fractura, R (kJ/m <sup>2</sup> )	173.5	152.2	162.9

Este resultado apresenta-se ligeiramente inferior ao obtido no modo I, no entanto, é de referir que o número de ensaios realizados com os provetes de corte é inferior ao realizado com os provetes de duplo entalhe e que a regressão linear calculada para o modo II foi calculada apenas para três comprimentos de ligamento diferentes, assim sendo o valor obtido para a tenacidade à fractura no modo II da mecânica da fractura é 162.9 kJ/m<sup>2</sup>.

#### 4.5. Tenacidade à fractura modo misto

Para o cálculo da tenacidade à fractura no modo I/II foram utilizados provetes staggered, com também uma espessura de 0.8 mm cortados a partir de chapas metálicas obtidos segundo as direcções de laminagem de 0° e 90°.

Também estes provetes apresentaram diversos problemas na fractura para comprimentos de ligamentos superiores a 15 mm, sendo por isso a amostra utilizada para calcular a tenacidade à fractura muito reduzida. Assim sendo, na figura 4.10 são apresentadas a curvas força – deslocamento obtidas para os provetes ensaiados.

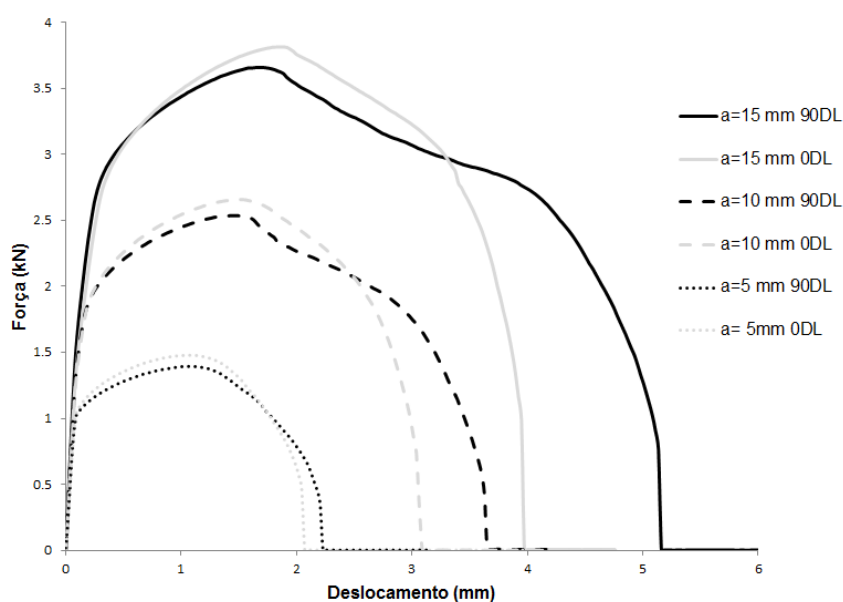


Figura 4.10 - Curvas força vs deslocamento para os provetes de corte alinhados com a direcção de laminagem de 0° e 90° dos provetes de duplo entalhe desalinhado



O ensaio destes provetes para ligamentos superiores a  $a = 15$  mm revelou diversas dificuldades. Na figura 4.11 são apresentados os provetes com as dimensões de ligamento  $a = 5$  mm (figura 4.11a),  $a = 15$  mm (figura 4.11b) e  $a = 20$  mm. No ligamento de menor comprimento a fissura prolongou-se exactamente como esperado, para  $a = 15$  mm é possível observar que apesar das fissuras originadas em cada um dos entalhes se cruzarem, existiu inicialmente um desvio desta orientação, criando uma deformação em zonas não esperadas. A criação destas zonas tornou muito difícil a medição da espessura após fractura e por isto estes provetes não foram utilizados na caracterização dos limites de enformabilidade do material. Para  $a = 20$  mm as zonas de fractura nunca se cruzam e de facto os provetes sofreram uma deformação muito inesperada não se obtendo deles resultados conclusivos.

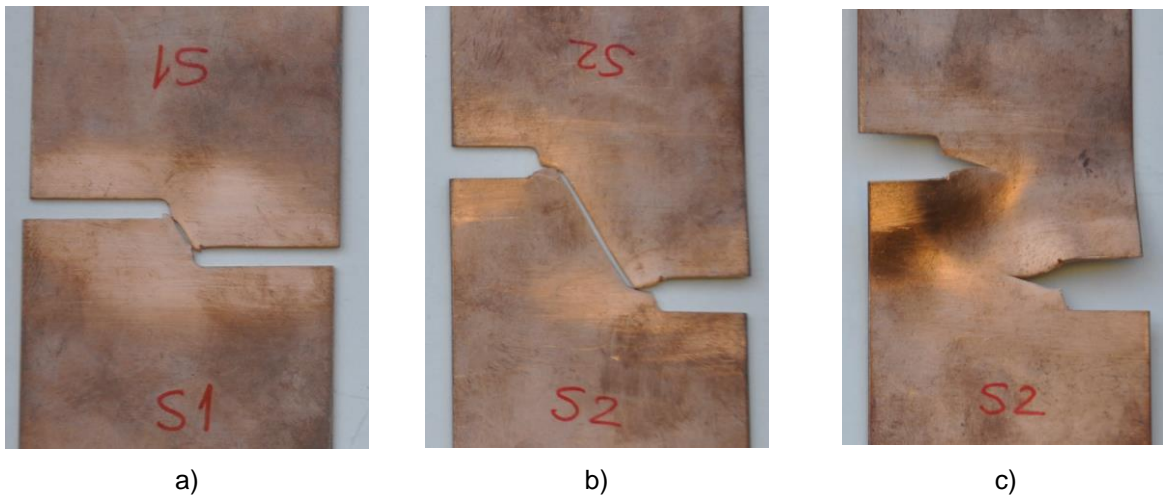


Figura 4.11 - Provetes de duplo entalhe desalinado ensaiados a)  $a = 5$  mm, b)  $a = 15$  mm, c)  $a = 20$  mm

Ainda assim, foram calculados os valores das áreas abaixo das curvas da figura 4.10 e foi possível obter um valor para a tenacidade à fractura no modo misto, a partir dos resultados obtidos dos provetes com os três diferentes comprimentos de  $a$ , na figura 4.12 são expostos os resultados obtidos, segundo cada uma das direcções de laminagem, para o trabalho total específico de cada um deles.

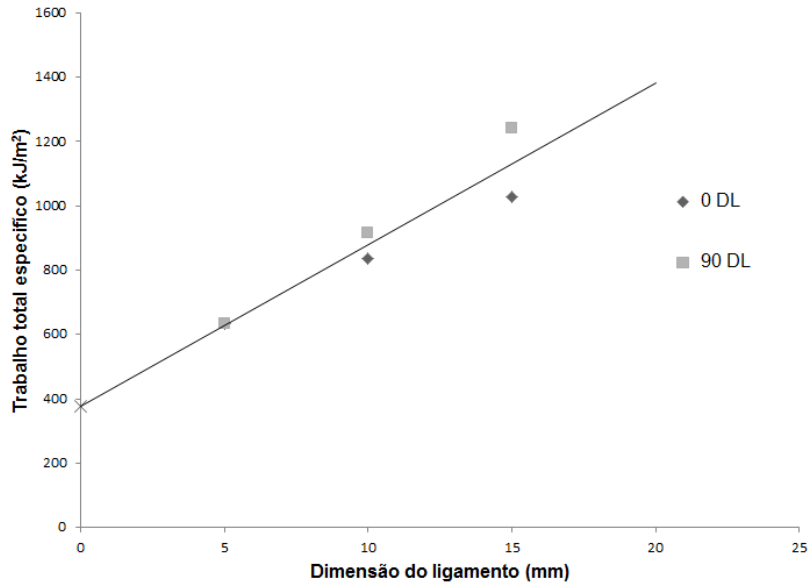


Figura 4.12 - Regressão linear que determina o valor da tenacidade à fractura

A tabela 4.4 apresenta os valores da regressão linear calculada segundo cada uma das direcções e a média destes valores.

Tabela 4.4 - Valores obtidos para a tenacidade à fractura modo I/II

	0° DL	90° DL	Média
<b>Tenacidade à fratura, R (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	311.3	345.3	<b>350.4</b>

O valor calculado para a tenacidade à fractura neste modo é 350,4 kJ/m<sup>2</sup>, no entanto, este valor é muito elevado quando comparado com os obtidos no modo I e no modo II da mecânica da fractura, calculados nas secções anteriores. Esta diferença acentuada de valores pode ser justificada pela mostra tão pequena que foi possível ensaiar para estes provetes e os defeitos que alguns destes apresentavam.

## 4.6. Ensaio Nakajima

Os ensaios nakajima foram possíveis de realizar com todos os provetes planeados. Permitindo uma grande variedade de resultados que foram todos eles coerentes e que auxiliaram grandemente a caracterização dos limites de enformabilidade do cobre. Os provetes, todos eles de espessura de 0.8 mm, são apresentados na figura 4.13. A diminuição da zona central dos provetes resulta em valores

diferentes valores de extensão na direcção  $\epsilon_2$ , sendo possível caracterizar uma maior área tanto da CLE como da CLF.



Figura 4.13 - Provetes nakajima após os ensaios

Na figura 4.14 é apresentado um detalhe da zona de fractura que tal como se pode observar se deu na zona central do provete e as duas linhas utilizadas para medição de valores da CLE que atravessam a zona da fractura perpendicularmente.

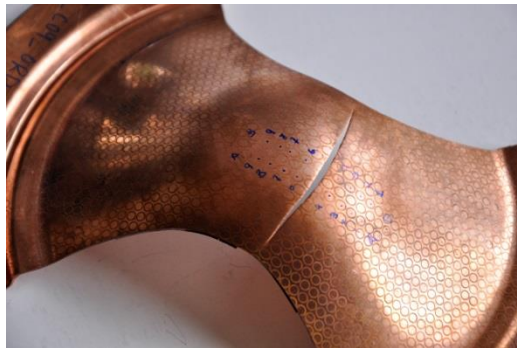


Figura 4.14 – Detalhe da zona de fractura provete Nakajima

## 4.7. Ensaio Estampagem Incremental

A partir deste processo foi possível a realização das três geometrias propostas com chapa de cobre de 0.8 mm. A intenção na realização destas três geometrias é o estudo das diferentes trajetórias de deformação que é possível obter a partir destas.

A geometria cónica obtida por estampagem incremental, apresentada na figura 4.15 apresenta uma trajetória de deformação plana ao longo de toda a parede lateral.

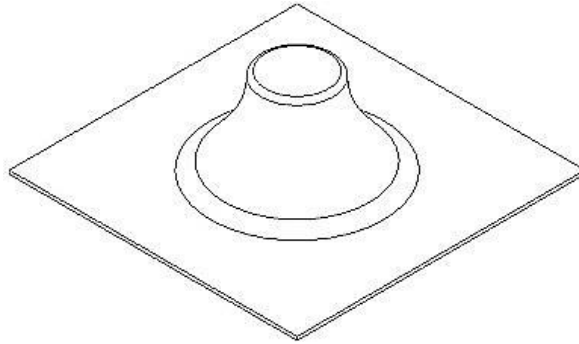


Figura 4.15 – Geometria cônica produzida

Para a geometria piramidal (apresentada na figura 4.16) são retirados resultados de duas zonas distintas da geometria. Da análise da zona de canto podemos perceber que a deformação é biaxial (figura 4.19) ao mesmo tempo que a deformação presente nas zonas das paredes da pirâmide é uma deformação plana. Os resultados provenientes destas duas geometrias serão portanto, utilizados na determinação da CLE e CLF com intenção de validar a sua concordância com os obtidos a partir de ensaios convencionais.

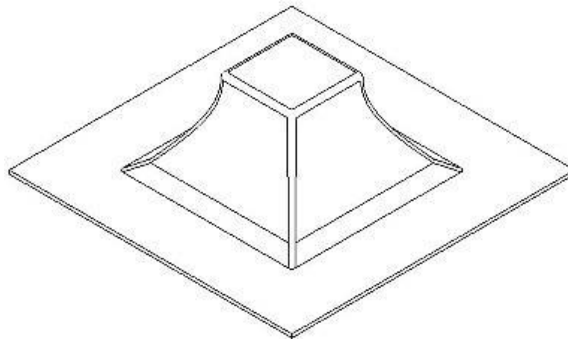


Figura 4.16 – Geometria piramidal produzida

A geometria de quatro lóbulos elípticos foi também ela produzida com sucesso a partir do cobre. Esta permitiu a obtenção de pontos na CLFC pois quando a fractura é observada na zona BB' (zona de raio de concordância) identificada na figura 4.17 o modo de fractura predominante é o modo II, tornando possível a existência de uma trajectória de deformação de corte.

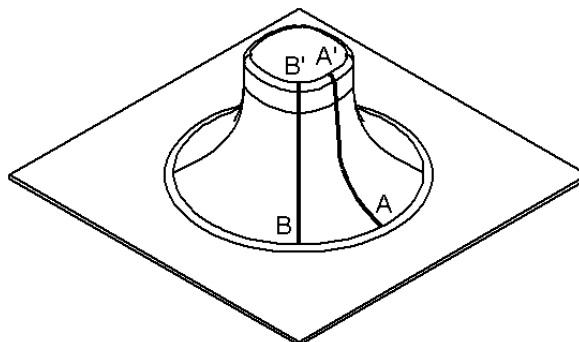


Figura 4.17 – Geometria de quatro lóbulos

De facto, muitas vezes a dificuldade da medição destas geometrias é o alinhamento das zonas de medição desejadas com a grelha de círculos marcada, por se tratar de zonas muito específicas e com dimensões reduzidas como é possível observar na figura 4.18.



Figura 4.18 - Detalhe da zona de raio de concordância da geometria de quatro lóbulos

Deste modo, na figura 4.7, além dos pontos de fractura das geometrias obtidos por SPIF são apresentadas em detalhe a trajectórias de deformação das diferentes zonas das geometrias. É de referir que os resultados dos valores de extensão dos ensaios SPIF expostos na figura 4.19 (pontos não preenchidos) foram obtidos através dos métodos de medição utilizados para a CLE (secção 2.3) e que estes se apresentam muito próximos dos limites de fractura obtidos (CLF e CLFC) e acima dos limites de enformabilidade (CLE) apresentados na secção 4.8.

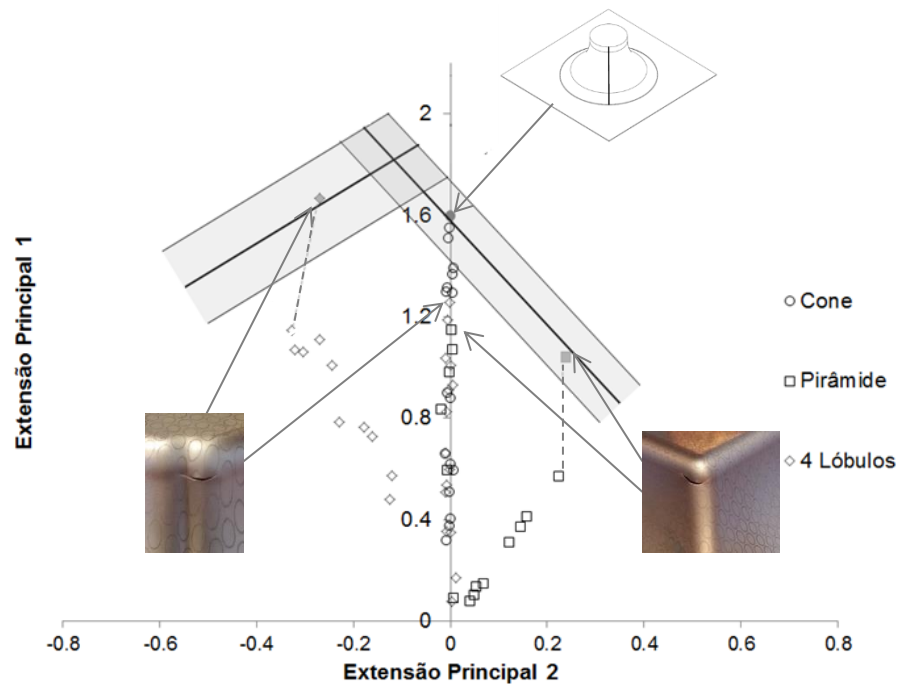


Figura 4.19 -Trajectórias de deformação do ensaio SPIF para as três geometrias e limites de enformabilidade obtidos

## 4.8. Limites de Enformabilidade

Para a determinação dos limites de enformabilidade foram seguidos os métodos descritos na secção 2.3. na figura 4.20 são apresentados os resultados da CLE, da CLF e da CLFC obtidos através dos ensaios de tracção, bulge e nakajima, ensaios de corte e dos provetes de duplo entalhe.

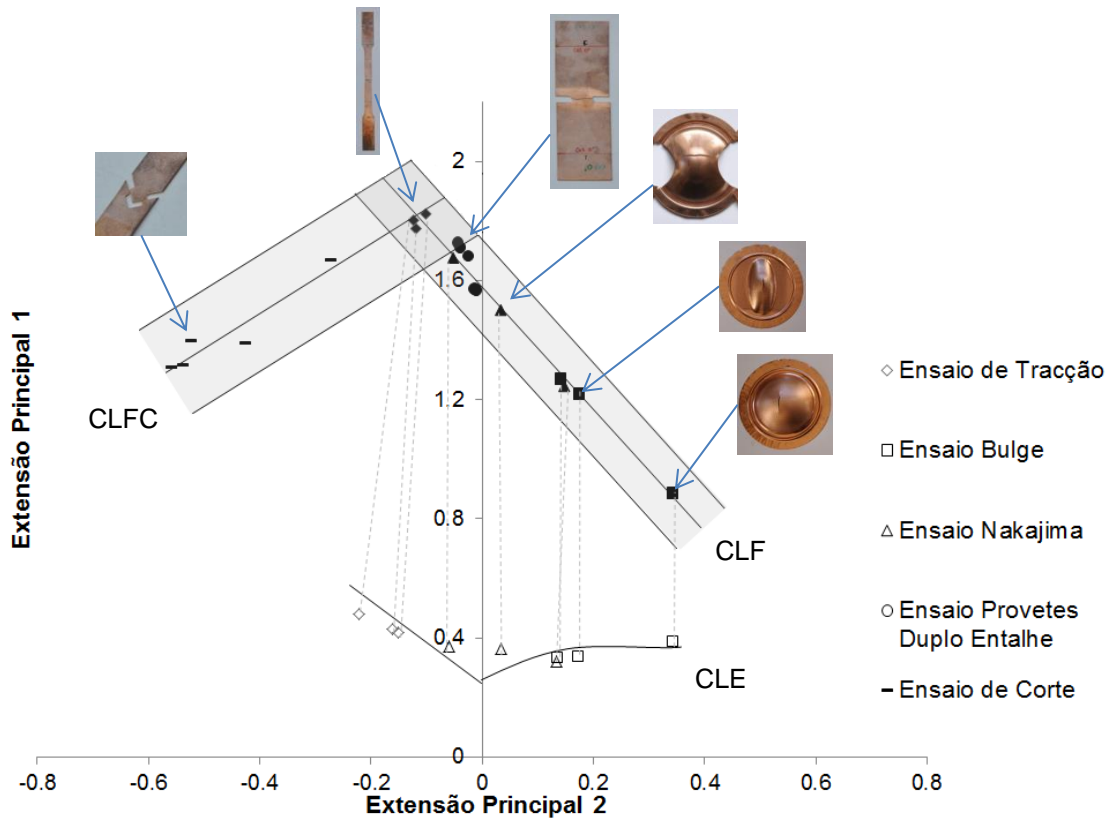


Figura 4.20 – Diagrama com limites a CLE, a CLF e a CLFC obtidas para o cobre

É importante referir que as linhas verticais apresentadas indicam que ocorre deformação plana desde o momento que ocorre a estricção até ao momento em que ocorre a fractura. Os pontos sólidos correspondem aos pontos de fractura para cada um dos ensaios. A área a cinzenta que acompanha a CLF representa a área de segurança considerada aceitável de 10% acima e abaixo da linha obtida, devida à incerteza associada à sua determinação experimental. As imagens que acompanham o gráfico são fotografias obtidas dos ensaios realizados.

Na figura 4.6 é possível observar os resultados obtidos para os limites de enformabilidade relativos ao cobre, a análise ao gráfico dos limites de enformabilidade permite observar que a distância entre as curvas limite de enformabilidade e de fractura é relativamente elevada, o que é característico de um material dúctil, com boas características de enformabilidade.

A apresentação dos resultados obtidos por ensaios de SPIF (figura 4.19) tem como objectivo a validação deste ensaio enquanto ensaio que permite a caracterização dos limites de enformabilidade do material. De facto, é possível observar na figura que as três geometrias (cone, pirâmide e de quatro lóbulos) forneceram resultados, não só dentro dos limites de 10% de incerteza como o centro dos pontos que a representa se encontram muito próximos das curvas identificadas como limite.

A equação encontrada para a Curva Limite de fractura foi

$$\varepsilon_1 + 2.06\varepsilon_2 = 1.58 \quad (4.2)$$

E a obtida para a Curva Limite de Fractura ao Corte foi

$$\varepsilon_1 - 1.17\varepsilon_2 = 1.96 \quad (4.3)$$

O valor de declive previsto na teoria para a CLF é de “-1”, no entanto, o declive obtido para o cobre é muito mais acentuado do que o previsto na teoria, cerca “-2.06”, no entanto a CLFC apresenta um declive de “1.17”, próximo do valor previsto na teoria de “1”. Este resultado indica que as curvas não comprovam a previsão de perpendicularidade esperada, no entanto, os resultados experimentais obtidos através dos diversos ensaios convencionais apresentam coerência e uniformidade. Além dos obtidos a partir de ensaios convencionais também os obtidos por processos de estampagem incremental apresentam coerência entre si (geometria piramidal e geometria cônica) e concordância com os obtidos a partir de ensaios convencionais (a três geometrias).

## 5. Conclusões e Perspectivas de Trabalho Futuro

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado, bem como sugestões de trabalho a efectuar futuramente.

Este documento propõe uma caracterização mecânica para o cobre avaliando-o como um material com boas propriedades de enformabilidade sendo, por isso, um bom candidato a processos de deformação mecânica de chapa.

A determinação da sua tenacidade à fractura verificou-se possível no modo I e no modo II apesar da pequena amostra ensaiada tendo . No entanto, para o modo misto os provetes a propagação da fissura para zonas não esperadas tonou impossível a caracterização da tenacidade à fractura neste modo.

A determinação dos limites de enformabilidade foi possível a partir dos ensaios convencionais de deformação de chapa, verificando-se ao mesmo tempo a abordagem das técnicas de medição sugerida por Martins et al. (2014) revelando a grande importância da medição da espessura antes e após fractura ao longo da fissura de forma a obter a deformação segundo a espessura e garantir a compatibilidade da CLF.

Relativamente à utilização de geometrias produzidas através de processos de estampagem incremental foi possível observar a concordância dos valores obtidos a partir destas com os resultados obtidos pelos ensaios convencionais, validando assim, a utilização destas geometrias na caracterização dos limites de enformabilidade à fractura. De facto os valores alcançados a partir das geometrias cónica e piramidal revelaram uma grande semelhança com a CLF obtida a partir de ensaios convencionais e o mesmo pode ser afirmado para a geometria de quatro lóbulos e a CLFC obtida a partir dos ensaios de corte.

Como sugestão de estudos futuros é de grande interesse investigar a qualidade da superfície nas geometrias produzidas por processos de estampagem incremental com cobre com a influência de lubrificantes. E também o efeito da variação do diâmetro da ferramenta utilizada nesta mesma superfície. Seria também de grande interesse a produção de protótipos com geometrias mais complexas e o estudo dos seus parâmetros visto o interesse deste material ser muito grande na produção de peças de decoração.



## 6. Referências

ASTM Standard E8/E8M, 2011, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM B831 – 05 Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products.

Atkins, A.G. (1996), Fracture in forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 56, 609-618.

B.Cotterell, J.K. Reddel, The essential work of plane stress fracture. *International Journal of Fracture* 13, 267–277 (1977).

Cristino, V. A., Martins, P. A. F. (2013), *Tecnologia Mecânica Vol 4 - Tecnologias da Deformação Plástica e Corte*, Escolar Editora, Lisboa, Portugal.

Embury J.D., Duncan J.L (1981), Formability maps, *Annual Review of Materials Science*, 11, 505-521.

Goodwin G. (1968), Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. SAE Technical Paper 680093.

Isik K., Silva M. B., Tekkaya A. E., Martins P. A. F. (2014), Formability limits by fracture in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 1557-65.

ISO 12004-2 (2008) – International Standard, Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of forming limit curves – part 2: Determination of forming-forming limit curves in the laboratory.

Jeswiet, J., Micar, F., Hirt, G., Bramley, A., Dufloy, J., Allwood, J. (2005), *Asymmetric single point incremental forming of sheet metal*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54, pp. 623–650.

Jeswiet, J., Young, D. (2005), Forming limit diagrams for single-point incremental forming of aluminium sheet, *Journal of Engineering Manufacture*, 219, 359-364.

Keeler S. P. (1968), Circular Grid System – A valuable aid for evaluating sheet metal formability, SAE paper N°680092.

Li Y., Luo M., Gerlach J, Wierzbicki T. (2010), Prediction of shear-induced fracture in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 1858 – 1869.

Madeira, T., Silva, C.M.A., Silva, M.B., Martins, P.A.F. (2014), Failure in single point incremental forming, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

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, pp.112-123.

Martins, P. A. F., Montanari, L., Cristino V.A., Silva, M.B. (2014), Formability and Simulative Tests in Modern Sheet Metal Forming Education. Modern Mechanical Engineering – Materials Forming, Machining and Tribology: *Springer*, pp.411-447.

McClintock, F.A. (1968), A criterion for ductile fracture by the growth of holes, *Journal of Applied Mechanics - Transactions ASME*, 35, 363-371.

Muscat-Fenech C. M., Arndt S., Atkins A. G. (1996), The determination of fracture forming limit diagrams from fracture toughness, *4th International Sheet Metal Conference*, University of Twente, The Netherlands, 1, 249-260.

Rodrigues J. M. C., Martins P.A.F. (2010), *Tecnologia Mecânica*, Escolar Editora.

Silva M. B., Skjoedt M., Atkins A. G., Bay N., Martins P. A. F. (2008), Single point incremental forming and formability/failure diagrams, *Journal Strain Analysis in Engineering Design*, 43, 15–36.

Silva M. B., Nielsen P. S., Bay N., Martins P. A. F. (2011), Failure mechanisms in single point incremental forming of metals, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56, 893-903.

Soeiro, J.M., Silva, C.M., Silva, M.B., Martins, P.A.F. (2014), Revisiting the formability limits by fracture in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*.

Young D., Jeswiet J. (2004), Wall Thickness Variations in single Point Incremental Forming, *Journal of Engineering Manufacture*, 217 B11, 1571-1581.