



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

António Pedro Oliveira Lopes da Costa Machado

Simulação de processos de conformação
multi-etapa: casos de aplicação com o *software*
DD3IMP



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

António Pedro Oliveira Lopes da Costa Machado

**Simulação de processos de conformação
multi-etapa: casos de aplicação com o *software*
DD3IMP**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

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

Ao Professor Doutor José Luís Carvalho Martins Alves pelo imenso apoio prestado e aconselhamento ao longo da redação desta dissertação, além de todo o conhecimento que me foi transmitindo e se revelou essencial para alcançar os objetivos aos quais me propus.

Aos meus amigos que tornaram os anos de passagem pela Universidade do Minho, os melhores da minha vida e sem eles não teria tido a motivação para atravessar este percurso.

À minha família, em especial aos meus pais, que sempre motivaram e possibilitaram a minha formação superior e as condições para o seu sucesso.

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 acted with integrity in the preparation of this academic work and confirm that I have not resorted to the practice of plagiarism or any form of misuse or falsification of information or results in any of the stages leading to its preparation.

I further declare that I know and have respected the Code of Ethical Conduct of the University of Minho.

Universidade do Minho, 28 de abril de 2023

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo desenvolver uma solução melhorada para a simulação de processos de conformação de chapa multi-etapa, no *software* DD3IMP, bem como a recolha de dados de vários casos de estudo, para disponibilizar exemplos práticos para os utilizadores do DD3IMP. Este *software* permite a simulação de processos de conformação de chapa a partir da aplicação do método de elementos finitos com formulação implícita.

Como ponto de partida para este tópico, apresentam-se os conceitos essenciais, para melhor compreender a conformação multi-etapa, de modo a apoiar a realização do trabalho e contextualizando o leitor para o mesmo. De seguida, apresentam-se os objetivos a atingir com este trabalho, uma breve descrição dos *softwares* utilizados, com especial enfoque no DD3IMP, seguido de um Guia de Leitura, para auxiliar o leitor na consulta do presente documento.

Posteriormente, é feita uma revisão de literatura acerca da conformação, a sua evolução e os seus processos, bem como uma contextualização sobre a simulação numérica dos processos de conformação de chapa metálica, essencial à realização deste trabalho.

Na presente dissertação estudam-se 3 casos de estudo diversos, em que todos os referidos casos abordam componentes obtidos por conformação multi-etapa. Os componentes de cada caso de aplicação terão geometrias e dimensões diversas dos demais componentes e, portanto, cada componente requererá uma abordagem própria para a simulação do processo de fabrico do mesmo. Posteriormente à definição de cada caso de aplicação e das ferramentas a utilizar, foi necessário definir os parâmetros dos ficheiros de *input* e posterior análise dos resultados obtidos no final da simulação numérica, com uma observação crítica acerca dos mesmos e da sua congruência com o que seria esperado a nível teórico.

Por fim e após simular os diversos casos de estudo, perceberam-se as reais dificuldades e limitações existentes no *software* DD3IMP, fornecendo-se do ponto de vista do utilizador do DD3IMP, diversas sugestões de melhoria a implementar no código do referido *software*. No seguimento das sugestões dadas, acresce ainda a definição de objetivos futuros no desenvolvimento do DD3IMP, de modo a facilitar e melhorar a sua utilização.

PALAVRAS-CHAVE

CONFORMAÇÃO MULTI-ETAPA; EMBUTIDURA; DD3IMP; CRITÉRIOS DE CEDÊNCIA

ABSTRACT

The present dissertation aims to develop an improved solution for the simulation of multi-step sheet metal forming processes, in the DD3IMP software, as well as the collection of data from several case studies, to provide practical examples for DD3IMP users. This software allows the simulation of sheet metal forming processes from the application of the finite element method with implicit formulation.

As a starting point for this topic, the essential concepts are presented, in order to better understand the multi-step conformation, in order to support the work and contextualize the reader for it. Then, the objectives to be achieved with this work are presented, a brief description of the software used, with a special approach in the DD3IMP, followed by a Reading Guide, to assist the reader in consulting the present document.

Subsequently, a literature review is carried out on forming, its evolution and processes, as well as a contextualization on the numerical simulation of sheet metal forming processes, which is essential to carry out this work.

In this dissertation, 3 different case studies are studied, in which all referred cases approach components obtained by multi-stage conformation. The components of each application case will have geometries and dimensions different from the other components and, therefore, each component will require its own approach for simulating its manufacturing process. After defining each case and the tools to be used, it was necessary to define the parameters of the input files and subsequent analysis of the results obtained at the end of the numerical simulation, with a critical observation about them and their congruence with what would be expected on a theoretical level.

Finally, and after simulating the different case studies, the real difficulties and limitations existing in the DD3IMP software were perceived, providing, from the point of view of a DD3IMP user, several suggestions for improvement to be implemented in the code of that software. Following the suggestions given, it was also added up the definition of future objectives in the development of the DD3IMP, in order to facilitate and improve its use.

KEYWORDS

MULTI-STEP FORMING; DEEP DRAWING; DD3IMP; YIELD CRITERIA

ÍNDICE

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xvii
Lista de Símbolos.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Os Processos de Conformação Multi-etapa.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. <i>Softwares</i> utilizados.....	2
1.4. Guia de Leitura.....	5
2. A Conformação Plástica de Chapa Metálica.....	7
2.1. Evolução da Conformação ao longo do tempo.....	7
2.2. Processos de Conformação.....	9
2.3. Ferramentas utilizadas na Conformação Multi-etapa.....	12
2.3.1. Ferramentas Progressivas.....	12
2.3.2. Ferramentas Transfer.....	14
2.3.3. Ferramentas Tandem.....	16
2.4. Experimentação Numérica no desenvolvimento de produtos e de processos.....	17
2.5. Síntese e Conclusões.....	20
3. Caso de estudo 1 - Embutidura Profunda em 5 etapas.....	23
3.1. Especificações do conformado.....	23
3.2. Pré-Processamento e Geometria e Dimensões das Ferramentas.....	24
3.2.1. Etapa 1.....	30
3.2.2. Etapa i ($i > 1$).....	33

3.3.	Pós-Processamento e análise	36
4.	Caso de Estudo 2 - Conformação Multi-etapa e com Estiramento de Embutido Cilíndrico Profundo 43	
4.1.	Especificação do conformado	43
4.2.	Pré-Processamento e Geometria e Dimensões das Ferramentas	45
4.2.1.	Etapa 1	51
4.2.2.	Etapa i ($i > 1$)	55
4.2.3.	Etapa Final com Contrapunção	62
4.2.4.	Etapa Final sem Contrapunção	63
4.3.	Pós-Processamento e Análise	64
5.	Caso de Estudo 3 – <i>Benchmark</i> Numisheet#3 de 2020, Previsão de fratura após Embutidura, Reembutidura e Expansão	73
5.1.	Especificações do Processo e das Ferramentas	73
5.2.	Pré-Processamento	78
5.2.1.	Etapa 1	81
5.2.2.	Etapa 2	84
5.2.3.	Etapa 3	88
5.3.	Pós-Processamento e Análise	90
5.3.1.	Resultados com o critério de plasticidade Von Mises	90
5.3.2.	Resultados com o critério de plasticidade Hill48.....	92
5.3.3.	Resultados com o critério de plasticidade CB2001	94
5.3.4.	Comparação de resultados	96
6.	Atualização do <i>software</i> DD3IMP para simulações multi-etapa	101
6.1.	Solução #1 – Ferramentas e Corpo deformável acertam automaticamente a sua posição. 102	
6.2.	Solução #2 – Apenas as Ferramentas corrigem a sua posição em função ao Corpo deformável.	107
6.3.	Ajuste do ângulo de Ferramentas	109

7. Considerações Finais	111
7.1. Conclusões	111
7.2. Perspetivas e Trabalhos Futuros	115
Anexos	117
Anexo A: Cálculo dos Parâmetros para a lei de encruamento de Voce e para os parâmetros anisotrópicos do Critério Hill48, para a AA6111.	119
Bibliografia	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução do número de componentes por produto, desde a Revolução Industrial [9].	7
Figura 2.2 – Relação Performance-Restrições-Mecanismos-Inovação, na conformação de componentes leves, retirado de <i>Journal of Manufacturing Science and Engineering</i> , vol. 142 [5].....	9
Figura 2.3 – Representação esquemática do processo de Embutidura, adaptado de Roymech.org [13].....	10
Figura 2.4 – Representação esquemática do processo de Reembutidura, adaptado de Roymech.org [13].....	10
Figura 2.5 – Representação do processo de ironing, adaptado de Dean J. [16].....	11
Figura 2.6 – Exemplo de uma banda formada por ação de ferramentas progressivas, retirado de Dongguan Xinhongyuan Metal Products [21].	12
Figura 2.7 - Ferramentas progressivas e a respetiva banda obtida, retirado de Atlantic Precision Spring [24].	13
Figura 2.8 – Ferramentas <i>transfer</i> utilizadas na produção de carcaças de filtros de óleo, retirado de Metal Forming Handbook [14].	14
Figura 2.9 – Exemplo de componente produzido com ferramentas <i>transfer</i>	15
Figura 2.10 – Representação esquemática de uma Embutidura com ferramentas tandem, adaptado de JIER North America [30].	16
Figura 3.1 – Representação do componente que se pretende obter com a Embutidura profunda em 5 etapas: a) Representação esquemática 2D em <i>Solidworks</i> ; b) Representação do modelo 3D em <i>Solidworks</i>	23
Figura 3.2 – Representação do esboço a utilizar no processo de Embutidura Profunda em 5 etapas.	23
Figura 3.3 – Definição da lei de encruamento no ficheiro DD3_mater para as diferentes etapas da simulação da Embutidura Profunda em 5 etapas.	24
Figura 3.4 – Definição do critério de plasticidade no ficheiro DD3_mater para as diferentes etapas da simulação da Embutidura Profunda em 5 etapas.	25
Figura 3.5 – Vista de frente e de cima do esboço inicial modelado no <i>GiD</i>	25

Figura 3.6 – Representação esquemática da geometria do esboço após cada uma das 5 etapas.	26
Figura 3.7 – Representação esquemática do Punção e dimensões do mesmo.	27
Figura 3.8 – Representação esquemática da Matriz e dimensões da mesma, no Caso de Estudo 1.	28
Figura 3.9 – Representação do Cerra-Chapas e das suas dimensões, referentes ao Caso de Estudo 1.	29
Figura 3.10 – Posicionamento inicial das ferramentas em relação ao corpo deformável ao longo das 5 etapas da Embutidura Profunda.	29
Figura 3.11 – Configuração do ficheiro DD3_bcon para as diferentes etapas da simulação da Embutidura Profunda em 5 etapas.	30
Figura 3.12 – Configuração do ficheiro DD3_input para as diferentes etapas da simulação da Embutidura Profunda em 5 etapas.	30
Figura 3.13 – Configuração do ficheiro DD3_contact para as diferentes etapas da simulação da Embutidura Profunda em 5 etapas.	31
Figura 3.14 – Configuração do ficheiro DD3_phase para a 1ª etapa do Caso de Estudo 1.	32
Figura 3.15 – Configuração do ficheiro DD3_phase para a 2ª etapa do Caso de Estudo 1.	33
Figura 3.16 – Configuração do ficheiro DD3_phase para a 3ª etapa do Caso de Estudo 1.	34
Figura 3.17 – Configuração do ficheiro DD3_phase para a 4ª etapa do Caso de Estudo 1.	34
Figura 3.18 – Configuração do ficheiro DD3_phase para a 5ª etapa do Caso de Estudo 1.	35
Figura 3.19 – Representação do componente obtido no caso de estudo de Embutidura Profunda em 5 etapas.	36
Figura 3.20 – Detalhe da deformação observada no topo da parede lateral do embutido profundo.	37
Figura 3.21 – Altura do embutido profundo em relação à direção transversa, na face interior. .	37
Figura 3.22 – Altura do embutido profundo em relação à direção transversa, na face exterior..	38
Figura 3.23 – Diferença da altura do embutido entre a face interior e exterior em relação à direção transversa.	38
Figura 3.24 – Tensões residuais existentes no corpo deformável no final do processo.	39
Figura 3.25 – Evolução da espessura em relação à espessura inicial do esboço na direção de laminagem.	39

Figura 3.26 – Evolução da espessura em relação à espessura inicial do esboço na direção transversa.	40
Figura 3.27 –Carga-Deslocamento do Punção nas diversas etapas do Caso de Estudo 1.	41
Figura 4.1 – Representação do componente com estiramento de embutido cilíndrico profundo: a) Representação esquemática 2D em <i>Solidworks</i> com as dimensões que se pretendem obter no componente; b) Representação do modelo 3D em <i>Solidworks</i>	43
Figura 4.2 – a) Esboço para gerar a malha, efetuado no <i>GiD</i> ; b) Malha a utilizar na simulação do processo de obtenção do componente, vista de cima; c) Malha a utilizar na simulação do processo de obtenção do componente, vista de frente.	44
Figura 4.3 – Representação esquemática do componente após cada etapa, adaptado de A. Barata da Rocha e J. Ferreira Duarte [25].	44
Figura 4.4 – Representação esquemática do Punção e dimensões do mesmo no Caso de Estudo 2.	45
Figura 4.5 – Dimensões do Punção utilizado na 7ª etapa do Caso de Estudo 2.	46
Figura 4.6 – Representação esquemática da Matriz e dimensões da mesma, referentes ao Caso de Estudo 2.	46
Figura 4.7 – Dimensões da Matriz utilizada na 7ª etapa do Caso de Estudo 2.	47
Figura 4.8 – Geometria e dimensões do Cerra-Chapas, utilizadas na 1ª etapa do Caso de Estudo 2.	47
Figura 4.9 – Representação esquemática do Cerra-Chapas e dimensões do mesmo, referentes ao Caso de Estudo 2.	48
Figura 4.10 – Cerra-Chapas utilizado na 7ª etapa do Caso de Estudo 2 e respetivas dimensões.	48
Figura 4.11 – Representação esquemática da Mesa-Máquina e dimensões da mesma, referentes ao Caso de Estudo 2.	49
Figura 4.12 – Contrapunção utilizado no estudo da 7ª etapa do Caso de Estudo 2 e respetivas dimensões.	50
Figura 4.13 – Posicionamento inicial das ferramentas em relação ao corpo deformável ao longo das 6 primeiras etapas do Caso de Estudo 2.	50
Figura 4.14 – Posicionamento inicial das ferramentas em relação ao corpo deformável na 7ª etapa do Caso de Estudo 2 com e sem Contrapunção, respetivamente.	51
Figura 4.15 – <i>Inputs</i> definidos no ficheiro DD3_input para o Caso de Estudo 2.	51

Figura 4.16 – <i>Inputs</i> definidos no ficheiro DD3_bcon para a simulação do Caso de Estudo 2. .	52
Figura 4.17 – Ficheiro de <i>input</i> DD3_contact utilizado para a simulação do Caso de Estudo 2.	52
Figura 4.18 – Parâmetros utilizados para definir a lei de Voce e o critério Hill48 no ficheiro DD3_mater do caso de estudo de Conformação Multi-etapa e com Estiramento de Embutido Cilíndrico Profundo.	53
Figura 4.19 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 1ª etapa do Caso de Estudo 2.	54
Figura 4.20 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 2ª etapa do Caso de Estudo 2.	55
Figura 4.21 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 3ª etapa do Caso de Estudo 2.	56
Figura 4.22 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 4ª etapa do Caso de Estudo 2.	57
Figura 4.23 - Defeito provocado pelo deslocamento total da Matriz até à coordenada z da Mesa da Máquina, na 5ª etapa.	58
Figura 4.24 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 5ª etapa do Caso de Estudo 2.	59
Figura 4.25 – Defeito provocado pelo deslocamento total da Matriz até à coordenada z da Mesa da Máquina, na 6ª etapa.	60
Figura 4.26 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 6ª etapa do Caso de Estudo 2.	60
Figura 4.27 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 7ª etapa do Caso de Estudo 2, com Contrapunção.	62
Figura 4.28 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 7ª etapa do Caso de Estudo 2, sem Contrapunção.	63
Figura 4.29 – Vista do plano Oxz e perspetiva isométrica do componente obtido da 7ª etapa: a) com Contrapunção; b) sem Contrapunção.	64
Figura 4.30 – Vista no Plano Oxz e Vista em perspetiva isométrica do componente obtido na 7ª e respetivas tensões residuais: a) com Contrapunção; b) sem Contrapunção.	65
Figura 4.31 – Vista no Plano Oxz e Vista em perspetiva isométrica do componente obtido na 7ª e respetivas deformações plásticas equivalentes: a) com Contrapunção; b) sem Contrapunção.	66
Figura 4.32 – Dimensões do componente que se pretende obter no Caso de Estudo 2: a) Dimensões obtidas por simulação numérica; b) Dimensões teóricas.	67
Figura 4.33 – Calibração final da altura do embutido cilíndrico profundo e respetiva rotura, no Caso de Estudo 2.	68
Figura 4.34 – Carga exercida pelo Punção na 7ª etapa, em função do deslocamento.	68
Figura 4.35 – Carga exercida pelo Punção ao longo das 6 primeiras etapas, em função do deslocamento.	69

Figura 4.36 – Carga exercida pela Matriz ao longo das 5 etapas em que se desloca, no Caso de Estudo 1.	70
Figura 4.37 – Evolução da relação de espessuras ao longo da distância geodésica dos nós, na direção de laminagem.	71
Figura 4.38 – Evolução da relação de espessuras ao longo da distância geodésica dos nós, na direção transversa.	71
Figura 5.1 – Representação esquemática do processo de fabrico da lata de bebida: a)Embutidura e Reembutidura Inversa; b)Expansão (adaptado de [41]).	73
Figura 5.2 – Representação legendada das ferramentas das duas primeiras operações: a)Punção de Reembutidura; b)Punção de Embutidura; c)Matriz de Embutidura (adaptado de [41]).	74
Figura 5.3 – Matriz de Reembutidura: a)Matriz original; b)Matriz sem reentrância.	75
Figura 5.4 - Representação esquemática das ferramentas a utilizar no processo com as respetivas dimensões [41].	76
Figura 5.5 – Representação das ferramentas de Expansão e respetiva legenda [41].	77
Figura 5.6 – Ficheiro DD3_bcon para a simulação numérica das duas primeiras etapas do Caso de Estudo 3.	78
Figura 5.7 – Configuração do ficheiro DD3_input para a simulação da Embutidura.	79
Figura 5.8 – Ficheiro DD3_contact utilizado em cada etapa de simulação numérica do processo.	79
Figura 5.9 – Parâmetros das propriedades mecânicas e Lei de Voce para o AA3104-H19, no ficheiro DD3_phase.	80
Figura 5.10 – Ficheiro DD3_phase do Caso de Estudo 3, para o critério de Von Mises.	80
Figura 5.11 – Ficheiro DD3_phase do Caso de Estudo 3, para o critério Hill48.	81
Figura 5.12 – Ficheiro DD3_phase do Caso de Estudo 3, para o critério CB2001.	81
Figura 5.13 – Esboço e respetiva malha do componente para o problema proposto no Caso de Estudo 3.	82
Figura 5.14 – Posição inicial das ferramentas para a Etapa 1: 1) Punção; 2) Matriz; 3) Cerra-chapas.	82
Figura 5.15 – Ficheiro DD3_phase que define a etapa de Embutidura.	83
Figura 5.16 – Posição inicial das ferramentas para a Etapa 2: 1) Punção; 2) Matriz; 3) Cerra-chapas.	84

Figura 5.17 – <i>Setup</i> da etapa de Reembutidura: 1) Representação do esboço inicial da etapa; 2) Posição do esboço em relação às ferramentas.	85
Figura 5.18 – Configuração do ficheiro DD3_phase para a etapa de Reembutidura.	85
Figura 5.19 – Ficheiro DD3_input da etapa de Reembutidura com as devidas alterações assinaladas.	86
Figura 5.20 – Ficheiro DD3_phase para a simulação do Cerra-Chapas de Embutidura a força constante de 2400N de força total e 600N de força parcial.	87
Figura 5.21 – Posição inicial das ferramentas para a Etapa 3: 1) Punção de Expansão; 2) Matriz.	88
Figura 5.22 – <i>Setup</i> da etapa de Expansão: a) Representação do esboço inicial da etapa; b) Posição do esboço em relação às ferramentas.	88
Figura 5.23 – Ficheiro DD3_bcon da Etapa 3 do Caso de Estudo 3.	89
Figura 5.24 - Configuração do ficheiro DD3_phase para a etapa de Expansão.	89
Figura 5.25 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção de laminagem, para vários deslocamentos de Punção, no critério de Von Mises.	90
Figura 5.26 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção transversa, para vários deslocamentos de Punção, no critério de Von Mises.	91
Figura 5.27 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção de laminagem, para vários deslocamentos de Punção, no critério Hill48.	92
Figura 5.28 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção transversa, para vários deslocamentos de Punção, no critério Hill48.	93
Figura 5.29 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção de laminagem, para vários deslocamentos de Punção, no critério CB2001.	94
Figura 5.30 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção transversa para vários deslocamentos de Punção, no critério CB2001.	95
Figura 5.31 – Vista de frente da “orelha” do corpo deformável após Embutidura para o critério de plasticidade: a) Von Mises; b)Hill48; c) CB2001.	96
Figura 5.32 – Comparação da “orelha” do corpo deformável na etapa de Embutidura, para os diversos critérios de plasticidade estudados.	96
Figura 5.33 – Vista de frente da “orelha” do corpo deformável após Reembutidura para o critério de plasticidade: a) Von Mises; b)Hill48; c) CB2001.	97

Figura 5.34 – Comparação da “orelha” do corpo deformável na etapa de Reembutidura, para os diversos critérios de plasticidade estudados.	98
Figura 5.35 – Evolução da força do Punção com o deslocamento, para os diversos critérios de plasticidade, na etapa de Embutidura.	99
Figura 5.36 – Evolução da carga do Punção com o deslocamento para os diversos critérios de plasticidade, na etapa de Reembutidura.....	99
Figura 5.37 - Comparação das estricções e da sua localização, com a deformação plástica equivalente para: a) Hill48; b)CB2001.	100
Figura 6.1 – Questão inicial atual do DD3IMP, em casos multi-etapa.....	101
Figura 6.2 – Definição da posição 0 das ferramentas no ficheiro DD3_phase, na Solução #1.	103
Figura 6.3 – Posição das ferramentas e do corpo deformável no instante 0: 0) Corpo deformável; 1) Matriz; 2) Cerra-Chapas; 3) Punção.	103
Figura 6.4 – Cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, com indicação para o set 1 do corpo deformável se deslocar até à ferramenta 1 na direção do eixo Oz.....	104
Figura 6.5 – Posição virtual das ferramentas e do corpo deformável após <i>input</i> de st1 do set 1 da malha do corpo deformável (0).	104
Figura 6.6 – Corpo deformável, após ser aplicado o parâmetro: a) st+ na direção Z; b) st- na direção Z.....	105
Figura 6.7 – Cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, com os parâmetros de deslocamento das ferramentas 2 e 3 em direção ao <i>set</i> 2 do corpo deformável 0, em Z.	106
Figura 6.8 – Posição das ferramentas e do corpo deformável após os parâmetros inseridos no cabeçalho 0, do ficheiro DD3_phase.....	106
Figura 6.9 – Cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, com o posicionamento 0 das ferramentas, para a solução #2.	107
Figura 6.10 – Posição das ferramentas e do corpo deformável no instante 0 e o corpo deformável, na solução #2, em que: 0) Corpo deformável; 1) Matriz; 2) Cerra-Chapas; 3) Punção.....	107
Figura 6.11 – Cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, com os parâmetros de deslocamento das ferramentas 1, 2 e 3 em direção ao corpo deformável (0), em Z.	108
Figura 6.12 – Posição das ferramentas e do corpo deformável após ser inserido o parâmetro st0, no ficheiro DD3_phase.	108
Figura 6.13 – Cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, com o parâmetro de rotação da ferramenta 1 de 90° em torno do eixo z e da ferramenta 3 de 30° em torno do eixo x.....	109

Figura A.1 – Alteração da superfície de cedência com o tipo de encruamento [42].	119
Figura A.2 – Comparação da lei de Voce com a curva de tensão-deformação real, na direção Longitudinal para AA6111.	120

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dimensões pretendidas no final da cada etapa da Embutidura Profunda em 5 etapas.	26
Tabela 3.2 – Dimensões dos diversos punções para cada etapa da Embutidura Profunda em 5 etapas.	27
Tabela 3.3 – Dimensões das diversas Matrizes utilizadas para a simulação do Caso de Estudo 1.	28
Tabela 4.1– Dimensões dos diversos punções para cada etapa do Caso de Estudo 2.	45
Tabela 4.2 – Dimensões das diversas Matrizes utilizadas para a simulação do Caso de Estudo 2.	47
Tabela 4.3 – Dimensões dos diversos Cerra-Chapas utilizados para a simulação do Caso de Estudo 2.	48
Tabela 4.4 – Dimensões das diversas Mesa-Máquina utilizados para a simulação do Caso de Estudo 2.	49
Tabela 5.1 – Dimensões do Punção, Matriz de Embutidura e Punção de Reembutidura.	75
Tabela 5.2 – Dimensões do Punção de Expansão e da Base.	77
Tabela A.1 – Valores dos coeficientes de anisotropia r , para o AA6111.	121
Tabela A.2 – Valores dos coeficientes do critério Hill48, para o AA6111.	121

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas, abreviaturas e acrónimos

AA	liga de Alumínio (<i>Aluminum Alloy</i>);
BCID	identificação das condições de fronteira (<i>Boundary conditions ID</i>);
CB2001	critério de plasticidade de Cazacu & Barlat 2001;
CAD	desenho assistido por computador (<i>Computer-Aided Design</i>);
CAE	engenharia assistida por computador (<i>Computer-Aided Engineering</i>);
CPen	coeficiente de Penalidade;
DD3IMP	contração de “Deep Drawing 3D IMPLICIT finite elements code”;
DD3MAT	contração de “Deep Drawing 3D MATerial parameters identification”;
DXF	extensão de ficheiro <i>Drawing Exchange Format</i> ;
FLD	diagrama limite de conformação baseado na deformação (<i>Forming Limit Diagrams</i>);
EM	módulo de Elasticidade (<i>Elasticity Module</i>);
Hill48	critério de plasticidade de Hill 1948;
HSS	aço de alta resistência (<i>High Strength Steel</i>);
MEF	método dos elementos finitos (<i>Finite Element Method</i>);
PIB	produto interno bruto
PR	coeficiente de Poisson (<i>Poisson's Ratio</i>)
SFLD	diagrama limite de conformação baseado na tensão (<i>Stress-based Forming Limit Diagrams</i>)

Nomenclatura

D	diâmetro inicial do esboço;
d	diâmetro final do esboço;
F, G, H, L, M, N	parâmetros de anisotropia do critério Hill48;
h	altura final do embutido
r_0, r_{45}, r_{90}	coeficientes de anisotropia de Lankford;

t_o	espessura inicial do esboço;
t	espessura do componente;
Y_{sat}, C_y, Y_o	parâmetros da lei de Voce (encruamento isotrópico);
β	razão de embutidura;
ε_t	deformação real;
σ_t	tensão real;

1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo introdutório surge com o propósito de contextualizar o estudo apresentado, sustentando as razões para a realização do mesmo e situando o conteúdo das secções seguintes. Neste capítulo, começa-se por enquadrar o tema, demonstrando a sua pertinência na indústria das tecnologias de conformação de chapa, seguida de uma breve descrição dos objetivos propostos para este estudo. De seguida, surge uma breve descrição dos *softwares* utilizados no âmbito deste estudo, o *Solidworks*, o *GiD* e o DD3IMP. Numa fase inicial da dissertação foi necessária a pesquisa de casos de estudo de processos multi-etapa em diversos *benchmarks online* resultantes de conferências existentes na área da conformação, como por exemplo a *Numisheet*. Dessa pesquisa resultaram 3 casos de estudo, que serão apresentados um a um nas secções seguintes deste documento. Por fim, no presente capítulo encontra-se um guia de leitura, para auxiliar o leitor deste documento a situar nos capítulos, os conteúdos abordados no estudo.

1.1. OS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MULTI-ETAPA

A conformação multi-etapa de chapa é um processo utilizado para fabricar peças metálicas complexas de alta precisão. O processo envolve a deformação sucessiva da chapa em várias etapas, usando ferramentas especializadas para criar formas precisas. A conformação multi-etapa é amplamente utilizada na produção de peças para a indústria automóvel, peças eletrónicas e componentes para a indústria aeroespacial. Este processo é definido por várias etapas que deformarão a chapa, transformando-a no componente final pretendido.

A primeira etapa do processo de conformação multi-etapa é a preparação da chapa, que envolve a seleção do material adequado e a preparação da chapa para o processo de conformação. Antes da conformação em si começar, a chapa é geralmente laminada a frio para melhorar a sua uniformidade e sua conformabilidade que é a capacidade de ser conformada. Em seguida, a chapa é submetida a uma série de etapas de conformação, que envolvem a deformação da chapa em vários ângulos e direções, de modo a criar a geometria desejada. As etapas de conformação podem ser efetuadas por uma ou várias máquinas, podendo as mesmas ser prensas mecânicas, prensas hidráulicas ou matrizes de estampagem.

A conformação multi-etapa é muito precisa e permite a produção de peças complexas com tolerâncias muito apertadas. Além disso, é possível controlar a espessura da chapa com precisão, o que

é importante para a aplicação futura do componente. O processo de conformação multi-etapa também é altamente flexível, permitindo a produção de peças em grandes ou pequenas séries, consoante for desejado. Além disso, com a conformação multi-etapa de chapa é possível produzir peças com uma ampla gama de diferentes geometrias, que pode ir desde peças simples como fechaduras até peças muito complexas, como componentes de motores de aeronaves.

Acresce ainda que a conformação multi-etapa é mais eficiente do que outros processos de manufatura, uma vez que permite a produção de peças com menor desperdício de matéria-prima, para obter o componente final. Ademais, as ferramentas utilizadas na conformação multi-etapa são projetadas para durar muito tempo, o que significa que o processo é menos propenso a falhas e mais económico a longo prazo, principalmente para séries de produção com maiores quantidades. Em suma, a conformação multi-etapa de chapa é um processo eficiente, preciso e flexível que permite a produção de peças complexas com tolerâncias apertadas, sendo a aprendizagem acerca deste tipo de processos o maior fator de motivação para a realização da presente dissertação.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo global do presente trabalho é o estudo de componentes obtidos por processos de conformação de chapa metálica multi-etapa através da sua simulação numérica com o *software* DD3IMP, analisando, inferindo e documentando os resultados obtidos. Assim como resultado final, pretende-se:

- Simular, interpretar e documentar 3 casos de estudo selecionados, de modo a reunir exemplos do uso do DD3IMP em casos de simulação de conformação multi-etapa, para utilizadores futuros do *software*;
- Tendo em conta a perspetiva de utilizador do DD3IMP, sugerir alterações a implementar no *software* de modo a otimizar e facilitar o seu uso para utilizadores futuros;

1.3. SOFTWARES UTILIZADOS

A engenharia assistida por computador (CAE) é utilizado para melhorar o *design* do produto e resolver problemas de engenharia para uma ampla gama de indústrias, envolvendo o uso de *software* de computador e as suas potencialidades, isto é, a simulação, otimização e validação de produtos e processos [1].

O CAE é usado tanto para projetar quanto para apoiar o processo de engenharia de um produto, permitindo que testes e simulações sejam realizados sem a necessidade de um protótipo físico. No entanto, num processo CAE tipicamente compreendem-se 3 etapas, sendo elas: pré-processamento,

solver e pós-processamento. Ou seja, no pré-processamento, os engenheiros modelam a geometria, condições de fronteira e as propriedades físicas do projeto e das suas ferramentas, etc. Por sua vez, o modelo obtido do pré-processamento (*input*) é corrido num *solver* usando uma formulação matemática apropriado. Por fim, na fase de pós-processamento, os resultados obtidos a partir do *solver* (*outputs*) são apresentados e analisados pelo engenheiro [2].

No caso do presente estudo, modelaram-se as ferramentas do processo em 2D no *software* CAD *Solidworks*, sendo exportadas no formato DXF. Os documentos gerados no *Solidworks* têm a extensão DXF, de modo a que as mesmas possam ser facilmente importadas no *software* *GiD*, que é um pré e pós-processador universal para simulações numéricas em ciência e engenharia [3]. Uma vez importadas no *GiD*, as ferramentas são extrudidas em torno do eixo z, passando a 3D.

O *software* CAE que é o objeto da presente dissertação é o DD3IMP. O DD3IMP ou “*Deep Drawing 3D IMPLICIT finite element code*” começou a ser desenvolvido em 1990 no Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, e o mesmo simula processos de conformação de chapas metálicas recorrendo a um algoritmo de integração temporal completamente implícito e em que a chapa ou esboço é discretizada com elementos sólidos [4].

No momento após se gerarem as malhas das ferramentas e do esboço inicial no *GiD*, as mesmas devem ser exportadas para a respetiva pasta onde estão os restantes ficheiros de *input* relativos ao DD3IMP. O conjunto de ficheiros que deve existir para a simulação ocorrer são os seguintes:

- DD3_bcon é utilizado na definição de condições de fronteira, neste caso a definição de planos com deslocamento restringido (ex. planos de simetria em x);
- DD3_contact onde são formuladas as condições de contacto, como por exemplo o atrito entre uma chapa e uma ferramenta;
- DD3_input que é utilizado para definir todos os parâmetros numéricos, como por exemplo o critério de convergência, número máximo de iterações, etc;
- DD3_mater que contém as propriedades físicas e mecânicas do material em estudo, como por exemplo o Módulo de Elasticidade (ou Módulo de Young), a Tensão de Cedência e os parâmetros para definir o critério de plasticidade a ter em conta;
- DD3_mesh que possui as informações da malha gerada para o esboço inicial, como por exemplo as coordenadas de cada nó e os nós que definem cada elemento;

- DD3_phase determina-se o número de cada ferramenta e o modo como as mesmas atuam, por exemplo dar a indicação que na fase 1, se quer que a ferramenta 1 se mova 30mm no sentido negativo do eixo Oz;
- DD3_tool contém a definição da geometria e da malha gerada para as ferramentas;
- DD3oNodes onde se indica um ou mais nós nos quais se pretende conhecer as forças e os respetivos deslocamentos;
- DD3oGPoints indica-se o elemento nos quais se pretende conhecer os resultados obtidos nos Pontos de Gauss e as coordenadas dos mesmos.

Os ficheiros DD3oNodes e DD3oGPoints são de carácter opcional, pelo que não é necessária a sua existência para que a simulação corra. Relativamente aos ficheiros de *output*, os de maior relevo são listados de seguida:

- GID_ini é o ficheiro em que está contida a geometria e posição do corpo deformável, no início da simulação;
- GID_ini.tool é o ficheiro que contém a posição de cada ferramenta no início da simulação;
- GID_pXend ; é o ficheiro em que está contida a geometria e posição do corpo deformável, no final de uma dada fase X;
- GID_pXend.tool é o ficheiro que contém a posição de cada ferramenta no final de uma dada fase X;
- GID_simu é o ficheiro em que estão contidos os resultados e deformadas do corpo deformável ao longo do processo e quando lido no *GID* é possível visualizar a transformação do corpo deformável ao longo da simulação e o seu estado de deformação;
- TX_Name em que X é o número da ferramenta e *Name* o nome da mesma. Neste ficheiro estão contidos os deslocamentos e forças exercidas na ferramenta ao longo de todas as iterações, nas 3 direções (x,y,z).
- UFO_pXend.UFO é o ficheiro que contém os dados para recomeçar a simulação no final de uma dada fase da simulação. Quando o X corresponde ao número de uma fase intermédia, pode-se mudar o nome do ficheiro para resume.UFO e recomeçar a simulação a partir da fase X. Quando o referido ficheiro UFO corresponde à última fase de uma simulação e após o retorno elástico, pode-se alterar o nome desse ficheiro para resume.stage.UFO, de modo a poder ter as informações sobre o corpo deformável e sua geometria, para uma simulação da etapa seguinte de um processo multi-etapa;

Por fim, todo o tratamento de dados desde as espessuras do corpo deformável às forças exercidas pelas ferramentas, é efetuado no *Microsoft Excel*, tal como a análise gráfica das soluções dos problemas.

1.4. GUIA DE LEITURA

A dissertação está dividida em 7 capítulos, que por sua vez se dividem em vários subcapítulos.

No capítulo 1, introduz-se o tema da conformação plástica multi-etapa, a sua pertinência e a motivação para tratar o mesmo. Além do anteriormente citado, apresenta-se ainda os objetivos que este documento procura atingir e uma contextualização acerca dos *softwares* necessários à elaboração deste trabalho.

De seguida no capítulo 2, enquadra-se a conformação plástica de chapa metálica no global, abordando desde a sua evolução ao longo do tempo, aos seus processos, ferramentas utilizadas na conformação multi-etapa, terminando na experimentação numérica de produtos e de processos.

No capítulo 3, introduz-se o Caso de estudo 1 - Embutidura Profunda em 5 etapas em conjunto com as especificações iniciais e finais pretendidas do componente que se pretende obter com este processo. No pré-processamento do problema, apresentam-se as ferramentas a utilizar e os ficheiros de *input* necessários para iniciar a experimentação numérica. Ademais, analisam-se os ficheiros obtidos da experimentação numérica e apresentam-se as conclusões sobre os resultados obtidos.

No capítulo 4, trata-se o Caso de Estudo 2 – Conformação Multi-etapa e com Estiramento de Embutido Cilíndrico Profundo, apresentando as especificações a ser tidas em conta no resultado final do estudo. Apresentam-se também os ficheiros de *input* e as ferramentas utilizadas na simulação numérica do processo e posteriormente os resultados obtidos no pós-processamento e uma análise crítica sobre os mesmos.

Por sua vez no capítulo 5, apresenta-se o Caso de Estudo 3 – *Benchmark* Numisheet#3 de 2020, Previsão de fratura após Embutidura, Reembutidura e Expansão. Neste estudo será analisado o processo e o momento em que ocorre a rotura do componente em análise, aplicando 3 critérios de plasticidade distintos, sendo eles o Hill48, Von Mises que é um caso particular do Hill48 e o CB2001. Por fim é feita a análise e comparação para os resultados obtidos em cada um desses critérios.

No capítulo 6, do ponto de vista de utilizador, apresentam-se sugestões de otimização do *software* DD3IMP ao nível de posicionamento do corpo deformável e ferramentas com novos parâmetros.

Por fim, no capítulo 7 conclui-se acerca do trabalho, sobre se os seus objetivos foram atingidos e acerca dos resultados obtidos. Ademais incluíram-se breves sugestões para trabalhos e reflexões futuras sobre o *software* DD3IMP.

2. A CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DE CHAPA METÁLICA

2.1. EVOLUÇÃO DA CONFORMAÇÃO AO LONGO DO TEMPO

A arte de trabalhar metal acompanha o Homem desde o Neolítico até aos dias de hoje [5], nomeadamente no fabrico de armas, utensílios agrícolas, joalheria, entre outras aplicações do quotidiano. Por definição a conformação é o conjunto de processos que induzem deformação plástica de forma permanente a materiais, de modo a obter componentes com determinadas geometrias e dimensões [6], que não seriam possíveis de obter com a mesma qualidade e eficiência por outros processos de manufatura.

Com a crescente necessidade de melhorar as condições de vida das populações e com a evolução da indústria e das tecnologias, começaram-se a produzir produtos cada vez mais complexos e por sua vez constituídos por maior número de componentes [7]. Citando Schacher da área da conformação da indústria automóvel, o mesmo disse em 1997 que “No passado introduzíamos 3 modelos a cada 10 anos, no momento introduzimos 10 modelos a cada 3 anos” [8]. Este aumento tornou-se particularmente notório após a revolução industrial, devido ao progresso nos processos de fabrico e à progressiva automação dos mesmos [9], como é possível verificar na seguinte Figura 2.1.

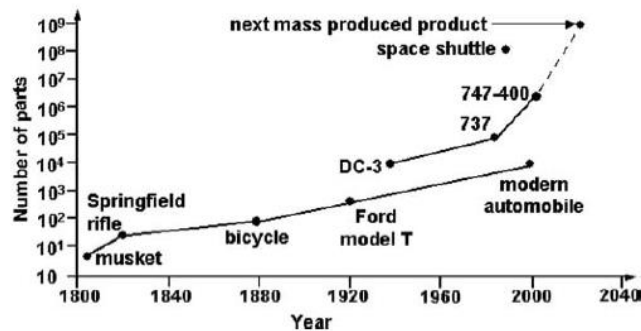


Figura 2.1 – Evolução do número de componentes por produto, desde a Revolução Industrial [9].

O aumento observado na figura acima, por sua vez, leva a que indústrias como a da Conformação tenham que se redefinir e melhorar a sua produtividade e otimização, para fazer face à concorrência.

Em 2019, estimava-se que nos países desenvolvidos, a conformação metálica e a indústria relacionada representa cerca de 15-20% do PIB [10]. Estes valores mostram a verdadeira importância da conformação a nível económico, levando a uma procura sucessiva de inovação nesta área, procurando

desenvolver a eficiência energética, a sustentabilidade e a otimização dos processos e dos componentes obtidos.

Um dos caminhos que se tem explorado, para obter uma maior eficiência e redução de custos, passa pela obtenção de componentes sucessivamente mais leves (*lightweight components*). Esta opção mostra-se válida por dois motivos. Por um lado, permite obter uma maior eficiência energética e sustentabilidade do uso do componente e por outro o desempenho funcional do mesmo.

Em termos de sustentabilidade e eficiência energética, a indústria de conformação de componentes mais leves tem um impacto direto e imediato. Nomeadamente, na redução do peso dos veículos quando se atinge o patamar dos 10%, pode resultar numa economia de combustível na ordem dos 6% a 8% [10]. Por sua vez, a utilização de materiais leves como ligas de alumínio, ligas de magnésio, fibra de carbono, compósitos, HSS (*High Strength Steel*) entre outros em detrimento dos metais mais convencionais como ferro fundido e as ligas de aço, pode levar a uma redução até 50% do peso de estruturas como o *chassis* e o corpo do veículo [5].

Em termos de performance, a conformação de componentes sucessivamente mais leves, além da redução de massa do produto, permitem atingir maiores acelerações no componente. Por exemplo nos carros, *chassis* e corpo mais leves permitem maior facilidade e conforto de condução. Outro dos exemplos mais flagrantes é o da produção de latas de bebida. De 1958 a 1963, as latas reduziram o seu peso em 70%, de 80 para 22,65g, devido à combinação do processo de embutidura com o processo de “*ironing*” [5]. Atualmente, as sucessivas reduções de peso e o facto de as latas serem formadas por 2 componentes, levam a que as mesmas atualmente possuam um peso de cerca de 13g, promovendo uma imensa poupança no que toca a matéria-prima utilizada, que se reflete diretamente no preço do produto final e no impacto ambiental deste tipo de indústria.

Na seguinte Figura 2.2 pode-se observar, para a conformação de componentes leves, de que forma se relaciona a sua performance, com as restrições do processo (materiais e máquinas), mecanismos e inovações ou tecnologias existentes.

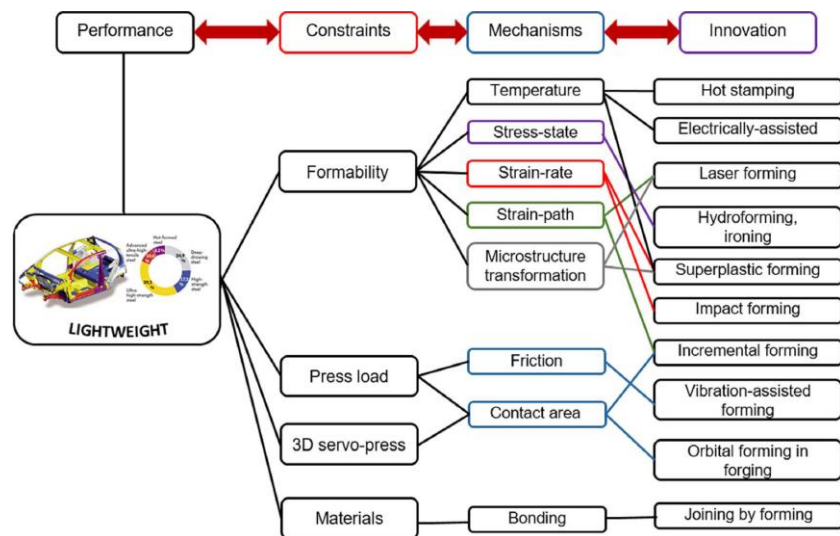


Figura 2.2 – Relação Performance-Restrições-Mecanismos-Inovação, na conformação de componentes leves, retirado de *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 142 [5].

2.2. PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

As operações intervenientes nos processos de conformação de chapa metálica são realizadas por intermédio de elementos mecânicos que atuam no esboço inicial, permitindo obter-se as deformações pretendidas para a peça em produção. Dos elementos mecânicos mais comuns na Embutidura pode-se destacar o punção, a matriz e o cerra-chapas.

O punção pode-se definir como o componente mecânico ativo, que se movimenta na direção da superfície da chapa impondo-lhe uma deformação. Por sua vez, a matriz normalmente é o elemento mecânico passivo, ou seja, estático, contra o qual a chapa será pressionada pelo punção, sendo-lhe imposta a deformação. Conjugando as geometrias complementares do punção e da matriz, surge a forma do componente final [11]. Por fim, o cerra-chapas tem a função de pressionar a chapa contra a superfície da ferramenta de estampagem durante o processo de Conformação. A utilização desta ferramenta permite controlar o escoamento do material para dentro da matriz, evitando a formação de pregas ou rugas, quando aplica uma força ideal, e possibilitando ainda controlar o maior ou menor estiramento da chapa (redução de espessura) durante o processo. Alguns processos populares de Conformação de metais são forjamento, laminagem, trefilagem, extrusão, embutidura e quinagem. O processo utilizado em todos os casos de estudo é a Embutidura (Profunda), ou Estampagem. Como definido por Rashmi Dwivedi e Geeta Agnihotri [12], a Embutidura é o processo no qual uma chapa

metálica em bruto é conformada contra uma cavidade oca, chamada de matriz, usando para isso uma força aplicada por um punção, para deformar assim a chapa e produzir o componente oco pretendido. Utiliza-se ainda uma ferramenta com o nome de cerra-chapas, de modo a controlar e guiar o fluxo do material e a oscilação do mesmo, através da aplicação de uma força do cerra-chapas no material durante a conformação. A Embutidura pode, por sua vez, ser parcial ou total, dependendo se o material inicial é completamente embutido na matriz, ou se o mesmo não o é, apresentando assim uma aba. Na seguinte Figura 2.3 encontra-se uma representação do processo de Embutidura.

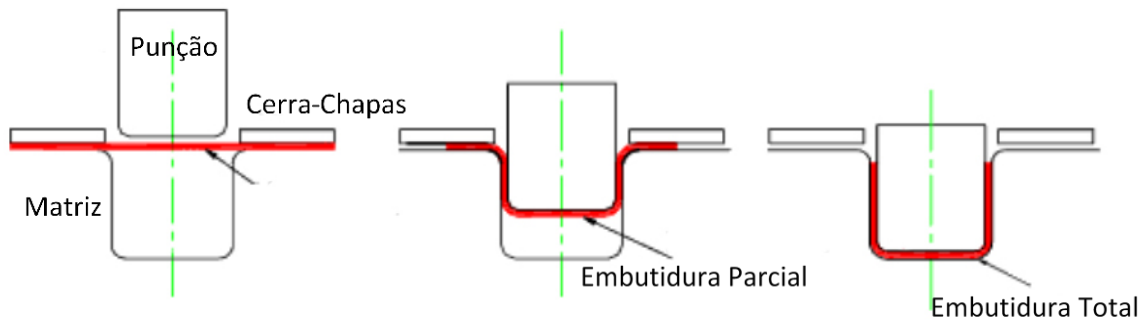


Figura 2.3 – Representação esquemática do processo de Embutidura, adaptado de Roymech.org [13].

Caso a partir do processo de Embutidura, não seja possível atingir a profundidade pretendida em apenas uma operação, é possível dividir a operação em várias etapas, aplicando assim o processo de Reembutidura [13]. Durante a Reembutidura o componente oco é conformado contra uma matriz de secção transversal menor que a do componente, após a sua Embutidura inicial. A Reembutidura pode então ser direta, se a cavidade do componente continuar orientada para o mesmo sentido, ou indireta, se a orientação da cavidade inverter o sentido. Para uma melhor interpretação dos tipos de Reembutidura, apresenta-se de seguida na Figura 2.4 uma representação dos mesmos.

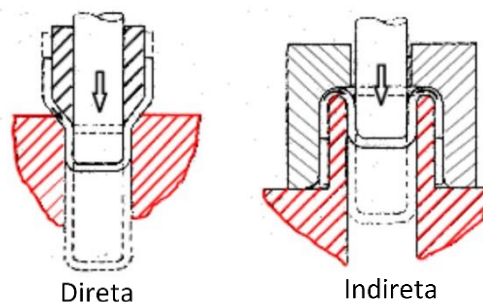


Figura 2.4 – Representação esquemática do processo de Reembutidura, adaptado de Roymech.org [13].

No caso de embutiduras profundas, muitas das vezes, a mesma não se consegue obter numa só etapa, ou seja em casos em que a razão de embutidura é superior a 2, em que é ultrapassada a razão limite de embutidura. A razão de embutidura β , é um valor numérico importante para processos de

embutidura profunda, já que auxilia na determinação do número necessário de etapas, para a mesma de modo a obter o conformado final. Por outras palavras, a razão de embutidura é a razão entre o diâmetro inicial da chapa e o diâmetro final do componente e pode-se calcular a partir da seguinte expressão:

$$\beta = \frac{D}{d}, \quad (2.1)$$

A razão limite de embutidura dependerá das propriedades da matéria-prima utilizada. Comumente, utiliza-se a estimativa aproximada de $\beta = 2$, para a primeira embutidura. Nas embutiduras seguintes e devido ao encruamento, β não deve ser superior a 1,3. Se a peça for recozida antes da próxima operação, pode-se ter 1,7 como o valor da razão limite de embutidura [14].

Um outro processo importante de salientar para melhor compreensão do conteúdo desta dissertação é o processo de *ironing*. Por definição este é o processo de conformação no qual a espessura, de um dado componente obtido por embutidura, é uniformizada através de um punção que puxa a parede do referido componente contra uma matriz de diâmetro inferior ao diâmetro exterior do embutido [15]. Na seguinte Figura 2.5, pode-se observar uma representação do processo de *ironing*.

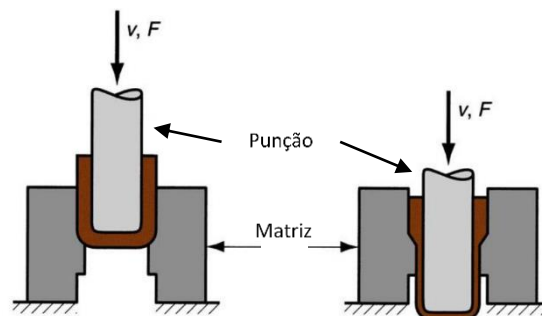


Figura 2.5 – Representação do processo de ironing, adaptado de Dean J. [16].

O processo de *ironing* pode ser incorporado ou não num processo de embutidura e geralmente leva à redução de 40 a 60% da espessura do componente embutido [17].

Os processos de conformação multi-etapa são todos aqueles em que o componente pretendido não pode ser obtido através de uma única pancada ou operação. Nestes casos têm então que se implementar e determinar as diversas etapas e as ferramentas necessárias para cada uma delas, de modo a se obter o componente desejado sem qualquer tipo de defeito ou rotura.

Num processo de conformação é necessária a utilização de uma prensa, que pode adotar características e tamanhos diversos, para atender às necessidades da produção, bem como a utilização de uma matriz, na qual o produto é moldado e deformado [18].

2.3. FERRAMENTAS UTILIZADAS NA CONFORMAÇÃO MULTI-ETAPA

Um dos aspetos mais importantes a ter em conta na conformação são as ferramentas a utilizar. Em muitos casos não é possível obter o componente final recorrendo apenas a uma operação, sendo necessários outros tipos de ferramenta que não as simples. No caso dos processos de conformação multi-etapa, as ferramentas são comumente classificadas em três grupos quanto às operações que realizam, sendo elas ferramentas: Progressivas, *Transfer* e Tandem.

2.3.1. FERRAMENTAS PROGRESSIVAS

Nos processos de conformação multi-etapa com ferramentas progressivas, uma bobina de metal alimenta uma máquina que contém uma série de estações, que realizam as operações em simultâneo. A tira ou banda de metal, que está a ser fornecida, move-se entre as referidas estações (onde pode ser efetuada uma ou mais operações distintas) e em cada uma delas, as matrizes progressivas alteram a configuração do metal em relação à estação anterior [19]. No entanto, com a utilização deste tipo de ferramentas podem haver etapas inativas, com o intuito de melhor posicionar a tira, facilitar o movimento entre estações, simplificar a construção e ainda aumentar a rigidez e robustez, quer da ferramenta, quer do processo [20].

Na Figura 2.6, pode-se observar um exemplo de banda formada por uma prensa que utilize ferramentas progressivas.

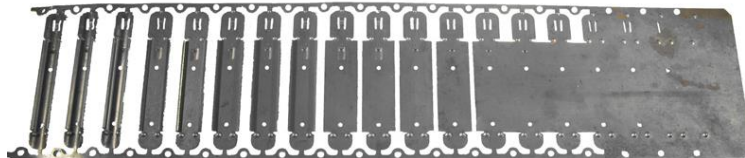


Figura 2.6 – Exemplo de uma banda formada por ação de ferramentas progressivas, retirado de Dongguan Xinhongyuan Metal Products [21].

Como se pode observar na figura acima apresentada, as ferramentas progressivas permitem retirar o material não necessário de forma progressiva ao longo das etapas, distribuindo também assim pelas etapas o esforço e desgaste das ferramentas [22].

Dentro da família das ferramentas progressivas, podem-se dividir as mesmas em três categorias. Assim, na 1ª categoria têm-se as ferramentas exclusivamente de corte, que são comumente utilizadas para fabricar componentes simples e planos como por exemplo discos, rodas dentadas, anilhas, entre outros. De seguida na 2ª categoria, encontram-se as ferramentas que, para além de cortarem, também

executam algumas operações como dobragens e Embutiduras pouco profundas. Por fim, na 3ª categoria incluem-se as ferramentas que executam essencialmente operações de Embutidura [23].

As ferramentas progressivas tradicionais funcionam com a parte superior da mesma (cabeçote) a mover-se verticalmente fazendo penetrar os punções nas matrizes, e com a parte inferior da ferramenta fixa. Toda a estrutura tem que ser robusta e fabricada em aços duros e/ou aços sujeitos a tratamentos térmicos, de modo a ser rígida e a suportar os esforços a aplicar em cada componente [20].

Uma vez que o componente tenha passado por toda a máquina e por todas as estações, a peça é cortada da tira pela máquina numa última etapa. Na seguinte Figura 2.7, pode-se observar um exemplo de ferramentas progressivas e o componente obtido da sua ação.

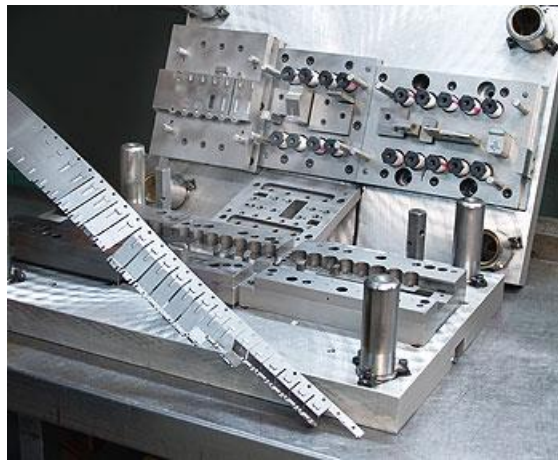


Figura 2.7 - Ferramentas progressivas e a respetiva banda obtida, retirado de Atlantic Precision Spring [24].

Segundo AAA Tool & Machine [24], as principais vantagens deste tipo de ferramenta em relação às demais são:

- Elevada velocidade de produção;
- Menos material desperdiçado para sucata;
- Configuração mais rápida do processo;
- Produção de mais geometrias numa única ferramenta;
- Ciclos de produção mais longos;
- Alta repetibilidade;
- Menor custo de mão-de-obra por peça, comparando com séries de operações únicas, por exemplo séries que usam ferramentas transfer;
- Produção de tolerâncias estreitas.

O custo de uma ferramenta progressiva é sempre bastante levado, devido à quantidade de elementos que a constituem e ainda devido à precisão que a montagem da mesma requer [24]. Assim, este tipo de ferramentas é especialmente considerada, quando é requerido um elevado volume de

produção de um dado componente, diluindo o seu custo por um elevado número de peças produzidas e com a velocidade de produção das mesmas.

2.3.2. FERRAMENTAS TRANSFER

Por sua vez, os processos que recorrem a ferramentas *transfer* é bastante semelhante à progressiva, no entanto, neste processo a peça está livre da banda metálica e é transferida de uma estação para outra por um sistema de transporte mecânico, por exemplo um sistema de pinças, que agarra a peça e a desloca entre batimentos da prensa, até à próxima matriz. No 1º posto, a matéria-prima é alimentada a partir de bobines, sendo cortada conjuntamente com outra operação, ou pode já vir cortada consoante for pretendido [25]. Este tipo de ferramentas é usado principalmente em situações em que a peça deve estar livre da banda, de modo a permitir que as operações sejam realizadas em estado livre [26]. As ferramentas *transfer* podem ser compostas por uma única matriz por si só ou várias matrizes ou máquinas dispostas em linha para formar uma linha de produção e com sistemas de transporte entre elas.

Na seguinte Figura 2.8, apresenta-se um exemplo de Conformação multi-etapa com ferramentas *transfer*.

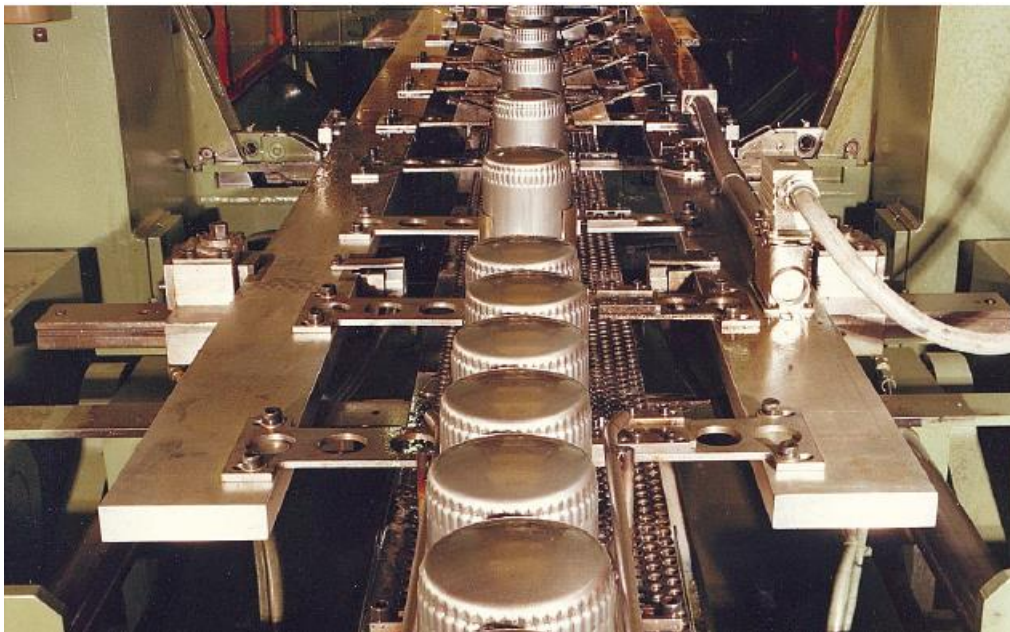


Figura 2.8 – Ferramentas *transfer* utilizadas na produção de carcaças de filtros de óleo, retirado de Metal Forming Handbook [14].

Este grupo de ferramentas permite de um modo geral obter um processo mais económico do que recorrer a ferramentas progressivas, uma vez que é mais fácil projetar uma matriz para ferramentas *transfer*, além de ser mais versátil, possibilitando a incorporação de outros tipos de operação na Embutidura, evitando custos com processos secundários [19]. Ademais, este tipo de ferramentas permite maior flexibilidade em relação às ferramentas progressivas em termos das regulações independentes que podem ser feitas em cada posto e em relação às dimensões dos componentes a conformar [25].

No entanto, este processo é substancialmente mais lento em relação aos que utilizam ferramentas progressivas. Tal se sucede com as ferramentas *transfer*, uma vez que no fim de cada pancada da prensa, o sistema que transfere as peças tem de se movimentar até à peça e movê-la à etapa seguinte, tendo as peças uma distância maior a percorrer entre etapas. As ferramentas *transfer* podem produzir até 25 peças por minuto, embora peças maiores, geralmente, façam com que as transferências entre etapas sejam mais lentas [27]. Assim, e apesar de que tanto as ferramentas *transfer* como as progressivas poderem ser usadas para obter peças de qualquer tamanho, as ferramentas *transfer* são geralmente consideradas mais adequadas para a produção de peças de maiores dimensões, ao contrário das ferramentas progressivas, que são consideradas como mais adequadas para a produção de conjuntos de componentes menores e de maior volume de produção.

Um dos vários exemplos de componentes produzidos por prensas *transfer* são as panelas mais profundas, que não se conseguem obter numa única embutidura, como pode ser observado na seguinte Figura 2.9.



Figura 2.9 – Exemplo de componente produzido com ferramentas *transfer*.

2.3.3. FERRAMENTAS TANDEM

Na Embutidura com ferramentas tandem, existe a mecanização de uma linha de prensas, em que entre as mesmas se coloca a componente de automatização que podem ser braços robóticos, de modo a mover e a corretamente posicionar as peças entre operações. Isto é, o transporte de peças entre prensas, entre cada estação, a alimentação de material e remoção das peças acabadas são efetuados por meio de sistemas de alimentação automatizados [28]. A utilização deste tipo de ferramentas, requer que a produção seja efetuada em múltiplas matrizes, em diferentes operações. As ferramentas tandem são geralmente escolhidas para produção de peças que possuem menor volume de produção, ou na obtenção de peças de geometria mais complexa, que não podem ser produzidas por outros métodos de conformação e ferramentas [29].

Um exemplo de Conformação com ferramentas *tandem* é possível observar na Figura 2.10 abaixo apresentada.

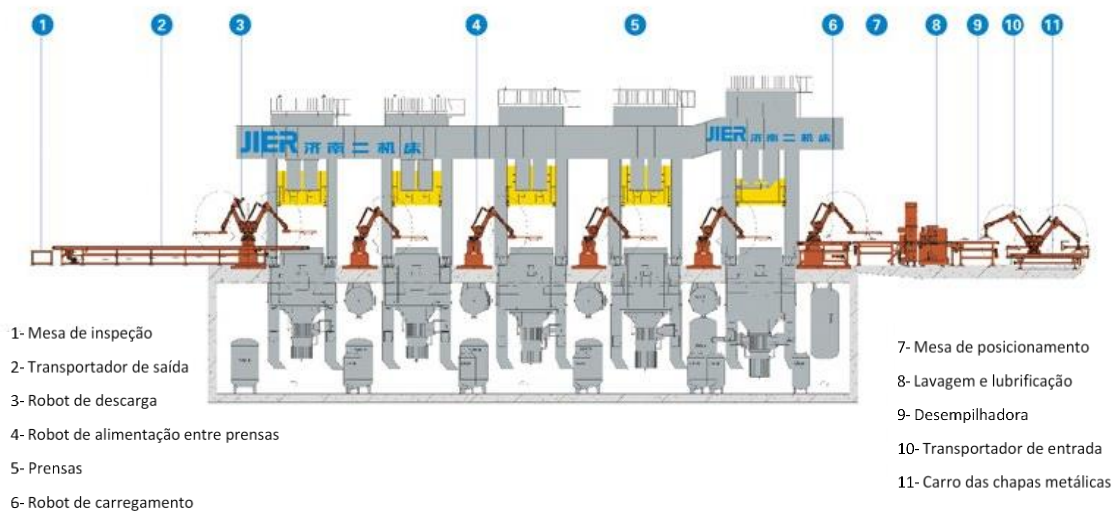


Figura 2.10 – Representação esquemática de uma Embutidura com ferramentas tandem, adaptado de JIER North America [30].

Segundo *Shieh Yih Machinery Industry*, a utilização de ferramentas tandem possibilitam [31]:

- A combinação de prensas servo e mecânicas numa única linha;
- O controlo simultâneo/cooperativo para várias prensas servo;
- A disposição de várias prensas menores de modo a permitir requisitos de altura de construção mais baixos e fundações mais simples, reduzindo os custos de construção de infraestrutura;
- O posicionamento de uma matriz em cada prensa, trazendo vantagens como redução de cargas desequilibradas na prensa, permitindo assim que cada prensa possa funcionar na configuração

ideal para cada matriz. Melhora-se assim a qualidade, reduzem-se os ajustes da ferramenta e o seu tempo de configuração e reduzem-se os custos de manutenção das ferramentas.

No entanto, as ferramentas tandem de conformação multi-etapa também têm algumas desvantagens, como serem mais caras do que as ferramentas convencionais de conformação de metal, e também requerem mais tempo e esforço para manutenção e reparação. Porém, o custo de produção e mão-de-obra é reduzido, proporcionando maior margem de lucro [18].

No entanto, E Glorieux [32] considera que a prática industrial atual para planejar os movimentos do robô para sistemas com ferramentas tandem tem um potencial relativamente grande para otimização usando metodologias de planeamento de movimento baseado em simulação/modelação *off-line*.

Em resumo, as ferramentas tandem são uma solução eficiente e precisa para o fabrico de peças complexas de metal, tornando-as uma escolha popular para muitas indústrias, tais como a automóvel, aeroespacial e de componentes eletrónicos, que requerem a produção de peças com elevada precisão e complexidade.

2.4. EXPERIMENTAÇÃO NUMÉRICA NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS E DE PROCESSOS

Um outro conceito a ter em conta no desenvolvimento de um projeto é a experimentação de processos de conformação plástica de chapa metálica com o auxílio de *softwares* que permitam a simulação numérica dos mesmos. Este é um procedimento muito importante no desenvolvimento e otimização da produção de componentes cada vez mais leves por conformação, trazendo diversas vantagens.

O Método de Elementos Finitos ou MEF, é um método numérico utilizado para aproximar a solução de problemas caracterizados por equações diferenciais parciais. O método dos elementos finitos é um procedimento sistemático de aproximação de funções contínuas como modelos discretos. Essa discretização envolve um número finito de pontos e subdomínios no domínio do problema. Os valores da função dada são mantidos nos pontos, a que se dá a designação de nós. Os subdomínios não sobrepostos, ou elementos finitos, são conectados por nós nos seus limites e contêm aproximações por partes e locais da função, que são definidas exclusivamente em termos de valores mantidos nos respetivos nós. Por sua vez, o conjunto de elementos e nós designar-se-á de malha e o processo em que se cria a mesma, designa-se por gerar malha [33]. Quanto maior o número de elementos e nós numa malha e menor a distância entre eles, mais precisa será a solução obtida para o problema e vice-versa. Os primeiros trabalhos publicados acerca da simulação numérica dos processos de conformação de chapa remontam ao final da década de 60. Em 1968, Woo propôs pela primeira vez a solução numérica

de um problema de conformação de chapa metálica com recurso ao método das diferenças finitas [8]. A generalização dos métodos de elementos finitos, foi determinante no surgimento da simulação numérica dos processos de conformação de chapa, cujos estudos pioneiros foram efetuados por Wifi em 1976, Gotoh & Ishise e Wang & Budiansky em 1978 [4].

No caso do *software* de conformação de chapa em estudo, o DD3IMP, o seu código utiliza o método implícito. A análise implícita no MEF é tida em consideração em casos em que o problema é não linear, a solução é obtida em várias etapas e a solução da etapa atual é baseada na solução da etapa anterior. Este tipo de análise é também conhecido como a integração inversa de Euler. As soluções obtidas pela análise implícita são soluções incondicionalmente estáveis e que facilitam intervalos de tempo maiores entre incrementos. Apesar das vantagens anteriormente mencionadas, os métodos implícitos podem consumir muito tempo ao resolver problemas dinâmicos e não lineares. O método implícito deve ser usado quando os eventos são mais lentos e os efeitos das taxas de deformação não sejam demasiado elevados. Alguns dos *softwares* que usam o método implícito, tais como o DD3IMP, utilizam os vários processadores do CPU para obter uma solução dos problemas, de modo a reduzir o tempo de simulação. Durante o processo de solução, os processadores comunicam continuamente entre si e à medida que o número de processadores necessários aumenta, chega-se a um ponto em que não há mais vantagem em usar a análise implícita, já que os processadores deixam de ser eficientes em termos de tempo [34].

Assim, para executar a simulação devem-se ultrapassar diversas etapas necessárias, sendo elas as seguintes [14]:

- Preparar dados nas ferramentas CAD para as ferramentas, tais como punção, matriz e cerra-chapas, bem como a geometria do corpo deformável, na direção em que se pretende trabalhar;
- Determinar as dimensões da chapa metálica, tais como espessura e diâmetro ou comprimento. Inserir as mesmas no software;
- Inserir e definir diversos parâmetros do processo, tais como as propriedades da matéria-prima, força do cerra-chapa, condições de atrito, e condições de fronteira do problema;
- Definir e gerar a malha de elementos finitos quer para as ferramentas, quer para o corpo deformável.
- Execução da simulação ou processo de cálculo.

Um dos objetivos da experimentação numérica de processos de conformação passa pela determinação dos esforços externos induzidos pelas ferramentas, que são aplicados aos metais ao longo das etapas do processo até à obtenção do produto final com as dimensões e geometria pretendidas.

Com isto pretende-se por um lado guiar o projeto do componente, levando a economizar matéria-prima se possível e identificar problemas, por exemplo como fratura do material durante o processo. A análise de processos de conformação mostra-se relevante para a detecção de possíveis problemas durante a produção de um dado componente, pois permite conhecer e interpretar as tensões presentes no material durante a conformação e após a mesma, o fluxo de material e o grau de deformação. Todos estes fatores ajudam a tirar conclusões e auxiliam de forma evidente na detecção de possíveis defeitos no processo, quando corretamente interpretados.

Por outro lado, uma correta análise permite guiar o projeto para o fabrico do componente, uma vez que permite conhecer as forças necessárias exercer, auxiliando assim na escolha de equipamento, na sequência de operações e na otimização das forças exercidas. Conhecer as tensões residuais presentes aquando o fim do processo e o possível retorno elástico que pode ocorrer na peça, através deste tipo de análise, permite a correção da geometria das ferramentas e do processo em si, antes de o defeito ocorrer. A análise tem então impacto direto na diminuição do desgaste de ferramentas, da potência consumida e componentes defeituosos, permitindo economizar e maximizar a produtividade.

Esta importante análise tem vindo a ser fortemente potenciada e aprimorada com o esforço da comunidade científica para o desenvolvimento contínuo ao longo dos últimos anos na área de simulação deste tipo de processos, que por sua vez permitem resultados cada vez mais fidedignos com o que se verifica na prática e simular processos cada vez mais complexos. Diversas publicações têm impulsionado o desenvolvimento na área da Conformação de metais, tais como o JMSE (*Journal of Manufacturing, Science and Engineering*) que conta com mais de 750 artigos na área da conformação desde que foi fundado em 1959 [5], bem como a revista “International Journal of Material Forming”, que é uma revista científica especializada que divulga pesquisas acadêmicas e técnicas no campo da conformação de materiais. Igualmente relevantes, conferências internacionais como a NUMISHEET que é promovida pela *The Minerals, Metals & Materials Society* (TMS), divulga a cada 2 anos *benchmarks* na área de conformação de chapas metálicas, com o intuito de: reunir especialistas de todo o mundo, para promover a discussão científica na área; aglomerar problemas e soluções apresentados, criando uma base de dados completa para a comunidade científica e indústria consultarem; e potenciar tecnologias de manufatura emergentes [35]. Alguns dos *benchmarks* anteriormente mencionados, requerem a simulação numérica de processos de conformação multi-etapa. Durante a simulação de um processo de conformação multi-etapa, antes de definir as novas ferramentas consoante o componente deformado, é necessário retirar do modelo de elementos finitos, a tensão existente no componente, através da carga que lhe foi imposta, anteriormente [36]. Tal pode ser obtido através do cancelamento das forças externas

com a desativação das ferramentas, no caso do DD3IMP, permitindo assim simular o retorno elástico resultante das tensões presentes no componente.

Para corretamente analisar o processo é importante não só olhar para o processo, ferramentas e *design* do componente em si, mas também analisar e caracterizar o material da matéria-prima a utilizar no fabrico.

Uma das principais preocupações que se deve ter em conta ao efetuar simulações de processos de conformação com o uso consistente é relativamente ao correto uso das cartas de seleção de materiais por parte dos engenheiros. Uma má escolha da carta de seleções de materiais, implica que a simulação apresente resultados incorretos e pouco exatos em relação ao contexto real, podendo levar a custos dispendiosos no processo.

Segundo Walker [37], as cartas de seleção de materiais são fulcrais para uma correta definição dos parâmetros de simulação já que, após examinar a precisão da simulação passo a passo se consegue perceber que até aproximadamente 66% da simulação pode ser afetada pela caracterização do material. Sugere-se ainda que uma possível solução para este problema passa por centrar de forma primária as atenções na educação, abordando a importância da correta simulação e focando nos aspetos inerentemente ligados ao *software* e que são influenciados por este. Nos processos multi-etapa, deve-se ter ainda em consideração que durante cada uma das etapas de conformação, o material é submetido a encruamento, afetando assim a conformabilidade do mesmo nas operações subsequentes. Assim em processos de conformação que o componente tem que passar por várias etapas, o diagrama limite de conformação baseado na deformação convencional (*Forming Limit Diagram* ou FLD) pode não ser aplicável devido a mudanças nos caminhos de deformação, e o diagrama limite de conformação baseado em tensão (*Stress-based Forming Limit Diagrams* ou SFLD) é frequentemente adotado nestes casos [38].

2.5. SÍNTESE E CONCLUSÕES

A conformação multi-etapa de chapa, foi evoluindo ao longo do tempo e revela-se um processo de fabrico de elevada importância, uma vez que permite a criação de peças mais precisas e complexas, com dimensões exatas e acabamento perfeito. Por sua vez resulta na obtenção de produtos de melhor qualidade e maior resistência, de forma económica e eficiente em relação a outros processos de fabrico.

A simulação por elementos finitos de processos de conformação multi-etapa de chapa, mostra ser uma ferramenta muito poderosa, nomeadamente na verificação e otimização destes processos. Torna-se, assim, necessário perceber qual o impacto dos diversos parâmetros que estão a ser colocados no

software como *input* e a forma como estes podem influenciar o resultado final da simulação. O engenheiro deve assumir espírito crítico e de não conformismo com a validade dos parâmetros inseridos, já que no caso de os parâmetros estarem errados, simular-se-á com um material diferente do que constitui a matéria-prima para o processo, invalidando assim os resultados que se obtiverem dessa simulação numérica.

Assim, mostra-se imperativo não apostar apenas na formação dos engenheiros para a correta utilização de todas as potencialidades dos *softwares* à disposição. Isto é, mostra-se cada vez mais importante a qualificação de toda a mão-de-obra que opera nos processos de conformação e manufatura no geral, permitindo assim a todos obter a capacidade de operar *softwares* com sentido crítico, detetando e diminuindo possíveis erros associados aos mesmos. Por sua vez, o custo de formação dos funcionários torna-se facilmente em ganho ou lucro, já que se traduz numa otimização dos processos e consequente minimização de erros na linha de produção. A condução de ensaios experimentais não deve ser substituída pela simulação numérica, mas sim devem-se complementar mutuamente. Ou seja, a simulação numérica deve-se apoiar sempre dos ensaios experimentais, de modo a conferir a veracidade dos resultados obtidos. Os ensaios experimentais devem, por sua vez, apoiar-se na simulação numérica, no sentido de eliminar à partida erros ou iterações desnecessárias consoante os resultados que se obtêm da simulação numérica, experimentando-se assim de forma mais eficiente o processo projetado, com menores custos globais.

3. CASO DE ESTUDO 1 - EMBUTIDURA PROFUNDA EM 5 ETAPAS

3.1. ESPECIFICAÇÕES DO CONFORMADO

O processo apresentado por A. Barata da Rocha e J. Ferreira Duarte em Tecnologia da Embutidura [24] pretende obter um recipiente com diâmetro (d) de 20mm e altura (h) de 60mm, a partir de um esboço circular de diâmetro D . Para este caso de estudo, não existem indicações para a espessura que o componente deve ter e então assumiu-se o valor de 0,5mm. Na Figura 3.1, observa-se a representação do componente e a sua modelação 3D em *Solidworks*.

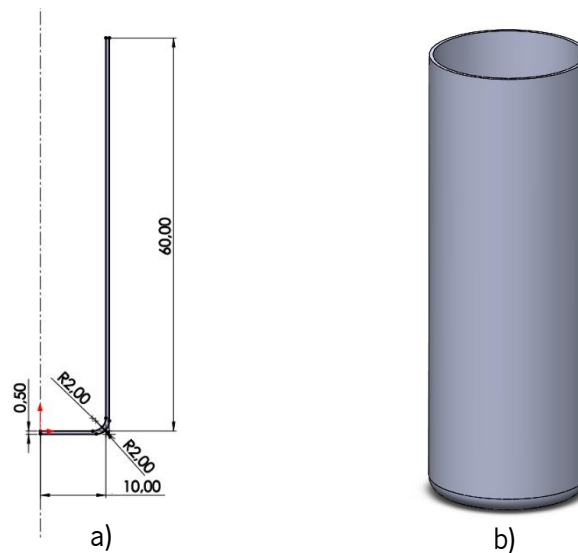


Figura 3.1 – Representação do componente que se pretende obter com a Embutidura profunda em 5 etapas: a) Representação esquemática 2D em *Solidworks*; b) Representação do modelo 3D em *Solidworks*.

Passando ao esboço inicial do problema, os autores definiram que o mesmo inicialmente deveria ter a forma de um disco e na seguinte Figura 3.2, apresenta-se a representação do mesmo.

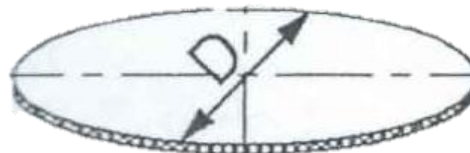


Figura 3.2 – Representação do esboço a utilizar no processo de Embutidura Profunda em 5 etapas.

De modo a poder calcular o diâmetro do esboço circular (D), os autores utilizaram a seguinte expressão:

$$D = \sqrt{d^2 + 4 d h} , \quad (3.1)$$

Neste caso tem-se então que:

$$D = \sqrt{20^2 + 4 \times 20 \times 60} = 72mm , \quad (3.2)$$

Segundo o cálculo acima apresentado será necessário um esboço com 72mm de diâmetro. No entanto, é importante salientar que este cálculo parte do princípio que no decorrer das etapas de Embutidura, a espessura ao longo do componente se mantém constante. Tendo em conta a variação de espessura, o componente poderá apresentar uma profundidade diferente da pretendida (h=60mm). Para este processo, como referido anteriormente, arbitrou-se a espessura da chapa como sendo de 0,5mm.

3.2. PRÉ-PROCESSAMENTO E GEOMETRIA E DIMENSÕES DAS FERRAMENTAS

De modo a efetuar uma simulação numérica, é estritamente necessário definir parâmetros, para que a mesma possa ser executada corretamente. Após se definirem as especificações iniciais do componente, é importante efetuar o pré-processamento, definindo os ficheiros de *input*.

A seleção do material é essencial, tal como a correta definição das suas propriedades mecânicas, de modo a no fim da simulação e pós-processamento, se obterem resultados fidedignos com o que é observado experimentalmente. O material selecionado para o presente caso de estudo foi uma liga de alumínio AA6111, cujas propriedades mecânicas foram determinadas a partir de dados experimentais existentes de um ensaio de tração efetuado para este material, presentes no Anexo A.

Na Figura 3.3 abaixo apresentada figuram ainda propriedades conhecidas do material, tais como o módulo de elasticidade (EM=68000,0 MPa) e o coeficiente de Poisson (PR=0,36). No parâmetro PlasLAW deve-se colocar o valor 5, de modo a que o *software* utilize os valores dos parâmetros da Lei de Voce.

```

1010*****      < DD3IMP 010.x > File "mater.dat" 23.03.2021      *****
*****          MANDATORY file to input constitutive parameters *****
=====
MATERIAL PARAMETERS| PlasLAW YldCRIT          EM          PR
                   |          5          1          68000.0      0.36
-----
Swift Law          |          Yo          CC          AN          |          AX|          alfa
Isot.Kinem.Hard.  |          |          |          |          |          0.0|          -
-----
Voce Law          |          Yo          CY          Ysat          m|          CX          Xsat
No-Isot.Kin.Hard.|          150.0      10.5      387.0      0.0|          0.0      0.0
-----

```

Figura 3.3 – Definição da lei de encruamento no ficheiro DD3_mater para as diferentes etapas da simulação da Embutidura Profunda em 5 etapas.

Para corretamente definir o comportamento mecânico do material é ainda necessário definir o critério de plasticidade a utilizar, para definir a superfície de cedência. Para a escolha do critério a utilizar, deve-se ter em conta o comportamento do material, isto é, se o material é isotrópico ou anisotrópico. No presente caso de estudo, o material AA6111 é anisotrópico e este tipo de materiais, pode-se definir como os materiais que apresentam propriedades mecânicas variáveis consoante a direção de solitação mecânica [37].

Na seguinte Figura 3.4, podem-se observar o *input* dos coeficientes do critério de Hill48, no ficheiro DD3_mater. No parâmetro YldCRIT, presente na Figura 3.3, deve-se colocar o valor 1, de modo a que o *software* DD3IMP leia os parâmetros introduzidos para o critério de plasticidade Hill48.

```
=====+=====
YIELD CRITERION |
-Hill48         |
                |         F         G         H         L         M         N
                |         0.48996   0.61881   0.38119   1.5       1.5       1.27065
                |-----+-----
```

Figura 3.4 – Definição do critério de plasticidade no ficheiro DD3_mater para as diferentes etapas da simulação da Embutidura Profunda em 5 etapas.

Outro dos aspetos a definir no pré-processamento é o esboço e a respetiva malha. A modelação da malha é efetuada no *software* *GiD*, inicialmente a duas dimensões, sendo posteriormente gerada em 3D com o executável *bi2tri*. Na seguinte Figura 3.5 apresenta-se o esboço modelado para representar a chapa inicial necessária ao processo. O processo devido à geometria do componente final ser axissimétrica no eixo Oy e Oz, poderá ser simulado $\frac{1}{4}$ da embutidura do esboço.

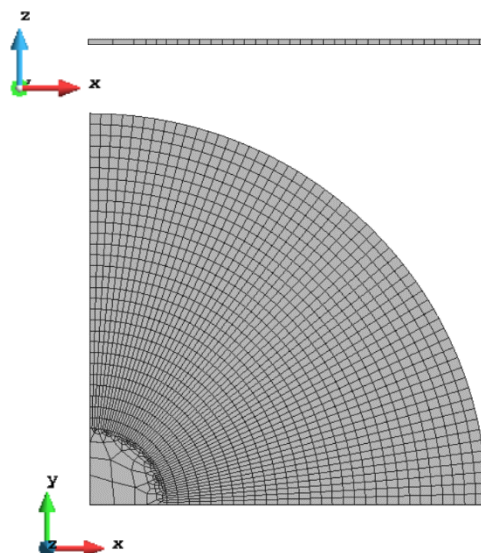


Figura 3.5 – Vista de frente e de cima do esboço inicial modelado no *GiD*.

A malha gerada para o esboço acima apresentado terá um raio de 36mm, em que na parte central, de 7mm de raio, terá malha quadrangular não-estruturada, uma vez que esta zona não vai sofrer a ação

de deformação plástica e portanto do ponto de vista da simulação numérica faz sentido malha grosseira na referida zona, para otimizar o tempo de simulação. Na periferia do esboço, os elementos serão quadrangulares e estruturados de 1mm de comprimento e largura, sendo preferível que inicialmente os elementos sejam o máximo quadrangular possível, de modo a que quando sujeitos à deformação não fiquem demasiado deformados, ao ponto de interromper a simulação. Na direção Oz, a malha terá uma espessura de 0,5mm e será constituída apenas por uma camada de elementos Hex8 (Hexaédricos trilineares de 8 nós), não se justificando mais que uma camada devido à reduzida espessura arbitrada para o esboço.

Na seguinte Figura 3.6, encontram-se as ilustrações da geometria do esboço ao longo das 5 etapas a que será sujeito e a legenda das dimensões após cada uma das mesmas.

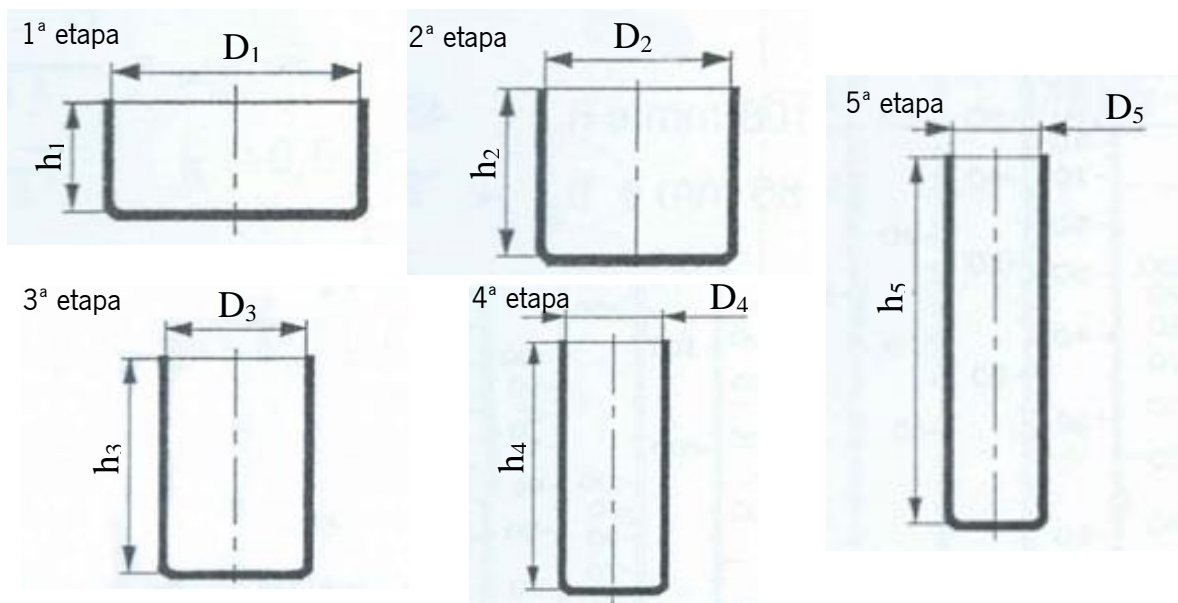


Figura 3.6 – Representação esquemática da geometria do esboço após cada uma das 5 etapas.

Por sua vez, na Tabela 3.1, apresentam-se os valores numéricos das dimensões pretendidas no fim de cada etapa de Embutidura.

Tabela 3.1 – Dimensões pretendidas no final da cada etapa da Embutidura Profunda em 5 etapas.

Diâmetro	Valor do diâmetro [mm]	Altura	Valor da altura [mm]
D_1	43,20	h_1	19,20
D_2	34,56	h_2	28,86
D_3	27,65	h_3	39,96
D_4	22,12	h_4	53,06
D_5	20,00	h_5	60,00

Na presente Embutidura Profunda em 5 etapas, identificou-se a necessidade da utilização de 3 tipos de ferramentas ao longo do processo, sendo estas o Punção, Matriz e Cerra-Chapas. Para o

presente trabalho definiu-se que para simplificar a designação das ferramentas, as mesmas serão compostas por um primeiro número que corresponde ao número de ferramenta e um segundo número que corresponde à etapa. Neste caso o Punção é a ferramenta 1, Matriz é a ferramenta 2 e o Cerra-Chapas a ferramenta 3.

Passando aos Punções necessários para este processo de Embutidura Profunda em 5 etapas; apresenta-se de seguida a Figura 3.7, onde é possível observar as designações para as dimensões e a geometria a ter em conta, na modelação desta ferramenta.

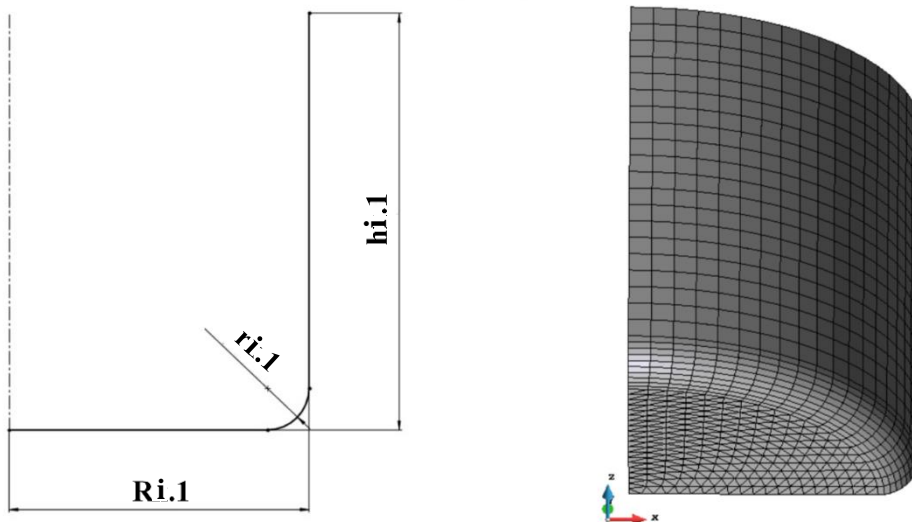


Figura 3.7 – Representação esquemática do Punção e dimensões do mesmo.

Assim, R corresponderá ao raio do Punção, h à altura e r corresponderá à curvatura presente nesta ferramenta, e por sua vez o Punção corresponderá à ferramenta número 1. Na Tabela 3.2, encontram-se as dimensões utilizadas na modelação da ferramenta Punção em *Solidworks*.

Tabela 3.2 – Dimensões dos diversos punções para cada etapa da Embutidura Profunda em 5 etapas.

Número de etapa, i	Raio, $R_{i,1}$ [mm]	Altura, $h_{i,1}$ [mm]	Raio de curvatura, $r_{i,1}$ [mm]
1	21,60	30,00	2,00
2	17,28	50,00	3,00
3	13,83	50,00	3,00
4	11,06	65,00	3,00
5	10,00	70,00	3,00

Relativamente às Matrizes necessárias para este processo de Embutidura Profunda em 5 etapas; é possível verificar na Figura 3.8, as designações das dimensões e a geometria necessária para a modelação deste tipo de ferramenta.

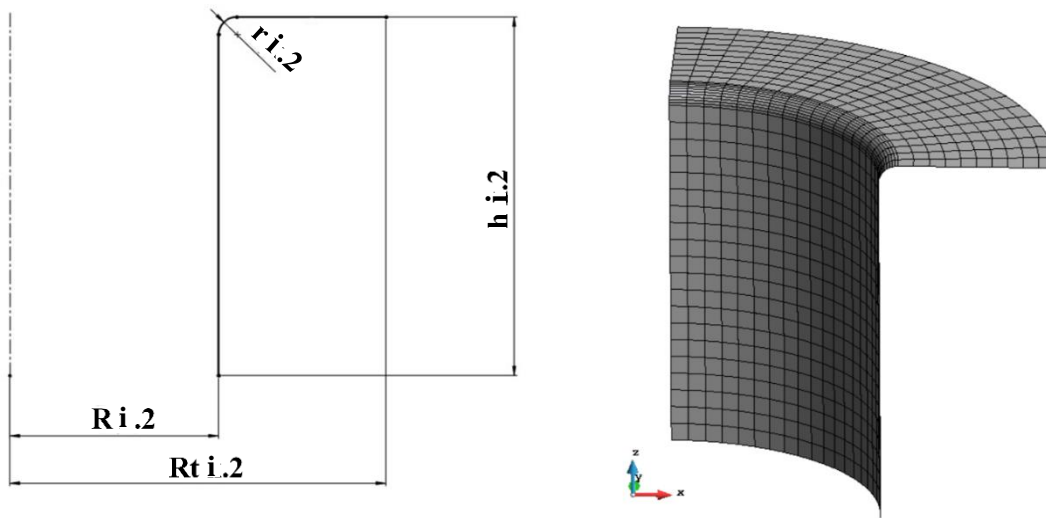


Figura 3.8 – Representação esquemática da Matriz e dimensões da mesma, no Caso de Estudo 1.

Para a Matriz, a ferramenta número 2, R corresponde ao raio da cavidade da Matriz, h à altura, r corresponde à curvatura presente nesta ferramenta e a designação Rt corresponde ao raio total da ferramenta. Na seguinte Tabela 3.3, encontram-se as dimensões utilizadas na modelação da ferramenta Matriz em *Solidworks*.

Tabela 3.3 – Dimensões das diversas Matrizes utilizadas para a simulação do Caso de Estudo 1.

Número de etapa, i	Raio, $R_{i,2}$ [mm]	Altura, $h_{i,2}$ [mm]	Raio total, $Rt_{i,2}$ [mm]	Raio de curvatura, $r_{i,2}$, [mm]
1	22,20	30,00	40,00	2,00
2	17,88	40,00	30,00	3,00
3	14,43	50,00	30,00	3,00
4	11,66	65,00	25,00	3,00
5	10,60	70,00	25,00	3,00

O Cerra-Chapas será apenas utilizado na 1ª etapa. A utilização do Cerra-Chapas faz sentido na 1ª etapa do processo, de modo a fixar a aba, não permitindo que esta oscile a elevada frequência, prevenindo ainda rugas indesejadas. Nas etapas seguintes esta ferramenta não é necessária, uma vez que o componente é completamente embutido e por conseguinte, não apresenta aba, não sendo necessária a sua fixação através de Cerra-Chapas.

Na Figura 3.9 apresentam-se as dimensões e a geometria que o mesmo deve possuir.

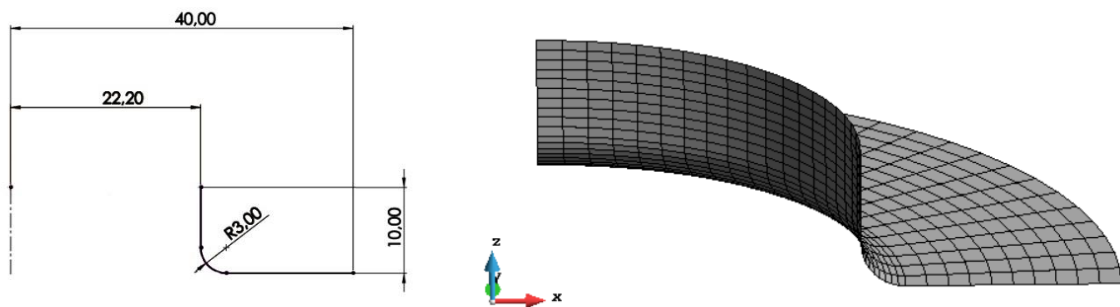


Figura 3.9 – Representação do Cerra-Chapas e das suas dimensões, referentes ao Caso de Estudo 1.

Nas ferramentas modeladas para este processo, além das dimensões, prestou-se ainda atenção às arestas das mesmas, que não devem ser vivas, mas sim com curvatura. Relativamente a essa curvatura arbitrou-se que a mesma deverá ter um raio de aproximadamente 6 vezes a espessura da chapa, de modo de facilitar o escoamento de material e prevenindo a rutura da chapa no processo.

Passando ao posicionamento das ferramentas, o mesmo foi efetuado com o auxílio do *software* *GiD*. No posicionamento entre a Matriz e o Punção, teve-se em conta o objetivo do componente não aumentar em demasia a sua espessura ao longo das sucessivas embutiduras. Ou seja, determinou-se inicialmente uma folga entre essas ferramentas de 0,6mm que corresponde a uma folga de 20% da espessura inicial do esboço ($t_0=0,5\text{mm}$), mantendo-se esta mesma folga ao longo das sucessivas embutiduras. Na seguinte Figura 3.10, encontra-se a representação do posicionamento inicial das ferramentas em relação ao componente, nas diversas etapas.

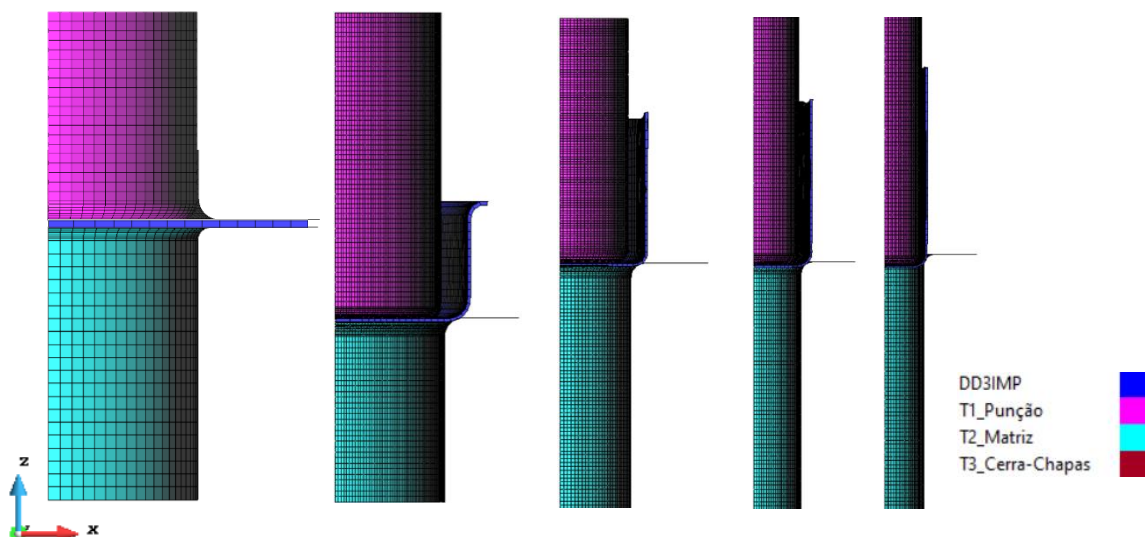


Figura 3.10 – Posicionamento inicial das ferramentas em relação ao corpo deformável ao longo das 5 etapas da Embutidura Profunda.

3.2.1. ETAPA 1

O ficheiro de *input* DD3_bcon, terá configuração igual em todas as etapas e no mesmo definir-se-ão as seguintes condições de fronteira, apresentadas na Figura 3.11. É então definida neste ficheiro, a axissimetria do esboço nas coordenadas x e y.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "bcon.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input Boundary Conditions *****
=====
Boundary conditions| NSC= 2 ERR= 1.D-2 BCID
Ax+By+Cz=D | A B C D COORD ID NRES
P1 | 0 1 0 0 2 2 0
P2 | 1 0 0 0 1 2 0
Restrictions | COORD COND VALUE ERR2
P2R1 | . . . 1.D-2
=====
OSS One Step | NRES= 1
Springback | x y z COORD Xinit
N1 | 0.0 0.0 0.0 3 1
N2 | . . . .
=====

```

Figura 3.11 – Configuração do ficheiro DD3_bcon para as diferentes etapas da simulação da Embutidura Profunda em 5 etapas.

No ficheiro DD3_input, apresentado na Figura 3.12, definiram-se os critérios da simulação, em que se definiu um NEND=10000, de modo a poder efetuar no máximo 10000 incrementos da simulação, para que as simulações não parem devido a este critério. Definiu-se ainda um TOLEQ=0,05 e o IEQMAX=50, de modo a tornar a simulação mais rápida e com menos tentativas por iteração. Da primeira para a as restantes etapas teve-se que fazer apenas uma alteração relativa ao iphOSS de 3 para 2, para assinalar a diferente fase em que ocorre o retorno elástico do corpo deformável.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "input.dat" 01.07.2009 *****
***** MANDATORY file to start/restart a simulation *****
=====
Simulation and | NSTART NEND NOUT iGID INC DEV
Output Data | 1 10000 0 10 51 0
-----
Tolerances and | TOLEQ TEQOUT RAPEQ TOLST CUNL dampOSS
residues | 0.05 0.05 1.0E+09 1.0E-08 0.999 0.50
-----
Maximum number | IRMXX IEQMAX NMAXST
of iterations | 1 50 25
-----
Max. Increments | DEMAX DWMAX DSNMAX DSTMAX
for each NST | 0.0100 0.5000 10.0 3.0
-----
Rmin | RINF RSUP DFNMAX DFT1MAX DFT2MAX
Strategy | 0.0010 5.000 0.0 0.0 0.0
-----
Thermal Analysis | T_TOLEQ T_alfa T_Diag T_Transi T0[°C]
Parameters | 1.0E-03 0.5 1 1 25.0
-----
Input data, | MEPopt iphOSS
Cep | 1 2
=====

```

Figura 3.12 – Configuração do ficheiro DD3_input para as diferentes etapas da simulação da Embutidura Profunda em 5 etapas.

No ficheiro DD3_contact, definiram-se os *sets* de contacto das ferramentas com a chapa, em que o set 1 corresponde ao contacto com a face inferior e o set 2 ao contacto com a face superior da chapa.

Ademais, definiu-se que o coeficiente de atrito seria de 0,144 (MU=0,144). Na seguinte Figura 3.13, é possível observar a configuração do referido ficheiro.

```

1010*****      < DD3IMP 010.x > File "contact.dat" 23.03.2021      *****
*****
MANDATORY file to input contact sets      *****
=====
CONTACT SETS
|
| NSET      2
|
ISET Ax+By+Cz=D X|      A          B          C          D
1      P|      0          0          1          L
2      P|      0          0          1          H
-----

X:  P -> Plane   | Ax + By + Cz = D
    R -> Radius  | Ax2 + By2 + Cz2 = D2 ; A, B, C =1 or 0
    N -> Normal  | normal(A,B,C), angular deviation = D [degrees]
    E -> Ellipse | (x/A)^2+(y/B)^2+(z/c)^2=1.0
    F -> File    | Name of the .dat file with nodes listed (1 space #node)
    F -> File    | First line: Mesh Entities; Last line: End Mesh Entities

If D=0.0 -> Reads the coordinates of Radius/Ellipse center in the next line
A=X0 ; B=Y0 ; C=Z0 ; D=D (Radius) or D=1 (Ellipse)
=====
FRICITION
|
xxx : xxx |      MU      CPen  IPenvar      CPenD
G      |      0.144  20600.0
S      1 |
S      2 |
P     10 : 15 |
T      1 : 2 |
-----

```

Figura 3.13 – Configuração do ficheiro DD3_contact para as diferentes etapas da simulação da Embutidura Profunda em 5 etapas.

Assim, na Figura 3.14 apresenta-se os parâmetros atribuídos no ficheiro DD3_phase da 1ª etapa do processo. Numa primeira fase, o Cerra-Chapas descerá na direção do eixo Oz, para fixar a chapa contra a Matriz, até ser exercida uma força de 2750N. De notar que esta força é aplicada em apenas ¼ do componente, pelo que na realidade a força a ser atingida pelo Cerra-Chapas terá a intensidade de 11000N. Na etapa seguinte, o Cerra-Chapas atuará a força constante e o Punção descerá 19,2mm relativamente à direção do eixo Oz, de forma a embutir a chapa. Por fim, na 3ª etapa desativam-se as ferramentas e ocorre o retorno elástico.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 3 NbTOOL= 3 NbBCID= 0
=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 -0.1 -0.1 0.5 T1_Punção 2
2 -0.1 -0.1 0.0 T2_Matriz 1
3 -0.1 -0.1 0.0 T3_Cerra-Chapas 2
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| .0001 3 3 2 2 0.0001
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 2 0.0 0.0 -0.3 0.0 0.0 2750.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
2| .001 1 3 1 1 19.2
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 2 0.0 0.0 -19.2 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 3 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2750.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
3| .0001 3 3 3 2 0.0001
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====

```

Figura 3.14 – Configuração do ficheiro DD3_phase para a 1ª etapa do Caso de Estudo 1.

3.2.2. ETAPA I (I>1)

Na 2ª etapa, o ficheiro DD3_phase terá a seguinte configuração apresentada na Figura 3.15. Nesta fase já não figura o Cerra-Chapas, havendo apenas 2 etapas. Na primeira fase, o Punção desce 34mm relativamente à direcção do eixo Oz, de modo a embutir totalmente o corpo deformável. Na segunda fase, dá-se a desativação das ferramentas, para que no corpo deformável haja o retorno elástico.

```

1400*****      < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021      *****
*****          MANDATORY file to input phase data              *****
                NPH= 2  NbTOOL= 2  NbBCID= 0
=====|=====|=====|=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
0|      X      Y      Z  <naming-----> BCID SET  lim-  lim+
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1|     -0.1    -0.1     0.31  T1_Punch           2
2|     -0.1    -0.1    -18.65  T2_Matriz           1
=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+
IPH|      DELT  NOUT  JD  NTYP  NOPR           Text[°C]  TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1|      .001    3     3     2     2           34.
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout|  INDOUT(I)      DISINT(I)(f8.0)      EFFIMP(I)(f8.0)  Hcoef  Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1|  1  1  2     0.0     0.0    -34.0     0.0     0.0     0.0     0     0
2|  1  1  1     0.0     0.0     0.0     0.0     0.0     0.0     0     0
=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+
IPH|      DELT  NOUT  JD  NTYP  NOPR           Text[°C]  TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
2|      .0001    1     3     3     2           0.0001
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout|  INDOUT(I)      DISINT(I)(f8.0)      EFFIMP(I)(f8.0)  Hcoef  Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1|  0  0  0     0.0     0.0     0.0     0.0     0.0     0.0     0     0
2|  0  0  0     0.0     0.0     0.0     0.0     0.0     0.0     0     0
=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+

```

Figura 3.15 – Configuração do ficheiro DD3_phase para a 2ª etapa do Caso de Estudo 1.

Por fim, na 5ª etapa o ficheiro terá a seguinte configuração apresentada na Figura 3.18. Na primeira fase, o Punção desce 56mm relativamente à direção do eixo Oz, de modo a embutir totalmente o corpo deformável. Na segunda fase, dá-se a desativação das ferramentas, para que no corpo deformável haja o retorno elástico.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 2 NbTOOL= 2 NbBCID= 0
=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+
1 -0.1 -0.1 0.0 T1_Punch 2
2 -0.1 -0.1 3.7 T2_Matriz 1
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+
1| .001 3 3 2 2 65.
+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 2 0.0 0.0 -65.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+
2| .0001 1 3 3 2 0.0001
+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+
1 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====

```

Figura 3.18 – Configuração do ficheiro DD3_phase para a 5ª etapa do Caso de Estudo 1.

Todo o posicionamento e deslocamento inicial das ferramentas, definido no cabeçalho 0 dos ficheiros DD3_phase foi ajustado por iteração e manualmente, medindo as distâncias entre ferramentas e o corpo deformável com o auxílio do *GiD*, o que torna a simulação de processos multi-etapa mais morosa e trabalhosa, retirando alguma eficiência à utilização do DD3IMP, atualmente.

3.3. PÓS-PROCESSAMENTO E ANÁLISE

Passando ao pós-processamento da simulação numérica, e analisando os resultados obtidos a nível de geometria e a nível de deformação plástica, obteve-se o seguinte resultado apresentado na Figura 3.19.

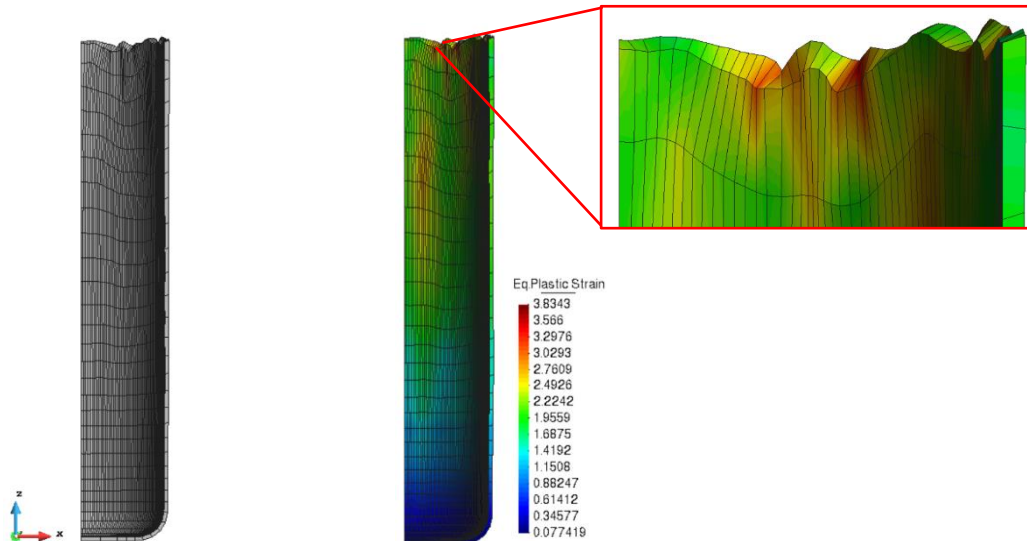


Figura 3.19 – Representação do componente obtido no caso de estudo de Embutidura Profunda em 5 etapas.

Como é possível observar na figura acima apresentada, o local que apresenta a deformação mais acentuada é o topo do corpo deformável, onde se observam irregularidades a nível de geometria, provenientes dessa deformação. Pode-se ademais observar que à medida que a parede lateral se vai aproximando da base, a deformação nela vai diminuindo. Tal acontece, uma vez que a zona central não sofre deformação ao longo do processo e as deformações vão acumulando ao longo das etapas, na parede lateral do embutido. Assim, as zonas deformadas nas etapas iniciais apresentam menor deformação, relativamente às zonas mais próximas do topo do corpo deformável, que foram embutidas nas etapas finais.

Segundo os dados obtidos por simulação numérica, o corpo deformável no final terá um diâmetro de aproximadamente 19,87mm, diferindo 0,13mm do diâmetro pretendido final de 20mm, o que corresponde a um desvio de 0,65%. Este desvio poderá dever-se ao deslocamento de -0,1mm, dado inicialmente às ferramentas nas direções O_x e O_y , de modo a evitar problemas de contacto com os nós do corpo deformável.

Quanto à altura do corpo deformável, observou-se que existiam imperfeições no topo do mesmo, provenientes da Embutidura e do efeito de *ironing* que ocorreu durante o processo, que também poderá ser devido à utilização de uma malha relativamente grosseira.

As referidas imperfeições passam a ser apresentadas na seguinte Figura 3.20.

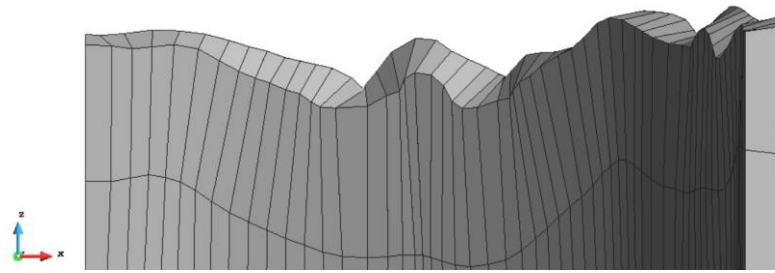


Figura 3.20 – Detalhe da deformação observada no topo da parede lateral do embutido profundo.

Como se pode observar na figura acima apresentada, a altura final do corpo deformável é variável com o ângulo em relação à direção de laminagem e que a altura difere também da superfície interior para a exterior. Tendo em conta que a superfície interior é a que visivelmente apresenta menor altura, teve-se essa superfície em conta para verificar se todo o topo do corpo deformável cumpre o requisito mínimo de estar a uma altura de 60mm. Na Figura 3.21 abaixo apresentada, pode-se observar a evolução da altura da face interior do embutido, consoante o ângulo em relação à direção de laminagem.

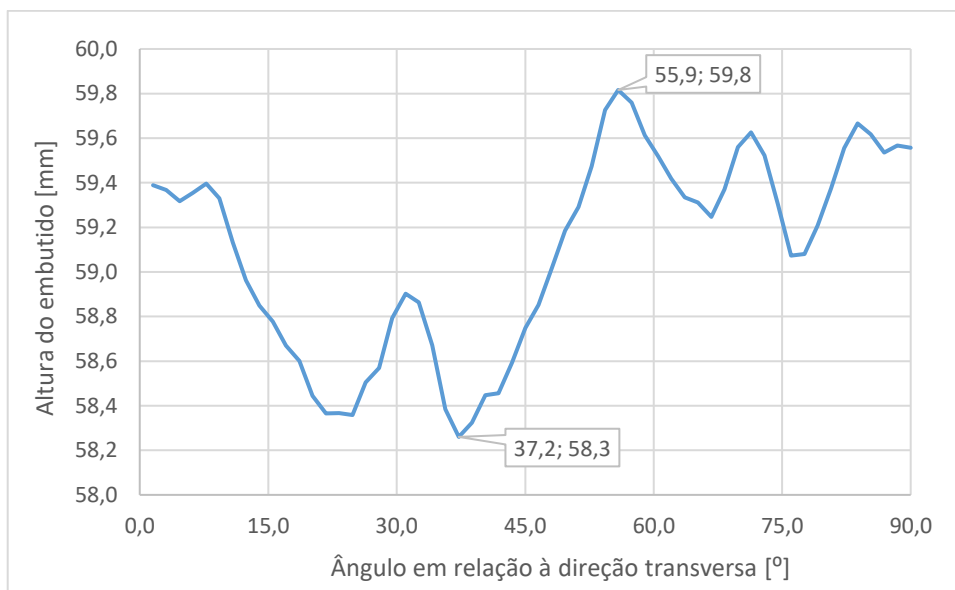


Figura 3.21 – Altura do embutido profundo em relação à direção transversa, na face interior.

Como é possível observar, na figura acima, a altura mínima é de 58,26mm para um ângulo de 37,24°, o que significa que não se cumpriram os requisitos da altura pretendida, sendo necessário um diâmetro maior inicial do esboço, de modo a poder satisfazer a condição que o embutido deve ter 60mm de altura.

No entanto, num processo real apenas é possível medir com exatidão a face exterior do embutido. Para essa face obtiveram-se os seguintes valores para a altura (Figura 3.22).

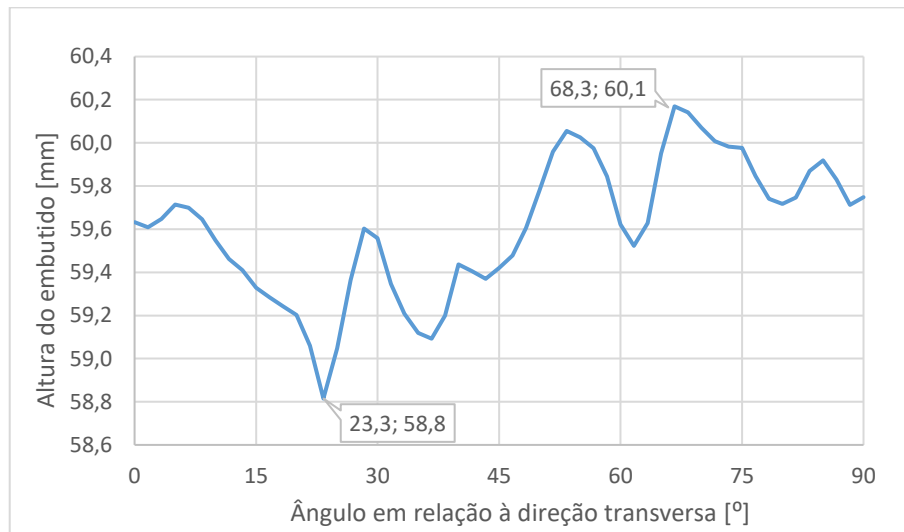


Figura 3.22 – Altura do embutido profundo em relação à direção transversa, na face exterior.

Comparando a diferença de alturas entre a face interior e exterior, obteve-se a seguinte representação gráfica, presente na Figura 3.23.

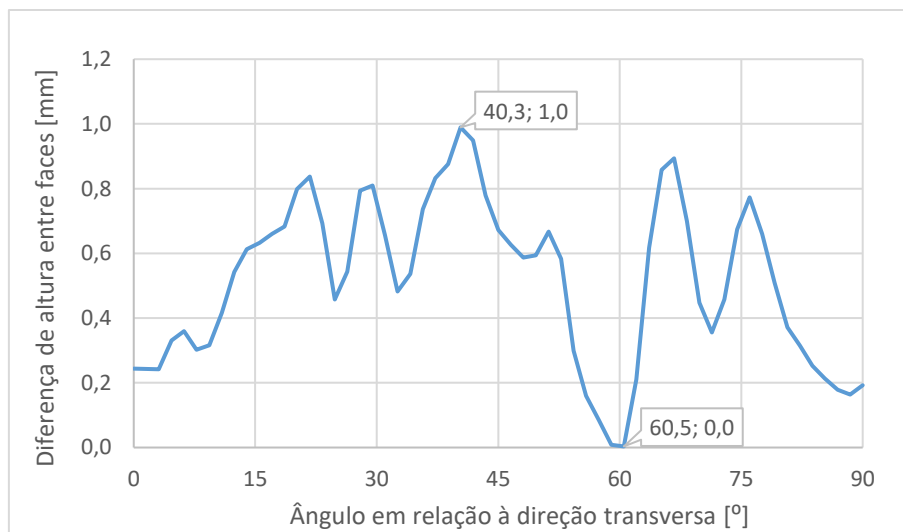


Figura 3.23 – Diferença da altura do embutido entre a face interior e exterior em relação à direção transversa.

Como é possível observar, na generalidade dos casos, a face exterior apresenta maior altura em relação à base, do que a face interior do embutido, confirmando assim o que se observa na Figura 3.20.

A nível das tensões residuais existentes no corpo deformável após a etapa final, obteve-se o seguinte resultado observável na Figura 3.24.

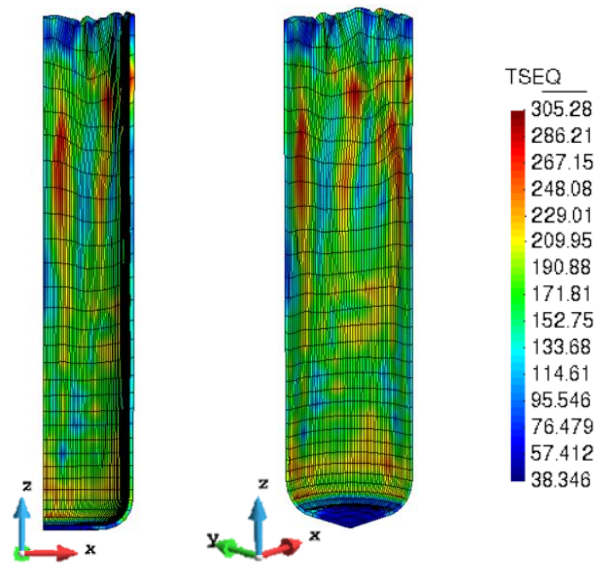


Figura 3.24 –Tensões residuais existentes no corpo deformável no final do processo.

Inferindo sobre a figura acima apresentada, existem tensões residuais bastante elevadas no corpo deformável, a rondar os 305,28MPa, em zonas em que a deformação plástica é maior e causada pelo efeito de *ironing*. Por outro lado, as tensões residuais menores concentram-se na base do corpo deformável, pois esta praticamente não sofreu deformação plástica e no topo da parede lateral, devido ao efeito de bordo livre.

De modo a interpretar o presente caso de estudo de forma abrangente, observou-se a evolução da espessura do corpo deformável desde o centro até à aba. Os resultados obtidos na direção de laminagem apresentam-se na seguinte Figura 3.25, em função da distância geodésica.

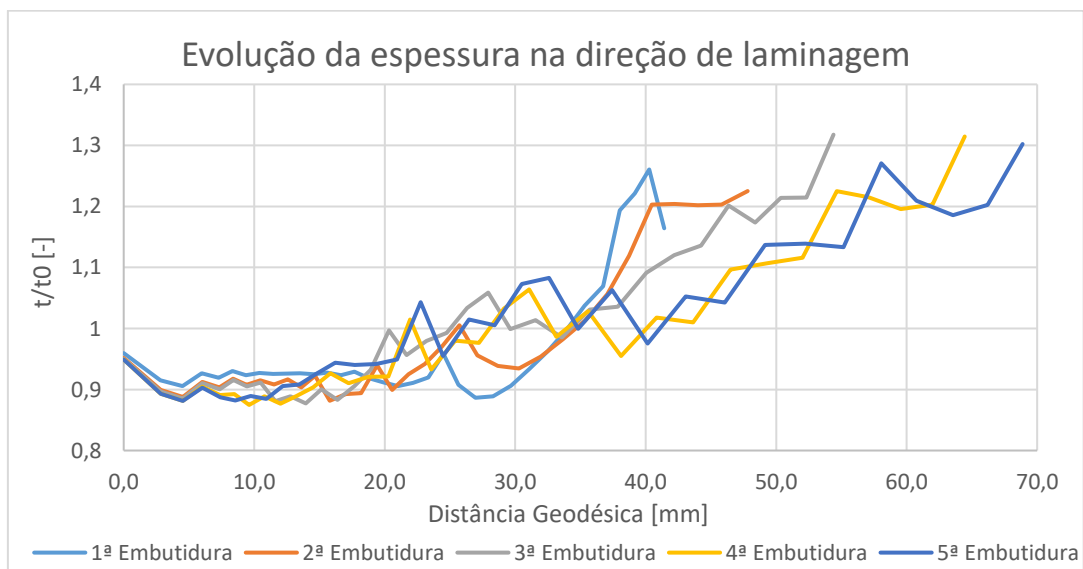


Figura 3.25 – Evolução da espessura em relação à espessura inicial do esboço na direção de laminagem.

Como o material conformado é anisotrópico, será expectável um diferente comportamento na direção transversa, sendo portanto importante também analisar a evolução das espessuras nesta direção, através da observação da Figura 3.26.

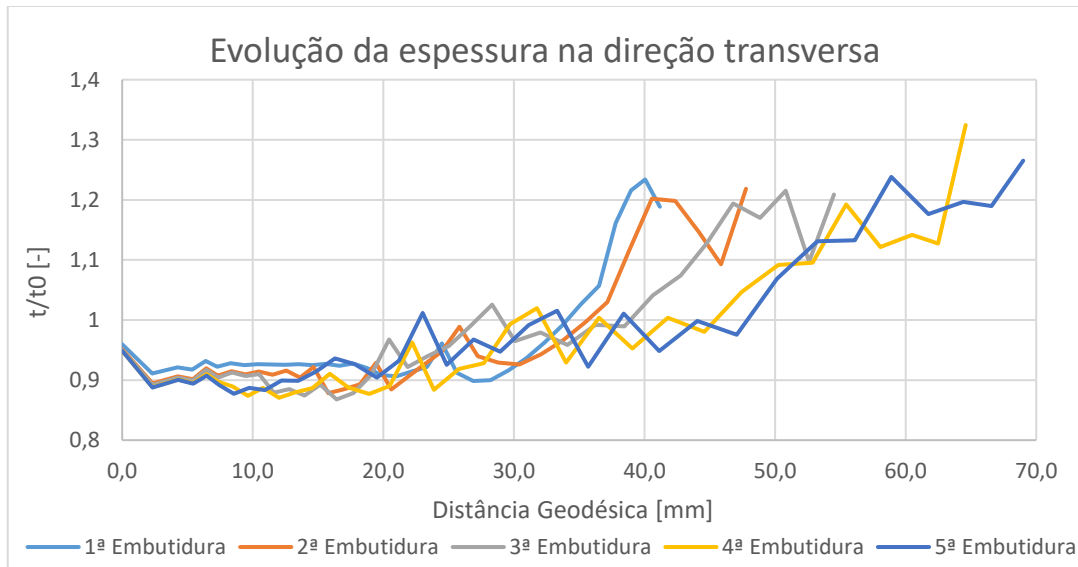


Figura 3.26 – Evolução da espessura em relação à espessura inicial do esboço na direção transversa.

Como é possível observar em ambas as direções, as espessuras vão aumentando à medida que se avaliam os nós mais perto da aba e tal sucede devido ao natural escoamento de material para esta zona, durante a Embutadura. A espessura nos nós da ponta do corpo deformável apresentam maior espessura do que a folga de 20% dada entre a matriz e o punção (0,6 mm), devido ao algoritmo calcular a distância entre os nós da camada superior e inferior da malha do corpo deformável. Como nesta última camada de nós se verifica uma deformação acentuada, que pode ser observada na Figura 3.20, a distância entre nós da face superior e inferior do corpo deformável terá um valor aumentado em relação à real espessura. Deve-se então concluir que estes valores não devem ser tidos em conta.

Por sua vez as zonas em que se observa menor espessura são na base, que é a zona mais perto do centro e no início da parede lateral do corpo deformável, com reduções na casa dos 14% na direção de laminagem e 16% na direção transversa, que não é um valor acentuado ou que ponha em risco a integridade do corpo deformável. Na zona da base em particular, pode-se verificar que a espessura se vai mantendo aproximadamente constante, uma vez que esta zona é a que está sujeita a menor ação de deformação plástica ao longo das diversas etapas.

Portanto, conclui-se que é possível obter o embutido pretendido com as etapas propostas pelos autores do caso de estudo, usando a mesma folga em todas as etapas, controlando a espessura máxima do corpo deformável ($\geq 0,6\text{mm}$). No entanto, os cálculos dos autores do problema mostram-se incorretos, uma vez que ao aplicar as referidas fórmulas, partem do princípio que a espessura do componente se

mantém constante ao longo do processo, o que não se verifica nos resultados obtidos da simulação, principalmente devido à evolução da espessura ao longo do componente.

De seguida, analisaram-se os resultados obtidos para a carga do Punção em função do seu deslocamento, para as diversas etapas/embutiduras que compõem o processo, presentes na Figura 3.27.

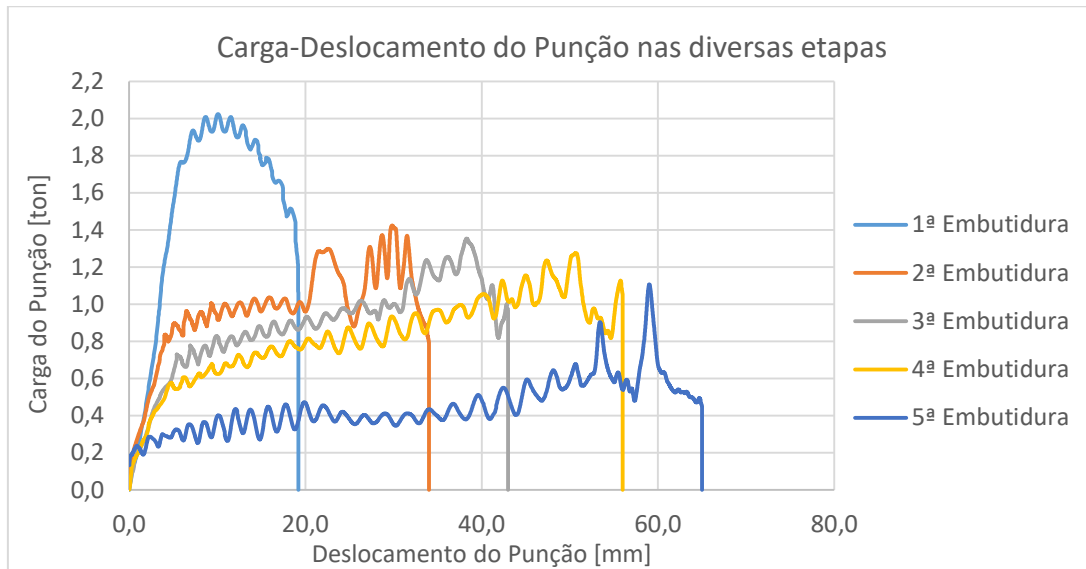


Figura 3.27 –Carga-Deslocamento do Punção nas diversas etapas do Caso de Estudo 1.

Como é possível observar na figura acima apresentada, o pico de força exercida é atingido na 1ª Embutidura, sendo cerca de 2,06 toneladas. Este facto pode derivar do facto de nesta etapa o Cerra-Chapas estar a atuar e a segurar a aba do componente, levando a que o Punção tenha que exercer uma maior carga de modo a avançar no seu curso. Tendo em conta a carga máxima exercida durante a simulação do processo, e de modo a reproduzir o processo experimentalmente, deve-se ter em conta a utilização de uma prensa com uma capacidade de pelo menos 2,5 toneladas de capacidade de carga. Neste caso deu-se uma margem de segurança de cerca de 0,5 toneladas, mas a mesma depende da sensibilidade de cada um perante os dados obtidos por simulação numérica e da experiência com a utilização do *software*. Pode-se notar ainda que da 2ª à 5ª Embutidura se verifica que o pico de força exercida pelo punção se situa perto do final da etapa. Este facto pode ocorrer devido ao aumento de espessura do corpo deformável na zona da aba, que é a última zona a ser embutida, sendo assim necessária uma força maior para embutir totalmente essa zona de maior espessura. O referido aumento de espessura ocorre devido ao escoamento de material durante a Embutidura. Assim, a espessura na aba pode passar até a ser maior que a folga entre a matriz e o punção. Nesse caso, durante a Embutidura ocorre um efeito de “*ironing*”, ou seja, como a espessura é maior que a folga, será necessário o punção exercer uma força maior, para que a espessura do corpo deformável nesta zona diminua até ao valor da

folga entre o punção e matriz. Este efeito de “*ironing*” permite que o corpo deformável seja embutido totalmente, sem haver um aumento acentuado na espessura na aba, uniformizando assim a sua espessura.

Assim e concluindo sobre o presente processo, o mesmo não cumpre os parâmetros dimensionais pretendidos, nomeadamente na altura do embutido. O problema pode ser solucionado de duas maneiras possíveis: fazendo uma etapa final de *ironing*, ou ter um maior diâmetro do esboço inicial. Do ponto de vista de eficiência, o ideal seria implementar uma etapa final de *ironing*, diminuindo a espessura do corpo deformável, ao mesmo tempo em que estira a parede lateral. Aplicando essa etapa adicional, obtém-se a altura final pretendida, ou até uma altura ligeiramente superior à pretendida, de modo a dar uma margem de folga para maquinar as irregularidades do corpo deformável na parte superior. No entanto, se houverem limites de espessura mínimos definidos para o corpo deformável, a solução terá de passar por aumentar o diâmetro do esboço inicial, significando assim uma maior quantidade de matéria-prima gasta por componente e conseqüentemente maior desperdício e sucata produzida por componente, sendo assim um cenário a ter em conta, se não houver outra hipótese.

4. CASO DE ESTUDO 2 - CONFORMAÇÃO MULTI-ETAPA E COM ESTIRAMENTO DE EMBUTIDO CILÍNDRICO PROFUNDO

4.1. ESPECIFICAÇÃO DO CONFORMADO

O processo 4[12] apresentado por A. Barata da Rocha e J. Ferreira Duarte [24], consiste na obtenção da seguinte peça de alumínio apresentada na seguinte Figura 4.1, através de sucessivas etapas em que o material é estirado para um embutido, gerando-se assim um embutido cilíndrico profundo de progressivo menor diâmetro e maior profundidade, no centro do componente que se pretende obter.

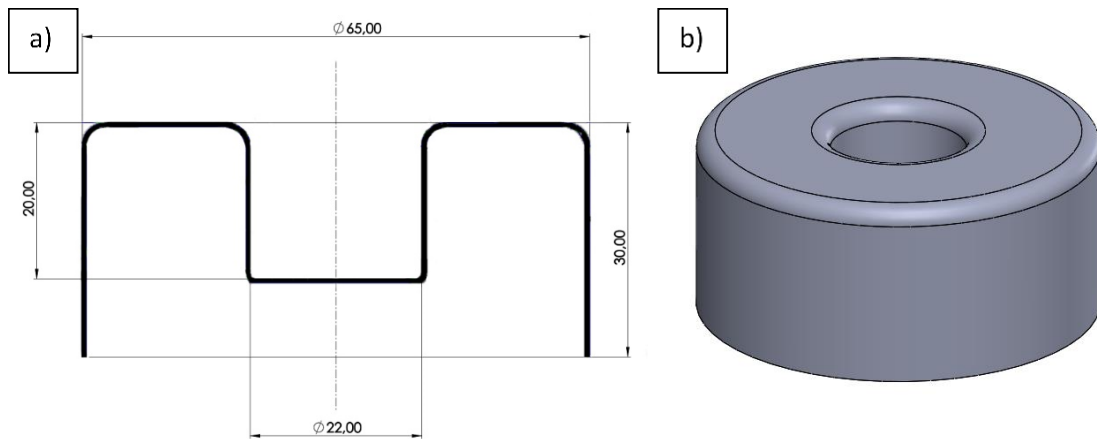


Figura 4.1 – Representação do componente com estiramento de embutido cilíndrico profundo: a) Representação esquemática 2D em *Solidworks* com as dimensões que se pretendem obter no componente; b) Representação do modelo 3D em *Solidworks*.

Ao contrário do caso de estudo anteriormente apresentado, neste caso não se pretende que o componente seja completamente embutido, mas sim embutido parcialmente, obtendo-se uma secção embutida e uma aba dobrada a 90° . Definiu-se que a espessura do esboço inicial é de $0,5\text{mm}$ e que o material a usar é a liga de alumínio Al6111, cujas propriedades mecânicas foram determinadas a partir de dados experimentais existentes para este material, anteriormente apresentadas no Capítulo 3. As propriedades do material serão inseridas no ficheiro de *input* DD3_mater0.

De modo a estabelecer o diâmetro do esboço circular (D) necessário, os autores através de cálculos obtiveram o valor de $117,41\text{mm}$. No entanto e de modo a arredondar este valor para uma dimensão mais arredondada, considerou-se o valor de $D=118\text{mm}$, de modo a que haja um aumento na margem de segurança na garantia das dimensões pretendidas para o esboço.

De seguida, apresenta-se a malha de elementos finitos, axissimétrica, do esboço inicial com um raio de 59mm, na Figura 4.2.

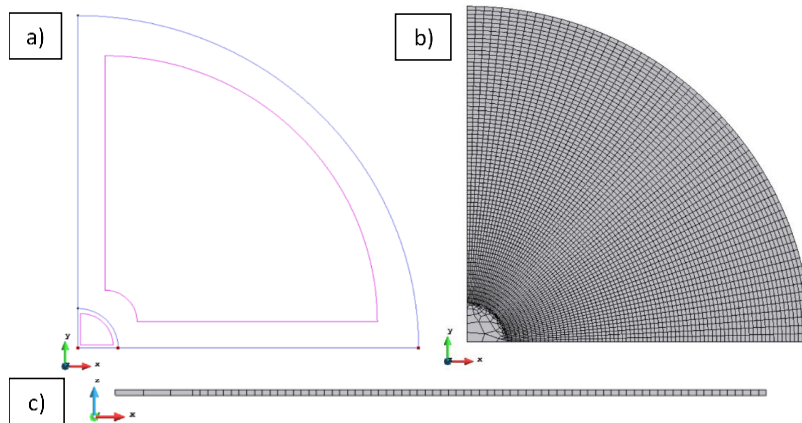


Figura 4.2 – a) Esboço para gerar a malha, efetuado no *GiD*; b) Malha a utilizar na simulação do processo de obtenção do componente, vista de cima; c) Malha a utilizar na simulação do processo de obtenção do componente, vista de frente.

Como se pode observar na figura acima, o esboço da malha é dividido em duas partes. Uma parte central com diâmetro de 7mm e em que os elementos não são estruturados nem refinados. Esta zona não vai sofrer a ação de deformação plástica e portanto do ponto de vista da simulação numérica faz sentido malha grosseira na mesma, para otimizar o tempo de simulação. Na zona da direita a malha é refinada com comprimento de elemento de 0,7mm, tentando que inicialmente os elementos sejam o máximo quadrangular possível, de modo a que quando sujeitos à deformação não fiquem demasiado deformados, ao ponto de interromper a simulação. A malha em termos da direção Oz terá uma espessura de 0,5mm e será constituída apenas por uma camada de elementos Hex8 (Hexaédricos trilineares de 8 nós), não se justificando mais que uma camada devido à reduzida espessura arbitrada para o esboço.

Na seguinte Figura 4.3, encontram-se as ilustrações da geometria do esboço ao longo das 7 etapas a que será sujeito e as respetivas dimensões após cada etapa.

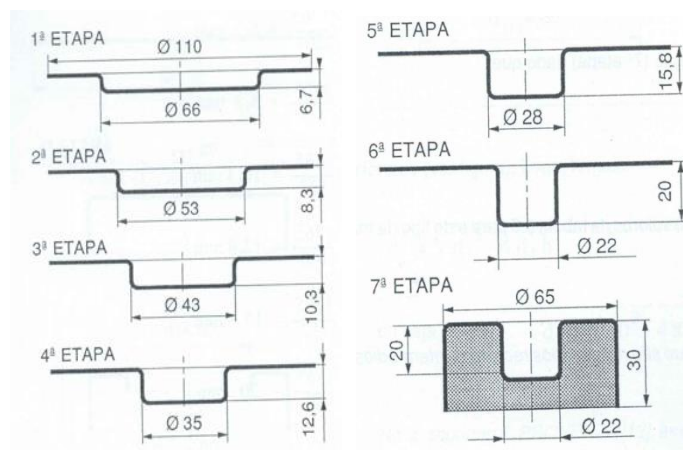


Figura 4.3 – Representação esquemática do componente após cada etapa, adaptado de A. Barata da Rocha e J. Ferreira Duarte [25].

4.2. PRÉ-PROCESSAMENTO E GEOMETRIA E DIMENSÕES DAS FERRAMENTAS

No presente caso de estudo, identificou-se a necessidade da utilização de 4 tipos de ferramentas ao longo do processo, sendo estas o Punção, Matriz, Cerra-Chapas e Mesa-Máquina. Na última etapa é utilizado um Contrapunção, de modo a se estudar o efeito do mesmo na configuração final do componente. A designação das ferramentas é composta por uma letra, que corresponde à geometria dimensionada, seguida da letra inicial da ferramenta em maiúscula, um primeiro número (x) que corresponde à etapa e um segundo que corresponderá ao número de ferramenta.

Começando pela ferramenta Punção, neste processo será necessário em todas as etapas e apresenta-se de seguida a Figura 4.4, onde é possível observar as designações para as dimensões e a geometria a ter em conta, na modelação desta ferramenta.

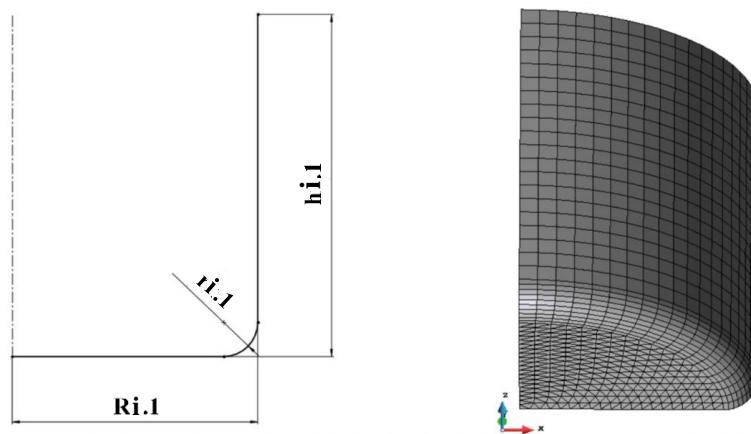


Figura 4.4 – Representação esquemática do Punção e dimensões do mesmo no Caso de Estudo 2.

Neste caso o Punção é a ferramenta 1 e a R corresponde ao raio do Punção, h à altura e r corresponde à curvatura presente nesta ferramenta. Na seguinte Tabela 4.1, encontram-se as dimensões utilizadas na modelação 2D da ferramenta Punção em *Solidworks*, para posterior modelação e geração de malha no *software* *GiD*.

Tabela 4.1– Dimensões dos diversos punções para cada etapa do Caso de Estudo 2.

Número de etapa, i	Raio, $R_{i,1}$ [mm]	Altura, $h_{i,1}$ [mm]	Raio de curvatura, $r_{i,1}$, [mm]
1	33,00	10,00	1,00
2	26,50	10,00	3,00
3	22,50	15,00	3,00
4	17,50	15,00	3,00
5	14,00	25,00	3,00
6	11,00	25,00	3,00

Relativamente ao Punção da 7ª etapa, o mesmo ao contrário dos demais punções avançará de baixo para cima, na direção positiva do eixo Oz e terá as seguintes dimensões e geometria abaixo apresentadas na Figura 4.5.

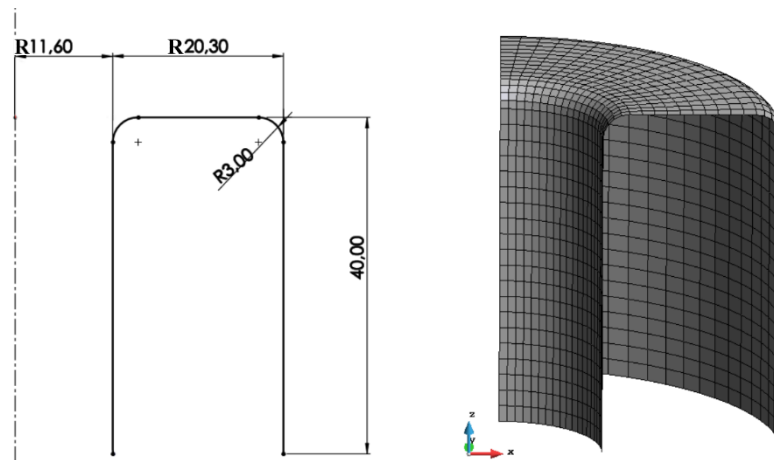


Figura 4.5 – Dimensões do Punção utilizado na 7ª etapa do Caso de Estudo 2.

Passando às Matrizes utilizadas na simulação deste processo de Conformação Multi-etapa e com Estiramento de Embutido Cilíndrico Profundo, é possível observar na Figura 4.6, as designações das dimensões e a geometria pretendidas para a modelação deste tipo de ferramenta, que é definida como a ferramenta 2.

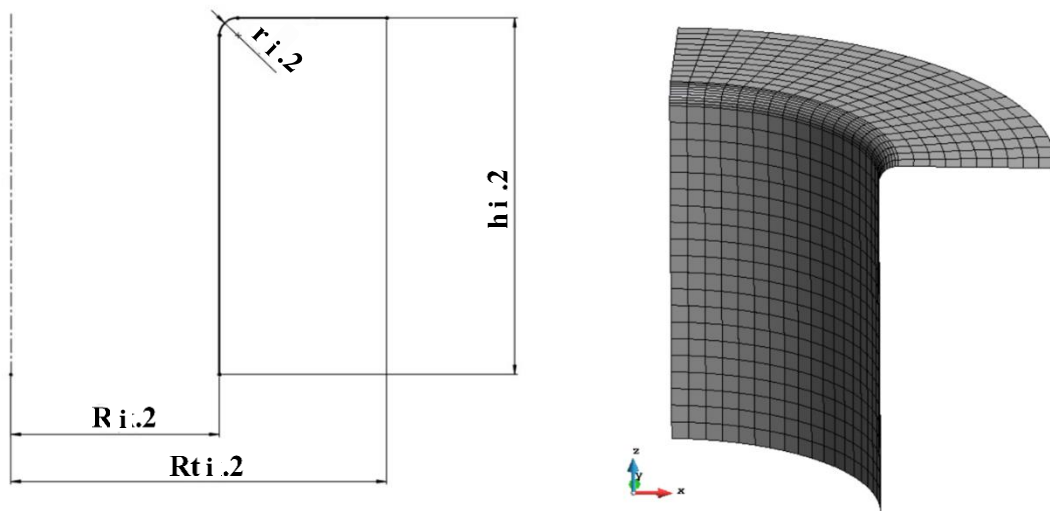


Figura 4.6 – Representação esquemática da Matriz e dimensões da mesma, referentes ao Caso de Estudo 2.

No caso da ferramenta Matriz, R corresponde ao raio da cavidade da Matriz, h à altura, r corresponde à curvatura presente nesta ferramenta e a designação Rt corresponde ao raio total da ferramenta.

Na seguinte Tabela 4.2, encontram-se as dimensões pretendidas na modelação da ferramenta Matriz em *Solidworks*.

Tabela 4.2 – Dimensões das diversas Matrizes utilizadas para a simulação do Caso de Estudo 2.

Número de etapa, i	Raio, $R_{i,2}$ [mm]	Altura, $h_{i,2}$ [mm]	Raio total, $Rt_{i,2}$ [mm]	Raio de curvatura, $r_{i,2}$, [mm]
1	33,60	10,00	59,00	3,00
2	27,10	10,00	37,10	3,00
3	23,10	15,00	33,10	3,00
4	18,10	15,00	28,10	3,00
5	14,60	25,00	24,60	3,00
6	11,60	25,00	21,60	3,00

Relativamente à Matriz da 7ª etapa, a mesma terá um posicionamento invertido, em relação às etapas anteriores, de modo a formar a dobra pretendida na aba do componente em estudo no presente caso de estudo, como é possível observar na Figura 4.7.

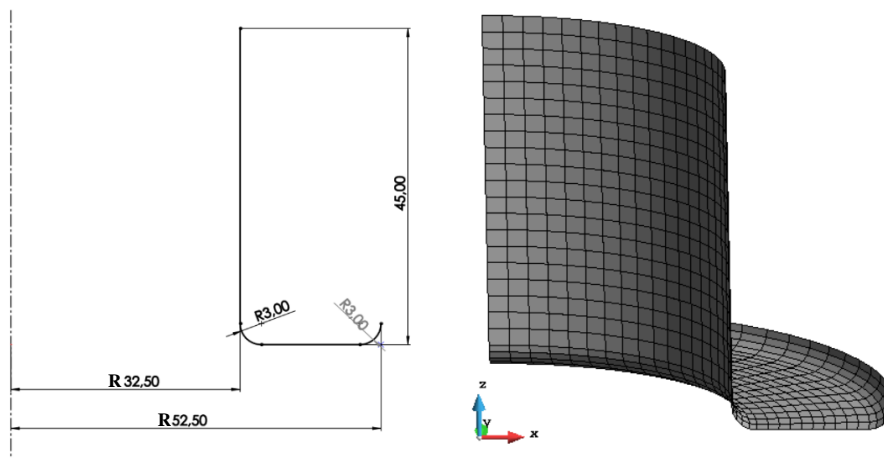


Figura 4.7 – Dimensões da Matriz utilizada na 7ª etapa do Caso de Estudo 2.

De seguida e passando aos Cerra-Chapas do presente Caso de Estudo, na 1ª etapa terá a seguinte geometria e dimensões apresentadas na seguinte Figura 4.8.

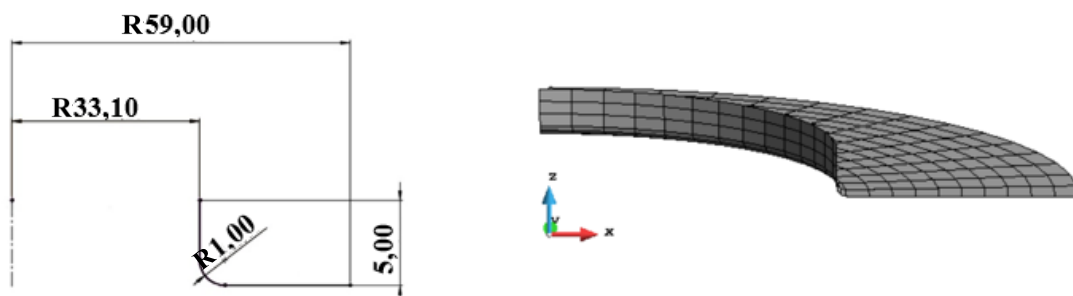


Figura 4.8 – Geometria e dimensões do Cerra-Chapas, utilizadas na 1ª etapa do Caso de Estudo 2.

Da segunda etapa até à sexta será utilizada a seguinte configuração geométrica de Cerra-Chapas apresentada na seguinte Figura 4.9, com as designações das dimensões e a geometria pretendidas para a modelação deste tipo de ferramenta, que se arbitrou como sendo a ferramenta número 3.

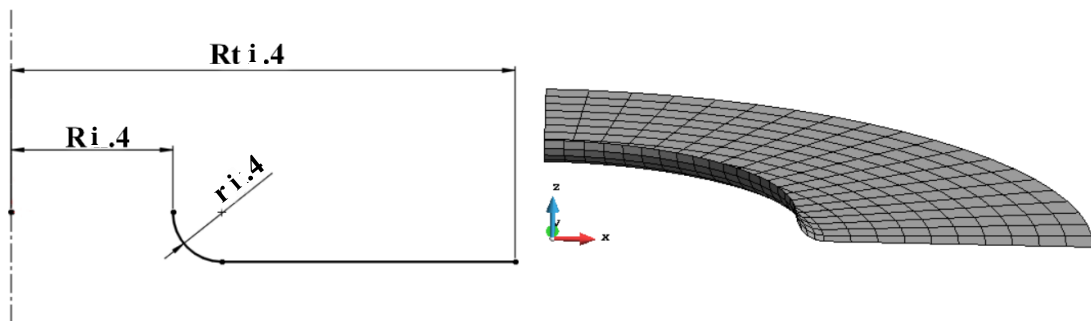


Figura 4.9 – Representação esquemática do Cerra-Chapas e dimensões do mesmo, referentes ao Caso de Estudo 2.

Assim, para o Cerra-Chapas que corresponde à ferramenta número 3, R corresponde ao raio da cavidade do mesmo, r corresponde à curvatura presente nesta ferramenta e a designação Rt corresponde ao raio total da ferramenta. Neste caso não existe a designação para a altura do Cerra-Chapas (h), uma vez que a altura é igual ao raio de curvatura (r). Na Tabela 4.3, abaixo apresentada, é possível observar as dimensões utilizadas na modelação da ferramenta Cerra-Chapas no *software Solidworks*.

Tabela 4.3 – Dimensões dos diversos Cerra-Chapas utilizados para a simulação do Caso de Estudo 2.

Número de etapa, i	Raio, $R_{i,3}$ [mm]	Raio total, $Rt_{i,3}$ [mm]	Raio de curvatura, $r_{i,3}$ [mm]
2	26,40	57,40	3,00
3	23,50	67,00	3,00
4	19,10	62,60	3,00
5	16,00	70,00	3,00
6	12,00	70,00	3,00

Relativamente ao Cerra-Chapas utilizado na 7ª etapa, o mesmo terá as dimensões apresentadas na Figura 4.10. Nesta etapa o Cerra-Chapas avançará na direção positiva do eixo Oz, atuando em contacto com a face inferior do esboço.

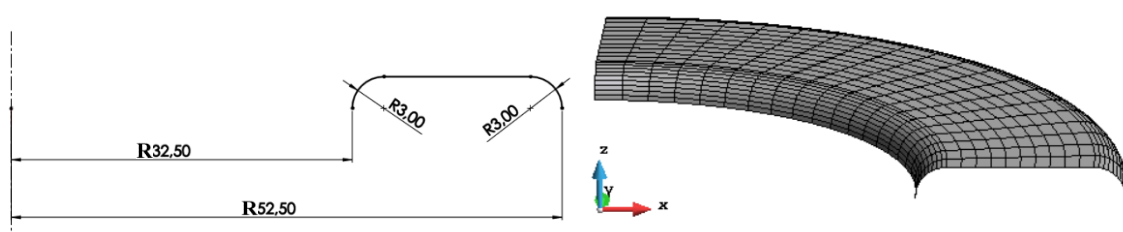


Figura 4.10 – Cerra-Chapas utilizado na 7ª etapa do Caso de Estudo 2 e respetivas dimensões.

A partir da 2ª etapa do processo, a aba começou a apresentar elevada oscilação aquando do avanço do Punção, mostrando-se necessária a implementação de uma nova ferramenta. A solução foi a adição da Mesa-Máquina, com a designação de ferramenta 4, que se encontra imóvel em todas as etapas em que está incluída, até à 6ª etapa, e corresponde ao plano de trabalho da máquina utilizada no processo. Esta ferramenta demonstra-se essencial na fixação da aba do corpo deformável em conjunto com o Cerra-Chapas, aumentando assim a qualidade do processo e possibilitando uma simulação mais estável do processo com a fixação da posição da aba. Na seguinte Figura 4.11, passa-se a observar a geometria e as designações atribuídas a esta ferramenta.

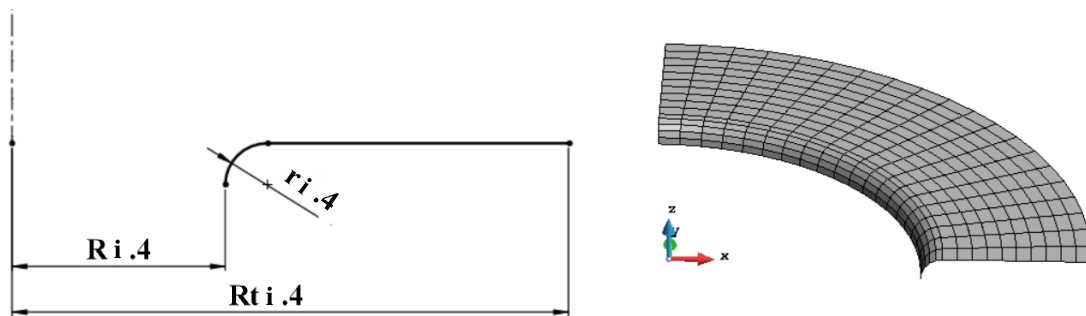


Figura 4.11 – Representação esquemática da Mesa-Máquina e dimensões da mesma, referentes ao Caso de Estudo 2.

Assim, para a Mesa-Máquina que corresponde à ferramenta número 4, R corresponde ao raio da cavidade da referida ferramenta, r corresponde à curvatura presente nesta ferramenta e a designação Rt corresponde ao raio total da ferramenta. Neste caso não existe a designação para a altura do Cerra-Chapas, uma vez que a altura é igual ao raio de curvatura (r). Na Tabela 4.4, abaixo apresentada, é possível observar as dimensões utilizadas na modelação da ferramenta Mesa-Máquina no *software Solidworks*.

Tabela 4.4 – Dimensões das diversas Mesa-Máquina utilizados para a simulação do Caso de Estudo 2.

Número de etapa, i	Raio, $R_{i.4}$ [mm]	Raio total, $Rt_{i.4}$ [mm]	Raio de curvatura, $r_{i.4}$ [mm]
2	26,40	57,40	3,00
3	23,50	67,00	3,00
4	19,10	62,60	3,00
5	16,00	70,00	3,00
6	12,00	70,00	3,00

Por sua vez, o Contrapunção será apenas utilizado na 7ª etapa e terá as dimensões e geometria apresentados na Figura 4.12.

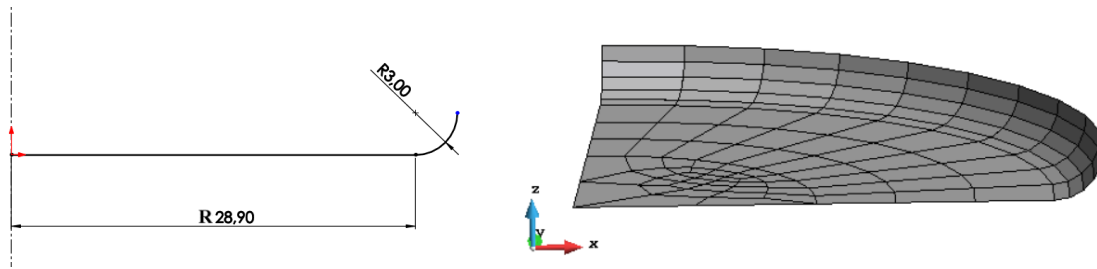


Figura 4.12 – Contrapunção utilizado no estudo da 7ª etapa do Caso de Estudo 2 e respectivas dimensões.

Salienta-se ainda que as ferramentas designadas para a simulação, do presente caso de estudo, foram modeladas em 2D no *software* Solidworks e posteriormente foram modeladas em 3D e a respetiva malha gerada no *software* GiD. Relativamente ao posicionamento das ferramentas, o mesmo foi efetuado com o auxílio do *software* GiD, tendo sempre em atenção uma folga de 20% em relação à espessura inicial ($t_0=0,5\text{mm}$), entre o Punção e Matriz. Além disso teve que se recolocar as ferramentas Cerra-Chapas e Mesa-Máquina em relação à aba e à face superior e inferior, respetivamente.

O objetivo ao longo das 6 primeiras etapas é um progressivo *embossing* do centro do componente, cada vez mais profundo e com diâmetro progressivamente menor. Na seguinte Figura 4.13, encontra-se a representação do posicionamento inicial das ferramentas em relação ao corpo deformável, nas diversas etapas.

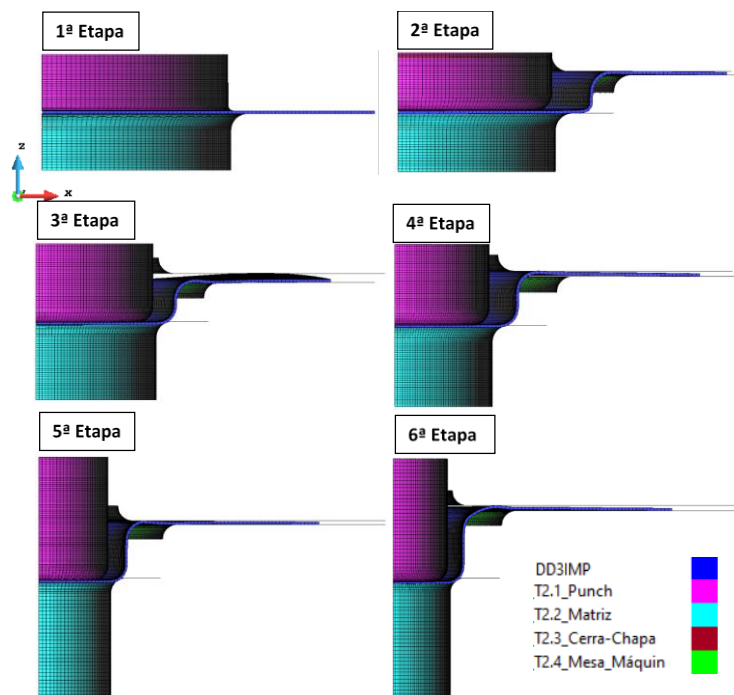


Figura 4.13 – Posicionamento inicial das ferramentas em relação ao corpo deformável ao longo das 6 primeiras etapas do Caso de Estudo 2.

Relativamente à 7ª etapa, o objetivo desta etapa é a dobragem da aba e estudaram-se dois *setups* de ferramentas, para perceber se existe a necessidade de um Contrapunção nesta etapa do processo.

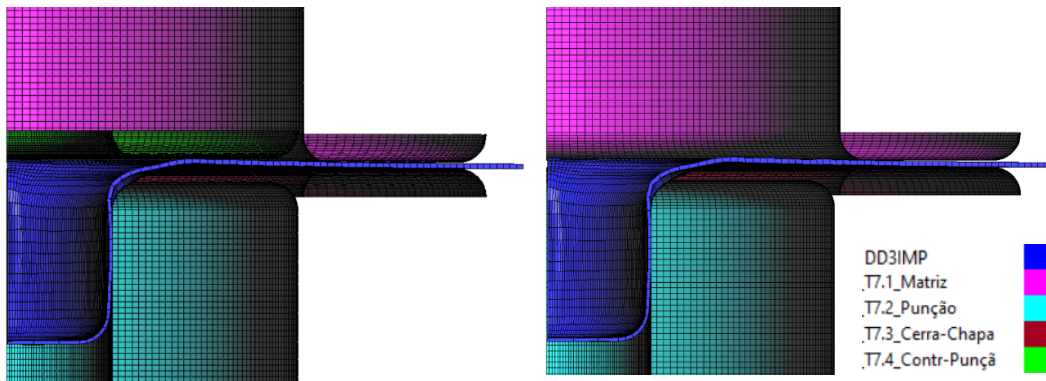


Figura 4.14 – Posicionamento inicial das ferramentas em relação ao corpo deformável na 7ª etapa do Caso de Estudo 2 com e sem Contrapunção, respetivamente.

4.2.1. ETAPA 1

Passando aos ficheiros de *input*, os ficheiros em comum entre todas as etapas serão o DD3_bcon, DD3_contact, DD3_mater0 e o DD3_input. No DD3_input, variou apenas um único parâmetro, o iphOSS, que corresponde ao número de fase em que ocorre o retorno elástico e o mesmo variou entre os valores 2, 3 e 4. Tal como no Caso de Estudo 1, atribui-se uma margem de erro de 5% no critério de convergência da simulação (TOLEQ=0,05), como se pode observar na seguinte Figura 4.15.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "input.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to start/restart a simulation *****
=====
Simulation and | NSTART  NEND  NOUT  iGID  INC  DEV
Output Data   |      1   10000  0     20   51   0
-----
Tolerances and | TOLEQ  TEQOUT  RAPEQ  TOLST  CUNL  dampOSS
residues       |      0.05  0.1  1.0E+09  1.0E-08  0.999  0.50
-----
Maximum number | IRMX  IEQMAX  NMAXST
of iterations   |      1    50    25
-----
Max. Increments | DEMAX  DWMAX  DSNMAX  DSTMAX
for each NST    |      0.0100  0.5000  9.0    3.0
-----
Rmin            | RINF  RSUP  DFNMAX  DFT1MAX  DFT2MAX
Strategy        |      0.0010  5.000  0.0    0.0    0.0
-----
Thermal Analysis | T_TOLEQ  T_alfa  T_Diag  T_Transi  T0[°C]
Parameters       |      1.0E-03  0.5    1      1      25.0
-----
Input data,     | MEPopt  iphOSS
Cep             |      1    2
=====

```

Figura 4.15 – *Inputs* definidos no ficheiro DD3_input para o Caso de Estudo 2.

Analisando o ficheiro de *input* DD3_bcon, no mesmo definem-se as condições de fronteira do problema, tais como a axissimetria do esboço, nas direções Ox e Oy.

Os parâmetros introduzidos neste ficheiro, podem-se observar na seguinte Figura 4.16.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "bcon.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input Boundary Conditions *****
=====
Boundary conditions| NSC= 2 ERR= 1.D-2 BCID
Ax+By+Cz=D | A B C D COORD ID NRES
P1 | 0 1 0 0 2 2 0
P2 | 1 0 0 0 1 2 0
Restrictions | COORD COND VALUE ERR2
P2R1 | . . . 1.D-2
=====
OSS One Step | NRES= 1
Springback | x y z COORD Xinit
N1 | 0.0 0.0 0.0 3 1
N2 | . . . .
=====

```

Figura 4.16 – *Inputs* definidos no ficheiro DD3_bcon para a simulação do Caso de Estudo 2.

De seguida, na Figura 4.17 passa-se a apresentar os valores utilizados no ficheiro DD3_contact, onde se definem as condições de contato entre as ferramentas e o corpo deformável. Neste ficheiro de *input*, definem-se parâmetros como o *Contact Sets*, onde se atribui um set e respetivo número à face superior e inferior do esboço, sendo neste caso o *set 1* correspondente à face inferior e o *set 2* à face superior. Igualmente importante de definir neste ficheiro são o coeficiente de atrito no parâmetro *Friction* e o coeficiente de penalidade, no parâmetro *CPen*. Por sua vez, o *CPen* teve que em algumas etapas ser reduzido para 10% do valor inicial (*CPen* inicial=20600), de modo a que a simulação não fizesse reajustes abruptos da posição entre os nós da ferramenta e do esboço.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "contact.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input contact sets *****
=====
CONTACT SETS
ISET Ax+By+Cz=D X| NSET 2
1 | P| 0 0 1 L
2 | P| 0 0 1 H
-----
X: P -> Plane | Ax + By + Cz = D
R -> Radius | Ax2 + By2 + Cz2 = D2 ; A, B, C =1 or 0
N -> Normal | normal(A,B,C), angular deviation = D [degrees]
E -> Ellipse | (x/A)^2+(y/B)^2+(z/c)^2=1.0
F -> File | Name of the .dat file with nodes listed (1 space #node)
F -> File | First line: Mesh Entities; Last line: End Mesh Entities

If D=0.0 -> Reads the coordinates of Radius/Ellipse center in the next line
A=X0 ; B=Y0 ; C=Z0 ; D=D (Radius) or D=1 (Ellipse)
=====
FRICTION
xxx : xxx | MU CPen IPenvar CPenD
G | 0.144 20600.0
S 1 |
S 2 |
P 10 : 15 |
T 1 : 2 |
-----

```

Figura 4.17 – Ficheiro de *input* DD3_contact utilizado para a simulação do Caso de Estudo 2.

No ficheiro DD3_mater, definem-se propriedades mecânicas do material considerado para este caso de estudo (Figura 4.18). Entre as propriedades definidas, pode-se encontrar o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, o critério de plasticidade, neste caso o Hill48, e os parâmetros da lei de encruamento do material, como os da lei de Voce, que para este material são os que melhor representam o comportamento do material.

```

1010*****      < DD3IMP 010.x > File "mater.dat" 23.03.2021      *****
*****
MANDATORY file to input constitutive parameters      *****
=====
MATERIAL PARAMETERS| PlasLAW  YldCRIT          EM      PR
                   |          5          1          68000.0  0.36
-----
Swift Law          |          Yo      CC      AN      |      AX|      alfa
Isot.Kinem.Hard.  |          |          |          |      |      0.0|      -
-----
Voce Law          |          Yo      CY      Ysat    m|      CX      Xsat
No-Isot.Kin.Hard.|          150.0   10.5   387.0   0.0|      0.0      0.0
-----
YIELD CRITERION  |
-Hill48          |          F      G      H      L      M      N
                   |          0.48996 0.61881 0.38119 1.5   1.5   1.27065
-----

```

Figura 4.18 – Parâmetros utilizados para definir a lei de Voce e o critério Hill48 no ficheiro DD3_mater do caso de estudo de Conformação Multi-etapa e com Estiramento de Embutido Cilíndrico Profundo.

Tal como no caso de estudo anteriormente abordado, as propriedades conhecidas da liga Al6111 e que se definem no ficheiro DD3_mater são: o módulo de elasticidade (EM) que é igual a 68000,0 MPa; o coeficiente de Poisson (PR) que é igual a 0,36. Na lei de Voce utilizam-se os valores designados na linha *Voce Law* da Figura 4.18 e no parâmetro *PlasLAW* deve-se colocar o valor 5, de modo a que o *software* utilize os valores dos parâmetros dessa mesma lei. Na linha *Yield Criterion* designam-se os coeficientes respetivos ao critério de plasticidade Hill48, que neste caso correspondem aos de um material anisotrópico.

Relativamente à 1ª etapa, será necessário o seguinte ficheiro DD3_phase de modo a corretamente se posicionarem inicialmente as ferramentas em relação à chapa e a se efetuar a 1ª etapa segundo o pretendido.

Na seguinte Figura 4.19, podem-se observar os parâmetros e movimentos das ferramentas para a 1ª etapa.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 3 NbTOOL= 3 NbBCID= 0
=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| -0.1 -0.1 0.5 T1.1_Punção 2
2| -0.1 -0.1 0.0 T1.2_Matriz 1
3| -0.1 -0.1 0.0 T1.3_Cerra-Chapas 2
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| .0001 3 3 2 2 0.0001
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2| 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3| 1 1 2 0.0 0.0 -0.3 0.0 0.0 2000.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
2| .001 1 3 1 1 6.7
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| 1 1 2 0.0 0.0 -6.7 0.0 0.0 0 0
2| 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3| 1 1 3 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2000.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
3| .0001 3 3 3 2 0.0001
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2| 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3| 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====

```

Figura 4.19 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 1ª etapa do Caso de Estudo 2.

Na fase 1, o Cerra-Chapas descerá para fixar o esboço até atingir uma força de 2000N na direção do eixo Oz, que no total do componente será uma força de 8000N. Por sua vez, na fase 2, o Punção descerá 6,7mm, enquanto que o Cerra-Chapas continua a atuar a força constante de modo a que a aba não levante ou crie dobras. Por fim na 3ª e última fase, as ferramentas são desativadas, de modo a que a deixem de ser exercidas forças externas ao corpo deformável e possa ocorrer o retorno elástico.

4.2.2. ETAPA I (I>1)

A partir da 2ª Embutidura, serão necessárias 4 ferramentas para uma correta simulação do processo, adicionando às anteriormente apresentadas, a ferramenta Mesa da Máquina.

Na Figura 4.20 apresenta-se o ficheiro DD3_phase correspondente à simulação da 2ª etapa do Caso de Estudo 2.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 2 NbTOOL= 4 NbBCID= 0
=====|=====|=====|=====|=====|=====|=====|=====|
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 -0.1 -0.1 0.0 T2.1_Punch 2
2 -0.1 -0.1 0.1 T2.2_Matriz 1
3 -0.1 -0.1 0.7 T2.3_Cerra-Chapas 2
4 -0.1 -0.1 -2.4 T2.4_Mesa_Máquina 1
=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| .001 2 3 1 2 8.3
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 2 0.0 0.0 -1.6 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 2 0.0 0.0 6.55 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
4 1 1 2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
2| .0001 3 3 3 2 0.0001
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
4 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+

```

Figura 4.20 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 2ª etapa do Caso de Estudo 2.

Como é possível observar na figura acima apresentada, nesta etapa figuram 4 ferramentas que atuarão ao longo de 2 fases. Como a aba inicialmente não apresenta dobra ou deformação, não há necessidade de o Cerra-Chapas trabalhar a força constante, mas sim poderá trabalhar a folga constante, não sendo necessária uma etapa para calibrar a força do mesmo. Na 1ª fase, é imposto um deslocamento de 1,6mm ao Punção na direção oposta ao eixo Oz, de modo a que o mesmo desça. Por sua vez na matriz e em simultâneo, é imposto um deslocamento de 6,64mm na direção positiva do eixo Oz, de modo a que esta ferramenta suba e auxilie na Embutidura do corpo deformável. Na 2ª fase do ficheiro, anulam-se as ferramentas, de modo a que se dê o retorno elástico.

Passando à 3ª etapa, as ferramentas serão novamente 4 e a simulação será dividida em 3 fases, como é possível observar na seguinte Figura 4.21.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 3 NbTOOL= 4 NbBCID= 0
=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 -0.1 -0.1 0.45 T3.1_Punção 2
2 -0.1 -0.1 0.58 T3.2_Matriz 1
3 -0.1 -0.1 3.38 T3.3_Cerra-Chapas 2
4 -0.1 -0.1 2.15 T3.4_Mesa-Máquina 1
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| .001 3 3 2 2 0.0001
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 2 0.0 0.0 -1.3 0.0 0.0 3000.0 0 0
4 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
2| .001 2 3 1 2 10.3
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 2 0.0 0.0 -2.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 2 0.0 0.0 7.46 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 3 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 3000.0 0 0
4 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
3| .0001 2 3 3 1 0.0001
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
4 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====

```

Figura 4.21 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 3ª etapa do Caso de Estudo 2.

Analisando a figura acima, na 1ª fase é imposto um deslocamento de 1,3mm ao Cerra-Chapas na direção oposta ao eixo Oz, de modo a que o mesmo desça até apertar o esboço contra a Matriz com uma força de 3000N. Na fase seguinte, o Punção e a Matriz avançam em simultâneo, é imposto um deslocamento de 2mm ao Punção na direção negativa a Oz e um deslocamento de 7,59mm na direção oposta à Matriz, de modo a que esta ferramenta suba e auxilie na embutidura do corpo deformável. Enquanto o Punção e a Matriz se movem, o Cerra-Chapas trabalha a força constante, movendo o necessário para manter a força de 3000N e a Mesa da Máquina mantém-se estática, de modo a fixar a aba e que a mesma não oscile. Na 3ª fase anulam-se as ferramentas, de modo a que se dê o retorno elástico.

Na simulação da 4ª etapa, o processo será diferente ao da 3ª etapa, uma vez que o avanço simultâneo das ferramentas estava a causar uma dobra na aba, que o *software* não é capaz de resolver.

De modo a resolver este defeito, repartiu-se a 4ª etapa em 4 fases, desfasando o movimento do Punção e da Matriz, deixando de avançar em simultâneo estas ferramentas, como é possível observar na Figura 4.22.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 4 NbTOOL= 4 NbBCID= 0
=====|=====|=====|=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 -0.1 -0.1 -0.13 T4.1_Punção 2
2 -0.1 -0.1 0.3 T4.2_Matriz 1
3 -0.1 -0.1 10.43 T4.3_Cerra-Chapas 2
4 -0.1 -0.1 9.44 T4.4_Mesa-Máquina 1
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| .001 3 3 2 2 0.0001
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 2 0.0 0.0 -0.5 0.0 0.0 3000.0 0 0
4 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
2| .001 1 3 1 1 2.4
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 2 0.0 0.0 -2.4 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 3 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 3000.0 0 0
4 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
3| .001 2 3 1 2 9.2
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 2 0.0 0.0 9.14 0.0 0.0 0 0
3 1 1 3 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 3000.0 0 0
4 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
4| .0001 3 3 3 2 0.0001
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
4 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====

```

Figura 4.22 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 4ª etapa do Caso de Estudo 2.

Como é possível observar na figura acima apresentada, na 1ª fase da simulação da 4ª etapa, o Cerra-Chapas descerá na direção negativa do eixo Oz e em direção à face superior da chapa, até atingir uma força de esmagamento da mesma de 3000N. Na fase seguinte, o Punção avança na direção negativa de Oz 2,4mm, de modo a dar a profundidade pretendida ao embutido. De seguida, na 3ª fase, é a vez de a Matriz avançar 9,14mm na direção positiva do eixo Oz, de modo a formar corretamente a aba do corpo deformável e a ficar ao mesmo nível que a Mesa da Máquina. Por fim, na 4ª fase, anulam-se as ferramentas, de modo a se poder dar o retorno elástico num incremento final da simulação.

Avançando para a 5ª etapa do processo e respetiva simulação, teve-se em conta uma metodologia muito semelhante à da 4ª etapa. No entanto, teve que se reduzir o deslocamento da Matriz na direção positiva do eixo Oz, de modo a não se formar uma zona evidente de menor espessura na dobra entre o fundo e a parede do corpo deformável, que pode levar a uma rotura na etapa seguinte. Na Figura 4.23 é possível observar o que acontece ao corpo deformável se se der o deslocamento da Matriz até à coordenada z da Mesa da Máquina.

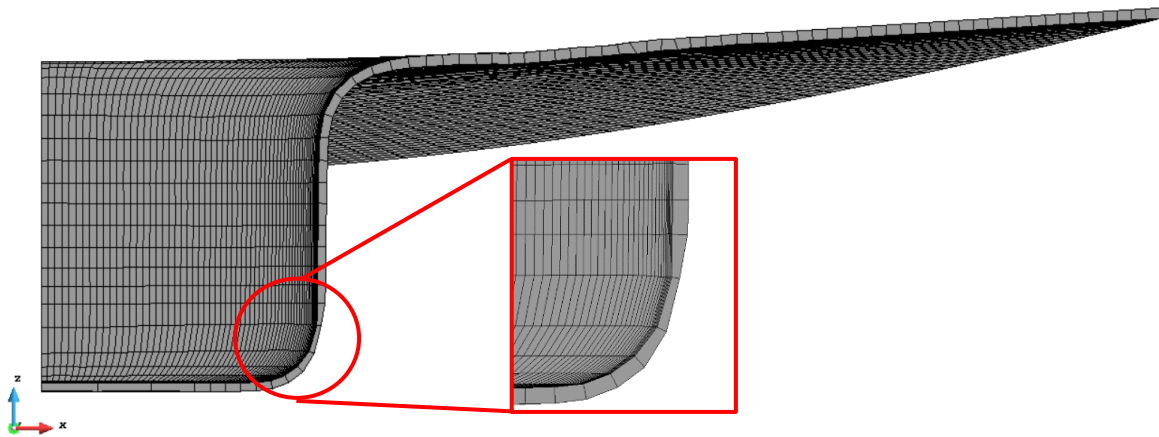


Figura 4.23 - Defeito provocado pelo deslocamento total da Matriz até à coordenada z da Mesa da Máquina, na 5ª etapa.

Assim e de modo a evitar o defeito apresentado na ilustração acima, implementaram-se os seguintes parâmetros no ficheiro DD3_phase, presentes na seguinte Figura 4.24.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
          NPH= 4 NbTOOL= 4 NbBCID= 0
=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0|          X          Y          Z <naming-----> BCID SET  lim-  lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1  -0.1    -0.1    -0.13  T5.1_Punção          2
2  -0.1    -0.1     0.91  T5.2_Matriz          1
3  -0.1    -0.1    12.51  T5.3_Cerra-Chapas   2
4  -0.1    -0.1    11.75  T5.4_Mesa-Máquina   1
=====
IPH|  DELT  NOUT  JD  NTYP  NOPR          Text[°C]  TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1|    .001    3    3    2    2          0.0001
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout|  INDOUT(I)  DISINT(I)(f8.0)  EFFIMP(I)(f8.0)  Hcoef  Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1  1  1  1  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0
2  1  1  1  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0
3  1  1  2  0.0  0.0 -0.3  0.0  0.0 3000.0  0  0
4  1  1  1  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0
=====
IPH|  DELT  NOUT  JD  NTYP  NOPR          Text[°C]  TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
2|    .001    1    3    1    1          3.7
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout|  INDOUT(I)  DISINT(I)(f8.0)  EFFIMP(I)(f8.0)  Hcoef  Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1  1  1  2  0.0  0.0 -3.7  0.0  0.0  0.0  0  0
2  1  1  1  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0
3  1  1  3  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0 3000.0  0  0
4  1  1  1  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0
=====
IPH|  DELT  NOUT  JD  NTYP  NOPR          Text[°C]  TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
3|    .001    2    3    1    2          9.7
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout|  INDOUT(I)  DISINT(I)(f8.0)  EFFIMP(I)(f8.0)  Hcoef  Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1  1  1  1  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0
2  1  1  2  0.0  0.0  9.7  0.0  0.0  0.0  0  0
3  1  1  3  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0 3000.0  0  0
4  1  1  1  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0
=====
IPH|  DELT  NOUT  JD  NTYP  NOPR          Text[°C]  TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
4|    .0001    3    3    3    2          0.0001
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout|  INDOUT(I)  DISINT(I)(f8.0)  EFFIMP(I)(f8.0)  Hcoef  Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0
2  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0
3  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0
4  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0  0
=====

```

Figura 4.24 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 5ª etapa do Caso de Estudo 2.

Na 1ª fase da simulação da 5ª etapa, o Cerra-Chapas descerá na direção negativa do eixo Oz e em direção à face superior da chapa, até atingir uma força de esmagamento da mesma de 3000N. O Cerra-Chapas permanecerá a trabalhar a força constante nas restantes fases. Na fase seguinte, o Punção avança na direção negativa de Oz 3,7mm, de modo a dar a profundidade pretendida ao embutido. De seguida, na 3ª fase, é a vez da Matriz avançar 9,7mm na direção positiva do eixo Oz. Por fim, na 4ª fase, anulam-se as ferramentas, de modo a se poder dar o retorno elástico num incremento final da simulação.

Na 6ª fase ocorre rotura do corpo deformável, mesmo com os avanços do Punção e Matriz, desfasados. Tem então que se reduzir o avanço da Matriz, de forma a não ocorrer a rotura, que se pode observar na Figura 4.25, abaixo apresentada.

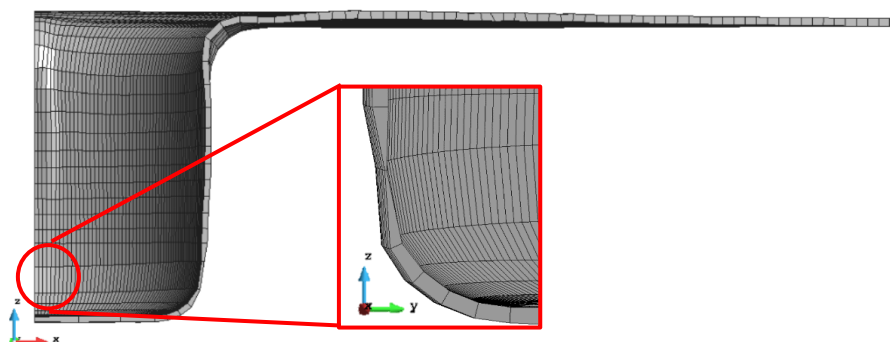


Figura 4.25 – Defeito provocado pelo deslocamento total da Matriz até à coordenada z da Mesa da Máquina, na 6ª etapa.

Aplicando um deslocamento menor à Matriz, resolveu-se o problema acima demonstrado, obtendo-se o seguinte ficheiro DD3_phase, com as informações de *input* para a simulação, presentes na Figura 4.26.

```

1400***** < DD3IMP O11.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 4 NbTOOL= 4 NbBCID= 0
=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
-----
1 -0.1 -0.1 0.32 T6.1_Punção 2
2 -0.1 -0.1 1.2 T6.2_Matriz 1
3 -0.1 -0.1 15.86 T6.3_Cerra-Chapas 2
4 -0.1 -0.1 14.81 T6.4_Mesa-Máquina 1
-----
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----
1| .001 3 3 2 2 0.0001
-----
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----
1 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 2 0.0 0.0 -0.7 0.0 0.0 2000.0 0 0
4 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
-----
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----
2| .001 1 3 1 1 4.5
-----
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----
1 1 1 2 0.0 0.0 -4.5 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 3 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2000.0 0 0
4 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
-----
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----
3| .001 2 3 1 2 11.64
-----
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----
1 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 2 0.0 0.0 11.64 0.0 0.0 0 0
3 1 1 3 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2000.0 0 0
4 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
-----
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----
4| .0001 3 3 3 2 0.0001
-----
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----
1 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
4 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====

```

Figura 4.26 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 6ª etapa do Caso de Estudo 2.

Assim, analisando o ficheiro DD3_phase para esta etapa, pode-se verificar que na 1ª fase da simulação da 6ª etapa, o Cerra-Chapas descerá na direção negativa do eixo Oz e em direção à face superior da chapa, até atingir uma força de esmagamento da mesma de 2000N. Arbitrou-se uma redução de força do Cerra-Chapas, de modo a diminuir a probabilidade de haver rotura, ao mesmo tempo que se previne a formação de oscilações na aba. O Cerra-Chapas permanecerá a trabalhar a força constante nas restantes fases. Na 2ª fase, o Punção avança na direção negativa de Oz 4,5mm, de modo a dar a profundidade final pretendida ao corpo deformável. De seguida, na 3ª fase, a Matriz avança 11,64mm na direção positiva do eixo Oz, de modo a conformar corretamente a parede do embutido cilíndrico profundo. Por fim, na 4ª fase, anulam-se as ferramentas, de modo a se poder dar o retorno elástico num incremento final da simulação.

Em seguida, na 7ª etapa são estudados 2 cenários para a dobragem da aba do corpo deformável. Um primeiro cenário em que se testa o processo com o auxílio de um Contrapunção e um segundo cenário em que se utiliza apenas um Punção, Matriz e Cerra-Chapas.

4.2.3. ETAPA FINAL COM CONTRAPUNÇÃO

No caso em que se utiliza Contrapunção, foram utilizadas 4 ferramentas, sendo elas: o Punção, Matriz, Cerra-Chapas e Contrapunção. No ficheiro DD3_phase, presente na Figura 4.27, definiram-se os deslocamentos e posicionamento inicial das ferramentas.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 3 NbTOOL= 4 NbcCID= 0
=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 -0.1 -0.1 17.5 T7.1_Punção 1
2 -0.1 -0.1 19.5 T7.2_Matriz 2
3 -0.1 -0.1 18.8 T7.3_Cerra-Chapas 1 0.2
4 -0.1 -0.1 19.9 T7.4_Contr-Punção 2
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| .001 1 3 1 2 1.8
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 2 0.0 0.0 1.8 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
4 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
2| .001 1 3 1 2 42.0
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 2 0.0 0.0 42.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
4 1 1 2 0.0 0.0 42.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
3| .0001 3 3 3 2 0.0001
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
4 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====

```

Figura 4.27 – Ficheiro DD3_phase para a simulação da 7ª etapa do Caso de Estudo 2, com Contrapunção.

Abordando o ficheiro DD3_phase do estudo da 7ª etapa com Contrapunção estão presentes 3 fases e 4 ferramentas, mudando-se os números de set das ferramentas, significando que o Punção e Cerra-Chapas estarão em contacto com a face inferior do corpo deformável e a Matriz e o Contrapunção com os nós da face superior. Na 1ª fase o Punção avançará 1,8mm na direção positiva do eixo Oz, enquanto as demais ferramentas permanecem imóveis, fazendo com que o Punção aperte a chapa contra o Contrapunção. Na 2ª fase o Punção e o Contrapunção avançam em simultâneo 42,0mm de modo a dobrar na totalidade a aba do corpo deformável em estudo, enquanto o Cerra-Chapas e a Matriz se mantém imóveis a folga constante, não permitindo que haja dobras e oscilações na aba. Por fim e na 3ª fase, anulam-se as ferramentas, de modo a que se dê o retorno elástico do corpo deformável.

4.3. PÓS-PROCESSAMENTO E ANÁLISE

Primeiramente e após a simulação da 7ª e última etapa, analisou-se e compararam-se os resultados obtidos com e sem o uso de Contrapunção. Na seguinte Figura 4.29 podem-se observar os componentes obtidos em ambos os casos, de modo a poder comparar a geometria final obtida.

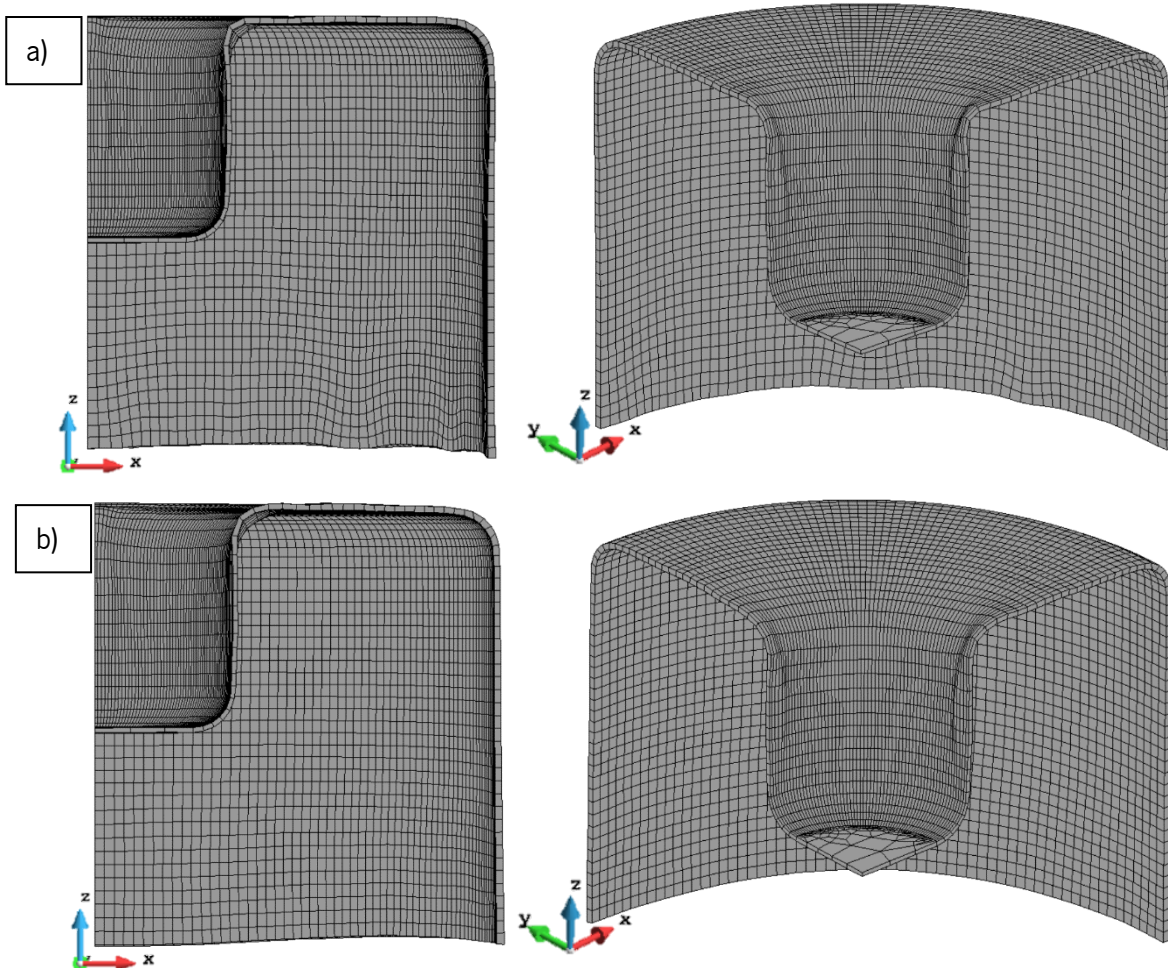


Figura 4.29 – Vista do plano Oxz e perspectiva isométrica do componente obtido da 7ª etapa: a) com Contrapunção; b) sem Contrapunção.

Como é possível observar na figura acima, as diferenças geométricas entre ambos os casos não são muitas, tendo ambas uma regularidade semelhante na parte da aba horizontal e o mesmo defeito na parede lateral do embutido cilíndrico profundo junto aos planos Oxz e Oyz.

Na Figura 4.30 pode-se observar com maior detalhe a zona referida da parede lateral do Embutido cilíndrico profundo.

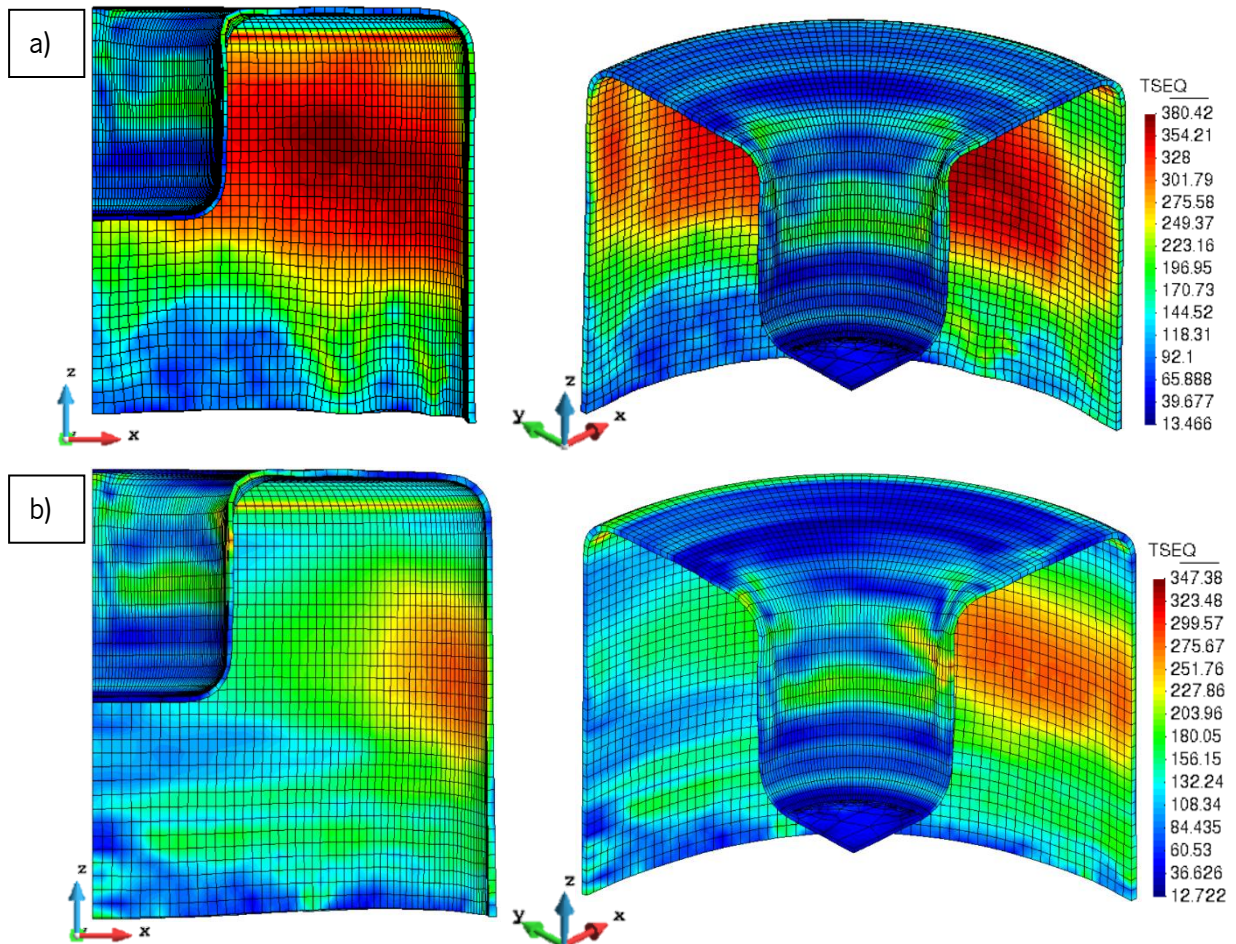


Figura 4.30 – Vista no Plano Oxz e Vista em perspectiva isométrica do componente obtido na 7ª e respectivas tensões residuais: a) com Contrapunção; b) sem Contrapunção.

Concluindo sobre o observado na figura acima, no componente da 7ª etapa sem Contrapunção, as tensões residuais são menores no geral, em termos absolutos, e principalmente na aba vertical. Assim o máximo de tensões residuais obtidas é de 380,42MPa com Contrapunção e 347,38MPa sem Contrapunção. Observa-se ainda em ambos os casos uma concentração de tensões na zona do defeito da parede lateral do embutido cilíndrico profundo, o que é expectável tendo em conta as deformações existentes nessa zona. No caso sem Contrapunção pode-se ainda observar que no interior da dobra entre a aba horizontal e vertical se concentram tensões residuais ao longo de toda a direção circunferencial.

Passando às deformações plásticas ao longo do componente, em ambos os casos, apresenta-se a seguinte Figura 4.31 de forma a melhor entender os resultados obtidos.

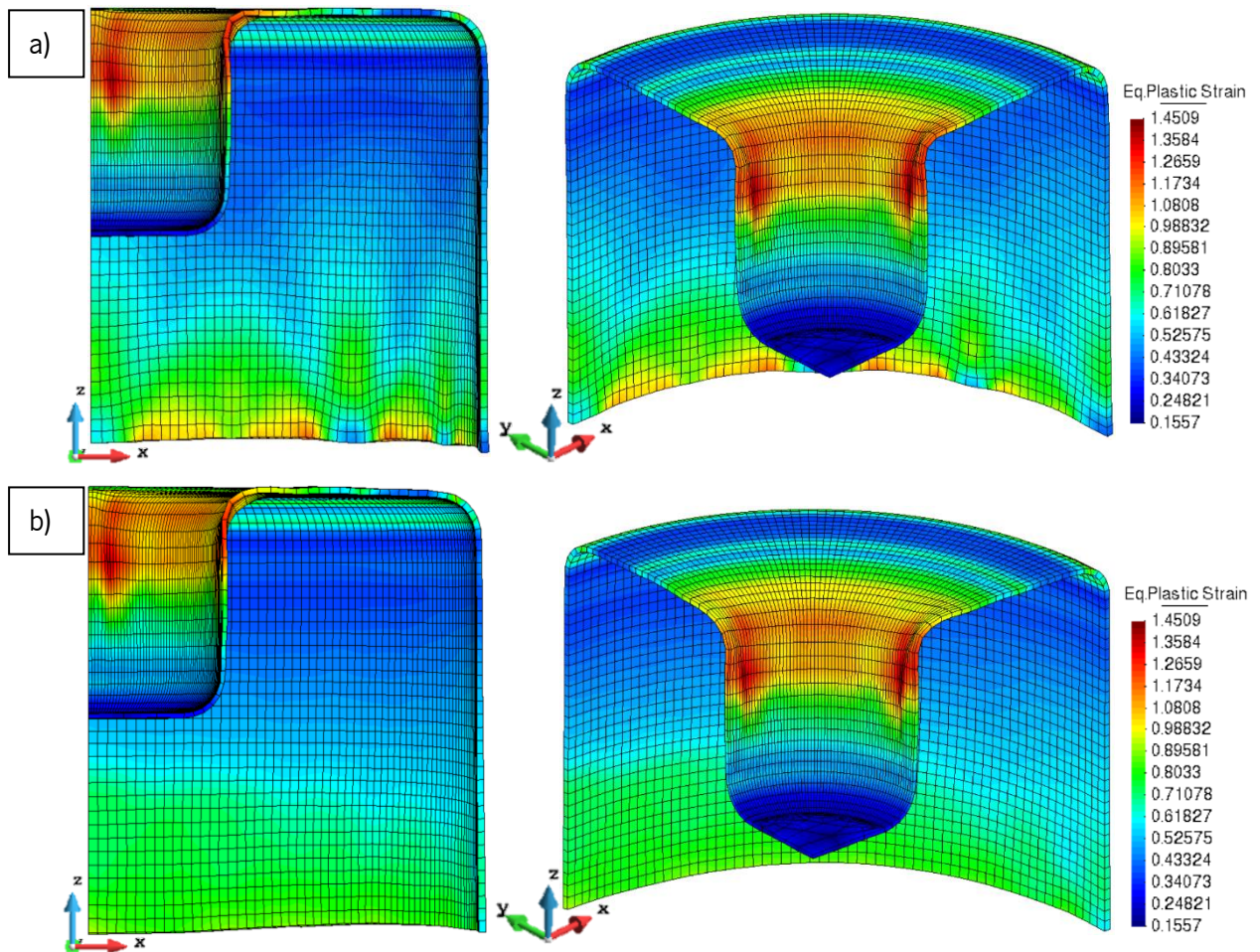


Figura 4.31 – Vista no Plano Oxz e Vista em perspetiva isométrica do componente obtido na 7ª e respetivas deformações plásticas equivalentes: a) com Contrapunção; b) sem Contrapunção.

Inferindo acerca da figura acima apresentada, pode-se afirmar que em termos de deformação plástica equivalente, em ambos os casos é semelhante e com maior intensidade na zona de defeito na parede lateral do embutido cilíndrico profundo e a zona com menores deformações, sendo a base do referido embutido. Estes resultados são esperados devido à elevada deformação na zona do defeito e a deformação praticamente nula no centro do corpo deformável e do embutido cilíndrico profundo, uma vez que esta zona apenas é empurrada pelo Punção ao longo das etapas. A diferença visível entre o caso com e sem Contrapunção é uma tendência para a formação de rugas no fundo da parede vertical externa com a utilização do Contrapunção, ao contrário do caso em que não se utiliza a referida ferramenta.

Assim, tendo em conta todos os resultados supracitados nesta secção da Dissertação (geometria, tensões residuais e deformações plásticas equivalentes), escolheu-se a simulação da 7ª etapa sem

Contrapunção como a ideal, uma vez que se obtém resultados muito semelhantes com menos uma ferramenta. Este aspeto reflete-se no custo final do processo e no custo por componente, caso o componente seja fabricado, e portanto, teve-se em conta o caso sem Contrapunção como o melhor do ponto de vista de otimização do processo.

Passando às dimensões finais do conformado, as mesmas foram obtidas a partir da funcionalidade *Distance* do *GiD* e as mesmas encontram-se esquematizadas na seguinte Figura 4.32.

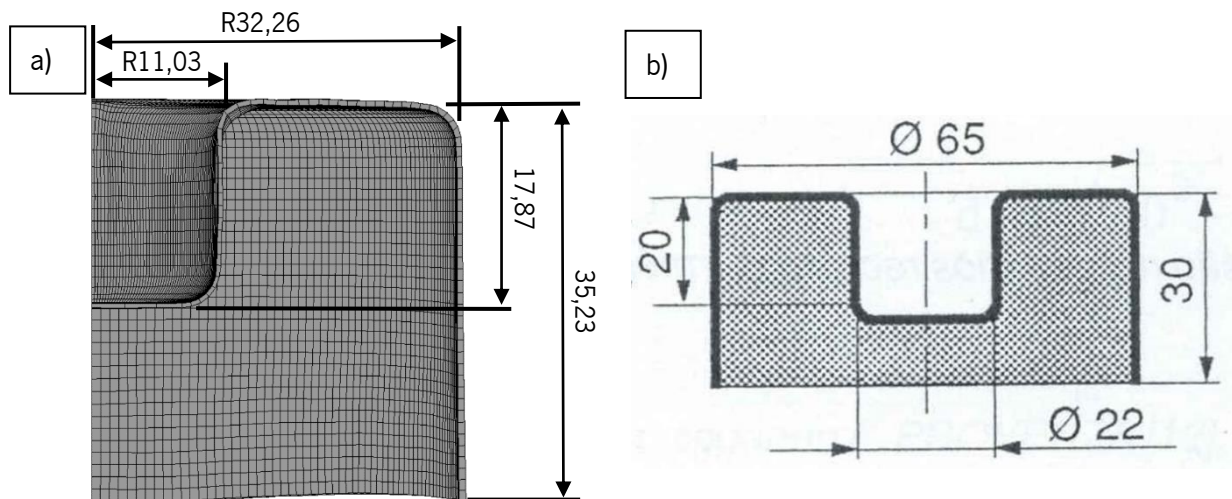


Figura 4.32 – Dimensões do componente que se pretende obter no Caso de Estudo 2: a) Dimensões obtidas por simulação numérica; b) Dimensões teóricas.

No diâmetro total do componente obtido por simulação numérica obteve-se um diâmetro de 64,52mm, assinalando-se assim um desvio de aproximadamente 0,74% a menos em relação ao inicialmente pretendido, o que reflete que esta dimensão se aproximou muito ao pretendido. Quanto ao diâmetro do Embutido cilíndrico profundo, obteve-se o valor de 22,06mm através da simulação, o que significa que o desvio em relação ao pretendido é de 0,27% constituindo mais uma vez um resultado bastante satisfatório. Quanto à altura total do componente, obteve-se o valor de 35,23mm. Esta dimensão não é comparável com o inicialmente pretendido, uma vez que é maior que a altura inicialmente definida de 30mm, dando assim margem para depois o componente ser maquinado até à altura pretendida. Por fim e analisando desta vez a altura do Embutido cilíndrico profundo, a mesma será de 17,87mm, o que significa um desvio de 10,65% em relação ao pretendido inicialmente.

Foi impossível corrigir este desvio, uma vez que quando se tentou calibrar o mesmo com o avanço de um punção, de modo a aumentar para 20mm a altura do Embutido cilíndrico profundo, o corpo deformável rompeu, como é possível verificar na Figura 4.33.

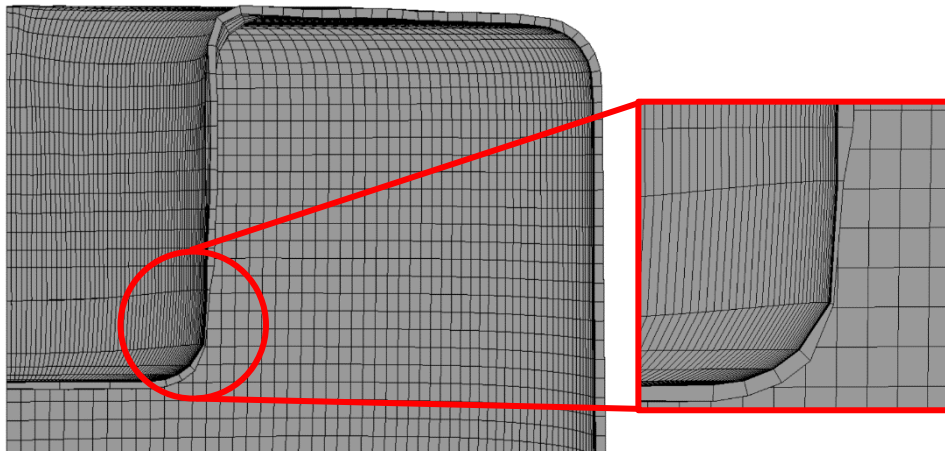


Figura 4.33 – Calibração final da altura do embutido cilíndrico profundo e respetiva rotura, no Caso de Estudo 2.

Este defeito dimensional pode levar a crer que o material selecionado pode não ser o indicado para o presente processo, ou que então deve ser acrescentada mais uma etapa intermédia, de modo a permitir que mais material flua para a zona mais central do componente.

Relativamente ao estudo realizado na 7ª etapa entre o uso ou não do Contrapunção, analisaram-se ainda as cargas exercidas pelo Punção em ambos os casos, ao longo do seu deslocamento. Na seguinte Figura 4.34, apresenta-se um gráfico que auxilia à interpretação e análise da força do punção em função do seu deslocamento.

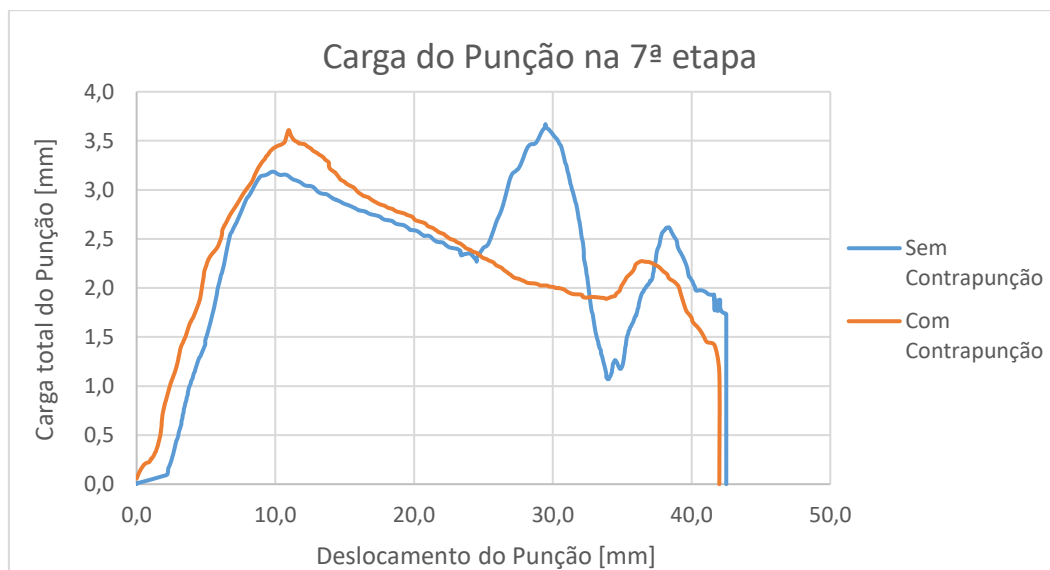


Figura 4.34 – Carga exercida pelo Punção na 7ª etapa, em função do deslocamento.

Observando a figura acima, há um desfasamento entre a força do Punção em ambos os casos, sendo superior inicialmente no caso da utilização do Contrapunção e posteriormente a força de Punção é superior no caso sem Contrapunção. Inicialmente e no caso com Contrapunção, a existência dessa mesma ferramenta, fará com que o Punção tenha que exercer uma força maior, para avançar e dobrar a aba. Posteriormente observa-se maior força no caso sem Contrapunção, uma vez que neste caso o Cerra-Chapas atua a força constante, enquanto que no caso com Contrapunção o Cerra-Chapas trabalha a folga constante, influenciando assim a força total exercida nesta parte da etapa.

Posteriormente analisaram-se as forças de Punção necessárias para cada etapa, que é essencial na determinação da prensa a utilizar no processo, consoante a capacidade de carga que a mesma deve ter. Na Figura 4.35 está presente um gráfico que compara as forças exercidas pela ferramenta Punção em função do seu deslocamento, ao longo das primeiras 6 etapas.

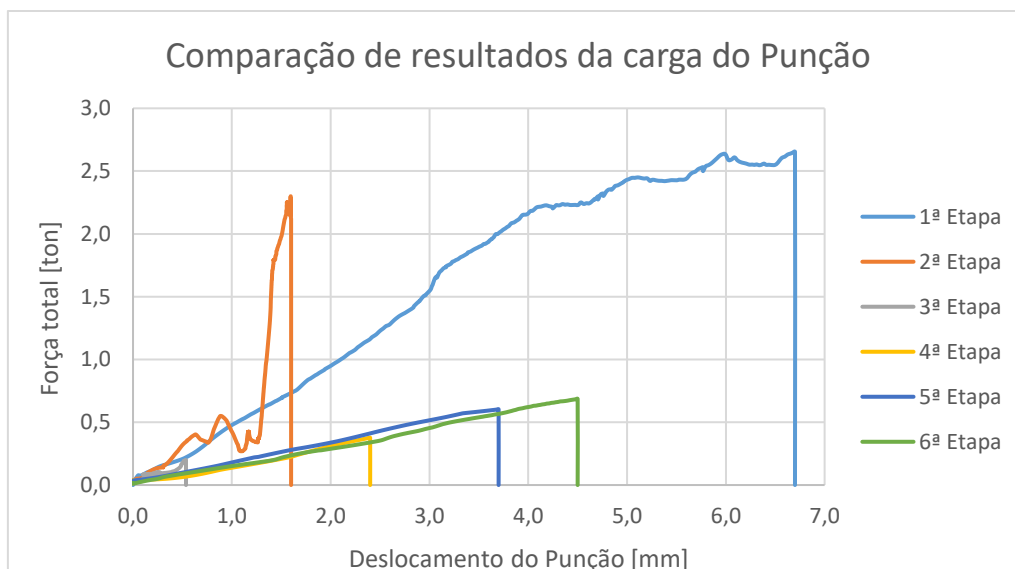


Figura 4.35 – Carga exercida pelo Punção ao longo das 6 primeiras etapas, em função do deslocamento.

Comparando a Figura 4.34 com a Figura 4.35, a etapa onde é requerida maior carga em termos do Punção é na 7ª etapa sem Contrapunção, sendo requerida uma carga de aproximadamente 3,67 toneladas. Arbitrando uma margem de segurança de cerca de 20%, será aconselhável a utilização de uma prensa com capacidade de aproximadamente 4,4 toneladas.

Da 2ª à 6ª etapa ocorre também o deslocamento da Matriz a par do deslocamento do Punção. Verificando a carga exercida pela Matriz ao longo do seu deslocamento, obteve-se o gráfico presente na seguinte Figura 4.36.

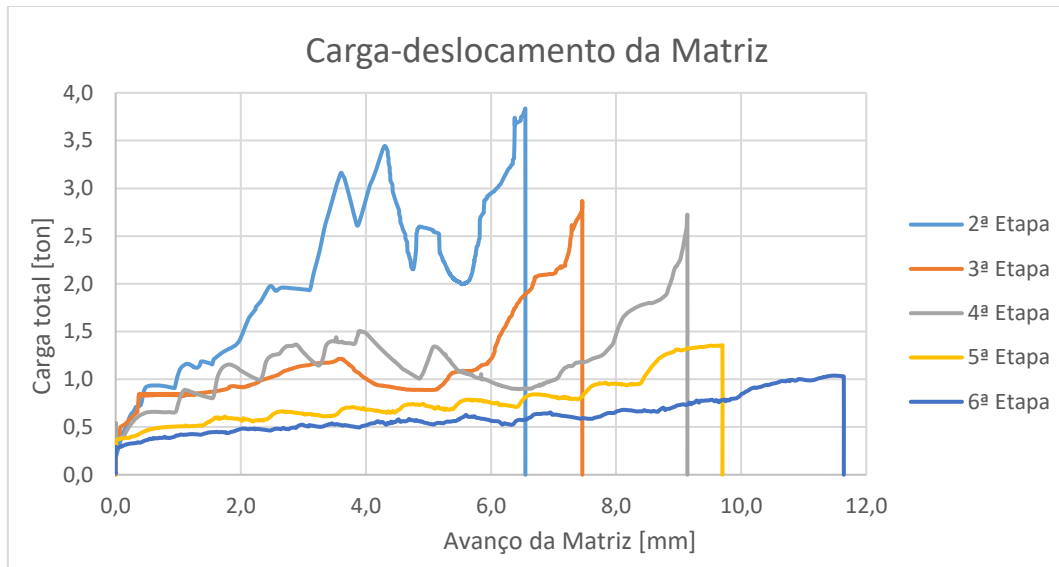


Figura 4.36 – Carga exercida pela Matriz ao longo das 5 etapas em que se desloca, no Caso de Estudo 1.

A maior carga exercida pela Matriz ocorrerá na 2ª etapa e será de aproximadamente 3,84 toneladas. Os picos presentes no fim do deslocamento da Matriz da 2ª à 4ª etapa, coincidem também com os picos no final dessas etapas para a carga do Punção, podendo indicar que ocorreu um ligeiro esmagamento da chapa entre a Matriz e o Cerra-Chapas. Ou seja, uma solução para atenuar estes picos poderia ter passado por atribuir um menor deslocamento à Matriz, nessas etapas, na casa das décimas.

Por fim e passando à análise da evolução das espessuras, traçaram-se gráfico que mostra a relação entre as espessuras na direção de laminagem e na direção transversa, com a espessura inicial (t_0), ao longo da distância geodésica.

Os resultados da espessura relativa do corpo deformável na direção de laminagem, podem-se observar na seguinte Figura 4.37.

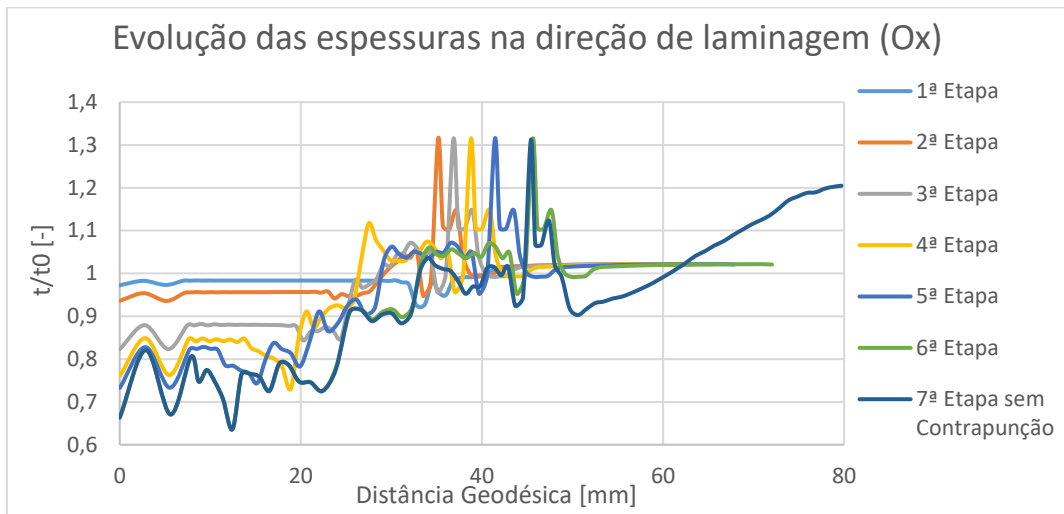


Figura 4.37 – Evolução da relação de espessuras ao longo da distância geodésica dos nós, na direção de laminagem.

Como se pode observar na figura acima, a maior redução de espessura ocorre na 7ª etapa, cerca de 37%, e o maior aumento de espessura é cerca de 31% e é semelhante da 2ª à 7ª etapa.

De seguida, na Figura 4.38, pode-se observar a relação de espessuras na direção transversa.

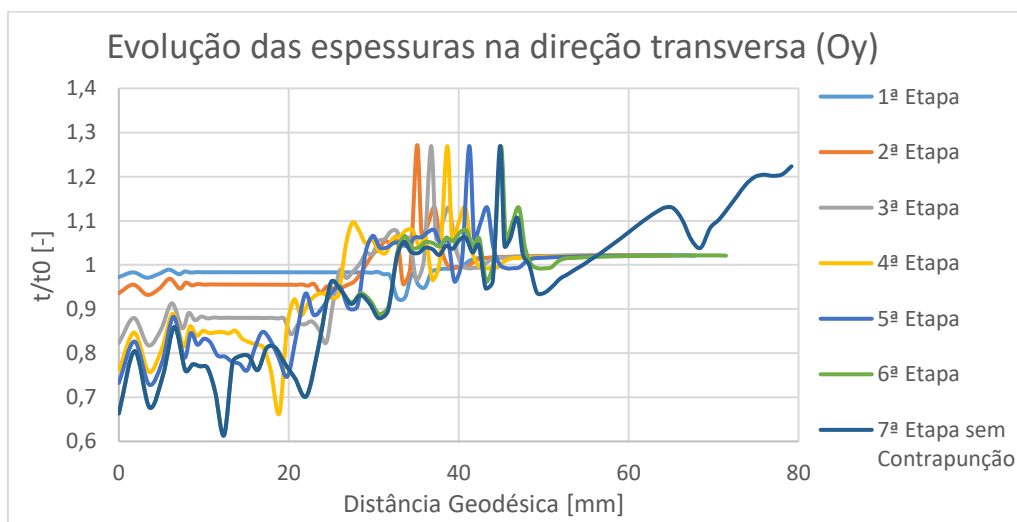


Figura 4.38 – Evolução da relação de espessuras ao longo da distância geodésica dos nós, na direção transversa.

Na figura acima apresentada, a maior redução de espessura ocorre na 7ª etapa novamente, cerca de 39%, e o maior aumento de espessura é cerca de 27% e é semelhante da 2ª à 7ª etapa.

Assim, não há nenhuma redução demasiado abrupta de espessura ao longo das etapas, sendo este um sinal que não há rotura no corpo deformável. No entanto, o corpo deformável está muito perto da rotura na zona do fundo da parede do embutido cilíndrico profundo, como se pode verificar após a tentativa de calibração da altura do embutido cilíndrico profundo.

5. CASO DE ESTUDO 3 – *BENCHMARK NUMISHEET#3* DE 2020, PREVISÃO DE FRATURA APÓS EMBUTIDURA, REEMBUTIDURA E EXPANSÃO

5.1. ESPECIFICAÇÕES DO PROCESSO E DAS FERRAMENTAS

As latas de bebida são recipientes que contêm uma dada porção líquida que pode ser refrigerantes gaseificados, bebidas alcoólicas, sumos, etc. Estes componentes são geralmente obtidos através da conformação a frio de finas chapas, sendo inicialmente embutidas até ao diâmetro requerido e de seguida passam por uma etapa de “*ironing*”, onde se uniformiza e reduz a espessura da parede lateral ao longo do seu comprimento. Atualmente, estima-se que 75% das latas de bebida sejam feitas em alumínio e que mundialmente sejam produzidas cerca de 370 mil milhões de latas [40], anualmente, o que revela a importância deste tipo de indústria no contexto global.

O processo em análise nesta secção foi proposto na conferência internacional Numisheet 2020, no *Benchmark#3: Failure Prediction after Cup Drawing, Reverse Redrawing, and Expansion* [41]. Este referido Benchmark, retrata o processo de fabrico de latas de bebidas, que neste caso inclui uma etapa de Embutidura, Reembutidura. Adicionalmente pretende-se que ocorra uma etapa de Expansão, que será relevante para determinar a rotura do componente. Por sua vez, dentro das referidas etapas haverá diversas fases, que serão aprofundadas posteriormente, no presente documento. Para melhor interpretação e perceção do processo, apresenta-se o mesmo na seguinte Figura 5.1.

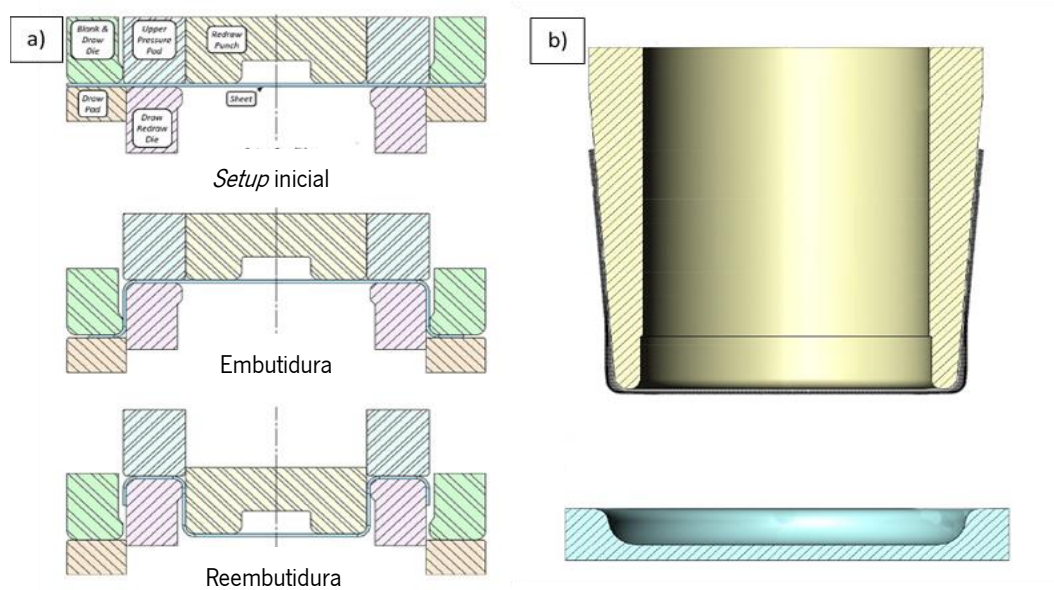


Figura 5.1 – Representação esquemática do processo de fabrico da lata de bebida: a)Embutidura e Reembutidura Inversa; b)Expansão (adaptado de [41]).

Em condições normais o processo pode ter a etapa de Reembutidura de seguida à Embutidura na mesma Simulação. No entanto, com esta dissertação pretende-se analisar o que sucede quando após a Embutidura se possibilita o retorno elástico do componente antes da Reembutidura, simulando assim cada processo em separado, com os resultados da etapa anterior.

Os autores que formularam a questão tratada no presente Caso de Estudo, propuseram a utilização das seguintes ferramentas:

- Punção de Embutidura, que terá como função ser a Matriz durante a Reembutidura (designado nos ficheiros de simulação como *Punch1&Die2*);
- Matriz de Embutidura (designado nos ficheiros de simulação como *Die1*);
- Cerra-Chapas da Embutidura (designado nos ficheiros de simulação como *BHolder1*);
- Punção de Reembutidura (designado nos ficheiros de simulação como *Punch2*);
- Cerra-Chapas da Reembutidura (designado nos ficheiros de simulação como *BHolder2*);
- Punção de Expansão (designado nos ficheiros de simulação como *PunchExpansion*);
- Base da Expansão (designado nos ficheiros de simulação como *Base*);

Passando a definir as ferramentas da operação de Embutidura e Reembutidura, pode-se observar na Figura 5.2 abaixo a representação legendada das mesmas.

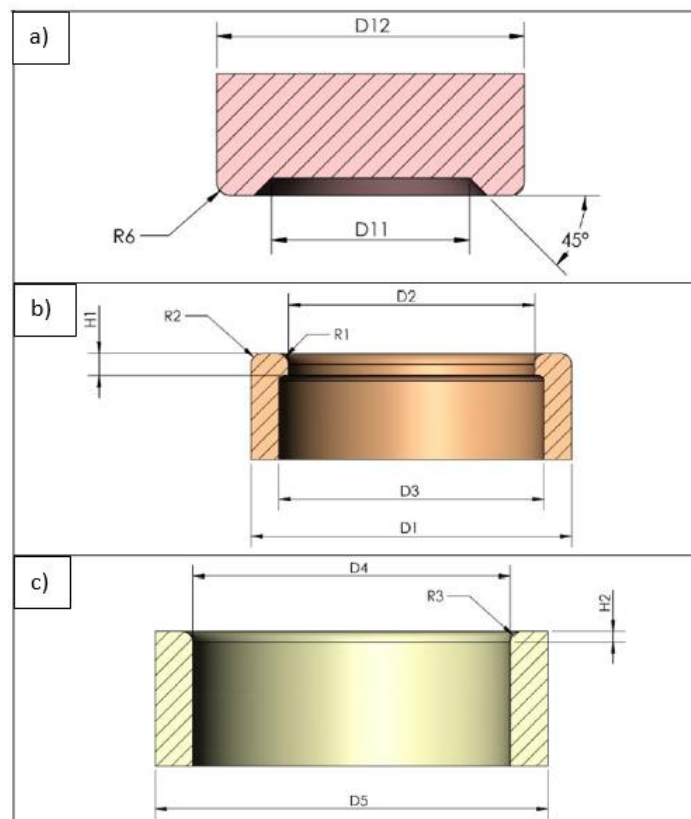


Figura 5.2 – Representação legendada das ferramentas das duas primeiras operações: a)Punção de Reembutidura; b)Punção de Embutidura; c)Matriz de Embutidura (adaptado de [41]).

Na Tabela 5.1 assinala-se a correspondência entre as designações presentes na figura acima apresentada e os seus valores numéricos em termos de dimensão.

Tabela 5.1 – Dimensões do Punção, Matriz de Embutidura e Punção de Reembutidura.

Dimensões das ferramentas	Valor das dimensões [mm]	Dimensões das ferramentas	Valor das dimensões [mm]
D1	107,95	R1	2,159
D2	77,242	R2	3,048
D3	79,274	R3	2,286
D4	108,87	R6	3,175
D5	162,86	H1	6,096
D11	53,848	H2	6,350
D12	75,971	T	0,274

A ferramenta Punção de Embutidura, que será a Matriz no decorrer da Reembutidura, sofreu uma ligeira alteração, isto é, foi removida a sua reentrância que tinha como função auxiliar na ejeção das peças após o fim da Reembutidura e durante o recuo do Punção de Reembutidura. A referida reentrância não afeta o resultado final do que é pretendido com esta simulação, mas no entanto essa descontinuidade afeta a performance da simulação, não se justificando manter a referida geometria, presente na Figura 5.3.

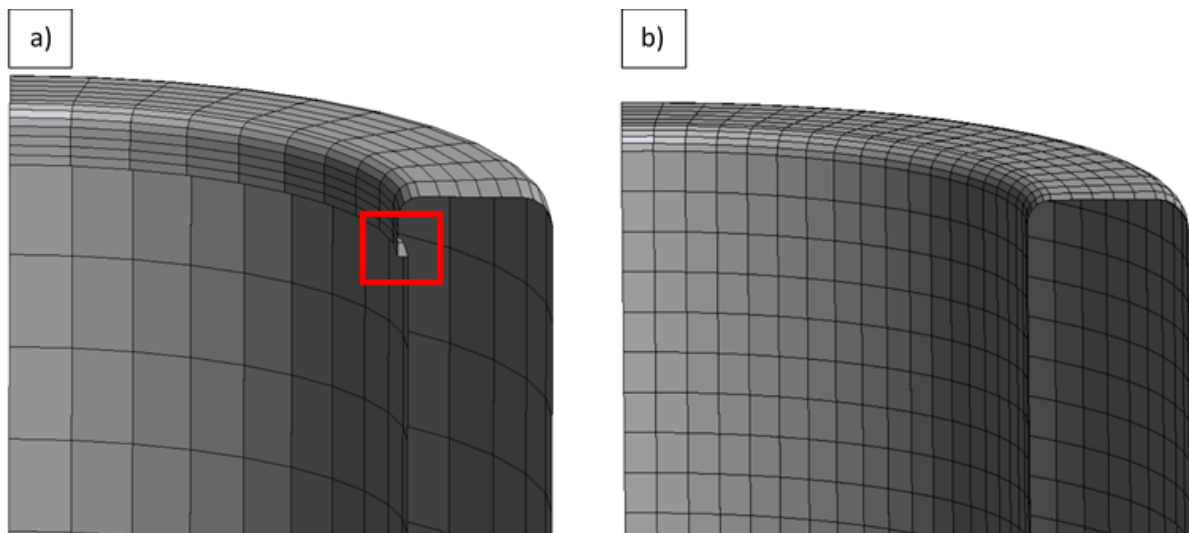


Figura 5.3 – Matriz de Reembutidura: a)Matriz original; b)Matriz sem reentrância.

Quanto às dimensões de ambos os Cerra Chapas (nomeados de *Upper Pressure Pad* e *Draw Pad* pelas instruções do *Benchmark*), devem ser obtidas através da representação legendada das ferramentas do processo, presentes na Figura 5.4.

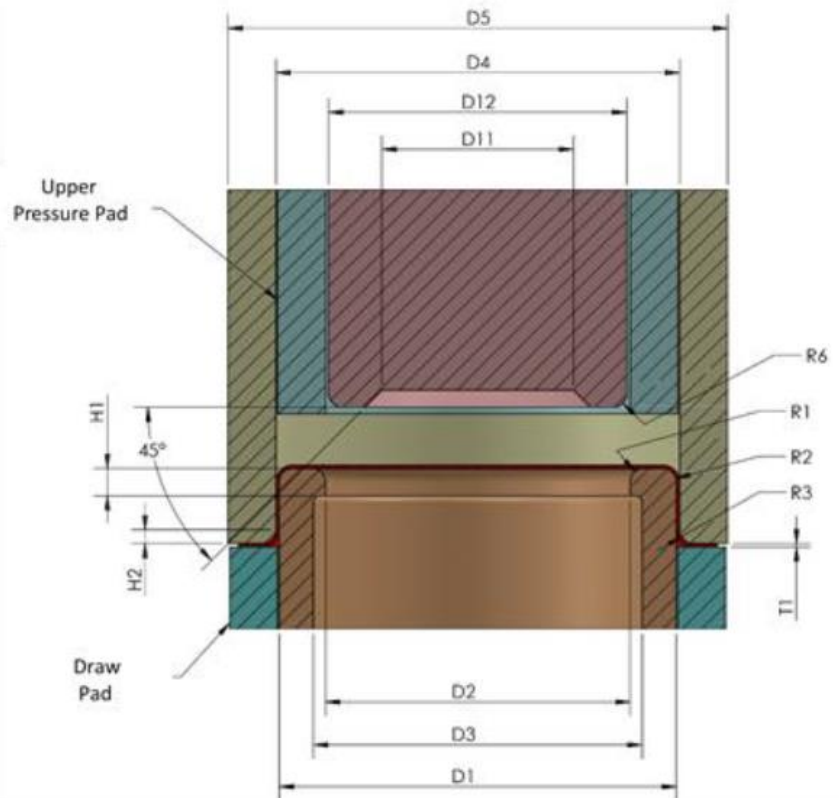


Figura 5.4 - Representação esquemática das ferramentas a utilizar no processo com as respectivas dimensões [41].

Isto é, a dimensão essencial para modelar os Cerra-chapas de forma tubular é a espessura da sua parede, que no caso do Cerra-Chapas de Embutidura é dado pela metade da diferença entre D5 e D1 que é de 27,46mm. Por sua vez, no Cerra-Chapas de Reembutidura a espessura é dada pela metade da diferença entre D4 e D12 que é de 16,45mm.

Passando às ferramentas da etapa de Expansão, nesta etapa serão necessárias 2 ferramentas, nomeadamente Punção e a Base da Expansão. Na Figura 5.5 encontra-se a representação das referidas ferramentas.

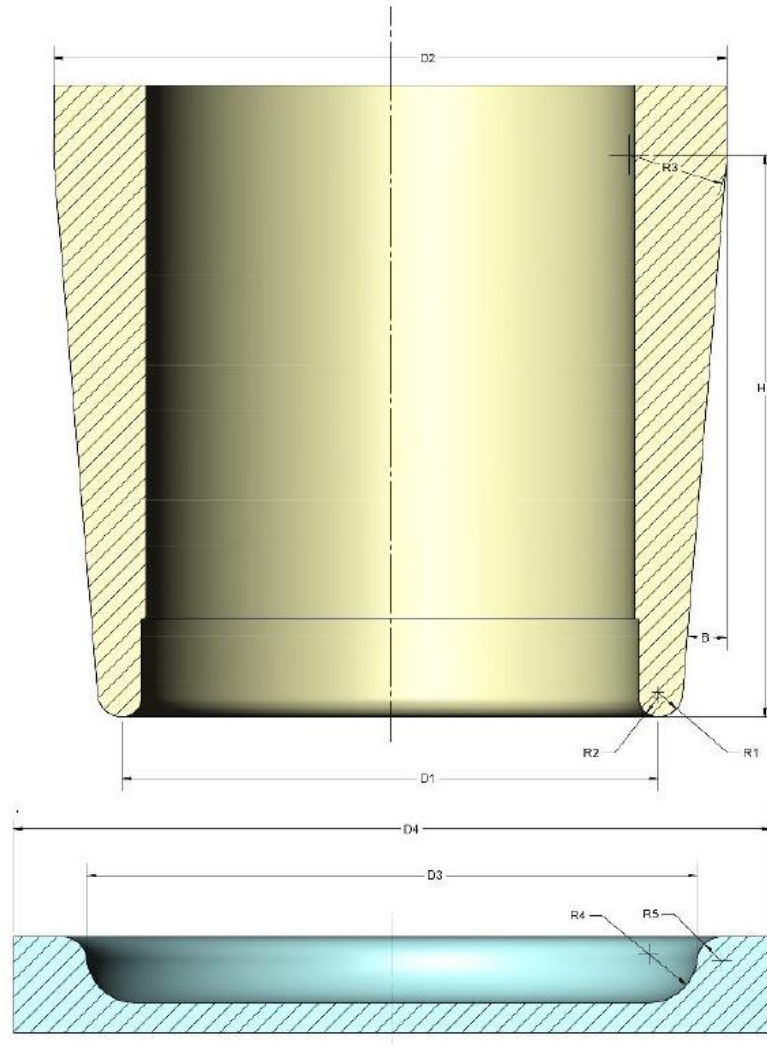


Figura 5.5 – Representação das ferramentas de Expansão e respetiva legenda [41].

Na Tabela 5.2 encontram-se as dimensões correspondentes à legenda presente na figura acima assinalada.

Tabela 5.2 – Dimensões do Punção de Expansão e da Base.

Dimensões das ferramentas	Valor das dimensões [mm]	Dimensões das ferramentas	Valor das dimensões [mm]
D1	69,723	R1	69,723
D2	85,090	R2	85,090
D3	76,708	R3	76,708
D4	108,87	R4	108,87
H1	58,405	R5	58,405
β	4,7		

Do conhecimento existente na área da Manufatura, tem-se que a conformação de latas é diretamente afetada por fatores como: propriedades mecânicas da folha de alumínio, geometria das ferramentas, condições de contacto (como por exemplo os efeitos da lubrificação) e condições de fronteira do processo [40].

Com este Benchmark os autores pretendem que através de simulação por elementos finitos de um processo de latas de bebida, se obtenha:

- A previsão da “orelha” devido à anisotropia plástica do material após a operação de embutidura e após a operação de reembutidura;
- A previsão do curso do punção onde ocorre a falha, diâmetro do componente no local da fratura e localização da fratura, durante a operação de expansão.

Neste caso, será prevista a “orelha” devido à anisotropia plástica e a previsão do curso do Punção em que ocorre a falha e a localização da mesma.

5.2. PRÉ-PROCESSAMENTO

De modo a simular o processo de forma fidedigna têm que ser devidamente definidos os ficheiros de *input* e de acordo com os dados fornecidos pelos autores do Benchmark em estudo. O processo de definição dos ficheiros de *input* será repetido para cada uma das simulações das três etapas existentes no processo.

Começando no ficheiro DD3_bcon, apresentado na Figura 5.6, o mesmo será igual para as etapas 1 e 2, uma vez que nele se define a axissimetria do esboço da chapa. Isto é, define-se na linha P1 a simetria em relação ao eixo Oy e na linha P2 a simetria em relação ao eixo Ox.

```

1010*****      < DD3IMP 010.x >   File "bcon.dat"  01.07.2009      *****
*****          MANDATORY file to input Boundary Conditions      *****
=====+=====
Boundary conditions| NSC= 2      ERR= 1.D-2      BCID
  Ax+By+Cz=D      |      A      B      C      D      COORD  ID  NRES
                   |      0      1      0      0      2      2      0
                   |      1      0      0      0      1      2      0
Restrictions      |      COORD  COND  VALUE  ERR2
                   |      1      1      80.1  1.D-2
=====+=====

```

Figura 5.6 – Ficheiro DD3_bcon para a simulação numérica das duas primeiras etapas do Caso de Estudo 3.

No ficheiro DD3_input é importante definir parâmetros como o número máximo de incrementos, que neste caso foi arbitrado como 10000, o número de iterações por incremento, entre outras informações relevantes para a simulação. É importante também definir o número da etapa onde ocorre

o retorno elástico, que para o caso da Etapa 1 (Embutidura) e Etapa 2 (Reembutidura) é na fase 3 (iphOSS=3) e na Etapa 3 (Expansão) ocorre na fase 2 (iphOSS=2). Na Figura 5.7 é possível observar a configuração geral do ficheiro DD3_input para as simulações efetuadas neste processo.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "input.dat" 01.07.2009 *****
***** MANDATORY file to start/restart a simulation *****
=====
Simulation and |          NSTART      NEND      NOUT      iGID      INC      DEV
Output Data   |          1      10000      0      10      51      0
-----
Tolerances and |          TOLEQ      TEQOUT      RAPEQ      TOLST      CUNL      dampOSS
residues      |          0.01      0.05      1.0E+09      1.0E-08      0.999      0.50
-----
Maximum number |          IRMXX      IEQMAX      NMAXST
of iterations  |          1      150      25
-----
Max. Increments |          DEMAX      DWMAX      DSNMAX      DSTMAX
for each NST   |          0.0100      0.5000      10.0      3.0
-----
Rmin          |          RINF      RSUP      DFNMAX      DFT1MAX      DFT2MAX
Strategy      |          0.0010      5.000      0.0      0.0      0.0
-----
Thermal Analysis |          T_TOLEQ      T_alfa      T_Diag      T_Transi      T0[°C]
Parameters    |          1.0E-03      0.5      1      1      25.0
-----
Input data,    |          MEPopt      iphOSS
Cep           |          1      3
=====

```

Figura 5.7 – Configuração do ficheiro DD3_input para a simulação da Embutidura.

Passando ao ficheiro DD3_contact, presente na Figura 5.8, este também será comum às 3 etapas e nele define-se o contacto das ferramentas na direção do eixo Oz. Na linha 1 define-se o NSET 1, que se traduz no na parte de baixo da chapa em z e o NSET 2 que define o contacto na face superior. Adicionalmente definem-se as condições de atrito, que neste caso é o coeficiente de atrito que será MU=0,03, como estabelecido no documento de instruções.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "contact.dat" 01.07.2009 *****
***** MANDATORY file to input contact sets *****
=====
CONTACT SETS
-----
ISET Ax+By+Cz=D | NSET 2
                  | A      B      C      D
1      1      P | 0      0      1      L
2      2      P | 0      0      1      H
-----
X:  P -> Plane   | Ax + By + Cz = D
    R -> Radius  | Ax2 + By2 + Cz2 = D2 ; A, B, C =1 or 0
    N -> Normal  | normal(A,B,C), angular deviation = D [degrees]
    E -> Ellipse | (x/A)^2+(y/B)^2+(z/c)^2=1.0
    F -> File    | Name of the .dat file with nodes listed (1 space #node)
    F -> File    | First line: Mesh Entities; Last line: End Mesh Entities

If D=0.0 -> Reads the coordinates of Radius/Ellipse center in the next line
           A=X0 ; B=Y0 ; C=Z0 ; D=D (Radius) or D=1 (Ellipse)
=====
FRICITION
-----
G      xxx : xxx |          MU      CPen      IPenvar      CPenD
          1      |          0.03      20600.0
S      1      |
S      2      |
P      10 : 15 |
T      1 : 2   |
-----

```

Figura 5.8 – Ficheiro DD3_contact utilizado em cada etapa de simulação numérica do processo.

Por sua vez, e para a simulação em questão, o material indicado pelos autores é o alumínio AA3104-H19, tendo um Módulo de Elasticidade de 68,95 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,33. Uma vez que o referido material é um alumínio, a lei de encruamento que melhor o define é a lei de Voce que terá como parâmetros que a definem: $Y_0 = 288,86\text{MPa}$; $C_y = 27,20$ e $Y_{sat} = 351,26\text{MPa}$. Os dados de propriedades mecânicas, anteriormente referidos, foram retirados dos dados experimentais fornecidos pelo *Benchmark*. Na seguinte Figura 5.9, observam-se os parâmetros referidos anteriormente inseridos no ficheiro DD3_phase.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "mater.dat" 27.05.2018 *****
***** MANDATORY file to input constitutive parameters *****
=====
MATERIAL PARAMETERS| PlasLAW YldCRIT EM PR
| 5 4 68950.0 0.33
+-----+
Swift Law | Yo CC AN | AX
Isot.Kinem.Hard. | | | | 0.0
+-----+
Voce Law | Yo CY Ysat | CX Xsat
No-Isot.Kin.Hard. | 288.86 27.20 351.26 | |
+-----+
    
```

Figura 5.9 – Parâmetros das propriedades mecânicas e Lei de Voce para o AA3104-H19, no ficheiro DD3_phase.

A definição das propriedades do material são de extrema relevância e são definidas no ficheiro DD3_mater. No presente Caso de Estudo serão estudados 3 critérios de plasticidade distintos e o momento em que ocorre a rotura em cada um, sendo eles: Von Mises, Hill48 e CB2001.

Na seguinte Figura 5.10, pode-se observar o ficheiro que pode ser utilizado para o caso em que se considerou o material isotrópico, aplicando o critério de Von Mises, em que o valor do YldCRIT no cabeçalho terá de ser igual a 1, uma vez que este é um caso particular do critério Hill48.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "mater.dat" 27.05.2018 *****
***** MANDATORY file to input constitutive parameters *****
=====
MATERIAL PARAMETERS| PlasLAW YldCRIT EM PR
| 5 1 68950.0 0.33
+-----+
YIELD CRITERION
-Hill48 | F G H L M N
| 0.5 0.5 0.5 1.5 1.5 1.5
+-----+
    
```

Figura 5.10 – Ficheiro DD3_phase do Caso de Estudo 3, para o critério de Von Mises.

Passando ao caso de Hill48, em que se considera o material anisotrópico, terão de se considerar parâmetros diferentes para F, G, H, L, M e N.

Na Figura 5.11 podem-se observar os parâmetros que definirão o critério de plasticidade Hill48, para o material do presente Caso de Estudo. Tal como em Von Mises o parâmetro YldCRIT deve ser igual a 1, para ser Hill48 o critério a ser considerado pelo *software* DD3IMP.

```

=====
YIELD CRITERION |
-Hill48         |
                |      F      G      H      L      M      N
                | 0.255326  0.712758  0.287241  1.500000  1.500000  1.343701
                |
=====
    
```

Figura 5.11 – Ficheiro DD3_phase do Caso de Estudo 3, para o critério Hill48.

Por fim, para o critério CB2001 pode-se observar na seguinte Figura 5.12 os parâmetros definidos para o respetivo critério de plasticidade. Os coeficientes que definem este critério, foram calculados a partir dos coeficientes de anisotropia de Lankford r_0 , r_{45} e r_{90} , com o auxílio do *software* DD3MAT. Este *software* serve de apoio ao DD3IMP, já que a partir de um conjunto de dados experimentais, o DD3MAT calcula e fornece ao DD3IMP os parâmetros de anisotropia necessários ao critério de plasticidade selecionado no modelo constitutivo do material a conformar [4]. Alguns dos parâmetros retirados da caracterização experimental dos materiais que servem de *input* ao DD3MAT são os coeficientes de anisotropia de Lankford e tensão de cedência em tração uniaxial e equibiaxial. Para o CB2001 ser o critério pela qual a simulação se vai guiar, é necessário alterar o *input* YldCRIT para o valor 4.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "mater.dat" 27.05.2018 *****
***** MANDATORY file to input constitutive parameters *****
=====
MATERIAL PARAMETERS | PlasLAW  YldCRIT      EM      PR
                    |          5      4          68950.0  0.33
                    |-----+-----
                    |
-CB2001             |          c      m
-CB2004             | -0.167119      -
-newDrucker-like   |          a1      a2      a3      a4      a5      a6
                    | 0.765838  1.021425  0.698776  1.007372  1.000000  1.000000
                    |          b1      b2      b3      b4      b5      b6
                    | 1.931928  9.323671 -0.105025 -5.000000  0.619786  1.000000
                    |          b7      b8      b9      b10     b11
                    | 1.000000  1.000000  1.000000  1.222261  1.000000
                    |-----+-----
    
```

Figura 5.12 – Ficheiro DD3_phase do Caso de Estudo 3, para o critério CB2001.

5.2.1. ETAPA 1

Na etapa inicial de Embutidura, ou Etapa 1, o ficheiro DD3_mesh terá uma malha 3D (Hex8) com uma camada de espessura e elementos com 0,9mm de lado. Quanto ao tipo de elementos no centro do esboço, a malha é constituída por elementos não estruturados, de modo a otimizar o tempo de simulação, sem se comprometer a exatidão dos resultados, uma vez que não ocorrerá deformação significativa induzida nesta zona. A espessura é a definida pelos autores do Benchmark #3 da conferência

Numisheet2020, como sendo de 0,274mm, pelo que a malha terá apenas uma camada dessa mesma espessura, não se justificando múltiplas camadas neste caso.

A simulação será efetuada apenas a um quarto do esboço, uma vez que existe axissimetria no mesmo, obtendo-se resultados fidedignos ao mesmo tempo que se diminui o tempo de processamento da simulação. Na Figura 5.13 é possível observar a malha do esboço modelada com o auxílio do *software* GiD.

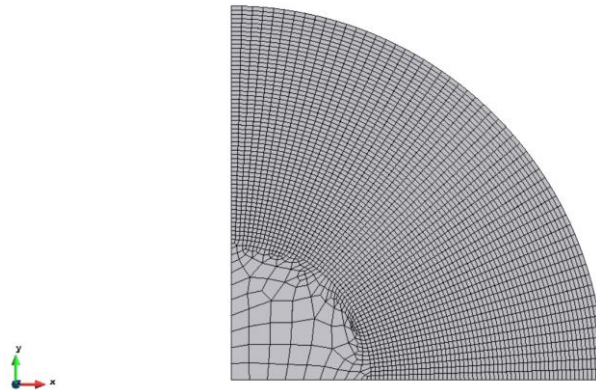


Figura 5.13 – Esboço e respetiva malha do componente para o problema proposto no Caso de Estudo 3.

O esboço terá no total um diâmetro de 160mm, ou seja como na simulação será considerado apenas um quarto do componente, modela-se apenas o raio de 80mm.

O processo é definido inicialmente por uma etapa de embutidura, em que se prende o esboço com a ação de um Cerra-chapas, seguida de um avanço de 45mm do Punção de Embutidura contra o esboço. Por fim dá-se o anulamento das ferramentas para que ocorra o retorno elástico do componente.

Nesta etapa serão necessárias 3 ferramentas, que deverão ter o seguinte posicionamento entre si, demonstrado na Figura 5.14.



Figura 5.14 – Posição inicial das ferramentas para a Etapa 1: 1) Punção; 2) Matriz; 3) Cerra-chapas.

As diferentes fases da etapa de Embutidura anteriormente referidas, devem ser definidas no ficheiro DD3_phase, como é possível observar na seguinte Figura 5.15.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 04.02.2014 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 3 NbTOOL= 3 NbBCID= 0
=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----IMAT-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 -0.1 -0.1 0.0 T1_Punch1&Die2 1
2 -0.1 -0.1 0.0 T2_Die1 2
3 -0.1 -0.1 -0.01 T3_BHolder1 1 -1.0 .274
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| .0001 3 3 2 2 0.0001
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 2 0.0 0.0 0.1 0.0 0.0 -5275. 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
2| .001 1 3 1 2 45.
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 2 0.0 0.0 45.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 1 1 2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 -5275. 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
3| .001 1 3 3 1 0.0001
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
3 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====

```

Figura 5.15 – Ficheiro DD3_phase que define a etapa de Embutidura.

Como é possível observar na figura acima, o Punção de Embutidura e o Cerra-Chapas de Embutidura (as ferramentas 1 e 3 respetivamente) aparecem definidos pelo SET 1, uma vez que este é o SET definido no ficheiro DD3_contact, para o contacto com a superfície inferior da chapa. Por sua vez, a Matriz de Embutidura (ferramenta 2) contacta a face superior em Oz da chapa, tendo assim o SET 2. A ferramenta Cerra-Chapas apresenta valores no campo “lim”, de modo a controlar a sua altura máxima e mínima em z, em relação à posição inicial, limitando assim o seu deslocamento, de modo a não subir ou descer em demasia.

Na primeira fase, o Cerra-Chapas avança contra a chapa até atingir a força parcial de 5275N (total de 21,1kN), assegurando assim a fixação da mesma. Na segunda fase, o Punção avança 45mm na direção z, enquanto que o Cerra-chapas mantém-se a trabalhar à força constante de 5275N. Por fim, na terceira fase, anulam-se as ferramentas (INDOUT=0), para que ocorra o retorno elástico do corpo deformável, num único *step*.

Nas etapas seguintes, o ficheiro correspondente à malha inicial dessa etapa será o ficheiro “UFO_pXend” (ex: UFO_p2end), da última fase da etapa anterior que corresponde ao retorno elástico, tendo-se apenas de alterar o nome desse ficheiro para “resume.stage”. Assim, começa a etapa seguinte com uma malha com os dados e a geometria resultantes da etapa anterior, como acontece num processo multi-etapa na realidade.

5.2.2. ETAPA 2

Na segunda etapa, e garantindo o correto posicionamento do corpo deformável na Matriz de Reembutidura (anterior Punção de Embutidura), Cerra-Chapas da Reembutidura fixa o corpo deformável anteriormente embutido e o Punção de Reembutidura avança no sentido negativo do Eixo Oz, descendo em direção ao corpo deformável.

Na Figura 5.16, apresentam-se as ferramentas e a sua posição, de modo a melhor compreender esta etapa.

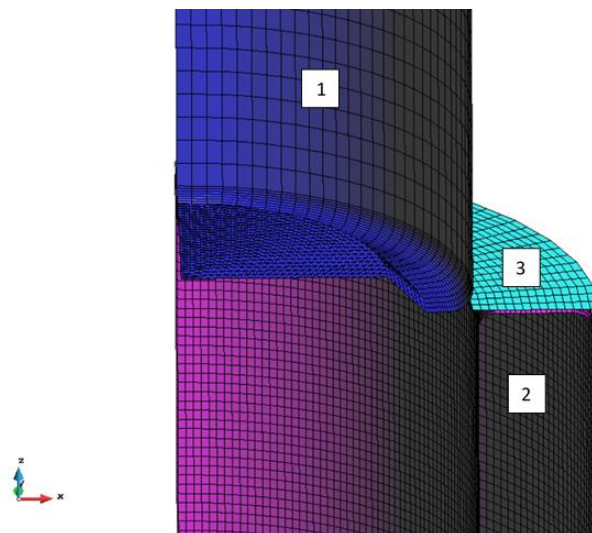


Figura 5.16 – Posição inicial das ferramentas para a Etapa 2: 1) Punção; 2) Matriz; 3) Cerra-chapas.

Como mencionado anteriormente, esta etapa começará a partir de um ficheiro UFO, nomeado de “resume.stage”. Este ficheiro contém as informações geométricas, estados de tensão, deformação plástica, entre outras informações do esboço obtido na etapa anterior, permitindo assim uma simulação da etapa aproximada ao que se verifica na realidade.

No *Benchmark* de onde foi retirado este caso de estudo, indica-se que o Cerra-Chapas trabalha a 16,6kN (em axissimetria 4150N), mas com esta força, o corpo deformável estava a estriccionar no decorrer da Reembutidura. De forma a evitar que a chapa estriccione ao fluir com o movimento do Punção, decidiu-se simular o Cerra-Chapas a folga constante de 0,1mm e não a força constante como na etapa anterior. Esta é também uma prática muito comum na indústria, ou seja fixar o cerra-chapas numa posição, com uma determinada folga, previamente analisada.

Então, na primeira fase o Cerra-Chapas desce 0,3mm na direção negativa do eixo Oz, de modo a fixar a chapa com uma folga de aproximadamente 0,347mm em relação à Matriz, ou seja, uma folga da espessura do corpo deformável mais 0,1 mm. Por sua vez, na segunda fase da simulação, o Cerra-Chapas mantém a sua posição, trabalhando a folga constante, enquanto que o punção desce 77,2mm. No documento guia para interpretar o processo, os autores indicam que o punção desce 75mm. Arbitrou-se assim descer mais 2,2mm, uma vez que não comprometendo o resultado final do processo, se consegue garantir que a chapa é reembutida na sua totalidade e não apresenta aba. Na terceira e última fase da simulação, desativam-se as ferramentas e dá-se o retorno elástico do corpo deformável.

Nesta etapa, de modo a otimizar a simulação e o tempo para obter a mesma, fizeram-se ainda algumas alterações no documento DD3_input, apresentadas na seguinte Figura 5.19, como por exemplo no TOLEQ, IEQMAX e no iphOSS.

1010***** < DD3IMP 010.x > File "input.dat" 01.07.2009 *****						
***** MANDATORY file to start/restart a simulation *****						
Simulation and Output Data	NSTART	NEND	NOUT	iGID	INC	DEV
	1	10000	0	10	51	0
Tolerances and residues	TOLEQ	TEQOUT	RAPEQ	TOLST	CUNL	dampOSS
	0.05	0.05	1.0E+09	1.0E-08	0.999	0.50
Maximum number of iterations	IRMXX	IEQMAX	NMAXST			
	1	50	25			
Max. Increments for each NST	DEMAX	DWMAX	DSNMAX	DSTMAX		
	0.0100	0.5000	10.0	3.0		
Rmin Strategy	RINF	RSUP	DFNMAX	DFT1MAX	DFT2MAX	
	0.0010	5.000	0.0	0.0	0.0	
Thermal Analysis Parameters	T_TOLEQ	T_alfa	T_Diag	T_Transi	T0[°C]	
	1.0E-03	0.5	1	1	25.0	
Input data, Cep	MEPopt	iphOSS				
	1	2				

Figura 5.19 – Ficheiro DD3_input da etapa de Reembutidura com as devidas alterações assinaladas.

No TOLEQ alargou-se o critério de convergência de 0,01 a 0,05 de modo a que o critério convirja com 5% de erro, que continua a ser um valor bastante aceitável e sólido em termos de simulação. Com esta alteração permitiu-se resolver o problema de convergência, que existia e prolongava a simulação em horas, alargando o critério. O IEQMAX passou de 150 para 50, diminuindo o número de tentativas do

algoritmo para uma dada estratégia de incremento. Esta alteração foi efetuada, uma vez que se verificou que a partir deste número de iterações de incremento não havia convergência do critério, evitando-se assim perdas de tempo em termos de simulação. O iphOSS alterou-se de 3 para 2 com a eliminação da etapa de movimento do Cerra-Chapas para prender a chapa, a presente etapa passou a ter apenas 2 fases, dando-se o retorno elástico na fase 2 e não na 3.

Nesta etapa a ferramenta Matriz de Reembutidura estará em contacto com a face inferior do corpo deformável, correspondendo ao set 1 e o Punção e Cerra-Chapas de Reembutidura terão contacto com a face superior, sendo-lhes atribuído o set 2. De seguida, na Figura 5.20 encontra-se o ficheiro DD3_phase da etapa de Reembutidura, para os diversos critérios de plasticidade aplicados neste estudo.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 04.02.2014 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 3 NbTOOL= 3 NbBCID= 0
=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| -0.1 -0.1 0.10 T1.2_Punch 2
2| -0.1 -0.1 -0.57 T2.2_Die 1
3| -0.1 -0.1 0.10 T3.2_BHolder 2
=====
IPH| DELT NOUT JD NTPR NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| .001 3 3 1 1 0.0001
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
2| 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
3| 1 1 2 0.0 0.0 -0.3 0.0 0.0 0.0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTPR NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
2| .001 1 3 1 1 77.2
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| 1 1 2 0.0 0.0 -77.2 0.0 0.0 0.0 0
2| 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
3| 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTPR NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
3| .001 1 3 3 1 0.0001
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
2| 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
3| 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
=====

```

Figura 5.20 – Ficheiro DD3_phase para a simulação do Cerra-Chapas de Embutidura a força constante de 2400N de força total e 600N de força parcial.

Do ficheiro apresentado na figura acima, pode-se observar que na 1ª fase desta etapa o Cerra-Chapas descerá 0,3mm na direção Oz, de modo a ficar aproximadamente 0,38mm da superfície da Matriz, ou seja a espessura do corpo deformável mais aproximadamente 0,1mm de folga. Na 2ª fase, o Punção de Reembutidura avançará 77,2mm na direção negativa de Oz, enquanto as restantes ferramentas permanecem imóveis, de modo a garantir que o corpo deformável é completamente reembutido. Por fim, na 3ª fase, desativam-se as 3 ferramentas, de modo a anular forças externas e a ocorrer o retorno elástico.

5.2.3. ETAPA 3

Na etapa 3, ou etapa de Expansão, o pretendido é expandir o diâmetro interno do corpo deformável, de modo a que o mesmo atinja um ponto de rotura e com o auxílio da simulação numérica conseguir prever com exatidão quando a referida rotura ocorre e onde se localiza. Na seguinte Figura 5.21, apresentam-se as ferramentas e a sua posição, de modo a melhor compreender esta etapa.

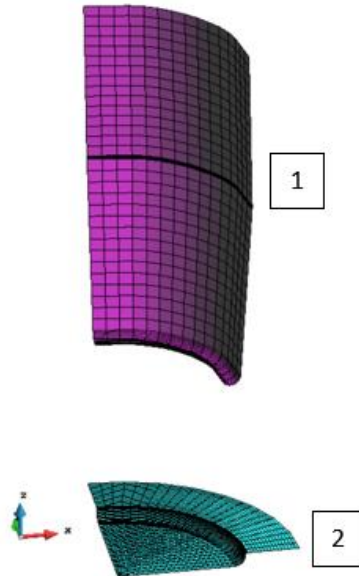


Figura 5.21 – Posição inicial das ferramentas para a Etapa 3: 1) Punção de Expansão; 2) Matriz.

Assim, tal como na etapa anterior, a Expansão começará a partir de um ficheiro .UFO, nomeado de “resume.stage”. O estado inicial do corpo deformável e o seu posicionamento relativo em relação às ferramentas, encontra-se apresentado na Figura 5.22.

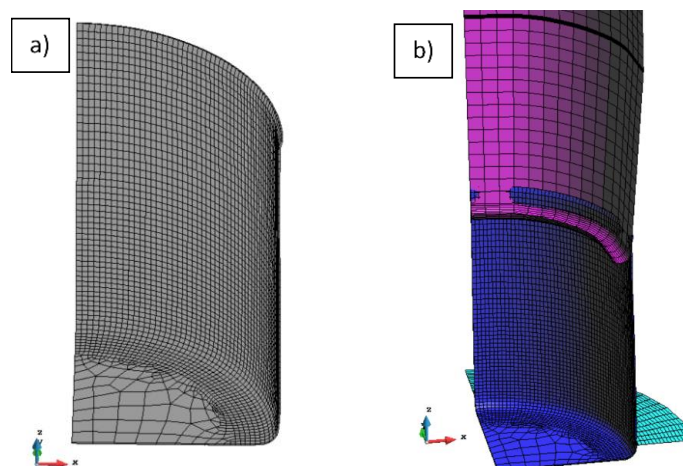


Figura 5.22 – *Setup* da etapa de Expansão: a) Representação do esboço inicial da etapa; b) Posição do esboço em relação às ferramentas.

Na definição das condições de fronteira há uma ligeira alteração em relação às demais etapas, adicionando-se uma nova condição no ficheiro de *input* DD3_bcon, presente na Figura 5.23.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "bcon.dat" 01.07.2009 *****
***** MANDATORY file to input Boundary Conditions *****
=====
Boundary conditions| NSC= 3 ERR= 1.D-2 BCID
Ax+By+Cz=D | A B C D COORD ID NRES
P1 | 0 1 0 0 2 2 0
P2 | 1 0 0 0 1 2 0
P3 | 0 0 1 0 3 2 2
Restrictions | COORD COND VALUE ERR2
P2R1 | 1 -1 0.001 1.D-2
P2R1 | 2 -1 0.001 1.D-2
=====
OSS One Step | NRES= 1
Springback | x y z COORD Xinit
N1 | 0.0 0.0 0.0 3 1
N2 | . . . .
=====

```

Figura 5.23 – Ficheiro DD3_bcon da Etapa 3 do Caso de Estudo 3.

O ficheiro DD3_input da Etapa 3 será igual ao da etapa anterior. Quanto ao ficheiro DD3_phase para a Etapa 3, ou etapa de Expansão são utilizadas apenas 2 ferramentas.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 04.02.2014 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 2 NbTOOL= 2 NbBCID= 0
=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 -0.1 -0.1 60.0 T6_PunchExpansion 2
2 -0.01 -0.01 -5.873 T7_Base 1
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1| .001 1 3 1 1 50
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 1 1 2 0.0 0.0 -50.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 1 1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====
IPH| DELT NOUT JD NTYP NOPR Text[°C] TIME[sec]
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
2| .001 1 3 3 2
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
iout| INDOUT(I) DISINT(I)(f8.0) EFFIMP(I)(f8.0) Hcoef Temp
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
2 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0
=====
#REPEAT
#NEXT
=====

```

Figura 5.24 - Configuração do ficheiro DD3_phase para a etapa de Expansão.

Então, na primeira fase o Punção de expansão desce 50mm e na segunda e última fase da simulação, desativam-se novamente as ferramentas e dá-se o retorno elástico do corpo deformável. De notar que o punção de expansão tem forma troncocónica com um diâmetro progressivamente maior, que por sua vez é maior que o diâmetro do corpo deformável após a Reembutidura, obrigando a que o mesmo expanda até à estricção na parede lateral.

5.3. PÓS-PROCESSAMENTO E ANÁLISE

Nesta secção do presente documento, analisa-se inicialmente a evolução das espessuras do corpo deformável nas direções transversa e de laminagem, para diversos deslocamentos de Punção de Expansão, indicados nas respetivas legendas dos gráficos que serão apresentados.

Ademais serão ainda comparados os resultados para os diversos critérios, nomeadamente a orelha apresentada no final da etapa de Embutidura e Reembutidura e as forças exercidas pelo Punção em cada critério, e respetivas conclusões.

5.3.1. RESULTADOS COM O CRITÉRIO DE PLASTICIDADE VON MISES

Começando pelo critério de plasticidade Von Mises, as espessuras na direção de laminagem evoluem em função da distância geodésica da seguinte forma, para os seguintes deslocamentos de Punção de Expansão, apresentados na Figura 5.25.

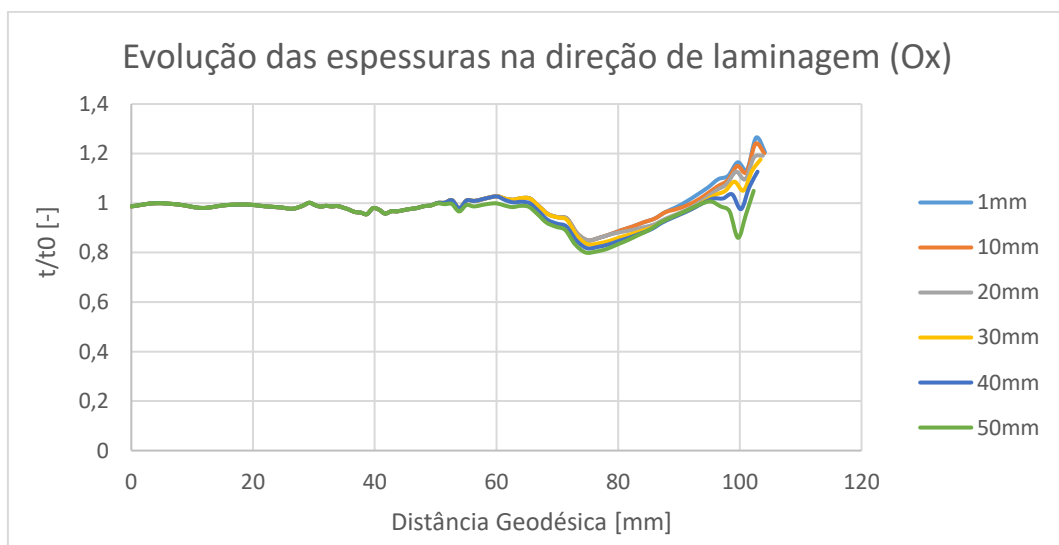


Figura 5.25 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção de laminagem, para vários deslocamentos de Punção, no critério de Von Mises.

Na direção de laminagem, não ocorre estricção, mantendo-se as espessuras ao longo do deslocamento do Punção de Expansão. Tal se sucede, já que o material é isotrópico, ou seja, a sua resposta é isotrópica e igual em todas as direções, sendo impossível nestes casos se localizar a estricção apenas numa zona.

Na seguinte Figura 5.26, pode-se observar a evolução das espessuras na direção transversa, com o avanço do Punção de Expansão.

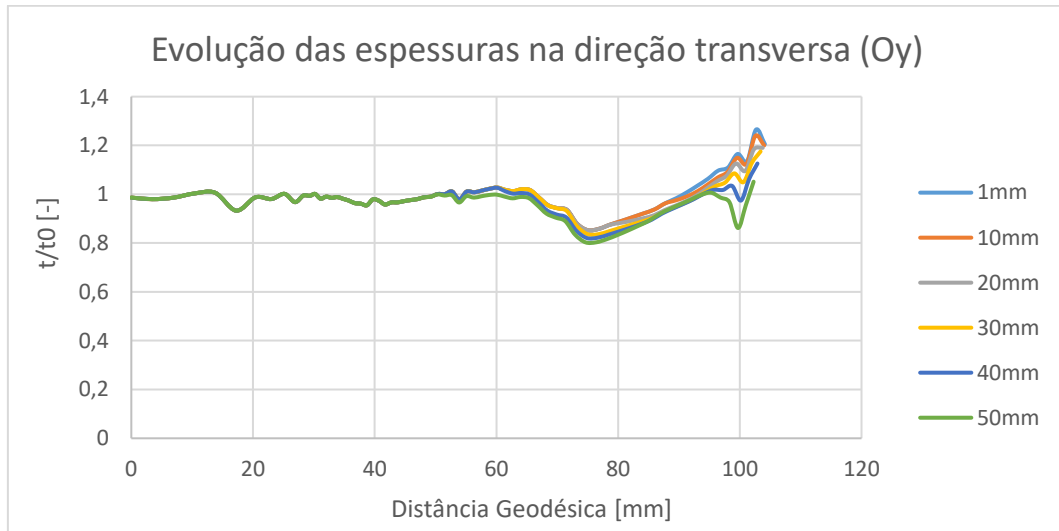


Figura 5.26 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção transversa, para vários deslocamentos de Punção, no critério de Von Mises.

Observando e comparando os resultados da evolução das espessuras na direção de laminagem e direção transversa, pode-se concluir que o comportamento do material é idêntico em ambas as direções. Tal comportamento é expectável perante um material tido como isotrópico, uma vez que estes materiais mantêm as suas propriedades em todas as direções.

5.3.2. RESULTADOS COM O CRITÉRIO DE PLASTICIDADE HILL48

Analisando os resultados obtidos para o critério Hill48, começa-se por inferir sobre a evolução das espessuras na direção de laminagem, para vários valores de deslocamento de Punção de Expansão, que é possível observar na Figura 5.27.

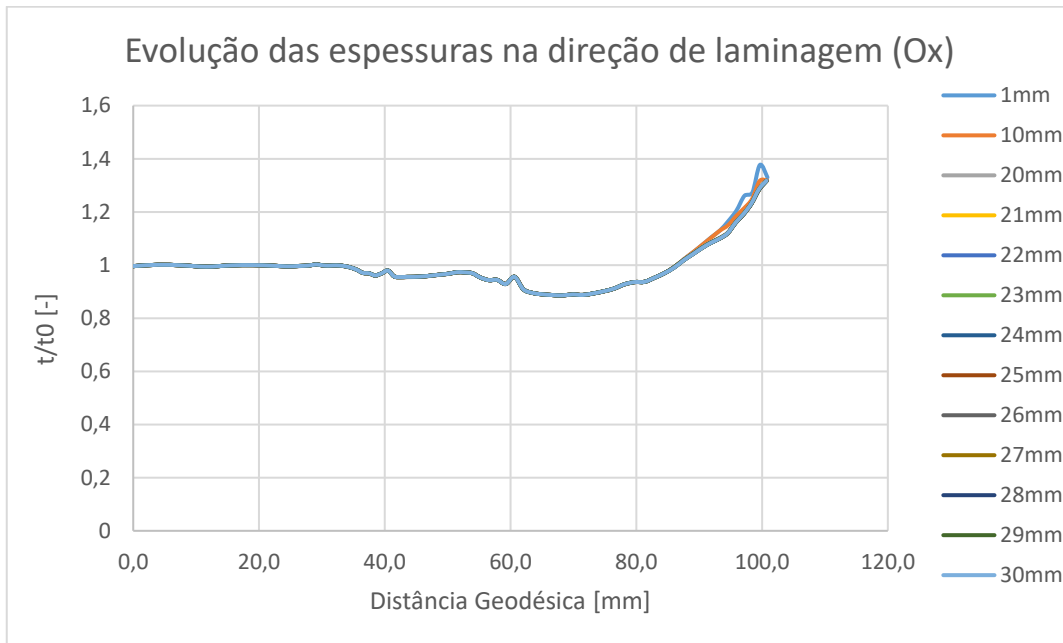


Figura 5.27 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção de laminagem, para vários deslocamentos de Punção, no critério Hill48.

A nível da direção de laminagem, não se observa localização de rotura e estrição, aquando da Expansão. Como se pode ainda observar, permanece a existência do aumento de espessura no topo da parede lateral do corpo deformável.

De seguida, passa-se à análise da evolução das espessuras do corpo deformável na direção transversa, ao longo de diversos deslocamentos de Punção de Expansão, na Figura 5.28.

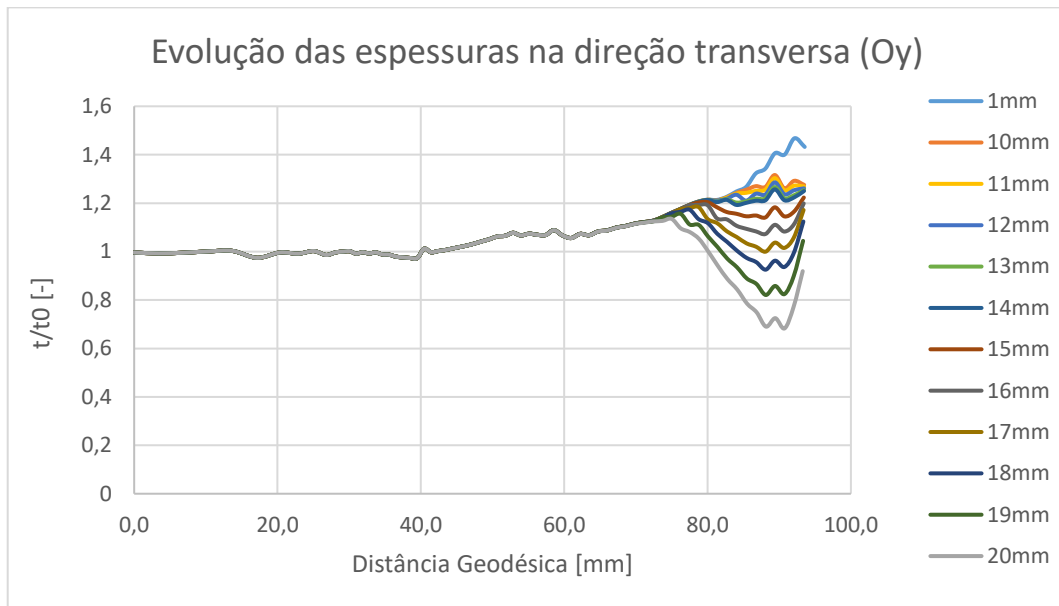


Figura 5.28 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção transversa, para vários deslocamentos de Punção, no critério Hill48.

Observando a figura acima apresentada, estima-se que se seja por volta dos 15mm de deslocamento do Punção de Expansão, que se começa a localizar a estricção no corpo deformável, na direção transversa. Teve-se em conta o valor de 17mm, uma vez que se começa a observar, a partir dos deslocamentos seguintes a este, uma tendência acentuada para diminuição de espessura do corpo deformável a uma distância geodésica entre os 90 e os 92mm.

5.3.3. RESULTADOS COM O CRITÉRIO DE PLASTICIDADE CB2001

Passando à análise dos resultados obtidos para o critério Hill48, começa-se novamente por interpretar a evolução das espessuras na direção de laminagem, para vários valores de deslocamento de Punção de Expansão

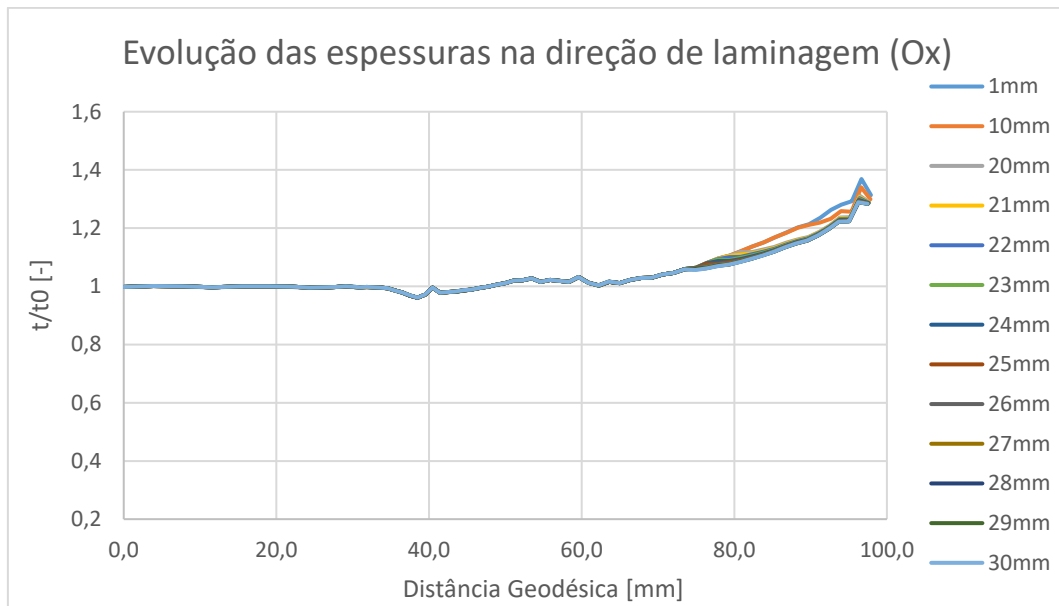


Figura 5.29 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção de laminagem, para vários deslocamentos de Punção, no critério CB2001.

Como se pode observar, na direção de laminagem não existe localização de rotura e estrição, aquando da Expansão, para os deslocamentos apresentados no gráfico acima. Ou seja, não é nesta direção que ocorre a estrição ou rotura do corpo deformável.

Passa-se então à análise da evolução das espessuras do corpo deformável ao longo da distância geodésica dos nós e com os diferentes deslocamentos do Punção de Expansão, possível de observar na seguinte Figura 5.30.

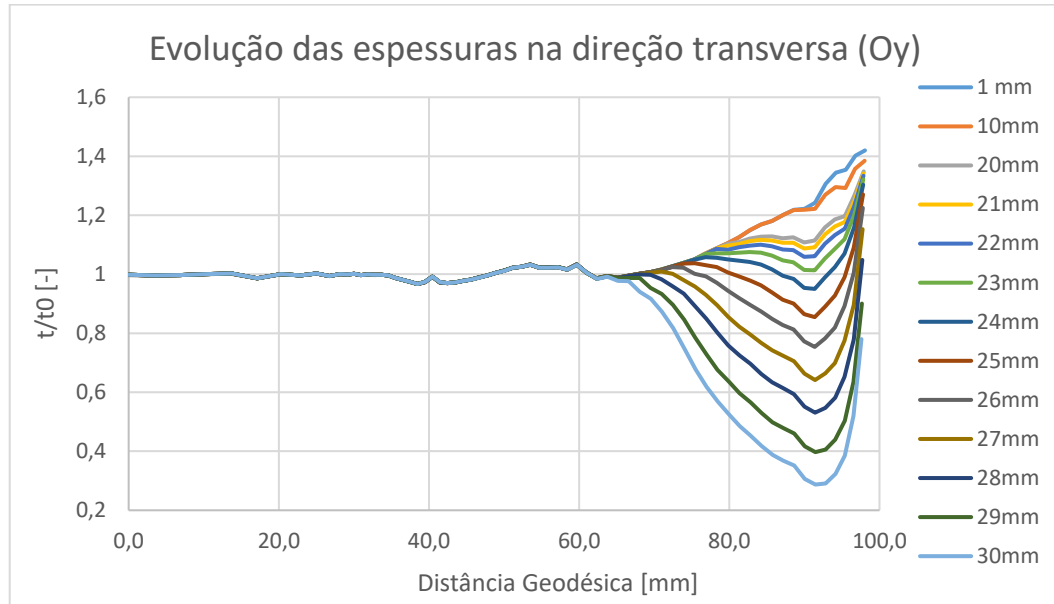


Figura 5.30 – Evolução da espessura do corpo deformável na direção transversa para vários deslocamentos de Punção, no critério CB2001.

Como se pode observar no gráfico acima apresentado, estima-se que se seja por volta dos 23mm de deslocamento do Punção de Expansão, que se começa a localizar a estricção no corpo deformável, na direção transversa. Tem-se em conta o valor de 25mm, uma vez que se começa a observar, a partir dos deslocamentos seguintes, uma tendência progressivamente mais acentuada para a diminuição de espessura do corpo deformável a uma distância geodésica entre os 90 e os 91mm, sendo prova do início da ocorrência de estricção.

5.3.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Comparando os resultados entre critérios de plasticidade estudados, começou-se por analisar a “orelha” no topo da parede do corpo deformável. A partir da Figura 5.31 é possível fazer uma análise visual comparativa entre os resultados obtidos para cada critério, no final da etapa de Embutidura.

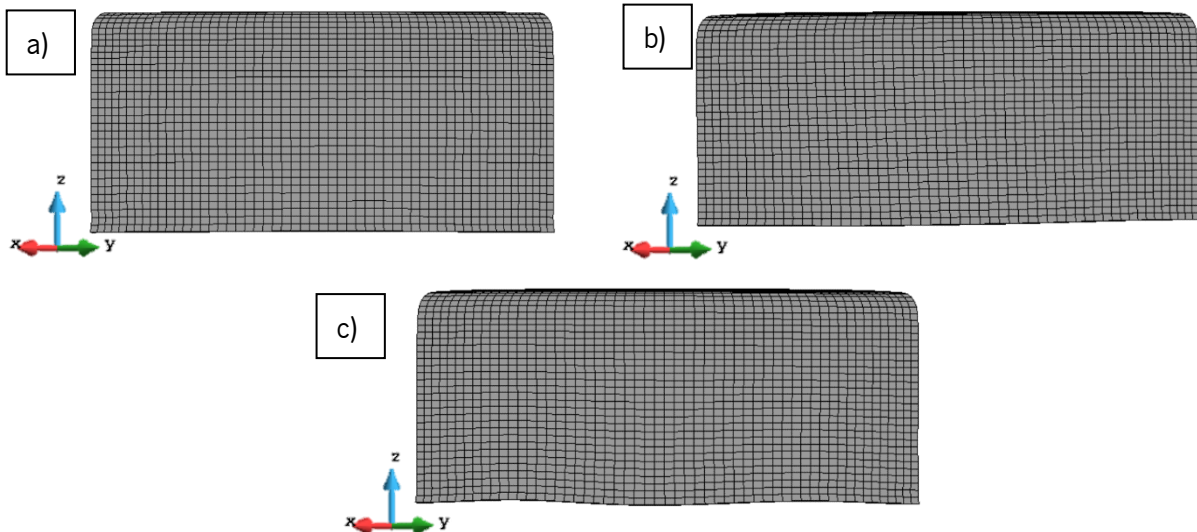


Figura 5.31 – Vista de frente da “orelha” do corpo deformável após Embutidura para o critério de plasticidade: a) Von Mises; b) Hill48; c) CB2001.

Após a simulação da etapa de Embutidura, a “orelha” não difere muito de critério para critério de plasticidade em termos de geometria, havendo ligeiras alterações de altura ao longo da direção circunferencial do corpo deformável. Para melhor perceber essas variações traçou-se um gráfico que relaciona a altura do corpo deformável com o ângulo em relação à direção de laminagem do mesmo. O respetivo gráfico pode-se observar na seguinte Figura 5.32.

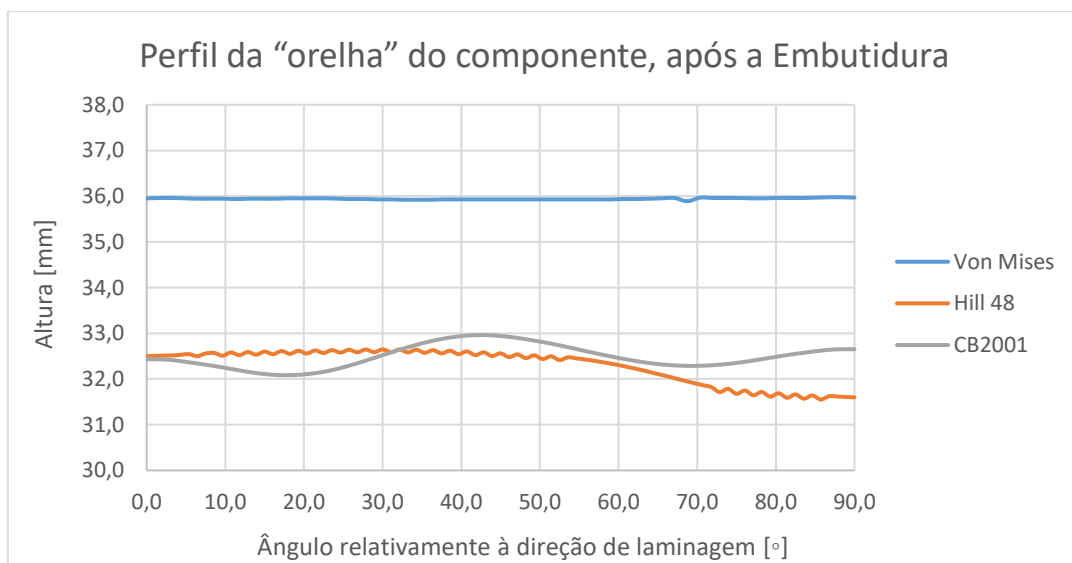


Figura 5.32 – Comparação da “orelha” do corpo deformável na etapa de Embutidura, para os diversos critérios de plasticidade estudados.

Como se pode observar no gráfico acima, no critério de Von Mises é onde se observa uma menor variação da “orelha” com o aumento do ângulo. Quanto aos critérios de Hill48 e CB2001, observa-se uma variação semelhante entre altura máxima e mínima de cerca de 1,0mm.

Quanto à Reembutidura, observando o resultado da simulação numérica obtiveram-se as seguintes “orelhas” do corpo deformável, observando de frente, na Figura 5.33.

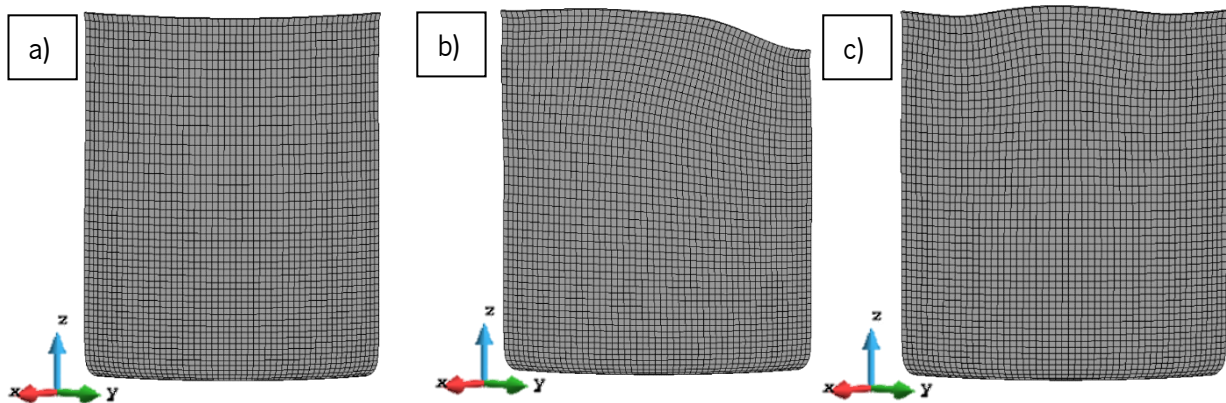


Figura 5.33 – Vista de frente da “orelha” do corpo deformável após Reembutidura para o critério de plasticidade: a) Von Mises; b)Hill48; c) CB2001.

Novamente, no caso do critério de plasticidade Von Mises observa-se uma aba regular em termos de altura, o que é expectável, uma vez que este critério é um caso particular do critério Hill48 em que se tem em conta que o material é isotrópico.

Ou seja, é expectável que a “orelha” seja aproximadamente semelhante em todas as direções, devido às propriedades isotrópicas consideradas neste caso.

Por sua vez para os casos dos critérios Hill48 e CB2001, o mesmo não se observa, havendo variações acentuadas de altura entre si e em relação ao critério de Von Mises, como é possível visualizar na Figura 5.34.

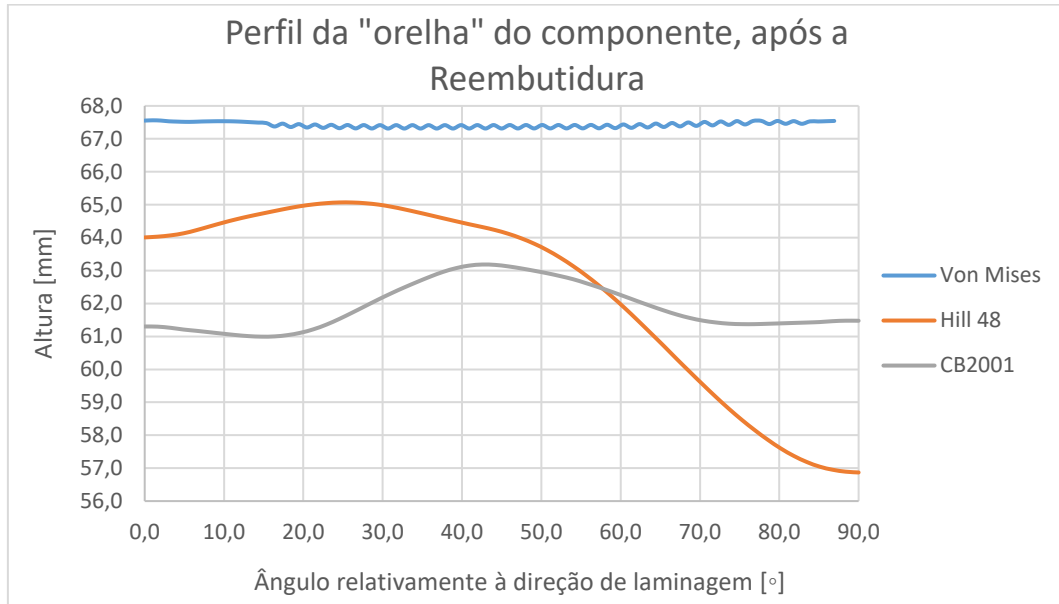


Figura 5.34 – Comparação da “orelha” do corpo deformável na etapa de Reembutidura, para os diversos critérios de plasticidade estudados.

As “orelhas” existentes no corpo deformável são sinal de anisotropia do material AA3104-H19, o que é expectável tendo em conta os parâmetros inseridos no ficheiro DD3_mater, para os critérios Hill48 e CB2001. Por sua vez, a orelha do critério Hill48 é a mais acentuada, divergindo aproximadamente 8mm entre a sua altura máxima e mínima, como é possível observar na figura acima. No caso em que se utilizou o critério de Von Mises, como o material se define como isotrópico, observa-se mais uma vez uma continuidade na aba em termos de altura, não existindo “orelha”.

Ademais à análise da “orelha”, efetuou-se ainda uma análise de forma a perceber como a escolha do critério de plasticidade influencia a previsão para a força que o Punção necessita exercer no corpo deformável na direção Oz, para embutir e reembutir o mesmo.

Começando pela Embutidura, retiraram-se os dados acerca da deslocação do Punção e respetiva força exercida na direção vertical, na direção Oz, obtendo-se a seguinte Figura 5.35.

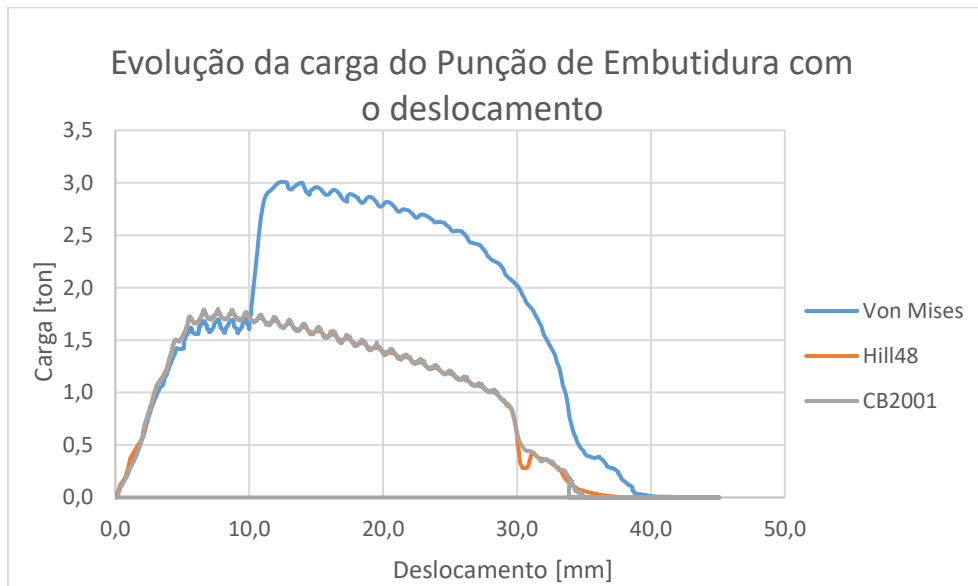


Figura 5.35 – Evolução da força do Punção com o deslocamento, para os diversos critérios de plasticidade, na etapa de Embutidura.

Inferindo sobre o gráfico acima apresentado, nos critérios de Hill48 e CB2001 os resultados encontram-se praticamente sobrepostos, enquanto que no critério de Von Mises se observam cargas consideravelmente superiores ao longo do deslocamento do Punção de Embutidura, atingindo o valor máximo de 3,01 toneladas aproximadamente aos 13mm de deslocamento. Ou seja, apesar de se manterem as mesmas condições em termos de simulação numérica, existe uma diferença acentuada se o material for considerado isotrópico ou anisotrópico.

Por sua vez, na etapa de Reembutidura, o Punção terá a seguinte evolução de força exercida em função do seu deslocamento, presente na Figura 5.36.

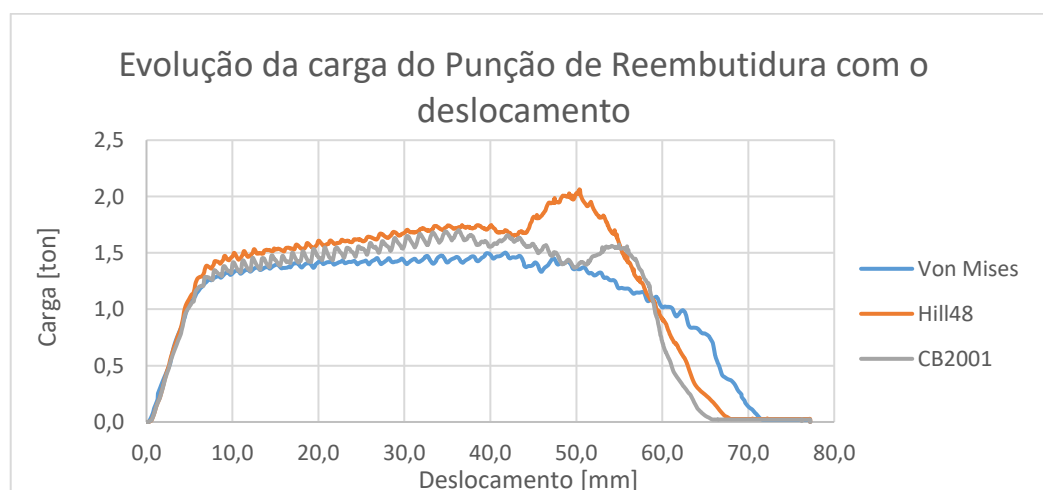


Figura 5.36 – Evolução da carga do Punção com o deslocamento para os diversos critérios de plasticidade, na etapa de Reembutidura.

Assim pode-se concluir que as forças evoluem de forma semelhante para os 3 critérios até o Punção de Reembutidura se deslocar aproximadamente 40mm. A partir desse ponto, as cargas divergem entre critérios, havendo um aumento mais acentuado no critério Hill48 até cerca das 2,03 toneladas. No final do deslocamento as forças voltam a ser semelhantes e quase nulas, uma vez que como se deu deslocamento em excesso ao Punção de Reembutidura, no final desta etapa, a referida ferramenta estará apenas a empurrar o corpo deformável, uma vez que o mesmo a partir de um dado deslocamento se encontra completamente embutido.

Passando à comparação da localização da estrição no corpo deformável, para os critérios de plasticidade Hill48 e CB2001, apresenta-se a seguinte Figura 5.37, de modo a apresentar os resultados de modo a serem de mais fácil percepção.

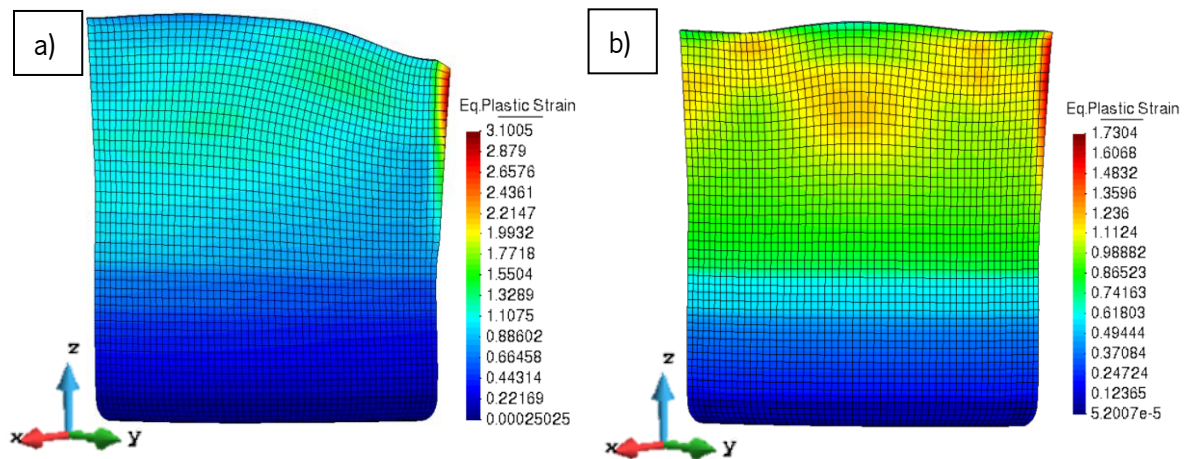


Figura 5.37 - Comparação das estrições e da sua localização, com a deformação plástica equivalente para: a) Hill48; b)CB2001.

6. ATUALIZAÇÃO DO *SOFTWARE* DD3IMP PARA SIMULAÇÕES MULTI-ETAPA

Como referido anteriormente, um dos principais objetivos da presente dissertação passa pela melhoria do *software* DD3IMP, tornando a sua utilização mais simples e fácil para novos utilizadores. Para isso foram analisados e simulados alguns casos de estudo, de modo a perceber as dificuldades que podem surgir do ponto de vista do utilizador, no manuseamento do *software*, para sugerir alterações e implementar as que assim se justifiquem.

Anteriormente à presente dissertação, o DD3IMP, em casos multi-etapa, antes de começar a correr a simulação apresentava uma pergunta cuja resposta seria 0 ou 1, presente na seguinte Figura 6.1.

```
>>> shift the FE mesh to this node INIT position (1/0)?  
( 1 - Yes / 0 - No )
```

Figura 6.1 – Questão inicial atual do DD3IMP, em casos multi-etapa.

A pergunta interpela o utilizador se quer que a malha de elementos finitos que representa o corpo deformável, se mova para a origem do referencial. No caso de a resposta ser 0, o corpo deformável permanece na posição e coordenadas em que estava no final da simulação da etapa anterior. No caso de a resposta ser 1, o corpo deformável move-se para a origem do referencial. Esta questão não é a solução perfeita para localizar a malha de elementos finitos no espaço, principalmente quando a mesma tem geometrias relativamente complexas. A incerteza da localização do corpo deformável no espaço, leva por sua vez à incerteza do utilizador quanto ao posicionamento inicial das ferramentas, sendo necessárias diversas iterações do posicionamento de cada ferramenta, até acertar o posicionamento ideal. Esta metodologia é trabalhosa e morosa, uma vez que o utilizador do *software* tem que por cada iteração ajustar no ficheiro DD3_phase o posicionamento das ferramentas, ler o ficheiro GID_ini e GID_ini.tool no *GID*, de modo a visualmente perceber o posicionamento relativo da malha de elementos finitos às ferramentas e correr a simulação novamente. Torna-se então imperativo encontrar uma solução alternativa à já existente, de modo a poder implementar definitivamente a conformação multi-etapa no DD3IMP, de uma forma simples e amigável para o utilizador.

Além do ponto de melhoria anteriormente mencionado, detetou-se um erro no ficheiro de *output* relativo às espessuras do corpo deformável no final da simulação, em que as espessuras em Oy, são na realidade as espessuras entre os nós que têm de coordenada y=0. Ou seja, na realidade são os resultados dos nós que se encontram sob o eixo Ox (direção de laminagem) e vice-versa para os dados das espessuras no eixo Ox.

O DD3IMP é um *software* que utiliza o método implícito para a convergência dos seus incrementos, fornecendo assim soluções bastante sólidas e exatas. Anteriormente a esta dissertação, este *software* não se encontrava devidamente testado para casos de conformação multi-etapa, sendo ainda relativamente desconhecidas as suas falhas ou dificuldades de manuseamento.

Em todos os casos de estudo apresentados, ocorreu uma dificuldade em comum, que foi o posicionamento das ferramentas, antes de cada simulação. O mesmo tem que ser feito manualmente e com o auxílio do *GiD*, de modo a perceber a que distância estão as ferramentas da superfície do corpo deformável, de modo a corretamente posicionar as ferramentas em relação ao mesmo. Além disso e de modo a estabilizar a simulação no primeiro incremento, deve-se dar uma pequena penetração da ferramenta no corpo deformável. Tal se sucede de modo a que haja estabilidade no contacto entre os nós da ferramenta e da respetiva superfície do corpo deformável, de modo a promover uma mais fácil convergência do primeiro incremento da simulação numérica. A penetração anteriormente referida é ela também difícil de definir ou quantificar enquanto utilizador, levando a diversas iterações de posicionamento de ferramentas e verificação da estabilidade para o 1º incremento e se o mesmo converge.

Com o intuito de implementar novas soluções de modo a otimizar o DD3IMP, apresentam-se várias soluções nesta secção do presente documento. De modo a o leitor melhor perceber as soluções, serão apresentadas representações esquemáticas do posicionamento das ferramentas e corpo deformável após cada fase da solução. É ainda relevante mencionar que as ferramentas devem penetrar ligeiramente na malha do corpo deformável, promovendo uma mais fácil convergência dos primeiros incrementos, criando assim maior estabilidade no arranque da simulação.

6.1. SOLUÇÃO #1 – FERRAMENTAS E CORPO DEFORMÁVEL ACERTAM AUTOMATICAMENTE A SUA POSIÇÃO

Com esta solução elimina-se a pergunta que era feita anteriormente “shift the FE mesh to this node INIT position (1/0)? (1 - Yes / 0 - No)”, pelo que a malha do corpo deformável se manterá nas coordenadas onde estaria na etapa anterior, ou onde a malha foi modelada.

Nesta solução, parte-se do princípio do processo que ocorre na realidade, em que o corpo deformável é posicionado inicialmente em relação a uma matriz ou um plano de trabalho da máquina e posteriormente se posicionam as restantes ferramentas em relação ao corpo deformável consoante o pretendido. No caso exemplo que se apresentará em paralelo à apresentação desta solução tem-se que

o set 1 da malha do corpo deformável é a face inferior, nós em que a coordenada z é menor, e o set 2 corresponde à face com os nós com a coordenada z maior.

Inicialmente, no cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, define-se a posição 0 das ferramentas e o set da malha do corpo deformável que cada ferramenta vai contactar, como se pode observar na seguinte Figura 6.2. Inicialmente, o posicionamento do corpo deformável (0) é dada pelo ficheiro que contém as informações sobre a malha do mesmo.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
          NPH= 2 NbTOOL= 3 NbBCID= 0
=====|=====|=====|=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0|      X      Y      Z <naming-----> BCID SET  lim-  lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1  -0.1   -0.1    0.0  T1_Matriz          1      1
2  -0.1   -0.1    0.1  T2_Cerra-Chapas  2      2
3  -0.1   -0.1    0.7  T3_Punção       2      2
=====+=====+=====+=====+=====+=====

```

Figura 6.2 – Definição da posição 0 das ferramentas no ficheiro DD3_phase, na Solução #1.

Definindo a posição 0 das ferramentas, por exemplo, pode-se ter a seguinte configuração inicial, apresentada na Figura 6.3.

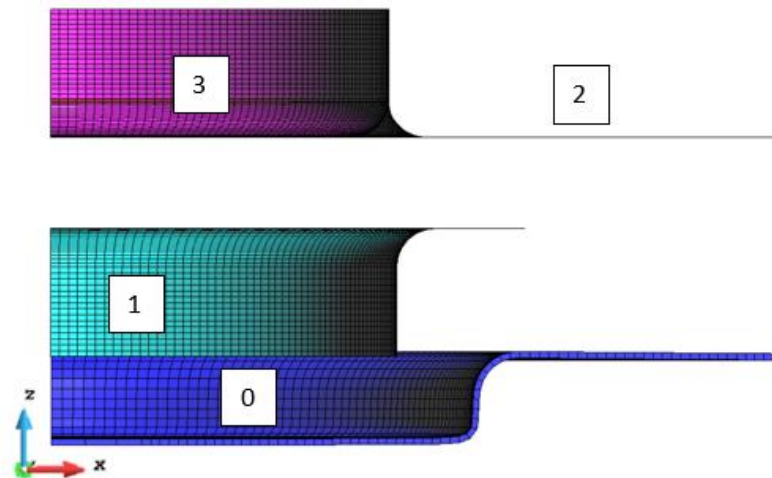


Figura 6.3 – Posição das ferramentas e do corpo deformável no instante 0: 0) Corpo deformável; 1) Matriz; 2) Cerra-Chapas; 3) Punção.

Neste tipo de casos pretende-se que certa ferramenta ou malha se desloque relativamente a um dado corpo com um dado número definido no ficheiro DD3_phase. Este deslocamento poderá ser efetuado na direção X, Y ou Z, sendo necessário também indicar em qual direção ou direções se quer que a ferramenta ou malha se desloque. A solução pensada passa por atribuir um novo tipo de *input* no cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, sendo esse input do tipo *shift to x* (stx), sendo x substituído pelo número do corpo deformável ou ferramenta para a qual queremos que a malha se desloque.

Aplicando o princípio anteriormente mencionado, posiciona-se agora o corpo deformável em direção a uma dada ferramenta, consoante o pretendido. A título de exemplo, pretende-se que a face inferior do corpo deformável (set 1) se desloque (*shift*) até à ferramenta 1. Na seguinte Figura 6.4, apresenta-se o *shift* do corpo deformável (0), para a ferramenta 1, que é designada no parâmetro de *input* st1, que significa *shift to 1*.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 2 NbTOOL= 3 NbBCID= 0
=====|=====|=====|=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
0| X Y Z <naming-----> BCID SET lim- lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+
1 -0.1 -0.1 0.0 T1_Matriz 1
2 -0.1 -0.1 0.1 T2_Cerra-Chapas 2
3 -0.1 -0.1 0.7 T3_Punção 2
0 -0.1 -0.1 st1
=====|=====|=====|=====

```

Figura 6.4 – Cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, com indicação para o set 1 do corpo deformável se deslocar até à ferramenta 1 na direção do eixo Oz.

Esta nova funcionalidade de poder dar *input* ao parâmetro stx (*shift to x*) deverá ser possível para cada ferramenta e malha definidas e para qualquer direção, seja ela X, Y ou Z, dependendo de qual coluna ou colunas se inserir um *input* do tipo stx, ou um valor numérico prescrito aos componentes individuais do vetor deslocamento a impor ao corpo deformável ou ferramenta. Isto é, deve ser possível o corpo deformável (0), poder movimentar-se em direção a qualquer ferramenta designada no cabeçalho 0 e vice-versa, sendo aplicável a qualquer uma das 3 direções possíveis (X, Y e Z). Na Figura 6.5, está presente a representação do que ocorre após ser inserido o st1 no ficheiro DD3_phase.

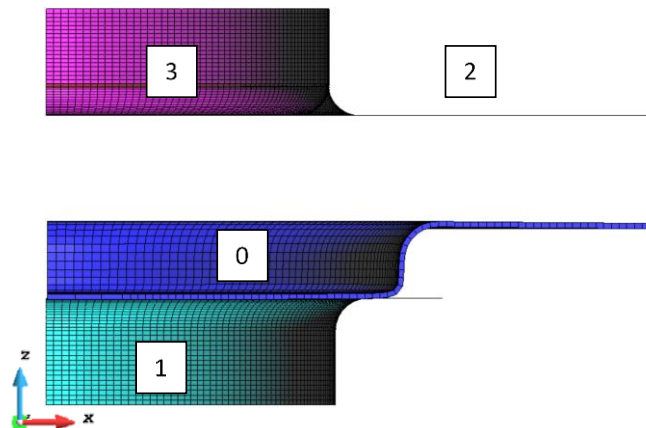


Figura 6.5 – Posição virtual das ferramentas e do corpo deformável após *input* de st1 do set 1 da malha do corpo deformável (0).

Em caso de não se querer este posicionamento, não se deve introduzir nenhum parâmetro *shift to x* (*stx*), ficando apenas a posição 0 definida para as ferramentas, dando assim sempre a liberdade ao utilizador de ser ele próprio a definir as coordenadas iniciais das ferramentas em vez do posicionamento “automático”, que se pretende com a presente solução de otimização.

Assim, adicionalmente ao parâmetro *stx* anteriormente referido, pode-se acrescentar mais 2 parâmetros, sendo eles o *st+* e *st-*. Ou seja, introduzindo esses parâmetros na coluna da direção ou direções pretendidas, poder-se-ia deslocar o corpo deformável ou ferramenta para o 0 do referencial na parte positiva, com *st+*, ou para o 0 pelo lado negativo do referencial, com *st-*. Na seguinte Figura 6.6, pode-se observar o que aconteceria ao corpo deformável (0), aplicando os parâmetros *st+* e *st-* na coluna da direção z do ficheiro DD3_phase.

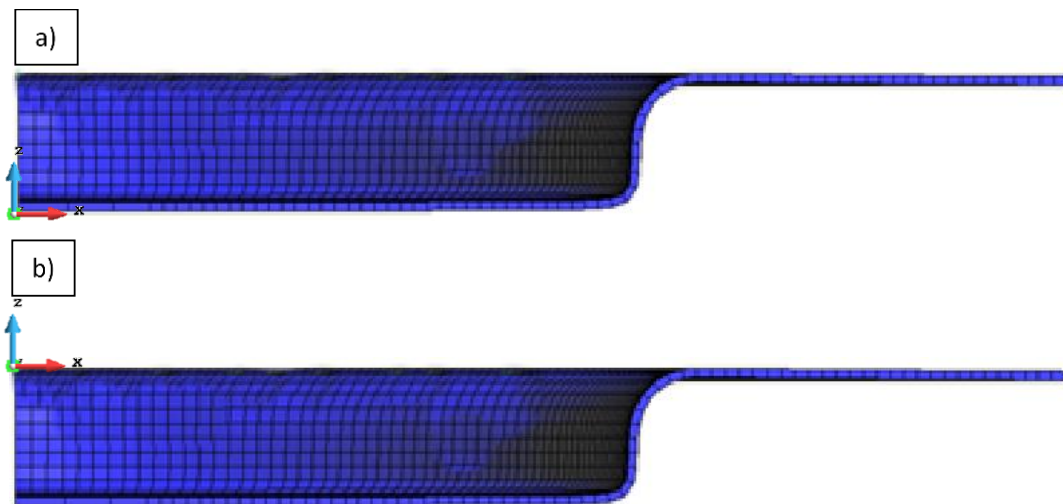


Figura 6.6 – Corpo deformável, após ser aplicado o parâmetro: a) *st+* na direção Z; b) *st-* na direção Z.

No caso exemplo apresentado, após o deslocamento do corpo deformável para a ferramenta 1, pretende-se agora que as demais ferramentas se posicionem corretamente em relação ao corpo deformável (0). Ou seja, as ferramentas 2 e 3 se desloquem em direção ao set 2 do corpo deformável (0), que é o que designa os nós e elementos que correspondem à face superior do mesmo.

Na Figura 6.7, observa-se um exemplo de como se pretende aplicar estes parâmetros no ficheiro DD3_phase. Assim, na coluna mais à esquerda, insere-se o número da entidade que se pretende deslocar, o parâmetro *stx* é inserido na coluna da direção em que se pretende o deslocamento da ferramenta em direção ao set de nós do corpo deformável com o número definido na coluna mais à direita, inicialmente.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
*****
MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 2 NbTOOL= 3 NbBCID= 0
=====!=====!=====!=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
 0|      X      Y      Z <naming-----> BCID SET  lim-  lim+
-----+-----+-----+-----+-----+-----+
 1|    -0.1    -0.1     0.0 T1_Matriz          1
 2|    -0.1    -0.1     0.1 T2_Cerra-Chapas  2
 3|    -0.1    -0.1     0.7 T3_Punção        2
 0|     0.0     0.0     st1
 2|     0.0     0.0     st0
 3|     0.0     0.0     st0
=====

```

Figura 6.7 – Cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, com os parâmetros de deslocamento das ferramentas 2 e 3 em direção ao *set* 2 do corpo deformável 0, em Z.

Na Figura 6.8, apresenta-se um exemplo da posição de todas as entidades após o *software* DD3IMP ler todas as informações do cabeçalho 0 do ficheiro de *input* DD3_phase, presente na anterior Figura 6.7.

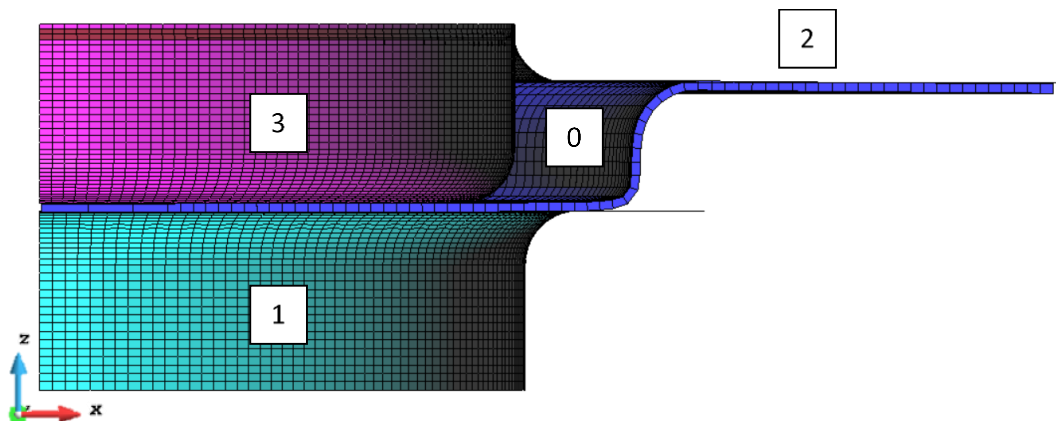


Figura 6.8 – Posição das ferramentas e do corpo deformável após os parâmetros inseridos no cabeçalho 0, do ficheiro DD3_phase.

6.2. SOLUÇÃO #2 – APENAS AS FERRAMENTAS CORRIGEM A SUA POSIÇÃO EM FUNÇÃO AO CORPO DEFORMÁVEL.

Nesta solução o corpo deformável permanecerá no local da etapa anterior, ou no 0 dos referenciais, consoante fizer mais sentido a nível de programação, eliminando assim a pergunta inicial, que existia anteriormente à otimização do *software*.

Assim, o corpo deformável (0), fixa a sua posição e as ferramentas é que se irão deslocar em função do corpo deformável, fazendo o *shift to 0* (st0), em função dos sets pretendidos e da direção ou direções que se pretende em X, Y e Z. O parâmetro st0 será inserido na coluna da direção em que pretendemos que a ferramenta se mova em relação ao corpo deformável (0).

Assim, inicialmente e tal como anteriormente, deve-se definir a posição 0 das ferramentas, no cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, presente na Figura 6.9.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021 *****
*****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 2 NbTOOL= 3 NbBCID= 0
=====!=====!=====!=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools-----iMAT-----
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
0|      X      Y      Z  <naming-----> BCID SET  lim-  lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1  -0.1    -0.1    0.0  T1_Matriz          1
2  -0.1    -0.1    0.1  T2_Cerra-Chapas    2
3  -0.1    -0.1    0.7  T3_Punção          2
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

```

Figura 6.9 – Cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, com o posicionamento 0 das ferramentas, para a solução #2.

Na Figura 6.10 apresenta-se a posição de todas as entidades após o *software* DD3IMP ler todas as informações do cabeçalho 0 do ficheiro de *input* DD3_phase.

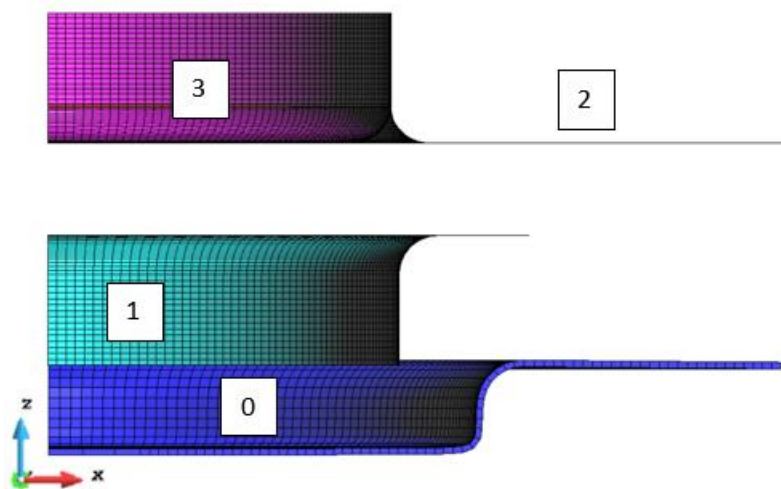


Figura 6.10 – Posição das ferramentas e do corpo deformável no instante 0 e o corpo deformável, na solução #2, em que: 0) Corpo deformável; 1) Matriz; 2) Cerra-Chapas; 3) Punção.

Assim, para posicionar as ferramentas automaticamente e corretamente, deve-se no cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase dar as instruções às ferramentas para se moverem em direção ao set que for pretendido da malha do corpo deformável. Isto é deve-se atribuir o parâmetro st0, na coluna com a direção pretendida (X,Y ou Z) e o número do set para o qual queremos mover a ferramenta, na coluna SET.

Um exemplo possível do que se pretende implementar no ficheiro DD3_phase é apresentado na Figura 6.11.

```

1400*****      < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 23.03.2021      *****
*****
                MANDATORY file to input phase data              *****
                NPH=      2  NbTOOL=      3  NbBCID=      0
=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----+-----iMAT-----
0|      X      Y      Z  <naming-----> BCID SET      lim-      lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
1      -0.1    -0.1    0.0  T1_Matriz      1
2      -0.1    -0.1    0.1  T2_Cerra-Chapas  2
3      -0.1    -0.1    0.7  T3_Punção      2
1      0.0      0.0      st0
2      0.0      0.0      st0
3      0.0      0.0      st0
=====

```

Figura 6.11 – Cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, com os parâmetros de deslocamento das ferramentas 1, 2 e 3 em direção ao corpo deformável (0), em Z.

Na seguinte Figura 6.12, pode-se observar o posicionamento das ferramentas em relação ao corpo deformável (0), após os parâmetros st0 serem inseridos no ficheiro DD3_phase e lidos pelo *solver* do DD3IMP.

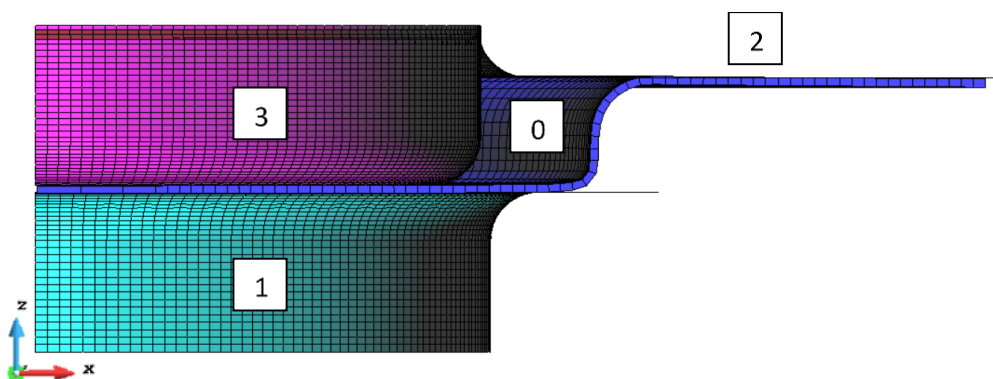


Figura 6.12 – Posição das ferramentas e do corpo deformável após ser inserido o parâmetro st0, no ficheiro DD3_phase.

6.3. AJUSTE DO ÂNGULO DE FERRAMENTAS

Acrescendo às duas soluções anteriormente apresentadas, sugere-se ainda a introdução da rotação de ferramentas, de modo a facilitar o processo de modelação dos mesmos e facilitar mais uma vez o seu posicionamento.

Assim, idealizou-se um novo parâmetro de *input* para esta nova funcionalidade, que consiste em *rx*, ou seja, *r* de *rotate* e *x* o número de graus que se quer rodar a peça, ou corpo deformável.

Na seguinte Figura 6.13, encontra-se exemplificada a aplicação do parâmetro *rx* na coluna da respetivo eixo que se pretende que a malha e os seus elementos e nós efetuem a rotação em torno do mesmo.

```

=====
|Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
 0|      X      Y      Z  <naming-----> BCID SET  lim-  lim+
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
 1  -0.1    -0.1    0.26  T2.1_Punção          2
 2  -0.1    -0.1    0.0   T2.2_Matriz          1
 3  -0.1    -0.1    0.40  T2.3_Cerra-Chapas   2
 1  -0.1    -0.1    r90
 3    r30    -0.1    0.40
=====

```

Figura 6.13 – Cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, com o parâmetro de rotação da ferramenta 1 de 90° em torno do eixo z e da ferramenta 3 de 30° em torno do eixo x.

Esta melhoria se implementada poderá, por exemplo, facilitar o estudo de ângulos ótimos na trefilagem, alterando o ângulo da ferramenta apenas com um parâmetro e não sendo necessário voltar a modelar a mesma. Pode ainda ser útil no estudo de processos de Quinagem, em que o retorno elástico do corpo deformável é acentuado e se pretende saber o ângulo ideal de correção a dar à ferramenta, evitando assim que se tenha que modelar diversas iterações de ferramentas, com diferentes ângulos até se compensar o retorno elástico.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. CONCLUSÕES

O objetivo proposto para a presente dissertação foi o estudo e documentação de casos de estudo de processos de conformação multi-etapa de chapa metálica. A par desse objetivo, houve ainda o objetivo de apresentar aspetos menos positivos do DD3IMP em casos de conformação multi-etapa e apresentar, por sua vez, possíveis soluções a implementar no código do *software* de modo a otimizar a sua utilização.

Assim, foram selecionados 3 casos de estudo relevantes para o tema da conformação multi-etapa, sendo o Caso de Estudo 1 - Embutidura Profunda em 5 etapas e o Caso de Estudo 2 - Conformação Multi-etapa e com Estiramento de Embutido Cilíndrico Profundo, retirados de exemplos teóricos do livro “Tecnologia da Embutidura” de A. Barata da Rocha e J. Ferreira Duarte. No ponto de partida enunciado pelos autores, apenas se sabem as dimensões e geometria que o corpo deformável deveria ter no fim de cada etapa prevista, sendo necessário desenvolver e modelar ferramentas para cada etapa, capazes de cumprir com as especificações pretendidas. Por sua vez, o Caso de Estudo 3 foi retirado do Benchmark #3 da conferência Numisheet 2020 e da autoria de Robert Dick, Jeong Whan Yoon e Yanshan Loud. No Caso de Estudo 3 o processo estava totalmente definido, sendo necessário apenas reproduzir e prever a localização e o momento em que ocorre a fratura no corpo deformável, recorrendo a 3 critérios de cedência distintos.

Em primeiro lugar, no Caso de Estudo 1 - Embutidura Profunda em 5 etapas efetuou-se a simulação de múltiplas embutiduras progressivamente mais profundas, de modo a prever se ocorre estricção no corpo deformável. No pós-processamento e na análise dos resultados obtidos inferiu-se acerca das tensões residuais e deformação no corpo deformável obtido no final da simulação numérica e da altura do embutido, onde o objetivo seria obter uma altura mínima de cerca de 60mm. Obteve-se assim uma altura mínima desde o fundo interior do corpo deformável até ao topo da face exterior de 58,8mm, correspondendo assim a um erro de 2%, podendo-se assim concluir que a altura final do embutido foi razoavelmente próxima do objetivo. No entanto, o objetivo não foi cumprido, apresentando-se como possível solução um aumento do diâmetro inicial do esboço, ou caso a espessura do corpo deformável não seja um problema, efetuar uma etapa de *ironing* no final do processo, de modo a aumentar a altura do embutido, sem ter que necessitar de gastar mais matéria-prima e assim não aumentar ao custo final do componente. Analisaram-se ainda a evolução da força exercida pelo Punção

ao longo das etapas, concluindo-se que será necessária uma prensa com a capacidade de exercer uma carga de pelo menos 2,06 toneladas, para o fabrico do componente do Caso de Estudo 1 - Embutidura Profunda em 5 etapas. Quanto à evolução das espessuras, observou-se que ao manter-se a folga entre o Punção e a Matriz de 1,2 vezes a espessura inicial do esboço, ocorreu o fenómeno de *ironing*, devido ao acumular de material na aba, que ocorre devido às progressivas embutiduras, aumentando a espessura nesta zona. Este facto é ainda comprovado pelo facto de na fase final do avanço do Punção nas diversas etapas, haver um aumento súbito da carga necessária exercer, quando a aba atravessava a zona entre o Punção e a Matriz onde ocorria *ironing*.

No Caso de Estudo 2 - Conformação Multi-etapa e com Estiramento de Embutido Cilíndrico Profundo, avaliou-se, na 7ª etapa do processo, os efeitos da utilização de um Contrapunção ou não e quais os efeitos dessa decisão. Sendo as diferenças mínimas a nível geométrico, a nível de tensão de cedência e deformação plástica, concluiu-se que o cenário ótimo seria a não utilização de um contrapunção, no sentido de o mesmo não ter um efeito assinalável na qualidade final da peça e ao mesmo tempo estar a induzir um custo extra ao processo. A nível dimensional, obtiveram-se margens de erro muito boas abaixo de 1%, exceto na altura final do embutido cilíndrico profundo, que é sensivelmente 10,65% abaixo do valor pretendido. Tentou-se ainda inserir uma etapa de calibração sem sucesso, levando à rotura na parede lateral do corpo deformável, uma vez que no final da 7ª etapa o fundo da parede lateral do embutido cilíndrico profundo já se encontra muito próximo da rotura, devido à sua reduzida espessura em relação à espessura inicial da chapa. Este facto leva a acreditar que o material selecionado pode não ser o mais indicado, ou as etapas do processo se encontram mal definidas, uma vez que as mesmas são definidas de forma teórica e sem uma base prática sólida. Relativamente à prensa a utilizar no processo, a mesma terá que ter uma carga máxima capaz de superar as 3,8 toneladas.

Por sua vez no Caso de Estudo 3 – Benchmark Numisheet#3 de 2020, Previsão de fratura após Embutidura, Reembutidura e Expansão, replicou-se o processo apresentado no Benchmark #3 da conferência Numisheet de 2020, com a alteração de que as etapas de Embutidura e Reembutidura aconteceriam em separado, ocorrendo retorno elástico do corpo deformável entre as referidas etapas. Posteriormente analisaram-se os resultados de modo a determinar o momento e a localização da rotura no conformado. Assim, e aplicando 3 critérios de cedência diversos (Von Mises, Hill48 e CB2001) na simulação das 3 etapas do processo (Embutidura, Reembutidura e Expansão), obtiveram-se diferentes respostas à pergunta inicial, como seria esperado. No caso do critério de Von Mises, não ocorre rotura, uma vez que este critério tem em conta que o material é isotrópico e assim o mesmo teria que romper

de forma igual ao longo de todo o corpo deformável. Na geometria da “orelha” do conformado e na sua altura observou-se uniformidade, tal como também seria expectável de um material isotrópico. Quanto ao critério Hill 48 observou-se que o conformado começa a localizar a estricção na direção transversa por volta dos 15mm de deslocamento do Punção de Expansão. Já no critério de CB2001, a estricção volta a localizar-se na direção transversa e por volta dos 23mm de deslocamento do Punção de Expansão. Em ambos os casos em que se aplicaram os critérios de Hill 48 e CB2001, observaram-se “orelhas” com geometrias irregulares, expectáveis tendo em conta a anisotropia do material AA3104-H19 e dos parâmetros de *input* atribuídos ao material do conformado. Relativamente à evolução da força exercida pelo Punção ao longo do seu deslocamento, na primeira etapa de Embutidura e nos critérios de Hill48 e CB2001 a mesma é idêntica, sendo bastante superior no caso em que foi usado o critério de Von Mises, sendo atingido o valor de carga máximo de 3 toneladas. Quanto à etapa de Reembutidura, a evolução das forças é sensivelmente semelhante, à exceção de um pico de força exercida no final do deslocamento do Punção no critério de Hill 48. Estes factos permitem concluir que a escolha do critério de plasticidade e dos parâmetros que definem um material numa simulação numérica, têm impacto nos resultados obtidos e deve-se procurar sempre pelo critério mais indicado para cada caso, de modo a representar o mais fidedignamente possível a realidade através da simulação numérica de processos de conformação de chapa. Ou seja, a escolha do critério de plasticidade tem relação direta com a qualidade final dos resultados obtidos através de simulação numérica, sendo muito importante ter sensibilidade para a escolha dos mesmos enquanto engenheiro.

Por fim, após os casos de estudo devidamente analisados, conclui-se acerca da utilização do DD3IMP na simulação dos mesmos. Este *software* apresenta elevada precisão nos resultados obtidos das suas simulações, mas no entanto, do ponto de vista de utilizador do DD3IMP em processos de conformação de chapa multi-etapa, a presente versão do *software* apresenta algumas lacunas e as mesmas foram identificadas. A principal lacuna identificada é relativa ao posicionamento do corpo deformável e ferramentas do processo, no início de cada etapa após a etapa inicial. Este tipo de lacunas retira muito tempo ao utilizador, sendo necessárias várias iterações para corretamente posicionar o corpo deformável e ferramentas. Para solucionar este problema, sugeriu-se a aplicação de novos parâmetros de *input* no cabeçalho 0 do ficheiro DD3_phase, apresentados em duas soluções distintas. Numa primeira solução, as ferramentas e corpo deformável podem-se mover entre si, enquanto que na segunda solução, apenas as ferramentas se movem em função do corpo deformável. As soluções apresentadas são alternativas muito sólidas ao funcionamento atual do DD3IMP, deixando assim ambas para consideração numa atualização futura, consoante a que for mais fácil e eficaz de aplicar no código.

Assim, estes parâmetros permitirão o posicionamento automático do corpo deformável e ferramentas, ao mesmo tempo que se mantém a possibilidade de manter o método anterior de posicionar com coordenadas, se o utilizador assim o desejar, para o problema que está a estudar. Afirma-se assim que a aplicação de qualquer uma das soluções apresentadas e a nova funcionalidade que introduzirão, permitirá um aumento significativo na versatilidade e facilidade de uso do *software*. Ao mesmo tempo, a análise detalhada dos 3 casos de estudo apresentados neste documento permitirá a futuros utilizadores do DD3IMP terem um ponto de partida e explicação do uso do *software*, para a simulação de processos de conformação multi-etapa de chapa metálica.

Em suma, e relativamente à análise dos diversos casos de estudo obtiveram-se resultados finais bastante satisfatórios, salvo algumas exceções, permitindo o aprofundar do conhecimento na área da Conformação multi-etapa de chapa metálica. Pode-se assim concluir que os objetivos do trabalho foram alcançados, encaminhando assim o *software* DD3IMP para sólidas e necessárias melhorias significativas, no futuro.

7.2. PERSPETIVAS E TRABALHOS FUTUROS

No fim de alguns dos processos de Conformação Multi-etapa, ocorrem operações de *triming* de modo a remover possíveis excessos de material no corpo deformável, ou simplesmente para remover o componente da banda, no caso da utilização de ferramentas progressivas, por exemplo. No ponto de vista de se obter uma simulação numérica mais completa no DD3IMP, seria interessante no futuro desenvolverem-se rotinas de *triming* no código do *software*, aprimorando assim toda a potencialidade do mesmo e conseguindo assim simular na totalidade as etapas de processos de conformação multi-etapa de chapa metálica.

Uma outra possível funcionalidade a adicionar ao código do DD3IMP numa oportunidade futura, passa por permitir a possibilidade de escalar a malha de elementos finitos que representa o corpo deformável, ou as ferramentas, em casos que o utilizador ao modelar as mesmas cometeu um erro dimensional, nomeadamente na atribuição de um diâmetro. Essa alteração seria vantajosa na medida em que com apenas a alteração de um parâmetro no ficheiro DD3_phase, ou no ficheiro com as informações da malha da respetiva ferramenta ou corpo deformável, o defeito seria solucionado, ao invés de ter de modelar essa mesma ferramenta ou malha de corpo deformável, novamente.

Assim, com o presente documento pretende-se que no futuro as melhorias sugeridas a nível de posicionamento das ferramentas, no capítulo 6 deste documento, sejam implementadas no código do *software* DD3IMP. Atualizar o DD3IMP trará inúmeras mais-valias ao utilizador, nomeadamente no posicionamento automático de ferramentas e corpo deformável no início da simulação de cada etapa, tornando mais intuitivo o *software* para todo o tipo de utilizadores, mesmo sendo eles experientes ou principiantes na utilização do mesmo.

ANEXOS

ANEXO A: CÁLCULO DOS PARÂMETROS PARA A LEI DE ENCRUAMENTO DE VOCE E PARA OS PARÂMETROS ANISOTRÓPICOS DO CRITÉRIO HILL48, PARA A AA6111.

De modo a descrever o comportamento do material aos esforços a que vai ser sujeito, é essencial conhecer a sua superfície de cedência. É então necessário estabelecer o critério de cedência que melhor descreve as referidas superfícies. Um critério de cedência associado a um dado material, por sua vez tem de estar associado a uma lei de encruamento, já que adjacente à deformação plástica imposta ao componente metálico, ocorre o encruamento no mesmo. Ou seja, com o encruamento a superfície de cedência do material é alterada, podendo aumentar a área de forma equivalente em todas as direções (encruamento isotrópico), ou podendo deslocar o centro dessa mesma superfície no espaço de tensões (encruamento cinemático). Na seguinte Figura A.1 apresenta-se uma representação esquemática de modo a se poder observar o efeito do encruamento cinemático e isotrópico na superfície de cedência inicial.

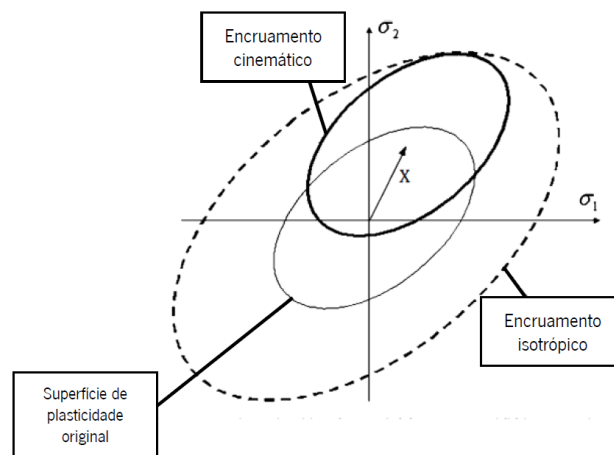


Figura A.1 – Alteração da superfície de cedência com o tipo de encruamento [42].

O fenómeno do encruamento pode ser descrito por leis de encruamento, como por exemplo, a lei de Hollomon, lei de Swift e lei de Voce.

Segundo evidências de estudos anteriores, a lei de Voce é a que melhor se aproxima o encruamento existente nas ligas de alumínio [43], sendo por isso a selecionada para descrever o material selecionado que é o AA6111. A lei de Voce é descrita pela seguinte Equação (A.1).

$$\sigma_t = Y_o + (Y_{sat} - Y_o) \times (1 - e^{-C_y \times \epsilon_t}), \quad (A.1)$$

Assim, para se obter a lei de Voce é necessária a definição de parâmetros como a tensão de cedência, Y_0 , a taxa de saturação, C_y e a tensão de saturação, Y_{sat} . Os referidos parâmetros, podem ser obtidos através da sobreposição da projeção gráfica da curva de tensão-deformação verdadeira com a lei de Voce. Os valores numéricos que melhor aproximam a lei de Voce à curva de tensão-deformação real são $Y_0 = 150,0MPa$, $C_y = 10,5$ e $Y_{sat} = 387,0MPa$. Por sua vez, a deformação real, ϵ_t , e a tensão real, σ_t , são fornecidas por dados experimentais existentes, podendo-se assim traçar a curva de tensão-deformação real. Na seguinte Figura A.2, pode-se comparar graficamente a lei de Voce com a curva de tensão-deformação real.

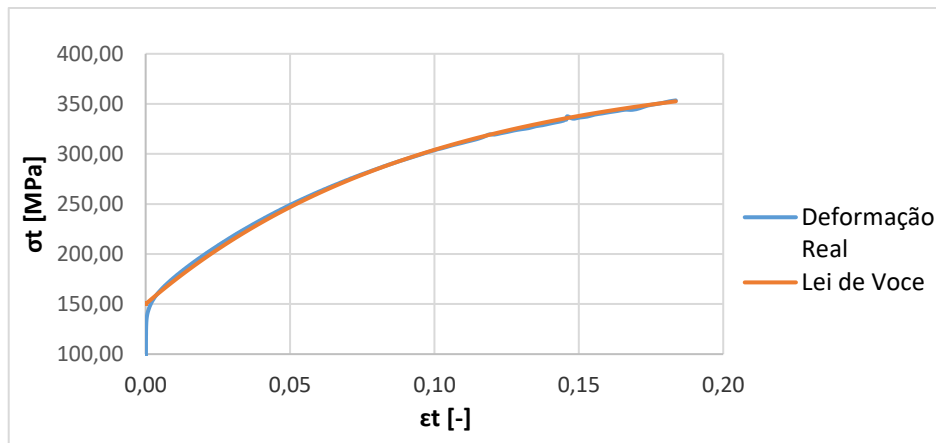


Figura A.2 – Comparação da lei de Voce com a curva de tensão-deformação real, na direção Longitudinal para AA6111.

Como se verifica a sobreposição das curvas apresentadas na figura acima, no domínio da deformação plástica do material, podem-se utilizar os parâmetros definidos para a Lei de Voce no ficheiro DD3_mater.

Tendo em conta esta característica, arbitrou-se que a utilização do critério de plasticidade anisotrópico Hill 48. O critério Hill 48, pode ser escrito da seguinte forma apresentada na Equação (A.2).

$$\phi = F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2(L\sigma_{yz}^2 + M\sigma_{xz}^2 + N\sigma_{xy}^2) = \sigma_Y^2, \quad (A.2)$$

Em que os que as variáveis F,G,H,L,M e N são constantes do material que podem ser determinadas recorrendo a dados experimentais. Estes parâmetros necessários para descrever a anisotropia, determinam-se a partir de ensaios de tração uniaxial a 0°, a 45° e a 90° em relação à direção de laminagem. Passando a apresentar as expressões para o cálculo dos referidos coeficientes:

$$F = \frac{H}{r_{90}}; \quad G = \frac{1}{r_0 + 1}; \quad H = r_0 \cdot G; \\ L = M = 1.5; \quad N = \frac{1}{2} \cdot \frac{(r_0 + r_{90}) \cdot (2r_{45} + 1)}{r_{90} \cdot (r_0 + 1)}, \quad (A.3)$$

Em que r_0 , r_{45} e r_{90} são os coeficientes de anisotropia de Lankford, que neste caso já são fornecidos pelos dados experimentais e que se passam a apresentar na seguinte Tabela A.1.

Tabela A.1 – Valores dos coeficientes de anisotropia r , para o AA6111.

Coefficiente	Valor obtido experimentalmente
r_0	0,616
r_{45}	0,646
r_{90}	0,778

Sabendo os valores de r_0 , r_{45} e r_{90} e utilizando as Equações (A.3), obtêm-se os seguintes valores para os coeficientes do critério de Hill48 presentes na Tabela A.2.

Tabela A.2 – Valores dos coeficientes do critério Hill48, para o AA6111.

Coefficiente	Valor do coeficiente
F	0,498996
G	0,61881
H	0,38119
L	1,5
M	1,5
N	1,27065

BIBLIOGRAFIA

- [1] TWI Ltd, “What is Computer Aided Engineering (CAE)?,” 2022. [Online]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-computer-aided-engineering>. [Acedido em 3 setembro 2022].
- [2] Siemens, “Computer-Aided Engineering (CAE),” 2022. [Online]. Available: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112>. [Acedido em 4 setembro 2022].
- [3] GiD, “GiD Simulation,” 2022. [Online]. Available: <https://www.GiDsimulation.com/>. [Acedido em 4 setembro 2022].
- [4] J. L. Alves, Simulação Numérica do Processo de Estampagem de Chapas Metálicas: Modelação Mecânica e Métodos Numéricos, Guimarães, 2003.
- [5] J. Cao e M. Banu, “Opportunities and Challenges in Metal Forming for Lightweighting: Review and Future Work,” *Journal of Manufacturing, Science and Engineering*, 2020.
- [6] S. P. C, “Multi directional forging and advanced deforming technique for severe plastic deformation,” em *Advanced Welding and Deforming*, Elsevier, 2021.
- [7] T. Graedel e B. Allenby, “Industrial ecology,” Englewood Cliffs, NJ, AT&T, Prentice Hall, 2003.
- [8] A. E. Tekkaya, “State-of-the-art of simulation of sheet metal forming,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, pp. 14-22, 2000.
- [9] J. Jeswiet e M. Hauschild, “EcoDesign and future environmental impacts,” *Materials and Design*, vol. 26, p. 629–634, 2005.
- [10] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, “Lightweight Materials for Cars and Trucks,” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks>. [Acedido em 5 maio 2022].
- [11] R. M. Ribeiro, “Análise Operacional de Roturas em Ferramentas de Estampagem Progressiva,” Porto, 2011.

- [12] R. Dwivedi e G. Agnihotri, "Study of Deep Drawing Process Parameters," *Materials Today: Proceedings 4*, pp. 820-826, 2017.
- [13] Roymech, "Bending /Forming/ Deep Drawing and Spinning," 2020. [Online]. Available: https://roymech.org/Useful_Tables/Manufacturing/Deep_Drawing.html. [Acedido em 2022 Setembro 7].
- [14] Springer-Verlag Berlin Heidelberg, "Metal Forming Handbook," Springer, 1998, p. 140.
- [15] J. Courbon, "Damage evolution in a compressive forming process: ironing of beverage cans," *Scripta Materialia*, vol. 48, pp. 1519-1524, 2003.
- [16] J. Dean, "Chapter 20 Metal Forming Part 2," Quia, [Online]. Available: <https://www.quia.com/jg/1961560list.html>. [Acedido em 7 setembro 2022].
- [17] Evans Tool & Die Metal Stamping, "Ironing (Metalworking)," [Online]. Available: <https://evanstd.com/ironing-metalworking/>. [Acedido em 7 setembro 2022].
- [18] Fit Tecnologia, "3 Tipos de Estampos Progressivo, Transfer e Tandem: Qual a diferença, como são e onde são usados?," 2021. [Online]. Available: <https://fit-tecnologia.com.br/tipos-estampos-progressivo-transfer-tandem/>. [Acedido em 5 setembro 2022].
- [19] B. Reed, "Progressive Die VS. Transfer Die Stamping," 24 maio 2017. [Online]. Available: <https://www.fairlawntool.com/blog/progressive-die-vs-transfer-die-stamping/>. [Acedido em 5 setembro 2022].
- [20] C. S. Gomes, "Concepção Optimizada de Ferramentas Progressivas," 2012.
- [21] Dongguan Xinhongyuan Metal Products, "The direction of progressive die stamping in the future," HT Metal Stampings, 2016. [Online]. Available: <https://www.htmetalstampings.com/the-direction-of-progressive-die-stamping-in-the-future-a-85.html>. [Acedido em 20 setembro 2022].
- [22] I. Suchy, Handbook of Die Design, McGraw-Hill, 2006.
- [23] D. A. Smith, Die Design Handbook, SME, 1990.
- [24] Atlantic Precision Spring, Inc., "Long Run Metal Stamping," [Online]. Available: <https://www.aps-ct.com/capabilities/long-run/>. [Acedido em 6 setembro 2022].
- [25] A. B. Rocha e J. F. Duarte, Tecnologia da Embutidura, Porto: Associação Portuguesa das Tecnologias de COnformação Plástica, 1992.

- [26] Peterson Enterprises, “Transfer Die Stamping,” 2022. [Online]. Available: <https://www.petersonenterprises.com/processesproducts/metal-stamping/transfer-die-stamping>. [Acedido em 5 setembro 2022].
- [27] A. Melocchi, “Transfer dies vs progressive dies: differences and advantages,” Minifaber, 9 setembro 2022. [Online]. Available: <https://www.minifaber.com/blog/transfer-dies-vs-progressive-dies-differences-and-advantages>. [Acedido em 2022 setembro 24].
- [28] Bosch Rexroth, “Tandem press line,” [Online]. Available: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/industries/machinery-applications-and-engineering/machine-tools-forming-and-separating/applications/automation/tandem-press-line/tandem-press-line>. [Acedido em 5 setembro 2022].
- [29] Burkamer Kalıp Makina Mühendislik San. Tic. Ltd., “Tandem & Progressive & Transfer Dies & Design,” 2017. [Online]. Available: <https://www.protses.com.tr/en/?p=61>. [Acedido em 23 setembro 2022].
- [30] JIER North America, “High Speed Tandem Press Line,” 2022. [Online]. Available: https://www.jier-na.com/products/metal-forming-machinery/High-Speed-Tandem-Press-Line_AE5.html. [Acedido em 24 Setembro 2022].
- [31] Shieh Yih Machinery Industry, “Tandem Press Line,” 2022. [Online]. Available: https://www.seyi.com/applications_tandem-press-line.htm. [Acedido em 5 Setembro 2022].
- [32] E. Glorieux, Multi-Robot Motion Planning Optimisation for Handling Sheet Metal Parts, Trollhättan, Sweden: University West, 2017.
- [33] A. E. Tekkaya e C. Soyarslan, “Finite Element Method,” 1 Janeiro 2019. [Online]. Available: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-642-20617-7_16699. [Acedido em 25 Setembro 2022].
- [34] A. Harish, “Implicit vs Explicit Finite Element Method (FEM): What Is the Difference?,” SIMSCALE, 29 Novembro 2020. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/blog/implicit-vs-explicit-fem/>. [Acedido em 28 Setembro 2022].
- [35] “TMS Aspires: The Society's Strategic Plan,” The Minerals, Metals & Materials Society, [Online]. Available: https://www.tms.org/portal/ABOUT/About_TMS/Strategic_Goals/portal/About/About_TMS/Strategic_Goals.aspx?hkey=f7da061f-b0ce-4d85-9f2f-d6f5ef8f785b. [Acedido em 20 março 2022].

- [36] M. Kawka, T. Kakita e A. Makinouchi, "Simulation of multi-step sheet metal forming processes by a static explicit FEM code," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 80-81, 1998.
- [37] A. Walker, "Why For Many Using a Correct Material Card is Still a Lottery!?!," *Forming World*, 9 Março 2021. [Online]. Available: <https://formingworld.com/material-cards-selection-digital-engineering/>. [Acedido em 28 Abril 2022].
- [38] C. Chiriac, "Experimental Study of Edge Stretching Limits of DP980IBF Steel in Multistage," *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2015.
- [39] T. J. Grilo, "Estudo de modelos constitutivos anisotrópicos para chapas metálicas," 2011. [Online]. Available: <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/7137/1/5360.pdf>. [Acedido em 2 julho 2022].
- [40] "Drink Can," Wikipedia, Novembro 2020. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Drink_can#Fabrication_process. [Acedido em 2 junho 2022].
- [41] R. Dick, J. W. Yoon e Y. Lou, "Benchmark 3 – Failure Prediction after Cup Drawing, Reverse Redrawing and Expansion," em *Numisheet 2020*, Ontario, 2020.
- [42] M. M. Fernandes, Simulação numérica do processo de fabrico de latas de liga de alumínio AA3104-H19: previsão da conformabilidade e determinação do risco de rotura, Guimarães, 2021.
- [43] M. Jain, D. J. Lloyd e S. R. Macewen, "Hardening laws, surface roughness and biaxial tensile limit strains of sheet aluminium alloys," Alcan International Limited, Ontario, Canada, 1995.