

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Marco Sanchez Magalhães

**Utilização de ferramentas CAE no projeto do
fabrico de um estampado profundo
metálico: estudo de caso**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Marco Sanchez Magalhães

**Utilização de ferramentas CAE no projeto do
fabrico de um estampado profundo
metálico: estudo de caso**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de
Especialização em Manufatura Avançada

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Doutor José Luís Carvalho Martins Alves

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Para a realização desta dissertação contei com o apoio de múltiplas pessoas, sem as quais todo o trabalho desenvolvido não teria sido possível. A todas elas expresso o meu agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Doutor José Luís Carvalho Martins Alves, cuja contribuição foi fundamental para a realização da presente dissertação. Agradeço toda a ajuda e disponibilidade demonstrada, e todo o conhecimento transmitido para vencer as dificuldades surgidas ao longo do trabalho.

Aos meus colegas de curso que muito ajudaram em fases de estudo e na realização de trabalhos que enriqueceram o meu conhecimento.

À *ETMA Metal Parts* pela oportunidade dada para que esta dissertação fosse desenvolvida nas suas instalações e por disponibilizar todos os meios técnicos e económicos necessários.

Ao departamento de Projeto e Serralharia de Ferramentas Novas por disponibilizar a ajuda necessária na resolução de problemas. Agradeço ao Pedro Vieira, João Figueiredo e Tiago Carneiro toda a ajuda relacionada com projeto; ao Sr. Vilaça e Sr. José Nascimento pelo conhecimento transmitido sobre ferramentas; ao Rui Gonçalves e ao Paulo Renato pelo apoio na maquinação, montagem e ensaios da ferramenta.

À minha família por todo o apoio demonstrado ao longo de todo o percurso académico. Quero agradecer em especial à minha mãe por todo o incentivo e acreditar sempre até ao fim.

Finalmente, agradeço à minha mulher Gisela e à minha filha Luísa por serem o meu principal suporte e fonte de inspiração, pela compreensão e ajuda em todos os momentos difíceis que passamos ao longo destes anos.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

STATEMENT OF INTEGRITY

I declare that i have worked with the formatting of work in the preparation of this work and confirm that there is no practical record of use or falsification of information or results in any of the stages leading to its preparation.

More i declare that i know and that i respect the Code of Ethical Conduct of the University of Minho.

Universidade do Minho, 31 de outubro de 2022

RESUMO

Existe atualmente um maior interesse por parte da indústria na utilização de ferramentas CAE, no sentido de diminuir os erros de projeto e posteriores custos 'improdutivos'.

A presente dissertação tem como objetivo principal analisar as vantagens do uso destas ferramentas no projeto do fabrico de um estampado profundo metálico, e foi desenvolvida em ambiente industrial, na ETMA Metal Parts. O trabalho consistiu em realizar o estudo numérico do processo de fabrico de um embutido cilíndrico, e posteriormente executar os ensaios experimentais necessários à validação do procedimento numérico inicial.

Estudaram-se inicialmente os processos produtivos relacionados com o processo de estampagem, as ferramentas, os equipamentos e os respetivos fundamentos teóricos. Também os fenómenos constitutivos dos materiais relacionados com a elasto-plasticidade dos materiais metálicos, e o método dos elementos finitos.

Tendo como base toda a informação recolhida, realizou-se uma análise detalhada ao componente, nomeadamente à sua geometria, dimensões, características funcionais e toleranciamento dimensionais e geométricos.

A simulação numérica foi desenvolvida através da utilização do solver *DD3IMP*, uma ferramenta CAE de cariz académico para simulação de processos de estampagem, e foram realizadas simulações com elementos 2D e 3D. Este estudo validou a geometria das ferramentas e serviu de apoio ao projeto da ferramenta *Softool* para conformação do embutido nos ensaios experimentais. Foi necessário realizar projeto CAD para fabrico de componentes e montagem de ferramenta.

O trabalho ficou concluído com a realização de ensaios na fábrica, onde se obtiveram amostras que forneceram resultados para comparação com o estudo numérico. Em geral pode afirmar-se que a utilização de uma ferramenta CAE foi determinante para o sucesso na obtenção de um embutido cilíndrico metálico, sem rotura nem defeitos do material, e que os ensaios experimentais permitiram obter mais conhecimento sobre o processo de embutidura.

PALAVRAS-CHAVE

ESTAMPAGEM PROFUNDA; SOFTOOL; MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS; ANISOTROPIA, CAE.

ABSTRACT

There is currently a greater interest on the part of industry in the use of CAE tools, in order to reduce design errors and subsequent 'unproductive' costs.

The main objective of this dissertation is to analyze the advantages of using these tools in the design of the manufacture of a metallic deep stamping part, and it was developed in an industrial environment, at ETMA Metal Parts. The work consisted in carrying out a numerical study of the manufacturing process of a cylindrical drawn part and subsequently carrying out the necessary experimental tests to validate the initial numerical procedure.

Initially, the production processes related to the stamping process, equipment and the respective theoretical foundations were studied. Also, the constitutive phenomena of materials related to the elasto-plasticity of metallic materials, and the finite element method.

Based on all the information collected, a detailed analysis of the component was carried out, namely its geometry, dimensions, functional characteristics and dimensional and geometric tolerances.

The numerical simulation was developed using the DD3IMP solver, an academic CAE tool for simulating stamping processes, and simulations were performed with 2D and 3D elements. This study validated the geometry of the tools and the design of the tool for forming the part in the experimental tests. It was necessary to carry out a CAD project for the manufacture of components and tool assembly.

The work was completed with tests carried out at the factory, where samples were obtained that provided results for comparison with the numerical study. In general, it can be said that the use of a CAE tool was decisive for the success in obtaining a metallic cylindrical drawn part, without splits or material defects, and the experimental trial allowed to obtain more knowledge about the stamping process.

KEYWORDS

DEEP DRAWING; SOFTOOL; FINITE ELEMENT METHOD; ANISOTROPY; CAE.

ÍNDICE

Agradecimentos	ii
Resumo.....	iv
Abstract	v
Índice	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xiii
Lista de Símbolos.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. ETMA Metal Parts.....	1
1.2. Ferramentas CAE nos processos de conformação de chapa – Estampagem.....	2
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Estrutura da dissertação.....	5
2. Revisão bibliográfica	7
2.1. Estampagem	7
2.1.1. Nomenclatura e mecânica de deformação.....	9
2.1.2. Relação de estampagem	11
2.1.3. Anisotropia	12
2.1.4. Critérios de plasticidade.....	14
2.1.5. Leis de evolução	16
2.1.6. Parâmetros tecnológicos do processo de estampagem cilíndrica.....	16
2.1.6.1. Matéria-prima	17
2.1.6.2. Estampagem com abas	21
2.1.6.3. Diagrama limite de embutidura.....	21
2.1.6.4. Cerra-chapas	23
2.1.6.5. Folga radial entre matriz e punção	24

2.1.6.6.	Raio de concordância da matriz e do punção.....	25
2.1.6.7.	Operações de corte em peças estampadas	27
2.1.6.8.	Furos de ar	27
2.1.6.9.	Velocidade de estampagem.....	28
2.1.7.	Força de estampagem	28
2.1.8.	Cálculo do diâmetro do esboço.....	30
2.1.9.	Ironing	31
2.2.	Método dos elementos finitos - MEF	33
2.2.1.	Formulação mecânica	33
2.2.2.	Discretização espacial	34
2.2.3.	Discretização temporal.....	36
3.	Análise do componente	37
3.1.	Estudo de caso	37
3.2.	Análise dimensional e geométrica. Factibilidade.....	38
3.3.	Análise do processo de fabrico.....	43
4.	Simulação numérica	47
4.1.	Caracterização do material.....	47
4.2.	Discretização espacial.....	50
4.3.	Discretização temporal.....	52
4.4.	Geometria das ferramentas.	53
4.5.	Formulação do problema.	59
4.6.	Dados a analisar.....	61
4.7.	Resultados numéricos	62
5.	Projeto e desenvolvimento da ferramenta softtool	73
5.1.	Análise e seleção do sistema construtivo da ferramenta	73
5.2.	Projeto CAD	74
5.3.	Bill of Materials.....	77

5.4. Montagem da ferramenta	78
6. Análise de resultados	81
6.1. Procedimento de ensaio.....	81
6.2. Resultados dimensionais da amostras	86
6.3. Comparação de resultados.....	88
6.4. Análise de resultados.....	90
7. Considerações finais.....	91
7.1. Conclusões.....	91
7.2. Perspetivas e Trabalhos Futuros	92
Anexos	93
Anexo A: Fórmulas para o diâmetro da estampa plana circular.....	95
Anexo B: Desenhos técnicos da ferramenta softtool.....	97
Anexo C: Fichas técnicas dos componentes normalizados.....	112
Bibliografia	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Instalações da ETMA Metal Parts.	1
Figura 1.2 - Processos produtivos da ETMA Metal Parts; a) protótipos e ferramentas, b) torneamentos, c) estampagem, d) forjamento a frio, e) conformação de arame, f) tratamentos térmicos, g) tratamentos de superfície, h) montagem e i) inspeção.....	2
Figura 1.3 – Exemplos de áreas de aplicação dos processos de conformação de chapa; a) elétrico, b) automóvel, c) eletrodomésticos e d) automação.....	3
Figura 1.4 - Problemas do processo de conformação de chapa metálica: a) rotura, b) retorno elástico e c) enrugamento [Hsu et al. 2002].....	3
Figura 1.5 - Estudo de caso de carcaça de solenóide.	4
Figura 2.1 - Representação de uma operação de estampagem numa prensa [Schuler, 1998].....	7
Figura 2.2 - Exemplos de produtos fabricados por estampagem.....	8
Figura 2.3 - Nomenclatura utilizada na estampagem.....	9
Figura 2.4 - Ferramenta de estampagem de duplo efeito [Schuler, 1998].	10
Figura 2.5 - Tensões sofridas na estampagem profunda de peça cilíndrica com cerra-chapas [Schuler, 1998].	11
Figura 2.6 - Sequência de estampagem [Suchy, 1998].....	12
Figura 2.7 - Variação do coeficiente de anisotropia com a orientação no plano da chapa.	13
Figura 2.8 - Anisotropia planar e anisotropia normal.....	14
Figura 2.9 - Influência da espessura da chapa na Curva Limite de Estampagem [Tisza et al, 2012].....	18
Figura 2.10 - Arestas irregulares de taças cilíndricas devido à anisotropia [Suchy, 1998].	19
Figura 2.11 - Técnicas de corte das abas de taças cilíndricas [Suchy, 1998].....	21
Figura 2.12 - Planificado gravado com marcas circulares.	22
Figura 2.13 - Círculos usados na análise de enformabilidade: a forma original, a deformação no plano, embutido e expansão biaxial.....	22
Figura 2.14 - Diagrama limite de embutidura.	22

Figura 2.15 - Cerra-chapas com folga normal e angular.....	23
Figura 2.16 - Variação do raio de concordância do punção.	26
Figura 2.17 - Influência do valor do raio de concordância da matriz no escoamento da chapa.	26
Figura 2.18 - Processo de corte da borda de peças estampadas (" <i>Pinch Trimming</i> ")....	27
Figura 2.19 - Projeto de matriz para remover a borda irregular.	27
Figura 2.20 - Diferentes tipos de punções de estampar com furos de ar.	28
Figura 2.21 - Peça cilíndrica.	30
Figura 2.22 - Processos de <i>Ironing</i>	32
Figura 3.1 - Componente em estudo, a) conjunto solenóide, b) carcaça e c) eletroválvula.	37
Figura 3.2 - Conjunto carcaça e solenóide. a) e b) Conjunto completo, c) e d) Secção transversal com e sem bobina.	38
Figura 3.3 - Desenho técnico da carcaça.	39
Figura 3.4 - Características especiais.	40
Figura 3.5 - Especificação para as furações na parede da taça.	41
Figura 3.6 - Detalhe Y.....	42
Figura 3.7 - Legenda do desenho técnico.	42
Figura 3.8 - A forma geométrica da peça após cada fase: a) estampagem, b) forjamento e extrusão e c) cortes dos furos laterais.	43
Figura 3.9 - Modelação 3D da taça cilíndrica após processo de estampagem.....	44
Figura 3.10 - Fluxograma para procedimento de análise de processo de estampagem profunda.....	45
Figura 3.11 - Processo de forjamento de furo repuxado.....	46
Figura 3.12 - Deformação obtida na extremidade superior através de forjamento.....	46
Figura 4.1 - Representação gráfica das superfícies limites de elasticidade no espaço tridimensional das tensões principais.....	49
Figura 4.2 - Curva limite de estampagem (<i>Autoform R10</i>).....	50
Figura 4.3 - Axissimetria da peça.	50
Figura 4.4 - Malha de elementos finitos.	51
Figura 4.5 - Estudo de convergência de malha.....	51

Figura 4.6 - Gráfico de convergência da força de estampagem em função do nº de elementos finitos no comprimento da malha.....	52
Figura 4.7 - Gráfico de convergência da força de estampagem em função do nº de elementos finitos na largura da malha	52
Figura 4.8 - Esquema de estampa plana e matriz com raio de canto igual a 20 mm.....	54
Figura 4.9 - Influência da folga entre punção e matriz na força de estampagem.....	55
Figura 4.10 - Volume de material correspondente ao furo repuxado [Fusion 360].	57
Figura 4.11 - 'Anel' para determinação do valor do raio do pré-furo [Fusion 360].	57
Figura 4.12 - Ferramentas para forjar o furo repuxado.	58
Figura 4.13 - Ferramentas para extrudir a extremidade superior da taça.	58
Figura 4.14 - Resumo geral do problema de elementos finitos.	59
Figura 4.15 - Formulação do problema na etapa 1 de estampagem.	60
Figura 4.16 - Formulação do problema na etapa 2 de estampagem.	60
Figura 4.17 - Formulação do problema na etapa de ironing.	61
Figura 4.18 – Resultados da simulação do processo de estampagem: a) 2ª etapa b) Ironing. Diâmetro Externo e interno.	62
Figura 4.19 - Resultado da simulação numérica da operação de Ironing: Altura da taça [mm].	63
Figura 4.20 - Resultados da simulação do processo de estampagem (2ª abordagem): a) 2ª etapa b) Ironing. Diâmetro Externo e interno.	64
Figura 4.21 - Resultado da simulação numérica da operação de Ironing: Altura da taça [mm] – 2ª abordagem	65
Figura 4.22 - Variação da espessura do fundo da taça.	66
Figura 4.23 - Malha de elementos finitos com nós em estudo a vermelho.	66
Figura 4.24 - Simulação do processo de forjamento do furo repuxado.	67
Figura 4.25 - Resultados obtidos de abordagens diferentes no processo de forjamento.	67
Figura 4.26 - Gráficos força vs deslocamento em cada etapa de simulação.....	68
Figura 4.27 - Simulação do processo de estampagem com elementos finitos hexaédricos a) 1ª etapa, b) 2ª etapa e b) ironing.....	69
Figura 4.28 - Evolução da deformação da chapa durante a segunda etapa de estampagem.....	70

Figura 4.29 - Diâmetro externo e interno da taça.....	70
Figura 4.30 - Diagrama Limite de Estampagem. Deformações principais após processo de estampagem.....	71
Figura 4.31 - Evolução da malha deformada em processo de estampagem com uma etapa.....	72
Figura 4.32 - Diagrama Limite de Estampagem. Processo de uma etapa.	72
Figura 5.1 - Ferramenta-tipo de processos de estampagem de taças cilíndricas, a) 1ª etapa e b) 2ª etapa [Rossi, 1975].	73
Figura 5.2 - Estrutura inferior da ferramenta.	75
Figura 5.3 - Estrutura Superior da ferramenta.	75
Figura 5.4 – Mecânica de deformação da peça.....	76
Figura 5.5 - Extração da peça.....	76
Figura 5.6 - Ferramenta na a) segunda etapa de estampagem e b) etapa de ironing. ...	77
Figura 5.7 - Torneamento de matriz de estampar.....	79
Figura 5.8 - Matrizes e punções de estampar.	79
Figura 5.9 - Placa superior, placa inferior e base.....	80
Figura 6.1 - Ferramenta montada em máquina pronta para ensaio.....	81
Figura 6.2 - Peça presa ao punção de estampar na posição de recuo.	82
Figura 6.3 - Punção de estampar com canais de ar.	82
Figura 6.4 - Desenho CAD com vista da secção transversal do punção de estampar com conicidade.	83
Figura 6.5 - Punção e peça presos na matriz de estampar.....	84
Figura 6.6 - Peças obtidas em cada etapa de estampagem dispostas sequencialmente.	84
Figura 6.7 - Amostra obtida após segunda etapa de estampagem.....	85
Figura 6.8 - Vista interior da taça.....	85
Figura 6.9 - Secção transversal de uma amostra.....	86
Figura 6.10 - Pontos onde se mediu o diâmetro externo.....	87
Figura 6.11 - Variação da espessura da chapa.....	88
Figura 6.12 - Ponto para comparar valores da espessura da chapa.....	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 - Coeficiente limite de estampagem para diferentes tipos de materiais [Rodrigues et al, 2010]	12
Tabela 2-2 - Classificação do material em função dos coeficientes de anisotropia.	14
Tabela 2-3 - Defeitos mais comuns no processo de estampagem.	20
Tabela 2-4 - Pressão nominal do cerra-chapas para diferentes tipos de material.....	24
Tabela 2-5 - Folga recomendada pela ASM entre punção e matriz em processos de estampagem [Rodrigues et al, 2010].	25
Tabela 2-6 - Velocidade de estampagem para os diferentes tipos de materiais metálicos.	28
Tabela 2-7 - Fator corretivo da tensão de rotura em função da relação de estampagem.	29
Tabela 2-8 - Coeficiente de Ironing em função do tipo de material.	32
Tabela 2-9 - Exemplos de tipos de elementos finitos utilizados na simulação de processos de conformação de chapa metálica.	35
Tabela 4-1 - Informação geral.....	48
Tabela 4-2 - Propriedades básicas.	48
Tabela 4-3 - Superfície de cedência.	48
Tabela 4-4 - Curva de encruamento	49
Tabela 4-5 - Influência do raio de canto da matriz na força de estampagem e na espessura final da parede da taça.....	54
Tabela 4-6 - Parâmetros geométricos das ferramentas de estampagem [valores em mm].	56
Tabela 4-7 - Limites superior e inferior do diâmetro externo, diâmetro interno e altura da taça.	61
Tabela 4-8 - Parâmetros geométricos das ferramentas de estampagem [valores em mm].	
2ª Abordagem de simulação.	64
Tabela 4-9 - Deslocamento sofrido pelos nós correspondentes ao raio do pré-furo. ...	66
Tabela 5-1 - Lista de Materiais da ferramenta softtool.	78
Tabela 6-1 – Registos médios em cada ponto correspondente ao diâmetro externo... 87	

Tabela 6-2 - Registos médios em cada ponto correspondente ao diâmetro interno. ...	88
Tabela 6-3 - Comparação entre resultados numéricos e os resultados experimentais – Diâmetro e altura [mm].	89
Tabela 6-4 - Comparação entre resultados numéricos e os resultados experimentais – espessura da chapa [mm]	90
Tabela A-1 - Secção transversal de peças axissimétricas - Fórmulas para calcular diâmetro da estampa plana.	95

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas, abreviaturas e acrónimos

ETMA	Empresa Técnica de Metalurgia;
FEM	Método dos elementos finitos;
CAE	Engenharia Assistida por Computador;
DD3IMP	<i>Deep Drawing 3D IMPLICIT Code;</i>

1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação foi desenvolvida em ambiente empresarial na ETMA Metal Parts. Na secção seguinte será realizada um pequeno enquadramento do trabalho desenvolvido, contextualizando o propósito do mesmo.

1.1. ETMA METAL PARTS

A ETMA Metal Parts é uma empresa familiar com mais de 200 colaboradores. Desde a sua fundação em 1940 e já com a força de 3 gerações, a ETMA Metal Parts tem vindo a desenvolver soluções customizadas para os seus clientes.



Figura 1.1 - Instalações da ETMA Metal Parts.

A aposta estratégica foi a de diversificar a sua atividade em várias linhas de negócio – nomeadamente a indústria de componentes automóveis, Elétrica, Eletrodomésticos, Sistemas de fixação e Injeção de plástico - e alargar o leque de oferta apresentando-se no mercado com 10 processos produtivos integrados, tornando-se um caso único na Europa. Esses processos englobam todo ciclo produtivo dos seus componentes (ver figura 1.2), desde a fase inicial em que se projetam e fabricam protótipos, ferramentas e equipamentos, passando pela fase de produção em série que, em função das características da peça, pode ser por processos de torneamento, forjamento a frio, estampagem e formação automática ou conformação de arame, e finalmente as peças podem passar por tratamentos térmicos, tratamentos de superfície, montagem e inspeção automática.

Utilização de ferramentas CAE no projeto do fabrico de um estampado profundo metálico

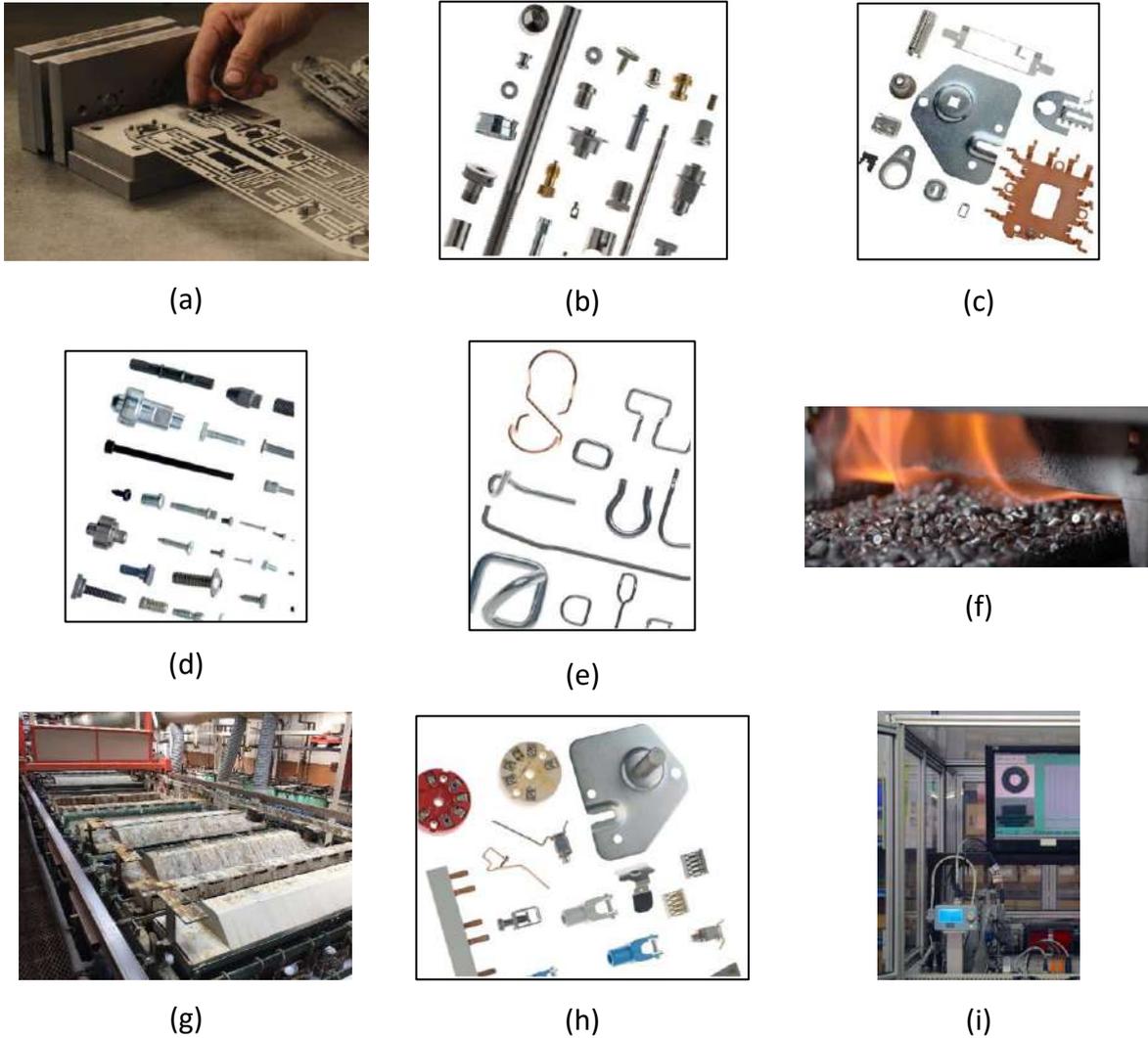


Figura 1.2 - Processos produtivos da ETMA Metal Parts; a) protótipos e ferramentas, b) torneamentos, c) estampagem, d) forjamento a frio, e) conformação de arame, f) tratamentos térmicos, g) tratamentos de superfície, h) montagem e i) inspeção.

A fabrica situa-se em Braga e agora com centro logístico na República Checa, juntamente com uma equipa de profissionais qualificados, resulta em vantagens competitivas para os clientes no fabrico de peças metálicas utilizando tecnologia adequada e atual.

1.2. FERRAMENTAS CAE NOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO DE CHAPA – ESTAMPAGEM

O processo de conformação plástica de chapas metálicas cobre uma parte significativa da indústria da manufatura, sobretudo no ramo automóvel e elétrico, fornecendo uma ampla gama de produtos utilizados no dia-a-dia dos consumidores.

Utilização de ferramentas CAE no projeto do fabrico de um estampado profundo metálico

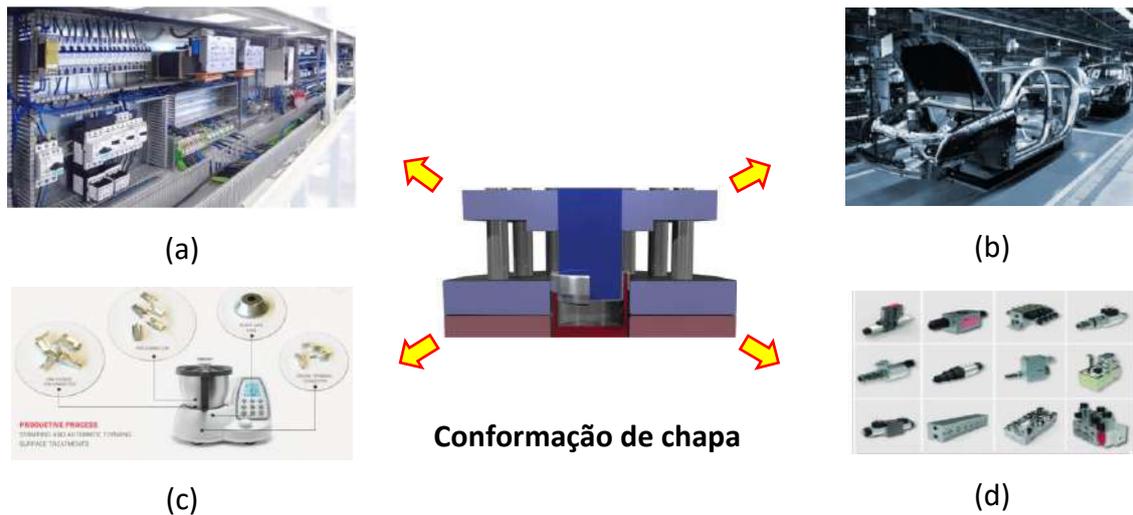


Figura 1.3 – Exemplos de áreas de aplicação dos processos de conformação de chapa; a) elétrico, b) automóvel, c) eletrodomésticos e d) automação.

A estampagem é um dos processos de conformação de chapa metálica mais importantes e mais utilizado na indústria para produzir componentes para a indústria automóvel, a indústria de componentes elétricos e de automação, produtos domésticos, entre outros.

A capacidade de projetar um produto de estampagem profunda com o material, o tamanho e a forma necessários, juntamente com o projeto da ferramenta depende significativamente do estudo da influência das falhas que ocorrem no processo. O fabrico deste tipo de peças requer um forte apoio de engenharia, desde a conceção e projeto do produto, ao projeto e construção da ferramenta de estampagem, que necessita de satisfazer as necessidades de curtos prazos de entrega, mantendo a qualidade e segurança do produto a um preço competitivo.

Prever o comportamento destes componentes no seu processo de fabrico não é fácil. Fenómenos como a rotura, o retorno elástico e o enrugamento são muito comuns neste tipo de processo de conformação. Evitar estes problemas torna-se essencial para fabricar uma ferramenta de estampagem com sucesso.

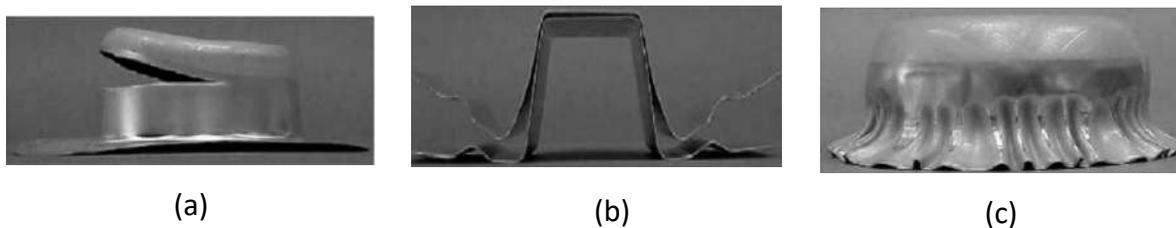


Figura 1.4 - Problemas do processo de conformação de chapa metálica: a) rotura, b) retorno elástico e c) enrugamento [Hsu et al. 2002].

Os erros de projeto das ferramentas podem resultar em reparações morosas, no aumento de *Tryouts*, no aumento do tempo de mão-de-obra e no fabrico e correção de novos componentes. Isto tem um custo irreparável e elevado, podendo levar a que se ultrapasse o valor de custo de venda da ferramenta, além do risco de incumprimento de prazos acordados com os clientes.

É neste contexto que a presente dissertação pretende demonstrar a utilidade das ferramentas CAE na otimização do projeto de ferramentas de estampagem. Apesar da vasta experiência no fabrico de componentes metálicos na ETMA, a complexidade geométrica das peças novas que surgem a cada ano é cada vez maior, tal como o grau de especificação técnica exigido pelos clientes. Sem as ferramentas de simulação, a experiência dos técnicos pode não ser suficiente para este tipo de componentes. Desta forma, no sentido de promover o conhecimento e de reduzir os erros de projetos futuros, a ETMA propôs a realização de um estudo de caso do fabrico de um estampado profundo metálico. Trata-se da carcaça que alberga o solenoide de uma electroválvula direcional (ver figura 1.5), um componente que deve ser fabricado por estampagem profunda e em várias etapas.



Figura 1.5 - Estudo de caso de carcaça de solenóide.

A utilização de uma ferramenta CAE na simulação do processo de fabrico de um componente metálico tem as seguintes vantagens:

-
- DETERMINAR O NÚMERO MÍNIMO DE ETAPAS NECESSÁRIAS PARA O FABRICO;
 - DETERMINAR AS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS FERRAMENTAS;
 - DETERMINAR AS DIMENSÕES DA CHAPA PLANIFICADA;
 - DIMINUIR O ERRO DE PROJETO;
 - APROXIMAR À SOLUÇÃO IDEAL
-

O estudo de caso será concluído com a realização de ensaios experimentais para comparar/validar os resultados obtidos no estudo numérico com ferramenta CAE. Espera-se obter resultados satisfatórios que proporcionem maior confiança neste tipo de ferramentas e assim diminuir o desperdício e os custos de fabrico em projetos futuros.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo primordial da presente dissertação passa por comprovar as vantagens da utilização de uma ferramenta CAE no projeto de fabrico de componentes metálicos, no sentido de reduzir o desperdício e os custos de fabrico de ferramentas de estampagem devido a erros de projeto e falta de conhecimento. Desta forma, destacam-se os seguintes objetivos:

-
- ESTUDO DO COMPONENTE;
 - ESTUDO DO MATERIAL;
 - DETERMINAR ETAPAS DE FABRICO;
 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE FABRICO;
 - PROJETO E MAQUINAÇÃO DE FERRAMENTA SOFTTOOL;
 - FABRICO DE AMOSTRAS;
 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.
-

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é composta por 7 capítulos. O primeiro capítulo é composto pela introdução ao trabalho, sendo realizada uma breve contextualização, bem como a apresentação da empresa, a descrição dos objetivos do trabalho e da estrutura da dissertação.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, onde são descritos alguns conceitos teóricos relacionados com o processo de estampagem e as ferramentas de simulação numérica.

No terceiro capítulo é exposta uma análise do componente em estudo, onde são identificadas as características geométricas e dimensionais, as especificações técnicas, assim como as funções principais e aplicação. Também se descreve a avaliação ao processo de fabrico do componente.

No quarto capítulo é exposta a análise numérica realizada, com a apresentação do pré-processamento e da análise do pós-processamento, assim como a otimização do processo.

No quinto capítulo apresenta-se o projeto da ferramenta *softool* e descreve-se o funcionamento da ferramenta e dos seus componentes.

No sexto capítulo é descrita a análise dos ensaios experimentais e do seu procedimento, bem como a apresentação dos resultados obtidos e comparação com os resultados numéricos.

Por fim, no sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado, sendo ainda descritos os trabalhos futuros a realizar.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são apresentados alguns conceitos teóricos sobre o processo de conformação de chapa metálica, a estampagem, e sobre o projeto de ferramentas para este tipo de processo, servindo de suporte para a compreensão do trabalho desenvolvido.

Por outro lado, como se pretende aplicar a técnica MEF (Método dos Elementos Finitos) através da utilização de ferramentas CAE, torna-se útil a descrição deste método numérico e do *solver* utilizado, o DD3IMP.

2.1. ESTAMPAGEM

O processo de fabrico abordado na presente dissertação é a estampagem, também denominada por embutidura, e trata-se de um processo tecnológico de transformação de chapa, no qual a partir de uma estampa plana de material metálico se pretende obter uma peça oca com geometria definida por um punção e uma matriz (ver figura 2.1). O escoamento do material é controlado pela ação de um cerra-chapas, enquanto o punção empurra o material contra a matriz [Rodrigues et al. 2010].

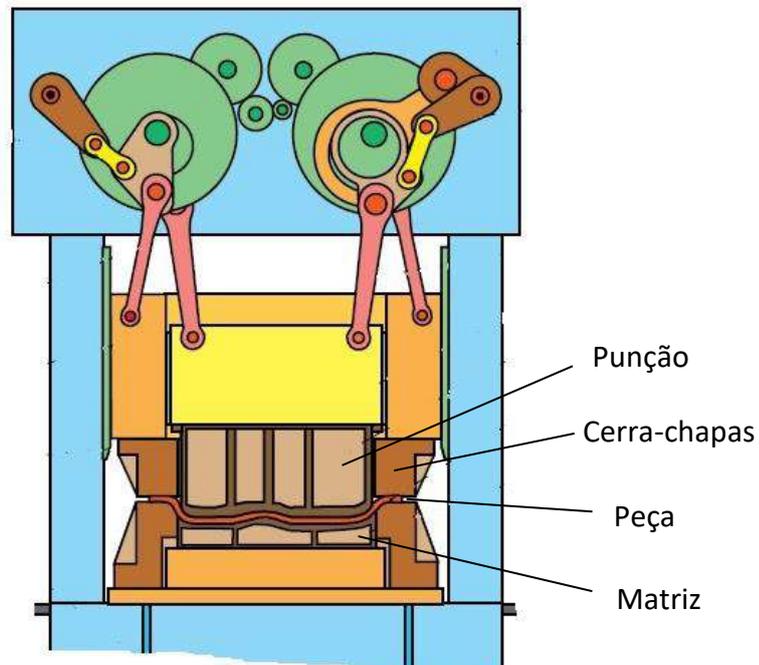


Figura 2.1 - Representação de uma operação de estampagem numa prensa [Schuler, 1998].

Trata-se de um dos processos mais importantes de conformação de chapa, cujo campo de aplicação abrange um vasto leque de indústrias, entre as quais:

-
- AUTOMÓVEL: PAINÉIS DE PORTAS, 'CAPOTS', APOIOS, TAMPAS DE VÁLVULAS, ETC.;
 - AEROESPACIAL E AERONÁUTICA: FUSELAGEM, APOIOS, ETC.;
 - PRODUTOS ALIMENTARES, DOMÉSTICOS & DECORATIVOS: TAÇAS, PAINÉIS, TABULEIROS, LAVALOIÇAS, BANHEIRAS, CANDEEIROS, ETC.;
 - ELETRODOMÉSTICOS: PAINÉIS DE FRIGORÍFICOS, MÁQUINAS DE LAVAR, FOGÕES, EXAUSTORES, APARELHAGENS DE SONS, ETC.;
 - PRODUTOS HOSPITALARES: RESERVATÓRIOS, TABULEIROS, ETC.
-



Figura 2.2 - Exemplos de produtos fabricados por estampagem.

Considera-se um processo de elevada cadência, onde se podem atingir os valores médios de 5000 peças/hora, dependendo da complexidade das peças que se estão a produzir.

Tendo em conta a elevada variedade de peças que podem ser produzidas por este processo, é habitual classificar a estampagem em função da geometria básica das peças que se podem obter – estampagem de peças cilíndricas, estampagem de peças cónicas, estampagem de peças retangulares e estampagem de peças complexas, compreendendo esta

última classe todas as peças que não são possíveis de incluir nas restantes operações [Rodrigues et al. 2010]. O estudo analítico de cada um destes casos é muito difícil de fazer para a maioria dos casos. Na presente dissertação apenas se abordará o estudo do processo de estampagem de peças cilíndricas, uma vez que o estudo de caso refere uma peça cilíndrica.

2.1.1. NOMENCLATURA E MECÂNICA DE DEFORMAÇÃO

Com o objetivo de melhorar a compreensão deste capítulo e evitar leituras contraditórias e confusas, torna-se necessário definir a nomenclatura que será usada ao longo da presente dissertação. Considerando a figura 2.3, observa-se uma ferramenta típica de estampagem é constituída por um punção, uma matriz e um cerra-chapas:

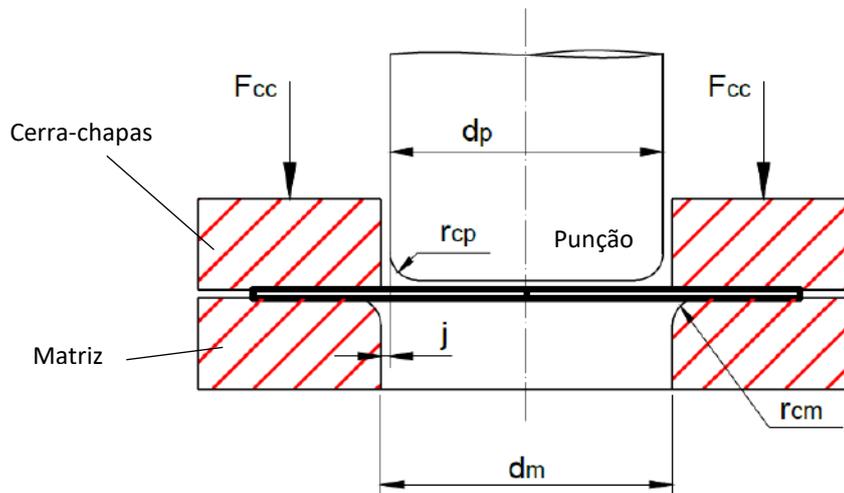


Figura 2.3 - Nomenclatura utilizada na estampagem.

Legenda:

d_p – diâmetro do punção;

r_p – raio de concordância do punção;

d_m – diâmetro da matriz;

r_m – raio de concordância da matriz;

j – folga radial entre o punção e a matriz;

F_{cc} – força aplicada pelo cerra-chapas;

Os lados do punção e da matriz estão afastados por uma folga j geralmente superior à espessura inicial da chapa, podendo, por vezes, ser inferior. Existe ainda um cerra-chapas que aplica uma força F_{cc} na extremidade da estampa plana que irá controlar o escoamento da aba para o interior da matriz durante o processo.

Considere-se a figura 2.4 para compreensão da mecânica de deformação no processo de estampagem.

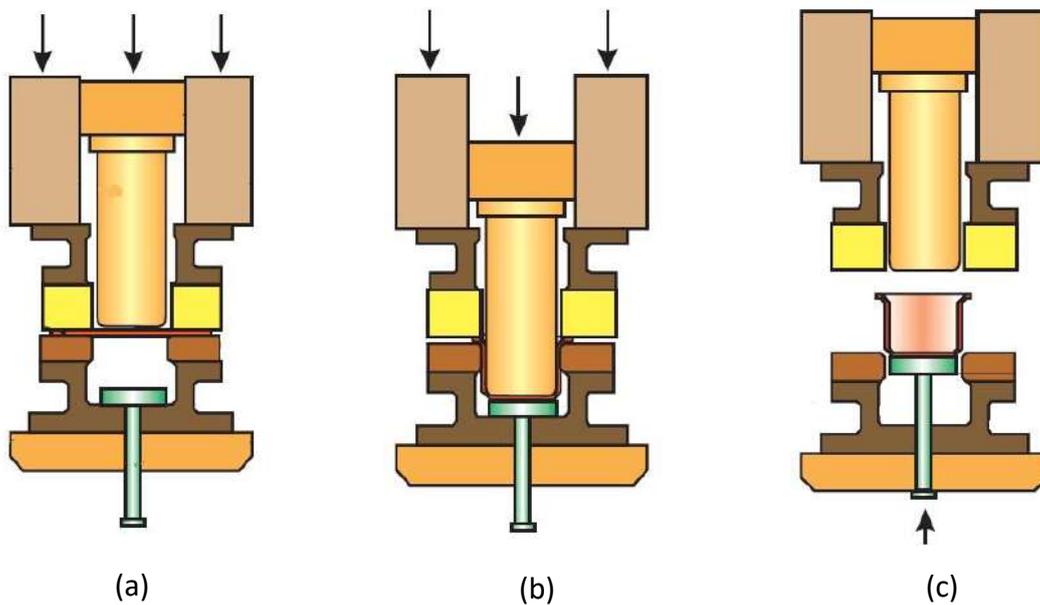


Figura 2.4 - Ferramenta de estampagem de duplo efeito [Schuler, 1998].

Da figura acima constata-se 3 fases: a primeira em que o cerra-chapas aplica uma força sobre o esboço que se encontra fixo sobre a matriz (ver figura 2.4 a)); a segunda fase que se inicia com o movimento punção contra o esboço, forçando este a obter a forma cilíndrica do punção quando atingir a base da matriz e do extrator (ver figura 2.4 b)), enquanto o cerra-chapas vai controlando o escoamento da chapa. No momento final desta fase, a aresta superior da peça cilíndrica expande-se um pouco devido ao retorno elástico; por último, na terceira fase quando o punção realiza o movimento de retorno, a peça será extraída por ação do extrator (ver figura 2.4 c)).

A peça é sujeita a tensões radiais F_R e tensões circunferenciais F_T , ou seja, o material é comprimido na direção tangencial e esticado na direção radial (ver figura 2.5). Com o aumento da profundidade de estampagem, aumenta também a deformação e a resistência do material. O material é severamente esticado na zona do raio de concordância do punção. A rotura ocorre normalmente nesta zona.

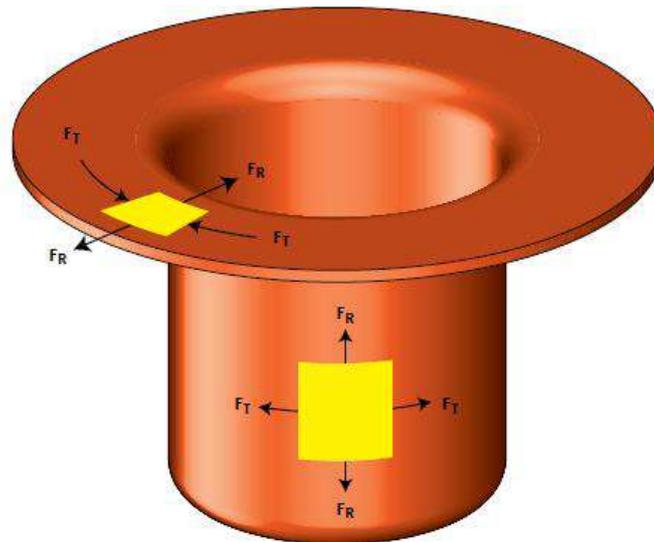


Figura 2.5 - Tensões sofridas na estampagem profunda de peça cilíndrica com cerra-chapas [Schuler, 1998].

2.1.2. RELAÇÃO DE ESTAMPAGEM

A severidade do processo de estampagem pode ser expressa pela relação de estampagem, m , definida pelo rácio entre o diâmetro da taça, d , e o diâmetro do esboço, D_0 .

$$m = \frac{d}{D_0} \quad (2.1)$$

Este rácio permite avaliar a quantidade de etapas de estampagem necessárias para obter uma determinada taça. Quando o valor do rácio é ultrapassado, pode ocorrer a rotura da peça devido aos limites das propriedades mecânicas do material serem ultrapassados. Portanto, a relação de estampagem é comparada ao coeficiente limite de estampagem, M , que não é mais do que um valor indicativo do limite de redução que o material da chapa pode suportar sem romper. Desta forma, sempre que a relação de estampagem for inferior ao coeficiente limite de estampagem surge a necessidade de realizar estampagem múltipla, onde cada etapa deverá ser escalonada de acordo com a redução permitida (ver figura 2.6). A vantagem de utilizar a severidade é a imediata determinação o número de etapas de estampagem necessárias para obter a taça final. Existem valores de coeficiente limite de estampagem que foram determinados para vários tipos de materiais. Esses valores podem ser consultados na tabela 2.1.

A altura h em cada etapa da sequencia de estampagem para vários tipos de materiais deve ser descoberta, e talvez até testada considerando as propriedades do material.

Utilização de ferramentas CAE no projeto do fabrico de um estampado profundo metálico

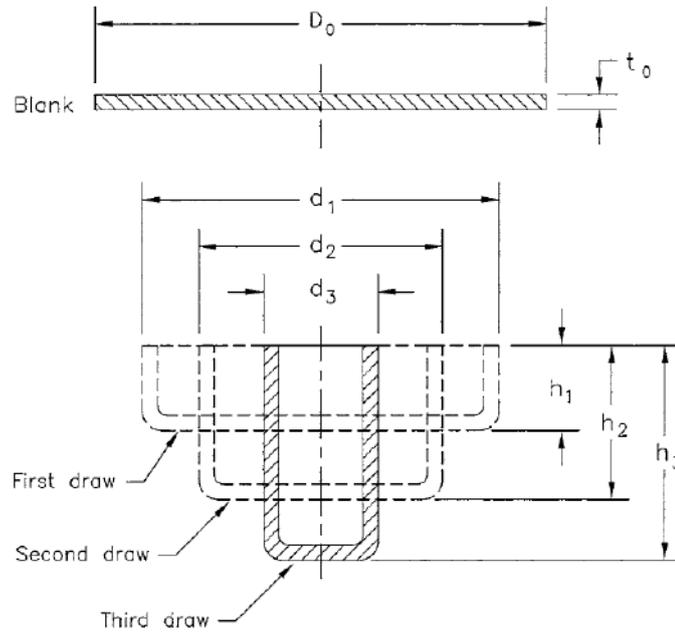


Figura 2.6 - Sequência de estampagem [Suchy, 1998].

Tabela 2-1 - Coeficiente limite de estampagem para diferentes tipos de materiais [Rodrigues et al, 2010]

Material	1ª Fase (M_1)	Fases seguintes (M_2)
Aço para estampagem	0.60 – 0.65	0.80
Aço para estampagem profunda	0.55 – 0.60	0.75 – 0.80
Aço para carroçaria automóvel	0.52 – 0.58	0.75 – 0.80
Aço inoxidável	0.50 – 0.55	0.80 – 0.85
Folha de flandres	0.50 – 0.55	0.75 – 0.80
Cobre	0.55 – 0.60	0.85
Latão	0.50 – 0.55	0.75 – 0.80
Zinco	0.65 – 0.70	0.85 – 0.90
Alumínio	0.53 – 0.60	0.80
Duralumínio	0.55 – 0.60	0.90
Níquel; Monel; Inconel	0.60 – 0.65	0.80

2.1.3. ANISOTROPIA

A anisotropia de um material metálico define o fenómeno intrínseco em que as propriedades mecânicas dependem da direção de solicitação de uma força externa. Isto deve-se aos processos de laminagem das chapas que promovem uma determinada orientação da

estrutura metalográfica dos metais. A anisotropia é quantificada através dos conceitos de anisotropia planar e normal (ver figura 2.8), e em que o primeiro representa o grau de anisotropia no plano da chapa, e calcula-se da seguinte forma:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (2.2)$$

r_0 – coeficiente de anisotropia na direção de laminagem;

r_{45} – coeficiente de anisotropia na direção a 45° com a de laminagem;

r_{90} – coeficiente de anisotropia na direção normal à de laminagem.

Quando não existir anisotropia planar, $\Delta r = 0$, significa que no plano da chapa o coeficiente de anisotropia é igual em qualquer direção considerada (ver figura 2.7).

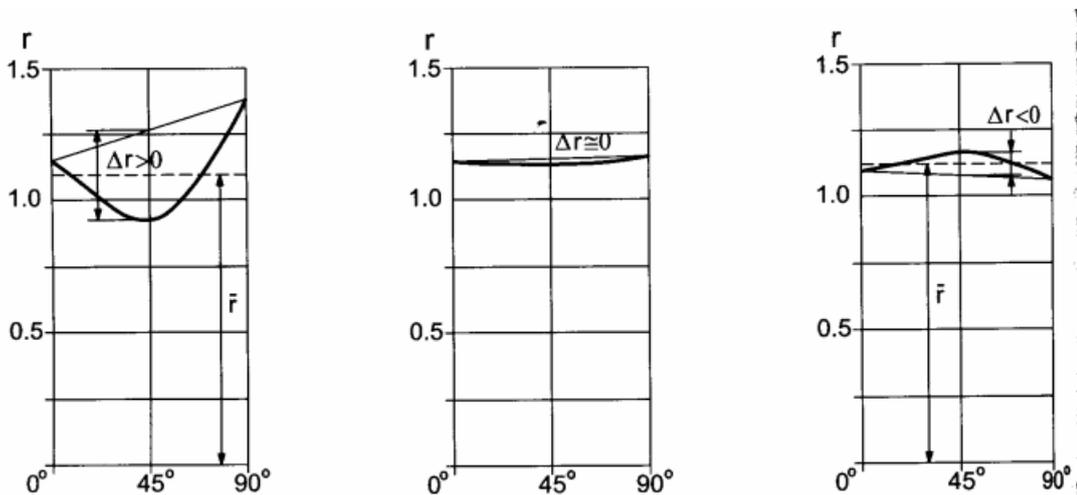


Figura 2.7 - Variação do coeficiente de anisotropia com a orientação no plano da chapa.

A anisotropia segundo a direção da espessura da chapa denomina-se anisotropia normal, e o coeficiente de anisotropia normal calcula-se através da seguinte expressão,

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.3)$$

O valor dos coeficientes de anisotropia entre si determina o tipo de material relativamente à sua anisotropia (ver tabela 2-2).

Tabela 2-2 - Classificação do material em função dos coeficientes de anisotropia.

$r_0 = r_{45} = r_{90} = 1$	Material isotrópico
$r_0 = r_{45} = r_{90} \neq 1$	Anisotropia normal e isotropia planar
$r_0 \neq r_{45} \neq r_{90} \neq 1$	Anisotropia normal e anisotropia planar

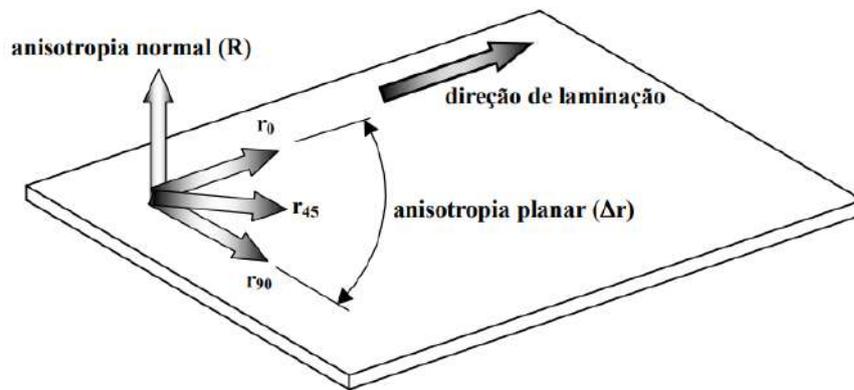


Figura 2.8 - Anisotropia planar e anisotropia normal.

2.1.4. CRITÉRIOS DE PLASTICIDADE

Os critérios de plasticidade podem definir-se como os modelos que definem a superfície no espaço de tensões tal que $F(\sigma) = 0$, e que corresponde a todos os estados de tensão em que ocorre a deformação plástica (Alves, 2010). Referem-se às superfícies de plasticidade iniciais.

O comportamento plástico dos materiais foi definido por uma variedade de critérios que ao longo dos anos foram otimizados em função dos resultados experimentais obtidos nos mais variados projetos de investigação. Neste capítulo citam-se os mais importantes (Rodrigues et al, 2010).

Para os materiais isotrópicos,

Tresca (1864),

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.4)$$

Von Mises (1913),

$$2\sigma_e^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad (2.5)$$

Drucker (1949),

$$k^2 = J_2^3 - cJ_3^2 \quad (2.6)$$

Em que σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais do tensor das tensões; σ_e é a tensão limite de elasticidade em tração uniaxial; J_2 e J_3 são os segundo e terceiro invariantes do tensor das tensões desviador, e $k^2 = 27(\sigma/3)^6$.

Para os materiais anisotrópicos,

Hill (1948),

$$\sigma_e^2 = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{xz}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 \quad (2.7)$$

Em que F, G, H, L, M e N são parâmetros de anisotropia de Hill 1948, que podem ser determinados em função dos coeficientes de anisotropia,

$$\begin{aligned} H &= \frac{r_0}{1 + r_0} \\ F &= \frac{r_0}{(1 + r_0)r_{90}} \\ N &= \frac{(r_0 + r_{90})(2r_{45} + 1)}{2(1 + r_0)r_{90}} \\ G &= 1 - H \end{aligned} \quad (2.8)$$

Barlat (Yld91),

$$2\sigma_e^a = |s_1 - s_2|^2 + |s_2 - s_3|^2 + |s_1 - s_3|^2 \quad (2.9)$$

Sendo s_1 , s_2 e s_3 as tensões principais do tensor S. Alves 2010 refere que o expoente a pode assumir qualquer valor real superior a 1, porém, o seu valor deve ser superior a 6 em função do tipo de material.

O critério de plasticidade de Hill 1948 é o mais amplamente aceite e utilizado nas simulações de processos de conformação plástica de chapa metálica laminada, ou seja, materiais de comportamento ortotrópico. Os demais critérios desenvolvidos posteriormente tiveram como base a necessidade de melhorar o rigor do critério de Hill 1948 (Alves, 2010).

2.1.5. LEIS DE EVOLUÇÃO

Também denominadas por leis de encruamento, leis de evolução associadas a critérios de plasticidade tratam de descrever a evolução da superfície de plasticidade com o decorrer da deformação plástica.

Existem dois tipos de leis de encruamento: o encruamento isotrópico para a expansão isotrópica da superfície de plasticidade e o encruamento cinemático para a expansão por translação.

Das diversas leis macroscópicas de encruamento isotrópico existentes, destacam-se as seguintes:

Swift (1947),

$$Y = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (2.10)$$

Voce (1948),

$$Y = Y_0 + (Y_{sat} - Y_0) \cdot (1 - e^{-C_y \varepsilon}) \quad (2.11)$$

Em que,

Y - Tensão de escoamento;

Y_0 - Tensão de cedência em tração uniaxial;

ε - Deformação plástica equivalente;

ε_0 - Deformação logarítmica equivalente;

Y_{sat} - Tensão de saturação.

A lei de Swift descreve o comportamento de materiais com encruamento isotrópico sem saturação, como por exemplo os aços macios para estampagem. Por outro lado, a lei de Voce descreve o comportamento de materiais com encruamento isotrópico com saturação. Como por exemplo o alumínio (Alves, 2010).

2.1.6. PARÂMETROS TECNOLÓGICOS DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM CILÍNDRICA

Uma peça estampada é afetada por várias influências tecnológicas que afetam o seu processo de fabrico e os resultados. Estes fatores são o tipo de ferramenta, o tipo de processo de fabrico, o atrito, a velocidade do processo, a temperatura e outras influencias que exercem o seu controlo sobre o produto final.

Todos estes parâmetros devem ser propriamente avaliados de modo que a sua influência seja limitada.

2.1.6.1. MATÉRIA-PRIMA

Para avaliar a influência da matéria-prima no processo de estampagem apresenta-se uma análise a um conjunto de variáveis que estão associadas ao material e cujas variações podem afetar a operação em si. Essas variáveis são a enformabilidade do material, a espessura e a anisotropia.

Conformabilidade do material

O projeto de uma ferramenta de estampagem depende sempre da capacidade intrínseca de enformação do material. Pode-se definir a conformabilidade como a capacidade que o material tem para adquirir determinada forma sem perder a estabilidade, ou seja, sem apresentar estrições nem fraturas e quantificada através do coeficiente limite de estampagem. Pode-se ainda realizar vários testes que avaliam a capacidade de enformação do material, estudar a influencia de alterações na composição química e metalográfica na conformabilidade ou como o tamanho de grão afeta a superfície da chapa [Rodrigues et al, 2010].

O aumento do tamanho de grão melhora a conformabilidade do material. A equação de Hall-Petch ajuda a compreender este conceito ao relacionar o tamanho de grão, \bar{d} , com a tensão limite de elasticidade, σ_e , dada por,

$$\sigma_e = \sigma_{e0} + \frac{k}{\sqrt{\bar{d}}} \quad (2.12)$$

em que se verifica que o aumento do tamanho de grão diminui a tensão limite de elasticidade, o que significa que o material se torna mais apto a ser deformado.

Este conceito tem limitações, pois em materiais deformados a frio e posteriormente recozidos, nas zonas com tamanho de grão elevado podem originar superfícies muito rugosas.

Espessura da chapa

A espessura da chapa influencia dois fatores, a força necessária aplicada pelo cerra-chapas sobre a chapa e o valor absoluto do alongamento na estrição. Aumentar a espessura da chapa traz vários problemas como o encarecimento da peça e do processo de fabrico, além de que a redução de peso ser dos fatores mais importantes para determinadas indústrias,

como a automóvel. Desta forma, quanto menor for a espessura da chapa, maior tendência do material em enrugar e, portanto, maior pressão de encosto será exigida ao cerra-chapas. Relativamente ao alongamento por estrição, quanto maior a espessura da chapa maior é o valor do alongamento de estrição, o que significa uma maior capacidade de deformação, sendo por isso um benefício para o processo de estampagem.

Nos trabalhos desenvolvidos por Tisza et al, 2012, foi comprovado que para aços típicos de estampagem, como o DC04 e DD14, o coeficiente limite de estampagem também é influenciado na medida em que o aumento da espessura da chapa melhora a conformabilidade, e geralmente, aumenta os limites de estampagem e melhora a curva limite de estampagem, como se verifica na figura 2.9.

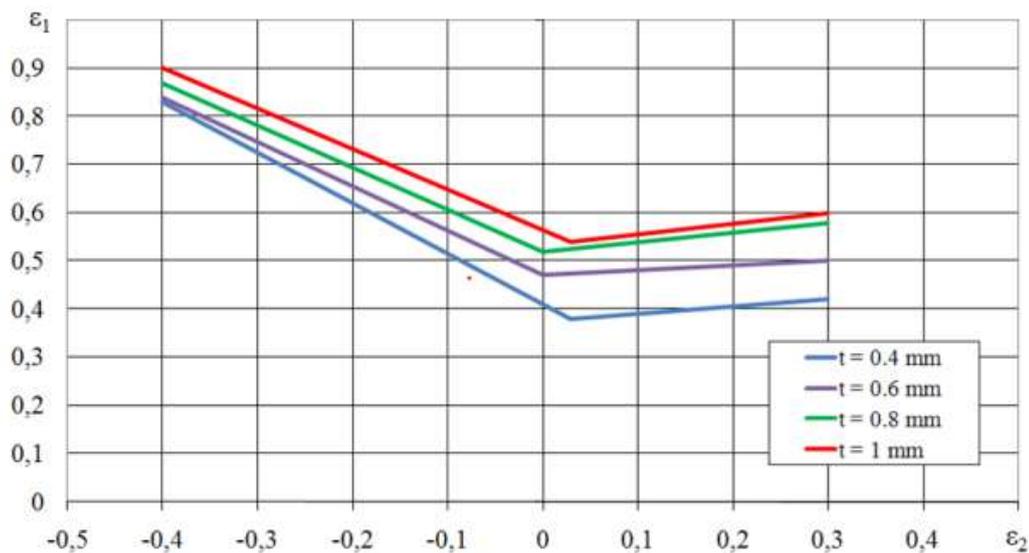


Figura 2.9 - Influência da espessura da chapa na Curva Limite de Estampagem [Tisza et al, 2012]

Anisotropia

Na estampagem de peças cilíndricas com materiais anisotrópicos acontece sempre a formação de 'orelhas' no topo da peça, sendo as zonas mais altas correspondentes aos valores mais altos do coeficiente de anisotropia e as zonas mais baixas aos valores mais reduzidos. As zonas das 'orelhas' correspondem então às direções em que a chapa demonstra maior resistência à deformação.

Este fenómeno vai obrigar ao projetista de ferramentas a adicionar posteriores etapas de correção da altura ou geometria da aba (no caso de taças com aba). Uma forma de evitar este problema é optar por um esboço de geometria não circular, em que se adaptaria à

variação do coeficiente de anisotropia do plano da chapa. Infelizmente, mesmo com isotropia planar, nunca se consegue evitar a anisotropia segunda a direção da espessura da chapa.

Geralmente o valor o coeficiente apresenta uma certa distribuição no plano da chapa, obtendo quatro valores máximos igualmente espaçados 90° , num ângulo de rotação de 360° no plano da chapa (ver figura 2.10).

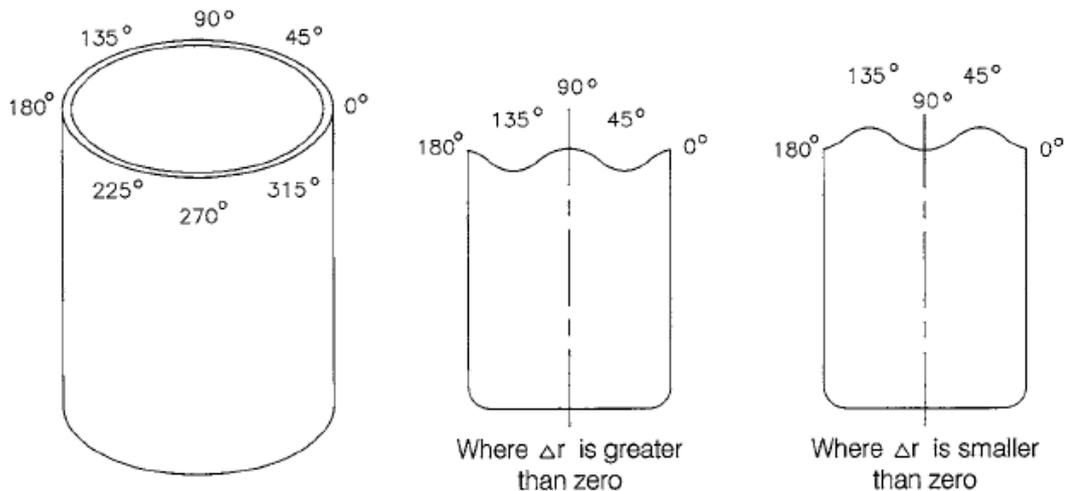


Figura 2.10 - Arestas irregulares de taças cilíndricas devido à anisotropia [Suchy, 1998].

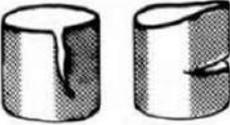
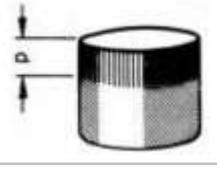
Materiais

Aços ligados e não ligados, assim com ligas de cobre e alumínio e ligas leves estão entre os materiais mais utilizados nos processos de conformação de chapa. Entre os aços ligados, os mais utilizados nos processos de estampagem são os que são laminados a frio, com percentagens de carbono entre os 0.05 e os 0.20%. na estampagem profunda os mais apropriados são os aços com baixo teor em carbono.

Defeitos

Sempre que possível deve-se evitar a produção de peças com defeitos, e neste sentido é necessário investigar e identificar as causas dos mais variados defeitos existentes nos processos de estampagem de forma a tomar medidas preventivas ao projetar uma ferramenta de estampagem. Alguns dos defeitos mais comuns estão ilustrados na tabela 2-3.

Tabela 2-3 - Defeitos mais comuns no processo de estampagem.

Aparência	Tipo de defeito	Causa possível	Ação corretiva
	<p>Fissuras irregulares desde a aresta pela parede abaixo. Normalmente aparecem dias após a estampagem.</p>	<p>Tensões residuais elevadas.</p>	<p>Recozimento das peças após estampagem.</p>
	<p>Fratura profunda com forma curvada num lado da parede. Desde aresta ou transversal.</p>	<p>Nódulos grossos ou corpos externos pressionados com limalhas.</p>	
	<p>Marca de compressão brilhante de altura 'p' na zona superior do lado externo da peça.</p>	<p>Folga de estampagem muito apertada.</p>	<p>Retificar punção ou matriz.</p>
	<p>Enrugamento e aresta da parede desgastada.</p>	<p>Excesso de folga ou curvatura da aresta matriz muito larga.</p>	<p>Substituição de ferramenta.</p>
	<p>Formação de orelhas apenas num lado da peça.</p>	<p>Descentramento do planificado, ou do punção com a matriz; Pressão irregular do cerra-chapas; Espessura irregular da chapa.</p>	<p>Alinhamento da ferramenta; Utilização de pilotos.</p>

2.1.6.2. ESTAMPAGEM COM ABAS

As peças estampadas podem ser divididas em dois grupos: as peças com abas e as que não possuem abas, i.e. os embutidos totais. Quando se tem de fabricar peças estampadas com aba, o tamanho do esboço deve-se adequar à largura e muitas vezes deixa-se um excesso de material que permita aparar a aba num processo final. Aparar a taça estampada com aba é geralmente inevitável devido aos efeitos da anisotropia que provocam a formação de 'orelhas' ou geometria distorcida durante o processo de estampagem (ver figura 2.11).

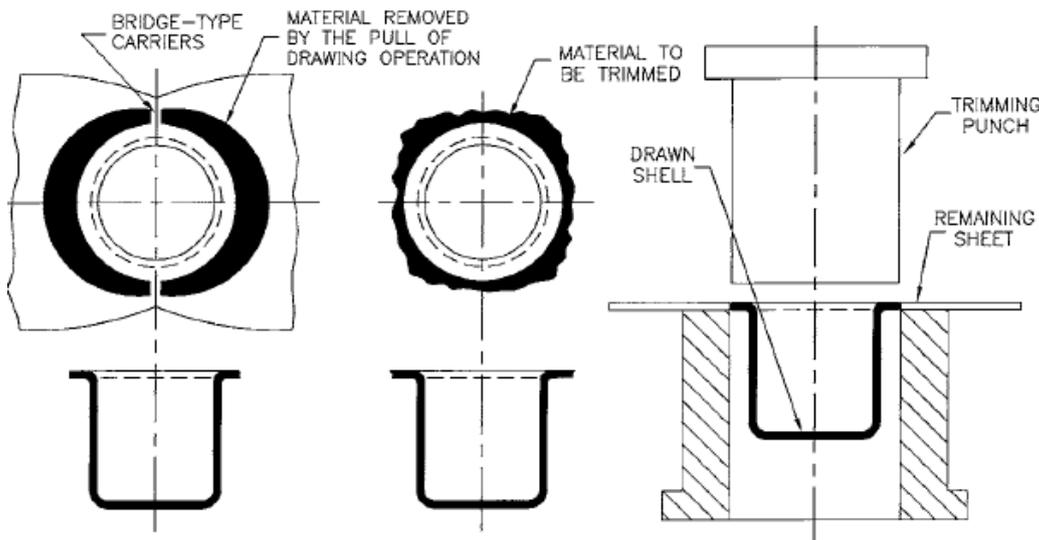


Figura 2.11 - Técnicas de corte das abas de taças cilíndricas [Suchy, 1998].

O corte da aba é realizado no final da sequência de etapas de estampagem, e onde também se extrai da matriz o produto acabado. Quando as peças não possuem aba, o tamanho do esboço não pode ser exato devido a faltar material algures na aresta da peça, o que obriga também a aparar o material.

2.1.6.3. DIAGRAMA LIMITE DE EMBUTIDURA

A avaliação da enformabilidade do material quando sujeito a operações de estampagem é realizada através do diagrama limite de embutidura (FLD siglas em inglês), que fornecem os limites das duas deformações principais (ϵ_1 e ϵ_2) levando à fratura. Os diagramas cobrem uma grande variedade de formas de deformação típicos de processos de estampagem, desde tração bi-axial e deformação de tração uniaxial [Kohara, 1993].

Para determinar a falha numa determinada região realizada um teste mecânico que consiste em colocar uma marca circular na peça antes de ser deformada e, de seguida, mede-se a elipse gerada após a deformação (ver figuras 2.12 e 2.13).

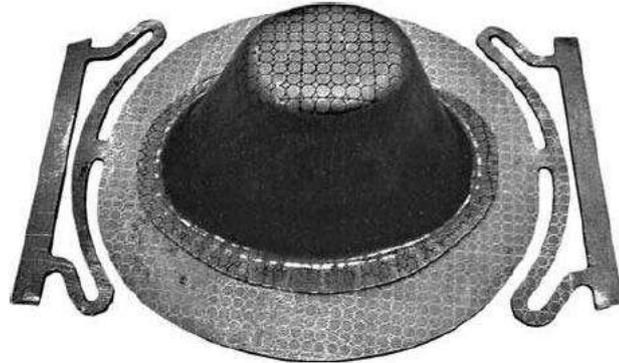


Figura 2.12 - Planificado gravado com marcas circulares.

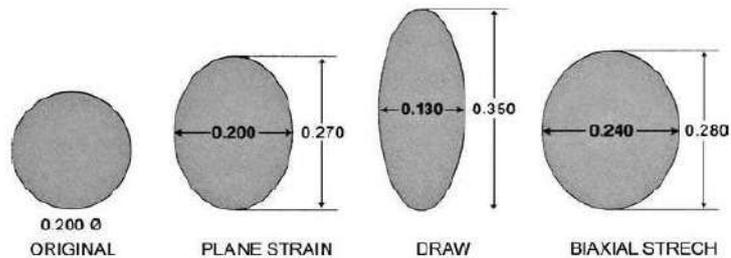


Figura 2.13 - Círculos usados na análise de enformabilidade: a forma original, a deformação no plano, embutido e expansão biaxial.

Ao repetir o teste para inúmeras marcas gera-se uma gama de estados de tensão a partir dos quais é possível criar o diagrama limite de embutidura como uma linha a partir da qual a rotura se inicia.

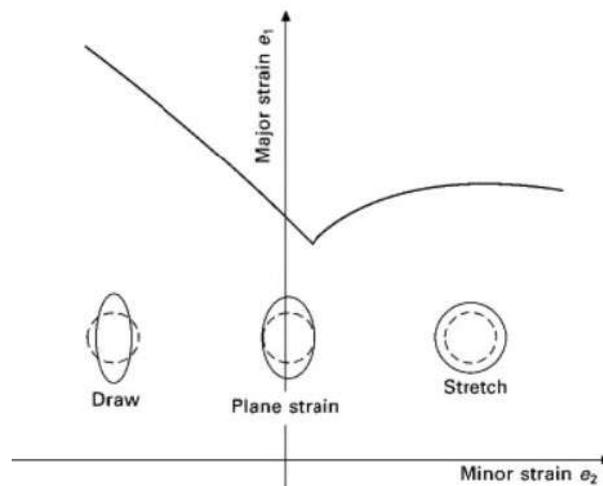


Figura 2.14 - Diagrama limite de embutidura.

2.1.6.4. CERRA-CHAPAS

O cerra-chapas é o componente ativo de uma ferramenta de estampagem que tem como função principal controlar o escoamento da chapa através da aplicação de uma pressão sobre a sua superfície. O cerra-chapas previne também o surgimento do fenómeno indesejado de enrugamento na aba, sendo este um dos fatores mais importantes na decisão de aplicar cerra-chapas ou não, uma vez que existem materiais em que a propensão para o enrugamento é muito baixa, podendo tornar o cerra-chapas dispensável. Segundo Rodrigues et al, as variáveis processuais que mais contribuem para estas condições são a espessura da chapa, a relação de estampagem e as propriedades mecânicas do material. Neste sentido, optar pela aplicação do cerra-chapas dependerá de ensaios experimentais e/ou de simulações virtuais através da análise por elementos finitos.

Dependendo do sistema construtivo da ferramenta, existem vários tipos de cerra-chapas, em que se distinguem os fixos, os que são acionados pela ferramenta e os independentes. Os fixos podem ter a superfície direita quando interessa obter um aumento de espessura na aba, e para isso deve-se deixar uma folga entre a superfície do cerra-chapas e a superfície inicial do esboço. O valor dessa folga é crucial e muito difícil de calcular. Segundo Suchy, esse valor corresponderia a 25 a 50% da diferença entre o valor da espessura inicial da chapa e o da espessura estimada para a operação realizada sem cerra-chapas. A superfície cônica é utilizada para evitar o problema da folga, e tem a vantagem de aplicar uma força decrescente à medida que a aba escoo para o interior da matriz.

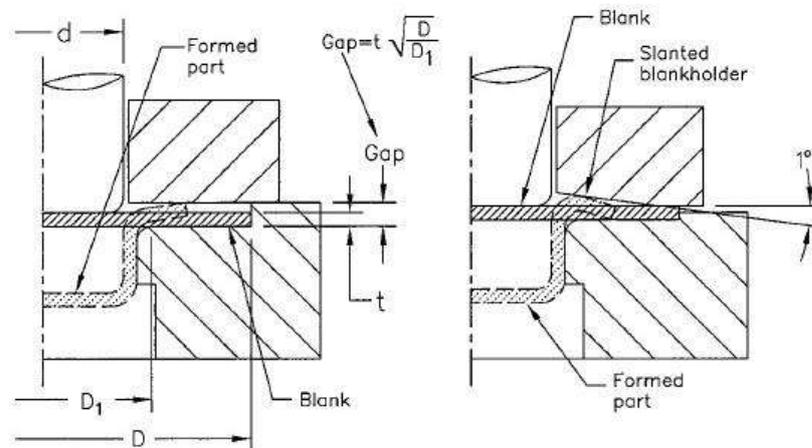


Figura 2.15 - Cerra-chapas com folga normal e angular.

Os cerra-chapas acionados pela ferramenta são utilizados para produções em série e, geralmente, são constituídos por sistemas de molas, de borrachas ou de cilindros a gás. Infelizmente têm a desvantagem de a força aumentar com o curso da ferramenta. Existem ainda cerra-chapas controlados por cames mas são muito difíceis de projetar.

Os cerra-chapas independentes são sistemas com acionamento hidráulico e são aplicados quando a prensa é de duplo ou triplo efeito.

A pressão nominal do cerra-chapas é vital para o correto controlo do escoamento da chapa para evitar o surgimento de problemas já mencionados neste capítulo. Vários autores referem que o valor, em geral, está entre os 0.5 e os 0.7% da soma do valor da tensão de cedência e o valor da tensão de rotura do material. Na tabela 2-4 são apresentados valores aproximados para materiais utilizados na estampagem.

Tabela 2-4 - Pressão nominal do cerra-chapas para diferentes tipos de material.

Material	Pressão do cerra-chapas (MPa)
Aço estampagem profunda	2.1 a 3.1
Aço com baixo teor em carbono	3.4
Alumínio e ligas de alumínio	0.8 a 1.4
Ligas especiais de alumínio	3.4
Aço inoxidável	2.1 a 5.2
Aço inoxidável austenítico	6.9
Cobre	1.2 a 1.7
Latão	1.4 a 2.1

2.1.6.5. FOLGA RADIAL ENTRE MATRIZ E PUNÇÃO

O valor da folga entre a matriz e o punção tem uma influencia significativa no processo de estampagem, na medida em que folga excessiva não permite contacto entre a chapa e as ferramentas ao mesmo tempo, fazendo com que o processo se altere provocando alongamento. Por outro lado, folga insuficiente promove o estiramento da chapa aumentando o risco de rotura e do desgaste das ferramentas.

Vários estudos foram realizados para determinar a folga radial ideal. Em geral, o valor recomendado para folga radial deve ser aproximadamente 40% superior à espessura da chapa

[Suchy, 1998]. A norma CSN 22 7301 sugere uma folga 20% superior à espessura da chapa. Oehler e Kaiser sugerem a seguinte expressão empírica para o cálculo da folga.

$$j = h_{m\acute{a}x} + k\sqrt{10h_0} \quad (2.13)$$

Em que $h_{m\acute{a}x}$ e h_0 são respetivamente a espessura máxima (considerando as tolerâncias dimensionais) e a espessura inicial da matéria-prima, e k um parâmetro que depende do material (0.07 para o aço, 0.04 para materiais não ferrosos e 0.02 para o alumínio) [Rodrigues et al, 2010].

Existem ainda os valores recomendados pela ASM (American Society for Metals) para a 1ª e para 2ª fase de estampagem, assim como para a fase de acabamento final (ver tabela 2-5).

Tabela 2-5 - Folga recomendada pela ASM entre punção e matriz em processos de estampagem [Rodrigues et al, 2010].

Espessura da chapa (mm)	Fator multiplicativo em função da espessura da chapa		
	1ª fase	2ª fase	Acabamento
< 0.4	1.07 a 1.09	1.08 a 1.10	1.04 a 1.05
0.4 < 1.3	1.08 a 1.10	1.09 a 1.12	1.05 a 1.06
1.3 < 3.2	1.10 a 1.12	1.12 a 1.14	1.07 a 1.09
> 3.2	1.12 a 1.14	1.14 a 1.20	1.08 1.10

2.1.6.6. RAIOS DE CONCORDÂNCIA DA MATRIZ E DO PUNÇÃO

Geralmente o raio de concordância da matriz deve ser elevado, porém, recomenda-se até certo limite pois a partir de certo valor aumenta a tendência de surgir enrugamento na aba. Os valores básicos recomendados para raios de concordância de punções e matrizes são:

- Primeira estampagem, $r_{cm} \approx (6 \text{ a } 10)h_0$
- Estampagens posteriores, $r_{cm} \approx (6 \text{ a } 8)h_0$

Os valores de raio de concordância do punção variam com o diâmetro do esboço (D_0) [Suchy, 1998]:

- Para $D_0 = 6 \text{ a } 25 \text{ mm}$, $r_{cp} \approx (3 \text{ a } 4)h_0$
- Para $D_0 = 25 \text{ a } 650 \text{ mm}$, $r_{cp} \approx (4 \text{ a } 5)h_0$
- Para $D_0 > 650 \text{ mm}$, $r_{cp} \approx (5 \text{ a } 7)h_0$

O valor do raio de concordância do punção é fortemente influenciado pela profundidade de estampagem, a relação de estampagem e o material. Não é necessário que o raio cubra os 90° de área do canto. Aceita-se uma variação desta zona (ver figura 2.16).

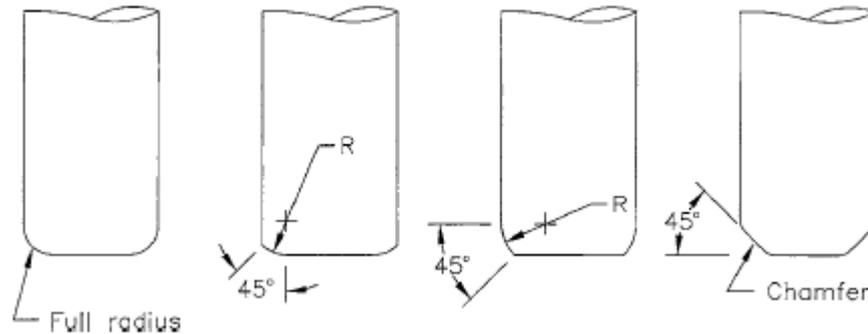


Figura 2.16 - Variação do raio de concordância do punção.

O raio de concordância da matriz tem influência direta na conformabilidade do material, e pode ser de maneira positiva ou negativa. Uma vez que o valor do raio é função da espessura da chapa, significa que para uma espessura reduzida, a influencia do raio diminui, pois haverá maior área superficial da chapa em contacto com o cerra-chapas.

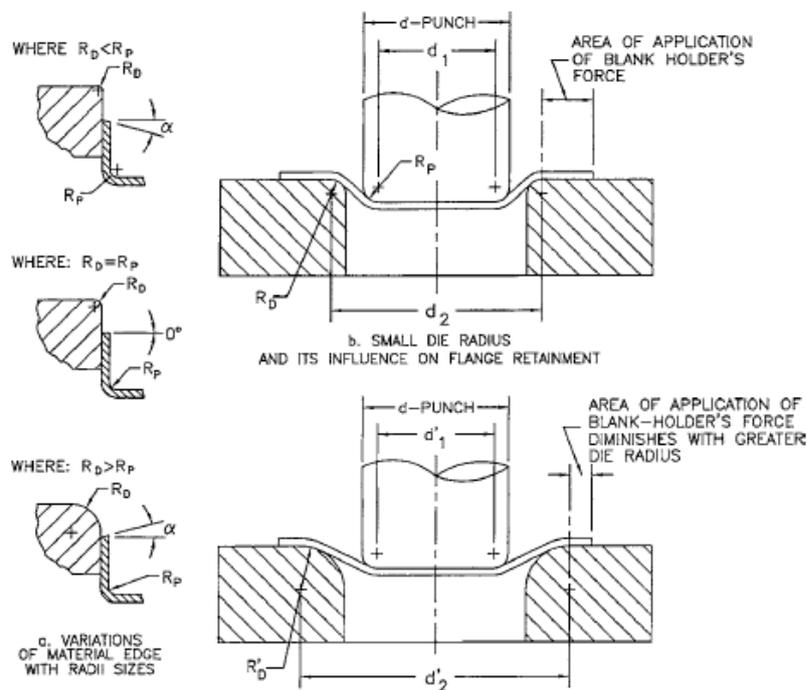


Figura 2.17 - Influência do valor do raio de concordância da matriz no escoamento da chapa.

Contudo, raios menores no canto da matriz dificultam o escoamento da matriz, promovem maiores variações da espessura da chapa e exigem maior força de estampagem, fazendo aumentar o consumo de energia.

2.1.6.7. OPERAÇÕES DE CORTE EM PEÇAS ESTAMPADAS

Existem várias maneiras de aparar uma peça estampada com ou sem aba. A técnica mais utilizada para aparar as bordas irregulares e contornos interiores é o *Pinch-Trimming* (ver figura 2.18).

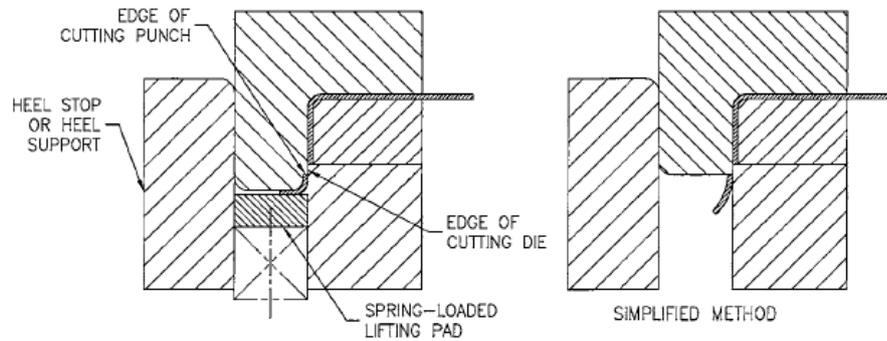


Figura 2.18 - Processo de corte da borda de peças estampadas ("*Pinch Trimming*").

Na figura 2.19 são apresentados os cálculos a ser usados quando se projeta a etapa de corte no processo de estampagem. Salienta-se que a secção de corte deve ser adicionada ao conjunto como um inserto separado que permita a afiação da aresta e substituição por desgaste.

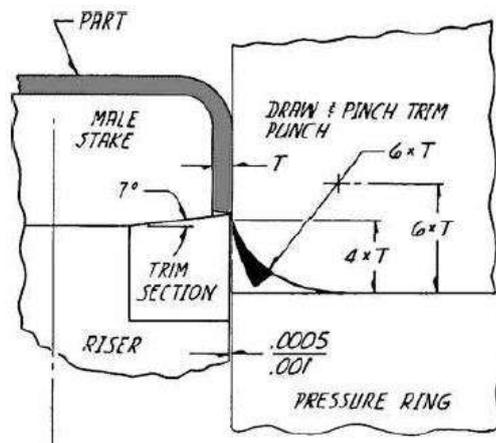


Figura 2.19 - Projeto de matriz para remover a borda irregular.

2.1.6.8. FUROS DE AR

Por vezes os punções possuem furos ou canais de ar para permitir eliminar o ar entre a base do punção e o fundo do estampado e assim evitar o aparecimento de defeitos na peça, e para introduzir ar quando o punção recua e assim evitar o surgimento de vácuo e facilitando

assim a sua saída. Com a formação de vácuo, a peça tende a colar-se ao punção no qual está enrolada e permanece retida pela força do vácuo.

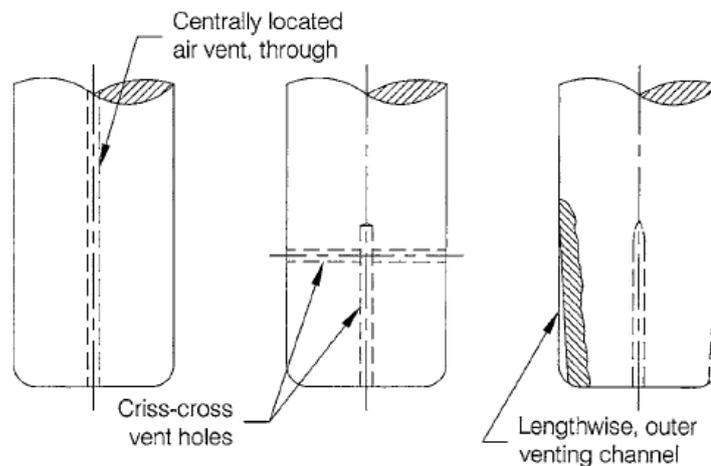


Figura 2.20 - Diferentes tipos de punções de estampar com furos de ar.

2.1.6.9. VELOCIDADE DE ESTAMPAGEM

A velocidade a que o punção se movimenta enquanto contacta com a chapa durante a estampagem denomina-se de velocidade de estampagem. Este é um parâmetro importante porque velocidades excessivas são muitas vezes prejudiciais ao processo. Materiais particularmente mais duros e menos dúcteis tendem a ser excessivamente alongados devido a velocidades excessivas. A tabela 2-6 apresenta as velocidades nominais de estampagem para alguns materiais [Rao, 1998].

Tabela 2-6 - Velocidade de estampagem para os diferentes tipos de materiais metálicos.

Material	Velocidade de estampagem [m/s]
Alumínio	0.90
Latão	1.00
Cobre	0.75
Aço	0.28
Zinco	0.75

2.1.7. FORÇA DE ESTAMPAGEM

As expressões que determinam a força ao longo do processo de estampagem são algo complexas devido à intervenção de variáveis difíceis de conhecer, como a tensão radial e o atrito por exemplo, e porque o valor da força varia de forma não linear, existindo diferentes

fases de comportamento ao longo do processo. Desta forma, alguns autores propõem expressões mais simples e menos rigorosas para o cálculo da força de estampagem. Romanowski propõe a seguinte equação para calcular a força máxima de estampagem [Rodrigues et al, 2010],

$$F_{m\acute{a}x} = 2\pi r_m h \sigma_R Q_f \quad (2.14)$$

em que:

- r_m é o raio médio da parede da taça;
- h a espessura da estampa;
- σ_R a tensão de rotura do material;
- Q_f um fator corretivo da tensão de rotura que depende da relação de estampagem (ver tabela 2-7).

Tabela 2-7 - Fator corretivo da tensão de rotura em função da relação de estampagem.

r_i/r_o	0.55	0.575	0.6	0.625	0.65	0.675	0.7	0.725	0.75	0.775	0.8
Q_f	1	0.93	0.86	0.79	0.72	0.66	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4

Por outro lado, na Schuler propõe-se que a força máxima de estampagem pode ser calculada pela seguinte expressão,

$$F_{m\acute{a}x} = \pi(d_p + h)h\sigma_R \left(1.2 \frac{m-1}{M_1-1}\right) \quad (2.15)$$

em que:

- d_p é o diâmetro do punção;
- h a espessura da estampa;
- σ_R a tensão de rotura do material;
- m a relação de estampagem da operação;
- M_1 o coeficiente limite de estampagem para a primeira fase.

Estas expressões fornecem um valor aproximado e são uma ajuda para um pré-estudo analítico. Para determinar um valor mais rigoroso será necessário recorrer a simulações virtuais como o MEF.

2.1.8. CÁLCULO DO DIÂMETRO DO ESBOÇO

Antes de iniciar as operações de embutidura, a forma e o tamanho do esboço devem ser determinados para obter a geometria da peça final desejada e o projeto da ferramenta de estampagem. Isto pode ser demonstrado através do exemplo de uma peça cilíndrica axissimétrica. No sentido de calcular o diâmetro do esboço, torna-se necessário dividir toda a peça axissimétrica em vários componentes individuais axissimétricos e então calcular as áreas superficiais destes componentes. A soma das áreas individuais (a área total da superfície) permite calcular o diâmetro do esboço [Heidelberg, 1998]. Este método permite obter apenas um valor aproximado do diâmetro do esboço, uma vez que devido ao estiramento sofrido pelo material durante o processo, há um excedente de material na borda superior da peça que pode ser calculado com exatidão.

Muitos fatores influenciam o processo de estampagem, tornando-o mais complexo do que qualquer outro processo de fabrico. O movimento da chapa, que pode provocar variação da espessura em várias secções, a possibilidade de trefilagem (*ironing*), a variação da altura, a anisotropia do material, são alguns fatores entre muitos que expõem a peça estampada a muitas influências tornando o resultado imprevisível.

De seguida é apresentado um exemplo do método de cálculo do diâmetro do esboço para um componente cilíndrico simples (ver figura 2.6), desprezando o raio de concordância no fundo da taça. Este princípio considera que a peça em bruto tem a mesma área superficial que a peça final [Rossi, 1972].

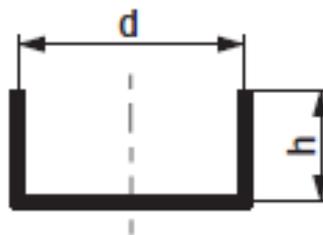


Figura 2.21 - Peça cilíndrica.

Considera-se D o diâmetro do esboço, d o diâmetro da linha média da peça (o cálculo do esboço não entra em linha de conta com a espessura da chapa) e a altura h .

A área superficial da estampa plana (S) é:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$

A área superficial da peça cilíndrica (S_p) é:

$$S_p = \frac{\pi d^2}{4} + \pi dh$$

Igualando as duas áreas obtém-se:

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi d^2}{4} + \pi dh$$

$$\pi D^2 = \pi d^2 + 4\pi dh$$

Simplificando:

$$D^2 = d^2 + 4dh$$

Por fim, o diâmetro do esboço de uma peça cilíndrica simples é igual a:

$$D = \sqrt{d^2 + 4dh} \quad (2.16)$$

Para peças com raio de concordância superior a 10 mm deve considerar-se a área superficial da zona do canto e, portanto, a expressão para calcular o diâmetro do esboço será diferente do exemplo mostrado.

Para consulta e apoio ao projeto apresenta-se no anexo A as equações correspondentes a uma variedade de formas geométricas de peças cilíndricas axissimétricas.

2.1.9. IRONING

Nas operações de estampagem de taças cilíndricas acontece, em geral, um aumento da espessura da parede na zona cilíndrica. Isto deve-se à redução de espessura na zona em contacto com o raio de canto do punção, fazendo com que o material se distribua para a zona em que existe folga entre o punção e a matriz. Por vezes, este fenómeno faz com que não se consiga cumprir com as tolerâncias dimensionais especificadas pelo cliente e, portanto, surge a necessidade de adicionar uma operação para correção da espessura da parede da taça.

Esta operação denomina-se '*Ironing*', e trata-se de um processo de trefilagem da zona cilíndrica com o objetivo de reduzir a espessura da parede, mantendo a dimensão interior da taça.

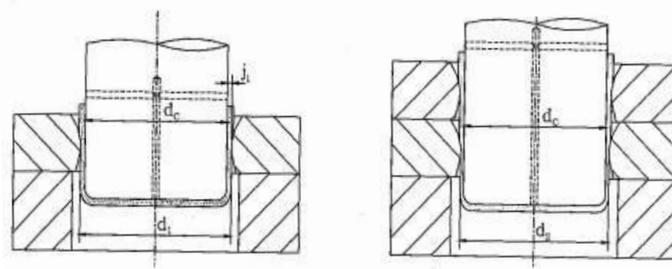


Figura 2.22 - Processos de *Ironing*.

A passagem sucessiva do pré-embutido pelas ferramentas de ‘ironing’ irá permitir reduzir e uniformizar igualmente a espessura da parede ao longo de toda a altura, mantendo, todavia, a espessura do fundo da taça.

Para planejar o fabrico por ‘ironing’ é necessário determinar o número de fases necessárias para alcançar a redução de espessura. O coeficiente de ‘ironing’, e_n , é um parâmetro que permite quantificar esse valor a partir da redução de espessura que a taça sofre entre fases, ou seja,

$$e_n = 1 - \frac{h_n}{h_{n-1}} \quad (2.17)$$

em que,

- h_n é a espessura da parede após a operação de ironing;
- h_{n-1} é a espessura da parede antes da operação de ironing.

Assim, o valor da redução de espessura entre duas fases seguidas de ironing estabelece-se de modo que o coeficiente de ironing não ultrapasse o valor limite admissível, o qual depende fundamentalmente do material. A tabela 2-8 fornece os valores para alguns materiais:

Tabela 2-8 - Coeficiente de Ironing em função do tipo de material.

Material	1ª fase	Fases seguintes
Aço macio	0.60-0.55	0.45-0.35
Aço meio duro	0.40-0.35	0.30-0.25
Alumínio	0.65-0.60	0.60-0.50

2.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS - MEF

É o método mais utilizado a nível industrial para resolver problemas complexos pois permite a otimização dos parâmetros que influenciam o sucesso de um processo tecnológico e, por isso, tornou-se indispensável na simulação do processo de estampagem de chapas metálicas.

Existem diferentes tipos de problemas conforme a complexidade de cada um. Estes podem ser do tipo linear quando é possível relacionar um carregamento e resposta através de uma relação linear, ou podem ser do tipo não-linear quando apresentam um ou mais tipos de não-linearidades. As não-linearidades estão relacionadas com o material, a geometria e as condições de fronteira, sendo, neste caso, necessário recorrer a métodos numéricos para a resolução do problema em questão. O processo de estampagem de chapas metálicas é um problema complexo que inclui não-linearidades, o que faz com que os algoritmos de resolução destes problemas sejam bastante robustos.

A descrição matemática da deformação plástica dos materiais metálicos é realizada através de sistemas de equações de derivadas parciais, e o método dos elementos finitos é utilizado para determinar soluções aproximadas destes sistemas. O MEF consiste na divisão do domínio de aplicação das equações de derivadas parciais em subdomínios de tamanho finito, denominados elementos. Cada um destes elementos é formado por nós [Zienkiewicz et al. 2005].

Na formulação de elementos finitos existem várias abordagens que dizem respeito ao tipo de elementos finitos a utilizar, à formulação mecânica das equações de movimento e à discretização temporal, e que serão descritas no presente capítulo.

2.2.1. FORMULAÇÃO MECÂNICA

Os sistemas de equações de derivadas parciais nos quais se constroem as formulações de elementos finitos caracterizam os equilíbrios quasi-estático ou dinâmico.

As formulações quasi-estáticas não têm em conta os efeitos da inércia e escrevem-se da seguinte forma abreviada,

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (2.18)$$

Aplicando a regra da derivada do produto à forma variacional fraca da equação 2.18 e o teorema da divergência obtém-se a expressão 2.19,

$$\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial(\delta u_i)}{\partial x_j} dV - \int_{S_T} t_i \delta u_i dS = 0 \quad (2.19)$$

Pelo contrário, as formulações de equilíbrio dinâmico já têm em conta os efeitos da inércia, como se verifica na expressão 2.20,

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \rho \ddot{u}_i = 0 \quad (2.20)$$

em que ρ é a densidade do material e \ddot{u} a aceleração.

Aplicando a mesma regra e teorema que na formulação quasi-estática obtém-se a expressão seguinte,

$$\int_V \rho \ddot{u}_i \delta u_i dV + \int_V \sigma_{ij} \frac{\partial(\delta u_i)}{\partial x_j} dV - \int_{S_T} t_i \delta u_i dS = 0 \quad (2.21)$$

A formulação quasi-estática é geralmente aplicada em problemas de deformação plástica de massa e de chapa, enquanto a formulação dinâmica é aplicada apenas em problemas de deformação plástica de chapa e problemas de impacto.

2.2.2. DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL

A discretização espacial da efetua-se subdividindo o volume de controlo V em M elementos finitos ligados entre si através de N pontos nodais. Para as formulações quasi-estáticas escreve-se na forma matricial condensada que se apresenta a seguir [Rodrigues et al, 2010],

$$\sum_{m=1}^M \{K^n u^n = F^n\} \quad (2.22)$$

em que K é a matriz rigidez e F o vetor de forças exteriores resultante de tensões aplicadas no corpo. O índice 'n' refere-se ao incremento de tempo.

De forma análoga, para as formulações dinâmicas, a discretização espacial pode ser descrita da seguinte forma,

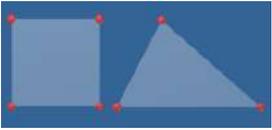
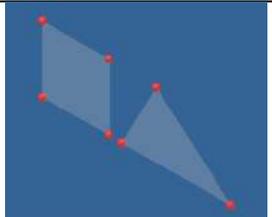
$$\sum_{m=1}^M \{M^n \ddot{u}^n + F_{int}^n = F^n\} \quad (2.23)$$

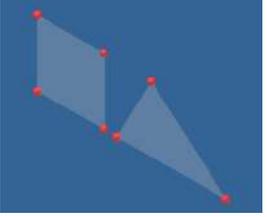
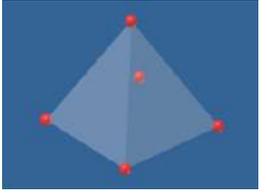
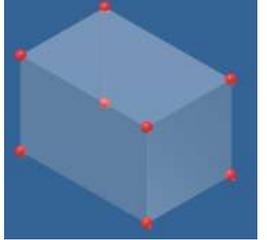
em que M representa a matriz de massas e $F_{int} = Ku$ representa o vetor de forças internas resultantes da rigidez da peça.

A discretização do corpo deformável é efetuada através do uso de elementos finitos, que podem ser do tipo sólido (tridimensionais) como os tetraédricos e os hexaédricos, ou bidimensionais como os elementos casca e membrana (ver tabela 2-9).

Cada tipo de elemento pode ser distinguido pelo tipo de deslocamento que pode realizar – linear ou parabólico. Os elementos lineares são caracterizados pelos deslocamentos seguirem uma função linear, ou seja, um polinómio de primeiro grau, e têm a vantagem de simplificarem o cálculo numérico e possuem menor peso na simulação computacional. Os elementos parabólicos são caracterizados pelos deslocamentos seguirem uma função quadrática, ou seja, um polinómio de segundo grau, e permitem obter resultados mais precisos e menor necessidade de refinação da malha. Contudo, tornam o cálculo numérico mais complexo e aumentam o peso na simulação computacional. Os elementos parabólicos possuem maior número de nós que os lineares.

Tabela 2-9 - Exemplos de tipos de elementos finitos utilizados na simulação de processos de conformação de chapa metálica.

Retangular e triangular		Elementos 2D com 2 graus de liberdade (translação em 2 eixos). São usados em análises de tensão e deformação planas. Normalmente aplicados em componentes cilíndricos axissimétricos como parafusos, arames, taças, mísseis e componentes com área de secção transversal constante, como uma barragem.
Membrana		Elementos 2D que podem ser orientados em qualquer lugar num espaço tridimensional. Usados para modelar membranas finas como materiais de tecido ou chapas metálicas finas.

Casca		Elementos 2D que podem ser orientados em qualquer lugar num espaço tridimensional. Usados para modelar carroçaria automóvel, cascos de navios e fuselagens de aeronaves.
Pirâmide de base quadrangular		Elementos 3D que apenas suportam graus de liberdade de translação. Normalmente usados para modelar objetos sólidos para os quais os elementos 2D não são aplicáveis.
Hexaédrico		Elementos 3D que apenas suportam graus de liberdade de translação. Normalmente usados para modelar objetos sólidos para os quais os elementos 2D não são aplicáveis. Funcionam muito bem para qualquer estrutura típica de peças maquinadas, forjadas ou fundidas.

2.2.3. DISCRETIZAÇÃO TEMPORAL

As formulações de elementos finitos podem ser resolvidas através de algoritmos de integração temporal explícitos ou implícitos.

O método explícito calcula o estado do sistema num incremento de tempo considerando apenas o estado do sistema no incremento anterior. Não aplica um procedimento de iteração e não garante o equilíbrio da peça em cada incremento de tempo.

Pelo contrário, no método implícito a solução para um dado instante é calculada tendo em conta o estado anterior e o atual do sistema, através de uma resolução iterativa controlada de modo a minimizar o resíduo de forças. O controlo do procedimento iterativo é efetuado através de critérios de convergência que garantem o equilíbrio da peça e possibilitam o avanço para o incremento seguinte.

3. ANÁLISE DO COMPONENTE

No presente capítulo é apresentada uma descrição do componente, onde se analisa a sua função principal, as especificações técnicas do produto e também se caracteriza quanto às suas dimensões e geometria.

Além disso, também é analisado o processo de fabrico para obtenção do produto final, que servirá de base para a análise numérica realizada posteriormente com o desenvolvimento do trabalho.

3.1. ESTUDO DE CASO

Diariamente, a ETMA recebe pedidos de análise de factibilidade e de orçamento para a produção de vários tipos de componentes metálicos, dos quais, menos de 5% acabam por se concretizar em negócio efetivo da empresa. Um dos tipos de componentes para os quais a empresa tem dificuldade em adjudicar são os que possuem forma cilíndrica, como as taças e panelas, devido à falta de experiência e conhecimento sobre o fabrico de componentes por estampagem profunda.

É neste contexto que surge a necessidade de realizar o estudo de caso da presente dissertação, a carcaça do solenóide de uma electroválvula direcional da *Argo Hytos* (ver figura 3.1).



Figura 3.1 - Componente em estudo, a) conjunto solenóide, b) carcaça e c) eletroválvula.

O conjunto electroválvula possui duas carcaças, em lados opostos (ver figura 3.1 a)), onde os solenóides inseridos no interior cumprem a sua função de alterar o fluxo da água dentro da válvula.

Foram obtidas umas amostras que serviram de apoio à presente análise para melhor compreensão da sua função principal e das especificações técnicas apresentadas a posterior no presente capítulo.

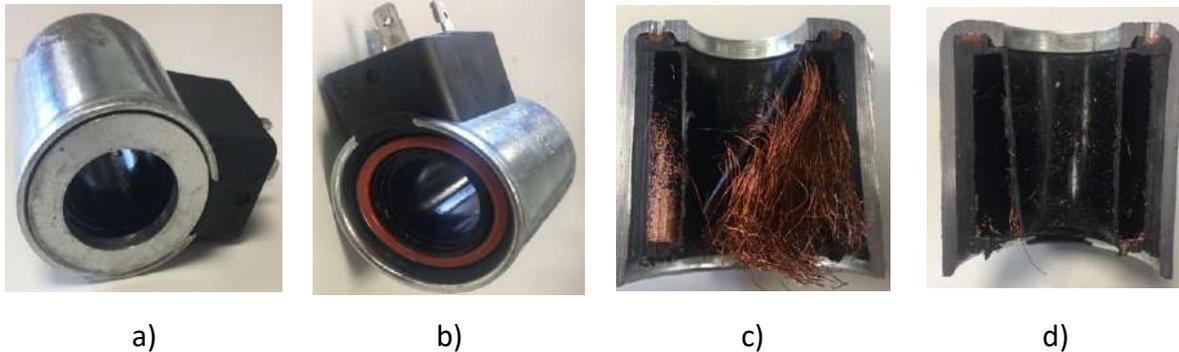


Figura 3.2 - Conjunto carcaça e solenóide. a) e b) Conjunto completo, c) e d) Secção transversal com e sem bobina.

Analisando a amostra ilustrada na figura 3.2, constata-se que a carcaça é um componente de aço galvanizado e que no seu interior está inserido um componente de plástico 'recheado' com filamentos de cobre que formam a bobina, ou seja, o solenóide (ver figura 3.2 c) e d)). No exterior tem a tampa e o vedante para ligação ao corpo principal da electroválvula (ver figura 3.2 a)), e os terminais elétricos dentro de um isolante de plástico (ver figura 3.2 b)). Desta forma, as funções principais da carcaça são as seguintes:

- Isolamento do solenóide e do seu campo magnético;
- Encastramento do solenóide no conjunto;
- Interligar o sistema à fonte elétrica através dos terminais elétricos encastrados no corpo.

Conclui-se facilmente que existem requisitos geométricos e dimensionais necessários para a o cumprimento das funções, nomeadamente no interior da carcaça relacionados com o diâmetro, a circularidade e a concentricidade, no sentido de facilitar o correto encastramento da peça de plástico e assim isolar o campo magnético criado pela bobina de cobre do fluido lubrificante do veio móvel.

3.2. ANALISE DIMENSIONAL E GEOMÉTRICA. FACTIBILIDADE.

Neste capítulo analisam-se os requisitos técnicos correspondentes às características geométricas e dimensionais indicadas no desenho técnico do componente (ver figura 3.3).

Desta forma pretende-se estudar a viabilidade do fabrico do produto e formar uma análise ao seu processo de fabrico.

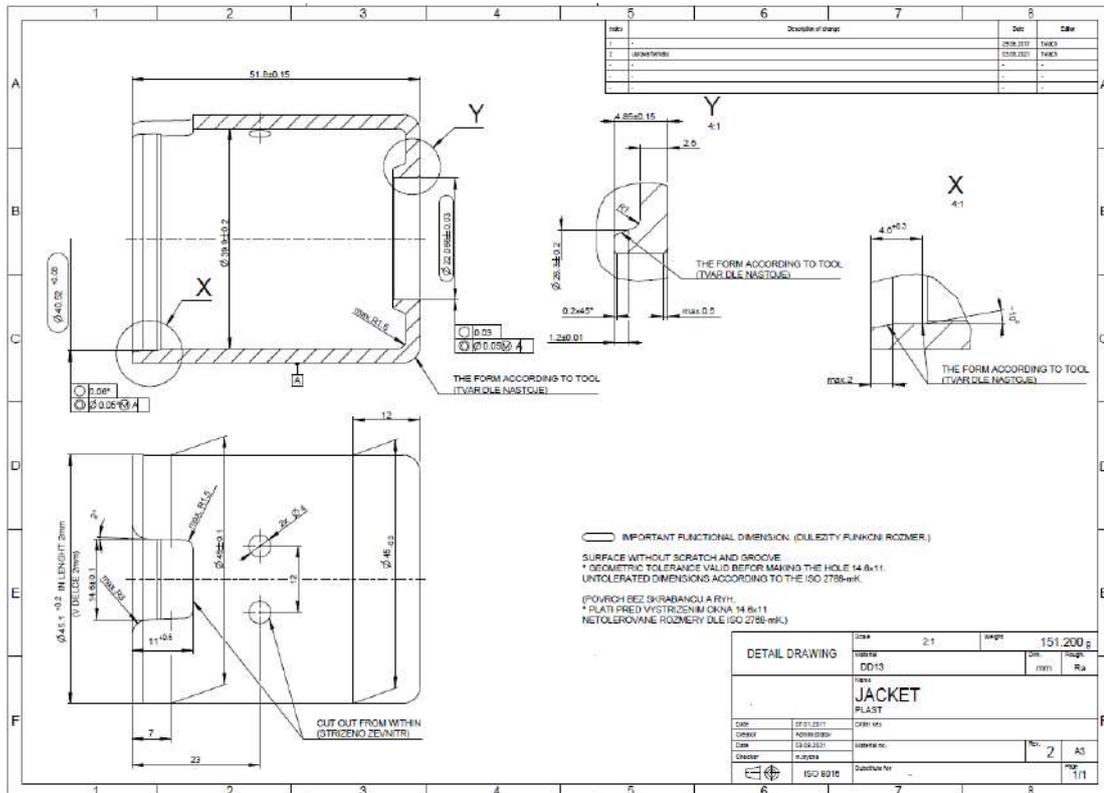


Figura 3.3 - Desenho técnico da carcaça.

Trata-se de uma peça cilíndrica com forma de taça, tipicamente fabricada por estampagem profunda, com dimensões gerais de 45 mm de diâmetro externo, 51.8 mm de altura e com espessura da chapa de 2.5 mm. Possui um furo circular repuxado de 22 mm diâmetro na base da taça com elevado rigor dimensional e geométrico, que é por onde passa o veio móvel da electroválvula.

Na parede da taça existem dois furos e um corte retangular, em que o material deverá ser removido no sentido transversal ao sentido de embutidura da taça.

Salienta-se o aumento de espessura da chapa na zona entre o raio interno e raio externo do furo repuxado e a diminuição da espessura na extremidade superior da taça, fazendo com que aumente o diâmetro interno nessa zona e permitindo a fixação da tampa (ver figura 3.2 a)). Estas são consideradas dimensões funcionais importantes.

O material é o DD13 EN 10111, um aço laminado a quente, geralmente usado nos processos de estampagem profunda.

Análise de factibilidade

Para analisar a factibilidade da peça, deve-se ter atenção às características especiais, principalmente as que influenciam o processo de fabrico. Para o estudo de caso começa-se pelos diâmetros funcionais da peça (ver figura 3.4).

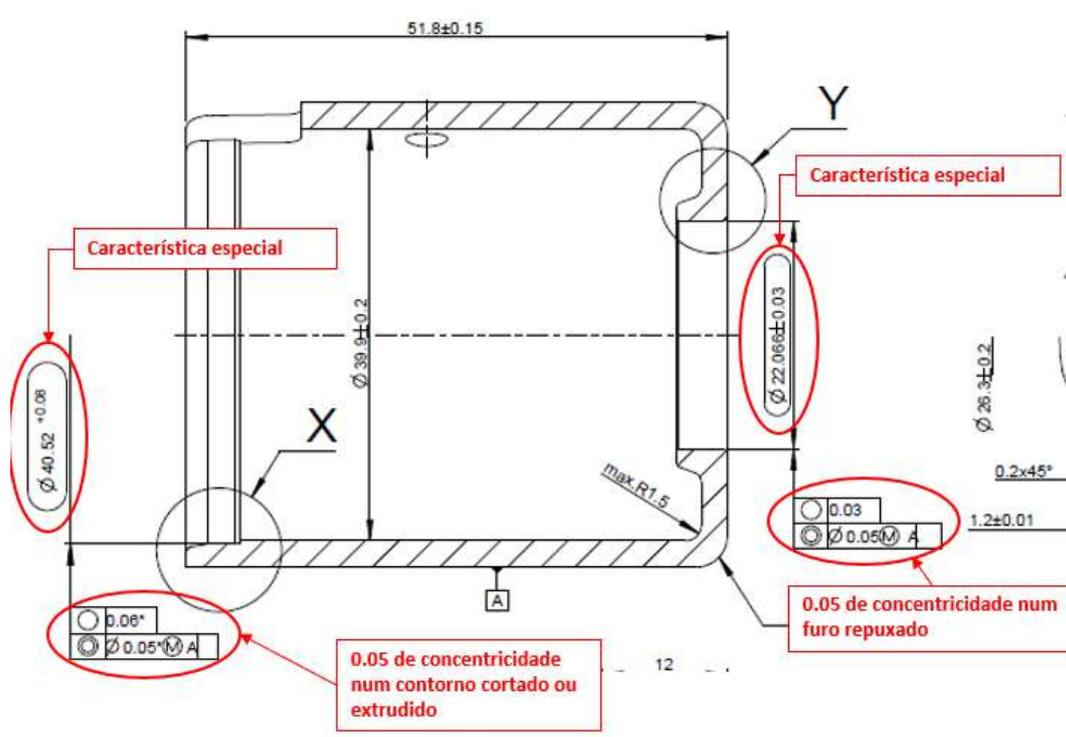


Figura 3.4 - Características especiais.

As tolerâncias ± 0.03 e $+0.08$ são características especiais devido ao rigor dimensional e geométrico, e por corresponderem às dimensões funcionais do componente. A tolerância geométrica de concentricidade de 0.05 mm num furo repuxado e num contorno que deve ser extrudido (ou cortado) gera muitas dúvidas devido à referência A. No furo repuxado verifica-se um aumento da espessura da chapa, que obriga a adicionar um processo de forjamento que obrigue o material a obter essa forma após repuxar o furo, enquanto na extremidade superior requer um processo de extrusão ou corte de forma a garantir a concentricidade de 0.05. A referência A gera dúvidas quanto à sua relevância para a função do componente, pois como se viu nas figuras 3.2 a carcaça não contacta com nenhum outro componente pelo lado exterior. O toleranciamento do diâmetro externo e interno é contraditório, pois como se viu no capítulo 2, no processo de estampagem de taças cilíndricas é impossível evitar a variação da espessura da chapa ao longo da parede, pois na zona do raio de canto haverá redução de espessura e esta aumentará ao longo da parede, o que torna muito difícil controlar os dois

diâmetros através deste processo. Além disso, o diâmetro externo tem dois toleranciamentos dimensionais (ver figura 3.2) e o seu valor aumenta na extremidade para $45.1^{+0.02}$ mm.

As furações na parede da taça merecem particular atenção pelo requisito indicado no desenho (ver figura 3.5).

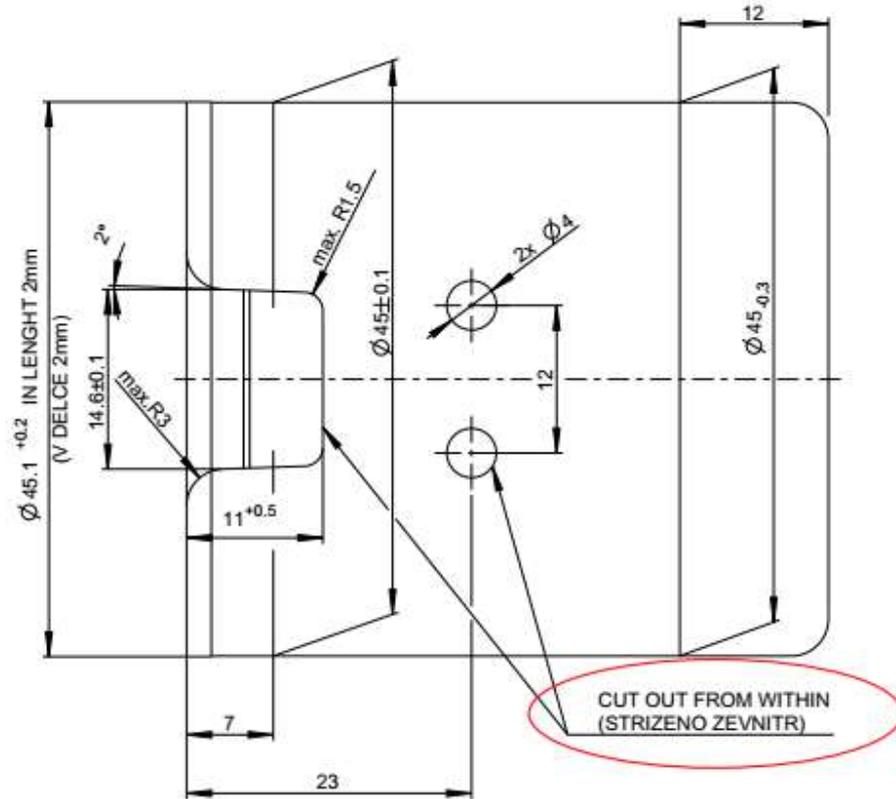


Figura 3.5 - Especificação para as furações na parede da taça.

No desenho vem especificado que o corte deve ser no sentido de dentro para fora da peça, o que significa que é exigido que a rebarba que surge no lado contrário da chapa ao que penetra o punção no corte por arrombamento [Suchy, 2010] não se encontre do lado interior da taça. Este requisito é aceitável porque a existência de rebarbas de corte no interior da peça vai dificultar e impedir o correto encastramento da peça de plástico que carrega a bobina. Sendo assim, a etapa de corte por arrombamento dos contornos laterais exige um sistema mais complexo do que seria se o corte se realizasse no sentido exterior para o interior.

No detalhe Y existe informação relevante para a factibilidade da peça (ver figura 3.6), pois trata-se do furo repuxado, uma zona funcional da peça.

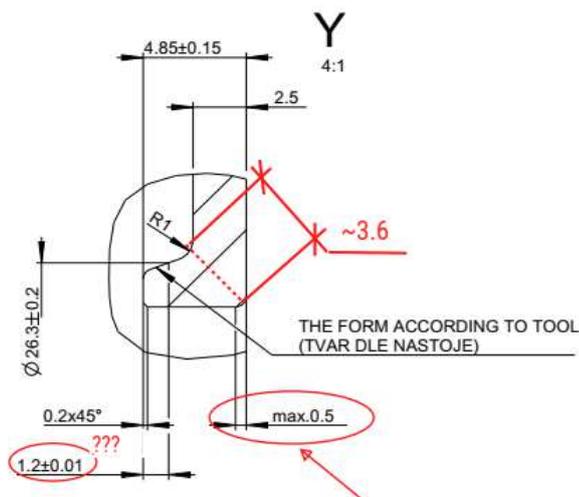


Figura 3.6 - Detalhe Y

O requisito de chanfro com valor máximo de 0.5 mm é de elevado rigor devido ao risco de não possuir material suficiente do processo de estampagem para cumprir a especificação. Neste caso em particular deve-se dimensionar corretamente o diâmetro do pré-furo necessário para o repuxamento, de forma a obter o material necessário para forjar a zona pretendida e cumprir com o requisito de aumento de espessura para 3.6 mm e o raio interno de 1 mm. Quanto à cota 1.2 ± 0.01 mm não se entende qual a sua funcionalidade, e gera muitas dúvidas quanto à forma de a controlar por medição.

Quanto a revestimentos, tratamento térmico ou rugosidade não existe qualquer informação no desenho (ver figura 3.7), apenas que a superfície não possua marcas de apanha ou outras irregularidades.

○ IMPORTANT FUNCTIONAL DIMENSION. (DULEZITÝ FUNKCNI ROZMER.)

SURFACE WITHOUT SCRATCH AND GROOVE.
 * GEOMETRIC TOLERANCE VALID BEFORE MAKING THE HOLE 14.6x11.
 UNTOLERATED DIMENSIONS ACCORDING TO THE ISO 2768-mK.

(POVRCH BEZ SKRABANCU A RYH.
 * PLATI PRED VYSTRIZENIM OKNA 14.6x11
 NETOLEROVANE ROZMERY DLE ISO 2768-mK.)

DETAIL DRAWING		Scale	2:1	Weight	151.200 g
		Material	DD13	Dim.	mm
		Rough.		Ra	
		Name	JACKET PLAST		
Date	27.01.2017	Order key			
Creator	Administrator				
Date	03.08.2021	Material no.	Rev.	2	A3
Checker	m.tyžna	Substitute for			
ISO 8015				Page	1/1

Figura 3.7 - Legenda do desenho técnico.

Da análise das amostras conclui-se que o material é um aço pré-galvanizado e que a rugosidade superficial não é uma característica importante para a funcionalidade do componente.

A presente análise de factibilidade serve de apoio à análise ao processo de fabrico necessário para a obtenção da peça final apresentada no capítulo seguinte.

3.3. ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICO.

Feita a análise de factibilidade do componente, passa a ser possível avaliar o método de fabrico do componente em estudo. Como já foi mencionado na introdução do presente capítulo, o componente deve ser fabricado por estampagem profunda para obtenção da forma cilíndrica. Posteriormente são necessários diferentes processos para obter a forma da peça final. A execução de todos os processos sequencialmente será feita de forma progressiva por etapas na mesma máquina, que para este caso a mais indicada é uma prensa. As prensas recomendadas para este tipo de processo são as hidráulicas [Schuler, 1998] por possuírem a capacidade de controlar a força de estampagem aplicada ao longo de todo o processo. A ferramenta recomendada será do tipo Transfer por possuir a vantagem de criarem menor percentagem de sucata [Nunes, 2020].

A análise ao processo de fabrico pode ser dividida em três partes em função da forma geométrica obtida em cada uma e ao tipo de processo necessário. Assim, a primeira corresponde à obtenção da forma em taça cilíndrica, que deve ser obtida por estampagem profunda (ver figura 3.8 a)). A segunda corresponde ao corte do pré furo no fundo da taça para conformação do furo repuxado e posterior forjamento da extremidade superior para aumentar o diâmetro (ver figura 3.8 b)). Finalmente a peça final é obtida através do corte dos furos da parede da taça (ver figura 3.8 c)).

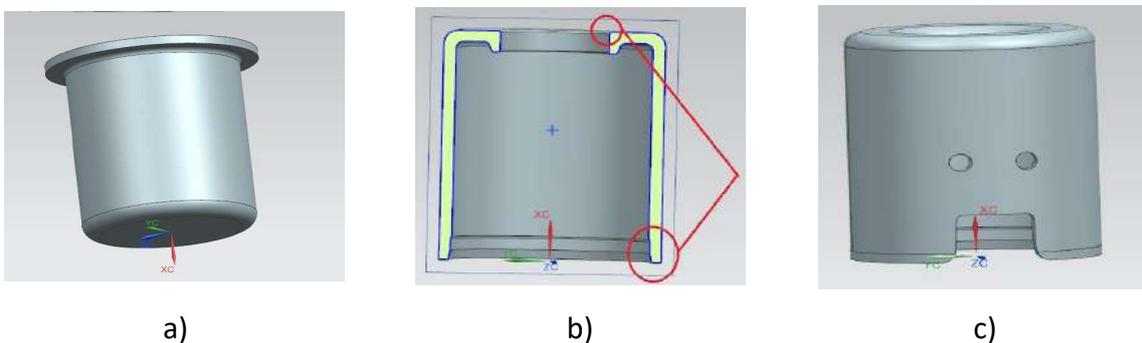


Figura 3.8 - A forma geométrica da peça após cada fase: a) estampagem, b) forjamento e extrusão e c) cortes dos furos laterais.

Para o desenvolvimento do presente estudo apenas interessa analisar os processos correspondentes às figuras a) e b), nas quais se analisará a influencia da simulação numérica.

Estampagem da taça cilíndrica

O processo de estampagem profunda deve ser corretamente analisado de forma a escolher o número correto de etapas necessárias para obtenção do estampado, o dimensionamento das ferramentas e a introdução de uma etapa de Ironing se necessário. Um projeto mal analisado aumenta as probabilidades de realizar mais *Try-outs* e de correção de ferramentas, aumentando os custos do processo. Neste sentido, este processo tem grande importância no estudo pelo MEF a desenvolver na presente dissertação.

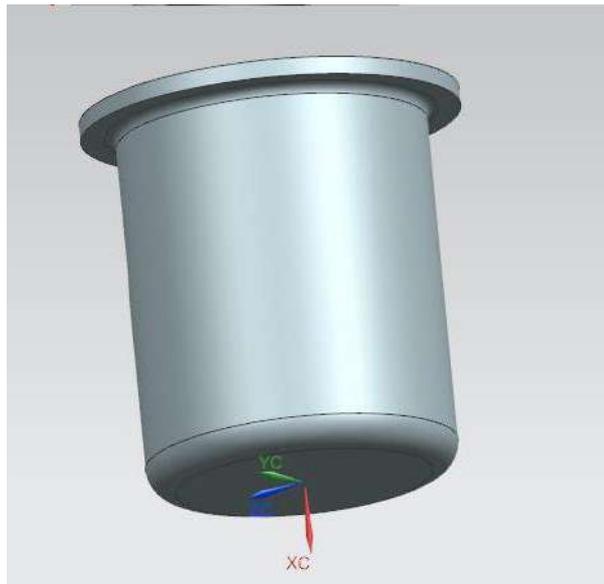


Figura 3.9 - Modelação 3D da taça cilíndrica após processo de estampagem.

O procedimento para análise do processo por estampagem profunda é apresentado no fluxograma da figura 3.10. Este começa com o pedido de um projeto novo para fabrico de determinada peça, de seguida analisam-se os dados de input necessários para iniciar o estudo, que dizem respeito à geometria da peça, as propriedades do material e ao processo de estampagem. A partir dos dados da geometria da peça determina-se a geometria da estampa plana, enquanto a partir dos restantes dados determina-se o processo de estampagem em si, no qual se define se se executa por uma ou mais etapas.

Depois, com os dados obtidos na simulação determina-se a necessidade de adicionar etapas de Ironing. Caso seja necessário, realiza-se o estudo e uma nova simulação, caso contrário, passa-se diretamente à fase final de análise de resultados: a força de estampagem, deformações, dimensões e variação da espessura.

Utilização de ferramentas CAE no projeto do fabrico de um estampado profundo metálico

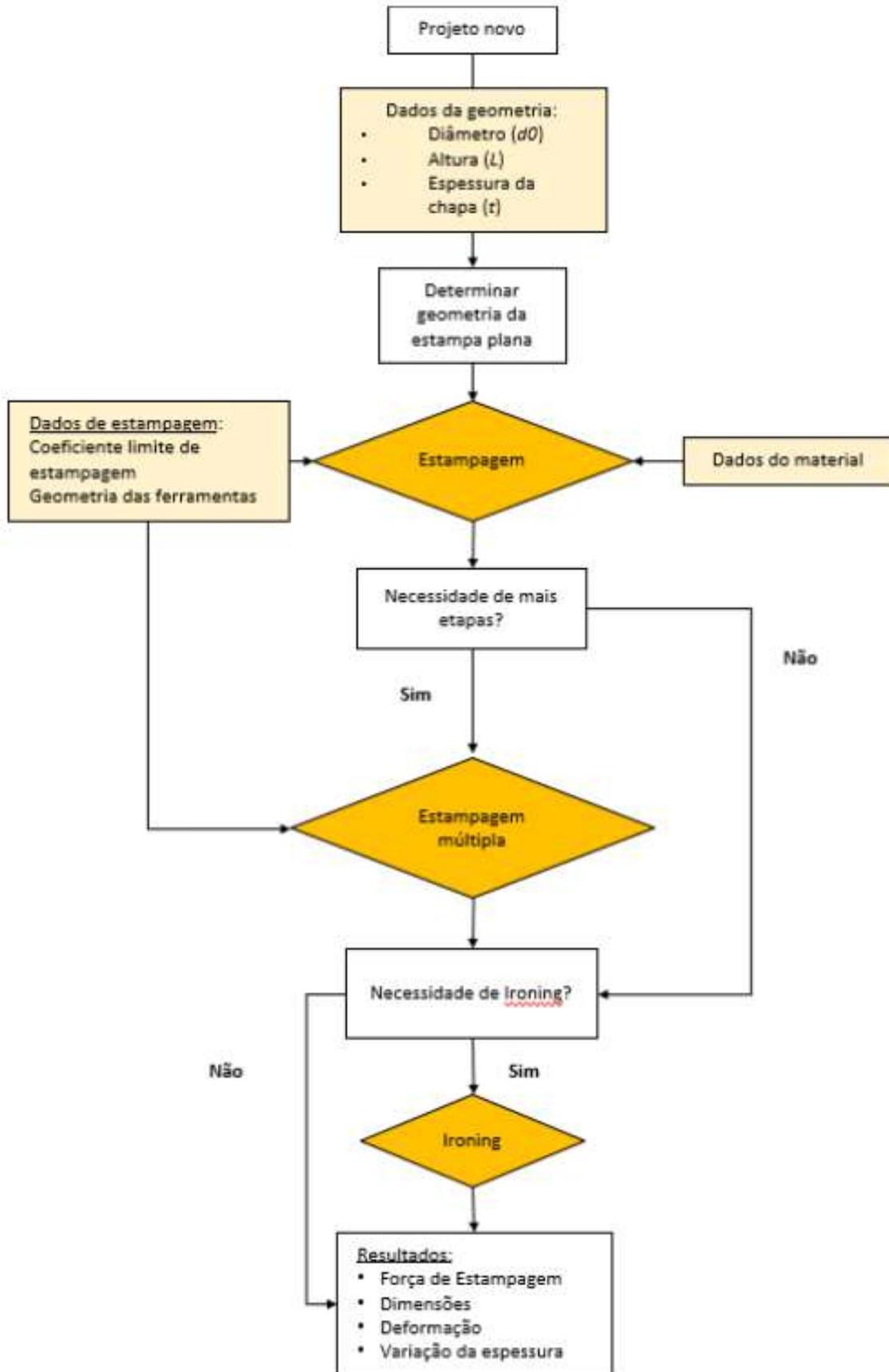


Figura 3.10 - Fluxograma para procedimento de análise de processo de estampagem profunda.

Forjamento nas extremidades

Este é a fase mais delicada do processo de conformação da peça final devido às deformações e especificações requeridas no desenho técnico. De facto, no capítulo 3.2 referenciou-se que o diâmetro do furo repuxado e do extremo superior da peça são características especiais devido a serem dimensões funcionais da peça.

Quanto ao furo repuxado é necessário fazer um pré-furo através de corte por arrombamento (ver figura 3.11 a)), seguido do repuxamento (ver figura 3.11 b)) em que se deve deformar o material suficiente para depois se forjar e obter a forma final pretendida (ver figura 3.11 c)).

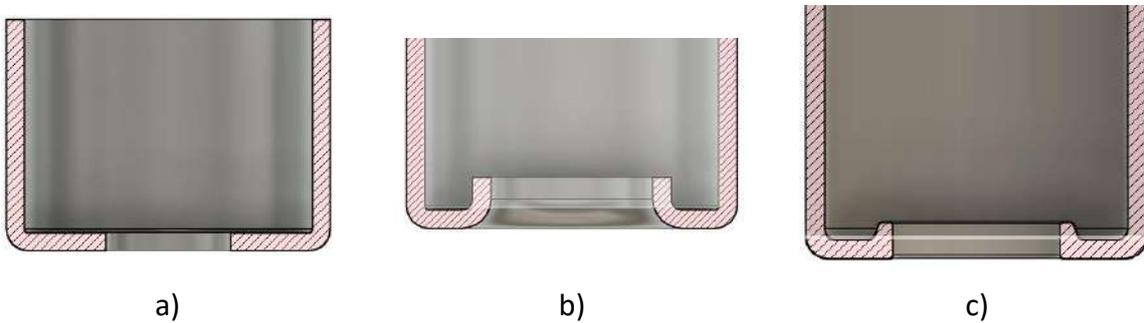


Figura 3.11 - Processo de forjamento de furo repuxado.

Para a conformação deste furo serão necessárias três etapas no mínimo, como se verifica na figura 3.11. A conformação da extremidade superior terá de ser realizada através de forjamento, em que se forçará a peça entrar entre um punção e matriz que promoverão a deformação necessária para aumentar o diâmetro interno e o externo e reduzir a espessura também.



Figura 3.12 - Deformação obtida na extremidade superior através de forjamento.

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

No presente capítulo apresenta-se o trabalho desenvolvido sobre a simulação numérica pelo método dos elementos finitos, que consiste no estudo dos dados de pré e pós-processamento, e divide-se nas seguintes etapas: caracterização do material, discretização espacial e temporal, convergência de malha, influencia de parâmetros, definição de geometria das ferramentas e análise de resultados.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.

Os dados relativos às propriedades mecânicas do material são dos parâmetros mais importantes e mais influentes em qualquer análise pelo método dos elementos finitos de qualquer processo de conformação. A margem de erro é muito pequena e uma pequena diferença no valor do coeficiente de anisotropia ou dos parâmetros de encruamento entre a mesma matéria-prima, mas lotes diferentes é o suficiente para obter resultados não conforme com as simulações.

A obtenção dos diagramas limite de embutidura e dos valores de outros parâmetros é conseguida através de ensaios experimentais, que têm um custo significativo que pode ser incomportável ou injustificável para a maioria das pequenas e médias empresas. Geralmente, quando não se possui dados, recorre-se a estudos académicos sobre determinado material ou o equivalente, ou caso a empresa possua software de simulação comercial, estes possuem dados genéricos de propriedades dos materiais.

Para a realização do presente estudo, a ETMA forneceu os dados sobre as propriedades mecânicas do aço DD13, obtidos de uma licença comercial do software de simulação de processos de estampagem, o *Autoform R10*, que já não possuía pela altura em que se realizou a dissertação. Contudo, esses dados permitem caracterizar o material e ser usados como input no solver utilizado, o DD3IMP.

Desta forma, a informação relativa às propriedades mecânicas e plásticas do aço DD13 (Fonte: *Autoform R10*), aço laminado a quente e comumente utilizado em processos de estampagem, são apresentadas nas tabelas de 4-1 a 4-4.

Tabela 4-1 - Informação geral

Designação	DD13
Norma	EN 10111:2008
Designação Internacional	Hot Rolled Mild Steel

Tabela 4-2 - Propriedades básicas.

Módulo de Young	210 GPa
Coefficiente de Poisson	0.30
Peso específico	7.68e-5 MPa/mm

As propriedades mecânicas básicas são típicas dos aços comuns. Quanto ao critério de plasticidade, segue o modelo BBC 2005 e os parâmetros de anisotropia são apresentados na tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Superfície de cedência.

Critério de Plasticidade	BBC 2005
r_0	0.95
r_{45}	1.04
r_{90}	0.95
σ_0	255.8 MPa
σ_{45}	250.1 MPa
σ_{90}	255.8 MPa
r_b	1
r_m	0.995

Verifica-se que os valores dos coeficientes de anisotropia são muito próximos de 1, tal como não se constata diferenças significativas no valor da tensão de cedência a 0, a 45 e 90 graus com a direção de laminagem. Como indicado na tabela 2-2, apesar do material possuir alguma anisotropia, como o valor dos coeficientes de anisotropia é muito próximo de 1, simplifica-se a caracterização do material considerando-o como isotrópico, pois não influenciará significativamente os resultados.

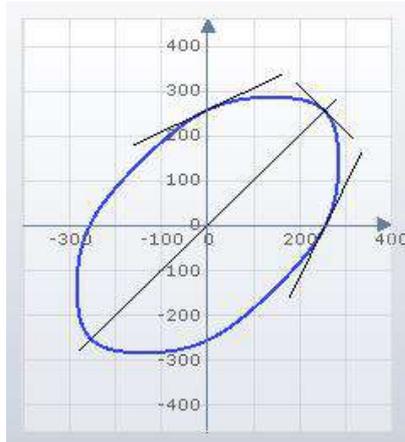


Figura 4.1 - Representação gráfica das superfícies limites de elasticidade no espaço tridimensional das tensões principais.

O solver DD3IMP não possui a equação correspondente ao critério de plasticidade BBC 2005, contudo, tem disponível o critério Hill 1948 (ver equação 2.7) que é amplamente aceite e aplicável para o processo de estampagem de chapas metálicas. Assim sendo, os coeficientes de anisotropia passam a ter valor igual a 1, e os parâmetros de anisotropia de Hill 1948 têm os seguintes valores correspondentes à definição de isotropia do material de Von Mises:

$$F = G = H = N = 0.5$$

$$M = L = 1.5$$

Quanto à lei de evolução de plasticidade, a indicada é a Swift/Hockett-Sherby, e os respetivos parâmetros e coeficientes apresentam-se na tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Curva de encruamento

Lei de evolução	Swift/Hockett-Sherby
ϵ_0	0.00891
n	0.173
K	579.5 MPa
σ_i	255.8 MPa
σ_{sat}	441.7 MPa
A	10.7
P	0.879
α	0.25

O solver DD3IMP também não possui a lei Swift/Hockett-Sherby, mas utiliza a lei de Swift, e segundo a equação 2.10, utiliza os parâmetros ϵ_0 , n e K , tal como a primeira. Analisando o trabalho desenvolvido por Gonoring et al, 2019, pode-se utilizar os mesmos valores para o uso da lei de Swift, que correspondem aos indicados na tabela 4-4.

A figura 4.2 apresenta o gráfico com a curva limite de estampagem do aço DD13.

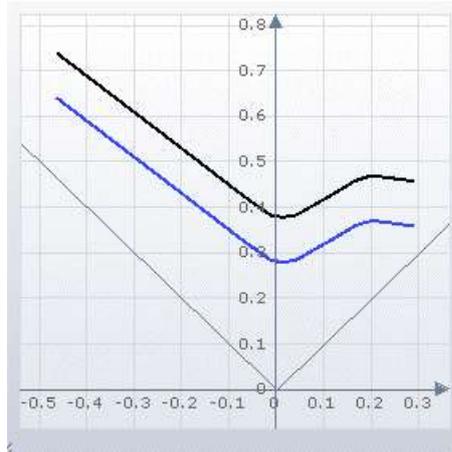


Figura 4.2 - Curva limite de estampagem (Autoform R10).

4.2. DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL.

Concluída a análise do material pode-se iniciar a análise para discretização espacial do problema, onde se determinam as condições de fronteira e o tipo de elemento finito. Para o problema em estudo existem duas condições determinantes para a presente análise, as propriedades de anisotropia do material e a geometria da peça. Considera-se o material como isotrópico (ver capítulo 4.1), ou seja, a resposta a qualquer sollicitação é indiferente a qualquer que seja a direção na qual é deformado, e a geometria da peça final (exceto os cortes laterais) é do tipo axissimétrica (ver figura 4.3).

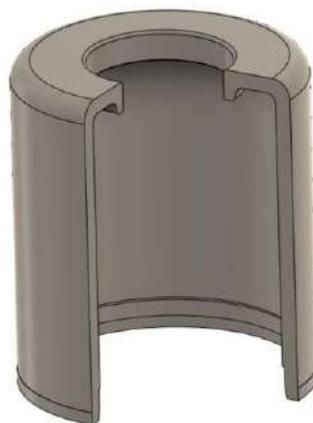


Figura 4.3 - Axissimetria da peça.

Isto significa que não existe variação da secção transversal ao longo do perímetro da peça. Juntando esta característica à isotropia do material, o problema pode ser resolvido com elementos finitos 2D axissimétricos (ver tabela 2-9). A principal vantagem do uso deste tipo de elemento, em comparação com os 3D, é o menor peso de computação necessário devido a menor número de nós, e desta forma, maior velocidade de resolução do problema. Possibilita, ainda, uma muito melhor definição por via de um maior refinamento da malha na secção 2D do embutido.

Assim sendo, podem se utilizar elementos finitos parabólicos com maior número de nós para obtenção maior precisão de resultados (ver capítulo 2.2.2), os retangulares de 9 nós (Qua9).



Figura 4.4 - Malha de elementos finitos.

A malha de elementos finitos tem a forma da secção transversal de uma chapa planificada com forma circular, e terá o comprimento igual ao valor do raio desse planificado e largura igual à espessura da chapa.

Para determinar o número de total de elementos finitos necessário para execução da simulação deve-se realizar um estudo de convergência de malha. Este consiste em realizar várias simulações de teste do processo em que varia o número de elementos até se verificar que um determinado parâmetro de saída (força de estampagem por exemplo) deixa de variar. Para o caso em estudo, primeiro realizaram-se simulações com 2 elementos finitos na largura e altera-se o valor no comprimento e, de seguida fixa-se o valor convergente e altera-se o valor na largura.



Figura 4.5 - Estudo de convergência de malha.

Os resultados são apresentados nos gráficos das figuras 4.6 e 4.7.

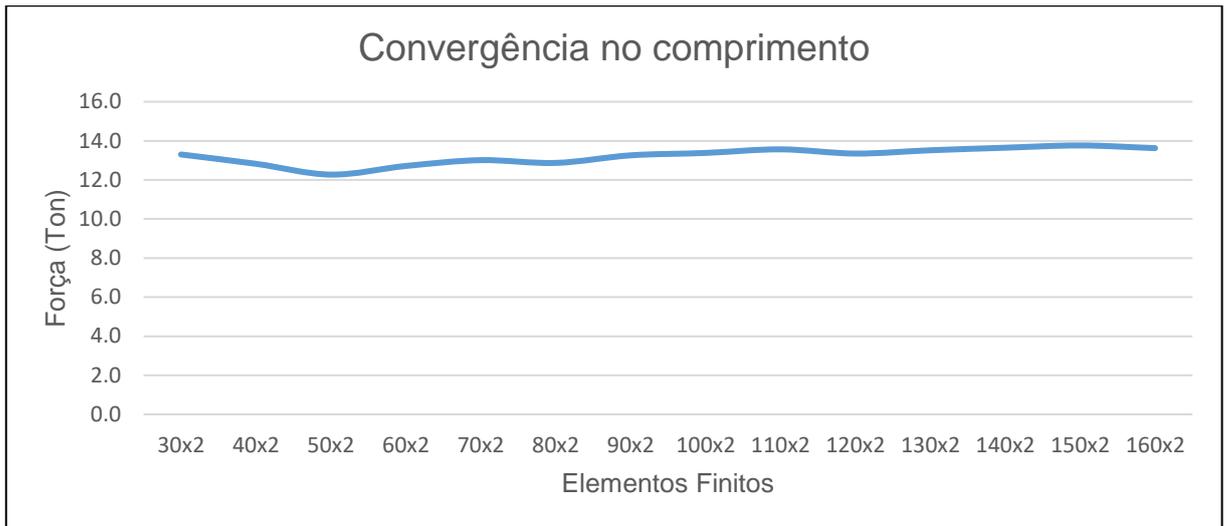


Figura 4.6 - Gráfico de convergência da força de estampagem em função do nº de elementos finitos no comprimento da malha.

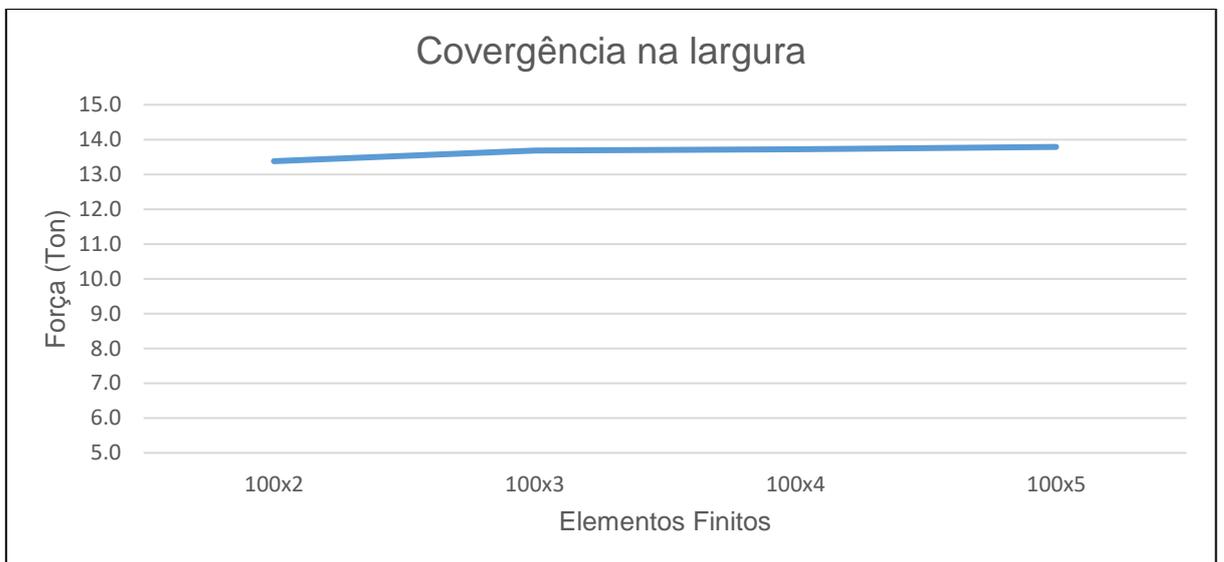


Figura 4.7 - Gráfico de convergência da força de estampagem em função do nº de elementos finitos na largura da malha

Analisando os gráficos verifica-se que o valor da força de estampagem converge quando a malha de elementos finitos possui 100 e 3 elementos no comprimento e largura, respetivamente.

4.3. DISCRETIZAÇÃO TEMPORAL.

O solver DD3IMP utiliza o algoritmo de integração temporal implícito, que como se explica no capítulo 2.2.3, é o mais indicado para a simulação de processos de conformação plástica de chapa.

4.4. GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS.

Para a realização do estudo e determinação da geometria das ferramentas, serve de apoio o conteúdo descrito no capítulo 2.1.6. A simulação consiste aplicar uma deformação na malha de elementos finitos através da intervenção das ferramentas necessárias para execução dos processos de estampagem da taça cilíndrica, o forjamento do furo repuxado e da aresta na parte superior. As ferramentas são também modeladas por elementos finitos, sendo só aplicável às superfícies em contacto com a chapa (malha) a ser deformada.

Estampagem

Os parâmetros mais importantes a determinar são o diâmetro do esboço, o número de etapas estampagem, o raio de concordância do punção e da matriz e a folga entre estes dois.

Para o cálculo do diâmetro do esboço serve de apoio a equação 2 da tabela A.1 do anexo A, na qual se substituem os respetivos valores de cada parâmetro:

$$d = 42.5 \text{ mm}$$

$$h = 51.8 \text{ mm}$$

$$r = 2.75 \text{ mm}$$

O cálculo não entra em linha de conta com a espessura da chapa e considera que as dimensões indicadas correspondem às dimensões da linha média da peça, de acordo com o desenho técnico da figura 3.3. Desta forma, o diâmetro do esboço é igual a:

$$D_0 = \sqrt{42.5^2 + 4 \cdot 42.5 \cdot 51.8 - 2.75} = 103 \text{ mm}$$

A determinação do número de etapas necessárias para estampar a taça realiza-se através do coeficiente limite de estampagem (M), cujo valor se retira da tabela 2-1 para um aço de estampagem profunda. No sentido de realizar o processo no menor número de etapas, escolheu-se o valor menos conservador para cada intervalo de valores de coeficiente limite de estampagem:

$$1^{\text{a}} \text{ Etapa} \rightarrow M_1 = 0.55$$

$$\text{Etapas seguintes} \rightarrow M_2 = 0.75$$

Resolvendo a equação 2.1 em ordem a d_i , para cada etapa multiplica-se o diâmetro inicial pelo respetivo coeficiente limite de estampagem até que o valor seja igual ou inferior ao diâmetro da peça final (da linha média).

$$d_i = M_i \times D_0$$

$$d_1 = 56.65 \text{ mm}$$

$$d_2 = 42.46 \text{ mm}$$

Como 42.46 mm é inferior a 42.50 mm, então foi atingido o valor do diâmetro final pretendido e, desta forma, serão necessárias 2 etapas de estampagem profunda.

Para determinar qual o valor mais indicado para o raio de concordância da matriz, r_{cm} , realizou-se um estudo para avaliar a influencia deste valor na força de estampagem e na espessura da parede da malha, que consistiu em simular com diferentes valores de raio. No capítulo 2.1.6.6. diz que o valor recomendado na primeira etapa é função da espessura do material, t , entre seis e 10 vezes esse valor. As simulações verificaram a influencia na força de estampagem e na espessura final da parede da taça (tabela 4-5).

Tabela 4-5 - Influência do raio de concordância da matriz na força de estampagem e na espessura final da parede da taça.

Coeficiente	r_{cm} (mm)	Força (Ton)	Espessura (mm)
6	15	11.7	2.80
7	17.5	11.2	2.82
8	20	10.9	2.83

Com o aumento do valor do raio de concordância da matriz diminui o valor da força de estampagem e aumenta a espessura final da parede da chapa. Apesar de o raio igual a 20 exigir menor energia, e como não se verificam diferenças significativas, escolheu-se o valor de raio igual a 15 mm para aumentar a área de contacto entre o esboço, a zona plana da matriz e o cerra-chapas, o que não aconteceria com raio de 20 mm (ver figura 4.8).

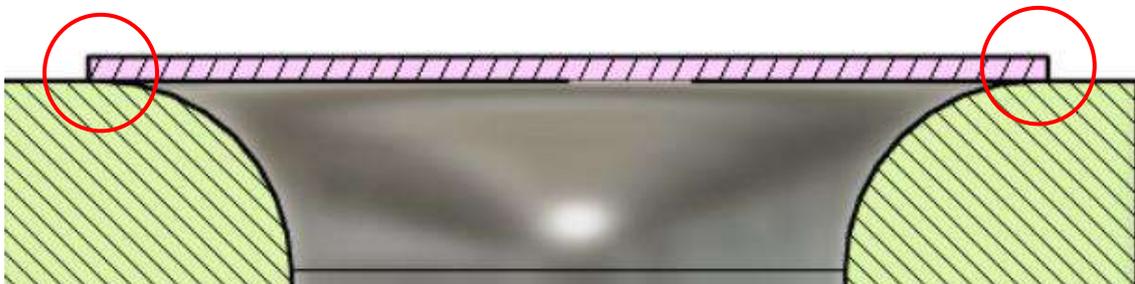


Figura 4.8 - Esquema de estampa plana e matriz com raio de canto igual a 20 mm.

Este estudo permitiu verificar um aumento significativo de espessura da parede da taça, o que significa que será necessário implementar uma etapa de Ironing.

O raio de concordância do punção, r_{cp} , é função do diâmetro da taça, d_i , e da espessura da chapa. De acordo com a expressão indicada no capítulo 2.1.6.6., para um diâmetro entre 25 e 650 mm, o raio é igual a 4 a 5 vezes a espessura da chapa. Segundo Rodrigues et al, 2010, quanto maior o raio de concordância do punção, menor a zona plana do fundo da taça e maior a redução de espessura nessa zona. Depreende-se então que o valor do raio de concordância deve ser 4 vezes a espessura, neste caso, igual a 10 mm.

O diâmetro da matriz e punção vai depender da folga aplicada entre estes em cada etapa. Para o cálculo da folga serve de apoio os fatores multiplicativos da tabela 2-5 para uma chapa com espessura entre 1.3 e 3.2 mm, em que se analisou a sua influência na força de estampagem. Realizaram-se então três simulações de estampagem na primeira etapa, para cada valor de fator multiplicativo, 1.10, 1.11 e 1.12, e para cada qual se obtiveram os valores de folga de 2.75, 2.78 e 2.80 mm, respetivamente.

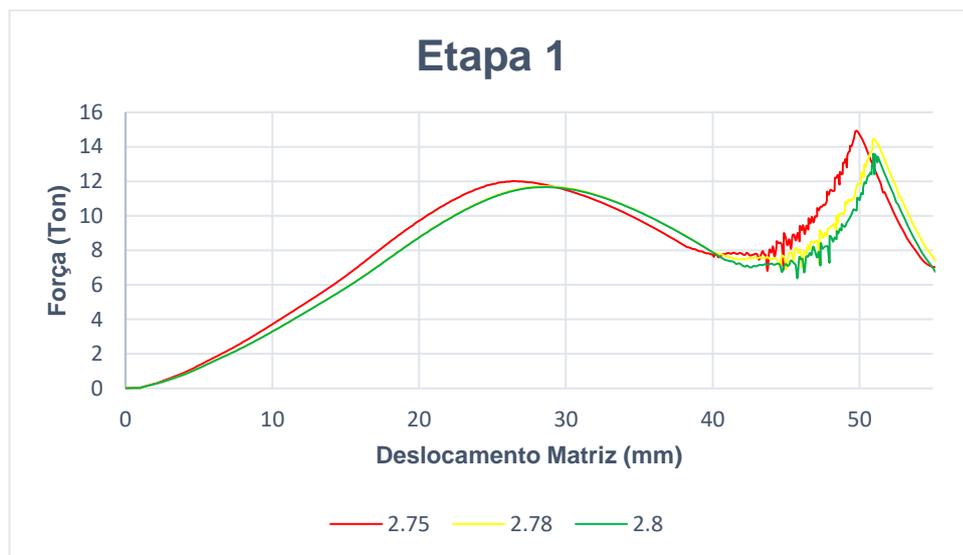


Figura 4.9 - Influência da folga entre punção e matriz na força de estampagem.

Analisando o gráfico da figura 4.9 verifica-se que aumentando a folga entre o punção e a matriz diminui a força de estampagem, contudo, essa diferença não é significativa comparada com o aumento de espessura da parede da taça, pois com o aumento da folga, o material terá tendência a aumentar. Nesse caso, será maior o interesse em manter a folga com o valor mais baixo possível, uma vez que será necessário acrescentar uma etapa de Ironing, e quanto menor a espessura da chapa, mais facilidade em executar o processo final.

Assim sendo, a tabela 4-6 apresenta os valores finais dos parâmetros relevantes para a definição da geometria das ferramentas de estampagem.

Tabela 4-6 - Parâmetros geométricos das ferramentas de estampagem [valores em mm].

Etapa	d_i	Folga	r_{cm}	r_{cp}	Diâmetro Punção	Diâmetro Matriz
1	56.65	2.75	15	10	53.90	59.40
2	42.50	2.80	15	10	39.70	45.30

Quanto ao cerra-chapas, como o processo se trata de estampar uma chapa com 2.5 mm de espessura cuja suscetibilidade ao enrugamento será reduzida, e devido à área pequena de contacto disponível ser muito reduzida, este pode ser do tipo fixo.

Ironing

Como se verificou na análise da influência do raio de concordância da matriz na espessura da parede da taça, esta sofre um aumento significativo de espessura, o que vai prejudicar o cumprimento dos requisitos do desenho técnico. Assim sendo, com a operação de Ironing pretende-se reduzir e uniformizar a parede da taça, mantendo a sua dimensão interior. Além disso, será necessário corrigir o raio de concordância do fundo da taça, que terá o valor similar ao raio de concordância do punção, que é de 10 mm.

O valor de redução de espessura entre duas fases sucessivas de ironing estabelece-se de modo que o coeficiente de ironing (ver equação 2.17) não ultrapasse o valor limite admissível, o qual depende fundamentalmente do material (ver tabela 2-8). Admitindo que a espessura da chapa aumenta para 2.80 mm, o valor do coeficiente de ironing é o seguinte:

$$e_n = 1 - \frac{2.50}{2.80} = 0.11$$

Como o 0.11 é inferior ao limite admissível para materiais macios, apenas será necessária uma etapa de ironing. O diâmetro do punção será igual ao diâmetro nominal interno da taça, e o diâmetro da matriz será igual ao diâmetro nominal externo da taça.

Forjamento do furo repuxado

Como foi analisado no capítulo 3.3, o processo de formação do furo repuxado no fundo da taça envolve 3 passos: pré-furo, repuxamento e forjamento.

Para determinar o diâmetro o pré-furo admite-se a conservação de volume do material a ser conformado, o que neste caso corresponde à zona ilustrada na figura 4.10.

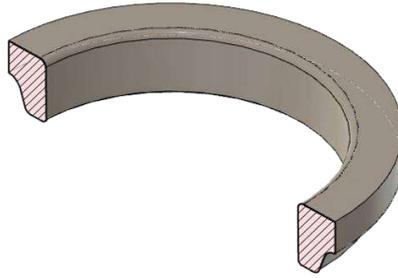


Figura 4.10 - Volume de material correspondente ao furo repuxado [Fusion 360].

Pretende-se um 'anel' de secção quadrada com 2.5 mm de espessura e o mesmo volume (ver figura 4.11), em que o objetivo será determinar o valor de r_2 .

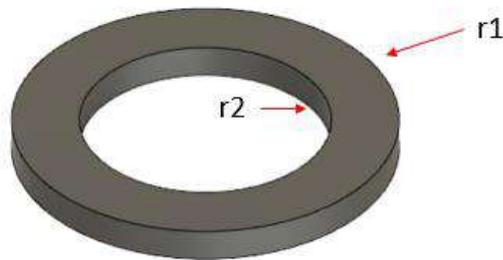


Figura 4.11 - 'Anel' para determinação do valor do raio do pré-furo [Fusion 360].

Com a ajuda do software CAD, calcula-se o volume do material a ser conformado, que é igual a 1020.45 mm^3 , e sabendo que r_1 é igual a 14.27 mm, determina-se r_2 através da equação para calcular o volume de um cilindro, resolvida em ordem a r_2 .

$$V = \text{área} \times \text{altura} \quad (4.1)$$

$$1020.45 = \pi \cdot (r_1^2 - r_2^2) \cdot 2.5$$

$$r_2^2 = 14.27^2 - \frac{1020.45}{\pi \cdot 2.5}$$

$$r_2 = 8.58 \text{ mm}$$

O diâmetro do pré-furo é igual a 17.16 mm. Para repuxar o furo utiliza-se um punção com um diâmetro ligeiramente superior e uma matriz, em que apenas se dobra a aba na direção do interior da taça. Finalmente, para forjar o material utiliza-se um punção para calibrar a forma ilustrada na figura 3.6, e com o punção de repuxar fixo e um calcador também fixo no fundo da taça, que servem de cavidade moldante e assim forçar a obtenção da forma pretendida. Na figura 4.12 ilustra-se um esquema das ferramentas utilizadas.

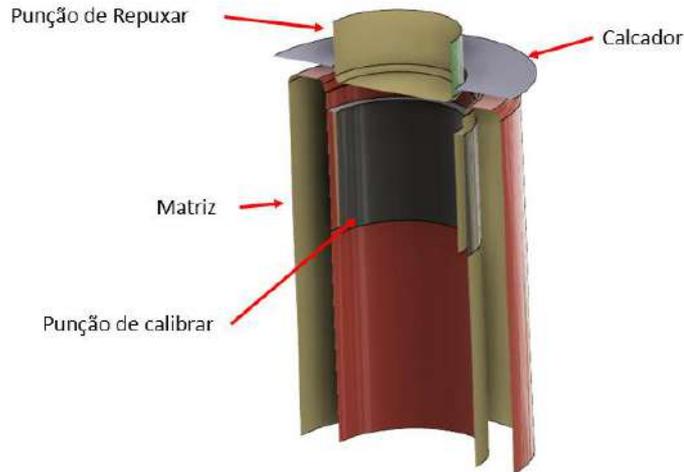


Figura 4.12 - Ferramentas para forjar o furo repuxado.

Esta etapa apenas será objeto de estudo na simulação numérica devido às limitações impostas nos ensaios experimentais realizados posteriormente, em que apenas se conseguiram realizar testes da etapa de estampagem da taça cilíndrica.

Forjamento da extremidade superior do embutido

Esta etapa apenas consiste em forçar a passagem da parede da taça entre um punção calibrador e uma matriz que provoquem a redução da espessura e ao mesmo tempo o aumento do diâmetro na extremidade (Ver figura 4.13).

O punção centrador permite centrar a taça pelo furo repuxado e o calcador fixa a taça impedindo o seu deslocamento na direção vertical. O punção de calibrar possui na zona inferior a forma negativa que se pretende dar ao material.



Figura 4.13 - Ferramentas para extrudir a extremidade superior da taça.

Esta etapa não será objeto de estudo de simulação numérica nem experimental devido ao assunto mencionado no processo de forjamento, ficando só a explicação do princípio teórico do funcionamento da ferramenta para este processo.

4.5. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.

No presente capítulo pretende-se resumir a formulação geral do problema através de tabelas e imagens das malhas das ferramentas, onde se informa que tipo de deslocamento é realizado por cada ferramenta em cada etapa, o coeficiente de atrito, contactos, entre outros parâmetros relevantes para introdução de inputs no solver *DD3IMP*.

Instituição:	Universidade Minho	Documento	Data:	01/04/2022
Programa:	Dissertação Mestrado	Simulação de estampagem profunda	Departamento:	Projeto
Projeto:			Nome:	Marco Sanchez
Resumo				
Informação			Simulação	
Nome:	Jacket Plast		Documento	
Part No.:			Solver	DD3IMP
Material	DD13		Parâmetros	
Espessura:	2.5 mm		Tamanho elemento	0.515 x 0.83 [mm]
Condições fronteira			Refinamento	100 x 3
Simetria	Axissimétrica		Tipo	Qua9
Drawing No.:				
				

Figura 4.14 - Resumo geral do problema de elementos finitos.

Utilização de ferramentas CAE no projeto do fabrico de um estampado profundo metálico

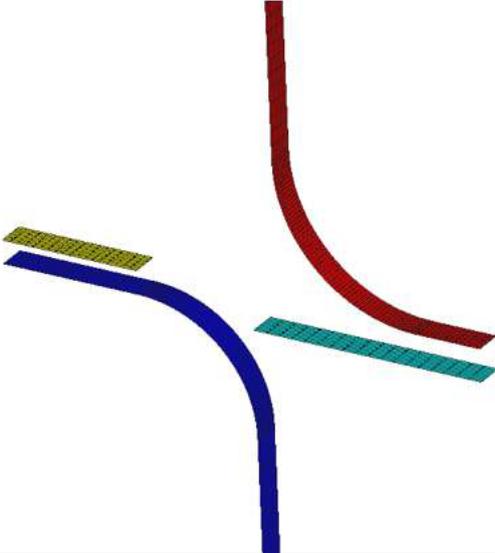
Processo		Etapa 1				
		Embutidura				
Tool Info						
Nome	Contacto	Folga	Deslocamento	Curso	Força	Atrito
Punção 1	Lado Inferior	0.125	N/A	55 mm	N/A	0.15
Matriz 1	Lado Superior	0.125	N/A	N/A	N/A	0.15
Cerrachapas 1	Lado Inferior	0.00	N/A	N/A	N/A	0.15
Contra-Punção 1	Lado Superior	0.00	N/A	55 mm	N/A	0.15
Geometria						
						

Figura 4.15 - Formulação do problema na etapa 1 de estampagem.

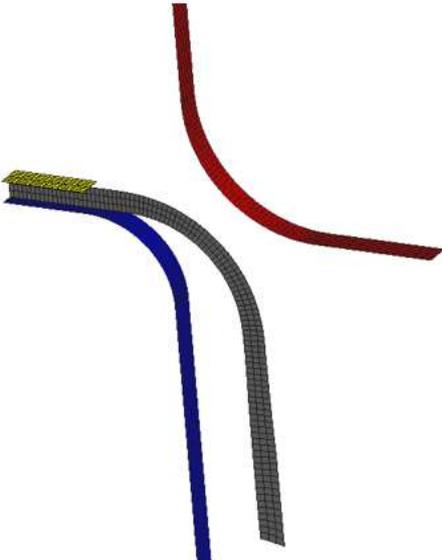
Processo		Etapa 2				
		Embutidura				
Tool Info						
Nome	Contacto	Folga	Deslocamento	Curso	Força	Atrito
Punção 2	Lado Inferior	0.125	N/A	N/A	N/A	0.15
Matriz 2	Lado Superior	0.125	N/A	70 mm	N/A	0.15
Contra-Punção 2	Lado Superior	0.000	N/A	N/A	N/A	0.15
Geometria						
						

Figura 4.16 - Formulação do problema na etapa 2 de estampagem.

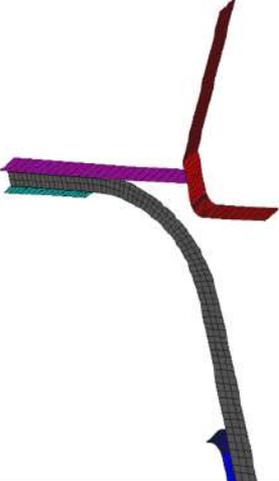
Processo		Etapa 3				
		Ironing				
Tool Info						
Nome	Contacto	Folga	Deslocamento	Curso	Força	Atrito
Punção 3	Lado Inferior	0.025		27.5 mm	N/A	0.15
Matriz 3	Lado Superior	0.000		70 mm	N/A	0.15
Camã 3	Lado Inferior	0.000	N/A	N/A	N/A	0.15
Contra-Punção 3	Lado Superior	0.000	N/A	N/A	5 kN	0.15
Geometria						
						

Figura 4.17 - Formulação do problema na etapa de ironing.

4.6. DADOS A ANALISAR.

O objetivo da análise por elementos finitos passa por analisar os dados de output fornecidos pelo solver. De forma a simplificar o estudo e, simultaneamente, cumprir com o objetivo principal da dissertação, serão apenas analisados os dados correspondentes ao diâmetro externo e interno e a altura da taça cilíndrica no processo de estampagem, para posterior comparação com os resultados experimentais, e a forma geométrica do furo repuxado no processo de forjamento.

Os dados que servem para validação das simulações são as cotas com toleranciamento dimensional da figura 3.3, e os respetivos limites superior e inferior na tabela 4-7.

Tabela 4-7 - Limites superior e inferior do diâmetro externo, diâmetro interno e altura da taça.

	Limite Superior (LSC)	Limite Inferior (LIC)
Diâmetro externo	45.10 mm	44.90 mm
Diâmetro interno	40.10 mm	39.70 mm
Altura	51.95 mm	51.65 mm

Conforme os resultados numéricos obtidos, estes serão validados quando se encontrarem no intervalo de valores admissíveis apresentados na tabela 4-7.

4.7. RESULTADOS NUMÉRICOS

Realizada a análise correspondente ao pré-processamento, tem-se toda a informação necessária para execução das simulações, cujos resultados se apresentam nas figuras 4.18 e 4.19.

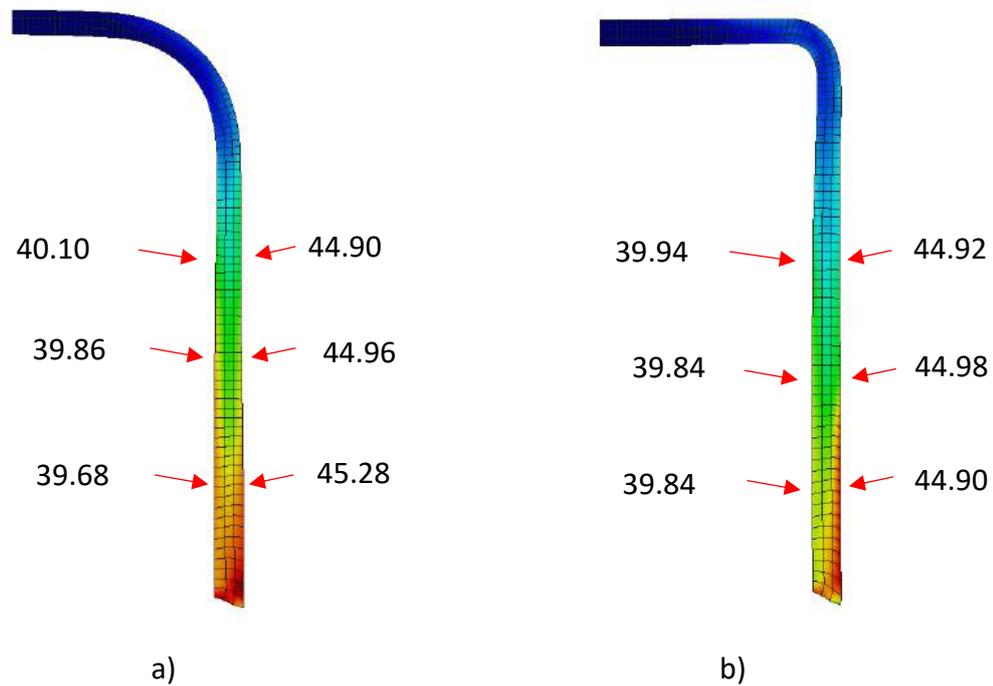


Figura 4.18 – Resultados da simulação do processo de estampagem: a) 2ª etapa b) Ironing. Diâmetro Externo e interno.

As imagens da figura 4.18 confirmam a necessidade de realizar a operação de ironing após a estampagem pois verifica-se uma variação significativa do diâmetro externo e do diâmetro interno ao longo da parede da taça, ultrapassando inclusive os limites de controlo. Isto deve-se à parede não uniforme que vai aumentando a espessura em direção à extremidade superior da taça, onde atinge o valor de 2.80 mm (ver figura 4.18 a)). Os resultados da simulação do processo de ironing são satisfatórios com os valores do diâmetro interno e externo dentro das tolerâncias dimensionais especificadas, e com reduzida variação da espessura da chapa na parede da taça. Além disso, conseguiu corrigir o raio de canto (ver figura 4.18 b)).

O valor da altura da taça ultrapassou significativamente o limite superior de controlo, como se verifica na figura 4.19.

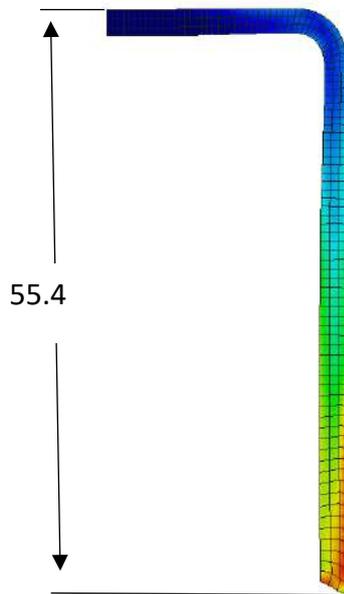


Figura 4.19 - Resultado da simulação numérica da operação de Ironing: Altura da taça [mm].

Devido à redução de espessura no raio de canto, o material tende a aumentar de espessura e a esticar ao longo da parede da taça, o que resulta na obtenção de uma taça com uma altura superior ao esperado.

Com os resultados obtidos na 1ª abordagem será necessária realizar apenas uma alteração com vista a realização de outra simulação para melhoria de resultados. A alteração introduzida é a seguinte:

- Diminuir o diâmetro da estampa plana para 100 mm no sentido de obter uma taça com altura dentro do intervalo de tolerância.

2ª abordagem

A alteração do valor do diâmetro da estampa plana implica uma alteração na geometria das ferramentas de estampagem da 1ª etapa ao manter a relação de estampagem. Desta forma, os novos dados das ferramentas nesta abordagem são os seguintes:

Tabela 4-8 - Parâmetros geométricos das ferramentas de estampagem [valores em mm]. 2ª Abordagem de simulação.

Etapa	d_i	Folga	r_{cm}	r_{cp}	Diâmetro Punção	Diâmetro Matriz
1	55.00	2.75	15	10	52.25	57.75
2	42.50	2.80	15	10	39.70	45.30

Os resultados obtidos com a 2ª abordagem são apresentados na figura seguinte:

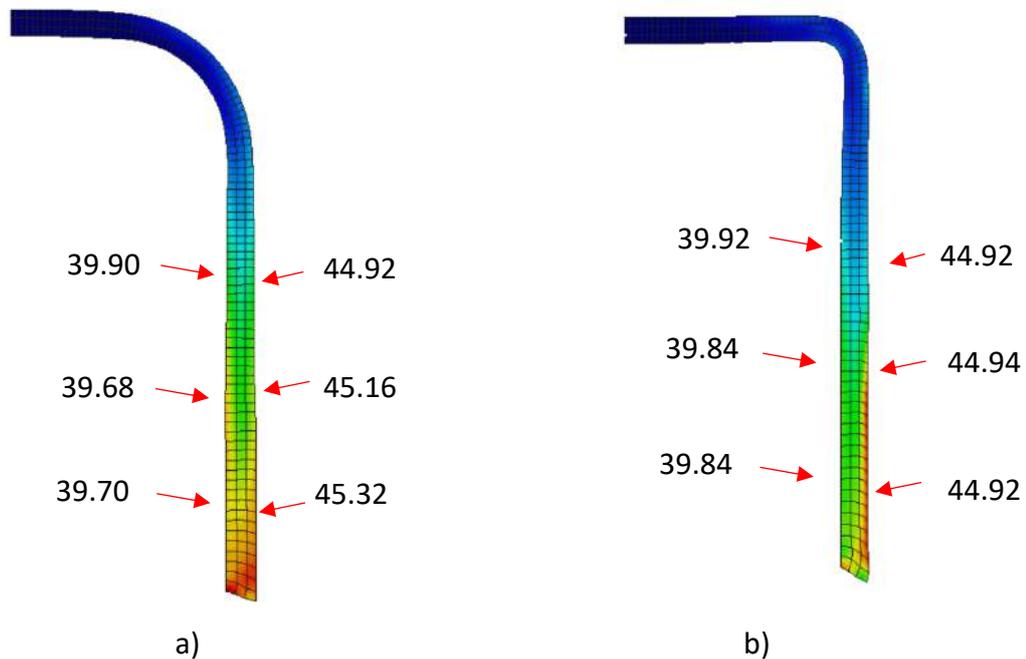


Figura 4.20 - Resultados da simulação do processo de estampagem (2ª abordagem): a) 2ª etapa b) Ironing. Diâmetro Externo e interno.

Conforme se verifica pela observação da figura 4.20, os resultados são satisfatórios no que toca aos valores do diâmetro externo e interno da taça, estando estes dentro da tolerância dimensional especificada. A espessura da parede da taça não varia significativamente, o que significa esta possui uniformidade ao longo da altura. Quanto à altura da taça, o seu valor é apresentado na figura 4.21.

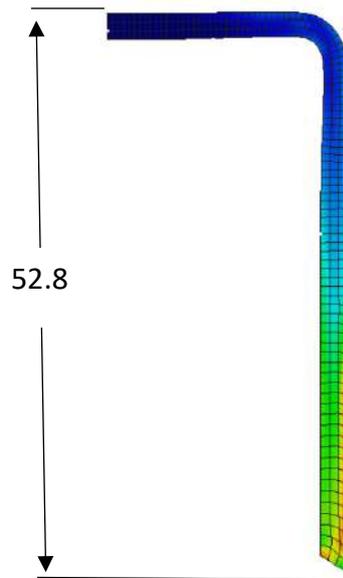


Figura 4.21 - Resultado da simulação numérica da operação de Ironing: Altura da taça [mm] – 2ª abordagem

Apesar de o valor da altura da taça estar fora da tolerância admissível, é aceitável porque deve-se deixar material em excesso para poder aparar e deixar na medida pretendida através de um processo como aquele explicado no capítulo 2.1.6.7. É também preciso ter em conta que o material possui alguma anisotropia, e que provoca a variação da altura da taça devido ao surgimento de ‘orelhas’. Este fenómeno não é visualizado na simulação devido a ser uma problema bi-dimensional axissimétrico.

3ª Abordagem

Durante o procedimento para simulação do processo de forjamento do furo repuxado surgiu uma dificuldade e limitação técnica relacionada com a simulação da etapa de corte do pré-furo numa malha de elementos finitos. Perante este problema surgiu a dúvida se seria possível simular todo o processo anterior de estampagem já com o pré-furo, de forma a poder utilizar a mesma malha deformada no processo de forjamento. Para isso teria de se comprovar que os nós correspondentes à zona na malha onde seria aplicado o corte não sofrem deslocamento significativo nesse processo. Desta forma foi analisado novamente a simulação de estampagem e os resultados foram os seguintes:

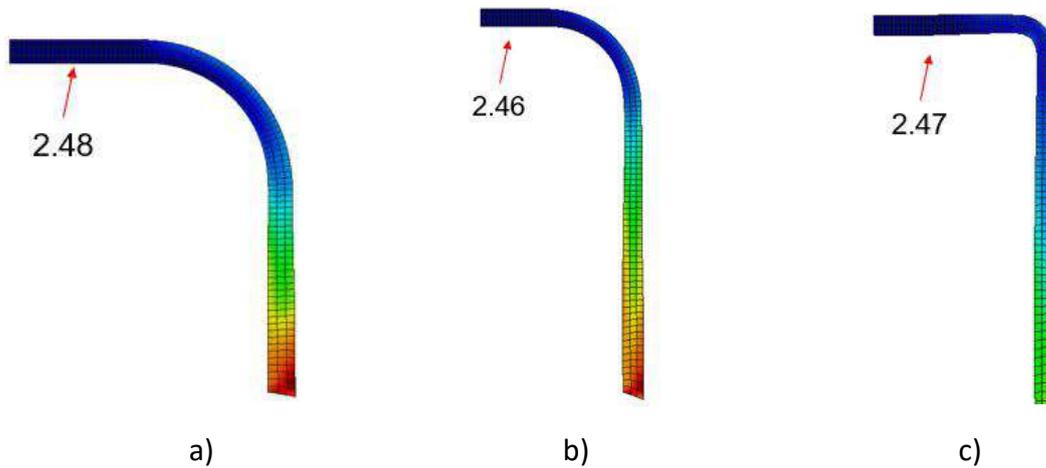


Figura 4.22 - Variação da espessura do fundo da taça.

Na figura 4.22 observa-se que a espessura da chapa na zona analisada não varia significativamente entre a 1ª etapa (figura 4.22 a)) e a etapa de ironing (figura 4.22 c)). Além disso, foi criada uma malha de elementos finitos com 3 nós posicionados no ponto correspondente ao raio do pré-furo (calculado anteriormente) no eixo dos xx, no sentido de avaliar o seu deslocamento (ver figura 4.23).



Figura 4.23 - Malha de elementos finitos com nós em estudo a vermelho.

A análise consistiu em verificar o deslocamento de cada nó na direção xx e zz e a tabela seguinte apresenta os resultados obtidos:

Tabela 4-9 - Deslocamento sofrido pelos nós correspondentes ao raio do pré-furo.

Deslocamento	1	2	3
X	0.05 mm	0.05 mm	0.05 mm
Z	0.07 mm	0.06 mm	0.05 mm

A variação da posição dos nós não é significativa, logo, esta variação pode ser desprezada e ser aplicada uma condição de fronteira de deslocamento nulo ($\delta = 0$) aos nós em estudo durante a simulação do processo de estampagem. Esta abordagem permite utilizar a mesma malha deformada no processo de estampagem para o processo de forjamento sem qualquer influencia nos resultados. Estes são apresentados na figura 4.24.

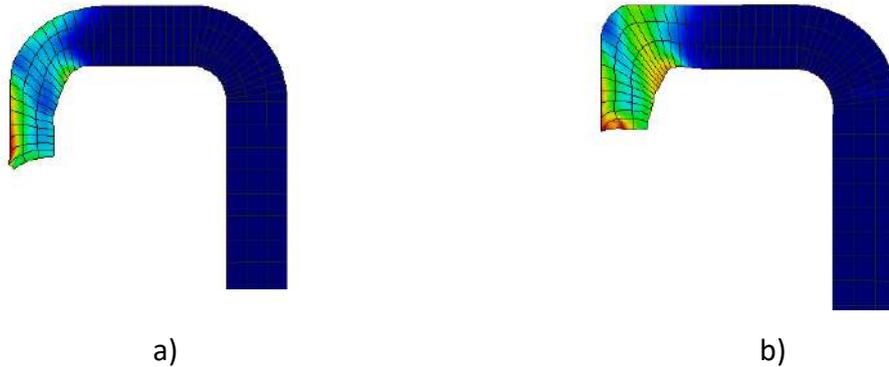


Figura 4.24 - Simulação do processo de forjamento do furo repuxado.

Como se pode observar na figura acima, a simulação consiste em repuxar o pré-furo (figura 4.24 a)) e de seguida forjar o material até obter a forma pretendida. Devido às limitações inerentes ao software, apenas foi analisada a cota de 4.85 ± 0.15 , ilustrada na figura 3.6. Na primeira simulação obteve-se 4.54 mm e, então, corrigiu-se o deslocamento do punção e na segunda abordagem obteve-se o valor de 4.84 mm (ver figura 4.25).

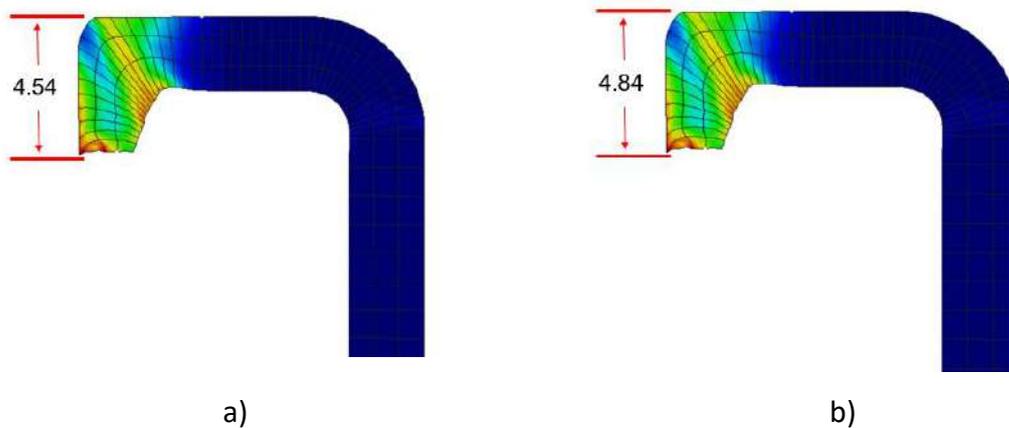


Figura 4.25 - Resultados obtidos de abordagens diferentes no processo de forjamento.

Devido às limitações surgidas para simular o processo de extrusão, considera-se o estudo de simulação concluído, a partir do qual se apresentam os resultados correspondentes à força de estampagem em cada etapa na figura seguinte.

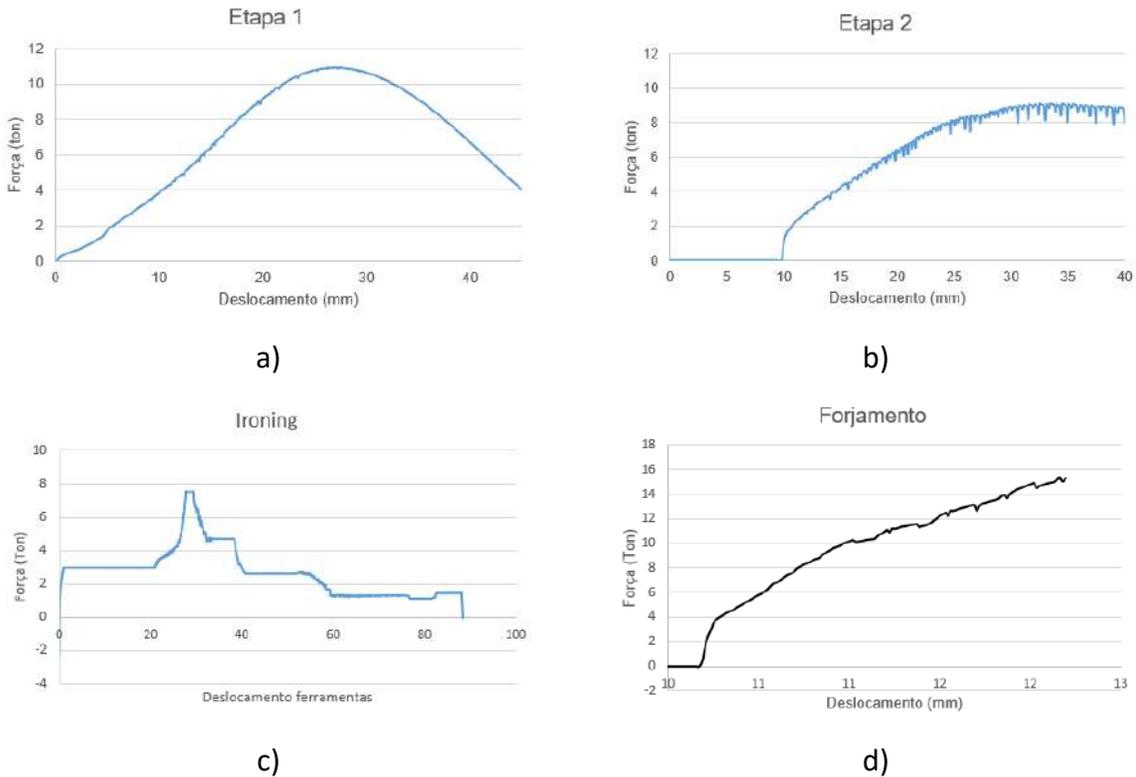


Figura 4.26 - Gráficos força vs deslocamento em cada etapa de simulação.

Analisando a figura 4.26 verifica-se que é necessária uma força aproximada de estampagem igual a 11 toneladas na primeira etapa de estampagem, 9 toneladas na segunda, 8 toneladas na etapa de ironing e 16 no processo de forjamento do furo repuxado. Comparando com calculo analítico a partir da equação 2.14 para a etapa 1, e admitindo uma tensão de rotura na ordem dos 300 MPa, o coeficiente de correção da tensão de rotura igual a 1 (ver tabela 2-7), e um raio médio da taça igual a 55 mm (ver tabela 4-8) obtém-se o seguinte valor:

$$F_{m\acute{a}x} = 2 \cdot \pi \cdot 55 \cdot 2.5 \cdot 300 \cdot 1 = 259181 \text{ N} = 25,9 \text{ Ton}$$

A expressão 2.14 não tem um resultado em concordância com a simulação. Contudo, calculado a partir da equação 2.15 obtém-se:

$$F_{m\acute{a}x} = \pi \cdot (52.25 + 2.5) \cdot 2.5 \cdot 300 \cdot \left(1.2 \cdot \frac{0.55 - 1}{0.55 - 1}\right) = 154802 \text{ N} = 15,4 \text{ Ton}$$

O valor obtido aproxima-se mais ao resultado obtido na simulação, o que demonstra que a expressão de schuler é mais assertiva para este tipo de processo. Contudo, esta análise carece de estudo experimental que validaria com maior rigor estes resultados.

Simulação com elementos 3D. Análise de risco de rotura. Curva limite de Estampagem

No sentido de tornar o estudo numérico mais robusto, realizou-se uma nova análise com as mesmas ferramentas, mas com elementos finitos tridimensionais. O objetivo é comparar com os resultados da análise axissimétrica para chegar a conclusões sobre as vantagens do uso de um ou outro tipo de elemento e, também analisar o risco de rotura através do gráfico curva limite de estampagem.

Na figura 4.27 pode observar-se o formato da peça após as três fases de estampagem e verifica-se o surgimento de 'orelhas' na extremidade superior da peça a partir da segunda etapa. Este fenómeno deve-se, neste caso, a ter-se utilizado os coeficientes anisotropia de acordo com a tabela 4-3, o que significa que o material não foi considerado isotrópico. Isto não pode ser previsto na simulação com elementos 2D, o que influencia significativamente o estudo realizado, principalmente a altura da taça e, desta forma, o diâmetro do esboço.

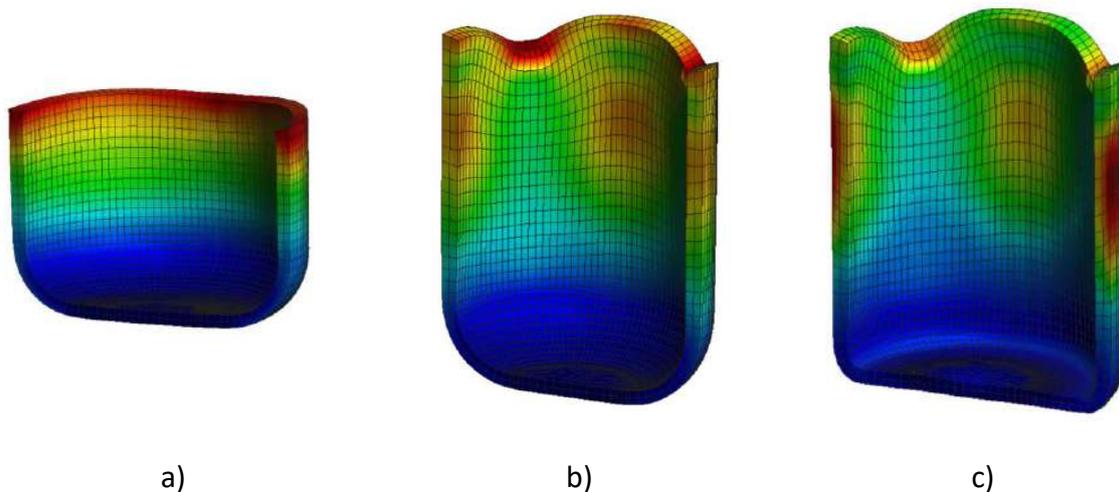


Figura 4.27 - Simulação do processo de estampagem com elementos finitos hexaédricos a) 1ª etapa, b) 2ª etapa e b) ironing.

Isto pode significar que apesar da anisotropia do material ser reduzida, a formação de orelhas é um fenómeno muito difícil de evitar. Neste caso, na primeira etapa não ocorre devido à presença do cerra-chapas fixo que promove um fluxo controlado e em contacto constante com a matriz. Pelo contrário, a partir da segunda etapa não existe cerra-chapas e o material é deformado livremente apenas por ação do punção que empurra o material contra o raio de concordância da matriz (ver figura 4.28).

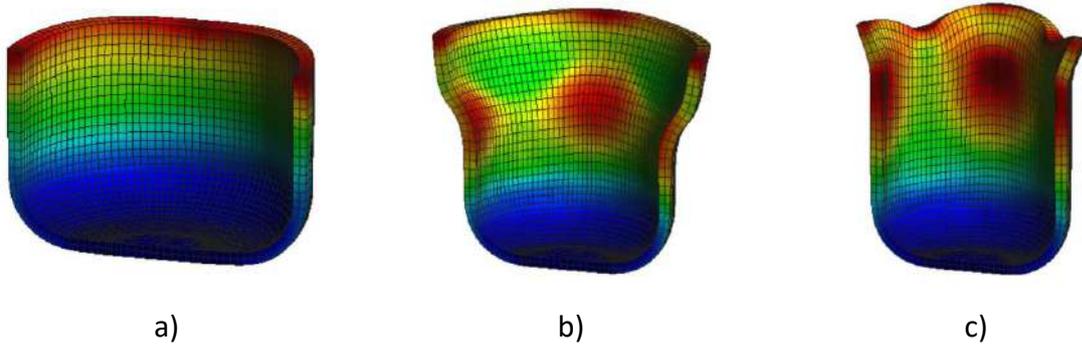


Figura 4.28 - Evolução da deformação da chapa durante a segunda etapa de estampagem.

Analisando a figura 4.28 verifica-se que nas zonas com maior deformação (na figura 4.28 b) as zonas a vermelho) a deformação da chapa evolui no sentido de formar a 'orelha' (figura 4.28 c) as zonas mais altas da taça).

Os valores do diâmetro externo e diâmetro interno indicam-se na figura 4.29.

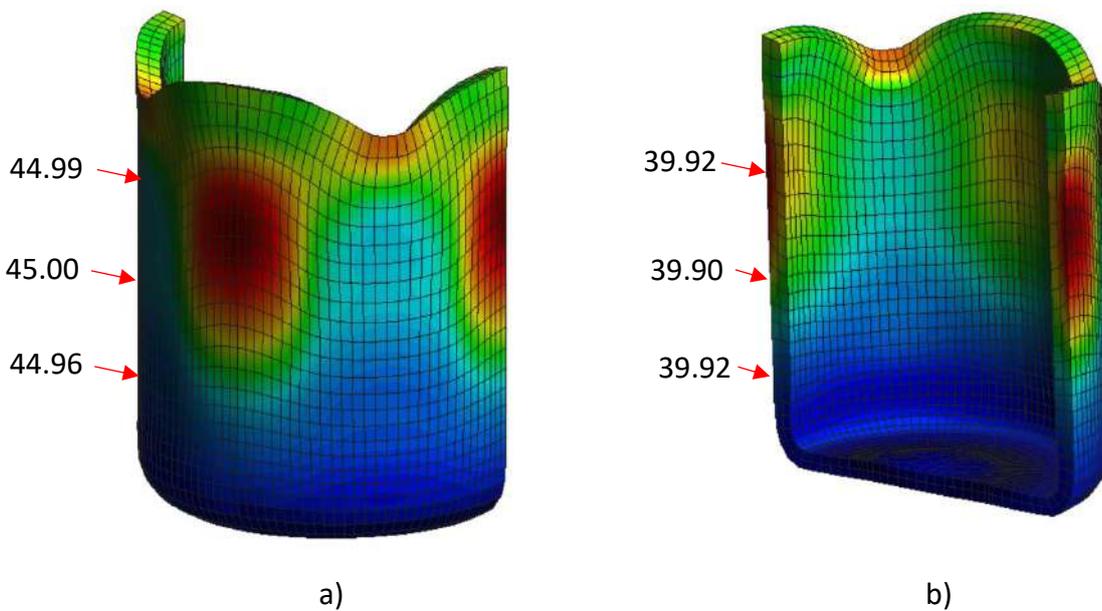


Figura 4.29 - Diâmetro externo e interno da taça.

Os resultados da simulação com elementos tridimensionais são satisfatórios no sentido do cumprimento do toleranciamento dimensional, no entanto, verifica-se uma pequena diferença nos valores do diâmetro externo e interno em relação à simulação com elementos 2D. Estes resultados serão objeto de comparação com os resultados experimentais no capítulo 6.

Quanto ao risco de rotura, o gráfico da figura 4.30 representa a curva limite de estampagem do aço DD13 (linha a vermelho) e os pontos (a verde) correspondentes às duas deformações principais, major strain (ϵ_1) e minor strain (ϵ_2).

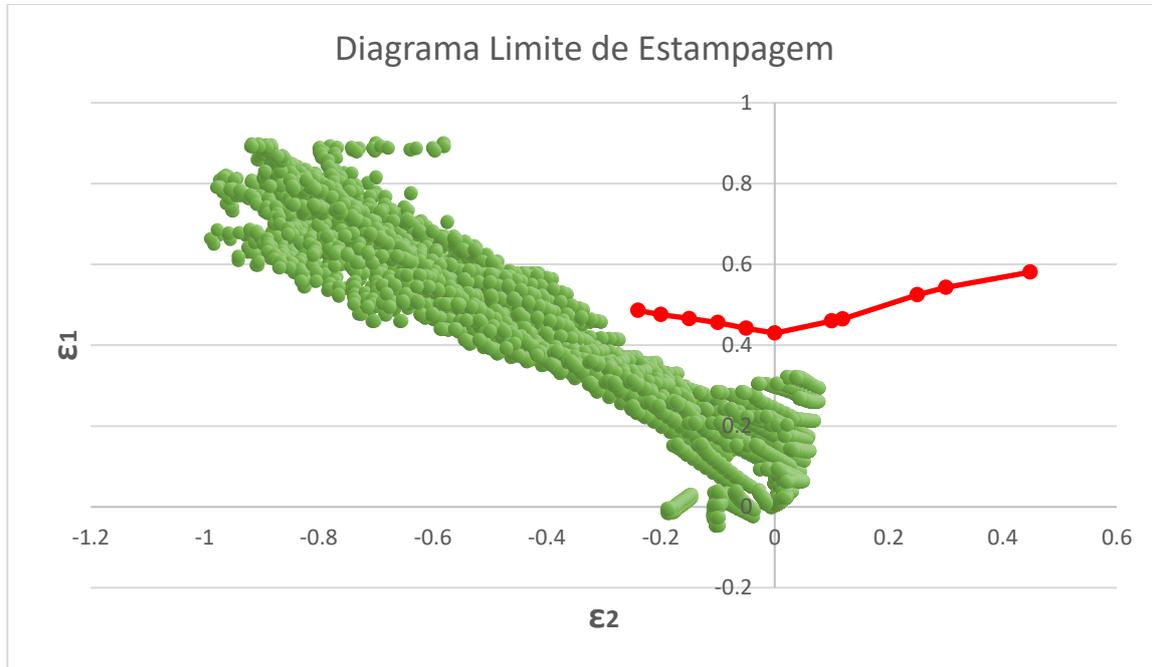


Figura 4.30 - Diagrama Limite de Estampagem. Deformações principais após processo de estampagem.

O diagrama demonstra que a maioria dos pontos se encontram na zona sujeita a estados de tensão de compressão ($\epsilon_2 < 0$). Isto significa que o processo pode decorrer sem risco de ocorrer a rotura do material ou outros defeitos relacionados, caso contrário, encontraríamos pontos mais para o lado direito do diagrama e a ultrapassar a curva limite de estampagem. Os resultados obtidos nos ensaios experimentais servirão para comparação e comprovar toda esta análise numérica.

A título de curiosidade, realizou-se uma simulação com o objetivo de analisar o comportamento da chapa se se realizasse a estampagem em apenas uma etapa, ignorado todo o pré-estudo realizado sobre o coeficiente limite de estampagem, o raio de canto das ferramentas, etc. Portanto, se tentasse obter a peça final em apenas uma etapa de estampagem, os resultados previstos são apresentados nas figuras seguintes:

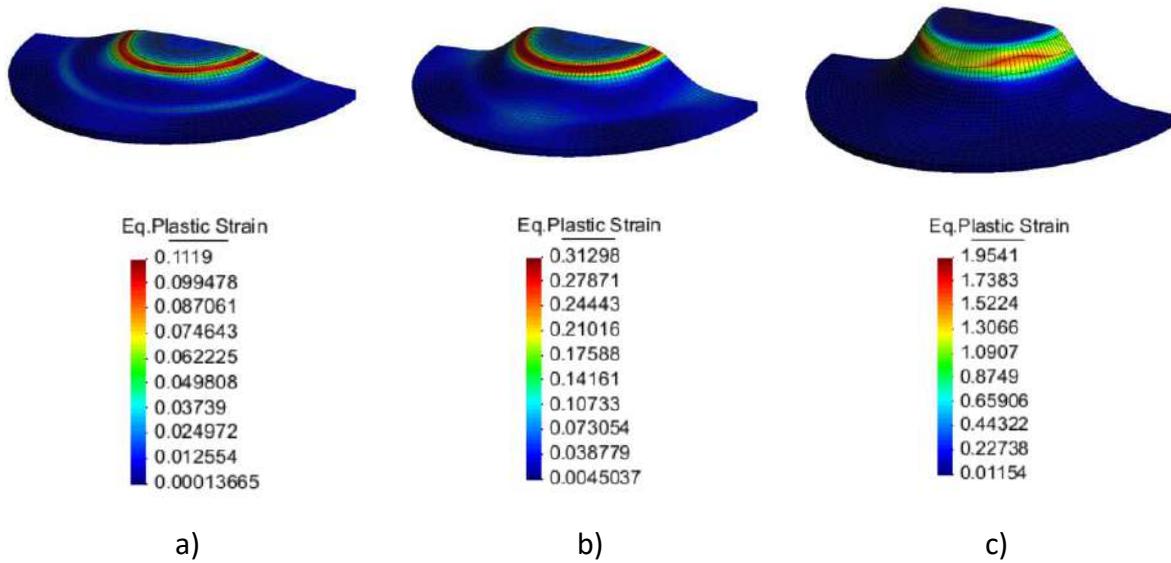


Figura 4.31 - Evolução da malha deformada em processo de estampagem com uma etapa.

Analisando a figura 4.31 depreende-se que a zona que sofre maior deformação é superfície da chapa oposta à superfície de contacto com o raio de concordância do punção. Nesta zona exercem forças de tração críticas, passando de uma deformação inicial de 0.112 (figura 4.31 a)) até a um ponto de rotura com deformação de 1.954 (figura 4.31 c)).

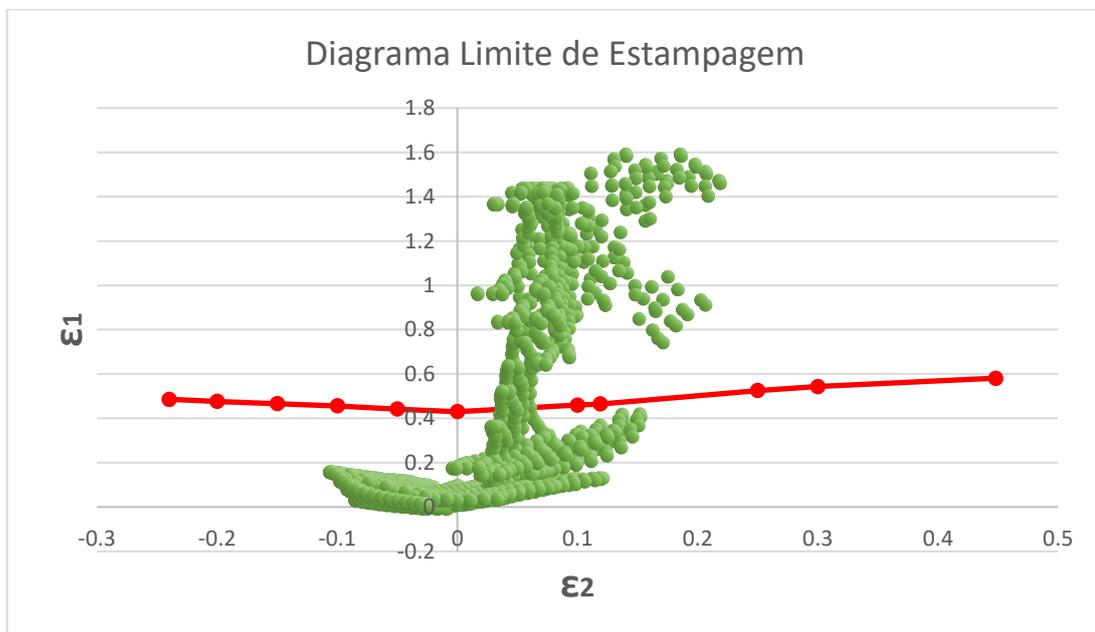


Figura 4.32 - Diagrama Limite de Estampagem. Processo de uma etapa.

O diagrama limite de estampagem da figura 4.32 demonstra o risco elevado e efetivo de rotura no processo com apenas uma etapa de estampagem.

5. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA SOFTOOL

Concluído o estudo analítico e numérico, chega-se à fase de ensaios experimentais para validação de resultados. É necessário desenvolver o projeto de uma ferramenta para conformar a peça, a partir de toda a informação adquirida nos capítulos anteriores.

5.1. ANÁLISE E SELEÇÃO DO SISTEMA CONSTRUTIVO DA FERRAMENTA

Segundo Rossi, 1975, os fatores essenciais que sugerem um caminho a seguir na escolha do sistema construtivo de uma ferramenta de estampagem são os seguintes:

- As características da peça final. A forma e dimensões, o grau de precisão e o material constitutivo da peça.

- A quantidade de peças a ser produzida. Se houver uma pequena produção, é conveniente recorrer aos chamados sistemas improvisados, ou à construção de ferramentas simples.

- Produção diária. Uma produção em série para durar vários anos requer ferramentas robustas com sistemas sofisticados de automatização de alimentação da matéria-prima, cames, transfer, etc.

- Capacidade dos operadores designados para o trabalho em série.

Seguindo os passos apresentados, o primeiro fator é a peça, neste caso uma taça cilíndrica de aço com rigor dimensional e geométrico. É necessária uma ferramenta molde constituída por elementos de aço de elevada dureza. Os componentes ativos, o punção, a matriz e o cerra-chapas devem possuir forma cilíndrica, tal como descrito no capítulo 4. Na figura seguinte é ilustrada um exemplo de ferramenta para este tipo de processo.

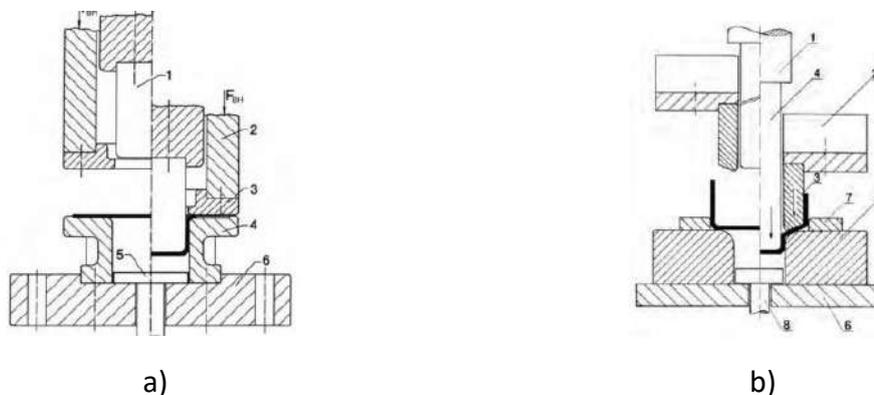


Figura 5.1 - Ferramenta-tipo de processos de estampagem de taças cilíndricas, a) 1ª etapa e b) 2ª etapa [Rossi, 1975].

Na figura 5.1 a) observa-se o punção (1) preso a um porta-punções (2), onde também está afixado o cerra-chapas (3) que controla o escoamento da chapa contra a matriz (4) que está afixada numa base ou placa superior (6). Se a prensa for de duplo efeito, é aconselhável introduzir um punção extrator (5) para ajudar a extrair a peça e planificar o fundo da taça estampada. Na figura 5.1 b) observam-se os mesmos elementos construtivos mais o anel de guiamento (7) da peça pré-estampada na 1ª etapa. Conclui-se então que a ferramenta pode ser dividida em duas partes, a estrutura superior (punção, porta-punções e cerra-chapas) e a estrutura inferior (matriz, base e extrator).

Tendo em conta que se trata de obter um valor baixo de amostras, a ferramenta deve ser simples como na figura 5.1, contudo, devido ao rigor dimensional e ao número de etapas de conformação será necessário garantir o centramento da peça entre etapas e entre a estrutura superior e a inferior, sendo por isso necessário introduzir elementos de guiamento, como por exemplo duas colunas.

A escolha da prensa deve ser selecionada mediante os seguintes parâmetros: características do processo de conformação, esforço necessário para realizar o processo e a produção. Os resultados obtidos no capítulo 4.6 demonstram ser necessária uma prensa com capacidade superior a 12 toneladas para realizar o processo, e do tipo hidráulica (preferencialmente) por possuírem esforço e velocidade de estampagem controlada. Esta seleção depende dos equipamentos disponíveis na empresa onde se realizaram os ensaios.

5.2. PROJETO CAD

No presente capítulo descreve-se o sistema construtivo da ferramenta e a função de cada componente constituinte. Tal como foi dito no capítulo anterior, a ferramenta é do tipo softtool, o que significa que é uma ferramenta mais simples do que as ferramentas tipicamente utilizadas para as produções em série, sejam estas do tipo progressivo ou transfer, mas com o mesmo princípio de funcionamento. Distinguem-se duas partes principais, a estrutura inferior e a estrutura superior (ver figura 5.2 e 5.3), e apenas a superior é móvel. Está dimensionada para uma prensa de simples efeito.

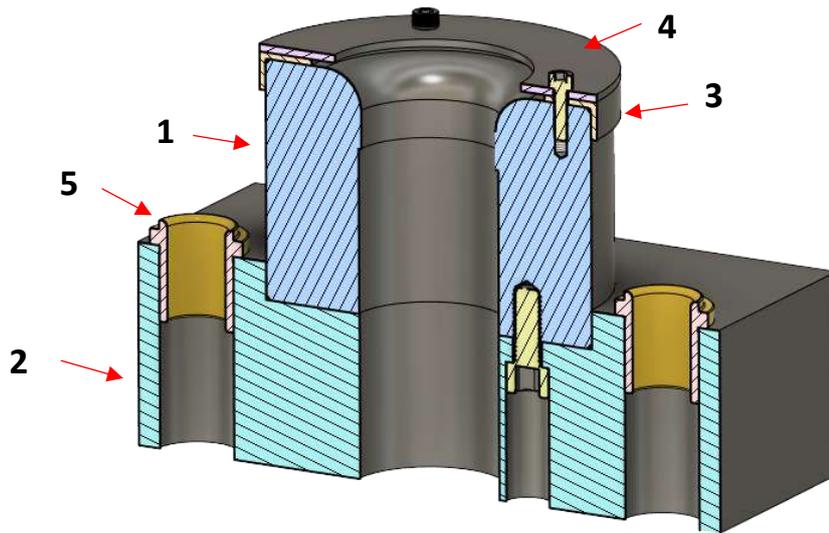


Figura 5.2 - Estrutura inferior da ferramenta.

Na figura 5.2 pode observar-se a matriz (1), a base ou placa inferior (2) para fixação da matriz e alinhamento com as colunas, o anel centrador (3) da chapa planificada, o cerra-chapas fixo (4) e os casquilhos de bronze (5) para guiamento e deslizamento das colunas.

Na figura 5.3 observa-se a estrutura superior, constituída pelo punção de estampar (1) que está fixo numa placa superior ou porta-punções (2) e por duas colunas de guiamento e de alinhamento entre as duas estruturas.

Os componentes de ligação, como os parafusos, e os de guiamento são todos normalizados e a suas fichas técnicas podem ser consultadas no anexo C.

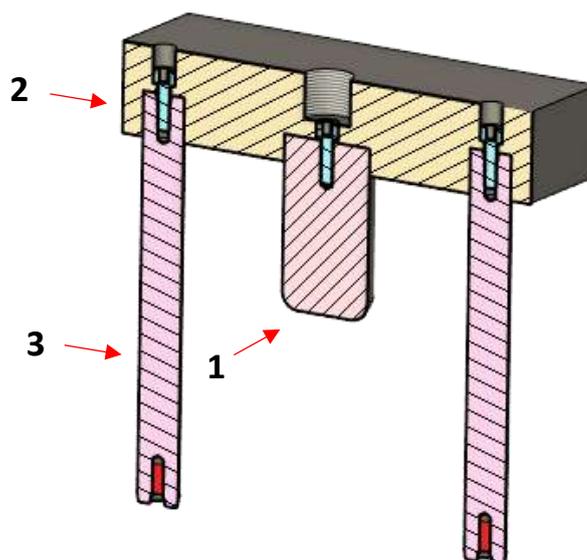


Figura 5.3 - Estrutura Superior da ferramenta.

O funcionamento da ferramenta consiste em afixar a estrutura superior à parte móvel da prensa e realizar o movimento induzido pela máquina em direção à estrutura superior promovendo o contacto entre o punção e o esboço (ver figura 5.4 a)) até esta ser deformada enquanto escoa sobre a matriz (ver figura 5.4 b)). Quando a deformada ultrapassar a zona moldante da matriz, o punção iniciará o movimento de retorno junto com o porta-punções, mas a peça ficará presa na extração da matriz (ver figura 5.5 a)) a contar com algum retorno elástico do material. Finalmente a peça cai livremente devido à ação da gravidade (ver figura 5.5 b)).

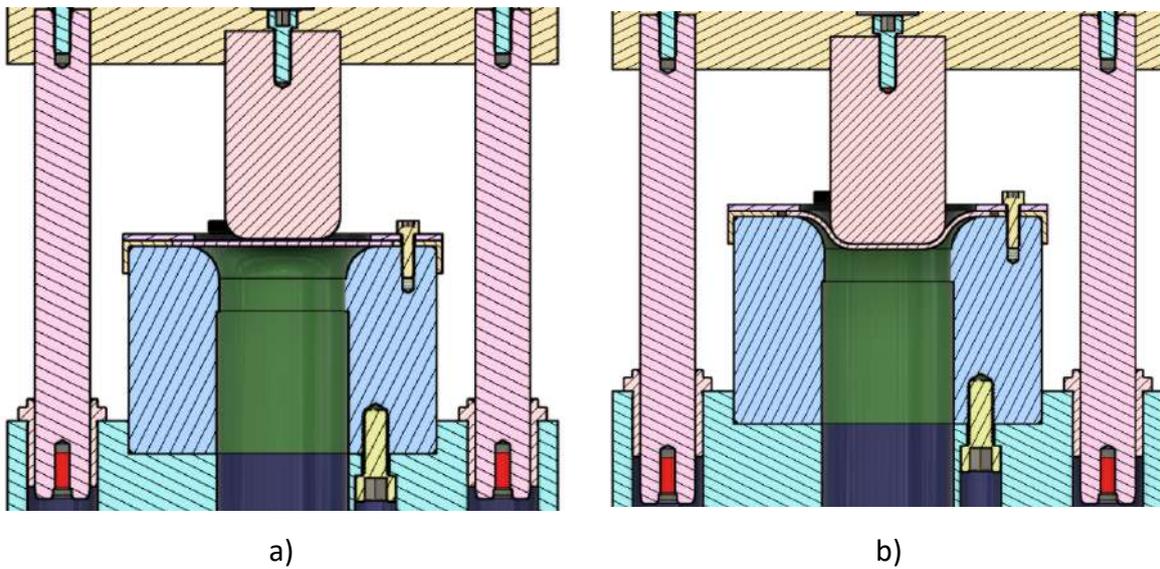


Figura 5.4 – Mecânica de deformação da peça.

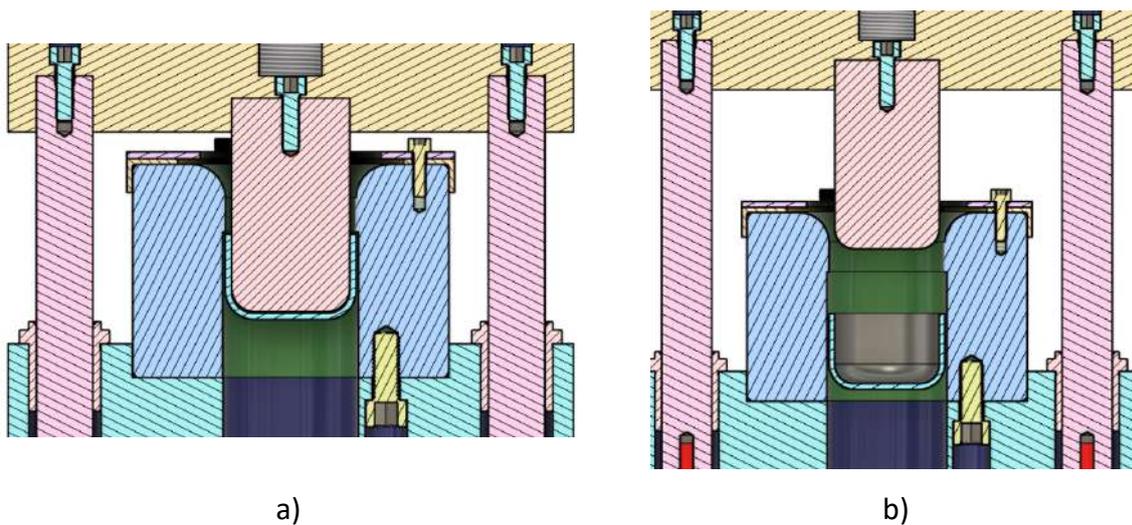


Figura 5.5 - Extração da peça.

O funcionamento da ferramenta na segunda etapa de estampagem e na etapa de ironing é idêntico, mas com punção, matriz e anel centrador de dimensões correspondentes à etapa (ver figura 5.6).

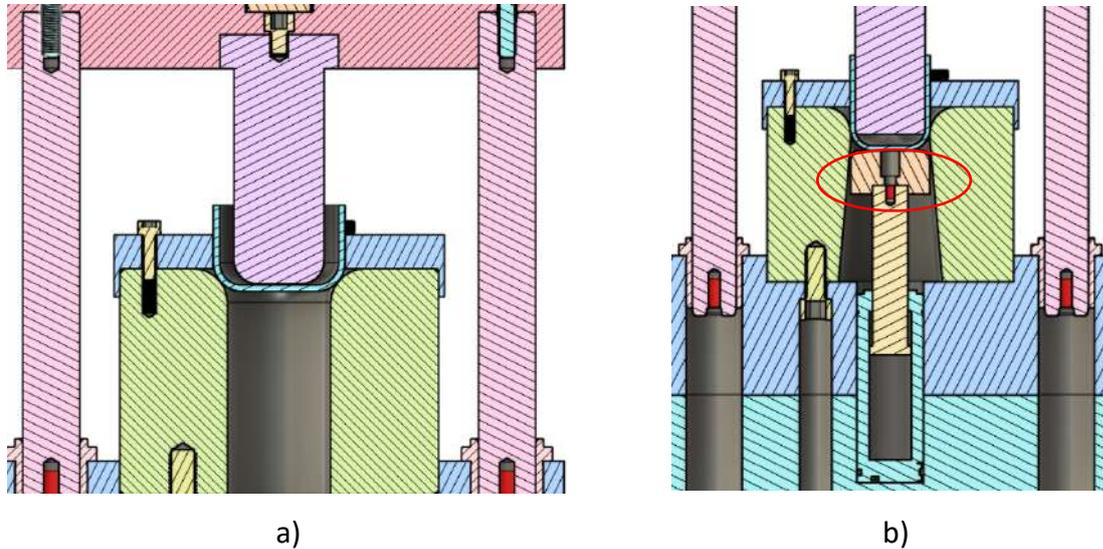


Figura 5.6 - Ferramenta na a) segunda etapa de estampagem e b) etapa de ironing.

Na etapa de ironing foi colocado um extrator no interior da matriz (ver figura 5.6 b) assinalado a vermelho) com a função de fazer de ‘batente’ e, em conjunto com a ação do punção sobre a peça, forçar a correção do raio de canto ao manter a planeza do fundo da taça. Além disso, o extrator acompanha o movimento do punção enquanto a parede da taça é extrudida. Este processo é executado com a ajuda de um cilindro a gás colocado na base, que ligado ao extrator através da haste promove a extração da peça quando o punção realiza o movimento de recuo. A escolha de um cilindro a gás em vez de uma mola de compressão (a solução mais barata) deve-se ao curso necessário de estampagem nesta etapa, que é superior a 70 mm, o que exigia uma mola de elevado comprimento. Esta solução obrigou a adicionar uma placa por baixo da placa inferior.

No anexo B podem ser consultados os desenhos técnicos dos componentes constituintes da ferramenta softool.

5.3. BILL OF MATERIALS

Foi elaborada uma lista de materiais com todos os componentes constituintes da ferramenta softool, incluindo os componentes normalizados, onde se pode consultar a descrição, o material e quantidades.

Tabela 5-1 - Lista de Materiais da ferramenta softool.

Descrição	Material	Qtd
Placa superior	Aço 1.1730	1
Punção de estampar	Aço 1.2842	3
Matriz	Aço 1.2842	3
Placa inferior	Aço 1.1730	1
Base	Aço 1.1730	1
Anel centrador	Aço 1.1730	3
Extrator	Aço 1.2842	1
Parafuso M8x10 – ISO 4762	Aço	1
Parafuso M8x25 - ISO 4762	Aço	2
Parafuso M6x12 – ISO 4762	Aço	1
Parafuso M6x20 – ISO 4762	Aço	3
Parafuso M12x30 – ISO 4762	Aço	5
Casquilho E5130/25	Bronze	2
Coluna E5030 25x224	Aço	2
Cilindro a gás E6350 470/38/90	-	1

5.4. MONTAGEM DA FERRAMENTA

A maquinação de todos os componentes foi executada na serralharia da ETMA Metal Parts, assim como a montagem final da ferramenta. Os processos de maquinação envolvidos foram o torneamento, a fresagem em máquina CNC e retificação cilíndrica.



Figura 5.7 - Torneamento de matriz de estampar.

Os componentes constituídos pelo aço 1.2842, ou seja, as matrizes, os punções e o extrator, tiveram que passar um tratamento térmico de têmpera para obter uma dureza de 58 HRC, para lhes conferir elevada dureza e resistência. Estes são os componentes que têm contacto com a chapa.



Figura 5.8 - Matrizes e punções de estampar.

Os restantes componentes da estrutura, a placa superior, a placa inferior e a base, são constituídos por um aço mais macio, o 1.1730, por não serem solicitados a esforços de contacto.



Figura 5.9 - Placa superior, placa inferior e base.

Concluído o processo de maquinação de componentes, a montagem da ferramenta seguiu as instruções de montagem dos desenhos técnicos do anexo D.



No capítulo seguinte apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados na empresa.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Serve o presente capítulo para descrever o procedimento para realização dos ensaios experimentais e apresentar os resultados obtidos dos mesmos. Esses resultados servem para comparar com os resultados da análise numérica descrita no capítulo 4 e obter conclusões sobre a utilidade das ferramentas CAE.

6.1. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O ensaio consistiu em estampar 10 amostras a partir de esboços cortados a laser, com os quais se pretende obter a forma final em três fases. Entre cada etapa trocavam-se os componentes ativos correspondentes e conformava-se a peça obtida na etapa anterior. Em todas as etapas e amostras foi utilizado óleo lubrificante próprio para estampagem com o objetivo de facilitar o escoamento da chapa sobre a matriz.



Figura 6.1 - Ferramenta montada em máquina pronta para ensaio.

Os primeiros ensaios não correram de acordo com o esperado devido a um problema de extração da peça. Apesar de o material escoar com facilidade sobre a matriz, quando o punção atingia o fim-de curso e a peça estava completamente estampada, esta encontrava-se muito apertada e presa ao punção, o que fazia com que não tocasse na parede da matriz

que forçaria a extração da peça quando o punção realizasse o movimento de recuo, trazendo a peça agarrada a este (ver figura 6.2).



Figura 6.2 - Peça presa ao punção de estampar na posição de recuo.

Vários fatores poderiam estar a provocar este problema, como a folga entre punção e matriz ser a incorreta ou não de acordo com o projeto, o que não poderia ser pois todos componentes foram medidos após os respetivos processos de maquinagem pela equipa de controlo de qualidade da empresa. Outra razão seria o surgimento de vácuo, como explicado no capítulo 2.1.6.8, em que a peça tende a colar-se ao punção. Desta forma, a ação corretiva para resolução deste problema foi introduzir canais de ar no punção para permitir a extração do ar entre a base do punção e o fundo do estampado e facilitar a saída. Como o punção de estampar é constituído por aço temperado de elevada dureza, os furos foram executados na máquina de eletro-erosão drill, um na direção axial do punção e outro transversalmente.



Figura 6.3 - Punção de estampar com canais de ar.

Realizaram-se novos testes com as alterações aplicadas e não se verificaram melhorias, pois a peça continuou a ficar colada ao punção, sendo necessário desmontar a ferramenta para forçar a extração da peça manualmente.

Portanto, foi necessária outra ação corretiva para a resolver este problema. Inicialmente considerou-se a hipótese de adicionar à ferramenta componentes que provocassem a extração da peça através do contacto forçado, mas seria uma ação mais complexa e demorada. Resolveu-se, então, alterar os punções de estampar para o formato cónico, de forma a existir uma zona da parede da peça que não contactasse com o punção e, assim, facilitar a extração da peça com menor esforço (ver figura 6.4).

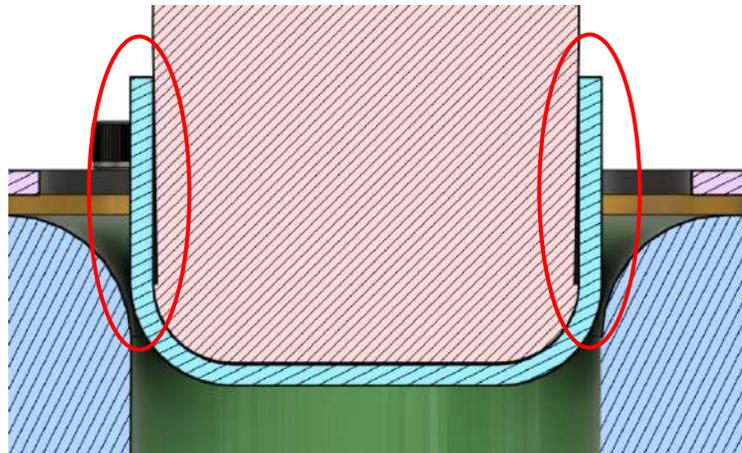


Figura 6.4 - Desenho CAD com vista da secção transversal do punção de estampar com conicidade.

Esta solução não resolveu o problema de o material continuar a colar-se ao punção, no entanto, facilitou a extração da peça manualmente sem necessidade de desmontar a ferramenta da máquina.

Sendo assim, prosseguiu-se com os ensaios, tendo completado a estampagem da primeira etapa de todas as amostras. Infelizmente, quando se estava a finalizar os ensaios da segunda etapa de estampagem, ocorreu um acidente no processo, em que a peça e o punção ficaram presos no interior da matriz. A força resistente foi tal que a 'parede' que separava a cabeça do parafuso do punção de estampar partiu, e desta forma, danificou a placa superior tornando a ferramenta inutilizável.



Figura 6.5 - Punção e peça presos na matriz de estampar.

Infelizmente, não foi possível continuar com os ensaios devido à falta de tempo e de recursos para proceder às correções necessárias à ferramenta e maquinação de uma nova placa, o que significa que o ensaio da etapa de ironing não foi executado. Portanto, servem para estudo as amostras obtidas nos dois ensaios de estampagem.



Figura 6.6 - Peças obtidas em cada etapa de estampagem dispostas sequencialmente.

Na figura 6.6 observa-se a evolução da peça, da esquerda para a direita, partindo do esboço (1), primeira etapa de estampagem (2) até obter a forma após a segunda etapa de estampagem (3).

Não se observa qualquer rotura ou defeito em nenhuma peça, tal como se tinha previsto na análise do gráfico FLC da figura 4.30, e apresentando um aspeto aceitável para peças obtidas em processos de estampagem.



a)



b)

Figura 6.7 - Amostra obtida após segunda etapa de estampagem.

Na figura 6.7 a) observa-se uma zona com superfície 'polida' junto à aresta superior da peça e outra no interior da taça na zona que contacta com o raio de concordância do punção, e que corresponde a maior estiramento do material devido a estados de tensão de compressão. Relativamente à aresta superior, o aspeto deve-se a ter ocorrido o fenómeno de ironing pois o valor da espessura da chapa nessa zona terá ultrapassado o valor da folga entre as ferramentas.

Pelo contrário, observa-se uma zona mais rugosa na superfície contrária às superfícies brilhantes, devido a tensões de tração (ver figura 6.7 b)).



Figura 6.8 - Vista interior da taça.

Observa-se também uma pequena tendência para formar 'orelhas', mas sem relevância, o que demonstra a reduzida anisotropia do material.

Na figura 6.9 apresenta-se a secção transversal de uma peça cortada, no sentido de avaliar a variação da espessura da chapa, e o resultado visual é satisfatório. O fundo da taça ficou planificado e verifica-se uma redução de espessura no raio de concordância, e esta aumenta ao longo da parede da taça em direção à extremidade superior.



Figura 6.9 - Secção transversal de uma amostra.

Observa-se também uniformidade da variação da espessura em todo o diâmetro da amostra.

Na secção seguinte apresentam-se os resultados dimensionais das amostras.

6.2. RESULTADOS DIMENSIONAIS DA AMOSTRAS

A medição das amostras esteve limitada pelas características da própria peça e por não estarem disponíveis nem terem fabricado calibre próprios. Tendo em conta que na simulação registaram-se o diâmetro interno, o diâmetro externo e altura da peça, apenas foram medidas estas características. Para tal foram utilizados um paquímetro digital e máquina de medições por coordenadas para obter os resultados mais precisos possível.

Devido à variação de espessura, o diâmetro externo varia ao longo da peça, e desta forma, esta característica foi medida nos mesmos pontos nos quais se apresentaram os resultados numéricos (ver figura 6.10).



Figura 6.10 - Pontos onde se mediu o diâmetro externo.

Na tabela 6-1 são apresentados os valores médios registados em cada ponto (de acordo com a figura 6.10) para cada amostra. Devido ao acidente, apenas se obtiveram 7 amostras completas na segunda etapa de estampagem.

Não foi considerado realizar um estudo metrológico mais rigoroso pois não se justificava para a quantidade de amostras obtida nem esse é o objeto de estudo.

Tabela 6-1 – Registos médios em cada ponto correspondente ao diâmetro externo.

Amostra	1	2	3
1	44.60	44.62	45.30
2	44.64	44.60	45.28
3	44.65	44.62	45.35
4	44.62	44.59	45.30
5	44.60	44.62	45.29
6	44.61	44.62	45.34
7	44.59	44.60	45.32
Média	44.62	44.61	45.31

Na tabela 6-2 apresentam-se os resultados relativos ao diâmetro interno.

Tabela 6-2 - Registos médios em cada ponto correspondente ao diâmetro interno.

Amostra	1	2	3
1	39.70	39.42	39.70
2	39.74	39.40	39.68
3	39.75	39.42	39.75
4	39.72	39.39	39.70
5	39.70	39.42	39.69
6	39.71	39.42	39.74
7	39.69	39.40	39.72
Média	39.72	39.41	39.72

A espessura da chapa nestes 3 pontos de altura, na zona do raio de concordância e no fundo da taça foi a seguinte:

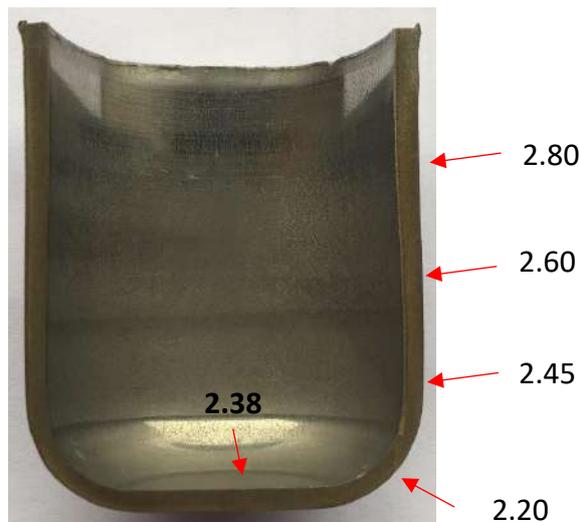


Figura 6.11 - Variação da espessura da chapa.

A altura da chapa não foi fácil determinar devido à pequena irregularidade provocada pela formação de orelhas, variando entre 55 e 56 mm de altura.

6.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Nesta secção realiza-se uma comparação entre os resultados apresentados na secção anterior e os resultados numéricos do capítulo 4. Servem de comparação os valores apresentados na figura 4.20 a) os resultados da simulação com elementos 3D.

Na tabela seguinte, ao lado de cada resultado numérico está o erro obtido em relação ao resultado experimental.

Tabela 6-3 - Comparação entre resultados numéricos e os resultados experimentais – Diâmetro e altura [mm].

Característica	Simulação 2D		Simulação 3D		Real
	Valor	Erro	Valor	Erro	
Diâmetro externo 1	44.92	0.7%	45.20	1.3%	44.62
Diâmetro externo 2	45.16	1.2%	45.26	1.5%	44.61
Diâmetro externo 3	45.32	0.0%	45.26	-0.1%	45.31
Diâmetro interno 1	39.90	0.5%	39.70	-0.1%	39.72
Diâmetro interno 2	39.68	0.7%	39.66	0.6%	39.41
Diâmetro interno 3	39.70	-0,1%	39.68	-0.1%	39.72
Altura	54.80	-1.3%	56.50	1.8%	55.50

Na figura 6.12 apresentam-se os pontos para comparar os valores da espessura chapa ao longo da taça.

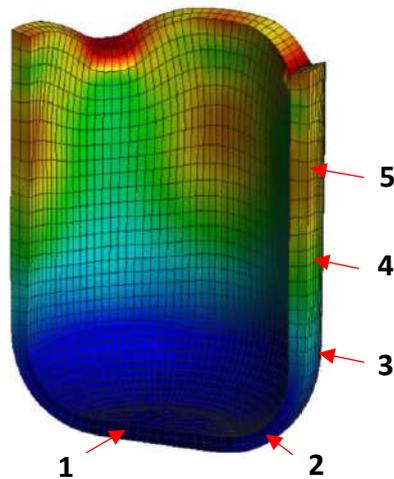


Figura 6.12 - Ponto para comparar valores da espessura da chapa.

Na tabela seguinte apresentam-se então os resultados obtidos na análise numérica e experimental, além do erro obtido.

Tabela 6-4 - Comparação entre resultados numéricos e os resultados experimentais – espessura da chapa [mm]

Ponto	Simulação 2D		Simulação 3D		Real
1	2.43	2.1%	2.32	-2.5%	2.38
2	2.22	0.9%	2.21	0.5%	2.20
3	2.45	0.0%	2.79	13.9%	2.45
4	2.66	2.3%	2.80	7.7%	2.60
5	2.80	0.0%	2.75	-1.8%	2.80

6.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Concluída a comparação entre resultados, é necessário analisar e tirar conclusões quanto à utilidade da simulação numérica. Como se viu na secção anterior, os resultados numéricos, em geral, tiveram uma taxa de erro reduzida em todas as características em estudo, principalmente a análise com elementos 2D. A análise com elementos 3D obteve uma taxa de erro ligeiramente superior, principalmente na variação de espessura.

Relativamente aos resultados experimentais, foi notório que os problemas relacionados com a colagem da peça ao punção influenciaram claramente os resultados finais em comparação com a análise numérica. A característica mais prejudicada foi o diâmetro externo e, tendo conta a margem de erro, os resultados teriam sido mais aproximados se as condições de ensaio tivessem corrido como o esperado.

A variação da espessura da chapa correspondeu claramente à simulação no que toca à resposta do material em cada zona da peça. O fundo da taça e o raio de canto diminuíram em espessura, e a parede da taça foi ao aumentando de espessura em direção à extremidade superior.

Outro fator importante foi a análise do risco de rotura da chapa através das deformações obtidas com o diagrama limite de estampagem. A decisão de determinar o número de etapas através do coeficiente limite de estampagem e depois confirmar em simulação, demonstrou ser a acertada do ponto de vista da obtenção de sucesso no processo sem aparecimento de defeitos na peça.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho desenvolvido demonstra a grande influência que estas ferramentas podem ter no sucesso de um projeto para o fabrico de uma determinada peça, em que se conseguiu fabricar um componente sem defeitos e muito próximo da qualidade pretendida, de acordo com a análise numérica desenvolvida pela ferramenta CAE. Uma empresa que disponha este tipo de ferramenta pode enfrentar desafios e requisitos de maior dificuldade relacionados com peças e materiais fora da sua 'zona de conforto' com maior confiança.

O trabalho de pesquisa realizado inicialmente foi também determinante na tomada de muitas decisões, como o número de etapas de estampagem, a geometria das ferramentas e técnicas de projeto. Ajudou na compreensão do comportamento do material neste tipo de processos, os possíveis defeitos e na posterior análise do trabalho. O estudo sobre anisotropia permitiu realizar simulação com elementos finitos bidimensionais e assim simplificar o estudo, o que se veio a confirmar eficiente.

Contudo, os ensaios experimentais demonstraram a importância de replicar o processo o mais similar possível à simulação realizada. Alguns parâmetros foram controlados e cumpridos de acordo com o projeto, como a geometria das ferramentas e a folga de estampagem, mas por outro lado, fatores como o atrito, a velocidade de estampagem e as propriedades reais do material, não houve forma de controlar e verificar. Isto significa que existem fatores de ruído que prejudicam a eficiência das simulações e que se deve minimizar o máximo possível. Simultaneamente, os ensaios experimentais foram importantes para validar o estudo numérico, o que demonstra que os dois estudos complementam-se e necessitam da informação que cada um fornece para melhorias futuras.

Em geral, o trabalho desenvolvido forneceu muita informação útil e novas aprendizagens sobre o processo de estampagem profunda e simulação numérica, com a qual a empresa poderá encarar no futuro as solicitações de fabrico de peças similares com maior confiança e mais conhecimento.

7.2. PERSPETIVAS E TRABALHOS FUTUROS

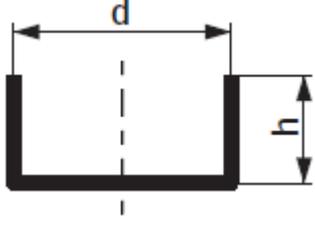
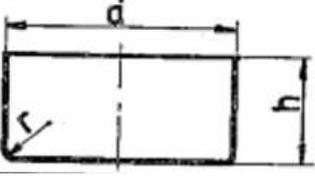
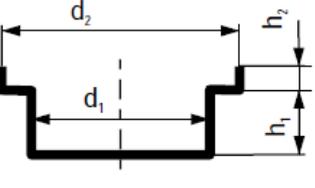
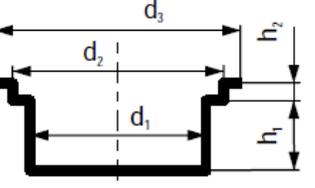
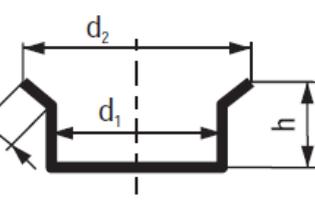
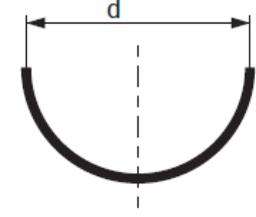
Como proposta de trabalho futuro seria interessante desenvolver novas simulações com diferentes valores de alguns parâmetros, como aumentar a folga de estampagem entre ferramentas e variar o tipo de raio de canto, no sentido de melhorar a eficiência nos resultados experimentais e o problema da extração da peça. O projeto da ferramenta softtool deveria também ser melhorado, nomeadamente alterar a placa superior de forma a evitar o problema que aconteceu, melhorar o sistema de extração e realizar os ensaios numa prensa hidráulica, tal como deveria ter sido realizado o presente trabalho.

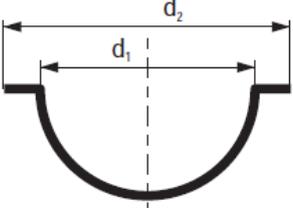
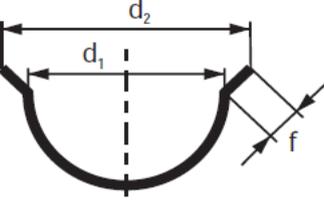
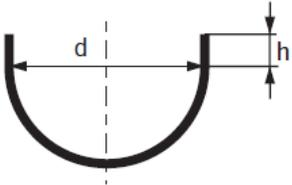
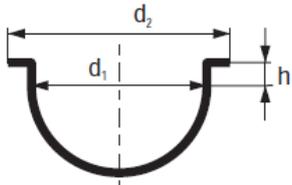
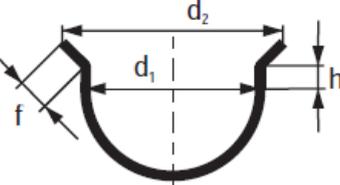
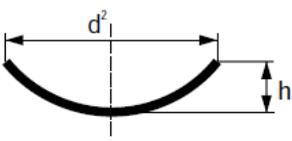
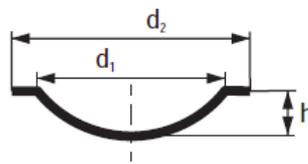
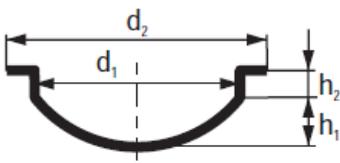
Conseguindo otimizar estes processos, o trabalho seguinte passaria por desenvolver o projeto para formar a peça final definitiva, ou seja, executar o processo de forjamento do furo repuxado, a extrusão da extremidade superior e a furação transversal, e posteriormente realizar ensaios experimentais.

ANEXOS

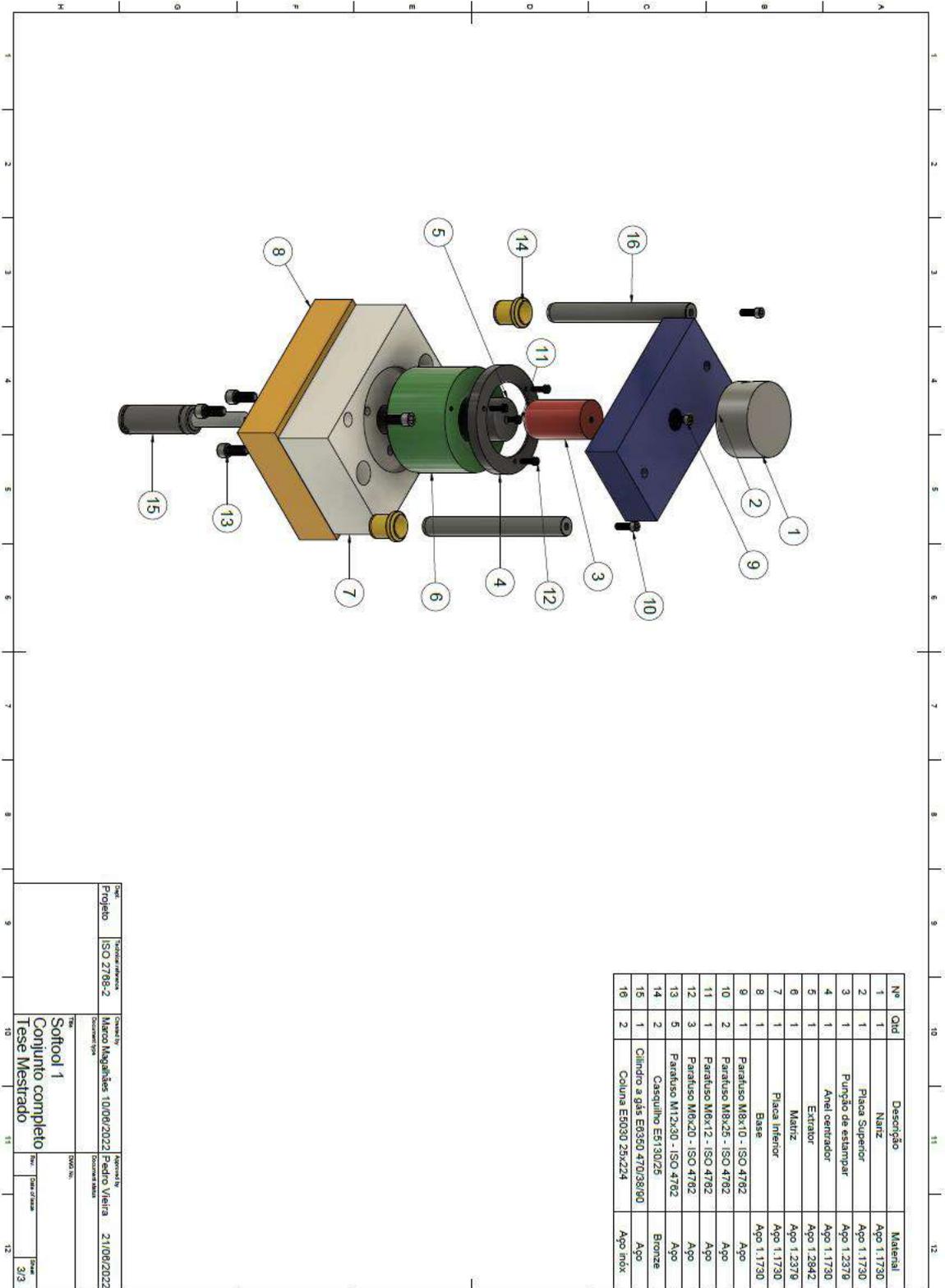
ANEXO A: FÓRMULAS PARA O DIÂMETRO DA ESTAMPA PLANA CIRCULAR

Tabela A-1 - Secção transversal de peças axissimétricas - Fórmulas para calcular diâmetro da estampa plana.

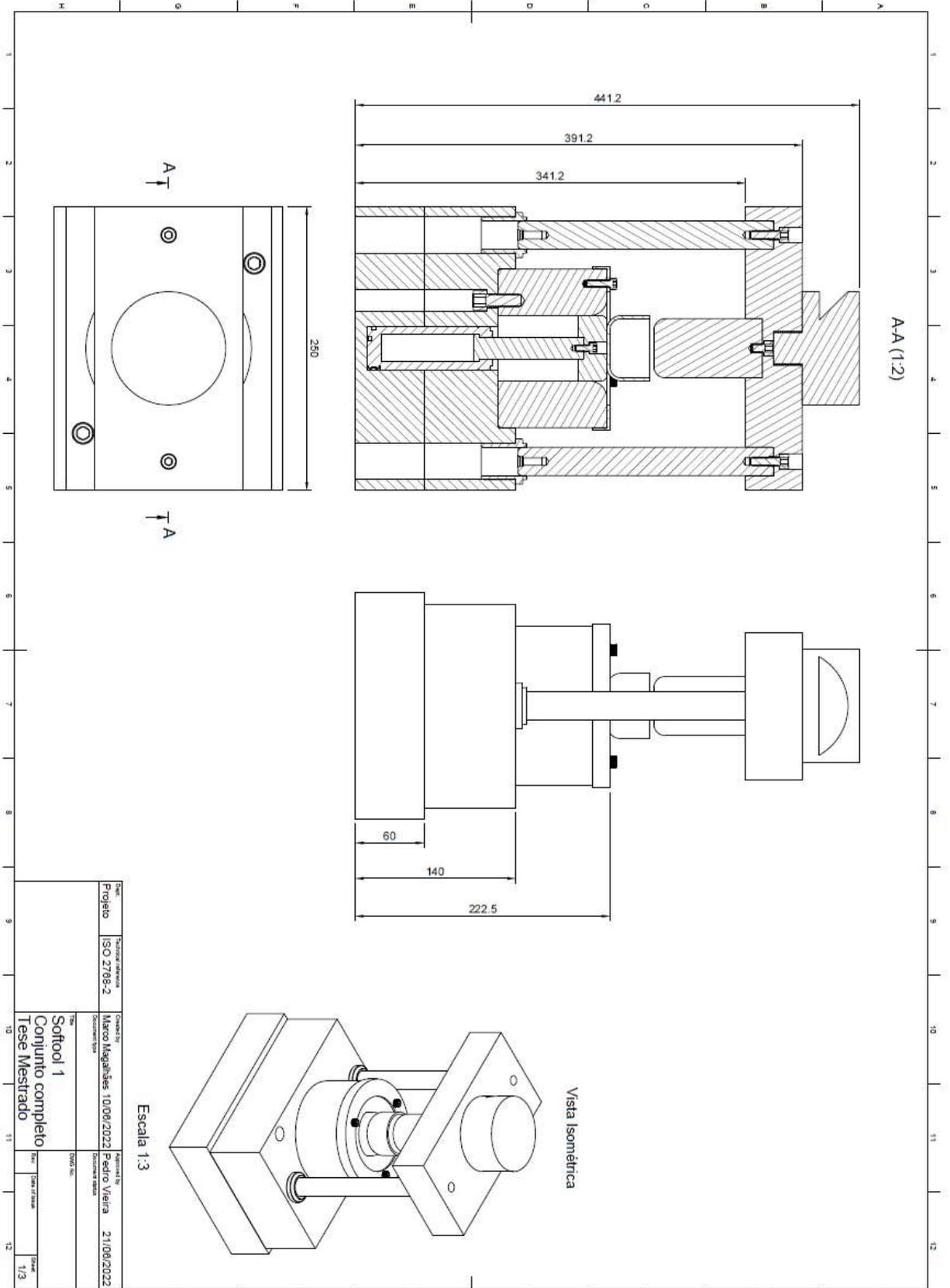
	$\sqrt{d^2 + 4dh}$
	$\sqrt{d^2 + 4dh - r}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4(d_1h_1 + d_2h_2)}$
	$\sqrt{d_3^2 + 4(d_1h_1 + d_2h_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4d_1h + 2f(d_1 + d_2)}$
	$1.414d$

	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$
	$1.414\sqrt{d_1^2 + f(d_1 + d_2)}$
	$1.414\sqrt{d^2 + 2dh}$
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4d_1h}$
	$1.414\sqrt{d_1^2 + 2d_1h + f(d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d^2 + 4h^2}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4h^2}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4(h_1^2 + d_1h_2)}$

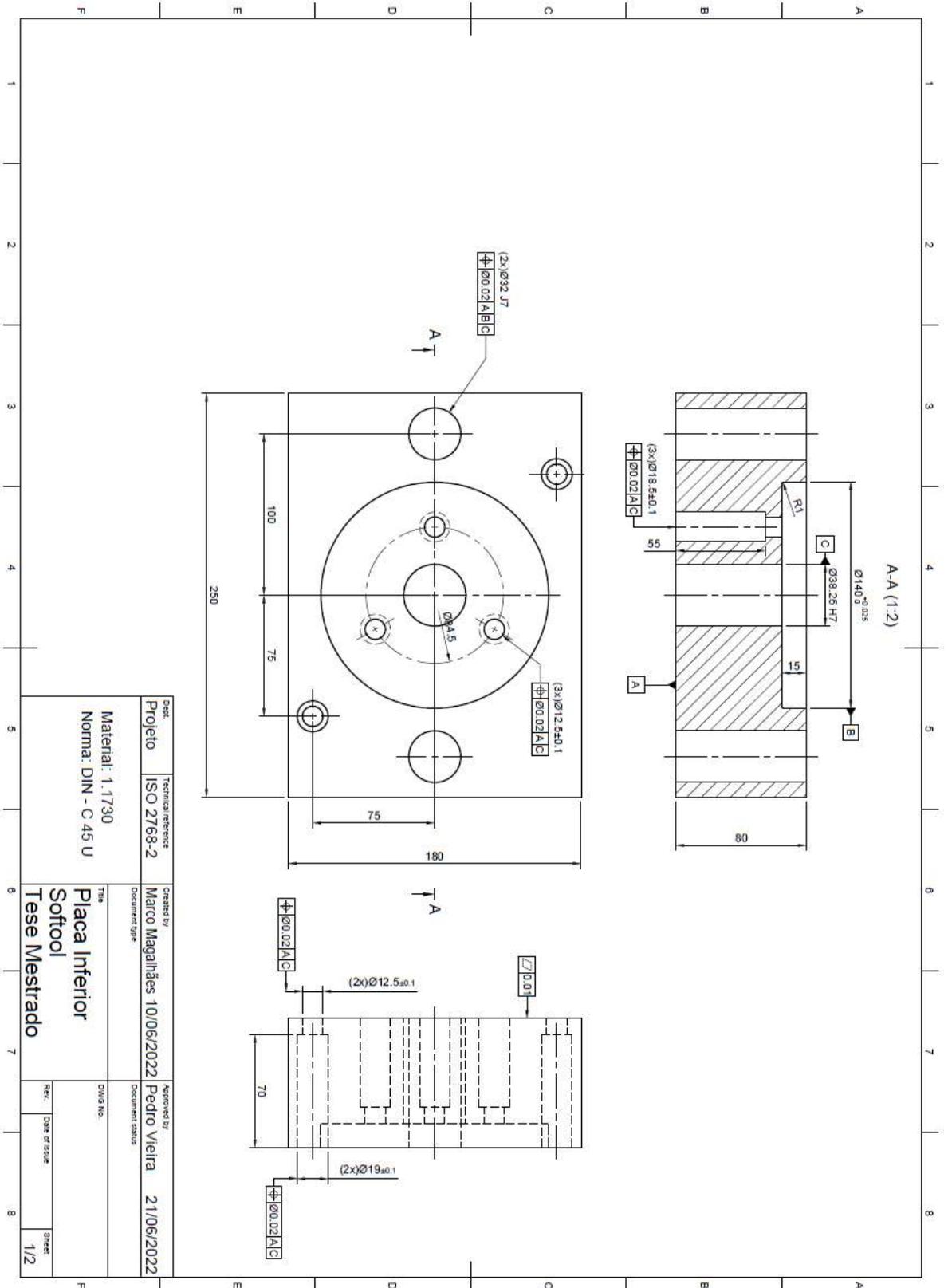
ANEXO B: DESENHOS TÉCNICOS DA FERRAMENTA SOFTOOL



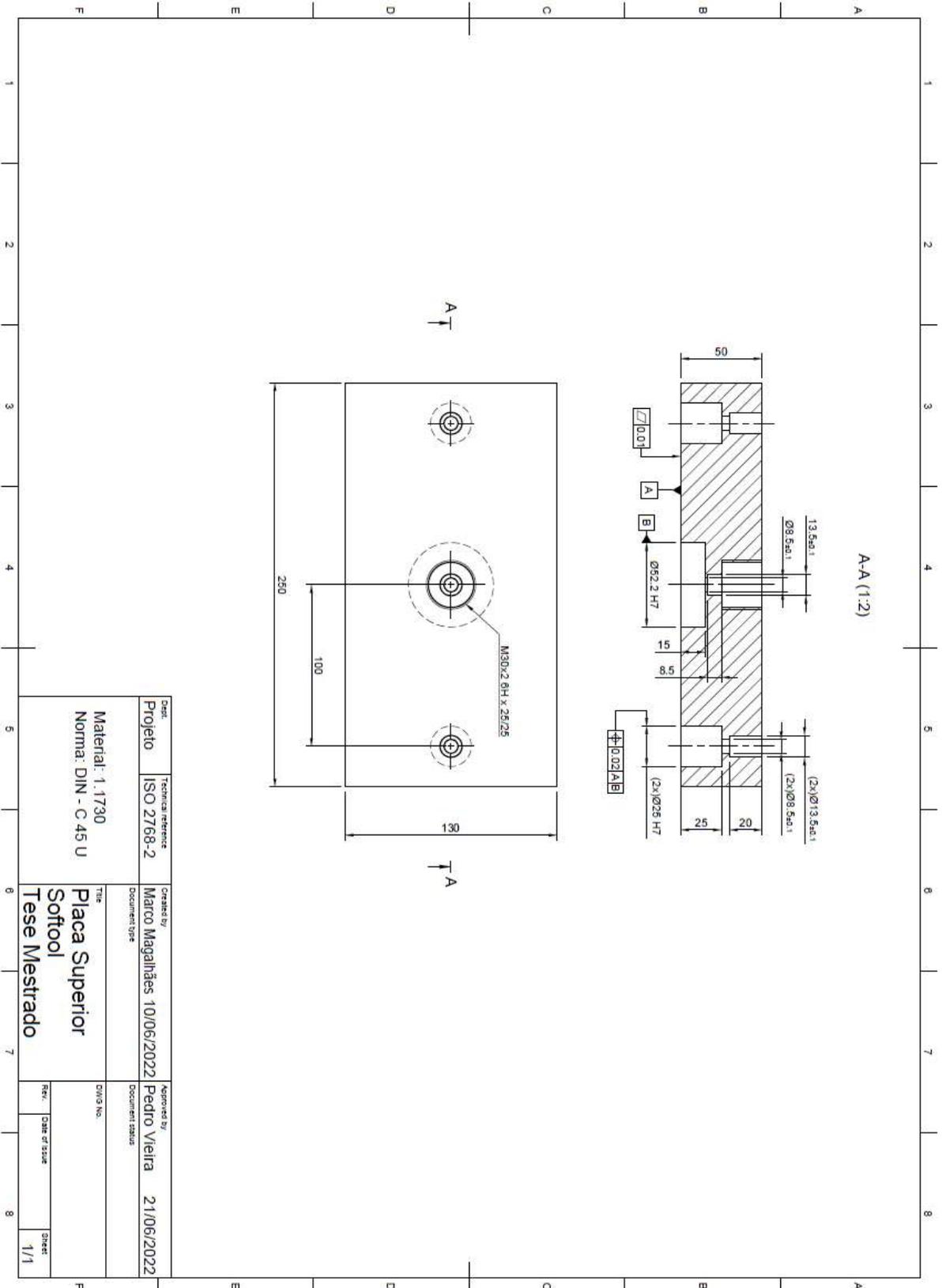
Utilização de ferramentas CAE no projeto do fabrico de um estampado profundo metálico

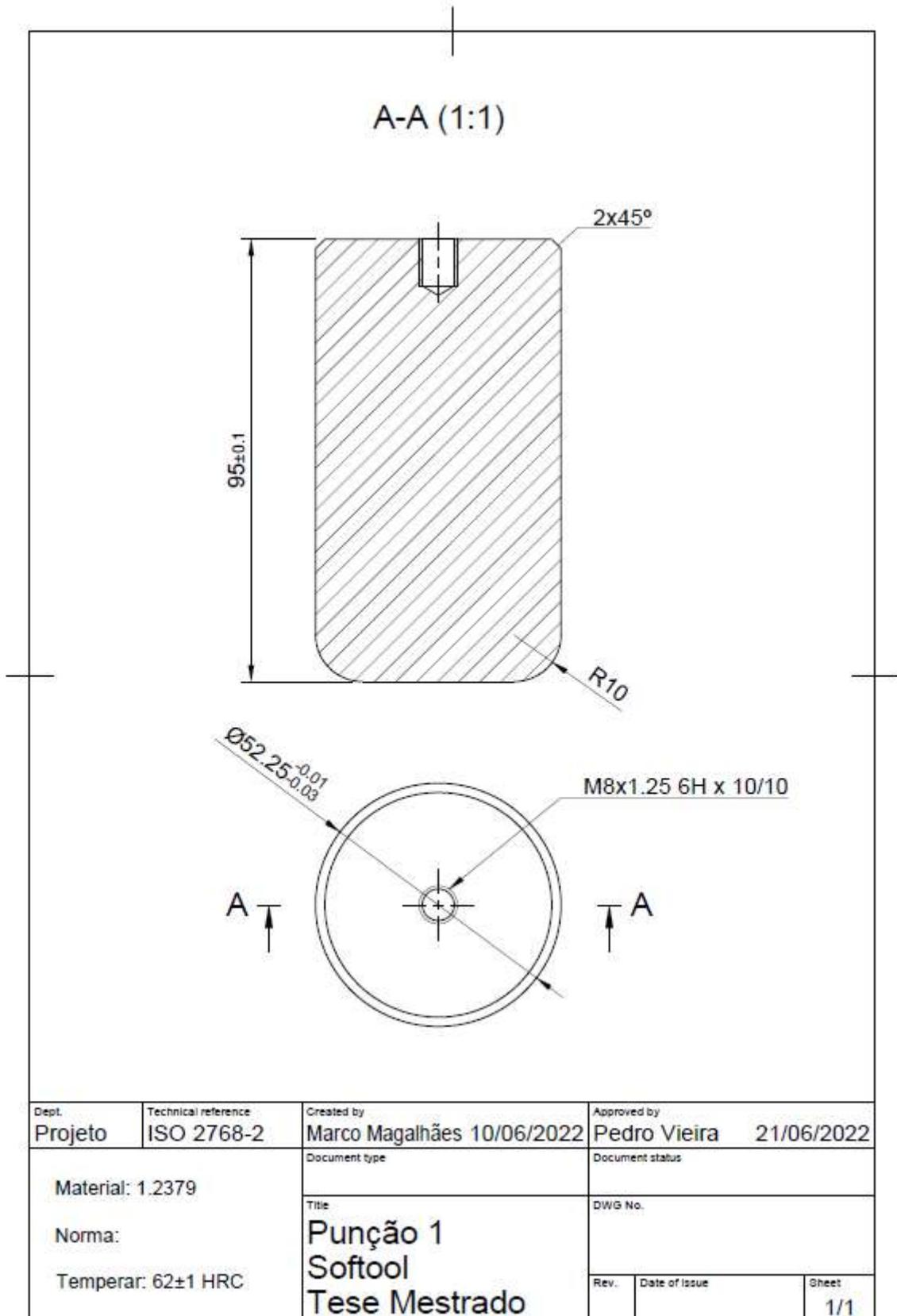


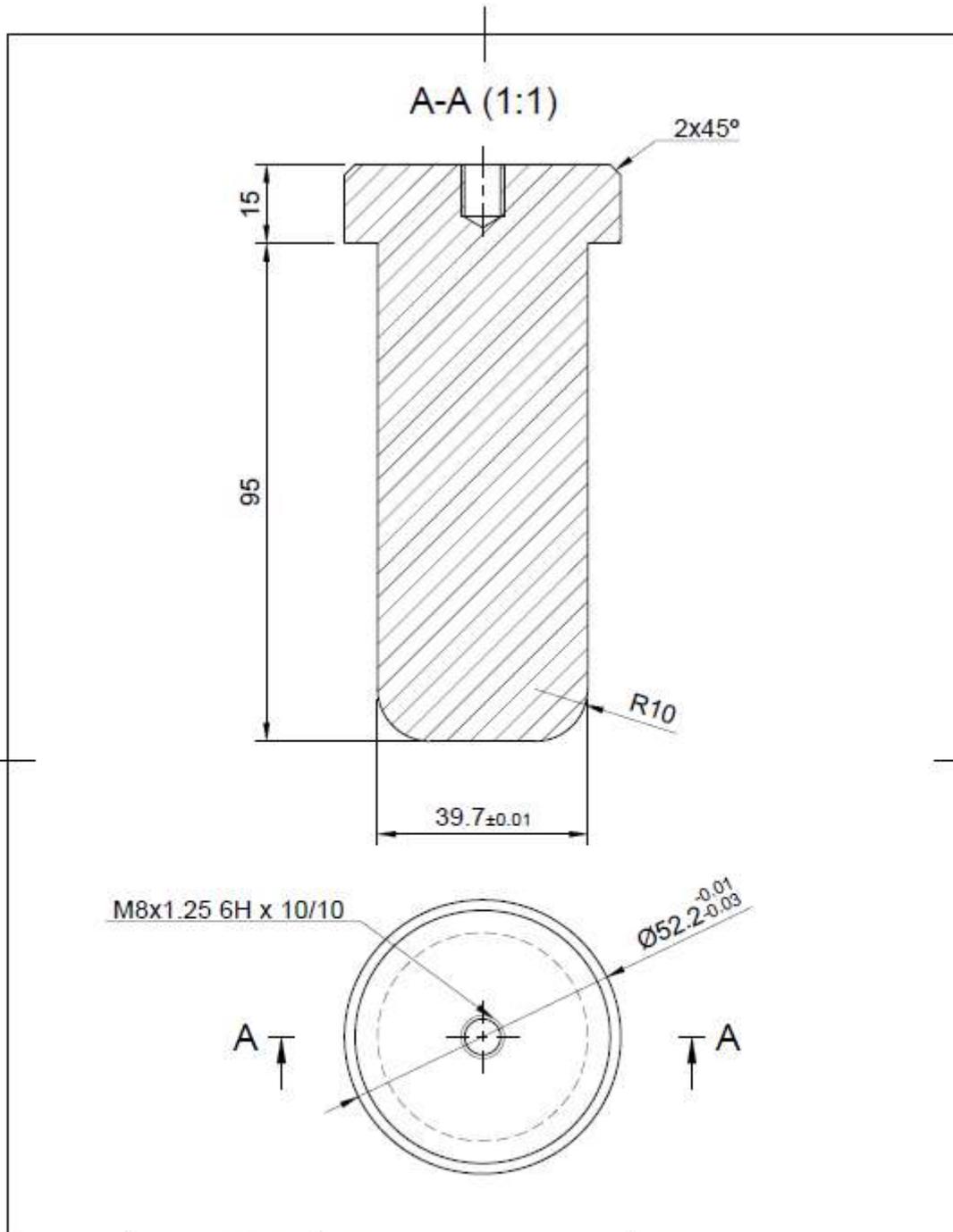
Utilização de ferramentas CAE no projeto do fabrico de um estampado profundo metálico



Utilização de ferramentas CAE no projeto do fabrico de um estampado profundo metálico

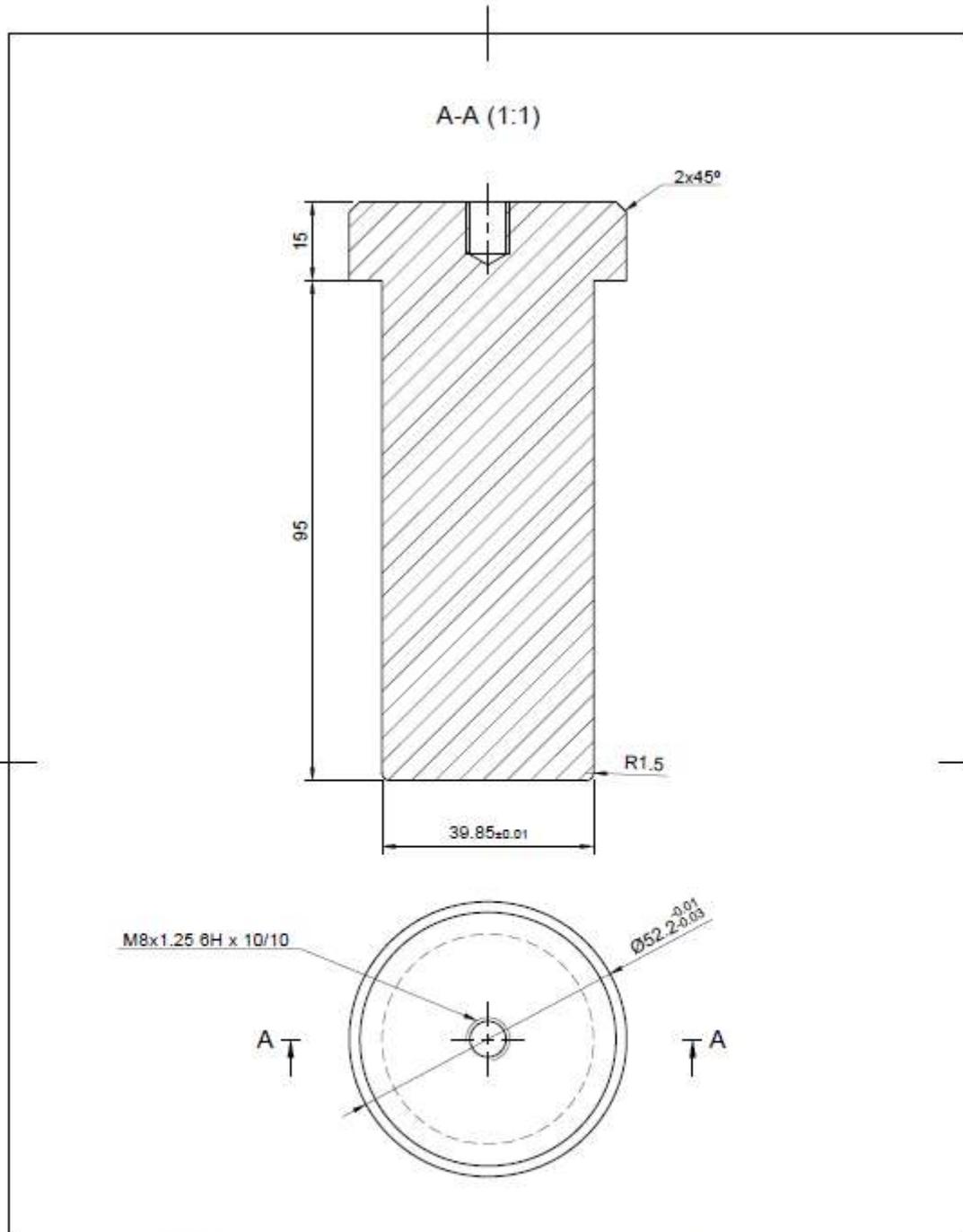




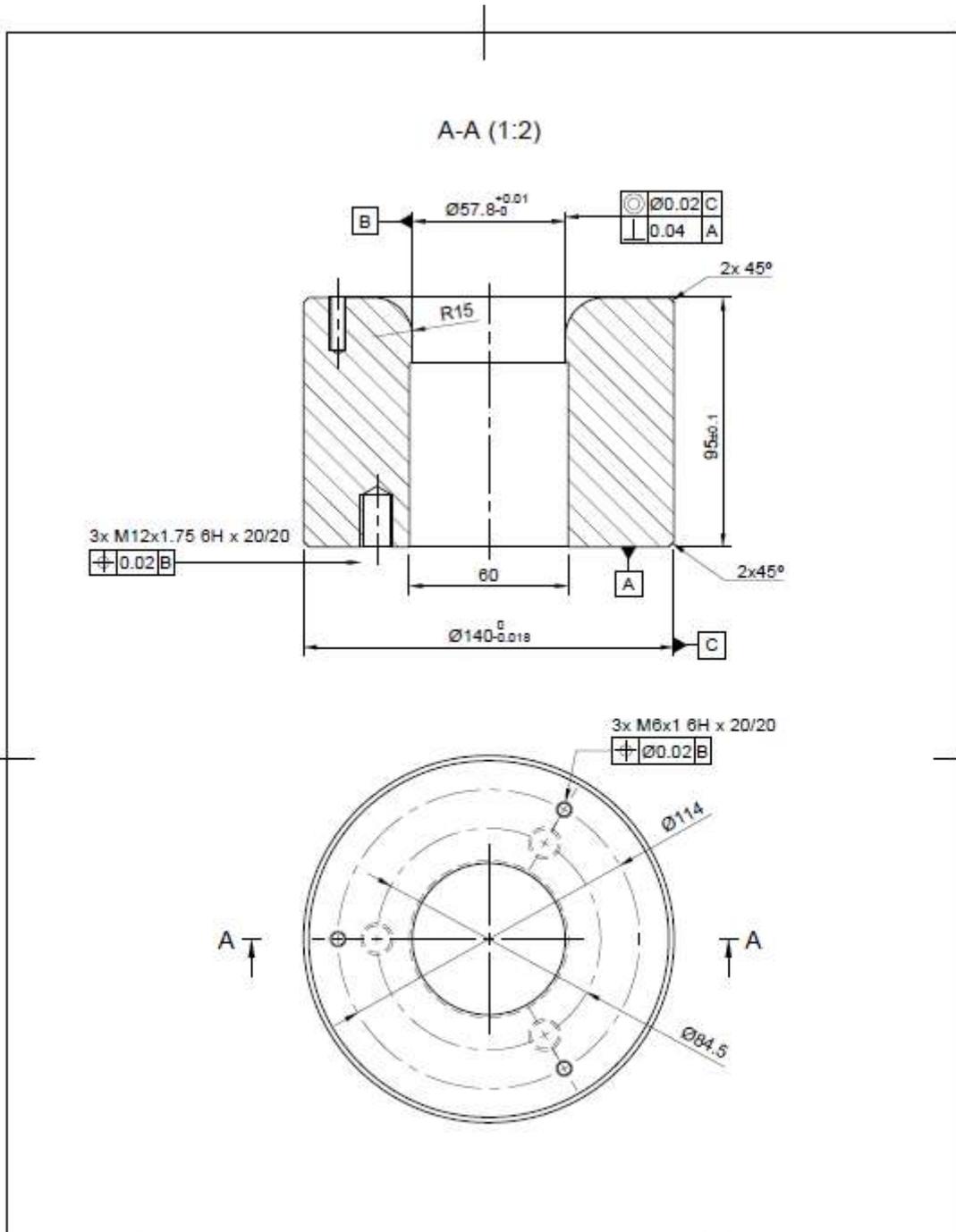


Dept. Projeto	Technical reference ISO 2768-2	Created by Marco Magalhães 17/06/2022	Approved by Pedro Vieira 21/06/2022
Material: 1.2379 Norma: Temperar: 62±1 HRC	Document type	Document status	
	Title Punção 2 Softool Tese Mestrado	DWG No.	
	Rev.	Date of Issue	Sheet 1/1

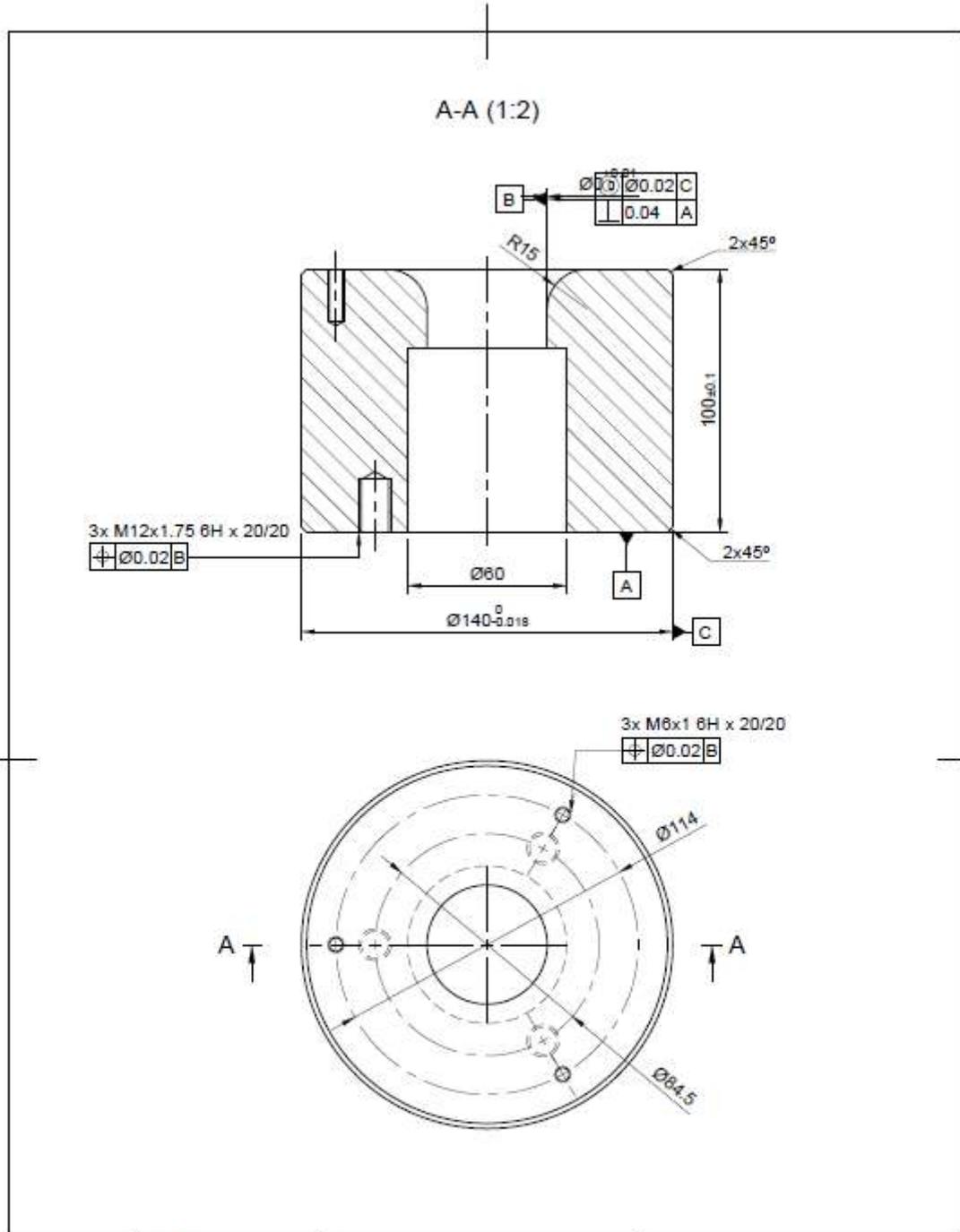
Utilização de ferramentas CAE no projeto do fabrico de um estampado profundo metálico



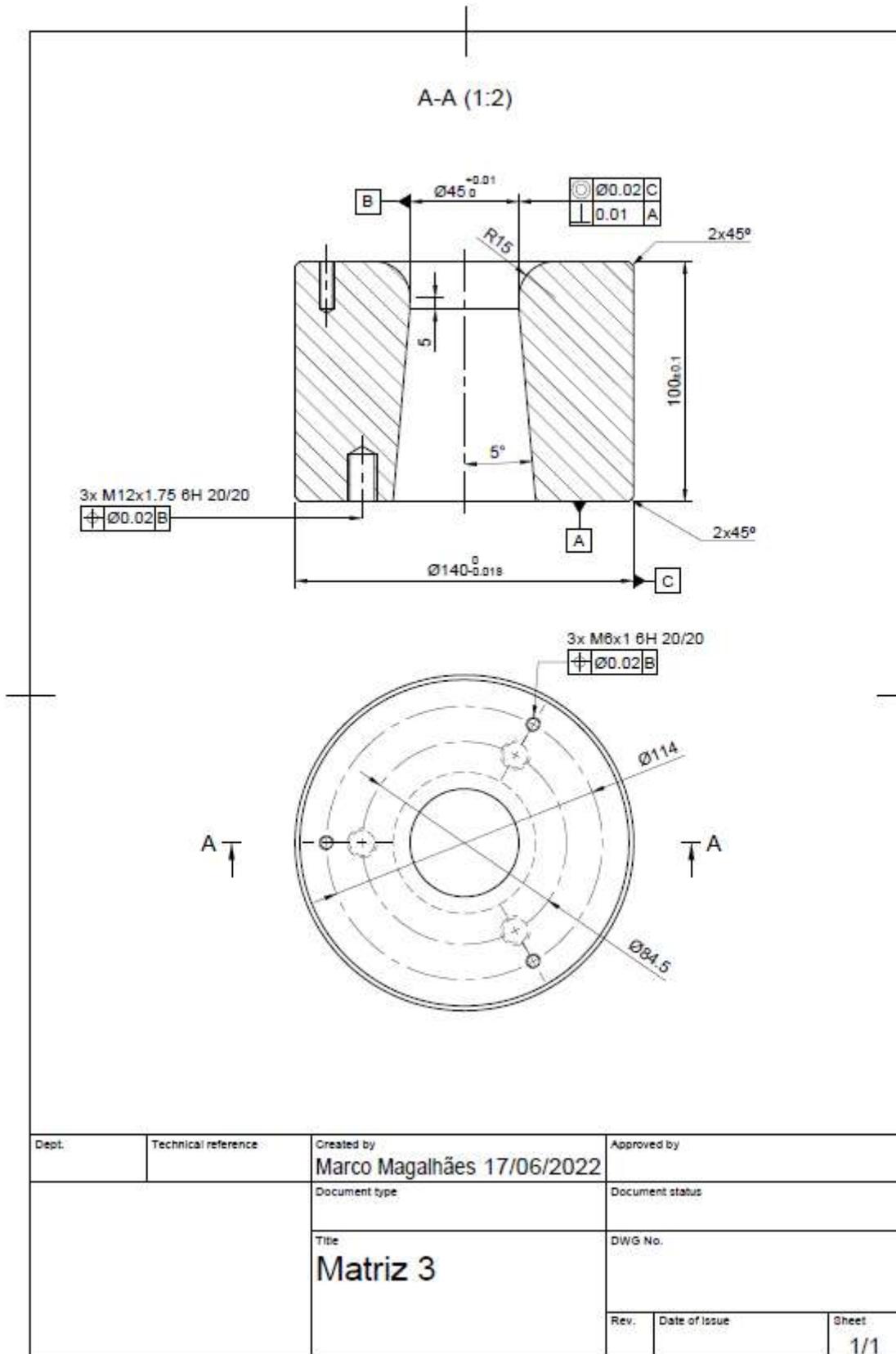
Dept. Projeto	Technical reference ISO 2768-2	Created by Marco Magalhães 17/06/2022	Approved by Pedro Vieira 21/06/2022
Material: 1.2379 Norma: Temperar: 62±1 HRC	Document type	Document status	
	Title Punção 3 Softool Tese Mestrado	DWG No.	
	Rev.	Date of Issue	Sheet 1/1

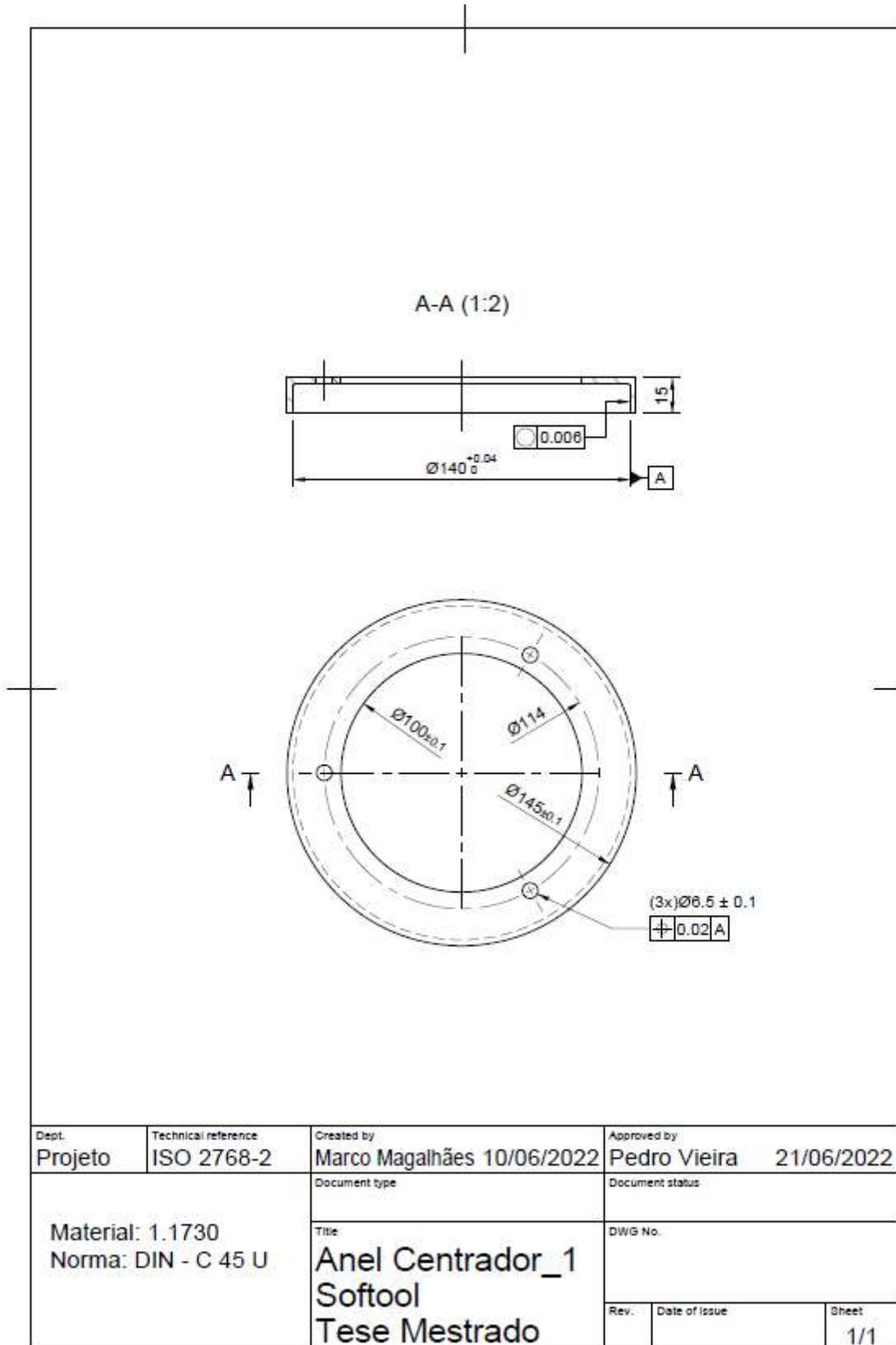


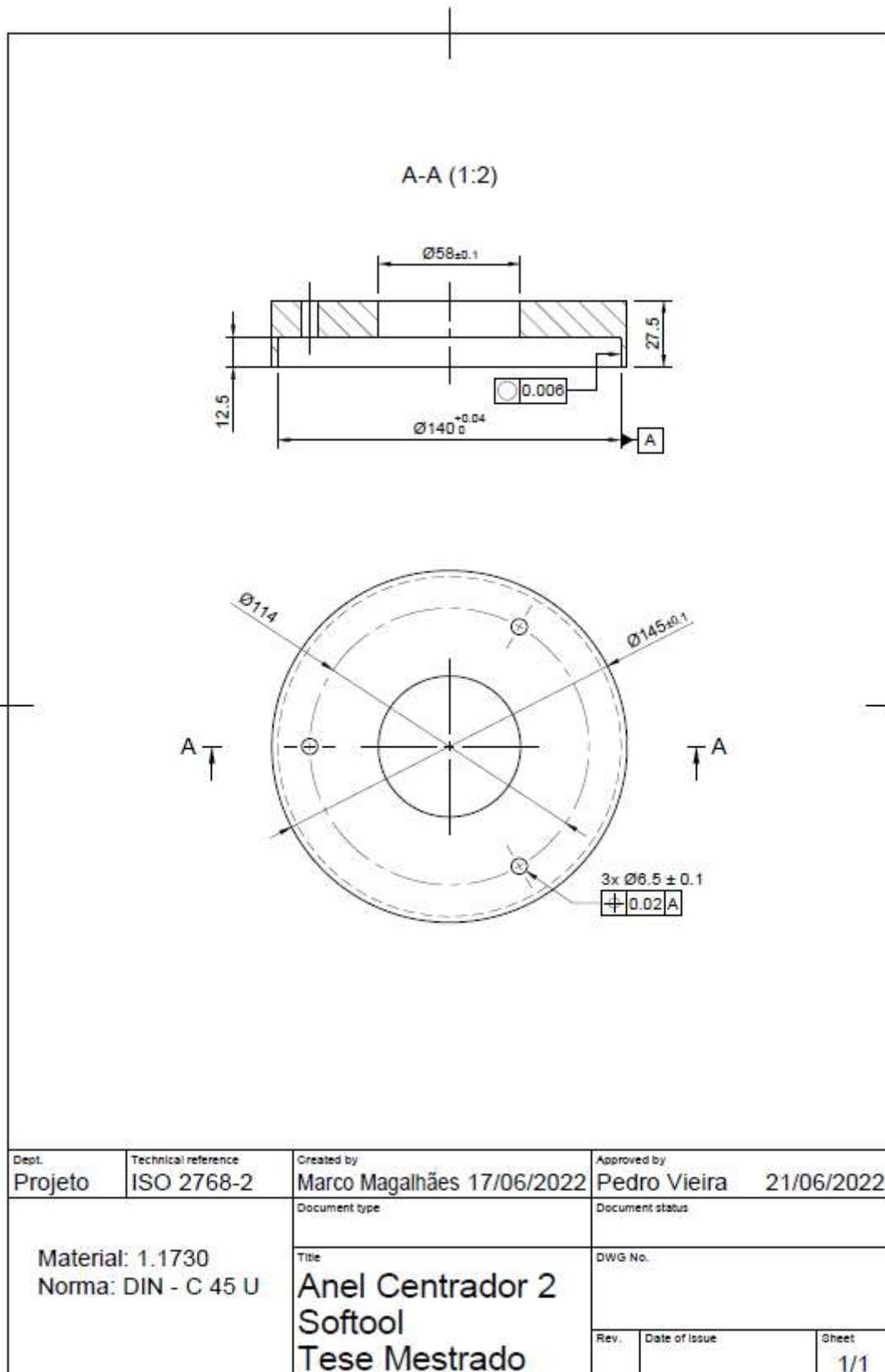
Dept. Projeto	Technical reference ISO 2768-2	Created by Marco Magalhães 10/06/2022	Approved by Pedro Vieira 21/06/2022
Material: 1.2379 Norma: Temperar: 62±1 HRC	Document type	Document status	
	Title Matriz 1 Softool Tese Mestrado	DWG No.	
	Rev.	Date of issue	Sheet 1/2

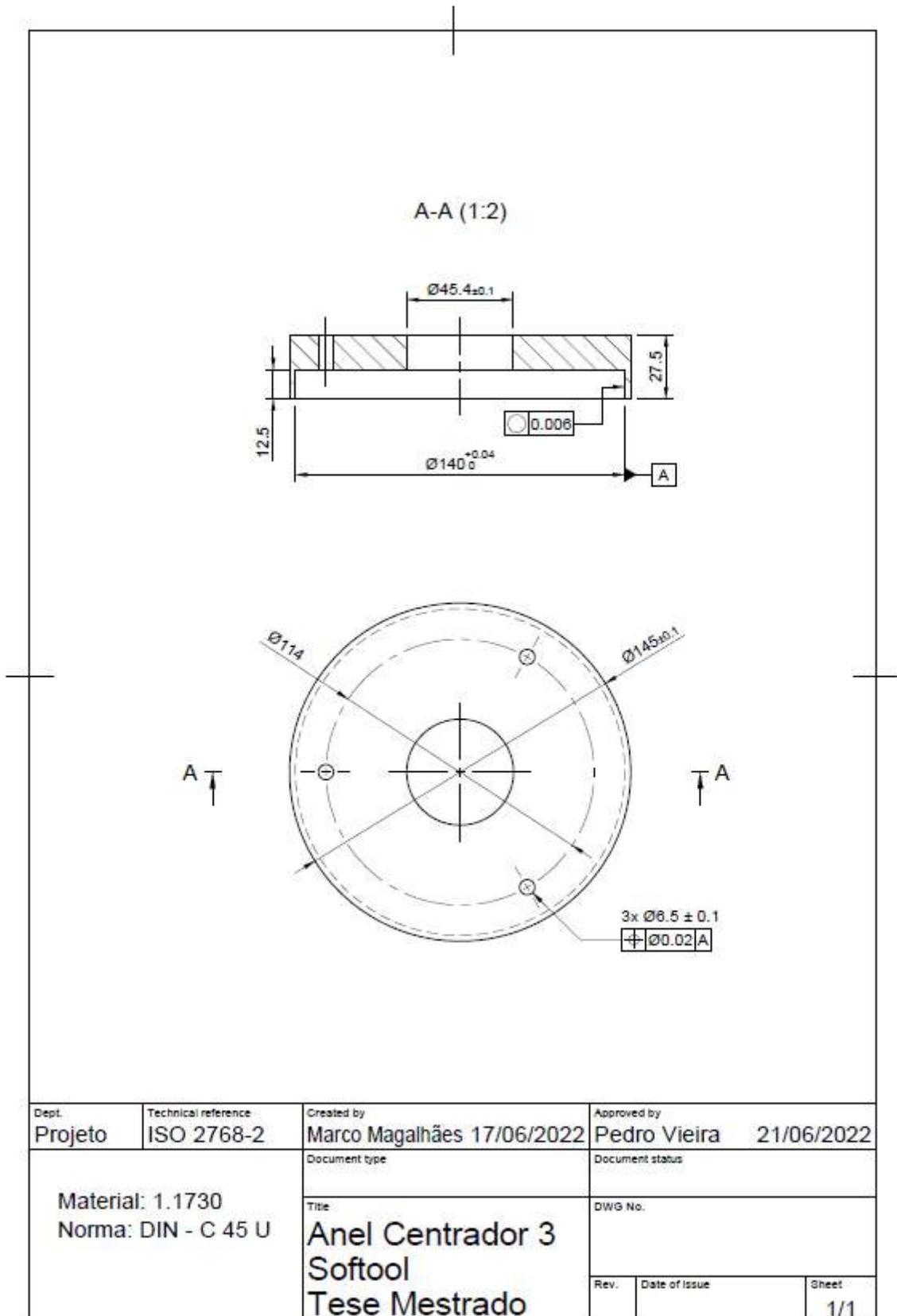


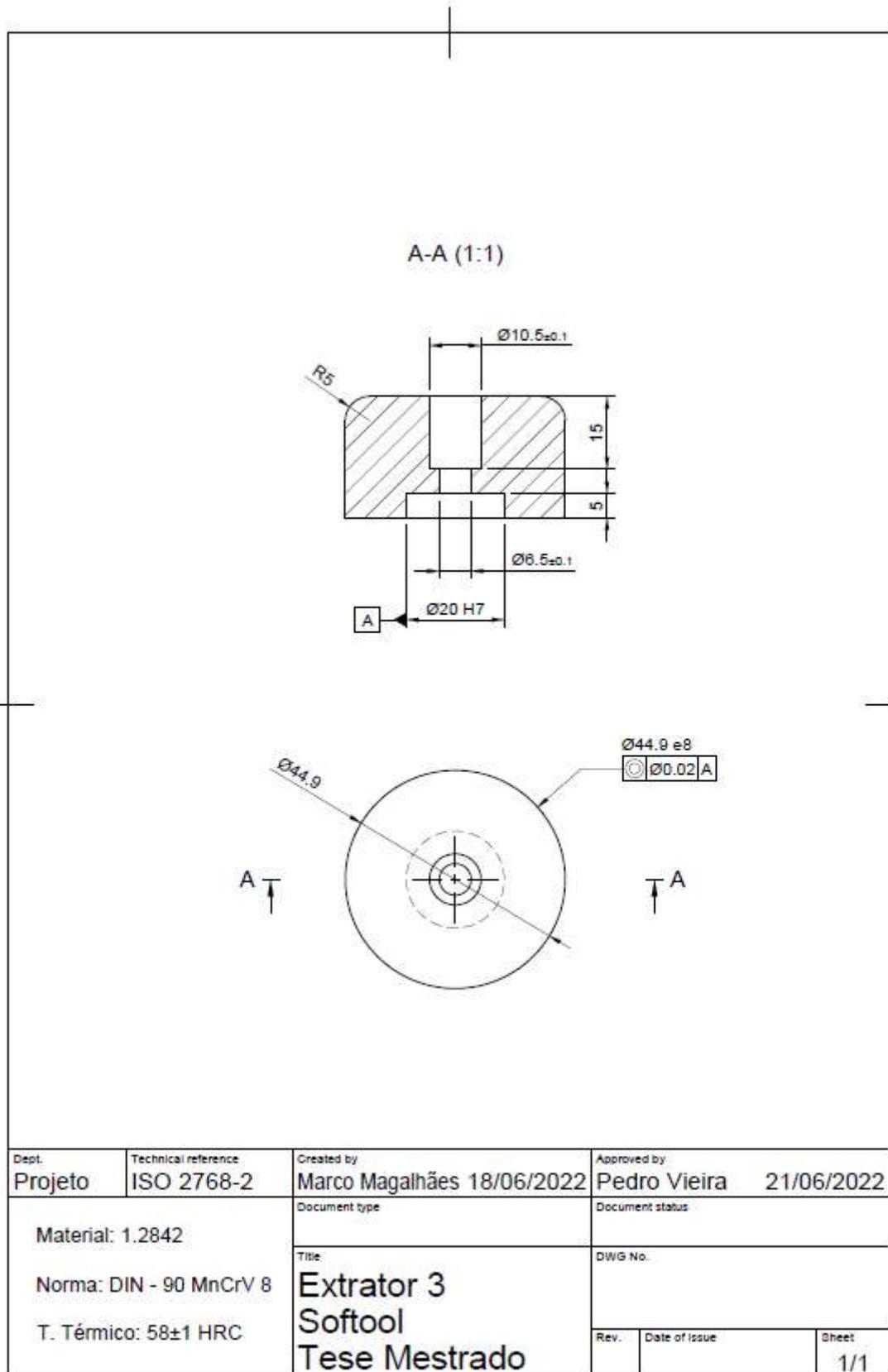
Dept. Projeto	Technical reference ISO 2768-2	Created by Marco Magalhães 17/06/2022	Approved by Pedro Vieira 21/06/2022
Material: 1.2379		Document type	Document status
Norma:		Title Matriz 2	DWG No.
Temperar: 62±1 HRC		Softool	Rev.
		Tese Mestrado	Date of issue
			Sheet 1/1







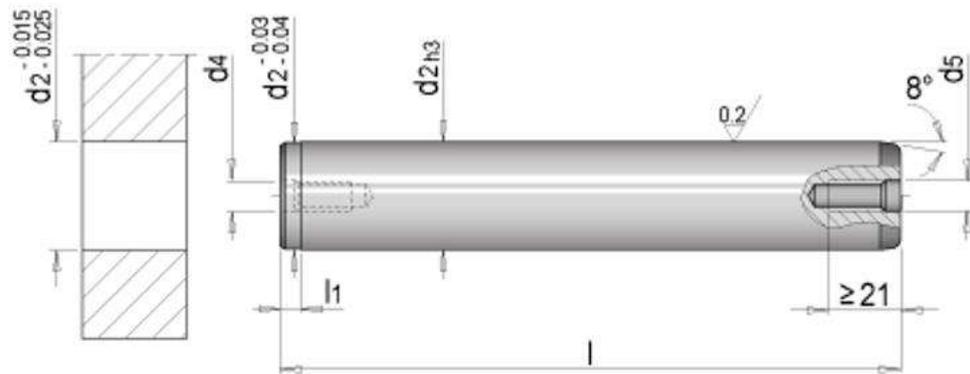




ANEXO C: FICHAS TÉCNICAS DOS COMPONENTES NORMALIZADOS

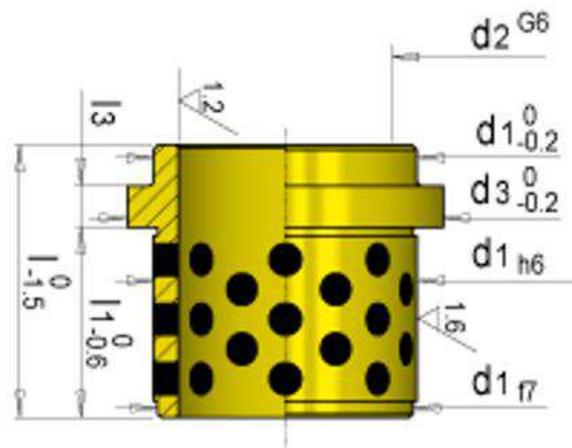
Catálogo Meusburger

Coluna de guiamento – ISO 9825 – E5030/25x224



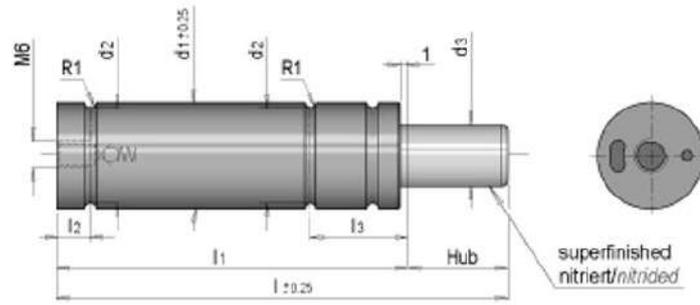
l1	d4	d5	d2	l	Nr.
3	M 8	M 8	25	224	E5030/25x224

Casquilho de bronze – ISO 9448 – E5130/25



d1	d3	Tk	E 5276	l	l1	l3	d2	Nr.
32	40	58	E5276/6/6.3	40	30	6.3	25	E5130/25

Cilindro a gás



d2	d3	l	l1	l2	l3	l4	P[bar]	F0[daN]	d1	Hub	Nr.
17	20	190	110	2	10.5	3.5	150	470	38	80	E6350 470/38/80

BIBLIOGRAFIA

- ALVES, J. L. (2003) Simulação Numérica do Processo de Estampagem de Chapas Metálicas. Modelação Mecânica e Métodos Numéricos. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho.
- HSU, ULSOY, DEMERI (2002) Development of process control in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology* 127 (2002), 361-368.
- RODRIGUES, MARTINS, (2010) *Tecnologia da Deformação Plástica, Escolar Editora, 2ª Edição, Vol. 1 & 2.*
- SCHULER. (1998) *Metal Forming Handbook* ISBN 3-540-61185-1
- SUCHY, I. (1998) *Handbook of Die Design, McGraw-Hill, 2ª Edition.*
- ROSSI, M. (1972) *STAMPAGGIO. A freddo delle lamiere, Hoepli, Decima Edizione.*
- KOHARA, S. (1993) *Effects of prestraining and annealing on the forming limit curve of aluminium, in Advances in Engineering Plasticity and its Applications.*
- MARCINIAK, DUNCAN, HU (2002) *Mechanics of Sheet Metal Forming, Butterworth Heinemann, 2ª edição.*
- RAO, P. N. (1998) *Manufacturing Technology, McGraw-Hill, 2ª Edition.*
- ZIENKIEWICZ, TAYLOR, ZHU. (2005) *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals Sixth ed. Butterworth-Heinemann.*
- ALVES, J. L. (2010) *Elastoplasticidade. Modelação constitutiva.* Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho.
- TISZA, KOVACS (2012) *New methods for predicting the formability of sheet metals.* Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. *Journal of Production Processes and Systems*, vol. 6. No. 1. pp. 45-54.
- NUNES, D. M. (2020) Projeto Mecânico de um sistema Tranfer. Tese de Dissertação em Engenharia Mecânica, Instituto de Ensino Superior de Engenharia do Porto.
- GONORING, ORLANDO, FERREIRA, SOUZA, MOREIRA (2019) Prediction of the uniaxial tensile plastic behavior of na interstitial free steel using diferente work-hardening equations. 56º Seminário de Laminação e Conformação de Metais, part of the ABM Week, São Paulo, SP, Brazil.