



ACADEMIA MILITAR

Metodologia para a aplicação de estampagem incremental na manutenção de componentes de chapa metálica

Autor: Alferes de Material Bernardo dos Anjos Colaço

Orientador: Professor Doutor João Pedro Grossa Magrinho

Coorientador: Tenente-Coronel Énio Chambel

Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica Militar

Lisboa, outubro de 2023



ACADEMIA MILITAR

Metodologia para a aplicação de estampagem incremental na manutenção de componentes de chapa metálica

Autor: Alferes de Material Bernardo dos Anjos Colaço

Orientador: Professor Doutor João Pedro Grossa Magrinho

Coorientador: Tenente-Coronel Énio Chambel

Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica Militar

Lisboa, outubro de 2023

AGRADECIMENTOS

Desejo deixar um agradecimento geral a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

Ao professor João Magrinho, orientador desta dissertação, por todo o conhecimento científico transmitido, assim como pela constante e paciente disponibilidade que sempre teve ao longo deste processo.

Ao Tenente-Coronel Énio Chambel, coorientador desta dissertação, pelo apoio prestado nas mais diversas situações que contribuíram para que o projeto pudesse ser concluído.

À professor Beatriz Silva, pelo conhecimento e apoio prestado ao longo deste período.

Ao projeto MPPrototype, pelo financiamento e matéria-prima fornecidos.

Ao Senhor Farinha e ao João Viegas, pelo auxílio e disponibilidade.

À Unidade de Apoio Geral de Material do Exército (UAGME), na pessoa do seu Comandante, assim como ao Capitão Vermelho, por me terem recebido e fornecido todo o material e equipamento necessário à realização deste projeto.

Ao Tenente Machado e ao Professor Hugo Rebelo, pelo apoio e disponibilidade fornecidos neste período.

Aos senhores Paulo Afonso e João Pinheiro, pelo constante apoio, disponibilidade, partilha de conhecimento e bons momentos passados no Centro de Manutenção da UAGME. Um sincero obrigado.

Aos meus amigos mais próximos, pela amizade, apoio e bons momentos passados.

Aos meus camaradas de curso, pela camaradagem, apoio, motivação e bons momentos passados ao longo destes anos. Foi um prazer fazer este percurso ao vosso lado.

À Luísa Freitas, por ter sido a pessoa extraordinária que é, e por toda a cumplicidade e entreaajuda que nos fez ultrapassar todos os obstáculos com que nos deparámos.

Ao meu irmão, que apesar de longe, nunca deixou de me apoiar, ajudar e ensinar ao longo dos anos, contribuindo sempre para a pessoa que sou hoje. Obrigado, Diogo.

Aos meus pais, que foram o pilar constante de todo este processo e sem o qual eu nunca seria capaz de chegar onde cheguei, estando sempre presentes nos bons e nos maus momentos e contribuindo constantemente para o meu sucesso. Obrigado pelo vosso amor e dedicação.

RESUMO

A estampagem incremental é um processo de deformação de chapa caracterizado pela sua flexibilidade e facilidade de utilização, sem a necessidade de ferramentas ou máquinas dedicadas. Por este motivo, tem merecido a atenção da indústria como sendo uma potencial solução no que toca à produção de pequenos lotes de peças e prototipagem, visto que a produção de lotes destas dimensões através de outros processos é economicamente inviável devido ao desequilíbrio entre os recursos gastos para a produção de ferramentas dedicadas e os lucros realizados ou gastos evitados pela produção desse lote de peças.

Tendo em consideração a elevada necessidade de produção de sobressalentes de peças em chapa do Exército Português, é de todo o interesse adaptar esta tecnologia à manutenção de componentes desta instituição. Por esse motivo, o principal objetivo deste trabalho prende-se com o estudo da viabilidade de aplicação deste processo tecnológico nesse mesmo sistema de reabastecimento e manutenção do Exército Português.

Para isto, o trabalho contempla uma secção onde é caracterizado mecanicamente e a nível de enformabilidade o material utilizado, fazendo a descrição de todo o processo desde a preparação de provetes, realização de ensaios, aquisição de dados e análise de resultados.

Por fim é realizada a aplicação do processo de estampagem incremental num caso prático de interesse, nomeadamente a produção de um componente constituinte de uma viatura militar.

Palavras-chave: Manutenção, chapa metálica, estampagem incremental, limites de enformabilidade, fratura

ABSTRACT

Single point incremental forming is a sheet metal forming process characterized by its flexibility and ease of use, without the need for dedicated tools or machinery. For this reason, it has gained the industry's attention as a potential solution when it comes to producing small batches of parts and prototyping, seeing as the production of these small batches through means of other processes is economically unfeasible due to the imbalance between the resources spent to produce dedicated tools and the profit made or avoided losses through the production of those batches of parts.

Considering the Portuguese Army's high need of spare sheet metal parts production, it is of great interest to adapt this technology to the maintenance of components for this institution. Therefore, the main objective of this work is to study the feasibility of applying this technological process to the Portuguese Army's maintenance and supply chain.

To demonstrate this, the following work includes a section where the material used is characterized both mechanically and in terms of its formability, describing the entire process from preparing the specimens, carrying out tests, acquiring data and analyzing the results.

Finally, the single point incremental forming process is applied to a practical case of interest, namely, the production of a component from a military vehicle.

Keywords: Maintenance, sheet metal, single point incremental forming, formability limits, fracture

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS	xvii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE	3
2.1. Enformabilidade	6
2.1.1. Limites de enformabilidade	9
2.1.2. Determinação dos limites de enformabilidade	11
2.2. Parâmetros do processo	19
2.3. Aplicações industriais.....	24
2.3.1. Indústria automóvel e aeronáutica.....	25
2.3.2. Aplicações médicas	27
2.3.3. Design, arquitetura e outros.....	29
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1. Caraterização mecânica	31
3.1.1. Preparação dos provetes	31
3.1.1.1. Corte dos provetes	31
3.1.1.2. Marcação dos provetes.....	33
3.1.1.3. Tratamento térmico.....	35
3.1.2. Ensaio realizados.....	36
3.1.2.1. Ensaio de tração	36
3.1.2.2. Ensaio de Bulge	37
3.1.3. Métodos de medição.....	39
3.1.3.1. Medição das extensões no plano.....	39
3.1.3.2. Medição de espessuras.....	42
3.1.4. Resultados.....	42

3.2.	Caraterização de enformabilidade	45
3.2.1.	Ensaio realizado.....	45
3.2.1.1.	Ensaio Nakajima	46
3.2.1.2.	Ensaio double-notched tension (DNT).....	46
3.2.1.3.	Ensaio double-notched shear (DNS)	47
3.3	Estampagem incremental	48
3.3.1	Ensaio realizado/Plano de ensaios.....	49
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		53
4.1	Limites de enformabilidade.....	53
4.1.1.	Ensaio convencional.....	53
4.1.2.	Estampagem incremental.....	55
4.2	Rugosidades	61
4.3	Peça industrial	63
4.3.1.	Seleção da peça.....	63
4.3.2.	Modelação e programação.....	64
4.3.3.	Produção de estrutura para ensaios.....	65
4.3.4.	Produção de protótipos	66
4.3.5.	Avaliação dos níveis de enformabilidade da peça.....	70
4.3.6.	Finalização e instalação da peça.....	73
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....		77
BIBLIOGRAFIA		79
Anexo A – Ferramenta de 8mm		i
Anexo B – Ferramenta de 12mm.....		iii
Anexo C – Estrutura para a peça final		v

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do processo típico de estampagem incremental.	4
Figura 2 – Diferentes variações do processo de estampagem incremental.	5
Figura 3 – Representação esquemática das diferentes trajetórias de deformação características de chapas, no plano das extensões principais.	7
Figura 4 – Representação esquemática dos limites de enformabilidade propostos por Marciniak.	8
Figura 5 - Modos de fratura segundo a mecânica da fratura: (a) Modo I, (b) Modo II e (c) Modo III.	9
Figura 6 – Representação esquemática das diferentes trajetórias de deformação em chapa.	12
Figura 7 – Resultados obtidos por Isik et al. (2014) através do uso de ensaios de estampagem incremental.	15
Figura 8 – Representação esquemática da (a) medição de círculos na superfície do provete, utilizando a câmara digital, (b) deformação típica da grelha de círculos, resultando numa elipse e (c) interpolação utilizada para a determinação das deformações do círculo correspondente à fratura.	16
Figura 9 – (a) Padrão de marcação utilizado nos ensaios medidos por sistema de Correlação Digital de Imagens e (b) Esquema da metodologia desenvolvida por Martínez-Donaire et al. (2014).	17
Figura 10 – Espessura dos provetes correspondentes aos ensaios de (a) tração e (b) Bulge.	18
Figura 11 – Esquema representativo da evolução do ângulo máximo de estampagem e do rácio de triaxialidade de tensões em função da variação do raio da ferramenta em ensaios de estampagem incremental de geometrias de referência.	20
Figura 12 – Representação esquemática de trajetórias (a) convencionais e (b) em espiral.	23
Figura 13 – Trajetória (a) convencional ou de incremento constante e (b) de scallop ou de incremento variável.	24
Figura 14 – Aplicações do processo de estampagem incremental na indústria automóvel: (a) símbolo da marca Ford, (b) capô do carro Honda S800, comparação entre (c) modelo comercial do carro Toyota iQ e (d) modelo de edição especial Toyota iQ-GRMN Super Charger.	26

Figura 15 - Aplicações do processo de estampagem incremental na indústria automóvel: (a) proteção para a cadeia cinemática de um veículo, (b) cobertura exterior dos faróis traseiros de um veículo, (c) secção do guarda-lamas de um veículo e (d) cobertura de um escape. .	27
Figura 16 - Aplicações do processo de estampagem incremental na indústria médica: (a) prótese para clavícula em titânio de grau 2, (b) implante craniano, (c) apoio externo para a articulação do tornozelo e (d) prótese dentária.....	28
Figura 17 - Aplicações do processo de estampagem incremental na área do design, arquitetura e outros: (a) painel artístico, (b) banco simples, (c) superfície com padrão que promove a coleção de água a partir de nevoeiro e (d) contentor central de um forno solar.	30
Figura 18 – Layout dos provetes no espaço útil da chapa.	32
Figura 19 – (a) Guilhotina e (b) máquina de corte por jato de água WAZER.	33
Figura 20 – (a) Grelha de círculos e (b) Máquina de marcação ME96 da marca UMS.....	34
Figura 21 – (a) Proвете de Nakajima fraturado pelo encostador da máquina de ensaios e (b) forno Instron SFL 3186K.	35
Figura 22 – Máquina universal de ensaios Instron 5900R.	36
Figura 23 – Máquina de ensaios Erichsen 145-60.....	38
Figura 24 – Câmara do sistema de medição 3Com Home Connect.	39
Figura 25 – Microscópio ótico Mitutoyo TM.....	40
Figura 26 – Sistema de Correlação Digital de Imagens Dantec Dynamics Q-400 3D.....	41
Figura 27 – Representação de um exemplo da seleção de pontos realizada para a aplicação da metodologia dependente do tempo de Martínez-Donaire et al. (2014)	42
Figura 28 – Curvas de comportamento do material obtidas pelo modelo de Ludwik-Hollomon, a partir de ensaios de tração e ensaios Bulge.	44
Figura 29 – Forno Hobersal HCV-42.	48
Figura 30 – Centro de maquinagem Leadwell V40.....	49
Figura 31 – Modelos de estruturas para ensaios de estampagem incremental para geometrias (a) cónicas truncadas e (b) piramidais truncadas; (c) ferramentas hemisféricas.	49
Figura 32 - Desenho técnico da secção das geometrias de referência utilizadas nos ensaios de estampagem incremental.....	50
Figura 33 – Acabamento superficial (a) antes da alteração do código G e (b) após a alteração do código G.	52
Figura 34 - Limites de enformabilidade obtidos a partir dos ensaios convencionais.....	54

Figura 35 – Comparação dos valores de ângulo máximo de estampagem entre os provetes de cada grupo de ensaios.	55
Figura 36 - Fraturas ocorrentes em provetes de geometria piramidal	56
Figura 37 – Comparação entre resultados obtidos de ensaios de estampagem incremental em geometrias cónicas utilizando valores de incremento vertical de 0,2mm e 0,5mm.	57
Figura 38 - Comparação entre resultados obtidos de ensaios de estampagem incremental em geometrias piramidais utilizando valores de incremento vertical de 0,2mm e 0,5mm.	57
Figura 39 - Comparação entre resultados obtidos de ensaios de estampagem incremental utilizando ferramentas de 8mm e 12mm de diâmetro.	58
Figura 40 - Dano causado na superfície dos provetes realizados com ferramenta de 8mm.	59
Figura 41 - Comparação entre resultados obtidos de ensaios de estampagem incremental utilizando avanços de ferramenta de 700mm/min e 1000mm/min.....	60
Figura 42 – Curva limite de fratura obtida a partir dos resultados correspondentes ao conjunto de ensaios de estampagem incremental realizados.....	61
Figura 43 – (a) Equipamentos MarSurf M300 e MarSurf RD18, da marca Mahr e (b) procedimento de medição de rugosidades.	62
Figura 44 – (a) Viatura HMMWV e (b) cobertura de diferencial da viatura HMMWV.....	64
Figura 45 – Modelo CAD da cobertura de diferencial da viatura HMMWV obtido através do scanner 3D e com alterações aplicadas.....	65
Figura 46 – (a) Modelo CAD da estrutura utilizada para a produção da peça final e (b) estrutura utilizada para a produção da peça final.	66
Figura 47 – Primeira iteração do processo de produção da peça final.	67
Figura 48 – Detalhe correspondente à primeira iteração do processo de produção da peça final.....	68
Figura 49 – (a) Lado interior e (b) lado exterior da segunda iteração do processo de produção da peça final.....	68
Figura 50 - Terceira iteração do processo de produção da peça final.	69
Figura 51 – (a) Modelação CAD da peça a realizar e (b) quarta iteração do processo de produção da peça final.....	70
Figura 52 – Representação esquemática das zonas da peça em que foram realizadas medições de deformação.....	71
Figura 53 – Medições de deformação obtidas a partir da peça final produzida comparadas à CLF obtida por ensaios convencionais.	72

Figura 54 - Medições de deformação obtidas a partir da peça final produzida comparadas à CLF obtida por ensaios de estampagem incremental.	73
Figura 55 - Peça industrial finalizada.	74
Figura 56 - Diferentes perspetivas da montagem da peça produzida na viatura HMMWV.	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Estados de tensão e extensão dos ensaios convencionais.....	13
Tabela 2 – Dimensões dos provetes de ensaio de tração.....	37
Tabela 3 – Dimensões dos provetes de ensaio Bulge.....	38
Tabela 4 – Resultados obtidos correspondentes às propriedades mecânicas do material. ..	43
Tabela 5 – Dimensões dos provetes de ensaio de Nakajima.	46
Tabela 6 – Dimensões dos provetes de ensaio DNT.	47
Tabela 7 – Dimensões dos provetes de ensaio DNS.	48
Tabela 8 – Plano de ensaios relativo aos ensaios de estampagem incremental.....	51
Tabela 9 – Resultados obtidos da medição de rugosidades realizada nos provetes dos ensaios de estampagem incremental.....	62
Tabela 10 – Parâmetros escolhidos para a realização da peça final.	65

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

3D – Tridimensional

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAD – Design assistido por computador (*Computer Aided Design*)

CAM – Produção assistida por computador (*Computer Aided Manufacturing*)

CDI – Correlação Digital de Imagens

CLE – Curva Limite de Estampagem

CLF – Curva Limite de Fratura

CLFC – Curva Limite de Fratura ao Corte

CNC – Controlo Numérico Computadorizado

DNS – Duplo entalhe ao corte (*Double-notched shear*)

DNT – Duplo entalhe à tração (*Double-notched tensile*)

DPIF – Estampagem incremental de duas ferramentas (*Duplex Incremental Forming*)

DPIF-L – Estampagem incremental de duas ferramentas com suporte local (*Duplex Incremental Forming with local support*)

DPIF-P – Estampagem incremental de duas ferramentas com suporte periférico (*Duplex Incremental Forming with peripheral support*)

EFW – Trabalho essencial de fratura (*Essential Work of Fracture*)

F3T – *Ford Freeform Fabrication Technology*

HMMWV – *High Mobility Multipurposed Wheeled Vehicle*

INMA – *Innovative Manufacturing of complex Ti sheet components*

ISO – *International Organization for Standardization*

IST – Instituto Superior Técnico

NOF – Núcleo de Oficinas

O – Tratamento térmico de recozimento

SPIF – Estampagem incremental de um ponto (*Single Point Incremental Forming*)

T6 – Tratamento térmico de solubilização, têmpera e envelhecimento

TPIF – Estampagem incremental de dois pontos (*Two Point Incremental Forming*)

UAGME – Unidade de Apoio Geral de Material do Exército

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos latinos

- A – Alongamento após fratura
 a – Dimensão do maior eixo de simetria da elipse
 b – Dimensão do menor eixo de simetria da elipse
 d – Diâmetro inicial dos círculos da grelha
 d_0 – Diâmetro inicial
 E – Módulo de Young
 K – Coeficiente de resistência do material
 l_0 – Comprimento inicial
 n – Expoente de encruamento do material
 q – Parâmetro microestrutural
 R_a – Rugosidade média
 R_q – Desvio médio quadrático da rugosidade
 R_z – Altura máxima entre pico e vale
 r – Coeficiente de anisotropia
 \bar{r} – Anisotropia normal
 r_0 – Raio inicial
 r_{tool} – Raio da ferramenta
 s – Constante de distorções máximas no plano
 t – Espessura da chapa
 t_0 – Espessura inicial
 t_f – Espessura após fratura
 w – Largura do provete

Símbolos gregos

- β – Inclinação da trajetória de deformação
 Δr – Anisotropia planar
 ε – Extensão verdadeira
 ε_1 – Maior extensão principal no plano
 ε_2 – Menor extensão principal no plano
 ε_3 – Extensão principal normal ao plano

ε_f – Extensão na fratura

$\varepsilon_{\text{espessura}}$ – Extensão na direção da espessura

$\varepsilon_{\text{largura}}$ – Extensão na direção da largura

σ – Tensão verdadeira

σ_1 – Tensão na direção principal 1

σ_2 – Tensão na direção principal 2

σ_3 – Tensão na direção principal 3

σ_c – Tensão de cedência

σ_m – Tensão média

σ_r – Tensão de rotura

$\bar{\sigma}$ – Tensão efetiva

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O processamento convencional de chapa é maioritariamente realizado através da aplicação do processo tecnológico de estampagem, processo este que envolve a utilização de punções e matrizes dedicados a cada operação. Isto faz com que este processo se torne apenas viável quando tem como objetivo a produção em larga escala, de forma que exista uma compensação monetária e de tempo superior aos recursos gastos na produção dos punções e matrizes dedicados, através da comercialização dos componentes produzidos. Deste modo, a produção em pequena escala e até mesmo a prototipagem de componentes em chapa metálica torna-se economicamente impossível, o que veio motivar o desenvolvimento de processos de deformação de chapa de cariz incremental, como é o caso da estampagem incremental. Este processo consiste na aplicação de deformações incrementais numa chapa através do uso de uma ferramenta com ponta esférica ou hemisférica, controlada por um sistema computadorizado, como os sistemas de Controlo Numérico Computadorizado (CNC). A ferramenta segue então uma trajetória periférica relativamente à geometria a produzir, sendo que a cada ciclo da trajetória periférica completo é incrementada a posição da ferramenta no sentido da chapa, provocando assim pequenas deformações em cada nível de cota, até que seja atingida a geometria final pretendida. Para além de não necessitar de ferramentas dedicadas, o processo possui uma elevada flexibilidade, sendo apenas limitado pelo número de graus de liberdade da ferramenta e pela dimensão da área de trabalho da máquina-ferramenta que controla o processo.

O sistema de reabastecimento e manutenção do Exército Português lida com uma quantidade considerável de componentes em chapa metálica com as mais variadas geometrias, que constituem viaturas ou sistemas de armas que são utilizados em ambientes e condições que potenciam a ocorrência de acidentes e consequente falha ou destruição destes componentes. Para dar resposta a estes incidentes e garantir a manutenção dos equipamentos, o Exército, que não tem capacidade de produção de componentes deste tipo e em pequena escala de forma rentável, é obrigado a recorrer à compra externa destes componentes, o que acaba por consumir bastantes recursos monetários e tempo útil de funcionamento dos equipamentos, comparativamente a um cenário em que possuísse capacidade de aplicação de estampagem incremental.

Considerando estes factos, a presente dissertação, tem como objetivo o estudo da aplicação de estampagem incremental no ambiente militar, com o intuito de criar uma alternativa à compra destes componentes, tornando o Exército Português numa entidade

autossuficiente no que toca à manutenção de peças em chapa metálica, em lotes de pequenas dimensões.

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos distintos, sendo que a presente introdução constitui o primeiro.

O Capítulo 2 – Estado da Arte aborda, inicialmente, o conceito de estampagem incremental, em todas as suas formas. Em seguida, é abordado o tema de enformabilidade de chapa, onde são explicados os limites que determinam o aparecimento de fenómenos como a estricção e fratura, assim como os procedimentos e metodologias utilizados para a sua determinação, nomeadamente, os ensaios que devem ser realizados e as metodologias de determinação de extensões. Após isto são descritos em detalhe os parâmetros que regem o processo de estampagem incremental, assim como o efeito da variação destes no produto final. Por fim, é feita uma exposição de diferentes casos práticos onde a estampagem incremental foi implementada com sucesso.

No Capítulo 3 – Materiais e métodos é descrito, inicialmente, o processo de caracterização mecânica e após isto a caracterização de enformabilidade. Em ambos os subcapítulos são descritos os métodos e procedimentos de corte, marcação e tratamento térmico utilizados nos provetes ensaiados, assim como uma descrição de cada provete, procedimento do respetivo ensaio, plano de ensaios e, por fim, a exposição dos métodos e equipamentos utilizados para as medições necessárias. Os resultados relativos à caracterização mecânica são também apresentados no respetivo subcapítulo.

O Capítulo 4 – Resultados e Discussão inicia com a exposição dos limites de enformabilidade determinados a partir dos resultados obtidos nos ensaios convencionais, e em seguida é realizada uma comparação entre estes limites e os resultados obtidos em ensaios de estampagem incremental. É também determinada a influência da variação dos valores representativos dos parâmetros de processo, de forma a identificar qual a melhor combinação de parâmetros a aplicar. Em seguida, é realizada uma análise ao acabamento superficial produzido por cada combinação de parâmetros e, por fim, é realizada a descrição completa da aplicação de estampagem incremental num caso prático de interesse.

Por fim, o Capítulo 5 – Conclusões e Trabalho futuro expõe as principais conclusões obtidas através da realização deste trabalho, assim como sugestões de trabalho futuro que possam dar continuidade a esta investigação.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é abordada a temática relativa ao processo de estampagem incremental, desde a descrição do processo em si, passando pelos seus parâmetros limitativos e de processo, e terminando nas suas possíveis aplicações industriais.

Com o desenvolvimento tecnológico da indústria nas últimas décadas aliado à necessidade de existência de métodos de produção de pequenos lotes de peças, veio promover a necessidade de serem desenvolvidos processos mais flexíveis e economicamente competitivos para deformação de chapas, para que deste modo pudessem ser produzidos lotes mais pequenos de peças, sem que houvesse a necessidade de serem produzidas ferramentas e matrizes específicas para essas peças, pois estes são componentes que tornam os processos dispendiosos e com um tempo de produção muito significativo. Desta forma, desenvolveu-se o que é atualmente a estampagem incremental, que permite a deformação de chapas de uma forma ágil, flexível e económica.

O processo de estampagem incremental consiste numa série de deformações incrementais impostas sobre uma chapa (Figura 1). Estas deformações são realizadas através do uso de uma ferramenta de ponta esférica ou hemisférica acoplada a algum sistema que possa ser controlado numericamente por computador, como um centro de maquinaria CNC ou até mesmo um braço robótico. É definida uma trajetória que visa cobrir toda a superfície da peça a ser produzida, sendo que esta trajetória é definida ao longo da periferia da geometria da peça e, a cada ciclo completo dessa mesma trajetória periférica, é feito um incremento na posição da ferramenta perpendicularmente ao plano da chapa, de modo que esta seja deformada aos poucos em cada um desses ciclos. Esta incrementação de posição da ferramenta é repetida conjuntamente com a passagem da ferramenta na periferia da geometria até que seja atingida a geometria final da peça pretendida.

Segundo Jeswiet et al. (2005b), comparativamente ao método de estampagem convencional, este método apresenta algumas vantagens e desvantagens distintas. Entre as vantagens, destacam-se a rapidez do processo, quando contabilizado todo o tempo desde o aparecimento de necessidade de uma peça até que é produzida uma peça de substituição, e o custo reduzido no processo de produção de protótipos e pequenos lotes de peças. Além disso, não são necessárias ferramentas ou equipamentos especializados, sendo possível utilizar equipamentos versáteis, como centros de maquinaria ou braços robóticos, juntamente com ferramentas universais que podem ser aplicadas em diferentes projetos, independentemente da geometria da peça a produzir. A flexibilidade é outra característica notável deste método,

uma vez que permite a fabricação de peças diretamente a partir de desenhos CAD (*Computer Aided Design*), facilitando a implementação de alterações rápidas e eficazes. Este método permite também a produção de peças simples ou extremamente complexas, sendo que a dimensão da peça é apenas limitada pela dimensão da área de trabalho da máquina-ferramenta utilizada. Além disso, devido à natureza incremental e à deformação localizada do processo, é possível alcançar deformações substanciais sem que haja a ocorrência de fenômenos mecânicos indesejados na chapa.

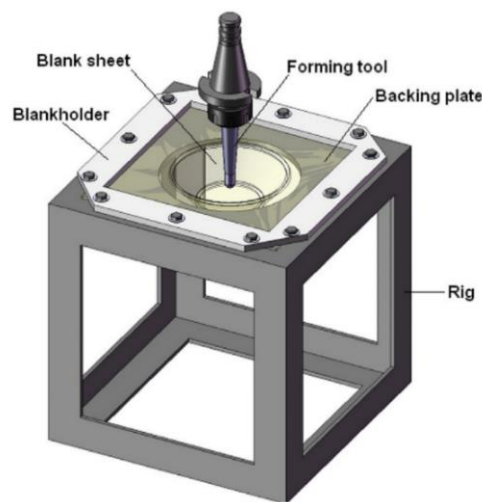


Figura 1 – Representação esquemática do processo típico de estampagem incremental.

Fonte: Magrinho et al. (2022)

Por outro lado, há também desvantagens a considerar. Este método é mais adequado para pequenos lotes de peças e protótipos, ficando a sua eficácia limitada em produções de larga escala devido ao facto de o processo em si, nomeadamente, a deformação da chapa até à geometria final pretendida, ser um processo demorado e impraticável quando são necessárias várias peças. Para produzir formas com ângulos retos, é necessário aplicar uma estratégia de múltiplas passagens, o que aumenta o tempo necessário para a estampagem para além da já elevada duração do processo, em comparação com a estampagem convencional. Além disso, a precisão geométrica deste método é inferior quando comparada a outros processos como a estampagem convencional, assim como quando comparada a outros processos de deformação incremental de chapas, como o fluo-torneamento (Rodrigues e Martins, 2010).

Segundo Meier et al. (2011), é possível fazer distinção entre três tipos de estampagem incremental, sendo eles a estampagem incremental de um ponto, ou sem matriz (SPIF), a

estampagem incremental de dois pontos, ou com matriz (TPIF) e a estampagem incremental de duas ferramentas (DPIF) (Figura 2). Apesar de cada um dos tipos possuir pequenas diferenças entre eles, todos necessitam de uma estrutura na qual é presa a chapa, uma máquina-ferramenta CNC e uma ferramenta para aplicar a deformação, sendo que em certos casos é possível também utilizar uma placa espera, componente este que tem como função garantir uma melhor deformação da chapa no início do processo (Jeswiet et al., 2008).

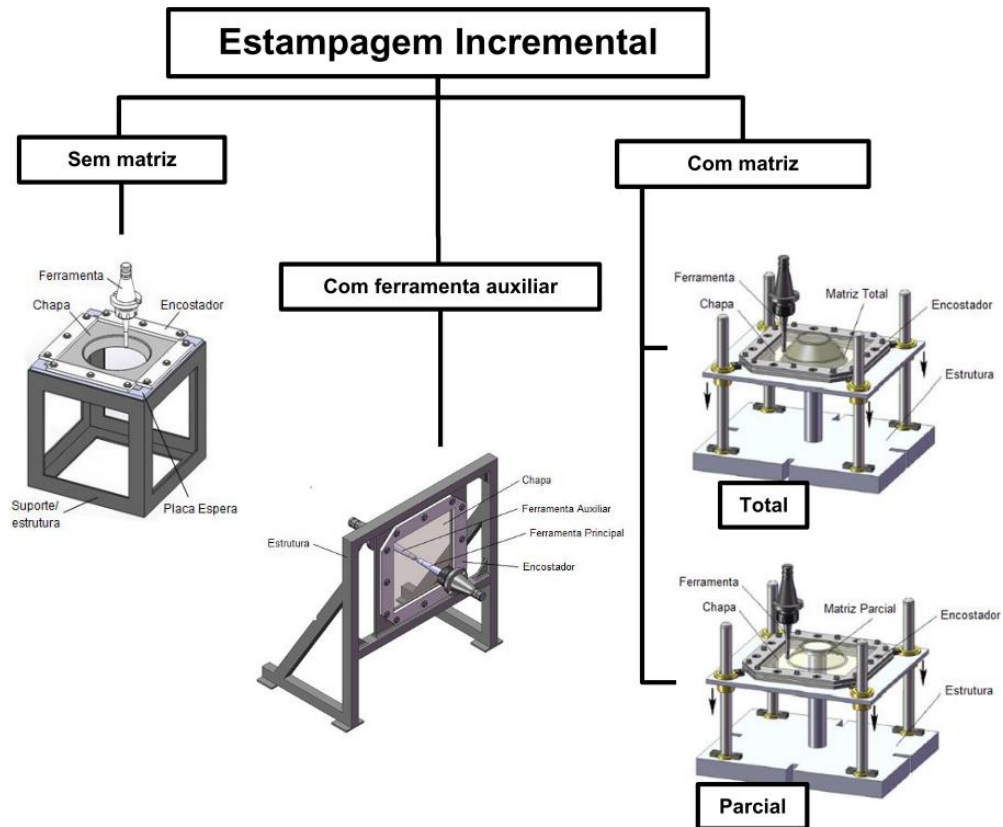


Figura 2 – Diferentes variações do processo de estampagem incremental.

Fonte: Soeiro (2014)

Na estampagem incremental de um ponto (SPIF) é utilizada uma estrutura fixa na qual a chapa é presa utilizando encostadores, sendo que em alguns casos é também utilizada uma placa espera, e a chapa é deformada através do uso de uma ferramenta com ponta esférica ou hemisférica, que descreve o contorno da geometria pretendida (Jeswiet et al., 2008; Magrinho et al., 2022).

Quanto à estampagem incremental de dois pontos (TPIF) é utilizada uma estrutura amovível, que se desloca no sentido dos incrementos da ferramenta à medida que são

impostas as deformações na peça, para que esta esteja constantemente em contacto com a matriz (Jeswiet et al., 2005b). Neste caso específico, a área de trabalho da ferramenta é no lado exterior da peça, pois no lado interior da peça é onde se encontra a matriz. Esta matriz pode ser total ou parcial, sendo que uma matriz parcial apenas apoia partes específicas da geometria da peça e uma matriz total tem o formato completo da geometria da peça (Jeswiet et al., 2005b).

Por fim, na estampagem incremental de duas ferramentas (DPIF), o seu princípio de funcionamento é o mesmo que na estampagem incremental de um ponto, sendo que neste caso é utilizada uma segunda ferramenta no lado oposto da peça, que se move simetricamente à primeira ferramenta. Devido ao facto de serem utilizadas duas ferramentas com movimento em lados opostos da chapa, este processo não pode ser aplicado em equipamentos como centros de maquinagem, sendo apenas viável com a utilização equipamento com capacidade de utilizar ferramentas em ambos os lados da chapa, como por exemplo, dois braços robóticos controlados simultaneamente. Dentro deste tipo de estampagem incremental há ainda uma subdivisão em que num dos casos a ferramenta auxiliar acompanha a ferramenta de deformação apenas no exterior da peça, junto à zona de fixação da chapa, criando um apoio periférico (DPIF-P), e no segundo caso a ferramenta auxiliar acompanha a ferramenta de deformação diretamente no lado oposto a esta, criando um apoio local (DPIF-L) (Meier et al., 2011).

No caso específico deste projeto, apenas será abordado o caso da estampagem incremental de um ponto e com uso de placa espora.

2.1. Enformabilidade

Enformabilidade é o conceito utilizado para descrever o limite máximo de deformação que pode ser atingido num processo tecnológico de deformação plástica, sem que haja a ocorrência de macrobandas, estrições ou fissuras (Rodrigues e Martins, 2010).

As macrobandas são áreas específicas de deformação plástica extremamente intensa, que separam zonas com graus de deformação distintos e que comprometem a viabilidade de uso do componente mecânico onde ocorrem (Rodrigues e Martins, 2010). No entanto, e no contexto do presente projeto, não serão abordadas em profundidade como serão os limites à estrição e à fratura.

Em virtude dos diferentes processos de deformação plástica existentes e das diferentes formas de solicitar mecanicamente uma certa peça, quer por motivos de

geometria, ferramenta utilizada, entre outros, é possível obter estados de tensão distintos e, conseqüentemente, trajetórias de deformação distintas. Estas trajetórias de deformação são representadas no que se chama de plano das extensões principais, que, como o nome indica, é um espaço bidimensional quantificado pelas extensões principais, ε_1 e ε_2 . No caso de deformações em chapa, as trajetórias de deformação estão localizadas apenas na parte superior do plano das extensões principais, mais especificamente, no segundo e terceiro octantes deste plano (Rodrigues e Martins, 2010).

Considerando este facto, pode ser feita uma diferenciação dentro dos modos de deformação de chapa, podendo esta ocorrer por expansão ou por retração. Esta diferença deve-se principalmente à relação existente entre o encostador e a chapa, pois quando a chapa está completamente presa pelo encostador e não lhe é permitido nenhum movimento estamos perante uma deformação por expansão, mas, caso a chapa consiga ter algum grau de liberdade entre o encostador e a matriz já passa a ser considerada uma deformação por retração (Rodrigues e Martins, 2010). A diferença da localização destes casos no plano das extensões principais pode ser observada na Figura 3.

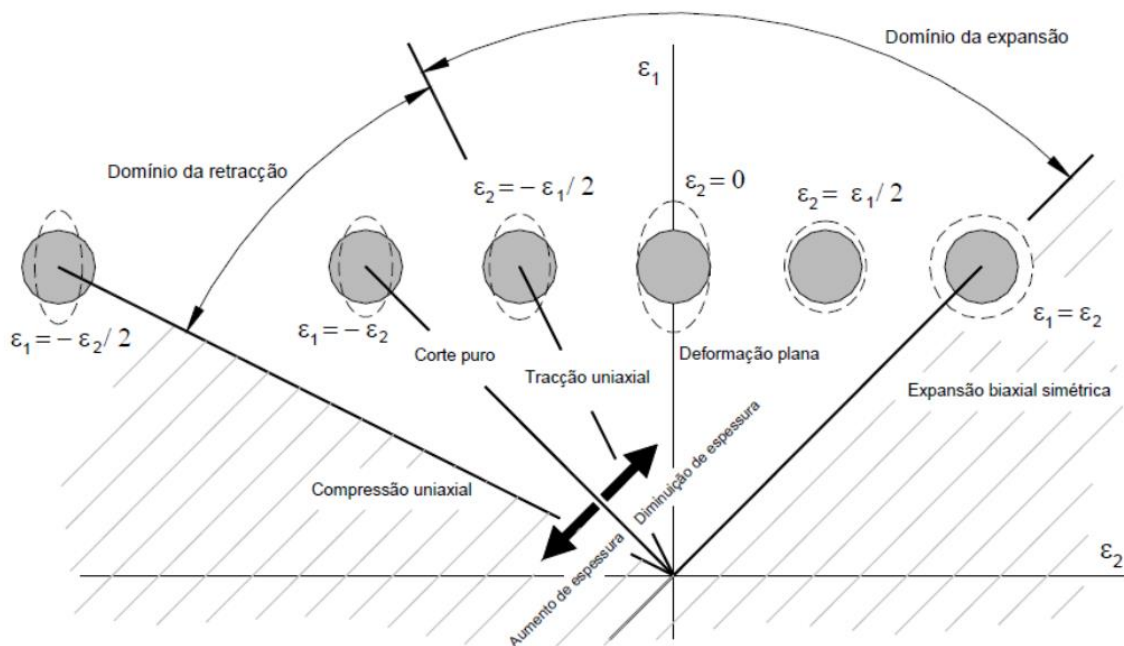


Figura 3 – Representação esquemática das diferentes trajetórias de deformação características de chapas, no plano das extensões principais.

Fonte: Rodrigues e Martins (2010)

Considerando a maior parte dos processos de deformação de chapa, quando solicitadas, as chapas vão seguir uma trajetória de deformação correspondente ao seu estado de tensão. Estes estados de tensão característicos, em deformação de chapa, são correspondentes às trajetórias de deformação representadas na Figura 3, e podem ser, da esquerda para a direita no plano das tensões principais, o corte puro ($\sigma_1 = -\sigma_2$), a tensão uniaxial ($\sigma_1 > 0 \wedge \sigma_2 = 0$), a deformação plana ($\sigma_2 = \sigma_1/2$) e a expansão biaxial ($\sigma_1 = \sigma_2$). Eventualmente, as deformações existentes na chapa vão chegar, primeiro, a um ponto em que sofrem os efeitos do fenômeno de estricção e, segundo, a outro ponto em que se inicia o fenômeno de fratura na chapa. É de notar que esta sequência de acontecimentos pode não ocorrer em todos os tipos de processo, especialmente, em processos de cariz incremental, mas para efeitos de introdução à temática de limites de enformabilidade vai ser considerada esta sequência. Quando realizados vários ensaios distintos, em vários tipos de trajetórias de deformação, é então possível unir os pontos obtidos para o material em estudo e para cada um dos fenômenos mencionados, formando assim curvas, às quais se dá os nomes de curva limite de enformabilidade (CLE), curva limite de fratura (CLF) e curva limite de fratura ao corte (CLFC).

Em relação ao eixo vertical, encontramos primeiramente a curva limite de estampagem (CLE), que possui uma forma em V e define os limites a partir dos quais ocorre o fenômeno de estricção localizada da chapa. Acima desta, encontramos a curva limite de fratura (CLF) e a curva limite de fratura ao corte (CLFC) que definem os limites de deformação a partir dos quais se inicia a fratura na chapa (Figura 4).

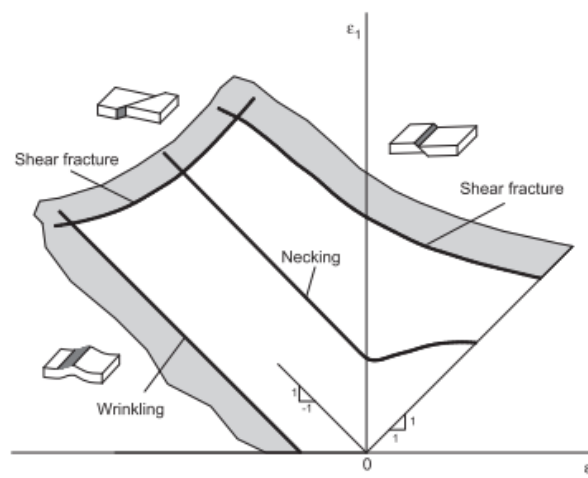


Figura 4 – Representação esquemática dos limites de enformabilidade propostos por Marciniak.

Fonte: Marciniak (1984)

A fratura em pode ocorrer segundo três modos, nomeadamente, o modo I da mecânica da fratura, em que esta ocorre em condições de tração dentro do plano da chapa, o modo II da mecânica da fratura, em que esta ocorre em condições de corte dentro do plano da chapa, e o modo III da mecânica da fratura, em que esta ocorre em condições de corte na direção da espessura da chapa. Estes modos encontram-se representados esquematicamente na Figura 5.

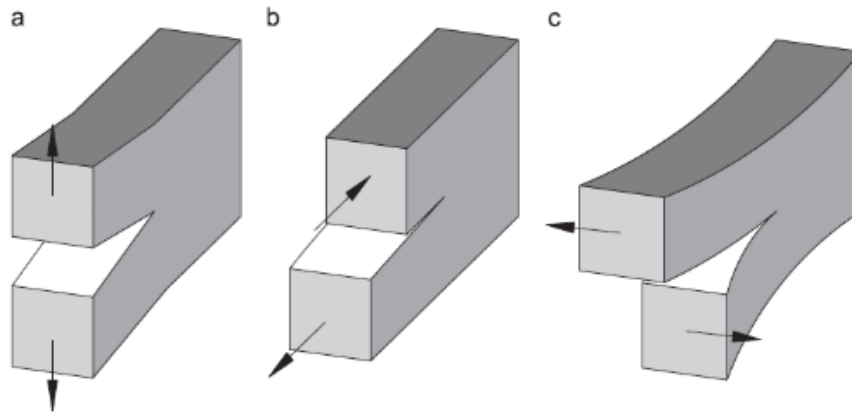


Figura 5 - Modos de fratura segundo a mecânica da fratura: (a) Modo I, (b) Modo II e (c) Modo III

Fonte: Martins et al. (2014a)

Apesar de tanto a CLF como a CLFC representarem os limites a partir dos quais ocorre a fratura no material, a curva limite de fratura ao corte (CLFC) difere da curva limite à fratura (CLF) no sentido em que o tipo de fratura representado pela CLFC ocorre predominantemente no modo II da mecânica da fratura, ou seja, em solicitações ao corte no mesmo plano da chapa. As fraturas representadas pela CLF ocorrem no modo I da mecânica da fratura, ou seja, à tração no plano da chapa. Quando traçadas, estas curvas formam o diagrama limite de enformabilidade.

2.1.1. Limites de enformabilidade

As primeiras publicações referentes ao diagrama limite de enformabilidade foram realizadas por Keeler (1968) e Goodwin (1968). Keeler (1966) publicou uma investigação referente à determinação dos limites de enformabilidade aplicada à indústria automóvel, na qual foram medidas as extensões de vários provetes deformados através do uso de um punção num processo de estampagem convencional. Posteriormente, fez uma outra publicação (Keeler, 1968), que veio complementar a anterior, sendo estas assim as primeiras

publicações acerca da CLE no primeiro quadrante do diagrama limite de enformabilidade, ou seja, no domínio da expansão. Goodwin (1968) veio então completar o trabalho realizado anteriormente, aplicando os mesmos princípios que o anterior autor, mas focando-se principalmente nas deformações por retração. Focou o seu estudo nas fraturas ocorrentes na zona lateral e do canto do cunho, o que produziu resultados que se encontravam predominantemente na zona à esquerda do eixo vertical do diagrama, estendendo assim a CLE ao segundo quadrante do diagrama.

Com o desenvolvimento da indústria, houve a necessidade de definir as CLE dos mais variados materiais e Embury e Duncan (1981) verificaram que em certos casos havia uma competição entre a CLE e a CLF de alguns materiais quando solicitados biaxialmente, visto que estes fraturavam sem aparecimento prévio de estricção. Isto fez com que passasse a haver uma maior necessidade de definir também a CLF no estudo da enformabilidade dos materiais.

Marciniak (1984) propôs então a existência de três limites distintos dentro do plano das extensões principais (Figura 4). Estes limites representam a ocorrência de estricção, a ocorrência de engelhamento e a ocorrência de fratura, sendo que este último, apesar de ser composto por duas curvas, representa em ambos os lados a ocorrência de fratura ao corte. Esta foi uma das primeiras publicações que representava limites semelhantes aos que são conhecidos atualmente (Martins et al., 2014a). Existem outras visões publicadas relativas aos limites de enformabilidade, mas para efeitos do presente trabalho apenas foi considerada a que foi apresentada.

Atkins (1996) veio mais tarde mostrar que a ocorrência de fratura pode ser relacionada com a redução de espessura crítica e o critério de fratura dúctil de McClintock (1968), critério este que avalia a acumulação de dano no material até serem atingidos valores críticos de fratura, relacionando a formação e dilatação de *voids* no material com o estado de tensões a que este está sujeito. Desta forma, Atkins (1996) sugeriu assim que a representação da ocorrência de fratura, em modo I da mecânica da fratura, no plano das extensões principais, ou seja, a CLF, fosse uma reta com declive de aproximadamente “-1” e definida pela equação,

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

em que q é o termo utilizado para definir os parâmetros microestruturais do material utilizado (Isik et al., 2014).

Com o aparecimento de novos processos de deformação plástica de chapa, tornou-se possível a obtenção de novos e variados resultados no que toca a esta temática. De entre estes novos processos, é de destacar a estampagem incremental, na qual se observou que é possível que ocorra fratura sem que antes ocorra o fenómeno de estrição, tendo sido também identificados os fatores influenciadores ótimos para que isto aconteça, no que toca ao rácio entre a espessura da chapa e o raio da ferramenta utilizada no processo (Silva et al., 2011). De entre estes fatores é de destacar o raio da ferramenta, pois o estudo feito por (Silva et al., 2011) mostrou que quanto maior o raio da ferramenta utilizada, maior é a probabilidade de ocorrer estrição. Estes resultados vieram comprovar os resultados previamente propostos por Silva et al. (2008), que afirmavam que a fratura com supressão da estrição é controlada pela CLF, e que o processo de estampagem incremental consegue produzir níveis de deformação maiores que os obtidos por outros processos de deformação convencionais. Considerando esta afirmação, é possível concluir que a determinação da CLF se tornou fulcral para conhecer a enformabilidade de um certo material, especialmente quando se estuda o processo de estampagem incremental.

Relativamente ao limite que representa a ocorrência de fratura ao corte, a CLFC, Isik et al. (2014) propuseram que esta fosse representada na forma de uma reta com declive “+1”, definida pela equação,

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = s \quad (2)$$

em que s representa as distorções máximas existentes no plano, fazendo assim com que esta curva seja então, teoricamente, perpendicular à CLF. A inclinação proposta é justificada pelo facto representar uma variação das extensões principais que mantém constante as distorções máximas existentes no plano (Isik et al., 2014). Esta curva veio então completar o trabalho realizado por Atkins (1996), ficando assim definidas ambas as curvas referentes à fratura dentro do plano das extensões principais.

2.1.2. Determinação dos limites de enformabilidade

Os limites de enformabilidade descritos na secção anterior, ou seja, a curva limite de estampagem (CLE), a curva limite de fratura (CLF) e a curva limite de fratura ao corte (CLFC), são tradicionalmente determinados utilizando ensaios convencionais, que solicitam o material de diferentes formas e com diferentes trajetórias de deformação, de modo que se

possam obter dados relativos às extensões principais, ε_1 e ε_2 , no instante em que ocorrem os fenômenos de estrição e fratura.

Os principais modos de deformação que é possível obter através de solicitações mecânicas em chapa são a expansão biaxial, a deformação plana, a tração uniaxial e o corte puro, sendo que cada um destes modos de deformação é definido por uma reta com inclinação característica no plano das extensões principais. Na Figura 6 é possível observar a representação destas trajetórias de deformação, sendo que β representa a sua inclinação.

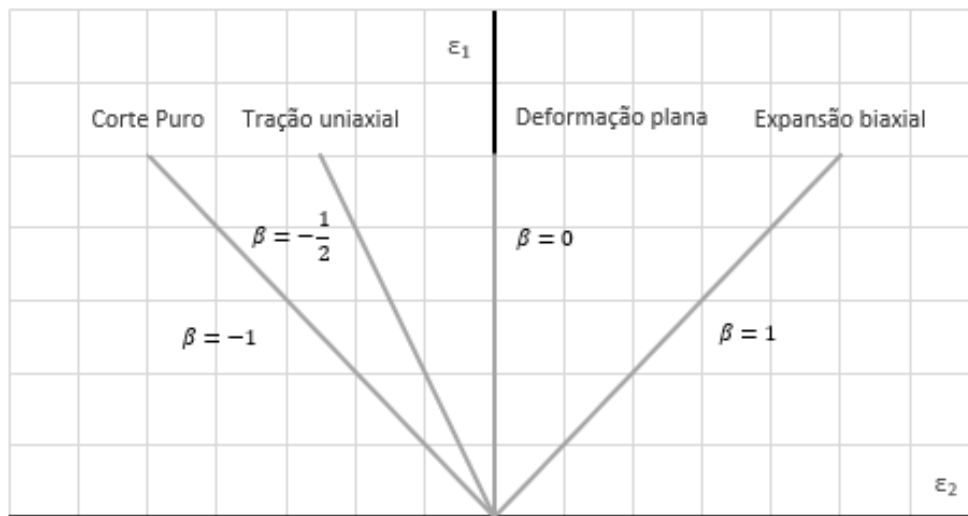
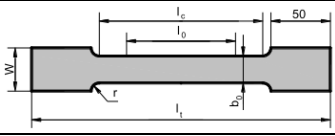
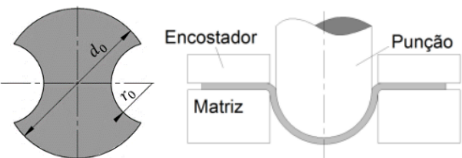
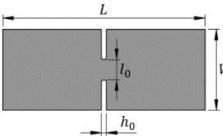
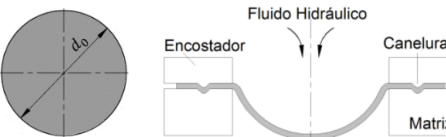
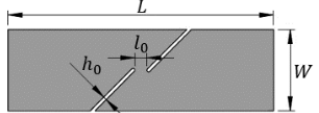


Figura 6 – Representação esquemática das diferentes trajetórias de deformação em chapa.

Os ensaios previamente referidos podem então ser separados em grupos correspondendo às diferentes solicitações que cada um aplica sobre o material. Esta divisão pode ser vista na Tabela 1.

O ensaio de tração é o ensaio mecânico mais frequentemente utilizado e tem como objetivo, principalmente, a determinação das propriedades mecânicas do material essenciais ao projeto, como o módulo de Young, tensões de cedência e rotura, alongamento após fratura e a lei do material. Este ensaio é, por norma, realizado consoante a norma ASTM Standard E8/E8M – 16a (2016) e consiste em aplicar no provete uma carga de tração, F , de tal modo que exista no provete um deslocamento imposto constante. Ao longo do ensaio é então registada a variação do comprimento de referência do provete, através do uso de extensómetros ou outro método de medição de extensões como o utilizado no presente trabalho, nomeadamente, um sistema de Correlação Digital de Imagens, e é também registada a evolução da força exercida pela máquina de ensaios (Rodrigues e Martins, 2010).

Tabela 1 – Estados de tensão e extensão dos ensaios convencionais.

Modo de deformação	Ensaio	Estado de extensão	Estado de tensão	Representação esquemática
Uniaxial	Tração	$\varepsilon_1 > 0$ $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 < 0$	$\sigma_1 > 0$ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$	
Deformação plana	Nakajima	$\varepsilon_1 \geq 0$ $-\frac{\varepsilon_1}{2} < \varepsilon_2 < \varepsilon_1$ $\varepsilon_3 < 0$	$\sigma_1 > \sigma_2 \geq 0$ $\sigma_3 = 0$	
	Double-notched tension (DNT)	$\varepsilon_1 > 0$ $\varepsilon_2 = 0$ $\varepsilon_3 < 0$	$\sigma_1 > 0$ $\sigma_2 < 0$ $\sigma_3 = 0$	
Biaxial	Bulge	$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 > 0$ $\varepsilon_3 < 0$	$\sigma_1 \geq \sigma_2 > 0$ $\sigma_3 = 0$	
Corte puro	Double-notched shear (DNS)	$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ $\varepsilon_3 = 0$	$\sigma_1 = -\sigma_2$ $\sigma_3 = 0$	

Fonte: Magrinho et al. (2019)

O ensaio Nakajima é um ensaio amplamente utilizado com o objetivo de se obterem dados necessários à determinação dos limites de enformabilidade dos materiais, devido à sua capacidade de se obterem diferentes trajetórias de deformação com pequenas variações de geometria nos provetes (Bergs et al., 2018). Este ensaio consiste numa solicitação de provetes semelhantes, mas com ligeiras diferenças geométricas, por meio de um punção hemisférico, sendo que os provetes são bloqueados na sua periferia e são deformados pelo punção numa direção normal ao plano da chapa (Magrinho, 2019), e é geralmente realizado consoante a norma ISO Standard 12004-2 (2008).

O ensaio de Bulge, ou ensaio de expansão biaxial, consiste na deformação de um provete através do uso de fluido hidráulico. A chapa é bloqueada em todo o seu perímetro, entre uma matriz e um encostador de geometria circular ou elíptica. O provete é depois deformado através de pressão hidráulica até que ocorra a sua fratura. O facto de a deformação ser causada por fluido hidráulico é a principal vantagem deste ensaio, pois não existe atrito entre o punção e o provete. Este ensaio é muito utilizado para caracterizar mecanicamente o material, pois as solicitações biaxiais são parte integrante da maior parte dos processos de

fabrico em chapa, e consegue também maiores níveis de extensão até à ocorrência de estricção do que os ensaios de tração, o que ajuda no processo de caracterização mecânica (Rodrigues e Martins, 2010).

O ensaio double-notched tension (DNT), ou ensaio de duplo entalhe à tração, foi originalmente desenvolvido por Cotterell e Reddel (1977) com o objetivo de testar a tenacidade à fratura de chapas metálicas em modo I da mecânica da fratura (Magrinho et al., 2019). Este ensaio é o mais indicado para aplicar a metodologia do Essential Work of Fracture (EWF) devido às simplificações que é possível fazer quando se atinge a cedência completa do ligamento (Frómata et al., 2019). Esta metodologia tem como objetivo a determinação da energia dissipada na zona de fratura em chapas, avaliando a sua resistência à ocorrência destas, e contém os contributos tanto da energia referente à iniciação de fratura como da sua propagação, permitindo a sua separação, o que acaba por distinguir esta metodologia das restantes. O ensaio tem os mesmos princípios de funcionamento do ensaio de tração, no sentido em que o provete é solicitado uniaxialmente em ambas as pontas e em sentidos opostos até que ocorra a sua fratura, sendo ao mesmo tempo medidas as suas deformações.

Por fim, o ensaio double-notched shear (DNS), ou ensaio de duplo entalhe ao corte, tem como objetivo a caracterização mecânica de chapas metálicas no que toca à sua resistência ao corte, ou seja, no modo II da mecânica da fratura (Magrinho et al., 2019). Apesar de haver outros ensaios com o mesmo objetivo deste no que toca à quantificação da resistência do material ao corte, como é o caso dos ensaios de torção no plano, este é frequentemente utilizado em detrimento dos outros devido à sua geometria de fácil produção e devido ao facto de este poder ser realizado no mesmo tipo de equipamentos e com o mesmo tipo de amarração que os ensaios de tração. Isto faz também com que a geometria do provete tenha de ser o principal promotor da sollicitação em regime de corte pretendida para este ensaio, sendo isto garantido pelos dois entalhes diagonais nas laterais do provete (Yin et al., 2015).

Apesar de, tradicionalmente, serem utilizados os ensaios previamente referidos para a determinação dos limites de enformabilidade de um determinado material, Isik et al. (2014) mostraram que é possível a determinação da CLF apenas através de ensaios de estampagem incremental e sem recorrer ao uso dos ensaios convencionais. No trabalho destes autores, foram realizados vários ensaios de estampagem incremental e os resultados obtidos foram muito semelhantes aos obtidos por ensaios convencionais, pois a CLF obtida dos ensaios de estampagem incremental possuía uma inclinação de “-0.70” (linha preta contínua na Figura

7) e a CLF obtida pelos ensaios convencionais possuía uma inclinação de “-0.68” (linha preta a traço interrompido na Figura 7).

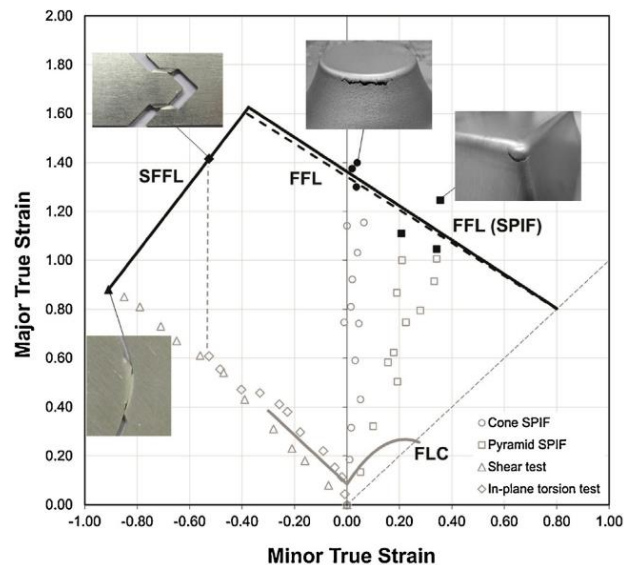


Figura 7 – Resultados obtidos por Isik et al. (2014) através do uso de ensaios de estampagem incremental

Fonte: Isik et al. (2014)

Esta nova metodologia faz uso do facto de no processo de estampagem incremental haver uma supressão do fenómeno de estrição (Silva et al., 2008), fazendo assim com que a evolução das extensões ao longo da peça seja linear. Isto, por sua vez, resulta em que não seja necessária a medição de espessuras e larguras dos provetes após a fratura, processo este que torna muito mais propício o aparecimento de erros indesejados, sendo apenas necessária a medição das grelhas de círculos marcadas na superfície da peça deformada (Isik et al., 2014).

Os ensaios previamente referidos servem apenas como solicitações mecânicas que provocam nos provetes as deformações pretendidas para a determinação de diferentes trajetórias de deformação dentro do plano das extensões principais, mas são também necessárias metodologias para a determinação dos pontos de ocorrência de estrição e fratura, para que, desta forma, se possa caracterizar completamente a CLE e a CLF de um material específico.

No caso da determinação da CLE, existem vários métodos diferentes que podem ser aplicados, mas para efeitos do presente trabalho serão apenas mencionados dois distintos, sendo eles um método dependente da posição, nomeadamente o método nº5 de Zurique, e

um método dependente do tempo, nomeadamente o método proposto por Martínez-Donaire et al. (2014).

O método nº5 de Zurique baseia-se na análise de uma grelha de círculos na superfície da chapa e foi inicialmente proposto por (Rossard, 1976). Atualmente, a norma ISO Standard 12004-2 (2008) serve como padrão para a aplicação de uma versão atualizada deste método. Para aplicar este método é realizada uma marcação eletroquímica de uma grelha de círculos na superfície do provete antes de este ser deformado. Quando é aplicada uma deformação no provete, estes círculos adquirem o formato de elipses, cujos eixos de simetria representam as direções principais de deformação local. Após isto são escolhidos os círculos cuja posição do seu centro esteja mais próxima da secção de rotura e são realizadas medições aos círculos adjacentes a estes, numa direção perpendicular à fratura, como se pode observar na Figura 8(a). Comparando as dimensões dos círculos da grelha inicial com as dimensões das elipses, determina-se então o valor das extensões principais ε_1 e ε_2 utilizando as seguintes equações,

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{a}{d}\right) \quad ; \quad \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{b}{d}\right) \quad (3; 4)$$

sendo que a e b correspondem às dimensões do maior e menor eixos da elipse, respetivamente, e d corresponde ao diâmetro inicial dos círculos da grelha, como se pode observar na Figura 8(b). Tendo sido recolhidos os valores das extensões principais dos círculos adjacentes é então feita uma interpolação para se obter as extensões principais dos círculos sobre a fratura, como representado na Figura 8(c).

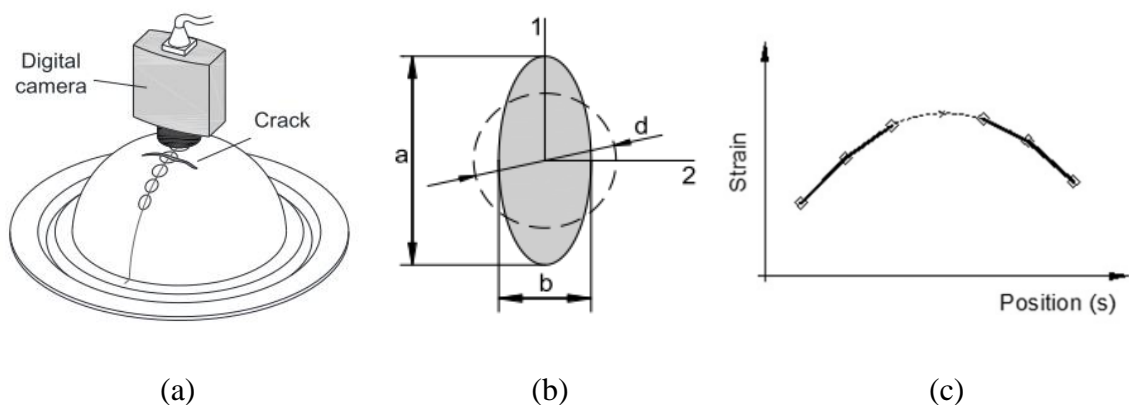


Figura 8 – Representação esquemática da (a) medição de círculos na superfície do provete, utilizando a câmara digital, (b) deformação típica da grelha de círculos, resultando numa elipse e (c) interpolação utilizada para a determinação das deformações do círculo correspondente à fratura.

Fonte: Martins et al. (2014b)

O segundo método utilizado, desenvolvido por Martínez-Donaire et al. (2014), faz uso de um sistema de Correlação Digital de Imagens (CDI), que consiste num sistema de duas câmaras que captam a superfície dos provetes e recolhem imagens destes ao longo do decorrer do ensaio. A superfície dos provetes é pintada com um padrão aleatório de pequenas gotículas de tinta preta sob um fundo branco (Figura 9(a)), cuja posição é depois comparada *de frame para frame*, resultando assim nas deformações sofridas pelo provete. Das imagens recolhidas são depois escolhidos vários pontos próximos da fratura para serem avaliadas as deformações que ocorrem nesses mesmos pontos. Como se pode observar na Figura 9(b), os pontos que se encontram na zona de instabilidade correspondem a linhas no gráfico que evoluem de forma monótona, enquanto os que estão fora da zona de estricção possuem uma inflexão na sua linha do gráfico correspondente. O ponto mais próximo da zona de estricção, mas ainda fora dela, ou seja, o último ponto que possui inflexão na representação gráfica da evolução da sua extensão principal, é então utilizado para determinar o instante de cedência, sendo que a inflexão da linha do gráfico correspondente a esse ponto é coincidente com o instante de cedência no provete.

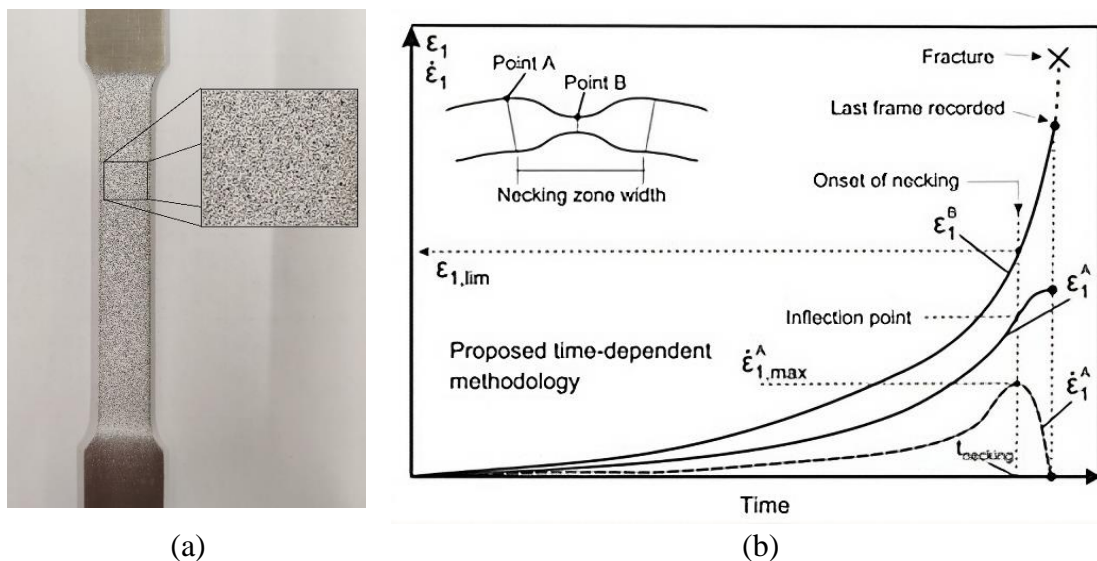


Figura 9 – (a) Padrão de marcação utilizado nos ensaios medidos por sistema de Correlação Digital de Imagens e (b) Esquema da metodologia desenvolvida por Martínez-Donaire et al. (2014).

Fonte: (b) Martínez-Donaire et al. (2014)

No caso da determinação da CLF, já não é possível aplicar os mesmos princípios de medição de medição da grelha de círculos no plano da chapa para obter as extensões principais, pois não é possível obter grelhas com círculos suficientemente pequenos para

conseguir quantificar estas extensões corretamente, e mesmo que tal fosse possível, círculos adjacentes à fratura não possuem extensões que possam ser consideradas extensões na fratura (Cristino et al., 2017; Soeiro, 2014). Tendo isso em consideração, para a determinação das extensões na fratura é necessário um levantamento de medições dos provetes, antes e após a sua fratura, medições estas referentes à espessura e largura dos provetes (Cristino et al., 2017).

No caso da determinação da extensão de fratura segundo a espessura do provete, ε_{3f} , é calculada utilizando a equação,

$$\varepsilon_{3f} = \ln\left(\frac{t_f}{t_0}\right) \quad (5)$$

sendo que t_0 é o valor de espessura inicial da chapa e t_f é uma média dos valores de espessura obtidos ao longo do comprimento da fratura, numa direção coincidente com a espessura da chapa, como pode ser observado na Figura 10.

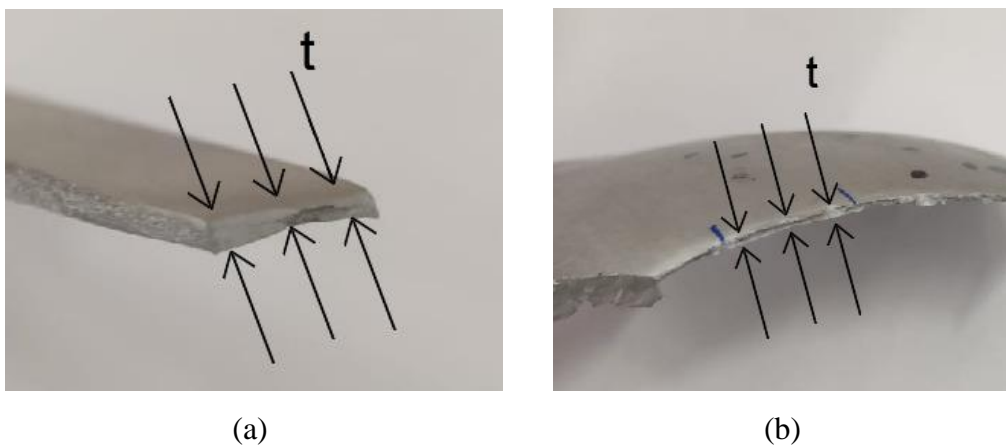


Figura 10 – Espessura dos provetes correspondentes aos ensaios de (a) tração e (b) Bulge.

Quanto à determinação da menor extensão de fratura no plano da chapa, ε_{2f} , são utilizadas duas abordagens distintas consoante o tipo de metodologia de determinação de deformações aplicado. No caso dos provetes em que é utilizada a metodologia de medição dependente da posição, ou por grelha de círculos, é possível assumir que o valor da menor extensão principal, ε_2 , obtido do círculo considerado como correspondente à fratura, se mantêm constante entre a ocorrência do fenómeno de estricção e o instante da fratura (Cristino et al., 2017), portanto considera-se o mesmo valor para ε_{2f} . No caso dos provetes em que é utilizada a metodologia dependente do tempo, ou por Correlação Digital de

Imagens, é possível assumir que o valor da menor extensão no plano da chapa, ε_2 , se mantém constante após a última medição registada pelo sistema (Magrinho et al., 2022), e considera-se esse valor para ε_{2f} .

Por fim, para a determinação do valor da maior extensão de fratura no plano da chapa, ε_{1f} , após terem sido obtidos os valores das extensões previamente referidas, é possível utilizar o princípio da incompressibilidade, representado pela equação,

$$\varepsilon_{1f} + \varepsilon_{2f} + \varepsilon_{3f} = 0 \Leftrightarrow \varepsilon_{1f} = -(\varepsilon_{2f} + \varepsilon_{3f}) \quad (6)$$

Tendo obtido todos os valores das extensões torna-se então possível fazer a representação gráfica dos limites à estricção e à fratura para o material em estudo. No plano das extensões principais são marcados, para todos os ensaios realizados, os pontos que representam a ocorrência do fenómeno de estricção e a ocorrência de fratura. Considerando o conjunto de pontos obtidos e a dispersão de cada grupo de pontos correspondente a cada tipo de ensaio no plano das extensões principais, é possível traçar linhas que intercetam a média destes conjuntos, formando assim os limites de enformabilidade que caracterizam o material em estudo.

2.2. Parâmetros do processo

O processo de estampagem incremental e, conseqüentemente, a enformabilidade da peça a produzir podem ser influenciados por vários parâmetros do processo. Segundo Jeswiet et al. (2005b), é possível identificar os parâmetros essenciais que influenciam o processo como sendo o diâmetro da ferramenta, o incremento de posição da ferramenta verticalmente (*step*), a velocidade de avanço da ferramenta (*feed rate*), a velocidade de rotação da ferramenta (*spindle speed*) e a espessura da chapa a deformar. Outros autores mais recentes (Dwivedy e Kalluri, 2019; Murugesan et al., 2022) identificam também a lubrificação e a trajetória da ferramenta como sendo fatores influenciadores do processo. Cada um destes parâmetros acrescenta variabilidade no processo, e podem ser avaliados individualmente de forma a perceber o seu impacto no conjunto.

Quanto ao primeiro parâmetro mencionado, o diâmetro da ferramenta, pode-se dizer que à medida que se aumenta o diâmetro da ferramenta vai também aumentar a área de contacto entre a ferramenta e a peça, levando assim a um aumento na distribuição de tensões na chapa (Soeiro, 2014). Do ponto de vista da enformabilidade, vários autores (Gulati et al., 2015; Hussain et al., 2008b; Jeswiet et al., 2005b; Silva et al., 2011) verificaram que quanto

menor fosse o diâmetro da ferramenta utilizada, maiores seriam os valores das extensões principais obtidos, visto que à medida que se aumenta o diâmetro da ferramenta, mais esta se aproxima do processo de estampagem convencional, que possui limites de enformabilidade mais reduzidos que a estampagem incremental. Na Figura 11, é possível observar resultados obtidos por Silva et al. (2011), que mostram que ferramentas com um diâmetro mais reduzido produzem raios de triaxialidade menores, o que resulta num aumento dos níveis de enformabilidade, traduzidos no aumento do ângulo máximo de estampagem, que corresponde ao ângulo entre o plano da chapa e a zona da superfície do provete onde ocorre a fratura. Na zona central observa-se uma acentuada transição nos níveis de enformabilidade, que acaba por terminar na “zona C”, onde existe uma estagnação nos níveis de enformabilidade abaixo dos níveis registados para as outras zonas. Quanto ao acabamento superficial da peça, tanto Echrif e Hrairi (2014), como Murugesan et al. (2022) concluíram que um aumento do diâmetro da ferramenta promove a redução da rugosidade da superfície produzida, resultando num melhor acabamento.

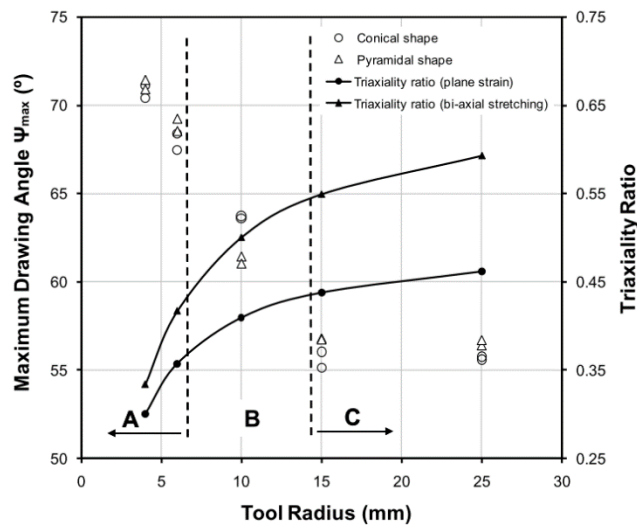


Figura 11 – Esquema representativo da evolução do ângulo máximo de estampagem e do rácio de triaxialidade de tensões em função da variação do raio da ferramenta em ensaios de estampagem incremental de geometrias de referência.

Fonte: Silva et al. (2011)

Conjugando os parâmetros de diâmetro da ferramenta e espessura da chapa, Silva et al. (2011), com base nos resultados obtidos no seu estudo, propuseram também um limite crítico para a existência de fratura com estricção e a fratura sem manifestação deste fenómeno, governado pelo rácio entre a espessura da chapa e o raio da ferramenta, t/r_{tool} .

Este rácio é explicado com o facto de em ferramentas com um raio maior existir um efeito estabilizador que promove o aparecimento de estrição, enquanto em ferramentas menores não existe estabilização suficiente para que ocorra estrição, fazendo assim com que se consiga atingir a fratura sem a ocorrência de estrição.

Relativamente à velocidade de rotação da ferramenta, considerando os estudos realizados ao longo dos anos, existem opiniões díspares dos diferentes autores na influência deste parâmetro nos níveis de enformabilidade obtidos. Estudos realizados por vários autores (Ambrogio et al., 2004; Gulati et al., 2015; Ham e Jeswiet, 2006) concluíram que a enformabilidade evolui proporcionalmente à velocidade de rotação da ferramenta, devido ao facto de o aumento de velocidade promover a produção de calor por fricção, que por sua vez aquece o material e aumenta assim a sua enformabilidade. Silva et al. (2009) compararam resultados de aplicações de estampagem incremental realizadas com rotação forçada, nomeadamente, 27rpm, conjuntamente com uma velocidade de avanço de 1000mm/min, uma ferramenta de 6mm de raio e em chapas de AA1050 H111/O, e aplicações realizadas com ferramenta livre e observaram que não existiam diferenças nos níveis de enformabilidade obtidos em cada um dos casos, concluindo assim que este parâmetro não teria influência significativa no processo. Do ponto de vista do acabamento superficial, Hagan e Jeswiet (2004) e Murugesan et al. (2022) não obtiveram diferenças significativas na rugosidade superficial de peças produzidas com vários valores de velocidade de rotação da ferramenta.

No que toca à velocidade de avanço da ferramenta, a generalidade dos estudos realizados apresentam as mesmas conclusões, no sentido em que referem que será preferível uma menor velocidade de avanço da ferramenta se o objetivo for puramente aumentar a enformabilidade do material (Gulati et al., 2015; Ham e Jeswiet, 2006; Hussain et al., 2008b; Kim e Park, 2002). Isto é explicado com o facto de quando a ferramenta é deslocada mais lentamente sobre o material, é potenciado um aquecimento localizado devido à fricção, que por sua vez faz aumentar a enformabilidade do material. É de notar que apesar de a redução de velocidade da ferramenta ser a opção preferencial para o aumento de enformabilidade no processo, quanto mais esta for reduzida, mais lento será o processo (Kim & Park, 2002), portanto nesse caso tem de ser feito um comprometimento entre estes dois parâmetros. Quanto à qualidade da superfície produzida, apesar de Gulati et al. (2015) demonstrar melhores resultados nas superfícies produzidas em chapas de alumínio 6063, e em velocidades de avanço mais reduzidas, num intervalo entre 1000 e 2500mm/min, e Murugesan et al. (2022) demonstrar o contrário, em chapas de alumínio AA3003-H18 com

uma espessura de 0,5mm e num intervalo entre 500 e 2000mm/min, os resultados obtidos por Echrif e Hrairi (2014) demonstram que este parâmetro tem uma influência muito reduzida em relação aos restantes, quando avaliado num intervalo compreendido entre 500 e 2000mm/min e em chapas de alumínio AA1050-O de 1mm de espessura.

Quanto ao incremento vertical da posição da ferramenta (step), existem vários estudos (Centeno et al., 2014; Ham e Jeswiet, 2006; Hussain et al., 2008b) que demonstram que quanto menor for o seu valor, maior será a enformabilidade produzida na peça. Isto deve-se ao facto de quanto maior for este incremento, também maiores serão as tensões aplicadas no material para obter essas deformações, o que por consequência aumenta a probabilidade de abertura de fissuras. Apesar disto e à semelhança da velocidade de avanço da ferramenta, também tem de haver um comprometimento entre a dimensão do incremento e o tempo de produção da peça, pois quanto menor for o incremento, mais demorado será o processo de produção da peça. Relativamente à rugosidade da superfície, este parâmetro tem um grande peso, juntamente com o diâmetro a ferramenta. Segundo Murugesan et al. (2022), este parâmetro de processo possui uma elevada importância na rugosidade produzida e demonstrou que quanto menor o seu valor melhor seria o acabamento superficial da peça. Hagan e Jeswiet (2004) e Gulati et al. (2015) obtiveram os mesmos resultados.

Quanto à lubrificação, Kim e Park (2002) compararam o uso de uma ferramenta esférica e hemisférica, com e sem lubrificante, e mostraram que o uso de uma ferramenta esférica sem lubrificante produz uma maior enformabilidade, apesar de não ser uma diferença muito significativa, produzir uma superfície com pior acabamento e estar mais passivo de ocorrer fratura devido ao aumento do atrito. Dufloy et al. (2007) no seu estudo compararam cinco estados diferentes, que incluíam quatro lubrificantes diferentes e um caso sem lubrificante, e observaram que não existe diferença significativa entre os tipos de lubrificante, mas no caso sem lubrificante é possível observar uma falha precoce e um desgaste acrescido na ferramenta e na peça, comparativamente aos restantes casos. Ao comparar um estado sem lubrificação, um com lubrificação apenas no início do processo e outro com lubrificação contínua, Carrino et al. (2006) mostraram que apenas existe uma diferença significativa em estados extremos (com e sem lubrificação). Gulati et al. (2015) realizaram ensaios em que foram testados casos com lubrificante sólido, líquido de arrefecimento e sem lubrificante e concluíram que quando não foi utilizado lubrificante a ferramenta tinha tendência para criar uma soldadura por fricção com a peça, tendo obtido os melhores resultados com o lubrificante sólido. Hussain et al. (2008a) e Zhang et al. (2010) também obtiveram resultados positivos ao utilizar lubrificantes sólidos.

Por fim, relativamente à trajetória da ferramenta, existem duas variações principais, sendo elas as trajetórias convencionais (Figura 12(a)) e as trajetórias em espiral (Figura 12(b)).

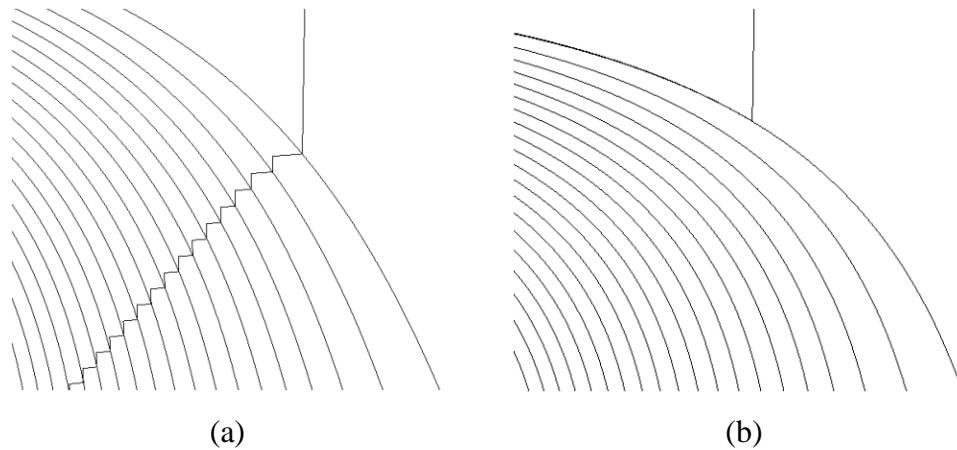


Figura 12 – Representação esquemática de trajetórias (a) convencionais e (b) em espiral.

Fonte: Skjoedt et al. (2007a)

Destes dois tipos de trajetória podem ser definidas outras variações em que são conjugadas as características destes dois tipos de trajetória consoante as necessidades geométricas da peça a produzir. As trajetórias convencionais são caracterizadas por contornos consecutivos da ferramenta separados por incrementos verticais da ferramenta, enquanto as trajetórias em espiral distribuem o incremento vertical da ferramenta ao longo da sua trajetória de contorno da geometria, formando uma trajetória contínua em toda a superfície da peça (Jeswiet et al., 2005b). Resultados obtidos por Fritzen et al. (2013) mostram um aumento de 4° no ângulo máximo de estampagem obtido quando utilizada uma trajetória em espiral, relativamente a uma trajetória convencional, em ensaios realizados em chapas de latão 70/30 com uma espessura de 0,5mm. Yamashita et al. (2008) realizou várias simulações nas quais aplicou variações diferentes de trajetórias da ferramenta e concluiu que as trajetórias em espiral conseguem uma melhor distribuição de espessura ao longo da chapa deformada, tendo realizado estas simulações considerando um material com 0,25mm de espessura, um módulo de Young de 110GPa, um coeficiente de Poisson de 0,33 e uma lei de comportamento do material representada pela equação $\sigma = 394\varepsilon^{0,28}$ MPa. Apesar destes resultados, Liu et al. (2013) não obteve diferenças significativas na enformabilidade de peças iguais com trajetórias convencionais e em espiral, em chapas de alumínio AA7075-O com 1,6mm de espessura.

Outro dos motivos pelo qual as trajetórias em espiral têm vantagem sobre as trajetórias convencionais tem que ver com o facto de em trajetórias convencionais, o incremento vertical da ferramenta ocorrer, normalmente, sempre no mesmo local, causando marcas indesejadas na superfície da peça produzida (Skjoedt et al., 2007a).

Apesar de estes serem os formatos de trajetória mais utilizados, por vezes torna-se necessária a aplicação de trajetórias ligeiramente diferentes, consoante a necessidade de aplicação. Attanasio et al. (2008) e Lu et al. (2013) deram uso ao que se denomina de trajetórias de *scallop*, que têm por base as trajetórias convencionais, mas, ao invés de possuírem um incremento vertical constante (Figura 13(a)), possuem um incremento vertical variável que é ajustado consoante a inclinação da superfície a produzir, de forma que a altura máxima das indentações produzidas pela ferramenta se mantenha constante (Figura 13(b)). Este tipo de trajetória é principalmente útil na produção de geometrias com reduções de inclinação à medida que a ferramenta se desloca para o centro.

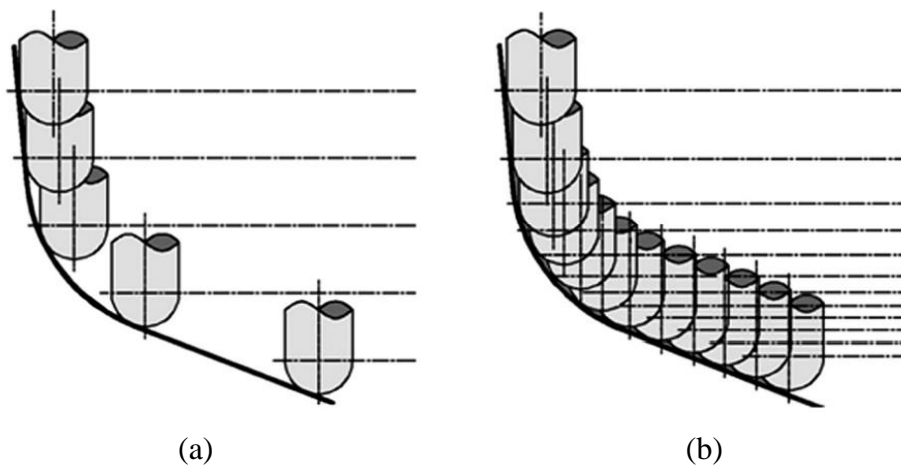


Figura 13 – Trajetória (a) convencional ou de incremento constante e (b) de *scallop* ou de incremento variável

Fonte: Attanasio et al. (2008)

2.3. Aplicações industriais

Como já referido anteriormente, a estampagem incremental é um processo de enformação de chapa principalmente adequado para produções de pequenos lotes de peças. Segundo Afonso et al. (2018), este processo tem um melhor aproveitamento económico dentro do intervalo de produção de 300 a 600 peças, sendo, neste caso, mais bem empregue em indústrias como a aeronáutica, indústria automóvel, design e arquitetura, aplicações médicas, produção de protótipos e produção de sobressalentes de peças obsoletas.

2.3.1. Indústria automóvel e aeronáutica

Apesar de a indústria automóvel ser uma indústria de produção em massa, a estampagem incremental já foi e pode, cada vez mais, ser aplicada nesta área. Geralmente, as partes produzidas em chapa nesta indústria são fabricadas através de processos convencionais mais rentáveis em grandes lotes, mas a estampagem incremental pode ser um recurso valioso no que toca a prototipagem, produção de sobressalentes obsoletos e personalização de peças.

Grandes empresas como Ford, Honda e Toyota possuem casos de aplicação do processo de estampagem incremental, maioritariamente nas chapas constituintes da parte exterior dos veículos. A empresa Ford Motor Company adotou esta tecnologia para a produção de protótipos, com o objetivo de acelerar o seu tempo de produção, e apelidando este método de Ford Freeform Fabrication Technology (F3T) (Behera et al., 2017). A Figura 14(a) mostra uma das peças produzidas por este método.

Em 2000, a empresa Honda Motor Company, Limited aplicou este processo na produção de uma série limitada de sobressalentes para o seu carro da década de 60, Honda S800. Visto que a empresa já não possuía os antigas ferramentas e desenhos técnicos das peças em questão, foi adotada a estampagem incremental para a produção dessas partes (Amino et al., 2014). É possível observar duas das peças produzidas pela empresa Honda na Figura 14(b).

No caso da empresa Toyota Motor Corporation, a estampagem incremental foi utilizada para acrescentar valor a um modelo de carro de edição especial, o Toyota iQ-GRMN Super Charger, baseado num outro modelo comercial, o Toyota iQ. O processo foi utilizado sobre as partes originais do modelo de base para criar certos detalhes e traços estilísticos, que acrescentam ao valor do modelo exclusivo (Amino et al., 2014). As Figura 14(c) e (d) mostram a comparação entre o modelo comercial e o modelo de edição especial produzido pela Toyota.

Existem outros trabalhos realizados na área da produção automóvel, em que a estampagem incremental é utilizada para produzir peças de um carro, como por exemplo, a caixa de um coletor e proteções para a cadeia cinemática de um veículo (Adams e Jeswiet, 2015), partes constituintes do exterior do veículo (Bambach et al., 2009; Governale et al., 2007) e a cobertura de um escape (Lozano et al., 2015), entre outros. Estas peças podem ser observadas na Figura 15, pela ordem que foram mencionadas.

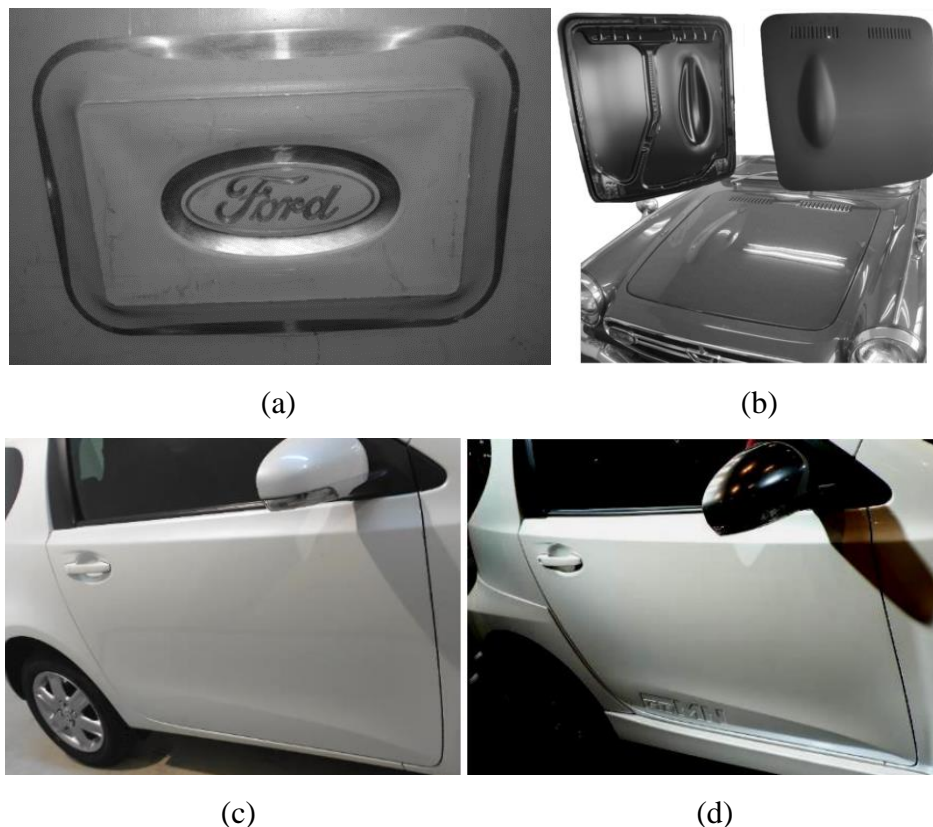


Figura 14 – Aplicações do processo de estampagem incremental na indústria automóvel: (a) símbolo da marca Ford, (b) capô do carro Honda S800, comparação entre (c) modelo comercial do carro Toyota iQ e (d) modelo de edição especial Toyota iQ-GRMN Super Charger

Fonte: (a) Afonso (2017), (b) Afonso (2017), (c) Amino et al. (2014) e (d) Amino et al. (2014)

A estampagem incremental foi também já aplicada na indústria aeronáutica, visto que esta necessita de uma produção de unidades consideravelmente menor que a indústria automóvel e a dimensão das peças dificulta o uso de processos convencionais.

O projeto INMA (Innovative Manufacturing of complex Ti sheet components), financiado pelo FP7 (7th Framework Programme) da União Europeia, foi criado em 2010, com o objetivo de reduzir os custos e ganhar flexibilidade no processo de produção de componentes em chapa na indústria europeia de aeronáutica, e teve como entidade coordenadora a Fundacion Tecnalia Research & Innovation, assim como 10 outras entidades participantes, como por exemplo, a Airbus Defence and Space GmbH e a Universidade de Liverpool. Estimou-se que os principais impactos decorrentes deste projeto seriam: uma redução de 80% nos custos de produção de ferramentas, os tempos de espera na produção de componentes seria reduzida em 90% e os rácios entre material comprado e material utilizado seriam 20% mais baixos (Penalva Oscoz et al., 2011). O projeto foi concluído em 2014.

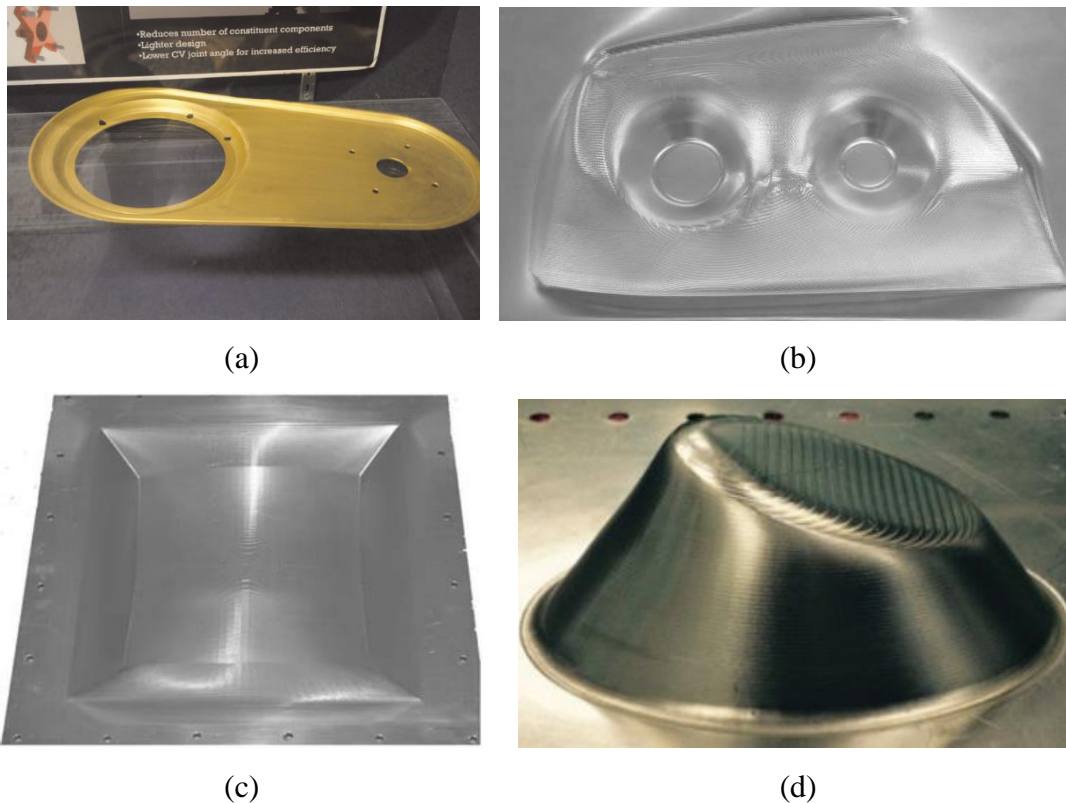


Figura 15 - Aplicações do processo de estampagem incremental na indústria automóvel: (a) proteção para a cadeia cinemática de um veículo, (b) cobertura exterior dos faróis traseiros de um veículo, (c) secção do guarda-lamas de um veículo e (d) cobertura de um escape.

Fonte: (a) Adams e Jeswiet (2015), (b) Governale et al. (2007), (c) Bambach et al. (2009) e (d) Lozano et al. (2015)

2.3.2. Aplicações médicas

Devido à sua elevada adaptabilidade e facilidade de produção de peças complexas, a estampagem incremental tem sido alvo de várias investigações com o objetivo de aplicar neste ramo, nomeadamente, na produção de próteses e outros semelhantes. Sendo o corpo humano algo tão complexo e diferente em todos os casos, é essencial a capacidade de personalizar as peças fabricadas, a fim de garantir que estas desempenhem suas funções de forma adequada e estejam alinhadas com o bom funcionamento do corpo humano.

A maioria dos casos de investigação centrou-se em torno da produção de implantes cranianos, mas é possível apontar outros casos como próteses dentárias, claviculares, faciais e apoios de tornozelo. Relativamente aos materiais utilizados nestes casos, por motivos de compatibilidade com o corpo humano, foram geralmente utilizadas ligas de titânio e polímeros biocompatíveis.

O caso apresentado na Figura 16(a) pertence ao trabalho realizado por Vanhove et al. (2017), que consiste na produção de uma prótese para a clavícula em titânio de grau 2, que

é amplamente usado em aplicações médicas. Os autores conseguiram obter a precisão pretendida através da aplicação de compensações na trajetória da ferramenta e tratamentos térmicos após a deformação da chapa.

Os implantes cranianos são também um dos grandes focos das aplicações médicas em que a estampagem incremental pode ser aplicada. As cirurgias de colocação destes implantes são bastante caras, morosas e por vezes não cumprem os pré-requisitos definidos, mas, com o auxílio da estampagem incremental, o custo associado e o tempo de produção dos implantes podem ser drasticamente reduzidos (Duflou et al., 2013). Na Figura 16(b) é possível observar um implante craniano produzido por Castelan et al. (2014).

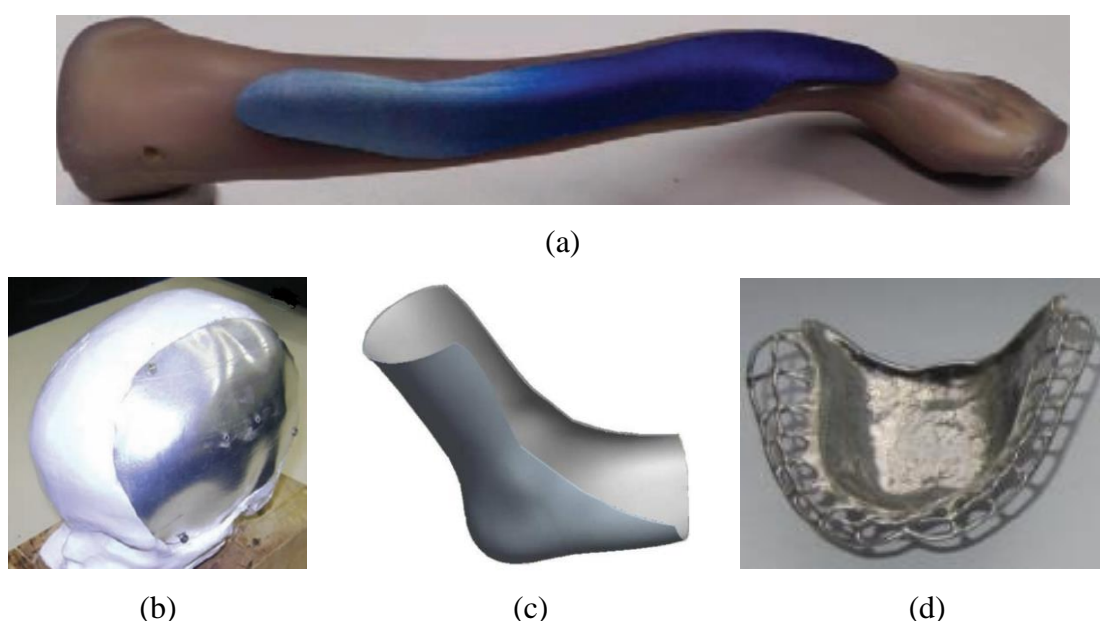


Figura 16 - Aplicações do processo de estampagem incremental na indústria médica: (a) prótese para clavícula em titânio de grau 2, (b) implante craniano, (c) apoio externo para a articulação do tornozelo e (d) prótese dentária.

Fonte: (a) Vanhove et al. (2017), (b) Castelan et al. (2014), (c) Ambrogio et al. (2004) e (d) Potran (2014)

Num âmbito um pouco diferente, Ambrogio et al. (2004) produziram um apoio externo para a articulação do tornozelo, produzida numa liga de aço apropriada para processos de enformação (Figura 16(c)). Os autores conseguiram produzir a peça pretendida com uma tolerância, relativamente ao modelo de CAD pretendido, menor que 1mm.

Por fim, na Figura 16(d) é possível observar uma prótese dentária produzida no âmbito do trabalho de Potran (2014). O trabalho em causa tinha como objetivo comparar um produto produzido por estampagem incremental e um produto convencional produzido por

moldes de cera, sendo que a peça produzida pelo novo método conseguiu corresponder aos pré-requisitos definidos pelos autores, conseguindo cumprir uma tolerância inferior a 1mm.

2.3.3. Design, arquitetura e outros

A estampagem incremental pode também ser utilizada para fins estéticos, tanto em peças artísticas como em estruturas arquitetônicas. Por ser um processo tão flexível, a estampagem incremental foi adotada para a produção de certos artigos de valor artístico de vários tipos, como será descrito adiante.

Afonso (2017) realizou um trabalho conjunto com o Laboratório de Fabricação Digital do Centro de Estudos de Arquitetura e Urbanismo, na Universidade do Porto, em que foi produzido um painel composto por nove peças individuais com designs inspirados em papel amarrado, unidas por ligações aparafusadas no lado posterior. Esta peça pode ser observada na Figura 17(a).

O anterior autor realizou também um projeto em conjunto com os designers Rogério Santos e Sérgio Barbosa, em que foi produzido um banco simples, constituído apenas por um assento e quatro pernas. O assento do banco foi produzido com um formato complexo, no qual foi aplicado o processo de estampagem incremental em várias fases (Afonso, 2017). O projeto contribuiu para a área em questão no sentido em que abriu toda uma nova possibilidade para a produção de peças 3D com curvas complexas e pode ser observado na Figura 17(b).

Na Figura 17(c) é possível observar uma peça produzida por estampagem incremental, inspirada no Besouro-da-Namíbia, que possui no seu corpo uma superfície capaz de coletar água a partir de nevoeiros matinais (Nørgaard e Dacke, 2010). Este trabalho foi realizado por Kalo e Newsum (2014) e tem como objetivo futuro a aplicação deste tipo de padrão em fachadas de edifícios ou em coberturas de telhados para sistemas de coleção de água.

Outro caso de uma aplicação prática de peças produzidas por estampagem incremental foi realizado no âmbito de um projeto da organização não governamental *Third World Workplace, Derdewereld Werkplaats*, e consistiu na produção do contentor central de um forno solar. Este trabalho foi realizado por Jeswiet et al. (2005a) com o objetivo de reduzir os custos de produção do forno solar, devido ao facto de a parte em causa ser originalmente produzida em fibra de vidro, o que dificultava a sua produção e aumentava os custos de produção. Esta peça pode ser observada na Figura 17(d).



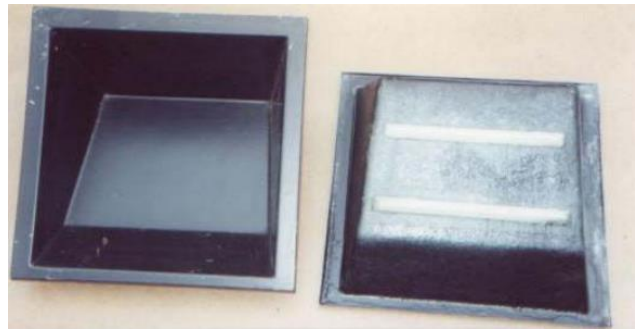
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 17 - Aplicações do processo de estampagem incremental na área do design, arquitetura e outros: (a) painel artístico, (b) banco simples, (c) superfície com padrão que promove a coleção de água a partir de nevoeiro e (d) contentor central de um forno solar.

Fonte: (a) Afonso (2017), (b) Afonso (2017), (c) Kalo e Newsum (2014) e (d) Jeswiet et al. (2005a)

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é abordado todo o processo de caracterização mecânica e de enformabilidade do material escolhido para o estudo, utilizando ensaios convencionais e também ensaios de estampagem incremental de chapa. São descritos todos os passos desde o corte e preparação dos provetes, até às medições efetuadas, passando pela descrição de todos os ensaios, técnicas e equipamentos utilizados.

O material utilizado para este estudo foi o alumínio AW6082-T6, que foi inicialmente adquirido no formato de chapas de dimensões 1500x3000mm, com uma espessura de 2mm. Os alumínios são materiais frequentemente utilizados em aplicações que envolvam elevadas deformações devido à sua elevada ductilidade. Este projeto é um exemplo de uma dessas aplicações.

3.1. Caraterização mecânica

Neste subcapítulo é descrito todo o processo de caracterização mecânica do material e encontra-se dividido em três partes, sendo elas: a preparação dos provetes, onde são descritas as fases de corte, marcação e tratamento; os ensaios realizados, onde são descritos ao pormenor os ensaios para a caracterização mecânica do material; e, por fim, os resultados obtidos dos ensaios realizados.

Esta secção do trabalho contempla a preparação e consequentes ensaios de provetes de tração em três direções distintas relativas à direção de laminagem do material (0°, 45° e 90°), assim como ensaios de Bulge, visto estes serem os ensaios necessários para uma correta caracterização mecânica.

3.1.1. Preparação dos provetes

A preparação dos provetes, no caso específico deste trabalho, foi composta por 3 fases distintas: o corte dos provetes, a marcação dos provetes e a aplicação de um tratamento térmico. Cada uma destas fases é descrita detalhadamente nas subsecções seguintes.

3.1.1.1. Corte dos provetes

Os provetes foram, inicialmente, modelados através do programa de CAD, SOLIDWORKS, seguindo as orientações geométricas das normas internacionais correspondentes a cada um desses provetes e ensaios. Feitos estes modelos e definida uma

quantidade inicial de provetes necessários, foi então feito um *layout* de todos os provetes com o objetivo de otimizar a distribuição dos provetes necessários na área da chapa adquirida, de modo que pudesse ser feita uma boa gestão da quantidade de material utilizado, como pode ser observado na Figura 18.

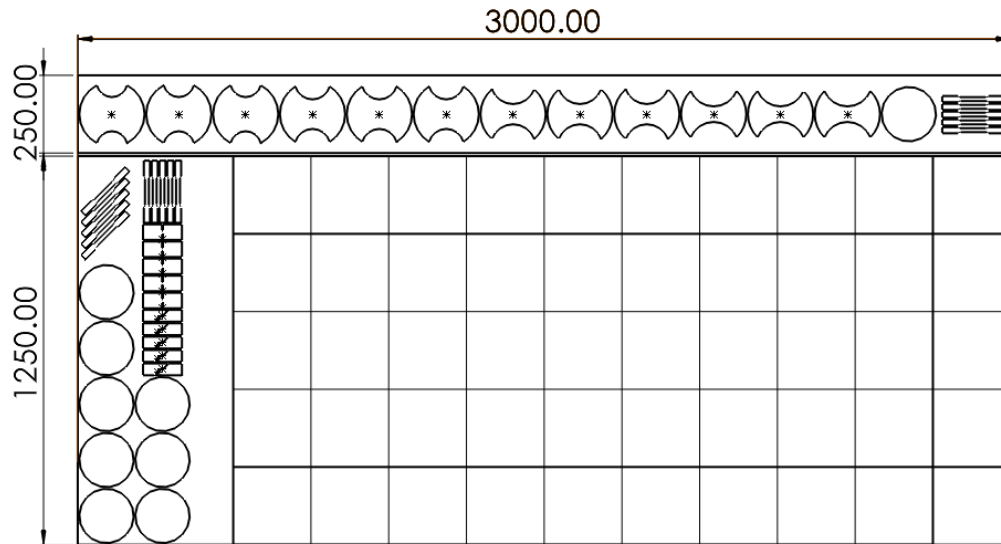


Figura 18 – Layout dos provetes no espaço útil da chapa.

Numa primeira fase, a chapa foi reduzida a segmentos mais pequenos através do uso de uma guilhotina (Figura 19(a)), sendo que as chapas necessárias aos ensaios de estampagem incremental foram cortadas também nesta fase por não possuírem formas complexas.

No caso dos provetes que dizem respeito a esta subsecção do trabalho, os provetes de tração e Bulge, o corte foi realizado por jato de água. A máquina utilizada foi uma máquina de corte por jato de água WAZER (Figura 19(b)), do laboratório de Tecnologia Mecânica, no Instituto Superior Técnico (IST). Para este processo foram utilizados os modelos CAD dos provetes previamente mencionados para criar ficheiros .DXF, que, por sua vez, serviram para guiar o corte da máquina.



(a)



(b)

Figura 19 – (a) Guilhotina e (b) máquina de corte por jato de água WAZER.

3.1.1.2. Marcação dos provetes

De modo a que seja possível observar as deformações criadas nos provetes é necessário que estes sejam marcados com algum tipo de referência que não interfira com o material, com o ensaio a ser realizado e não perca a sua validade com o decorrer do ensaio. Estas referências são depois avaliadas para que as deformações que ocorrem no provete possam ser quantificadas.

No caso dos provetes de tração e Bulge, foram utilizados dois tipos de marcação distintos para cada tipo de provete. Cada tipo de marcação com uma metodologia diferente de avaliação de deformações, uma delas consistindo num padrão de círculos gravados de forma eletroquímica no metal e outra numa pintura de fundo branco com um padrão estocástico de pequenas gotículas pretas por cima.

- **Marcação eletroquímica de grelhas**

Esta metodologia de marcação dos provetes consiste numa reação eletroquímica entre uma folha de marcação que contém o padrão desejado e o material do provete.

Existem vários tipos de grelhas disponíveis (círculos, círculos entrelaçados e quadrados) e a escolha entre os diferentes formatos depende do gradiente de deformação que se espera observar nas zonas de maior deformação dos provetes. Neste caso, o tipo de grelha utilizado foi uma grelha de círculos com diâmetros de 2.5mm (Figura 20(a)).

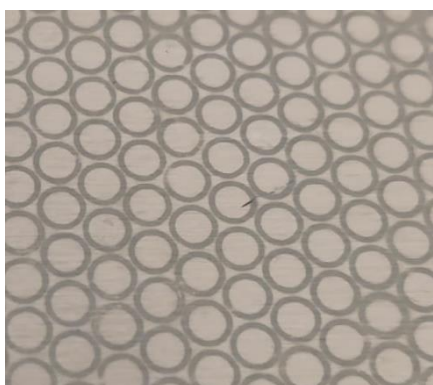
Previamente à marcação do material, os provetes foram lixados em todas as suas arestas, de forma a remover possíveis rebarbas produzidas pelo corte que danificassem as folhas de marcação, e, posteriormente, foram limpos com álcool etílico para remover

quaisquer óleos ou impurezas presentes na sua superfície que pudessem interferir com o processo.

Para a realização do processo de marcação, a folha de marcação é colocada sobre o provete e sobre essa folha é depois colocado um feltro embebido em eletrólito, nomeadamente, eletrólito ME5. Após isto, um elétrodo em forma de rolo é passado por cima do feltro, criando-se assim uma corrente entre o rolo e o provete, que foi previamente ligado à mesma fonte de corrente que o rolo. A passagem desta corrente faz com que fique marcado no provete o padrão presente na folha de marcação. Foi utilizada uma máquina de marcação ME96 da marca UMS (Figura 20(b)).

Por fim, o provete é limpo com um neutralizante, neste caso, neutralizante M2, para parar a reação e impedir que o processo de marcação continue e interfira com as características do material.

Este tipo de marcação foi aplicado nos provetes dos ensaios de Bulge.



(a)



(b)

Figura 20 – (a) Grelha de círculos e (b) Máquina de marcação ME96 da marca UMS.

Fonte: (b) ME96 - Electrolytic Marking Machine by Universal Marking Systems | DirectIndustry (s.d.)

- **Marcação para Correlação Digital de Imagens**

Como foi referido anteriormente, esta metodologia de marcação de provetes consiste na aplicação de uma pintura contrastante, que permite ao sistema de captura de imagem identificar várias referências na superfície do provete e segui-las ao longo de todo o ensaio, tornando assim possível o estudo das deformações no provete.

A aplicação deste padrão foi simplesmente feita à mão, através do uso de latas de tinta por aerossol. Primeiro foi aplicada uma camada uniforme de tinta branca para criar uma

base de fundo para o contraste necessário. Após esta camada, foi utilizada tinta preta, aplicada a uma maior distância, permitindo assim que chegassem apenas pequenas gotículas de tinta ao provete. Esta forma de aplicação da tinta cria um padrão estocástico de pequenas marcas pretas que servem depois como referência para o sistema de imagem (Figura 9(a)). As tintas utilizadas devem de ser cores mate para reduzir ao máximo a possibilidade de brilhos e reflexos criados pela pintura produzida, que podem interferir com a boa leitura da superfície do provete por parte do sistema de câmaras.

Este tipo de marcação foi aplicado nos provetes correspondentes aos ensaios de tração.

3.1.1.3. Tratamento térmico

Os tratamentos térmicos são processos controlados que têm como objetivo alterar as propriedades mecânicas e químicas de um metal, através do uso de ciclos de aquecimento e arrefecimento, ajustando assim as características desse material à sua utilização pretendida.

Neste caso, quando adquiridas, o material das chapas possuía um tratamento T6, que consiste numa solubilização, têmpera e, por fim, envelhecimento do material (Dias, 2020).

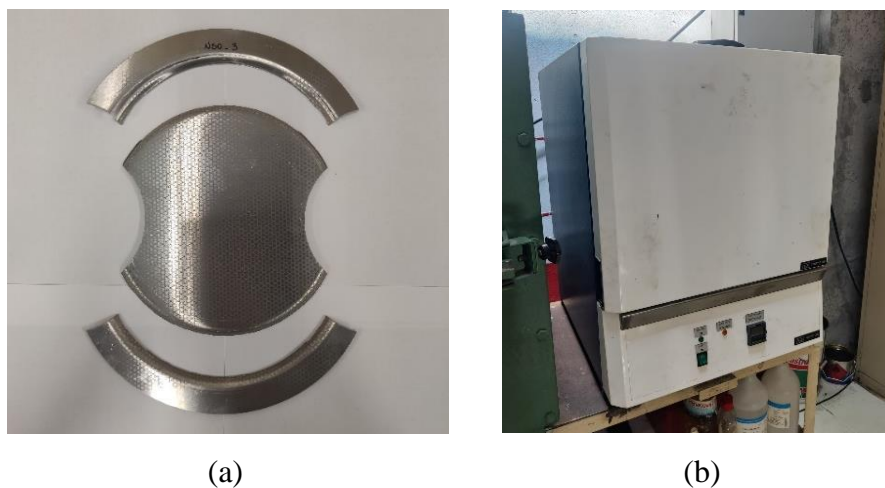


Figura 21 – (a) Provette de Nakajima fraturado pelo encostador da máquina de ensaios e (b) forno Instron SFL 3186K.

Aquando da realização do primeiro ensaio (ensaio de Nakajima), observou-se que o material dos provetes fraturou de forma precoce ao que seria suposto, pois quando o provete foi colocado na máquina de ensaios e se aplicou pressão no encostador da mesma, o provete fraturou completamente na zona de contacto (Figura 21(a)). Posto isto, procedeu-se à

aplicação de um outro tratamento térmico, de modo a conferir alguma ductilidade ao material para que este pudesse ser utilizado com sucesso.

O tratamento térmico utilizado foi um recozimento (O), em que se aqueceu o material a 415°C, durante 3h, e após este período deixou-se arrefecer naturalmente durante 24h. No caso dos provetes de tração e Bulge, este tratamento foi realizado num forno Instron SFL 3186K (Figura 21(b)).

3.1.2. Ensaios realizados

Como já foi referido anteriormente, a caracterização mecânica do material neste projeto foi realizada por meio de dois tipos de ensaio: ensaios de tração e ensaios de Bulge. Nesta subsecção é descrito detalhadamente todo o processo, parâmetros e equipamentos utilizados para a realização destes ensaios.

3.1.2.1. Ensaio de tração

O ensaio de tração tem como objetivo principal a caracterização mecânica do material, sendo que podem também ser utilizados para caracterizar a enformabilidade do material sob condições de tração uniaxial. Deste ensaio é possível obter as curvas tensão-extensão do material, e, por sua vez, é possível determinar as propriedades mecânicas do material, como a tensão de cedência, o módulo de Young, a tensão de rotura e a extensão após fratura. Foram também obtidos os parâmetros do modelo de Ludwik-Hollomon de caracterização do material, assim como o coeficiente de anisotropia, através do uso de provetes com diferentes orientações da direção de laminagem.

Para a realização deste ensaio, o provete é preso em ambas as extremidades por duas amarras que tracionam, lentamente e em direções também opostas, o provete, até este atingir a fratura.



Figura 22 – Máquina universal de ensaios Instron 5900R.

Estes ensaios foram realizados numa máquina universal de ensaios Instron 5900R (Figura 22) e segundo a norma ASTM Standard E8/E8M - 16a (2016), sendo que a geometria adotada para estes provetes se encontra representada esquematicamente na Tabela 2, assim como a quantidade de ensaios realizados.

Tabela 2 – Dimensões dos provetes de ensaio de tração.

Quantidade	Direção de laminagem	Dimensões (mm)	Representação esquemática
5	0°	$l_0 = 50$	
		$b_0 = 12,5$	
5	45°	$r = 12,5$	
		$l_t = 200$	
5	90°	$l_c = 82,15$	
		$w = 20$	

É de notar que um dos provetes do conjunto de 0° não foi considerado devido ao facto de o ensaio ter sido realizado antes do tratamento térmico de recozimento, o que levou a que a sua fratura tivesse ocorrido para deformações muito reduzidas, comparativamente com os restantes provetes.

Com os dados de força e deslocamento obtidos pelo sistema de aquisição de dados, é então possível convertê-los para tensão e extensão, o que permite, por sua vez, criar o gráfico de tensão-extensão. Deste gráfico é então possível retirar os valores pretendidos das características do material, como o módulo de Young, a tensão de cedência, a tensão de rotura e a lei do comportamento do material. Os resultados obtidos destes ensaios são expostos na Secção 3.1.4, Resultados.

3.1.2.2. Ensaio de Bulge

O ensaio Bulge tem como objetivo avaliar a enformabilidade do material sob condições de expansão biaxial. Como já referido anteriormente, este tipo de ensaio tem capacidade de conseguir obter maiores níveis de deformação até à ocorrência de instabilidade plástica, permitindo a caracterização mecânica do material em valores de deformação superiores aos obtidos em ensaios de tração.

Para a realização destes ensaios, um provete circular é colocado numa máquina de ensaios, por cima de um reservatório de óleo e encastrado em todo o seu perímetro por um encostador, criando um isolamento para o óleo. Após isto, é criada pressão nesse reservatório de óleo, fazendo com que o óleo crie uma deformação hemisférica na chapa, até que ocorra a fratura desta. No decorrer do ensaio, a altura da deformação provocada no provete e a pressão gerada pelo fluido hidráulico são continuamente registadas através do uso de transdutores de posição e pressão, respetivamente, que por sua vez transmitem os dados para um computador (Madeira, 2014).

Estes ensaios foram realizados por intermédio de uma máquina universal de ensaios Erichsen 145-60 (Figura 23).



Figura 23 – Máquina de ensaios Erichsen 145-60.

Foram realizados ensaios com diferentes matrizes de diferentes geometrias, com o intuito de se obterem diferentes trajetórias de deformação, e obter assim diagramas mais completos. Estas geometrias incluem uma com formato circular e duas com formatos elípticos. O plano de ensaios pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões dos provetes de ensaio Bulge.

Quantidade	Diâmetro do encostador (mm)	Dimensões (mm)	Representação esquemática
4	100 (circular)	$d_0 = 175$	
2	100:90 (elíptico)		
2	100:80 (elíptico)		

É de notar que o primeiro ensaio realizado com matriz circular não chegou a fraturar, ficando assim excluído do tratamento de dados. Os resultados obtidos destes ensaios são apresentados na Secção 3.1.4, Resultados.

3.1.3. Métodos de medição

De modo a avaliar as deformações causadas nos provetes e fazer uma correta caracterização do material em estudo há que realizar medições das marcações feitas nos provetes, antes e depois dos ensaios, para que possa haver um termo de comparação e poder-se assim quantificar as deformações.

3.1.3.1. Medição das extensões no plano

Para determinar as extensões principais no plano da chapa é necessário então medir as marcações feitas previamente à realização dos ensaios nos provetes. Como foi referido foram feitos dois tipos de marcações e, deste modo, há também duas formas distintas de fazer estas medições, consoante o tipo de marcação.

- **Método da grelha de círculos**

Nos casos em que foi utilizada uma marcação de grelha de círculos, foi utilizado um sistema semiautomático de captura de imagem, que consiste numa câmara 3Com Home Connect (Figura 24), ligada a um computador, que por sua vez controla o processo de medição das extensões principais através do software GPA 3.0.



Figura 24 – Câmara do sistema de medição 3Com Home Connect.

A câmara do sistema, manuseada pelo utilizador, é colocada por cima do círculo/elipse que se pretende medir, tentando garantir um contacto completo entre o rebordo do bocal da câmara e o provete para garantir que a câmara se encontra perpendicular à zona da superfície a medir, e o software faz a captação da imagem e consequente medição dos eixos principais da marcação. De forma que sejam obtidas medições o mais corretas possível, tem de ser feita uma calibração do sistema previamente à sua utilização, sendo que para esse fim foram realizadas vinte medições em círculos não deformados.

Feita a calibração do sistema iniciaram-se as medições dos círculos deformados, sendo que foram feitas cinco medições diferentes para cada um dos círculos que se pretendia medir e com estes valores foi tirado um valor médio para cada conjunto. Esta repetição de medições tem como objetivo reduzir os possíveis erros de medição inerentes ao processo. Por fim, o software retorna os dados das medições num formato compatível com Excel, para que possam ser tratados e analisados.

Em certos casos, devido às deformações impostas em certas regiões serem de grandes magnitudes, as marcações na superfície perdem a sua nitidez, tornando-se assim difícil a sua perceção através da câmara do sistema referido anteriormente. Nestes casos, recorreu-se à medição manual dessas elipses através de um microscópio. Para a realização dessas medições, os eixos principais das elipses são transpostos, através de marcações manuais, da superfície do provete para papel, de modo a que estes eixos possam posteriormente ser medidos. Nestes casos, foi utilizado um microscópio ótico Mitutoyo TM (Figura 25).



Figura 25 – Microscópio ótico Mitutoyo TM.

Fonte: TM Gen B - Microscópio de Medição by MITUTOYO | DirectIndustry (s.d.)

- **Método da Correlação Digital de Imagens**

Para os ensaios realizados na máquina universal de ensaios Instron 5900R foi utilizado um sistema de Correlação Digital de Imagens da marca Dantec Dynamics, modelo Q-400 3D (Figura 26), que consiste em duas câmaras com resolução de 6 *megapixels*, montadas num suporte de forma que consigam captar o provete de diferentes ângulos. Estas câmaras estão ligadas a um sistema de aquisição de dados com o software Instra 4D, que faz o processamento e correlação das imagens captadas.



Figura 26 – Sistema de Correlação Digital de Imagens Dantec Dynamics Q-400 3D.

Fonte: Magrinho (2019)

Este método de medição também tem de sofrer um processo de calibração para a sua correta aplicação. É necessário calibrar a captação da imagem no que toca aos diferentes ângulos de cada câmara em relação ao provete para que o padrão presente na superfície do provete seja captado da melhor forma possível.

No software utilizado, foi necessário seleccionar para cada provete uma sequência de pontos de interesse localizados na região adjacente à fratura, para que pudessem ser recolhidos os dados de extensão relativos a esses pontos (Figura 27). Esses dados são fornecidos pelo software num formato *.txt*, sendo posteriormente tratados em Excel. Com esses dados de extensão torna-se então possível aplicar a metodologia proposta por Martínez-Donaire et al. (2014), mencionada na Secção 2.1.2, em que se procura o ponto mais próximo da região de estrição, utilizando as evoluções temporais da extensão principal, ϵ_1 , correspondente a cada ponto seleccionado.

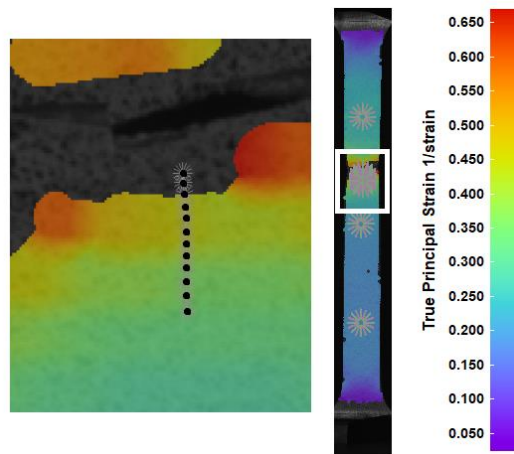


Figura 27 – Representação de um exemplo da seleção de pontos realizada para a aplicação da metodologia dependente do tempo de Martínez-Donaire et al. (2014)

3.1.3.2. Medição de espessuras

Para obter os valores das extensões na direção da espessura da chapa, foram realizadas medições à espessura da região de fratura dos provetes. As medições foram realizadas através de um microscópio ótico Mitutoyo TM (Figura 25).

Para a realização deste processo, os provetes fraturados foram cortados em partes de menor dimensão, para melhor manuseamento e de forma que estas coubessem dentro da área de trabalho do microscópio, deixando intactas as zonas de fratura.

Em cada um dos lados de cada fratura, foram realizados conjuntos de várias medições (cuja quantidade depende da dimensão da fratura) e para cada conjunto foi retirada a média desses valores para servir como valor representativo dessa fratura.

3.1.4. Resultados

Através da análise e tratamento dos dados obtidos dos ensaios de tração, foi possível obter as curvas tensão-extensão reais dos mesmos e, por sua vez, a partir destas foi então possível a obtenção de todas as outras propriedades mecânicas relevantes para este estudo. Estas propriedades podem ser observadas na Tabela 4. É de notar que os valores para cada uma das direções de laminagem foram obtidos através das médias dos valores de todos os ensaios, e para o cálculo do valor médio final foi utilizada a equação,

$$\bar{x} = \frac{x_0 + 2x_{45} + x_{90}}{4} \quad (7)$$

em que x representa a propriedade em causa.

Tabela 4 – Resultados obtidos correspondentes às propriedades mecânicas do material.

Direção de laminagem	E (GPa)	σ_c (MPa)	σ_r (MPa)	A (%)	K (MPa)	n	r
0°	78,91	43,61	115,24	30,34	215,1	0,254	0,67
45°	77,30	44,47	117,67	32,91	221,9	0,260	0,61
90°	78,25	44,72	116,67	30,75	221,7	0,260	0,73
Média	77,94	44,32	116,81	31,73	220,2	0,259	0,66

Na Tabela 4, o símbolo E representa o módulo de Young, σ_c representa a tensão de cedência, σ_r representa a tensão de rotura, A representa a extensão na fratura, K e n representam os parâmetros do modelo de Ludwik-Hollomon, sendo eles o coeficiente de resistência e o coeficiente de encruamento do material, respetivamente, e r representa os coeficientes de anisotropia, calculados através da equação,

$$r = \frac{\varepsilon_{largura}}{\varepsilon_{espessura}} \quad (8)$$

Considerando os valores médios para os parâmetros do modelo de Ludwik-Hollomon, é possível afirmar que a curva de tensão-extensão média do material pode ser aproximada pela equação em valores verdadeiros,

$$\sigma = 220,2\varepsilon^{0,259} \text{ (MPa)} \quad (9)$$

O valor médio para os coeficientes de anisotropia, r , corresponde ao valor de anisotropia normal, \bar{r} , calculado pela Equação 7, à semelhança dos restantes parâmetros. O valor para a anisotropia planar, Δr , é calculado através da equação,

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (10)$$

sendo que foi obtido um valor de $\Delta r = 0,09$. Considerando os valores obtidos para estes dois parâmetros, é possível afirmar que o material é praticamente isotrópico no plano da chapa, mas que sofre alguma redução na sua espessura quando solicitado.

Relativamente aos resultados obtidos dos ensaios de Bulge, foi possível também traçar os gráficos de tensão-extensão reais, a partir dos quais foram obtidos os parâmetros do modelo de Ludwik-Hollomon. As curvas deste modelo obtidas a partir dos ensaios de

Bulge podem ser observadas na Figura 28, juntamente com as curvas referentes aos ensaios de tração, sendo que no caso dos ensaios de Bulge foram utilizados os parâmetros obtidos de cada um dos três ensaios circulares realizados e no caso dos ensaios de tração foi utilizada a média dos ensaios realizados em cada uma das direções de laminagem.

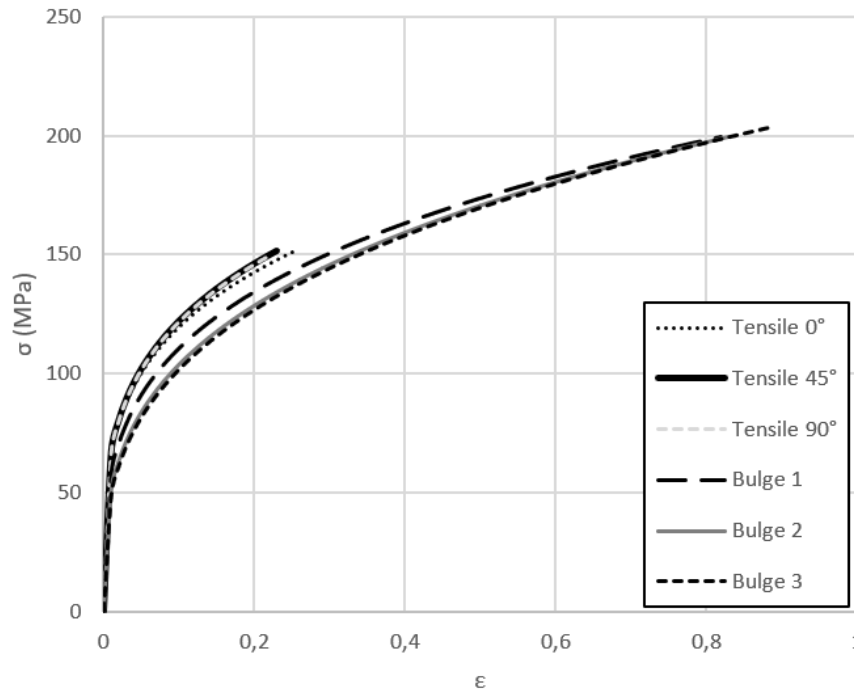


Figura 28 – Curvas de comportamento do material obtidas pelo modelo de Ludwik-Hollomon, a partir de ensaios de tração e ensaios Bulge.

Como se pode observar, para cada tipo de ensaio é obtida uma boa repetibilidade entre provetes, e comparando entre os dois tipos de ensaios é obtido um comportamento mecânico bastante semelhante, apesar de, no caso dos ensaios de Bulge, as curvas se encontrarem ligeiramente abaixo das curvas obtidas pelos ensaios de tração e serem obtidos valores de extensão muito superiores aos obtidos pelos ensaios de tração. Esta diferença nos valores de extensão obtidos tem que ver com o facto de em casos de solicitações biaxiais, como é o caso dos ensaios de Bulge, é necessária uma extensão efetiva maior até que ocorra algum efeito de instabilidade plástica, sendo que num caso equilibrado seria necessário o dobro da deformação, devido à sua natureza biaxial (Janbakhsh et al., 2013). Isto explica a diferença de valores, visto que as curvas estão representadas até ao instante de rutura do respetivo ensaio.

Apesar de anteriormente ter sido exposta uma lei de comportamento mecânico do material obtida exclusivamente a partir de ensaios de tração (Equação 9), seria correto

realizar uma aproximação considerando também os resultados obtidos dos ensaios de Bulge, pois apesar de os ensaios de tração fornecerem melhores dados relativos à fase inicial de deformação do material, os ensaios de Bulge produzem melhores dados no que toca às maiores extensões, precisamente pelo facto de estes conseguirem aguentar maiores deformações até à ocorrência de instabilidade plástica.

3.2. Caracterização de enformabilidade

Neste subcapítulo é descrito todo o processo realizado com vista à caracterização da enformabilidade do material através de ensaios convencionais.

Acrescendo aos ensaios já descritos na Secção 3.1.2, nesta Secção são descritos os restantes ensaios convencionais realizados, sendo eles os ensaios de Nakajima, double-notched tensile (DNT) e double-notched shear (DNS).

Relativamente à preparação destes provetes, foram realizados os mesmos processos referidos na secção anterior, apenas com algumas exceções.

No caso do corte dos provetes, os provetes de Nakajima foram produzidos utilizando o mesmo método de corte por jato de água referido anteriormente na Secção 3.1.1.1, mas os provetes de DNT e DNS foram maquinados por fresagem num centro de maquinagem, no Núcleo de Oficinas (NOF), no IST.

Relativamente às marcações utilizadas em cada provete, os provetes de ensaio Nakajima foram marcados utilizando a grelha de círculos, descrito na Secção 3.1.1.2, enquanto os provetes de DNT e DNS foram marcados com o padrão utilizado para o sistema de Correlação Digital de Imagens, descrito na mesma Secção.

O tratamento térmico foi também o mesmo aplicado nos provetes de tração e Bulge.

3.2.1. Ensaios realizados

Como já foi referido anteriormente, a caracterização de enformabilidade do material neste projeto foi realizada por meio dos ensaios utilizados para a caracterização mecânica do material, descritos na Secção 3.1.2, assim como por mais três tipos de ensaio: ensaios de Nakajima, ensaios de double-notched tensile (DNT) e ensaios de double-notched shear (DNS). Nesta subsecção é descrito detalhadamente todo o processo, parâmetros e equipamentos utilizados para a realização destes últimos três tipos de ensaios.

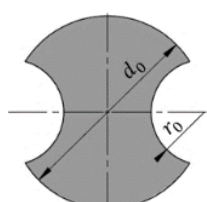
3.2.1.1. Ensaios Nakajima

Os ensaios Nakajima foram realizados segundo a norma ISO Standard 12004-2 (2008). À semelhança dos ensaios de Bulge, foram também realizados numa máquina universal de ensaios Erichsen 145/60 (Figura 23).

Para a realização destes ensaios, o provete é colocado na máquina de ensaios e fixo utilizando um encostador, e é posteriormente deformado utilizando um punção hemisférico, até que ocorra a sua fratura. De modo a reduzir o atrito entre a ferramenta da máquina e o provete, é usada uma camada de Teflon coberta com massa grafitada em ambos os lados, que é então colocada entre o provete e a ferramenta.

Foram realizados ensaios com diferentes variações da geometria dos provetes, de modo a obter diferentes trajetórias de deformação, e obter assim diagramas de enformabilidade mais completos. Estas variações consistem na alteração do raio dos cortes laterais que os provetes possuem. O plano de ensaios pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões dos provetes de ensaio de Nakajima.

Quantidade	Dimensões		Representação esquemática
	Diâmetro (mm)	Raio do corte (mm)	
3	$d_0 = 210$	$r_0 = 50$	
3		$r_0 = 57,5$	
3		$r_0 = 72,5$	
3		$r_0 = 80$	

É de notar que 3 dos conjuntos ($r_0 = 50mm$, $r_0 = 57,5mm$ e $r_0 = 80mm$) foram reduzidos a apenas 2 provetes devido ao facto de esses ensaios terem sido realizados antes do tratamento térmico de recozimento ter sido aplicado, o que resultou na fratura precoce dos provetes, ficando assim estes provetes excluídos do tratamento de dados. Os resultados obtidos destes ensaios são mostrados na Secção 4.1.1.

3.2.1.2. Ensaios double-notched tension (DNT)

Os ensaios DNT têm como objetivo caracterizar a tenacidade à fratura do material, em modo I da mecânica da fratura. Apesar disso, no presente trabalho, foram apenas utilizados para a caracterização de enformabilidade do material.

Este tipo de ensaios tem por base o mesmo funcionamento dos ensaios de tração, em que o provete é tracionado em ambas as extremidades e em sentido opostos, até ocorrer fratura. A única diferença está na geometria do provete, pois a geometria destes provetes, como já referido, foi projetada para a determinação da tenacidade à fratura do material em modo I da mecânica da fratura, utilizando a metodologia do Essential Work of Fracture (EWF). O plano de ensaios encontra-se representado na Tabela 6.

Tabela 6 – Dimensões dos provetes de ensaio DNT.

Quantidade	Dimensões (mm)	Representação esquemática
5	$L = 125$	
	$W = 50$	
	$l_0 = 10$	
	$h_0 = 30$	

À semelhança dos ensaios de tração, estes ensaios foram realizados numa máquina universal de ensaios Instron 5900R (Figura 22). Os resultados obtidos destes ensaios são apresentados na Secção 4.1.1.

3.2.1.3. Ensaios double-notched shear (DNS)

Os ensaios DNS têm como objetivo a caracterização mecânica de chapas metálicas no que toca à sua resistência ao corte, ou sejam no modo II da mecânica da fratura. A sua geometria com entalhes a 45° promove uma fratura em corte do ligamento do provete.

Estes ensaios foram realizados segundo a norma ASTM Standard B831-19 (2019) e o funcionamento do ensaio, à semelhança dos ensaios DNT, tem o mesmo princípio dos ensaios de tração, em que ambas as pontas do provete são tracionadas em sentido opostos até à fratura, sendo que, novamente, a diferença apenas reside na geometria que o provete possui. O plano de ensaios pode ser visto na Tabela 7.

Como os ensaios de tração e DNT, estes ensaios foram realizados numa máquina universal de ensaios Instron 5900R (Figura 22). Os resultados obtidos destes ensaios são mostrados na Secção 4.1.1.

Tabela 7 – Dimensões dos provetes de ensaio DNS.

Quantidade	Dimensões (mm)	Representação esquemática
5	$L = 125$	
	$W = 38,1$	
	$l_0 = 4,72$	
	$h_0 = 1,63$	
	Ângulo do entalhe = 45°	

3.3 Estampagem incremental

Nesta subsecção do trabalho é descrito todo o processo dos ensaios de estampagem incremental, desde a descrição do equipamento utilizado aos parâmetros de processo selecionados.

A preparação dos provetes consistiu nos mesmos processos utilizados para os provetes mencionados nas secções anteriores, tendo sido as chapas cortadas utilizando uma guilhotina (Secção 3.1.1.1), marcadas com grelha de círculos (Secção 3.1.1.2) e tratadas utilizando o mesmo tratamento térmico que os restantes provetes (Secção 3.1.1.3), apesar de, neste caso, o tratamento térmico ter sido realizado num forno Hobersal HCV-42 (Figura 29), devido às dimensões dos provetes.



Figura 29 – Forno Hobersal HCV-42.

3.3.1 Ensaios realizados/Plano de ensaios

Os ensaios de estampagem incremental foram realizados num centro de maquinagem Leadwell V40 com um controlador Fanuc 0i-MC (Figura 30), localizado na Unidade de Apoio Geral de Material do Exército (UAGME).



Figura 30 – Centro de maquinagem Leadwell V40.

Para a realização dos ensaios foram utilizadas duas estruturas cúbicas (Figura 31(a) e (b)), cada uma com uma placa espera distinta, juntamente com 4 encostadores, cuja função é fixar a chapa e impedir que esta tenha qualquer movimento ao longo do ensaio. Os encostadores são fixados na placa espera por intermédio de 3 parafusos cada um. Foram também utilizadas duas ferramentas com ponta hemisférica, de diferentes diâmetros, nomeadamente, 8mm e 12mm (Figura 31(c)), cujo desenho técnico se encontra nos Anexos A e B.

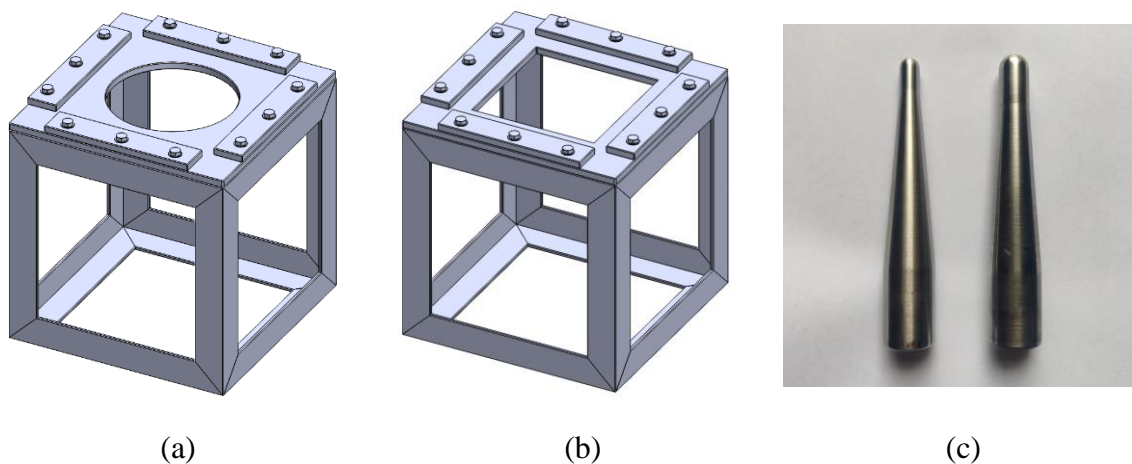


Figura 31 – Modelos de estruturas para ensaios de estampagem incremental para geometrias (a) cónicas truncadas e (b) piramidais truncadas; (c) ferramentas hemisféricas.

Ambas as placas espera possuem dois recortes centrais de diferentes geometrias, sendo que uma tem um recorte circular de 165mm de diâmetro e outra possui um recorte quadrado com 170mm de lado, pois cada uma das placas espera foi utilizada na produção de diferentes geometrias.

Os modelos das geometrias a produzir foram feitos no software de CAD, SOLIDWORKS. Como se pode observar na Figura 32, as geometrias iniciam com um ângulo constante de 30° ao longo dos primeiros 10mm de profundidade na peça e, após esta fase, o ângulo passa a ser variável à medida que se aumenta a profundidade. O facto de se utilizar um ângulo variável prende-se com facto de desta forma ser possível identificar o ângulo máximo de estampagem que é possível atingir antes da peça fraturar, sem que seja preciso fazer vários ensaios com diferentes ângulos cada um. Este ângulo corresponde ao ângulo entre o plano da chapa e a zona da superfície em que ocorre a fratura do provete. Após isto, os modelos foram passados para o software de CAM, MastercamX5, a fim de produzir as trajetórias das ferramentas em código G, para que pudessem ser interpretadas pelo centro de maquinagem. As trajetórias das ferramentas consistem em trajetórias convencionais que cobrem toda a superfície lateral das geometrias.

Ambas as ferramentas utilizadas nos ensaios foram produzidas em aço inoxidável e com uma ponta hemisférica, sendo que uma delas possui um diâmetro de 8mm e outra possui um diâmetro de 12mm. A ponta destas ferramentas foi polida para que o atrito entre elas e a chapa fosse reduzido ao mínimo e para que não fossem deixadas imperfeições na superfície das peças produzidas, conferindo-lhes assim o mínimo de rugosidade possível. Para além disto foi ainda utilizado um lubrificante, denominado Iloform TDN 81, sobre toda a superfície da chapa, para ajudar a reduzir o atrito existente entre a ferramenta e a chapa.

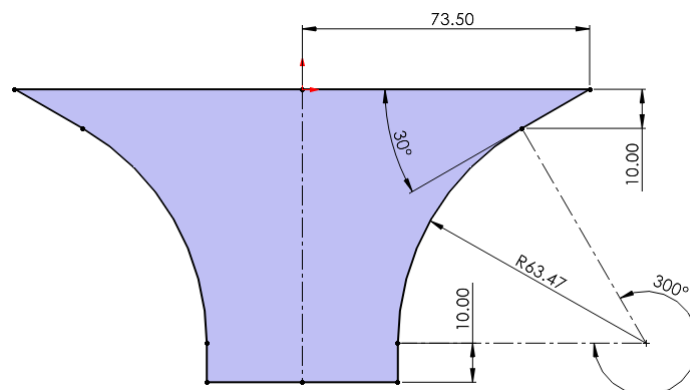


Figura 32 - Desenho técnico da secção das geometrias de referência utilizadas nos ensaios de estampagem incremental.

Relativamente ao incremento vertical da ferramenta (*step*), foram realizados ensaios com valores diferentes, tendo sido, neste caso, utilizados os valores 0,2mm e 0,5mm, de modo que se pudessem avaliar as diferenças entre os dois casos e qual deles seria o melhor a adotar. Foram utilizados estes dois valores por serem os valores mais comuns nos ensaios realizados na literatura consultada. Quanto ao avanço, foram adotados os valores de 1000mm/min, por ser o valor mais comum a ser utilizado na bibliografia existente, e o valor de 700mm/min, para haver um termo de comparação dentro deste parâmetro. Por fim, o valor referente à rotação do *spindle*, pretendia-se inicialmente que fosse nulo, ou seja, o *spindle* deveria rodar livremente sobre a superfície da peça, consoante a sua necessidade, de forma a reduzir o atrito entre a ferramenta e a chapa, e, caso isto não fosse possível, deveria ser utilizado um valor de 30rpm. Por limitações do centro de maquinagem utilizado, o valor utilizado foi de 70rpm por ser o valor mais baixo suportado pelo equipamento.

Considerando todas as variáveis mencionadas anteriormente, foi realizado um plano de ensaios que permite a comparação entre estes parâmetros que pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Plano de ensaios relativo aos ensaios de estampagem incremental.

Grupo	Quantidade	Geometria	∅ Ferramenta (mm)	Step (mm)	Avanço (mm/min)	Spindle (rpm)
1	2	Cónica	12	0,2	700	70
2	2	Cónica	8	0,2	700	70
3	2	Cónica	12	0,2	1000	70
4	2	Cónica	12	0,5	1000	70
5	2	Piramidal	12	0,2	1000	70
6	2	Piramidal	12	0,5	1000	70

É de notar que os primeiros dois ensaios realizados, pertencentes aos grupos 1 e 2, quando terminados, ficaram ambos com uma elevada rugosidade superficial devido à trajetória definida, pois a máquina calculou ambas as trajetórias “bloco a bloco”, o que faz com que as trajetórias fiquem com pequenos desvios acentuados no percurso da ferramenta (Figura 33(a)). Para combater esta questão, no código gerado por MastercamX5, foi adicionado, no cabeçalho do programa o código “G0.5 Q1” e no fim do programa o código “G0.5 Q0”, que altera o modo de leitura da máquina, fazendo com que esta leia os blocos de

código subsequentes ao que está a executar, de modo a ser capaz de definir uma trajetória mais contínua, considerando as posições dos pontos individualmente descritos e criando uma aproximação com estas posições. Este tipo de trajetória foi então aplicado nos restantes ensaios, mantendo os mesmos parâmetros de processo, o que resultou num melhor acabamento superficial (Figura 33(b)).



(a)



(b)

Figura 33 – Acabamento superficial (a) antes da alteração do código G e (b) após a alteração do código G.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados, inicialmente, todos os resultados relativos à caracterização de enformabilidade, tanto pelos ensaios convencionais como pelos ensaios de estampagem incremental e, por fim, é apresentado o processo de aplicação da estampagem incremental num caso de estudo que consiste na produção de uma peça industrial.

4.1 Limites de enformabilidade

Neste subcapítulo são descritos todos os resultados obtidos relativos à caracterização de enformabilidade do material. Esta caracterização foi inicialmente realizada considerando os resultados obtidos a partir dos ensaios convencionais, sendo depois comparada com os resultados obtidos nos ensaios de estampagem incremental.

4.1.1. Ensaio convencionais

Considerando os resultados obtidos a partir dos ensaios convencionais realizados foi então possível traçar os limites de enformabilidade do material, sendo elas a Curva Limite de Enformabilidade (CLE), a Curva Limite de Fratura (CLF) e a Curva Limite de Fratura ao Corte (CLFC), utilizando os procedimentos descritos na Secção 2.1.2. As curvas obtidas para o material em estudo encontram-se representadas na Figura 34.

É possível observar que existem dois tipos de representação para cada tipo de provete. No caso dos provetes de tração, Nakajima e Bulge foram apenas indicados os instantes de ocorrência de estrição e de fratura, marcados com símbolos vazios e sólidos, respetivamente. No caso dos provetes de DNT e DNS são utilizadas as suas trajetórias de deformação obtidas pelo sistema de Correlação Digital de Imagens, assim como uma marca sólida a representar o instante de fratura. O facto de serem utilizadas trajetórias de deformação em vez de pontos de ocorrência de estrição tem que ver com o facto de estes provetes possuírem entalhes e desta forma existir uma deformação localizada logo desde o início do ensaio, e desta forma não são utilizados para a determinação da CLE por estarem condicionados desde o início. É também possível observar linhas verticais em traço interrompido que representam a trajetória em deformação plana que cada tipo de provete adota após o instante do aparecimento de estrição, devido à localização de instabilidade plástica (Isik et al., 2014), formando a ligação deste ponto até ao ponto representativo da fratura.

Relativamente aos limites graficados, no caso da CLE, foram utilizados os pontos de estricção dos ensaios de tração, Nakajima e Bulge, e foi obtido o seu formato característico em “V”.

No caso da CLF, foi representada utilizando os pontos de fratura dos provetes de tração, DNT, Nakajima e Bulge. Com o intuito de lidar com possíveis incoerências no processo de determinação dos pontos de fratura, foi também graficada uma zona sombreada em redor da CLF que representa um intervalo de 10% de incerteza, tanto acima como abaixo. Desta forma, possíveis pontos de fratura não coincidentes com a CLF, mas que se encontrem dentro desse intervalo ainda são considerados aceitáveis. Apesar de, segundo Isik et al. (2014), a CLF dever ser representada como uma reta de inclinação “-1”, no caso deste material e com os resultados obtidos dos ensaios realizados, foi obtida uma inclinação de “-0.41”, bastante abaixo do que seria esperado, intersectando o eixo vertical no valor de “1.20”. Considerando estes valores, é possível representar a curva através da seguinte equação:

$$\varepsilon_{1f} = -0.41\varepsilon_{2f} + 1.20 \quad (11)$$

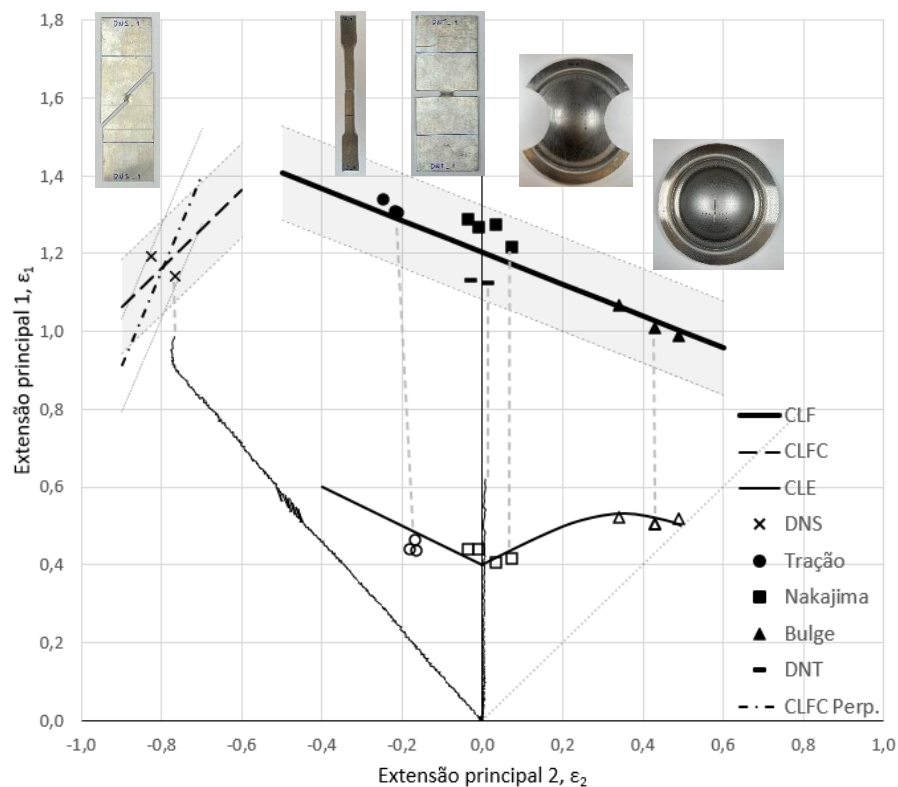


Figura 34 - Limites de deformabilidade obtidos a partir dos ensaios convencionais.

Por fim, quanto à CLFC, foi representada utilizando os dados de um tipo de ensaios, os ensaios DNS, o que torna impossível determinar com certeza os parâmetros que definem a reta. Por este motivo, optou-se por definir a CLFC de duas formas distintas, nomeadamente, com uma inclinação de “+1”, consoante o que é proposto no trabalho de Isik et al. (2014), passando pela zona de fratura dos provetes de DNS, e também com uma inclinação perpendicular à CLF determinada pelos restantes ensaios, também à imagem do que é referido no mesmo trabalho relativamente à existência de uma perpendicularidade entre estas duas curvas. Apesar de terem sido realizadas estas representações da CLFC, estas são apenas representativas e não correspondem à realidade deste material. À semelhança da CLF, foi também marcada uma zona de incerteza de 10% em seu redor.

4.1.2. Estampagem incremental

Tendo estabelecido os limites de enformabilidade do material por ensaios convencionais, torna-se então possível comparar estes limites com os resultados obtidos nos ensaios de estampagem incremental e tirar conclusões acerca dos parâmetros que fornecem maior enformabilidade no material.

Visto que foram realizados seis grupos de dois ensaios, como apresentado na Tabela 8, foi garantida a repetibilidade dos ensaios de cada conjunto de parâmetros através da comparação do ângulo máximo de estampagem obtido nos provetes de cada grupo, de forma que seja apenas necessário a utilização de um dos ensaios para efeitos de comparação entre grupos. Esta comparação entre os ensaios do mesmo grupo pode ser observada na Figura 35.

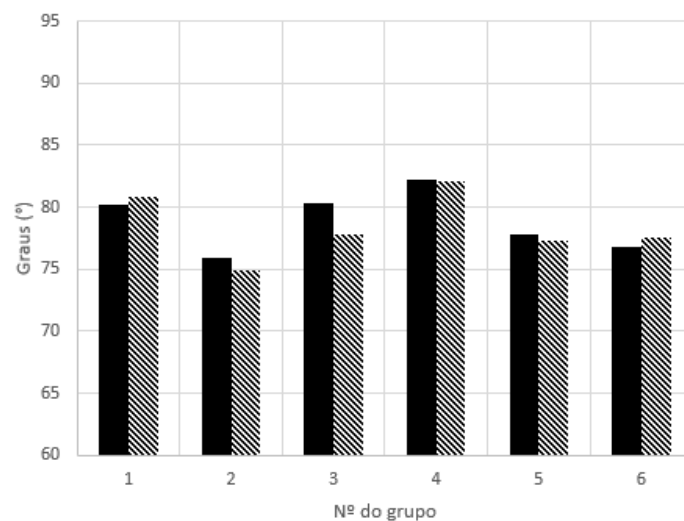


Figura 35 – Comparação dos valores de ângulo máximo de estampagem entre os provetes de cada grupo de ensaios.

É possível observar que a maior diferença no valor de ângulo máximo de estampagem se situa entre os ensaios do grupo 3, com uma diferença de 3,1%, que, apesar de ser a maior diferença, não é uma diferença significativa.

De forma a avaliar a influência na enformabilidade dos dois valores de incremento vertical utilizados, é possível realizar duas comparações, nomeadamente, entre os grupos 3 e 4 e entre os grupos 5 e 6. Em ambos os casos é utilizada uma ferramenta de 12mm e um avanço de 1000mm/min, sendo que a diferença entre as duas comparações se prende com a geometria, pois a primeira consiste em geometrias cónicas (Figura 37) e a segunda em geometrias piramidais (Figura 38).

Ambos os gráficos apresentam trajetórias com formatos dentro do que seria esperado, visto que nos ensaios cónicos existe uma forte tendência de deformação plana e nos ensaios piramidais existe tanto uma trajetória de deformação plana referente às laterais das pirâmides, assim como uma trajetória de deformação biaxial, característica das deformações ocorrentes nos cantos das pirâmides. De um ponto de vista comparativo, é possível observar que em ambos os casos existem maiores níveis de enformabilidade com incrementos de 0,5mm, o que vai contra os resultados presentes na bibliografia analisada, que apresenta melhores níveis de enformabilidade com incrementos verticais menores.

Deve também ser mencionado que no caso dos gráficos correspondentes às geometrias piramidais, as fraturas ocorreram nos cantos ou muito próximas destes e desta forma, os pontos representados com uma marca sólida na zona correspondente a deformação plana apenas correspondem a pontos equivalentes aos que sofreram fratura nos cantos da geometria.

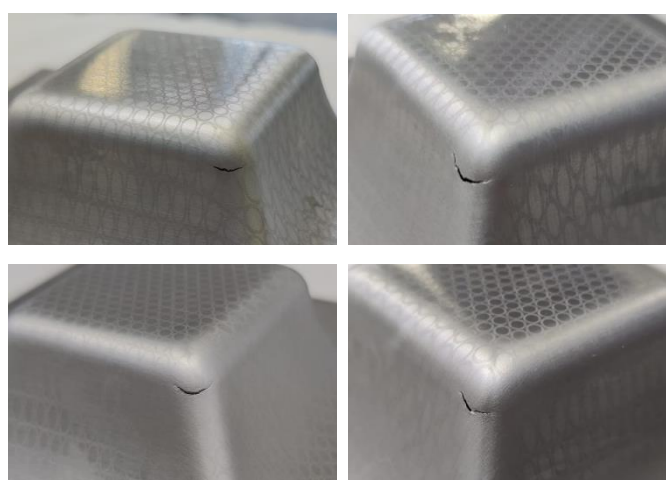


Figura 36 - Fraturas ocorrentes em provetes de geometria piramidal

Os pontos de fratura, em ambos os casos, ocorrem acima da CLF definida pelos ensaios convencionais. Seria esperado que estes ocorressem dentro do intervalo de 10% de incerteza definido pela CLF, o que não se verifica.

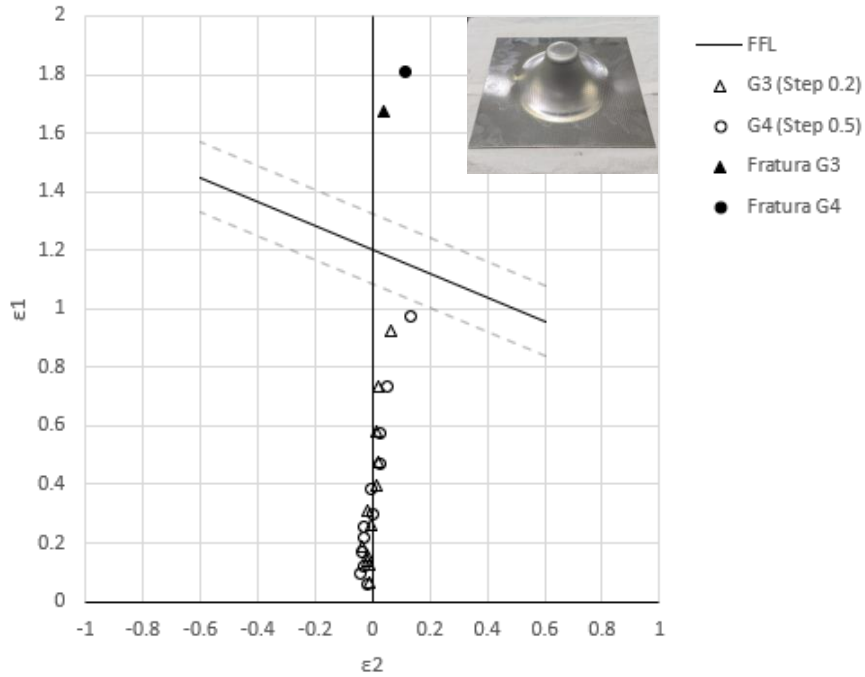


Figura 37 – Comparação entre resultados obtidos de ensaios de estampagem incremental em geometrias cónicas utilizando valores de incremento vertical de 0,2mm e 0,5mm.

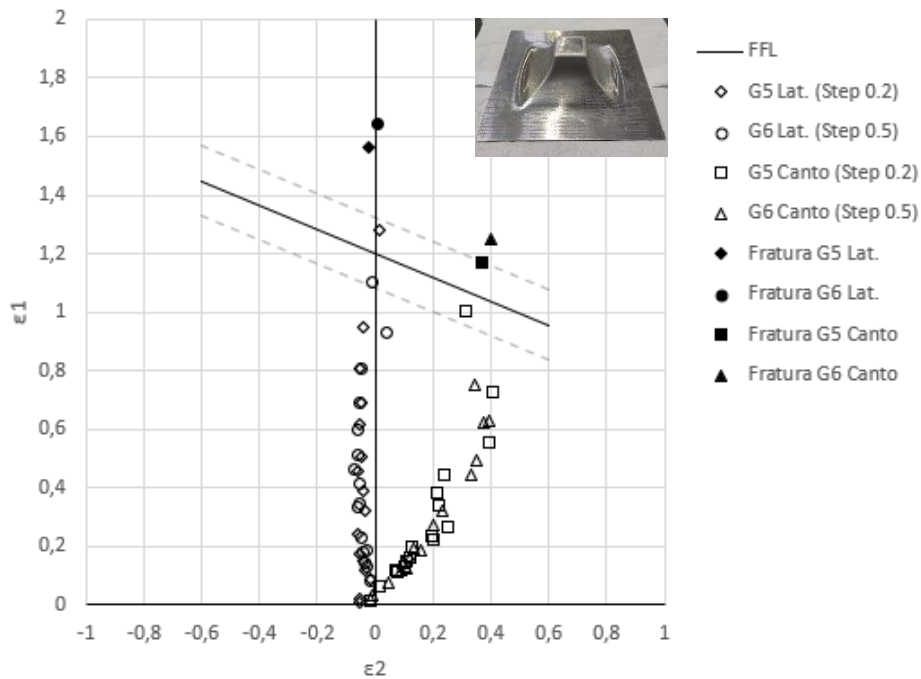


Figura 38 - Comparação entre resultados obtidos de ensaios de estampagem incremental em geometrias piramidais utilizando valores de incremento vertical de 0,2mm e 0,5mm.

No que diz respeito ao diâmetro da ferramenta utilizada, pode ser feita a comparação entre os grupos 1 e 2, cujos ensaios foram realizados em geometrias cónicas, com um avanço de 700mm/min e aplicando um incremento vertical de 0,2mm.

É possível observar pela Figura 39 que a ferramenta de maior diâmetro (12mm) apresenta níveis de enformabilidade maiores do que a ferramenta de menor diâmetro (8mm), contrariamente ao que seria de esperar, segundo a bibliografia. Esta diferença deve-se ao facto de nos ensaios realizados com ferramenta de 8mm, a ferramenta remover aparas do material, danificando a sua superfície e integridade (Figura 40). Este efeito já tinha sido documentado por Skjoedt et al. (2007b), que associam este fenómeno à deformação incremental de materiais macios. Deste modo, e apesar de os resultados se manterem próximos da CLF já determinada, a enformabilidade criada por esta ferramenta foi bastante reduzida relativamente à ferramenta de 12mm.

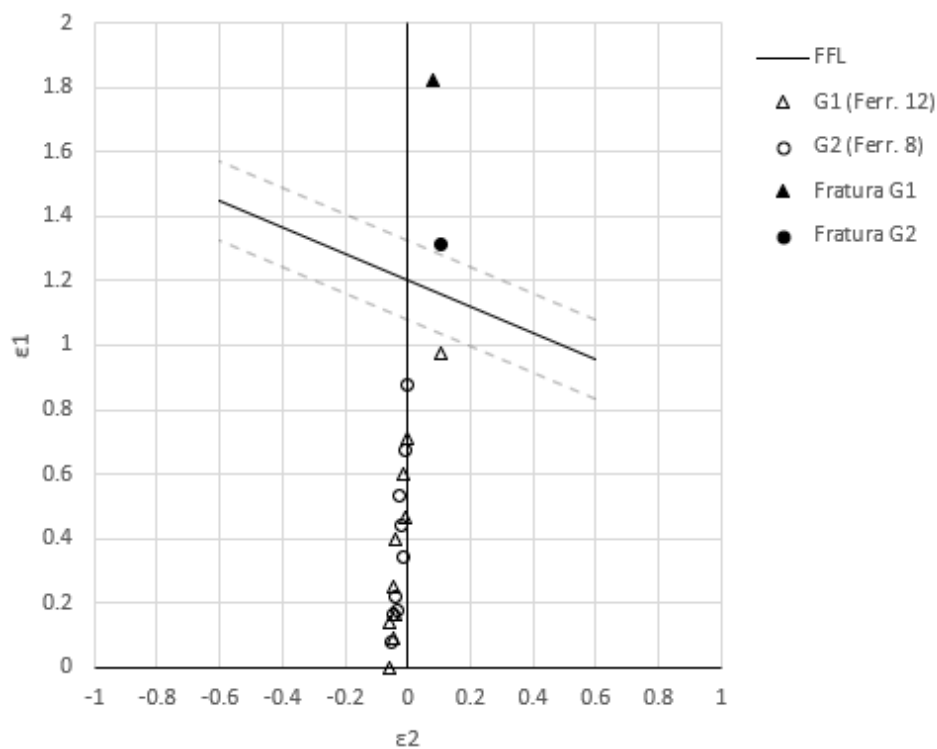


Figura 39 - Comparação entre resultados obtidos de ensaios de estampagem incremental utilizando ferramentas de 8mm e 12mm de diâmetro.

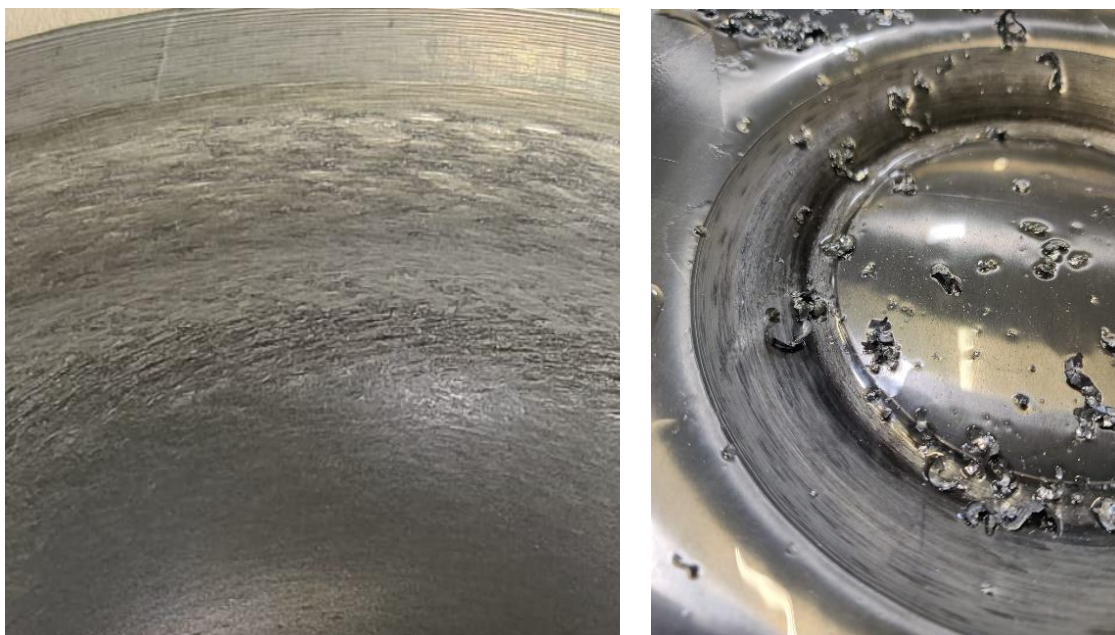


Figura 40 - Dano causado na superfície dos provetes realizados com ferramenta de 8mm.

Ambos os ensaios analisados apresentam uma trajetória de deformação plana bem definida, mas é de notar que os pontos com maiores extensões apresentam um pequeno desvio para o primeiro quadrante, justificado com o facto de estes pontos terem sido medidos manualmente e, conseqüentemente, terem uma maior probabilidade de conterem erros associados à medição. À semelhança dos casos apresentados anteriormente, os pontos de fratura também se encontram acima do esperado, ultrapassando a CLF com alguma margem.

Por fim, quanto ao avanço da ferramenta, foram comparados dois valores distintos, sendo eles 700mm/min e 1000mm/min, representados pelos grupos 1 e 3, respetivamente.

Pela Figura 41, é possível observar que no caso em que se utilizou um avanço de 700mm/min foi obtida uma maior enformabilidade, como seria de esperar, apesar de o caso em que se utilizou um avanço de 1000mm/min apresentar valores de enformabilidade bastante semelhantes. Neste caso e à semelhança dos anteriores, os pontos representativos da fratura também se encontram acima da CLF previamente determinada.

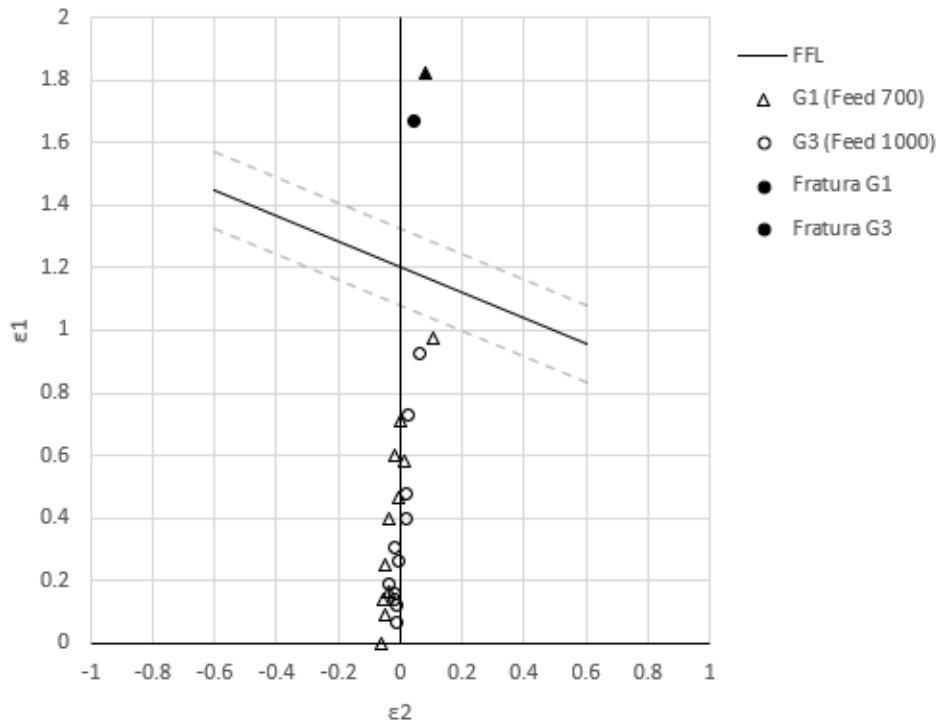


Figura 41 - Comparação entre resultados obtidos de ensaios de estampagem incremental utilizando avanços de ferramenta de 700mm/min e 1000mm/min.

Tomando uma visão geral dos resultados obtidos através dos ensaios de estampagem incremental, observa-se um facto inesperado e comum a todos os ensaios, pois os valores de extensão na fratura obtidos ultrapassam a CLF, determinada através dos ensaios convencionais previamente realizados. Centeno et al. (2014) obtiveram resultados semelhantes nos ensaios de estampagem incremental que realizaram em chapas de aço AISI 304 com 0,8mm de espessura, no sentido em que obtiveram também pontos de fratura a ocorrer para além da CLF. Os autores atribuem a explicação deste fenómeno à sensibilidade do material relativamente ao estado de triaxialidade de tensões na fratura. Em casos de solicitações biaxiais, como é o caso dos ensaios de Nakajima, os valores de triaxialidade de tensões obtidos são superiores aos valores obtidos em casos de deformação plana (Silva et al., 2011), e, no caso de o material possuir uma maior sensibilidade ao estado de triaxialidade de tensões no instante da fratura, torna-se provável que não exista coincidência dos valores de deformação na fratura entre esses dois casos. O estado de triaxialidade de tensões é definido pela equação $\sigma_m/\bar{\sigma}$, em que $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ e $\bar{\sigma}$ corresponde à tensão efetiva.

Considerando que, no presente caso, se está a lidar com um material que possua uma maior sensibilidade a este parâmetro, o facto de a CLF ser determinada utilizando ensaios

de Nakajima (que possuem maior valores de triaxialidade de tensões), faz com que ocorra uma fratura prematura e o limite seja definido ligeiramente abaixo do que seria se fossem utilizados ensaios de estampagem incremental, justificando assim este fenômeno.

Considerando apenas os ensaios de estampagem incremental, a CLF obtida (Figura 42) teria uma inclinação de “-0.59” e uma interseção no eixo vertical no valor de “1.32”.

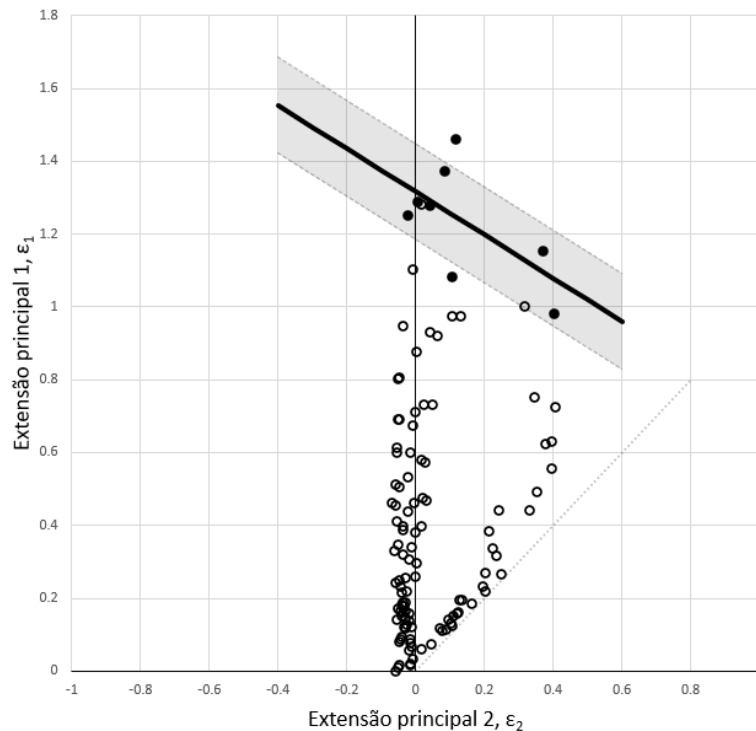


Figura 42 – Curva limite de fratura obtida a partir dos resultados correspondentes ao conjunto de ensaios de estampagem incremental realizados.

4.2 Rugosidades

O acabamento superficial obtido após a aplicação do processo de estampagem incremental também é um parâmetro relevante para a avaliação do sucesso da operação. Deste modo, foram avaliadas as rugosidades superficiais obtidas nos provetes fabricados.

Para esta avaliação, foi medido um dos provetes de cada grupo utilizando o conjunto dos equipamentos MarSurf M300, da marca Mahr, e MarSurf RD18, da mesma marca (Figura 43(a)). O procedimento de medição consiste na colocação da sonda sobre a superfície que se pretende medir e o dispositivo automaticamente faz uma avaliação da rugosidade da superfície e expõe os resultados (Figura 43(b)). Estes resultados contêm três

parâmetros de rugosidade distintos, sendo eles a rugosidade média, R_a , o desvio médio quadrático, R_q , e a altura máxima entre pico e vale, R_z .

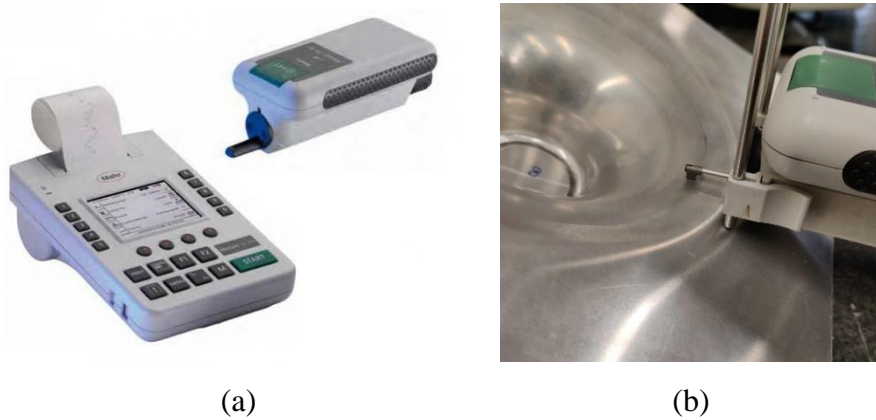


Figura 43 – (a) Equipamentos MarSurf M300 e MarSurf RD18, da marca Mahr e (b) procedimento de medição de rugosidades.

Fonte: (a) MarSurf M300 Mahr Federal Portable Surface Roughness Tester with 5 Micron Stylus (s.d.)

Para cada provete foram retiradas três medidas em zonas diferentes da superfície, numa direção perpendicular ao avanço da ferramenta sobre a chapa, e destes valores foi feita uma média para servir como valor representativo da peça em causa. Os resultados destas medições podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados obtidos da medição de rugosidades realizada nos provetes dos ensaios de estampagem incremental.

Grupo	Ø Ferr. (mm) / Step (mm) / Avanço (mm/min) / Spindle (rpm)	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)
1	12 / 0,2 / 700 / 70	0,199	0,251	1,133
2	8 / 0,2 / 700 / 70	2,372	3,192	12,620
3	12 / 0,2 / 1000 / 70	0,257	0,334	1,696
4	12 / 0,5 / 1000 / 70	0,347	0,444	1,736
5	12 / 0,2 / 1000 / 70	0,237	0,340	1,527
6	12 / 0,5 / 1000 / 70	0,360	0,484	1,747

Da avaliação destas medições é possível observar que o grupo 1, realizado com ferramenta de 12mm, incremento vertical de 0,2mm e avanço de 700mm/min obteve os melhores resultados e o grupo 2, realizado com ferramenta de 8mm, incremento vertical de

0.2 e avanço de 700mm/min, obteve os piores resultados, por uma larga margem. Esta diferença nos resultados do grupo 2 é explicada com o facto de ter sido utilizada a ferramenta de 8mm, que, como já referido anteriormente removia aparas do material, o que deteriorou o acabamento superficial da peça. Os restantes casos obtiveram resultados muito semelhantes, mas é notável uma ligeira melhoria nos grupos em que se empregou um step de 0,2mm (grupos 3 e 5), comparativamente aos grupos em que se empregou um step de 0,5mm (grupos 4 e 6).

4.3 Peça industrial

Neste subcapítulo é feita a descrição de todo o processo de produção de um protótipo de uma peça exemplo, pertencente a uma viatura ou equipamento existente no Exército Português. Esta descrição inclui todos os passos deste processo, desde a seleção da peça a produzir, até à produção do protótipo utilizando estampagem incremental.

4.3.1. Seleção da peça

Para verificar a possibilidade de aplicação da estampagem incremental na manutenção de componentes de chapa metálica, é necessário que este processo consiga produzir as peças pretendidas sem que haja rotura da chapa e garantindo que o produto final possui as mesmas características do componente original. De modo a conseguir testar estes parâmetros, foi então necessário escolher uma peça ou componente elegível para ser produzido por esta metodologia.

Desta forma, foi feita uma visita à UAGME (Unidade de Apoio Geral de Material do Exército) de forma a fazer uma recolha de possíveis peças e componentes a ser produzidos por esta metodologia.

Os critérios de escolha para estas peças foram que seria necessário ser uma peça de chapa (entre 1 e 3 mm de espessura), não possuir dimensões demasiado grandes tendo em consideração a área de trabalho do centro de maquinagem a utilizar e não possuir ângulos de estampagem demasiado próximos de 90°.

Destes critérios resultou uma seleção de catorze peças, que foi posteriormente reduzida a apenas uma peça, sendo esta a cobertura de um diferencial de uma viatura HMMWV (Figura 44(a)), por possuir o melhor conjunto de características de todas as peças.

Esta peça possui um formato maioritariamente hemisférico, à exceção de uma região que se torna plana e possui uma furação roscada. A peça possui uma aba em toda a sua periferia, com furações para a sua fixação (Figura 44(b)).



(a)



(b)

Figura 44 – (a) Viatura HMMWV e (b) cobertura de diferencial da viatura HMMWV.

Fonte: (a) List of Equipment of the Portuguese Army (s.d.)

4.3.2. Modelação e programação

De forma a conseguir replicar a geometria da peça escolhida com algum rigor e atendendo ao facto de esta possuir uma geometria algo irregular, foi utilizado um scanner 3D, Artec 3D Eva, para se obter um modelo digital da superfície da peça.

O ficheiro obtido foi então tratado, através do software SOLIDWORKS, de forma a manter apenas a área de interesse e remover algumas características que não são alvo desta aplicação de estampagem incremental. As características removidas consistem na aba perfurada em toda a periferia da peça e a furação central da peça, cuja realização depende da aplicação de outros processos posteriormente à aplicação da estampagem incremental. O modelo final após a aplicação destas alterações pode ser visto na Figura 45.



Figura 45 – Modelo CAD da cobertura de diferencial da viatura HMMWV obtido através do *scanner* 3D e com alterações aplicadas.

Tratado o modelo, foi utilizado o software MastercamX5 para a programação da trajetória da ferramenta. Para este fim, tiveram de ser escolhidos os parâmetros de processo a aplicar, tendo em conta os resultados obtidos relativos à enformabilidade e rugosidade nos ensaios de estampagem incremental. Os parâmetros escolhidos encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros escolhidos para a realização da peça final.

Ø Ferramenta (mm)	Step (mm)	Avanço (mm/min)	Spindle (rpm)
12	0,2	700	70

A ferramenta de 12mm foi escolhida com base nos resultados obtidos pela de 8mm, que danificava a superfície da peça, produzindo uma enformabilidade menor e uma superfície mais rugosa. Quanto ao incremento vertical, adotou-se o valor de 0,2mm com o objetivo de obter um acabamento melhor, visto que em termos de enformabilidade, apesar de ter obtido resultados piores, as fraturas ocorrem dentro ou acima da região de incerteza da CLF e não existe uma diferença muito significativa comparativamente ao incremento de 0,5mm. Relativamente ao avanço da ferramenta, foi utilizado o valor de 700mm/min, pois obteve melhores resultados tanto a nível de enformabilidade como de acabamento superficial. Por fim, o valor de 70rpm na velocidade de rotação do *spindle* manteve-se devido às limitações do equipamento.

4.3.3. Produção de estrutura para ensaios

Tendo em conta as dimensões e geometria da peça a produzir, foi necessário produzir-se uma estrutura que servisse o mesmo propósito que as estruturas utilizadas nos ensaios

descritos na Secção 3.3.1. Para este fim, recorreu-se ao software SOLIDWORKS para criar um modelo da estrutura pretendida, para servir como base para a produção da estrutura em si.

Dado o formato hemisférico da peça, a estrutura utilizada para os ensaios de estampagem incremental de geometrias cónicas foi utilizada como modelo para esta, com algumas alterações, nomeadamente, o aumento da área útil da estrutura e do furo da placa espera. O modelo pode ser visto na Figura 46(a). É de referir que a peça, possuía um diâmetro de 290mm e a placa espera foi projetada com um furo com diâmetro de 270mm, resultando num intervalo de 10mm em toda a periferia da peça.

A estrutura (Figura 46(b)) foi contruída com o apoio e material disponível nas oficinas da Unidade de Apoio Geral de Material do Exército (UAGME) e o desenho técnico da mesma encontra-se no Anexo C.

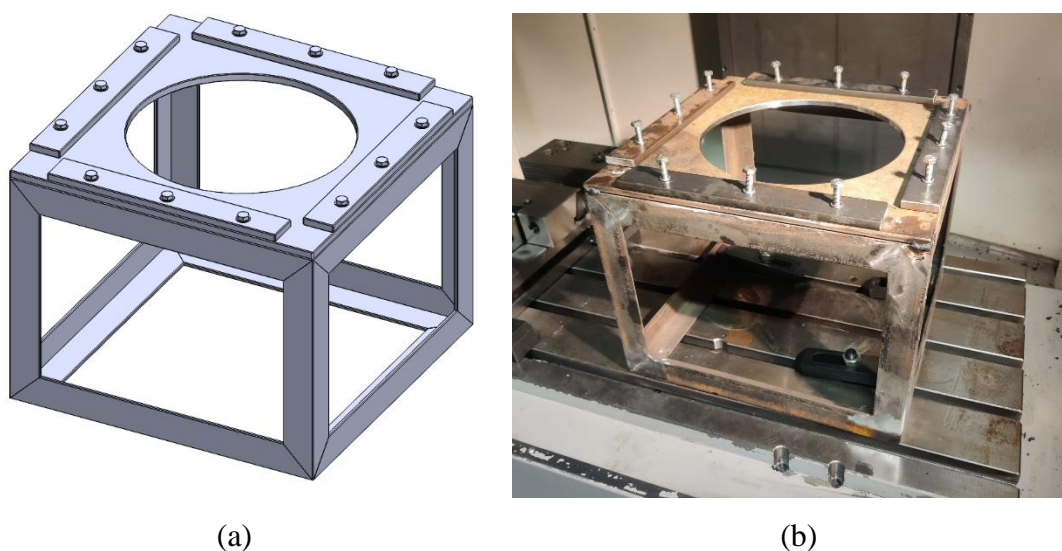


Figura 46 – (a) Modelo CAD da estrutura utilizada para a produção da peça final e (b) estrutura utilizada para a produção da peça final.

4.3.4. Produção de protótipos

A produção dos protótipos seguiu um percurso muito semelhante ao dos ensaios realizados em geometrias de referência, apenas com alguns ajustes diretamente relacionados com a diferença de dimensão da peça.

As chapas utilizadas foram cortadas com uma dimensão de 340x340mm, foram tratadas utilizando o mesmo tratamento térmico que os restantes provetes, mencionado na Secção 3.1.1.3, e foram também marcadas utilizando as grelhas de círculos mencionadas na

Secção 3.1.1.2, de forma que, posteriormente, possa ser realizada uma avaliação das deformações sofridas pela chapa no processo de produção da peça.

Foi realizado um total de 4 iterações até se atingir uma peça que correspondesse com o pretendido. A primeira iteração foi realizada utilizando uma trajetória de ferramenta denominada, no software MastercamX5, de “Surface finish – Contour”, que consiste numa trajetória que cobre toda a superfície da geometria com contornos espaçados verticalmente da distância definida pelo incremento vertical. Este tipo de trajetória é eficaz em superfícies inclinadas, mas em superfícies próximas do paralelismo com a mesa do equipamento, as passagens da trajetória da ferramenta deixam de ser próximas e consecutivas, e passam a estar afastadas umas das outras, como se pode verificar na Figura 13(b), o que produz um acabamento defeituoso (Figura 47), devido ao facto de os incrementos verticais serem constantes.

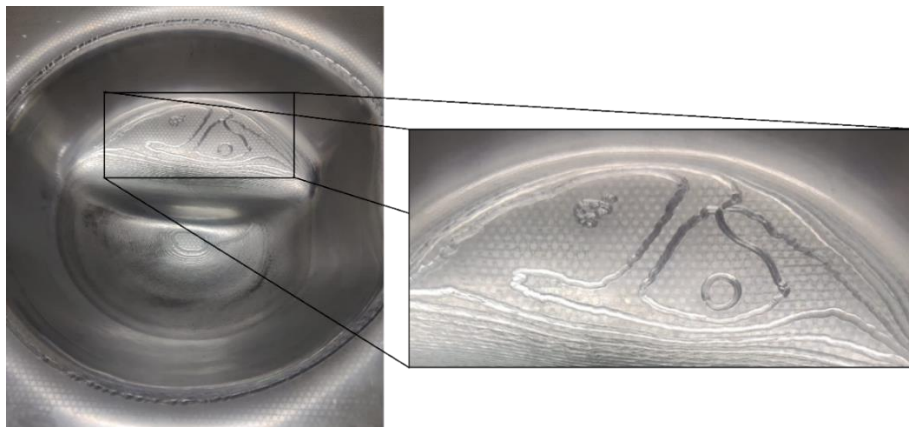


Figura 47 – Primeira iteração do processo de produção da peça final.

Por esse motivo, foi realizada uma segunda iteração, na qual foi empregue uma trajetória denominada de “Surface finish – Scallop”, que consiste em ajustar os intervalos de incremento vertical consoante a inclinação da superfície, de forma que a ponta da ferramenta se encontre sempre à mesma distância, mantendo a distância máxima como sendo 0,2mm.

Outra das alterações realizada teve que ver com a superfície obtida pelo *scanner* 3D não ser perfeitamente plana e possuir pequenas diferenças de cota e inclinação nos elementos da malha junto à sua periferia. Isto fez com que o software de CAM interpretasse a superfície com todos esses pequenos detalhes e diferenças de cota e fizesse pequenas passagens em cada local, resultando numa trajetória descontínua e com mau acabamento nessa mesma região (Figura 48). Para lidar com este problema foi necessário iniciar a trajetória da

ferramenta ligeiramente mais abaixo, de forma que o programa iniciasse com uma trajetória contínua, em vez de em pequenos incrementos, produzindo um melhor acabamento.

É de referir que a produção desta iteração da peça final resultou em algum dano na superfície da ferramenta utilizada, tendo esta sido posteriormente polida para as restantes utilizações, mas apesar das imperfeições iniciais da peça, esta foi realizada até ao fim, de modo a poder ser avaliada a trajetória em uso nesta iteração em toda a geometria da peça.



Figura 48 – Detalhe correspondente à primeira iteração do processo de produção da peça final.

A segunda iteração da peça, com as alterações supramencionadas implementadas, conseguiu obter um bom acabamento, mas devido à trajetória calculada pelo programa convergir numa zona onde existe uma grande diferença entre cotas, o material não seguiu a deformação esperada, tendo sido deformado lateralmente para o centro da peça, em vez de verticalmente (Figura 49).



(a)



(b)

Figura 49 – (a) Lado interior e (b) lado exterior da segunda iteração do processo de produção da peça final.

Na terceira iteração da peça, foram feitas alterações à trajetória anterior de forma que a convergência desta se desse na zona mais profunda da peça, onde não existe uma grande diferença de cotas. Para isto, foram criadas duas trajetórias independentes, mas que se completavam e cobriam toda a superfície da peça. Apesar disto, a peça não foi concluída com sucesso, pois o cálculo da trajetória da parte do programa previa quebras de contacto entre a ferramenta e a peça, devido a convergências da trajetória, que permitem ao material alguma margem para que ocorra recuperação elástica da chapa, visto que esta ainda se encontra sobre tensões dentro do seu limite elástico. Esta recuperação elástica faz com que no instante em que a ferramenta volta a entrar em contacto com a peça, a superfície desta já não se encontra na posição que a máquina tem programada, resultando na criação de imperfeições na superfície da peça. Esta iteração pode ser visualizada na Figura 50.



Figura 50 - Terceira iteração do processo de produção da peça final.

Por fim, atendendo a todos os problemas identificados nas iterações anteriores, optou-se por se realizar a modelação CAD da peça em questão para aplicação das trajetórias (Figura 51(a)). O facto de a peça ser modelada manualmente, em vez de ser utilizado o scan previamente realizado, faz com que as superfícies irregulares que provocam as imperfeições e quebras de contacto observadas nas iterações deixem de existir, permitindo assim que seja aplicada uma trajetória de “Surface finish – Contour” que percorre toda a superfície da chapa, sem criar imperfeições na secção inicial e na secção plana do centro da peça. O resultado obtido pode ser observado na Figura 51(b).

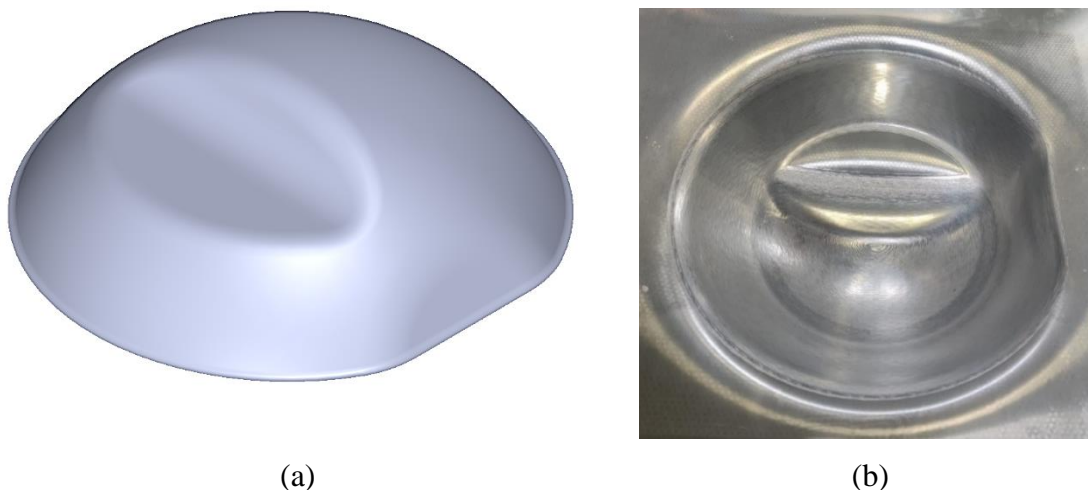


Figura 51 – (a) Modelação CAD da peça a realizar e (b) quarta iteração do processo de produção da peça final.

É de notar que o tipo de trajetórias utilizadas são trajetórias características de processos de maquinagem, em regime de subtração, e não de processos de deformação de chapa. Desta forma, torna-se difícil o projeto de peças com bases semelhantes às da peça apresentada utilizando estes formatos. Por norma, as trajetórias programadas para este tipo de processo são trajetórias programadas ponto a ponto, e, desta forma, conseguem produzir bons resultados, independentemente da geometria da peça que se pretende produzir. São utilizadas as duas tipologias de trajetória já apresentadas, as trajetórias convencionais e as trajetórias em espiral, conjugadas em secções diferentes da peça que se pretende produzir, de forma que se obtenha um resultado o mais próximo possível da realidade e com um bom acabamento superficial. Dependendo da geometria que se pretende produzir, por vezes, também se torna necessária a aplicação de várias passagens sobrepostas da ferramenta, de forma a aplicar a deformação na chapa de forma faseada, conseguindo assim que esta atinja níveis de deformação superiores aos definidos pelos seus limites característicos (Behera et al., 2015; Skjoedt et al., 2010).

4.3.5. Avaliação dos níveis de enformabilidade da peça

De forma a quantificar as deformações presentes na chapa, necessárias para a produção desta peça, foram realizadas medições da grelha de círculos marcada na superfície da chapa.

Para a realização destas medidas, foram determinadas cinco zonas distintas na superfície do provete, escolhidas por serem representativas das diferentes características

geométricas presentes na peça e podem ser observadas na Figura 52. A primeira zona, denominada de “A” e representada a verde na Figura 52, foi escolhida por ser representativa da característica plana na lateral da peça. A segunda zona, denominada de “B” e representada a azul na Figura 52, foi escolhida por ser representativa da maior parte da lateral da peça. A terceira zona, denominada de “C” e representada a amarelo na Figura 52, foi escolhida por ser representativa da transição entre o detalhe geométrico plano no centro da peça e a zona mais profunda da peça. A quarta zona, denominada de “D” e representada a laranja na Figura 52, foi escolhida por ser representativa da zona lateral da peça imediatamente abaixo do detalhe geométrico plano no centro da peça. Por fim, a quinta zona, denominada de “E” e representada a vermelho na Figura 52, foi escolhida por ser representativa do detalhe geométrico plano no centro da peça.

Estas cinco zonas foram avaliadas individualmente e as deformações em si presentes foram comparadas à Curva Limite de Fratura (CLF) previamente obtida a partir dos ensaios convencionais. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 53.

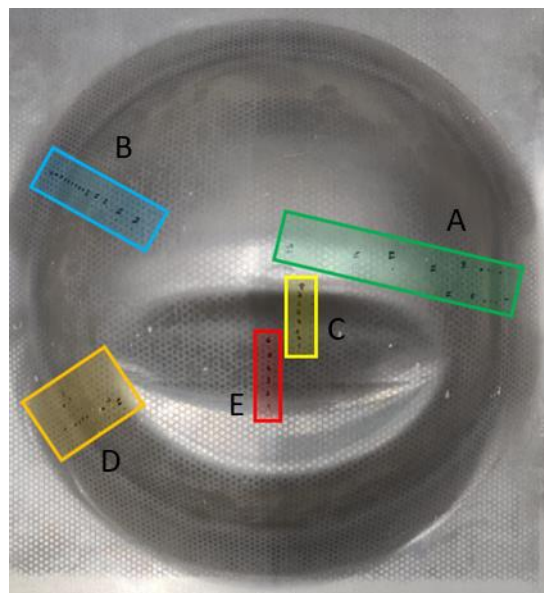


Figura 52 – Representação esquemática das zonas da peça em que foram realizadas medições de deformação.

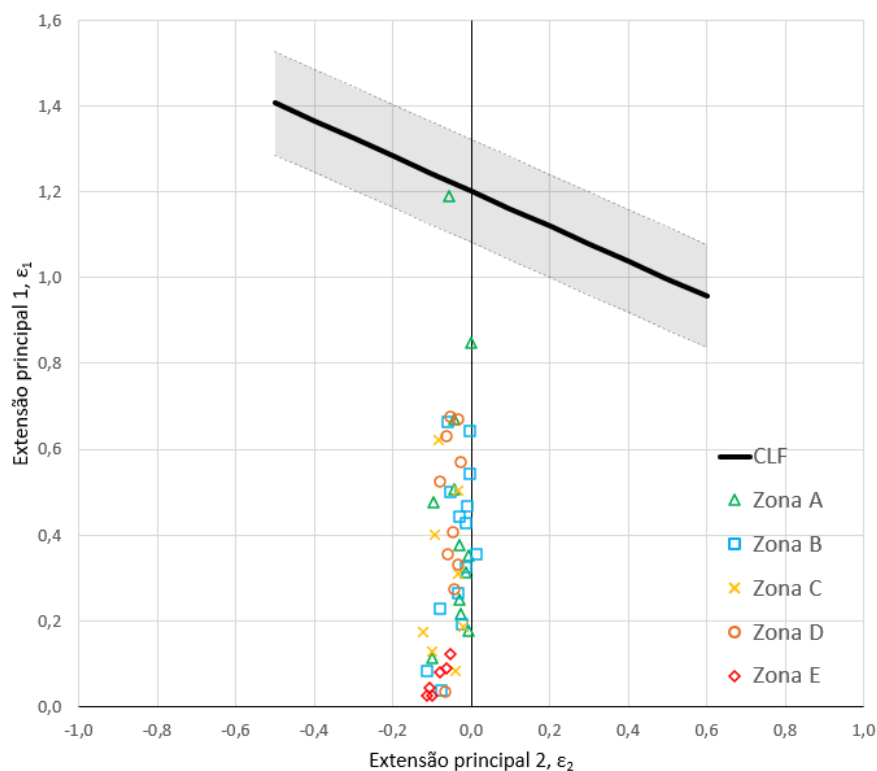


Figura 53 – Medições de deformação obtidas a partir da peça final produzida comparadas à CLF obtida por ensaios convencionais.

Como se pode observar, todas as zonas possuem evoluções de ponto para ponto em regime de deformação plana, como seria de esperar pela secção geométrica da peça a que correspondem. As zonas B, C e D possuem níveis de deformação intermédios relativamente àqueles definidos como sendo característicos de fratura, sendo que os pontos que exibem maiores níveis de deformação presentes nestas três zonas apenas atingem valores de “0,662”, “0,622” e “0,676”, respetivamente, na sua maior extensão principal, ϵ_1 . Relativamente à zona E, os valores de deformação obtidos são muito menores comparados aos restantes, apesar de ser uma zona central da peça, tendo um valor de “0,123” na sua maior extensão principal, ϵ_1 . Por fim, relativamente à zona A, os resultados obtidos atingem valores de “1,190” na sua maior extensão principal, ϵ_1 , que neste caso já se encontra dentro da zona de tolerância da CLF definida pelos ensaios convencionais, ficando muito próximo da própria CLF. Os pontos que possuem maiores níveis de deformação encontram-se mais próximos da base da peça. Apesar disto, a peça nunca chegou a fraturar.

Tendo em consideração este último resultado mencionado, assim como a justificação apresentada para a obtenção de pontos de fratura em ensaios de estampagem incremental para além da CLF definida (Secção 4.1.2), relativa ao facto de o material poder apresentar

uma elevada sensibilidade ao estado de triaxialidade de tensões na fratura (Centeno et al., 2014), foi realizada a comparação destes resultados com a CLF obtida, exclusivamente, a partir dos ensaios de estampagem incremental (Figura 54).

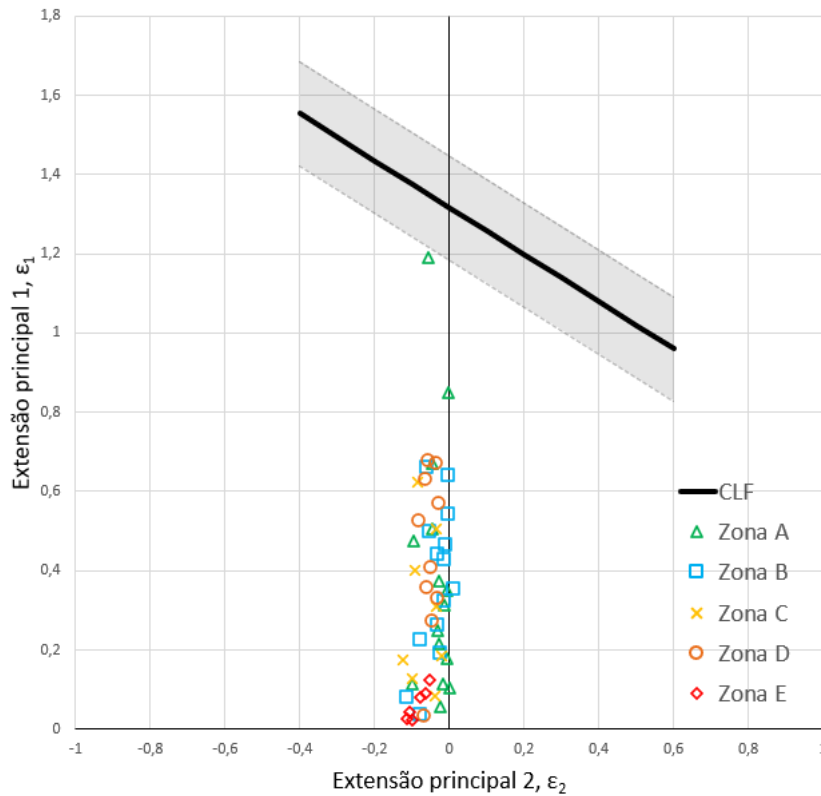


Figura 54 - Medições de deformação obtidas a partir da peça final produzida comparadas à CLF obtida por ensaios de estampagem incremental.

Como se pode observar na Figura 54, quando as medições de deformação da peça são comparadas com a CLF determinada a partir de ensaios de estampagem incremental, já não existe coincidência entre o ponto com maiores valores de deformação e a CLF, o que vem corroborar o facto de a peça ter sido produzida sem a ocorrência de fratura.

4.3.6. Finalização e instalação da peça

Para finalizar todo o processo de avaliação da viabilidade de aplicação do processo de estampagem incremental para manutenção de componentes de chapa metálica no sistema de manutenção do Exército Português, foi testada a instalação da peça produzida numa das viaturas das quais é proveniente a peça original considerada para este projeto.

De forma a conseguir concretizar esta última fase, foi necessário realizar processos de corte e furação na peça produzida, visto que esta ainda possuía o formato quadrado

original das chapas utilizadas para os ensaios, sem possuir, ao mesmo tempo, nenhum tipo de furação, tendo este processo sido também realizado nas oficinas da Unidade de Apoio Geral de Material do Exército (UAGME). Para isto, foi tida como referência a peça original de forma a garantir a coincidência de todas as furações com as suas correspondentes no diferencial da viatura, assim como do formato periférico, pois o local de montagem possui uma margem muito reduzida, em termos de espaço. O corte periférico da peça foi realizado consoante as características existentes na peça original, com recurso a uma serra de fita, enquanto que as furações existentes na aba da peça, para fixação desta, e na zona central, para aplicação de um bujão, foram realizadas com recurso a um engenho de furar. O produto final pode ser observado na Figura 55.



Figura 55 - Peça industrial finalizada.

Realizados os processos de corte e furação da peça, esta foi montada numa viatura HMMWV, como pode ser observado na Figura 56, que mostra diferentes perspetivas desta montagem da peça na viatura. O processo de montagem foi realizado sem necessidade de ajustes na peça, sendo que esta conseguiu cumprir a sua função de cobrir a área necessária, sem interferir com os componentes presentes no interior do diferencial.

O sucesso desta montagem veio então confirmar a viabilidade de aplicação deste processo na manutenção de meios militares.



(a)



(b)



(c)

Figura 56 - Diferentes perspectivas da montagem da peça produzida na viatura HMMWV.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a aplicabilidade da estampagem incremental no sistema de manutenção do Exército Português. Para isso foi realizado um estudo em torno da caracterização mecânica e de enformabilidade do material utilizado, assim como a determinação dos melhores parâmetros de processo e a sua aplicação num caso prático de produção de uma peça pertencente a uma viatura militar.

Durante o processo de caracterização mecânica do material, observou-se que o material em estudo era bastante frágil, tendo fraturado com reduzidas deformações, o que levou à necessidade de aplicação de um tratamento térmico de recozimento para lhe conferir maior ductilidade.

Relativamente à caracterização de enformabilidade através de ensaios convencionais, foi possível observar que a Curva Limite de Fratura (CLF) obtida para o material, possuía uma inclinação de “-0,41”, ficando bastante abaixo do valor de “-1” definido pela bibliografia existente (Atkins, 1996).

A caracterização de enformabilidade através de ensaios de estampagem incremental demonstrou alguns resultados inesperados, pois os pontos de fratura obtidos nestes ensaios situavam-se acima do que foi definido pela CLF determinada através de ensaios convencionais. Segundo o trabalho realizado por Centeno et al. (2014), este fenómeno poderá ser explicado por características materiais, nomeadamente a sua sensibilidade ao estado de triaxialidade de tensões na fratura, mas a confirmação desta conclusão, neste caso, carece de confirmação.

Relativamente à avaliação feita à influência dos parâmetros do processo de estampagem incremental sobre os níveis de enformabilidade obtidos no material, foram obtidos alguns resultados diferentes do esperado. Quanto à influência do incremento vertical da ferramenta (*step*), os resultados obtidos não vão de encontro aos resultados obtidos por outros autores, tendo sido obtida uma melhor enformabilidade quando se utilizou um *step* de maior dimensão. No caso do diâmetro de ferramenta, não foi possível obter um resultado sem influência de outros parâmetros, pois a ferramenta de menor diâmetro causava dano na superfície do material. Este tipo de fenómeno já teria sido documentado por outros autores (Skjoedt et al., 2007b), tendo sido justificado com o facto de o material ser demasiado macio para este tipo de aplicação, sendo que esta conclusão necessita de uma melhor avaliação para que possa ser confirmada.

Por fim, no processo de produção da peça escolhida, a utilização do *scanner* 3D, traria uma melhor correspondência entre a geometria da superfície produzida e a geometria da peça original, mas, apesar disso, foi necessário recorrer à modelação manual da geometria da peça, de forma a eliminar o erro inerente à leitura de superfícies com o *scanner* que impedia a correta programação da trajetória da ferramenta para produção da peça.

Não obstante, foi possível produzir uma réplica da peça escolhida para produção com bom acabamento, assim como a sua montagem com sucesso na viatura a que foi destinada, confirmando assim que é possível a utilização do processo de estampagem incremental para produção e manutenção de peças, dentro do sistema de manutenção do Exército Português.

Considerando todas as conclusões obtidas deste trabalho e numa ótica de possíveis trabalhos futuros, seria de todo o interesse a realização de um estudo mais aprofundado do material utilizado, com vista à sua utilização neste tipo de processo de deformação, ou até mesmo, a realização de estudos semelhantes em que fossem empregues outros materiais mais abundantes no sistema de manutenção do Exército Português. Poderá também ser útil a utilização de ferramentas em que sejam aplicados tratamentos térmicos que lhe confirmem outro tipo de características, de forma a evitar possíveis danos da ferramenta no material, e vice-versa.

Outra área que merece desenvolvimento futuro são as trajetórias de ferramenta aplicadas para atingir a geometria desejada. Pode ser realizado um estudo com o objetivo de definir uma metodologia de definição de trajetórias de ferramenta consoante a geometria da peça a ser produzida, complementado por um estudo da tipologia de peças pertencentes a material do Exército, elegíveis para produção através do processo de estampagem incremental. Desta forma, a aplicação deste tipo de processo seria extensível a outras peças com formatos distintos, fortalecendo ainda mais a justificação para o emprego do processo no sistema de manutenção do Exército Português.

BIBLIOGRAFIA

- Adams, D., & Jeswiet, J. (2015). Design rules and applications of single-point incremental forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(5), 754–760. <https://doi.org/10.1177/0954405414531426>
- Afonso, D., Alves de Sousa, R., & Torcato, R. (2018). Integration of design rules and process modelling within SPIF technology-a review on the industrial dissemination of single point incremental forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12), 4387–4399. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1130-3>
- Afonso, D. G. (2017). *Aplicabilidade Industrial de Estampagem Incremental: Análise Funcional e Energética*. Universidade de Aveiro.
- Ambrogio, G., Filice, L., Fratini, L., & Micari, F. (2004). Process Mechanics Analysis in Single Point Incremental Forming. *AIP Conference Proceedings*, 712(1), 922–927. <https://doi.org/10.1063/1.1766645>
- Amino, M., Mizoguchi, M., Terauchi, Y., & Maki, T. (2014). Current status of «Dieless» Amino's incremental forming. *Procedia Engineering*, 81, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.128>
- ASTM Standard B831-19. (2019). *Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/B0831-19>
- ASTM Standard E8/E8M - 16a. (2016). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0008>
- Atkins, A. G. (1996). Fracture in forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 56(1–4), 609–618. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01875-1](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01875-1)
- Attanasio, A., Ceretti, E., Giardini, C., & Mazzoni, L. (2008). Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, 197(1–3), 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.053>
- Bambach, M., Taleb Araghi, B., & Hirt, G. (2009). Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming. *Production Engineering*, 3(2), 145–156. <https://doi.org/10.1007/s11740-009-0150-8>
- Behera, A. K., de Sousa, R. A., Ingarao, G., & Oleksik, V. (2017). Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015.

- Journal of Manufacturing Processes*, 27, 37–62.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.03.014>
- Behera, A. K., Lauwers, B., & Duflou, J. R. (2015). Tool path generation for single point incremental forming using intelligent sequencing and multi-step mesh morphing techniques. *International Journal of Material Forming*, 8(4), 517–532.
<https://doi.org/10.1007/s12289-014-1174-y>
- Bergs, T., Nick, M., Trauth, D., & Klocke, F. (2018). Damage Evolution in Nakajima Tests of DP800 Dual Phase Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 418(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/418/1/012048>
- Carrino, L., Di Meo, N., Sorrentino, L., & Strano, M. (2006). The influence of friction in the negative dieless incremental forming process. *9th International ESAFORM Conference on Material Forming*, 207–210.
- Castelan, J., Schaeffer, L., Daleffe, A., Fritzen, D., Salvato, V., & Da Silva, F. P. (2014). Manufacture of custom-made cranial implants from DICOM® images using 3D printing, CAD/CAM technology and incremental sheet forming. *Revista Brasileira de Engenharia Biomedica*, 30(3), 265–273. <https://doi.org/10.1590/rbeb.2014.024>
- Centeno, G., Bagudanch, I., Martínez-Donaire, A. J., García-Romeu, M. L., & Vallellano, C. (2014). Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming. *Materials and Design*, 63, 20–29.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.066>
- Cotterell, B., & Reddel, J. K. (1977). The essential work of plane stress ductile fracture. *International Journal of Fracture*, 13(3), 267–277.
<https://doi.org/10.1007/BF00040143>
- Cristino, V. A. M., Silva, M. B., Wong, P. K., & Martins, P. A. F. (2017). Determining the fracture forming limits in sheet metal forming: A technical note. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 52(8), 467–471.
<https://doi.org/10.1177/0309324717727443>
- Dias, J. P. A. (2020). *Otimização do tratamento térmico T6 para ligas de alumínio A356*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Duflou, J. R., Behera, A. K., Vanhove, H., & Bertol, L. S. (2013). Manufacture of accurate titanium cranio-facial implants with high forming angle using single point incremental forming. *Key Engineering Materials*, 549, 223–230.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.549.223>

- Duflou, J., Tunçkol, Y., Szekeres, A., & Vanherck, P. (2007). Experimental study on force measurements for single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 189(1–3), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.01.005>
- Dwivedy, M., & Kalluri, V. (2019). The effect of process parameters on forming forces in single point incremental forming. *Procedia Manufacturing*, 29, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.116>
- Echrif, S. B. M., & Hrairi, M. (2014). Significant Parameters for the Surface Roughness in Incremental Forming Process. *Materials and Manufacturing Processes*, 29. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.901519>
- Embury, J. D., & Duncan, J. L. (1981). Formability Maps. *Annual Review of Materials Science*, 11(1), 505–521. <https://doi.org/10.1146/annurev.ms.11.080181.002445>
- Fritzen, D., Daleffe, A., Castelan, J., & Schaeffer, L. (2013). Brass 70 / 30 and Incremental Sheet Forming Process. 557, 1419–1431. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1419>
- Frómeta, D., Lara, A., Molas, S., Casellas, D., Rehrl, J., Suppan, C., Larour, P., & Calvo, J. (2019). On the correlation between fracture toughness and crash resistance of advanced high strength steels. *Engineering Fracture Mechanics*, 205, 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.10.005>
- Goodwin, G. M. (1968). Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. *SAE Transactions*, 77, 380–387. <https://doi.org/10.4271/680093>
- Governale, A., Lo Franco, A., Panzeca, A., Fratini, L., & Micari, F. (2007). Incremental Forming Process for the Accomplishment of Automotive Details. *Key Engineering Materials*, 344, 559–566. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.344.559>
- Gulati, V., Aryal, A., Katyal, P., & Goswami, A. (2015). Process Parameters Optimization in Single Point Incremental Forming. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. <https://doi.org/10.1007/s40032-015-0203-z>
- Hagan, E., & Jeswiet, J. (2004). Analysis of surface roughness for parts formed by computer numerical controlled incremental forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(10), 1307–1312. <https://doi.org/10.1243/0954405042323559>
- Ham, M., & Jeswiet, J. (2006). Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1), 241–244. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60407-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60407-7)

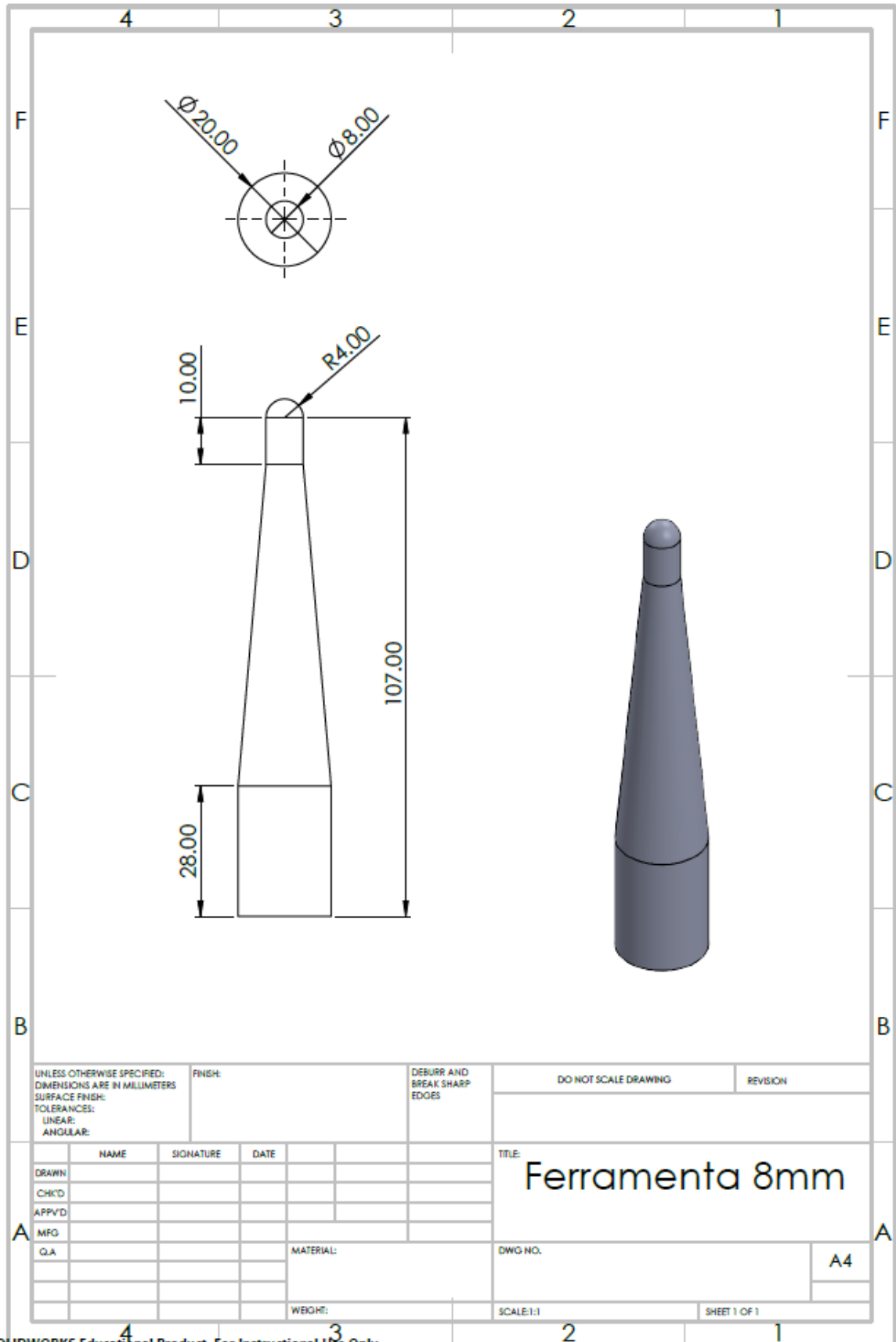
- Hussain, G., Gao, L., Hayat, N., Cui, Z., Pang, Y. C., & Dar, N. U. (2008a). Tool and lubrication for negative incremental forming of a commercially pure titanium sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 203(1–3), 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.043>
- Hussain, G., Gao, L., & Zhang, Z. Y. (2008b). Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(9–10), 920–926. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1043-7>
- 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(8), 1557–1565. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.026>
- ISO Standard 12004-2. (2008). *Metallic materials — Sheet and strip — Determination of forming-limit curves — Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory*. International Organization for Standardization.
- Janbakhsh, M., Djavanroodi, F., & Riahi, M. (2013). Utilization of bulge and uniaxial tensile tests for determination of flow stress curves of selected anisotropic alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 227(1), 38–51. <https://doi.org/10.1177/1464420712451963>
- Jeswiet, J., Duflou, J. R., Szekeres, A., & Lefebvre, P. (2005a). Custom Manufacture of a Solar Cooker – A Case Study. *Advanced Materials Research*, 6–8, 487–492. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.487>
- Jeswiet, J., Geiger, M., Engel, U., Kleiner, M., Schikorra, M., Duflou, J., Neugebauer, R., Bariani, P., & Bruschi, S. (2008). Metal forming progress since 2000. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(1), 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.06.005>
- Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., & Allwood, J. (2005b). Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals*, 54(2), 88–114. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3)
- Kalo, A., & Newsum, M. J. (2014). An Investigation of Robotic Incremental Sheet Metal Forming as a Method for Prototyping Parametric Architectural Skins. Em W. McGee & M. Ponce de Leon (Eds.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014* (pp. 33–49). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04663-1_3

- Keeler, S. P. (1966). Determination of Forming Limits in Automotive Stampings. *SAE Transactions*, 74, 1–9. <https://doi.org/10.4271/650535>
- Keeler, S. P. (1968). Circular grid system - A valuable aid for evaluating sheet metal formability. *SAE Transactions*, 77, 371–379. <https://doi.org/https://doi.org/10.4271/680092>
- Kim, Y. H., & Park, J. J. (2002). Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 130–131, 42–46. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00788-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00788-4)
- Liu, Z., Li, Y., & Meehan, P. A. (2013). Experimental investigation of mechanical properties, formability and force measurement for AA7075-O aluminum alloy sheets formed by incremental forming. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(11), 1891–1899. <https://doi.org/10.1007/s12541-013-0255-z>
- Lozano, A. J. B., Bermúdez, G. J. P., & Correa, F. A. B. (2015). Comparative Analysis between the SPIF and DPIF Variants for Die-less Forming Process for an Automotive Workpiece. *Inge CUC*, 11(2), 68–73. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.11.2.2015.07>
- Lu, B., Chen, J., Ou, H., & Cao, J. (2013). Feature-based tool path generation approach for incremental sheet forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(7), 1221–1233. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.023>
- Madeira, T. F. (2014). *Caracterização de chapa metálica para a Indústria Automóvel*. Instituto Superior Técnico.
- Magrinho, J. P. (2019). *Process Limits of Sheet-Bulk Forming*. Instituto Superior Técnico.
- Magrinho, J. P. G., Silva, M. B., & Martins, P. A. F. (2022). Incremental sheet forming. Em *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (2.^a ed., pp. 1–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00022-4>
- Magrinho, J. P., Silva, M. B., Reis, L., & Martins, P. A. F. (2019). Formability Limits, Fractography and Fracture Toughness in Sheet Metal Forming. *Materials*, 12(9), 1493. <https://doi.org/10.3390/ma12091493>
- Marciniak, Z. (1984). Assessment of material formability. Em *Advanced Technology of Plasticity* (Vol. 1, pp. 685–694).
- Martínez-Donaire, A. J., García-Lomas, F. J., & Vallellano, C. (2014). New approaches to detect the onset of localised necking in sheets under through-thickness strain gradients. *Materials & Design*, 57, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.012>

- Martins, P. A. F., Bay, N., Tekkaya, A. E., & Atkins, A. G. (2014a). Characterization of fracture loci in metal forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, *83*, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.04.003>
- Martins, P. A. F., Montanari, L., Cristino, V. A., & Silva, M. B. (2014b). Formability and Simulative Tests in Modern Sheet Metal Forming Education. Em J. P. Davim (Ed.), *Modern Mechanical Engineering: Research, Development and Education* (pp. 411–447). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45176-8_14
- McClintock, F. A. (1968). A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes. *Journal of Applied Mechanics*, *35*(2), 363–371. <https://doi.org/10.1115/1.3601204>
- Meier, H., Magnus, C., & Smukala, V. (2011). Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools. *CIRP Annals*, *60*(1), 327–330. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.134>
- Murugesan, M., Yu, J.-H., Jung, K.-S., Cho, S.-M., Bhandari, K. S., & Lee, C.-W. (2022). Optimization of Forming Parameters in Incremental Sheet Forming of AA3003-H18 Sheets Using Taguchi Method. *Materials*, *15*(4), 1458. <https://doi.org/10.3390/ma15041458>
- Nørgaard, T., & Dacke, M. (2010). Fog-basking behaviour and water collection efficiency in Namib Desert Darkling beetles. *Frontiers in Zoology*, *7*(1), 23. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-7-23>
- Penalva Oscoz, M., Zettler, J., & Papadopoulos, M. P. (2011). Innovative manufacturing of complex Ti sheet components (INMA). *International Journal of Structural Integrity*, *2*(4). <https://doi.org/10.1108/ijsi.2011.43602daa.002>
- Potran, M. (2014). Application of Single Point Incremental Forming for Manufacturing of Denture Base. *Journal for Technology of Plasticity*, *39*(2), 15–24.
- Rodrigues, J., & Martins, P. (2010). *Tecnologia Mecânica*. Escolar Editora.
- Rossard, C. (1976). *Mise en forme des métaux et alliages*. Centre National de la Recherche Scientifique – CNRS.
- Silva, M. B., Nielsen, P. S., Bay, N., & Martins, P. A. F. (2011). Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *56*(9–12), 893–903. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3254-1>
- Silva, M. B., Skjoedt, M., Atkins, A. G., Bay, N., & Martins, P. A. F. (2008). Single-point incremental forming and formability—failure diagrams. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, *43*(1), 15–35. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA340>

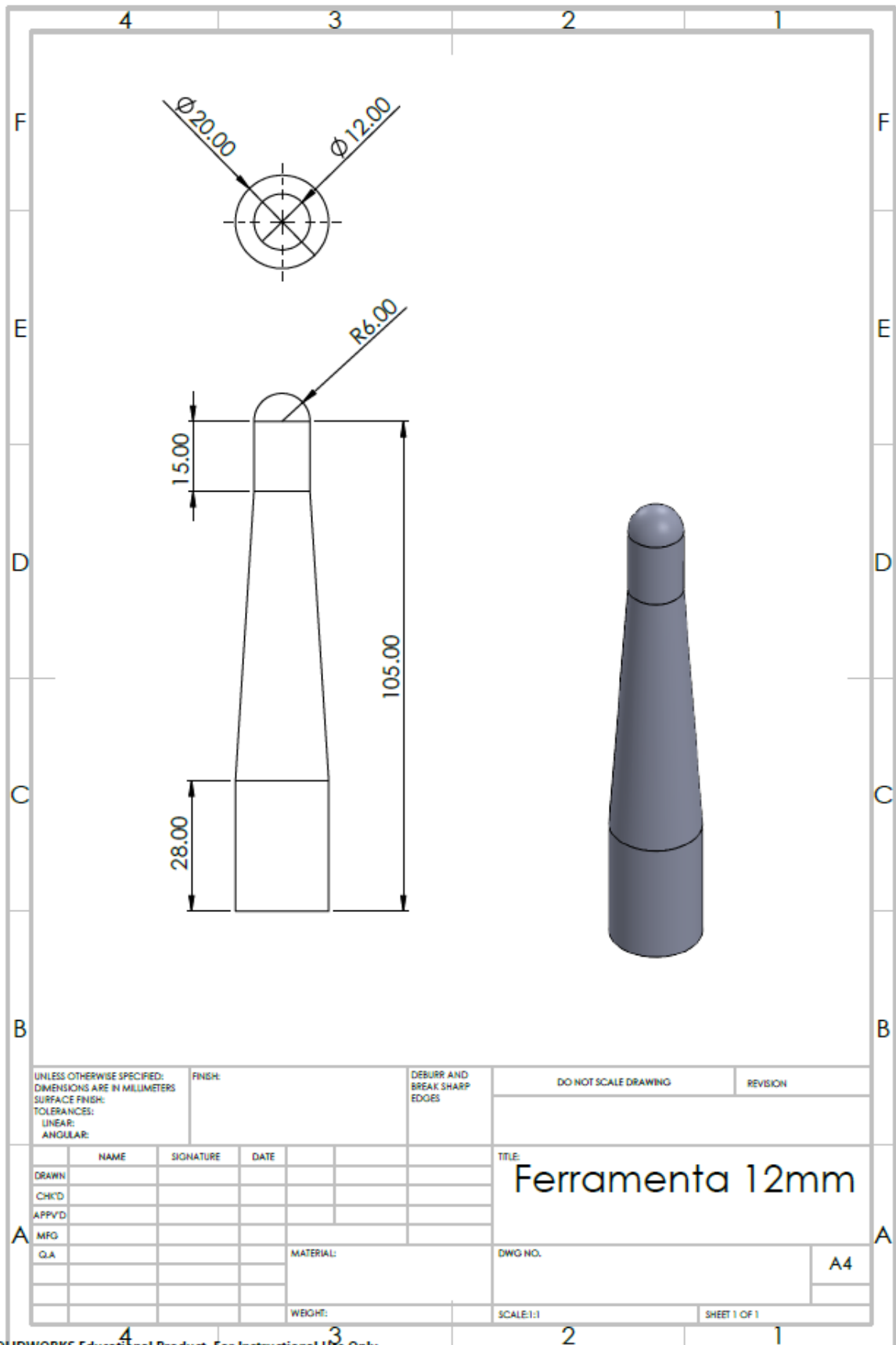
- Silva, M. B., Skjoedt, M., Bay, N., & Martins, P. A. F. (2009). Revisiting single-point incremental forming and formability/failure diagrams by means of finite elements and experimentation. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 44(4), 221–234. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA522>
- Skjoedt, M., Hancock, M. H., & Bay, N. (2007a). Creating Helical Tool Paths for Single Point Incremental Forming. *Key Engineering Materials*, 344, 583–590. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.344.583>
- Skjoedt, M., Silva, M. B., Bay, N., Martins, P. A. F., & Lenau, T. (2007b). Single point incremental forming using a dummy sheet. *2nd International Conference on New Forming Technology*, 2(February 2015), 267–276.
- Skjoedt, M., Silva, M. B., Martins, P. A. F., & Bay, N. (2010). Strategies and limits in multi-stage single-point incremental forming. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 45(1), 33–44. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA574>
- Soeiro, J. M. de C. (2014). *Enformabilidade Em Estampagem Incremental*. Instituto Superior Técnico.
- Vanhove, H., Carette, Y., Vancleef, S., & Duflou, J. R. (2017). Production of thin Shell Clavicle Implants through Single Point Incremental Forming. *Procedia Engineering*, 183, 174–179. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.058>
- Yamashita, M., Gotoh, M., & Atsumi, S.-Y. (2008). Numerical simulation of incremental forming of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 199(1–3), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.07.037>
- Yin, Q., Soyarslan, C., Isik, K., & Tekkaya, A. E. (2015). A grooved in-plane torsion test for the investigation of shear fracture in sheet materials. *International Journal of Solids and Structures*, 66(November 2013), 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.03.032>
- Zhang, Q., Xiao, F., Guo, H., Li, C., Gao, L., Guo, X., Han, W., & Bondarev, A. B. (2010). Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 Sheet: New lubricating method. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(2), 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.018>

ANEXO A – FERRAMENTA DE 8MM



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE: Ferramenta 8mm	
DRAWN						
CHK'D						
APP'VD						
MFG						
Q.A			MATERIAL:	DWG NO.	A4	
			WEIGHT:	SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1	

ANEXO B – FERRAMENTA DE 12MM



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

ANEXO C – ESTRUTURA PARA A PEÇA FINAL

