



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Frederico Pinheiro Antunes

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo.



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Frederico Pinheiro Antunes

**Analysis of the ESAFORM 2021
benchmark, deep drawing of an
axisymmetric cup: cross validation of
numerical and experimental results,
constitutive modelling of the aluminum
alloy and process parameters.**

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 Alves,

Por todos os ensinamentos e sabedoria que me passou durante todo este processo. Um grande obrigado pela sua paciência, disponibilidade e orientação.

Aos meus pais e irmã,

Pelo apoio incondicional, paciência e forte presença em todas as etapas do meu percurso, tanto académico como pessoal. Obrigado por me ensinarem o valor do respeito, do esforço e da resiliência.

De certa forma, este trabalho é também vosso.

A todos os meus amigos,

Por me terem acompanhado nesta jornada, sempre com um incontestável companheirismo e espírito de entreajuda, tanto dentro como fora da academia. Sem vocês não teria chegado aqui.

"It's not about the size of the dog in the fight, it's about the size of the fight in the dog."

- S.D.

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.

Universidade do Minho, 31 de outubro de 2024

RESUMO

O *benchmark* “*EXACT - Experiment and Analysis of Aluminum Cup Drawing Test*”, proposto pela associação ESAFORM, é o ponto de partida deste trabalho. As conferências anuais desta associação têm como principal objetivo estimular a pesquisa aplicada ao campo da conformação de materiais, disseminando informação científica e tecnológica relacionada à mesma dentro do ambiente acadêmico e industrial. Na presente dissertação é estudado o *benchmark* de 2021, explorando o processo de embutidura de uma liga de alumínio AA6016-T4 através da utilização de simulação numérica, recorrendo a ferramentas de CAE.

Inicialmente, é realizada uma breve apresentação do *benchmark* em estudo, expondo ao leitor o processo e as suas variáveis, assim como a informação experimental inserida no *benchmark* considerada para o presente trabalho.

Seguidamente é realizada a apresentação de alguns dos fundamentos teóricos da modelação constitutiva do material, nomeadamente os critérios de plasticidade isotrópicos e anisotrópicos relevantes, assim como as leis de encruamento consideradas, sucedendo-se a identificação dos parâmetros constitutivos do material para modelos anisotrópicos. É ainda abordada a modelação 3D de elementos finitos do problema utilizando o *software* GiD como pré-processador, assim como a edição dos ficheiros do *solver* DD3Imp, permitindo a definição das condições de fronteira do processo, assim como outros aspetos. Por fim, utiliza-se novamente o GiD para o pós-processamento.

Posteriormente, são apresentados os resultados das simulações realizadas considerando modelações isotrópicas e anisotrópicas do processo, respetivamente. Com base nestas, através da análise das curvas de força-deslocamento do punção e dos perfis de altura e espessura do embutido final, é possível compreender a influência tanto do modelo como do coeficiente de atrito utilizado no resultado.

Nesta dissertação conclui-se que para a isotropia os diferentes materiais isotrópicos têm uma grande influência no resultado obtido e, no caso dos critérios anisotrópicos, tornou-se evidente que o critério CPB06, para o material estudado, permite uma caracterização utilizando apenas três ensaios de tração uniaxial experimentais, obtendo através desta resultados mais aproximados aos desejados.

PALAVRAS-CHAVE

AA6016-T4; Conformação; Critérios de cedência; DD3Imp; Embutidura

ABSTRACT

The *benchmark* “EXACT - Experiment and Analysis of Aluminum Cup Drawing Test”, proposed by the ESAFORM association, is the starting point for this work. The main aim of this association's annual conferences is to stimulate applied research in the field of material forming, disseminating scientific and technological information related to it within the academic and industrial environment. In this dissertation, the 2021 *benchmark* is studied, exploring the process of deep drawing an AA6016-T4 aluminum alloy through the use of numerical simulation, utilizing CAE tools.

Initially, a brief presentation of the *benchmark* under study is given, exposing the reader to the process and its variables, as well as the experimental information included in the *benchmark* considered for this work.

This is followed by a presentation of some of the theoretical foundations of the material's constitutive modeling, namely the relevant isotropic and anisotropic plasticity yield criteria, as well as the hardening laws considered, followed by the identification of the material's constitutive parameters for anisotropic models. The 3D finite element modeling of the problem using GiD software as a preprocessor is also covered, as well as the alteration of the DD3Imp files, which acts as the solver, allowing the definition of the process's boundary conditions, as well as other aspects. Finally, GiD is used again for post-processing

Afterwards, the results of the simulations carried out considering isotropic and anisotropic modeling of the process, respectively, are presented. Based on these, by analyzing the force-displacement curves of the punch and the height and thickness profiles of the final inlay, it is possible to understand the influence of both the model and the friction coefficient used on the results of the final drawn part.

This dissertation concludes that when considering isotropy, the different isotropic materials have a great influence on the results and, in the case of the anisotropic criteria, it has become clear that the CPB06 criterion, for the material studied, allows characterization using only three experimental uniaxial tensile tests, obtaining results that are closer to those desired when compared with information from seven experimental uniaxial tensile tests.

KEYWORDS

AA6016-T4; DD3Imp; Deep Drawing; Sheet forming; Yield criteria.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas	xv
Notações e Convenções.....	xvii
Lista de Símbolos	xix
1. Introdução	1
1.1. Contexto.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Softwares Utilizados.....	3
1.4. Guia de leitura	5
2. O <i>Benchmark</i>	7
2.1. <i>Benchmark</i> EXACT.....	7
2.2. Material Utilizado	8
3. Modelação constitutiva	17
3.1. Critérios de plasticidade.....	17
3.1.1. Critérios Isotrópicos.....	18
3.1.1.1. Critério de Tresca	18
3.1.1.2. Critério de Von Mises.....	19
3.1.1.3. Critério de Drucker	20
3.1.1.4. Critério de Hosford	21
3.1.1.5. Critério Generalizado de Karafillis e Boyce.....	22
3.1.1.6. Critério CPB06	24
3.1.2. Critérios Anisotrópicos	26

3.1.2.1.	Critério Hill'48	26
3.1.2.2.	Critério Yld91	27
3.1.2.3.	Critério de Karafillis e Boyce	27
3.1.2.4.	Critério CB2001	28
3.1.2.5.	Extensão do critério CPB06 para inclusão da anisotropia.....	29
3.2.	Leis de Encruamento	30
3.3.	Identificação dos parâmetros constitutivos.....	32
3.3.1.	Hill48.....	33
3.3.2.	CB2001	35
3.3.3.	CPB06	39
4.	Modelo numérico	44
4.1.	Esboço	44
4.2.	Ferramentas	47
4.3.	Ficheiros de input DD3Imp.....	52
4.4.	Ficheiros de output DD3Imp	58
5.	Resultados para materiais isotrópicos.....	61
5.1.	Simulações utilizando modelos isotrópicos	62
5.2.	Discussão sobre o coeficiente de atrito.....	65
6.	Resultados para materiais anisotrópicos	69
6.1.	Simulações utilizando modelos anisotrópicos	69
6.1.1.	Hill48.....	70
6.1.2.	CPB06	72
6.1.3.	CB2001	75
6.2.	Discussão sobre o coeficiente de atrito.....	77
6.2.1.	Hill48.....	78
6.2.2.	CPB06	80
6.2.3.	CB2001	83
7.	Considerações finais	84

Bibliografia	86
--------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Representação esquemática de um processo de embutidura convencional - adaptado de (Gürün & Karaağaç, 2015)	2
Figura 2.1 - Representação esquemática do processo de teste do copo cilíndrico e dimensões das ferramentas – retirado de (Habraken et al., 2022)	8
Figura 2.2 - Esquema ilustrativo do processo de laminagem e das respetivas direções de laminagem e transversa – adaptado de (Güner, 2016)	10
Figura 2.3 - Geometria dos provetes utilizados para ensaios de tração uniaxiais com as dimensões (a) utilizadas nos ensaios UA (2020) para as direções de 15°, 30°, 60° e 75° devido a restrições de disponibilidade do material e (b) utilizadas nos restantes ensaios.	11
Figura 2.4 – Geometria dos provetes utilizados para ensaios de tração biaxiais em formato (a) crucifixo e (b) tubular. Dimensões em mm. As setas representam a direção de laminagem – retirado de (Habraken et al., 2022)	12
Figura 2.5 – Contorno do trabalho plástico a diferentes níveis de $\varepsilon_0 p$ formado por pontos de tensão - retirado de (Habraken et al., 2022)	12
Figura 2.6 - Direção da "plastic strain rate" a diferentes níveis de $\varepsilon_0 p$ - retirado de (Habraken et al., 2022)	12
Figura 2.7 - Geometria dos provetes utilizados para ensaios de corte simples com as dimensões (a) utilizadas nos ensaios da UA e (b) utilizadas nos ensaios da ULiege. Ambos possuem uma espessura de 1 mm.	13
Figura 2.8 - Curvas de tensão de corte obtidas utilizando os dados (a) da ULiege e (b) da UA - retirado de (Habraken et al., 2022)	13
Figura 2.9 - Comparação entre as curvas utilizando as leis de Swift e Voce com os dados experimentais obtidos na direção RD utilizando para a lei de Swift a expressão $Y = C\varepsilon_0 + \varepsilon p n$ e para a lei de Voce a expressão $Y = Y_0 + Y_{sat} - Y_0 \cdot 1 - e - CY \cdot \varepsilon p$	14
Figura 2.10 - Excerto do ficheiro expdata.dat, utilizado para a inserção dos dados necessários para a caracterização da anisotropia do material.....	16
Figura 3.1 - Superfície de plasticidade obtida através do critério de Tresca	19
Figura 3.2 - Superfície de plasticidade obtida através do critério de Von Mises – adaptado de (Prabowo et al., 2022)	20

Figura 3.3 - Superfície de plasticidade obtida através do critério de Drucker com: (a) $c = +2,25$ (linha vermelha), Von Mises (linha preta) e Tresca (linha verde); (b) $c = -278$ (linha tracejada vermelha) e Von Mises (linha preta) – retirado de (Alves, 2017)	21
Figura 3.4 - Representação do critério de Von Mises e fronteiras superior e inferior no plano π - retirado de (Karafillis & Boyce, 1993).....	22
Figura 3.5 - Representação geométrica de diferentes superfícies de plasticidade isotrópica no espaço (σ_1, σ_2) , entre a fronteira inferior (Tresca) e Von Mises – retirado de (Karafillis & Boyce, 1993)	23
Figura 3.6 - Representação geométrica de diferentes superfícies de plasticidade isotrópica no espaço (σ_1, σ_2) , entre Von Mises e a fronteira superior – retirado de (Karafillis & Boyce, 1993)	23
Figura 3.7 - Representação geométrica de diferentes superfícies de plasticidade isotrópica no espaço (σ_1, σ_2) , obtidas pelo critério de plasticidade isotrópico generalizado de Karafillis e Boyce, com $k=15$ e fazendo variar o parâmetro c entre 0 e 1 na equação (3.17) - retirado de (Karafillis & Boyce, 1993).....	24
Figura 3.8 – Representação no plano desviador do critério CPB06 para: (a) $k = 1$; e (b) $k = -1$ em comparação com o critério de Von Mises - retirado de (Alves, 2017).....	25
Figura 3.9 – Superfície inicial de plasticidade (elipses a cheio) com subsequente encruamento (a) isotrópico e (b) cinemático (elipses a traço interrompido)	31
Figura 3.10 – Curvas utilizadas para a obtenção dos valores virtuais utilizados nas caracterizações virtuais de (a) coeficientes de anisotropia e (b) tensões	33
Figura 3.11 – Caracterização utilizando o modelo Hill48	34
Figura 3.12 – Caracterização real utilizando o modelo CB2001 quando todos os fatores de ponderação têm o valor unitário.....	35
Figura 3.13 - Caracterização real utilizando o modelo CB2001 após ajuste dos fatores de ponderação	36
Figura 3.14 - Caracterização virtual utilizando o modelo CB2001 quando todos os fatores de ponderação têm o valor unitário.....	37
Figura 3.15 - Caracterização virtual utilizando o modelo CB2001 após ajuste dos fatores de ponderação	38
Figura 3.16 - Caracterização real utilizando o modelo CPB06 quando todos os fatores de ponderação têm o valor de 1	39

Figura 3.17 - Caracterização real utilizando o modelo CPB06 após ajuste dos fatores de ponderação	40
Figura 3.18 - Caracterização virtual utilizando o modelo CPB06 quando todos os fatores de ponderação têm o valor de 1	41
Figura 3.19 - Caracterização virtual utilizando o modelo CPB06 após ajuste dos fatores de ponderação	42
Figura 4.1 – Geometria dos esboços criados (a) sem a adição do <i>stopper</i> e (b) após a adição do <i>stopper</i>	45
Figura 4.2 - Constituição de um elemento Hex8	45
Figura 4.3 – Evolução da espessura do embutido ao longo de um (a) perfil na secção OX e (b) perfil na secção OY nas diversas malhas estudadas	46
Figura 4.4 – Comparação do perfil de alturas obtido com as diversas malhas estudadas	47
Figura 4.5 - Comparação do perfil de alturas obtido, com a omissão de algumas das malhas estudadas	47
Figura 4.6 - (a) Criação da linhas de união entre os pontos (0,0,0) e (24,0,0); (b) Utilização da ferramenta “Arc” para a criação dos raios de concordância.....	48
Figura 4.7 - (a) Preenchimento adequado da ferramenta "Copy" para a criação da ferramenta; (b) Geometria final do Punção.....	49
Figura 4.8 - Geometria do punção com as normais no sentido correto	49
Figura 4.9 - (a) Identificação do número de divisões por linha; (b) Malha gerada para o punção	50
Figura 4.10 - Posicionamento final do conjunto de ferramentas (a laranja, vermelho e cor-de-rosa) e esboço (a cinzento) em pós-processamento	51
Figura 4.11 - Excerto do ficheiro <i>DD3_bcon.dat</i> utilizado na definição do problema, destacando os parâmetros alterados.....	53
Figura 4.12 - Excerto do ficheiro <i>DD3_contact.dat</i> utilizado na definição do problema, destacando os parâmetros alterados	54
Figura 4.13 - Excerto do ficheiro <i>DD3_input.dat</i> utilizado na definição do problema, destacando os parâmetros alterados.....	55
Figura 4.14 - Excerto do ficheiro <i>DD3_mater0.dat</i> utilizado na definição do problema utilizando a lei de Voce e o modelo constitutivo de Von Mises, destacando os parâmetros alterados	56

Figura 4.15 - Excerto do ficheiro <i>DD3_phase.dat</i> utilizado na definição do problema, destacando os parâmetros alterados. Na presente figura é demonstrado apenas a secção do ficheiro referente ao cabeçalho.....	56
Figura 4.16 - Excerto do ficheiro <i>DD3_phase.dat</i> onde são esclarecidos os valores a utilizar referentes aos parâmetros <i>NOUT</i> , <i>JD</i> , <i>NTYP</i> , <i>NOPR</i> e <i>INDOUT</i>	57
Figura 4.17 - Excerto do ficheiro <i>DD3_phase.dat</i> , referente à primeira fase do processo	57
Figura 4.18 - Excerto do ficheiro <i>DD3_phase.dat</i> , referente à segunda fase do processo	58
Figura 4.19 - Excerto do ficheiro <i>DD3_phase.dat</i> , referente à terceira e quarta fase do processo	58
Figura 4.20 - Excerto do ficheiro <i>T1_punch.res</i> , destacando as colunas mais importantes	59
Figura 4.21 – Visualização do final da fase dois do processo no <i>software</i> GiD, utilizando o contorno de cores para avaliar a deformação plástica equivalente.....	59
Figura 5.1 - Curvas força-deslocamento do punção obtidas para os vários modelos isotrópicos avaliados	62
Figura 5.2 - Perfis de altura obtidos para os vários critérios de cedência isotrópicos testados...	63
Figura 5.3 - (a) Alturas de referência para a medição de espessuras e (b) Evolução da espessura em função do ângulo da direção de laminagem para diferentes alturas – retirado de (Habraken et al., 2022).....	64
Figura 5.4 – Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os critérios isotrópicos testados quando considerado o perfil na secção OX	64
Figura 5.5 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os critérios isotrópicos testados quando considerado o perfil na secção OY	65
Figura 5.6 - Curvas força-deslocamento do punção obtidas para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo isotrópico de Von Mises	66
Figura 5.7 - Perfis de altura obtidos para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo isotrópico de Von Mises.....	67
Figura 5.8 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo isotrópico de Von Mises, quando considerado o perfil na secção OX	67
Figura 5.9 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo isotrópico de Von Mises, quando considerado o perfil na secção OY	68

Figura 6.1 - Curvas de força-deslocamento experimental e obtida através do modelo Hill48	70
Figura 6.2 - Perfil de altura experimental e obtido através do modelo Hill48.....	71
Figura 6.3 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para o critério Hill48 quando considerado o perfil na secção OX.....	71
Figura 6.4 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para o critérios Hill48 quando considerado o perfil na secção OY	72
Figura 6.5 - Curvas de força-deslocamento experimental e obtidas através do modelo CPB06..	73
Figura 6.6 - Perfil de altura experimental e obtidos através do modelo CPB06	73
Figura 6.7 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para o critério CPB06 quando considerado o perfil na secção OX	74
Figura 6.8 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para o critério CPB06 quando considerado o perfil na secção OY	74
Figura 6.9 – Deformação plástica equivalente do esboço para o critério CB2001 no incremento de paragem da simulação, estando a vermelho a zona onde ocorre o rasgo	75
Figura 6.10 - Comparação das curvas dos coeficientes de anisotropia obtidas no presente documento (caracterização real) e no artigo estudado para o modelo CB2001	76
Figura 6.11 - Comparação das curvas do valor de σ obtidas no presente documento (caracterização real) e no artigo estudado para o modelo CB2001	77
Figura 6.12 - Comparação das superfícies de plasticidade σ obtidas no presente documento (caracterização real) e no artigo estudado para o modelo CB2001	77
Figura 6.13 - Curvas força-deslocamento do punção obtidas para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico Hill48.....	78
Figura 6.14 - Perfis de altura obtidos para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico Hill48	79
Figura 6.15 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico Hill48, quando considerado o perfil na secção OX.....	79
Figura 6.16 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico Hill48, quando considerado o perfil na secção OY	80
Figura 6.17 - Curvas força-deslocamento do punção obtidas para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico CPB06	81

Figura 6.18 - Perfis de altura obtidos para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico CPB06.....	81
Figura 6.19 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico CPB06, quando considerado o perfil na secção OX.....	82
Figura 6.20 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico CPB06, quando considerado o perfil na secção OY	82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Ficheiros de entrada do DD3Imp.....	4
Tabela 1.2 - Ficheiros de saída do DD3Imp	4
Tabela 2.1 - Sistema de designação de séries de alumínio de trabalho mecânico – adaptado de (G. Totten & D. Scott, 2003)	9
Tabela 2.2 - Subdivisões dos tratamentos térmicos T - adaptado de (G. Totten & D. Scott, 2003)9	
Tabela 2.3 - Resumo dos valores médios experimentais de r para uma liga AA6016-T4, estimado a partir de ensaios de tração uniaxial realizados na UA e na TUAT – adaptado de (Habraken et al., 2022)	11
Tabela 2.4 - Resumo dos valores experimentais da tensão normalizada obtidos para uma liga AA6016-T4, estimado a partir de ensaios de tração uniaxial realizados na UA e na TUAT – adaptado de (Habraken et al., 2022)	11
Tabela 2.5 - Parâmetros utilizados para a definição das curvas das Leis de Swift e Voce segundo a REEF - retirados de (Habraken et al., 2022)	14
Tabela 2.6 - Valor a inserir na coluna <i>Test</i> do ficheiro <i>expdata.dat</i> consoante o tipo de ensaio realizado	16
Tabela 2.7 - Síntese de todos os dados retirados dos ensaios experimentais realizados no <i>benchmark</i>	16
Tabela 3.1 – Valores virtuais obtidos para coeficientes de anisotropia e tensão utilizados nas caracterizações virtuais.....	32
Tabela 3.2 - Coeficientes de anisotropia do modelo Hill48	34
Tabela 3.3 - Valores dos fatores de ponderação utilizados na caracterização real para o modelo CB2001	35
Tabela 3.4 - Coeficientes de anisotropia do modelo CB2001 obtidos através da caracterização real	36
Tabela 3.5 - Valores dos fatores de ponderação utilizados na caracterização virtual para o modelo CB2001	38
Tabela 3.6 - Coeficientes de anisotropia do modelo CB2001 obtidos através da caracterização virtual.....	39

Tabela 3.7 - Valores dos fatores de ponderação utilizados na caracterização real para o modelo CPB06	40
Tabela 3.8 - Coeficientes de anisotropia do modelo CPB06 obtidos através da caracterização real	41
Tabela 3.9 - Valores dos fatores de ponderação utilizados na caracterização virtual para o modelo CPB06	43
Tabela 3.10 - Coeficientes de anisotropia do modelo CPB06 obtidos através da caracterização virtual.....	43
Tabela 4.1 - Discretização das malhas utilizadas	46
Tabela 4.2 - Descrição das malhas do cerra-chapas e matriz	51
Tabela 5.1 - Valores do parâmetro <i>YldCRIT</i> do ficheiro <i>DD3_mater0</i> consoante o critério de cedência isotrópico a utilizar	62
Tabela 6.1 - Valores do parâmetro <i>YldCRIT</i> do ficheiro <i>DD3_mater0</i> consoante o critério de cedência anisotrópico a utilizar	69
Tabela 6.2 - Dados utilizados para calcular o erro global para a utilização do modelo Hill48.....	72
Tabela 6.3 - Dados utilizados para calcular o erro global para a utilização do modelo CPB06 ...	74
Tabela 6.4 - Coeficientes de anisotropia do modelo CB2001 – retirado de (Habraken et al., 2022)	76
Tabela 6.5 - Dados utilizados para calcular o erro global dos diversos coeficientes de atrito utilizando o modelo Hill48 e respetivos resultados.....	80
Tabela 6.6 - Dados utilizados para calcular o erro global para a utilização da caracterização real recorrendo ao modelo CPB06 e respetivos resultados	83
Tabela 6.7 - Dados utilizados para calcular o erro global para a utilização da caracterização virtual recorrendo ao modelo CPB06 e respetivos resultados	83

NOTAÇÕES E CONVENÇÕES

Os tensores de segunda ou de quarta ordem são representados por letras maiúsculas (latinas ou gregas) a negrito, ou em notação indicial através dos seus 2 ou 4 índices, respetivamente. A mesma convenção é utilizada para a representação de vetores, sendo para estes adotadas as letras minúsculas a negrito. A convenção de soma entre índices idênticos é sempre assumida, a menos que o contrário seja especificado.

O produto entre dois tensores é identificado pelo símbolo “ $\cdot$ ”,

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \Leftrightarrow C_{ij} = A_{ik} B_{kj}.$$

O produto tensorial é:

$$\mathbf{S} = \mathbf{A} \otimes \mathbf{B} \Leftrightarrow S_{ijkl} = A_{ij} B_{kl}.$$

A dupla contração de tensores (ou produto interno tensorial), identificada pelo símbolo “ $:$ ” é:

$$s = \mathbf{A} : \mathbf{B} \Leftrightarrow s = A_{ij} B_{ij}, \quad \mathbf{C} = \mathbf{S} : \mathbf{B} \Leftrightarrow C_{ij} = S_{ijkl} B_{kl}, \text{ e}$$

$$s = \mathbf{A} : \mathbf{S} : \mathbf{B} \Leftrightarrow s = A_{ij} S_{ijkl} B_{kl}.$$

A norma de tensores é dada por:

$$\|\mathbf{A}\| = \sqrt{\mathbf{A} : \mathbf{A}} = \sqrt{A_{ij} A_{ij}}, \quad \|\mathbf{S}\| = \sqrt{\mathbf{S} : \mathbf{S}} = \sqrt{S_{ijkl} S_{ijkl}}.$$

Os super-índices ^{T} , ^{S} , ^{A} e $'$, quando associados a um tensor $\mathbf{T}$ representam, respetivamente:

- O tensor transposto de $\mathbf{T}$, $(T^T)_{ij} = T_{ji}$;
- A parte simétrica do tensor $\mathbf{T}$, $\mathbf{T}^S = \frac{1}{2}(\mathbf{T} + \mathbf{T}^T) \Leftrightarrow T_{ij}^S = \frac{1}{2}(T_{ij} + T_{ji})$;
- A parte anti-simétrica do tensor $\mathbf{T}$, $\mathbf{T}^A = \frac{1}{2}(\mathbf{T} - \mathbf{T}^T) \Leftrightarrow T_{ij}^A = \frac{1}{2}(T_{ij} - T_{ji})$, e
- A parte desviadora do tensor $\mathbf{T}$, $(\mathbf{T}')_{ij} = (\mathbf{T})_{ij} - \frac{T_{kk}}{3} \delta_{ij}$.

A inversa de um tensor é definida pelo índice $^{-1}$ sobrescrito, sendo $\mathbf{I}$ (ou $\mathbf{1}$) o tensor unidade e δ_{ij} o símbolo de Kronecker:

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{A}=\mathbf{I} \Leftrightarrow A_{ik}^{-1}A_{kj}=\delta_{ij}.$$

As operações definidas entre vectores são:

- O produto escalar, $s = \mathbf{v} \cdot \mathbf{u} = v_i u_i \Leftrightarrow s = v_i u_i;$
- O produto vetorial, $\mathbf{C} = \mathbf{v} \otimes \mathbf{u} \Leftrightarrow C_{ij} = v_i u_j, \text{ e}$
- A norma, $\|\mathbf{v}\| = \sqrt{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} = \sqrt{v_i v_i}.$

Por fim, os símbolos e expressões seguintes representam:

- $\mathbf{0}$ o tensor nulo, sendo $\mathbf{0} = [0];$
- (x_1, x_2, x_3) o sistema de eixos cartesiano global;
- $[A]$ a matriz $\mathbf{A}$ representada num sistema cartesiano;
- $\{\mathbf{a}\}$ o vetor $\mathbf{a}$ representado num sistema cartesiano;
- div o operador divergente;
- grad, ∇ o operador vetorial gradiente, e
- tr o traço do tensor, $\text{tr}(\mathbf{A}) = A_{ii}.$

O ponto (.) é utilizado como separador decimal.

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas, abreviaturas e acrónimos

$\bar{\epsilon}^p$ – Deformação plástica equivalente;

$\bar{h}$ - Altura média;

I_1, I_2, I_3 - Primeiro, segundo e terceiro invariantes do tensor das tensões;

J_2, J_3 – Segundo e terceiro invariantes do tensor das tensões desviador;

Y_0 – Tensão limite de elasticidade em tração uniaxial;

Y_{sat} – Tensão de saturação;

r_b - Coeficiente de anisotropia em tração biaxial;

r_θ – Coeficiente de anisotropia r medido segundo a distância angular θ relativamente à direção de laminagem;

s_1, s_2, s_3 – Tensões principais do tensor das tensões efetivo transformado;

$\bar{\sigma}$ – Tensão equivalente;

σ' - Tensor das tensões desviador;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – Tensões principais do tensor das tensões;

σ_C – Tensão de cedência em compressão uniaxial;

σ_I - Tensão principal de valor máximo;

σ_{III} - Tensão principal de valor mínimo;

σ_T – Tensão de cedência em tração uniaxial;

σ_X – Tensão limite de elasticidade no eixo x atribuído ao ensaio biaxial;

σ_Y – Tensão limite de elasticidade no eixo y atribuído ao ensaio biaxial;

σ_b – Tensão limite de elasticidade em tração biaxial;

σ_{ij} – Tensor das tensões;

σ_m – Pressão hidrostática;

τ_y – Tensão de escoamento em corte puro;

ϵ_g – Erro global

3D – três dimensões;

CAD – *Computer Aided Design*;

CB2001 - Critério de plasticidade de Cazacu & Barlat 2001;

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

CCC - Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado;

CFC - Estrutura cristalina cúbica de faces centradas;

CPB06 – Critério de plasticidade de Cazacu 2006;

DD3Imp – Contração de *Deep Drawing 3D Implicit Code*;

DD3Mat – Contração de *Deep Drawing 3D Material Parameters Identification*;

Displ_Z – Deslocamento ao longo do eixo Z;

ESAFORM - *European Scientific Association for material FORMing*;

EXACT - *Experiment and Analysis of Aluminum Cup Drawing Test*;

Exp. – Experimental;

Force_Z – Força ao longo do eixo Z;

GPa – Gigapascal;

Hill48 - Critério de plasticidade de Hill 1948;

kN – Quilonewton;

mm – Milímetros;

MPa – Megapascal;

NURBS – *Non Uniform Rational B-Splines*;

RD – Direção de laminagem;

$\mathbf{s}$ - Tensor das tensões efetivo transformado;

TD – Direção transversa;

TUAT – Universidade de Agricultura e Tecnologia de Tóquio;

UA – Universidade de Aveiro;

ULiege – Universidade de Liège;

VM – Critério de plasticidade de Von Mises;

$\mathbf{X}$ – Tensor das tensões inversas;

Yld91 - Critério de plasticidade de Barlat *et al.* 1991;

C , C_y , n , ε_0 – Constantes do material;

Y – Tensão de escoamento;

r – Coeficiente de anisotropia;

μ – Coeficiente de atrito;

σ – Tensor das tensões.

Parâmetros DD3Imp e DD3Mat

CPen – Constante de Penalidade;

EM – Módulo de Young;

IEQMAX – Define o número máximo de iterações;

INDOUT – Define a ação da ferramenta ou do BCID;

iPH – Número da fase;

iphOSS – Fase onde ocorre o retorno elástico;

JD – Direção de ação da ferramenta principal da fase;

MU – Coeficiente de atrito;

NbTOOL – Número de ferramentas utilizadas no processo;

NEND – Número máximo de incrementos;

NOPR – Teste de validação que permite a mudança de fase;

NOUT – Define a ferramenta principal que comanda a fase;

NPH – Número de fases;

NRES – Número de restrições;

NST – Número de incremento;

NTYP – Define o tipo de ação da ferramenta principal da fase que valida a troca de fase;

PlasLAW – Lei de encruamento utilizada;

PR – Coeficiente de Poisson;

TOLEQ – Tolerância das forças não equilibradas;

YldCRIT – Critério de cedência utilizado.

1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo é iniciado com uma breve contextualização referente aos processos de conformação de chapa metálica, incidindo particularmente no processo de embutidura e na importância da simulação numérica para a otimização do mesmo; são expostos os objetivos do trabalho desenvolvido; é feita uma introdução aos *softwares* utilizados no decorrer da dissertação (GiD, DD3Imp e DD3Mat) e por fim é realizado um guia de leitura, de forma a auxiliar o leitor a situar os conteúdos abordados.

1.1. CONTEXTO

A conformação de chapas metálicas é um conjunto de processos que permitem ao utilizador partir da matéria-prima para um produto que possuirá o resultado pretendido, podendo assim ser englobados numa família de processos com a designação de *near net shape*. Na conformação as peças são obtidas através da deformação plástica do material empregue, estando este conjunto de processos dividido em dois grandes grupos: conformação de massa e conformação de chapa. Para a conformação de massa são utilizadas técnicas que permitem dar uma determinada forma a um elemento maciço, como um tarugo por exemplo, técnicas estas como a trefilagem, forjamento, laminagem, extrusão, entre outros. Na conformação de chapa, como o nome indica, são utilizadas chapas metálicas que podem ter sido previamente conformadas através de processos como a laminagem. Neste grupo inserem-se tecnologias como a embutidura, quinagem, estampagem, *hydroforming*, entre outros.

Nesta dissertação, que tem por base o *benchmark* EXACT proposto através da conferência ESAFORM, existe um foco nos processos de conformação de chapas metálicas, em concreto na embutidura de chapas de ligas de alumínio. Este é um processo vastamente utilizado, com forte presença na conceção de latas para diversos produtos alimentícios, cuja representação na indústria leva à crescente importância do seu controlo e otimização.

O processo de embutidura trata-se de um processo de conformação de chapa metálica que, através da combinação de forças de tração e compressão, permite a criação de peças ocas onde normalmente não é pretendida uma alteração da espessura do esboço utilizado. Este processo ocorre por meio da ação de um punção que realizará um movimento através de uma matriz, dando assim a forma pretendida ao esboço, podendo necessitar de uma ou mais etapas. É também frequente a utilização de um cerra-chapas, ferramenta cuja função é garantir o correto posicionamento do esboço e

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo que, através da força por esta exercida, permite reduzir a ocorrência de defeitos como o enrugamento do esboço.

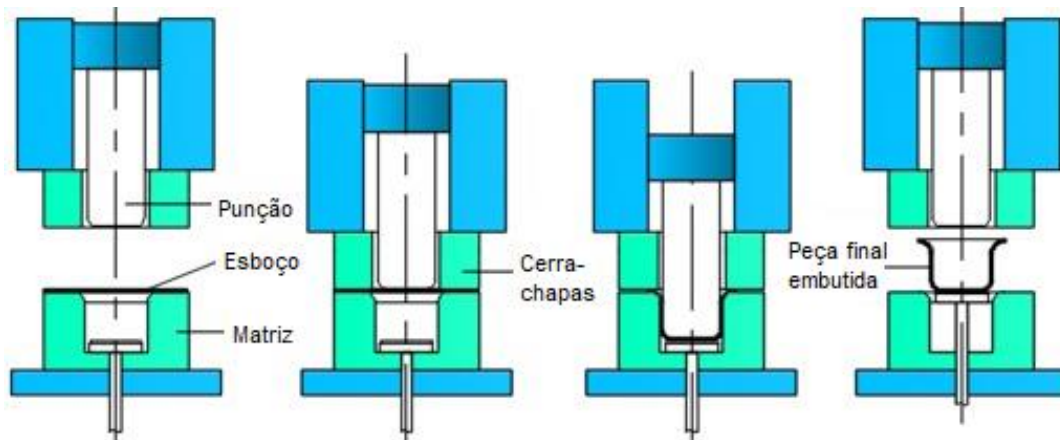


Figura 1.1 - Representação esquemática de um processo de embutidura convencional - adaptado de (Gürün & Karaağaç, 2015)

Como mencionado anteriormente, dada a vasta implementação deste processo, é importante a análise da sua eficácia e a procura pela otimização. Desta forma, é frequentemente utilizada a simulação numérica computacional por elementos finitos como ferramenta de auxílio para a previsão de vários fatores como forças exercidas no processo, ocorrência de defeitos, entre outros. Através da aplicação da simulação numérica é possível validar vários aspetos do processo como a geometria das ferramentas e do esboço a utilizar, obter deduções quanto ao sucesso do processo mais rapidamente e com menores gastos associados (simulação numérica vs prototipagem), permitindo também obter esclarecimento relativamente a algumas questões que de outra forma ficariam sem resposta, em qualquer das fases de desenvolvimento do produto.

1.2. OBJETIVOS

Esta dissertação tem como principal a correta previsão do comportamento de uma liga de alumínio AA6016-T4, utilizada no âmbito do *benchmark* EXACT, utilizando a simulação numérica de um processo de embutidura como auxílio para comprovar a correta representação do material. Paralelamente pretende-se entender de que forma a alteração de determinados parâmetros de entrada das simulações podem afetar o resultado obtido pelas mesmas.

É também tida em consideração a utilização de pontos virtuais para a caracterização do material, tendo como finalidade a redução do número de ensaios obrigatórios para obter a informação necessária para utilizar modelos constitutivos mais complexos.

1.3. SOFTWARES UTILIZADOS

Para a realização das simulações referentes ao processo de embutidura, foram utilizados dois *softwares*: o GiD, como pré e pós-processador, e o DD3Imp, como *solver*.

O GiD é um *software* de pré e pós-processamento, utilizado frequentemente para simulações numéricas nos campos da ciência e engenharia. Através da sua utilização é possível integrar códigos de simulação tanto comerciais como internos ou ferramentas de CAD e *meshing* externas, apesar de ser possível realizar a criação das geometrias e malhas recorrendo apenas às ferramentas fornecidas pelo mesmo. Na vertente do pós-processamento, o GiD contém várias opções de visualização de resultados como linhas de contorno, diagramas de feixe, linhas de corrente, deformações no modelo original, entre outros, permitindo também a realização de animações e visualização de cortes e isosuperfícies.

O DD3Imp (*Deep-Drawing 3D IMPLICIT code*) é um *software* criado originalmente para a realização de simulações de processos de embutidura, como é o caso presente nesta dissertação. No entanto, com o passar do tempo, evoluiu de maneira a permitir a simulação de vários processos de conformação. Este código utiliza um método de integração implícito, querendo isto dizer que procura iterativamente o equilíbrio em torno da configuração do corpo num qualquer instante $t + \Delta t$. Na eventualidade de ser impossível alcançar a convergência, devem ser alterados os parâmetros de entrada como por exemplo: os parâmetros de penalidade e a solução de iniciação do processo iterativo implícito. A alteração de outros parâmetros como o modelo constitutivo ou o coeficiente de atrito significaria uma alteração da modelação de todo o problema (Alves, 2003).

Este *software* utiliza vários *inputs* em forma de ficheiros, que serão lidos pelo *software* de forma a verificar a formulação do processo. São requeridos no mínimo cinco ficheiros de entrada: “DD3_bcon”; “DD3_contact”; “DD3_input”; “DD3_mater”; “DD3_phase”, e, dependendo do processo, um sexto tipo de ficheiro (será um ou mais ficheiros dependendo da necessidade de haver mais que uma ferramenta), “DD3_tool[X]”. Segue-se uma breve descrição de cada:

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Tabela 1.1 - Ficheiros de entrada do DD3Imp

Ficheiro	Descrição
DD3_bcon	Define as condições de fronteira do problema, como por exemplo, relações de simetria ou criação de BCID's.
DD3_contact	Permite estabelecer a forma como são considerados os contactos entre o esboço e as ferramentas, assim como outros parâmetros pertinentes a este, como o coeficiente de atrito (MU) e os parâmetros de penalidade e o seu valor (CPen).
DD3_input	Indica os dados de entrada do processo como por exemplo: número máximo de incrementos (NEND), número de iterações por incremento (IEQMAX), fase onde ocorre o retorno elástico (iphOSS) e tolerância máxima admissível para a convergência (TOLEQ)
DD3_mater	Descreve toda a caracterização do material em estudo, tendo em si inserida informação relativamente a modelo constitutivo a aplicar, leis de encruamento, modelos de dano e outros dados como módulo de Young (EM), coeficiente de Poisson (PR), propriedades térmicas, entre outros.
DD3_mesh	Define a discretização do esboço utilizando o método FE. É possível utilizar ficheiros customizáveis gerados pelo DD3Imp ou importar uma malha, previamente gerada num outro <i>software</i> , que será lida pelo código do <i>solver</i> .
DD3_phase	Descreve todas as etapas do processo sequencialmente. É possível definir movimentos, forças, pressões, temperaturas e posições a atribuir a cada uma das ferramentas, assim como o número destas a utilizar. É possível também definir o incremento de tempo a utilizar.
DD3_tool[X]	Ficheiro de malha onde se encontra a discretização da geometria de uma qualquer ferramenta. Este ficheiro é normalmente concebido no <i>software</i> GiD como demonstrado no capítulo 4.2. [X] representa o número da ferramenta.

No decorrer da simulação é criada uma variedade de ficheiros de output que permitirão aceder ao progresso da evolução do processo enquanto este decorre. No cessar da simulação são também criados os ficheiros finais, que permitirão fazer a análise de todo o estudo. Segue-se uma breve descrição de cada:

Tabela 1.2 - Ficheiros de saída do DD3Imp

Ficheiro	Descrição
Gid_ini.[X]	Conjunto de ficheiros que permitem ao utilizador aceder à informação do processo no instante $t = 0$. [X] representa a extensão do ficheiro (msh; res; tool.msh).
GiD_p[x]end.[Y]	Conjunto de ficheiros que permitem ao utilizador aceder à informação do processo no final de cada fase, definidas no ficheiro DD3_phase. [X] representa o número da fase e [Y] representa a extensão do ficheiro (msh; res; tool.msh).
GiD_simu.[X]	Conjunto de ficheiros que permitem ao utilizador aceder à informação de todo processo, ao longo do tempo. [X] representa a extensão do ficheiro (msh; res; tool.msh).
Stat.res	Permite compreender o atual estado da simulação, fornecendo informação sobre a convergência dos incrementos, em que incremento se encontra, valor do critério de convergência, entre outros.
T[X]_[Y].res	Permite aceder a informações relativas aos deslocamentos e às forças atuantes nas ferramentas, em cada um dos eixos x, y ou z. [X] representa o número da ferramenta e [Y] a nomenclatura dada a esta (exemplo: T1_Die.res)

Similarmente ao que ocorre nos ficheiros de *input*, se forem utilizados os ficheiros “DD3oNodes” e “DD3oGPoints”, são criados dois ficheiros de *output* denominados “R_Node_[X]” e “GPoint”, onde será extraída a informação sobre os nós ou pontos de Gauss escolhidos, sendo o [X] representativo do número do nó a rastrear pelo utilizador ou do nome atribuído por este ao ficheiro, no caso de ser necessário rastrear vários nós simultaneamente.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

De forma a auxiliar na caracterização do material foi também utilizado o *software* DD3Mat (*Deep Drawing 3D MATERIAL parameters identification*). Este é um programa de apoio, que permite ao utilizador inserir um conjunto de dados provenientes de ensaios experimentais, explorado mais à frente. Estes irão fornecer a informação necessária para caracterizar o material, mediante vários modelos constitutivos (Alves, 2003).

1.4. GUIA DE LEITURA

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos, podendo estes ser divididos em três partes. Na primeira parte são englobados os capítulos 1 e 2, utilizados para fazer um enquadramento do trabalho, na segunda parte consideram-se os capítulos 3 e 4, onde são apresentados os conhecimentos necessários para a realização do pré-processamento das simulações realizadas e, por fim, na terceira parte constituída pelos capítulos 5, 6 e 7 são reportados os resultados obtidos através das simulações e apresentadas as conclusões do trabalho.

No capítulo 1 é introduzido o tema da dissertação e feita uma contextualização do tema dentro do ramo das tecnologias de conformação e da importância da simulação numérica nesta área, expondo também os *softwares* utilizados no decorrer deste trabalho.

De seguida, no capítulo 2, é exposto o *benchmark* sobre o qual se assenta o desenvolvimento da dissertação, demonstrando a geometria proposta assim como os restantes parâmetros do processo a testar. São também tecidas considerações sobre o material utilizado no *benchmark*, os ensaios que neste foram elaborados e os respetivos resultados, permitindo a sua caracterização, e de que forma estes dados são inseridos nos *softwares* utilizados.

O capítulo 3 inicia a segunda parte da dissertação, onde é feita uma descrição dos modelos critérios de plasticidade fenomenológicos isotrópicos e anisotrópicos, assim como uma apresentação das leis de encruamento relevantes ao presente estudo.

No capítulo 4 é descrito o processo de criação e discretização do esboço circular descrito no *benchmark* EXACT e o método de modelação das ferramentas necessárias para descrever corretamente o processo de embutidura considerado. De forma a finalizar o pré-processamento são apresentados os ficheiros de *input* do DD3Imp utilizados, identificando os parâmetros alterados e explicando os mesmo. É também feita uma pequena consideração sobre o pós-processamento no capítulo 4.4, onde são apresentados alguns dos ficheiros de *output* utilizados para avaliar os resultados das simulações.

Nos capítulos 5 e 6 é estudada a influência do comportamento isotrópico e anisotrópico do material, recorrendo à conceção de simulações 3D, sendo nestes analisados os resultados obtidos nas

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo mesmas. Como critérios de avaliação foram utilizadas as curvas de força-deslocamento do punção e a altura e espessura finais do embutido. Ainda nestes capítulos é avaliada a resposta do produto final face à variação do coeficiente de atrito, tentando compreender qual o valor mais apropriado para o presente estudo.

Finalmente, no capítulo 7, são tecidas as considerações finais.

2. O *BENCHMARK*

Neste capítulo é discutido o *benchmark* EXACT da ESAFORM, que visa aprimorar a pesquisa no campo da conformação de materiais, focando-se no processo de embutidura de copos de alumínio. O EXACT avalia a caracterização de um material anisotrópico usando dados experimentais e vários modelos constitutivos, comparando diferentes métodos de simulação numérica com os resultados experimentais. De seguida são detalhas as propriedades da liga de alumínio AA6016-T4, destacando algumas das suas aplicações comuns e propriedades mecânicas. A liga é analisada através da realização de vários ensaios, entre os quais ensaio de tração uniaxial e biaxial, e ensaios de corte puro.

2.1. *BENCHMARK* EXACT

A presente dissertação tem como base o *benchmark* proposto pela associação ESAFORM (*European Scientific Association for material FORMing*), denominado por EXACT (*Experiment and Analysis of Aluminium Cup Drawing Test*). As conferências organizadas por esta associação têm como principais objetivos estimular a pesquisa aplicada ao campo da conformação de materiais, disseminar informação científica e tecnológica relacionada dentro do ambiente académico e industrial, assim como promover os interesses da comunidade de pesquisa relacionada com processos de conformação.

Com o caso de estudo presente no EXACT, pretende-se compreender vários aspetos referentes ao processo de embutidura de uma chapa metálica, tendo como principal foco a caracterização de um material através de vários modelos constitutivos apresentados pelos participantes, tendo como base os dados experimentais fornecidos pela entidade organizadora. Existe também uma forte presença de discussão referente aos diferentes métodos de simulação numérica utilizados e quais as vantagens e desvantagens de cada um, comparando sempre os seus resultados das simulações com os obtidos experimentalmente pela organização. São tecidas várias considerações sobre o número de orelhas presentes no embutido final, a evolução da textura da chapa utilizada, a influência do coeficiente de atrito no processo, assim como outras variáveis, tudo isto considerando a conceção de um copo cujo material é uma liga de alumínio AA6061-T4, estudado no decorrer do *benchmark*. Este copo é fabricado através de um esboço com um diâmetro de 107,5 mm e espessura de 1 mm. A sua geometria final é cilíndrica, com um diâmetro de 62,4 mm e altura variável, sendo possível verificar-se a ocorrência do fenómeno de *earring*, existindo 4 orelhas no embutido final.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Para a realização deste processo foram utilizadas quatro ferramentas: punção, cerra-chapas, matriz e um *stopper*. O posicionamento de todas estas, assim como do esboço, é demonstrado na Figura 2.1.

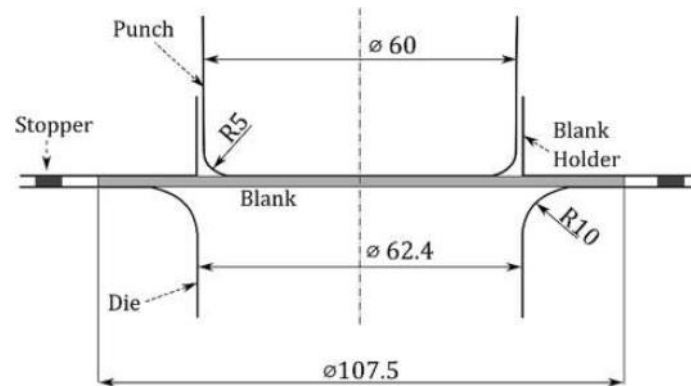


Figura 2.1 - Representação esquemática do processo de teste do copo cilíndrico e dimensões das ferramentas – retirado de (Habraken et al., 2022)

O punção utilizado tem um diâmetro de 60 mm e irá mover-se 54 mm desde o momento de contacto com o esboço, no sentido descendente. Para o cerra-chapas foi estabelecida uma força de 40 kN no sentido descendente e o uso de um *stopper* auxiliar, de forma a manter a folga entre o cerra-chapas e a matriz. A matriz possui um diâmetro de 62,4 mm, estabelecendo assim uma folga de 1,2 mm entre a matriz e o punção (Habraken et al., 2022).

2.2. MATERIAL UTILIZADO

As ligas de alumínio são dos materiais mais utilizados na indústria, tendo possíveis aplicações no ramo alimentício, automóvel, aeronáutico, entre outros. Este facto deve-se à vasta gama de materiais existentes e às suas propriedades mecânicas, que trazem bastantes benefícios como: boa condução elétrica e térmica, baixa massa volúmica, elevada rigidez, ductilidade e excelente resistência à corrosão (Jenny & Kabecha, 2023). No entanto possui algumas características que se provam restritivas como dificuldades no processo de soldadura, alto coeficiente de expansão térmica (devido à dificuldade em cumprir tolerâncias dimensionais em ambientes com temperaturas variáveis), baixas temperatura de fusão, dureza, resistência mecânica e ao desgaste quando comparado com outros materiais como aços, por exemplo (Davis, 1999).

As ligas de alumínio podem ser divididas em dois grandes grupos, as ligas de fundição e as ligas de trabalho mecânico. Estas últimas são de maior relevância para esta dissertação pois é onde se insere o material utilizado no *benchmark*, uma liga AA6016-T4.

Cada liga pode ser identificada através de um número, antecedido pelas letras “AA” segundo a norma americana, permitindo este distinguir o tipo de liga de alumínio (ligas de fundição e ligas de trabalho mecânico), série, modificações feitas à liga e tratamentos que possam ter sido realizados. As ligas de fundição seguem um formato (AAxxx.x) e as ligas de trabalho mecânico seguem o formato (AAxxxx). Nestas últimas o primeiro dígito representa a série da liga, o segundo (se diferente de 0) indica uma modificação feita à liga original e o terceiro e quarto dígito são números arbitrários utilizados para finalizar a nomenclatura da liga (G. Totten & D. Scott, 2003). No que toca à seriação, as ligas são divididas consoante os elementos de liga mais proeminentes, como é descrito na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Sistema de designação de séries de alumínio de trabalho mecânico – adaptado de (G. Totten & D. Scott, 2003)

Série	Elementos de liga mais proeminentes
1000 (1xxx)	≥ 99% de Alumínio
2000 (2xxx)	Cobre
3000 (3xxx)	Manganês
4000 (4xxx)	Silício
5000 (5xxx)	Magnésio
6000 (6xxx)	Magnésio e Silício
7000 (7xxx)	Zinco
8000 (8xxx)	Outros elementos
9000 (9xxx)	Série Inutilizada

Finalmente, de forma a terminar a especificação da liga, é necessário identificar a sua condição metalúrgica. Isto é feito através da utilização de um caracter que é colocado após o número, podendo ser: “F” para quando a liga é mantida na condição de fabrico, sem posterior tratamento; “O” quando é realizado um processo de recozimento; “H” quando a liga sofre encruamento ou deformação realizados a frio, podendo esta categoria ser subdividida em: apenas deformação (H1), deformação e recozimento parcial (H2), deformação e recozimento para estabilização (H3) e deformação e lacagem/pintura (H4); “W” para ligas tratadas através de solubilização e “T” para ligas tratadas termicamente. Quanto à última opção pode ainda ser feita uma subdivisão, como pode ser verificado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Subdivisões dos tratamentos térmicos T - adaptado de (G. Totten & D. Scott, 2003)

Designação	Tratamento térmico
T1	Arrefecido desde a temperatura de conformação e envelhecido naturalmente à temperatura ambiente
T2	Arrefecido desde a temperatura de conformação, encruado e envelhecido à temperatura ambiente
T3	Solubilizado, encruado e envelhecido à temperatura ambiente
T4	Solubilizado e envelhecido à temperatura ambiente
T5	Arrefecido desde a temperatura de conformação e envelhecido artificialmente
T6	Solubilizado e envelhecido artificialmente
T7	Solubilizado e sobre-envelhecido
T8	Solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado
T10	Arrefecido desde a temperatura de conformação, encruado e envelhecido artificialmente

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Como mencionado anteriormente, o material presente neste estudo trata-se de uma liga de alumínio AA6016-T4, na forma de uma chapa metálica com espessura de 1 mm. Esta pertence à série 6000, uma série caracterizada por ser normalmente indicada para o fabrico de perfis extrudidos, produção de caixilharias e estruturas de veículos. A extensão T4 é referente ao tratamento térmico exercido sobre a liga, tratando-se neste caso de uma solubilização seguida por um envelhecimento, ambos realizados à temperatura ambiente.

As chapas metálicas utilizadas no *benchmark* foram produzidas pela UACJ Co. no Japão. Tipicamente estas são concebidas através de um processo de laminagem, que consiste na produção de chapas metálicas através da redução da espessura de um maciço, utilizando dois rolos cilíndricos paralelos. Este é um processo que poderá ser de uma única etapa ou multi-etapa, dependendo das espessuras inicial e final pretendidas.

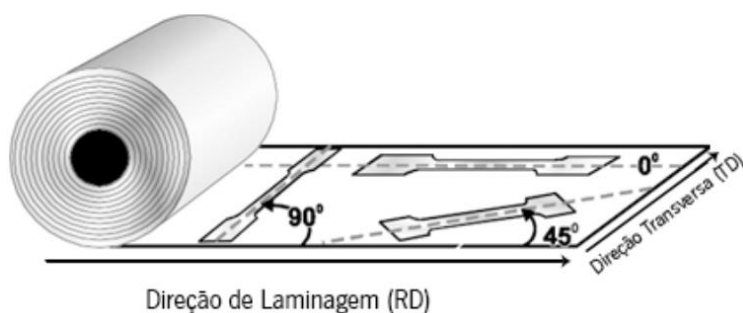


Figura 2.2 - Esquema ilustrativo do processo de laminagem e das respectivas direções de laminagem e transversa – adaptado de (Güner, 2016)

Após o processo de laminagem, é importante realizar ensaios que permitam caracterizar o material obtido. Para este fim são normalmente extraídos vários provetes de diferentes orientações, sendo estas definidas pelo ângulo entre a direção de laminagem e um dos eixos principais do provete, como demonstrado na Figura 2.2. Esta extensiva caracterização é importante de forma a compreender o comportamento anisotrópico do material, analisando as variações obtidas nas diversas orientações exploradas. Desta forma, foram realizados vários ensaios de tração uniaxial, contemplando diversas orientações e duas geometrias; ensaios de tração biaxiais, utilizando duas geometrias de provete diferentes e ensaios de corte simples, reportados abaixo.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

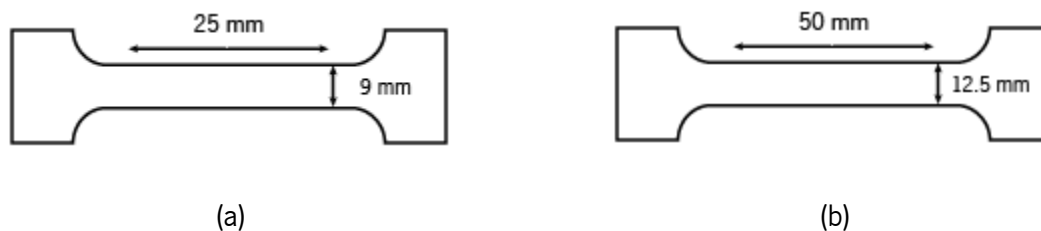


Figura 2.3 - Geometria dos provetes utilizados para ensaios de tração uniaxiais com as dimensões (a) utilizadas nos ensaios UA (2020) para as direções de 15°, 30°, 60° e 75° devido a restrições de disponibilidade do material e (b) utilizadas nos restantes ensaios.

Analisando os resultados expostos na Tabela 2.3 e Tabela 2.4 é possível compreender que o material demonstra pouca anisotropia quando nos referimos aos valores das tensões e anisotropia mais pronunciada quando comparados os valores dos coeficientes de anisotropia.

Tabela 2.3 - Resumo dos valores médios experimentais de r para uma liga AA6016-T4, estimado a partir de ensaios de tração uniaxial realizados na UA e na TUAT – adaptado de (Habraken et al., 2022)

Ângulo do provete	TUAT (2018)	TUAT (2020)	UA (2020)
0°	0,526	0,384	0,525
15°	0,344	-	0,359
30°	0,301	-	0,303
45°	0,253	0,229	0,248
60°	0,294	-	0,297
75°	0,393	-	0,387
90°	0,601	0,368	0,429

Tabela 2.4 - Resumo dos valores experimentais da tensão normalizada obtidos para uma liga AA6016-T4, estimado a partir de ensaios de tração uniaxial realizados na UA e na TUAT – adaptado de (Habraken et al., 2022)

Ângulo do provete	Tensão normalizada TUAT	Tensão normalizada UA
0°	1,000	1,000
15°	0,944	0,963
30°	0,913	0,904
45°	0,908	0,867
60°	0,898	0,919
75°	0,928	0,948
90°	0,983	0,926

Como mencionado anteriormente foram realizados ensaios biaxiais, com múltiplas geometrias. É mencionado o uso de dois provetes distintos, um possuindo formato de crucifixo e outro com formato tubular, cujas dimensões são ilustradas abaixo.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutadura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

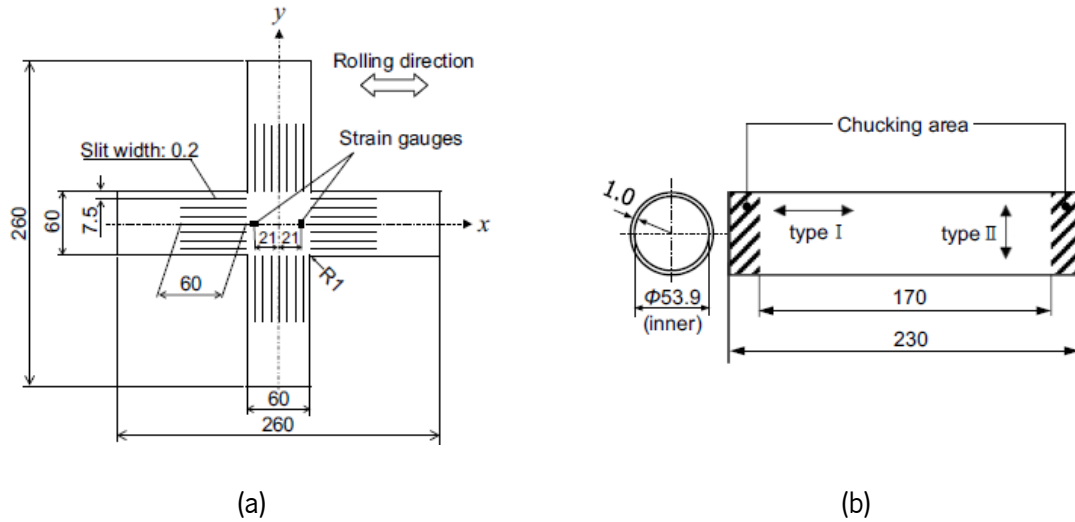


Figura 2.4 – Geometria dos provetes utilizados para ensaios de tração biaxiais em formato (a) cruciforme e (b) tubular. Dimensões em mm. As setas representam a direção de laminagem – retirado de (Habraken et al., 2022)

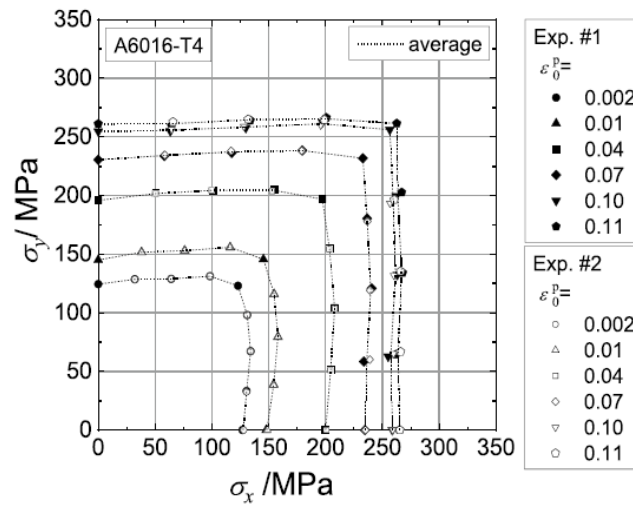


Figura 2.5 – Contorno do trabalho plástico a diferentes níveis de ε_0^p formado por pontos de tensão - retirado de (Habraken et al., 2022)

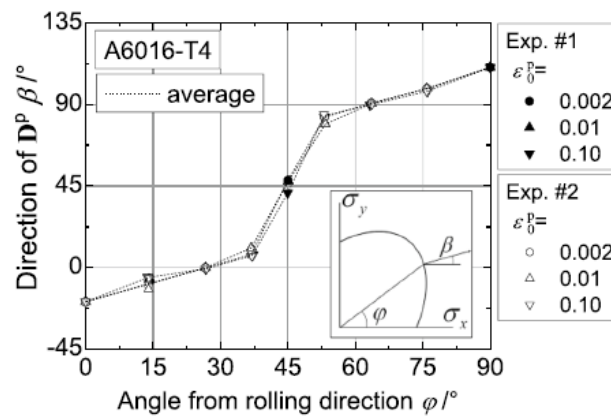


Figura 2.6 - Direção da "plastic strain rate" a diferentes níveis de ε_0^p - retirado de (Habraken et al., 2022)

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutadura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Para a realização dos ensaios de corte simples foram também utilizadas duas geometrias distintas, ambas retangulares, mas de dimensões variadas, representadas abaixo. A necessidade de empregar espécimes maiores está relacionado com as pegas hidráulicas utilizadas nos ensaios realizados pela ULiege.

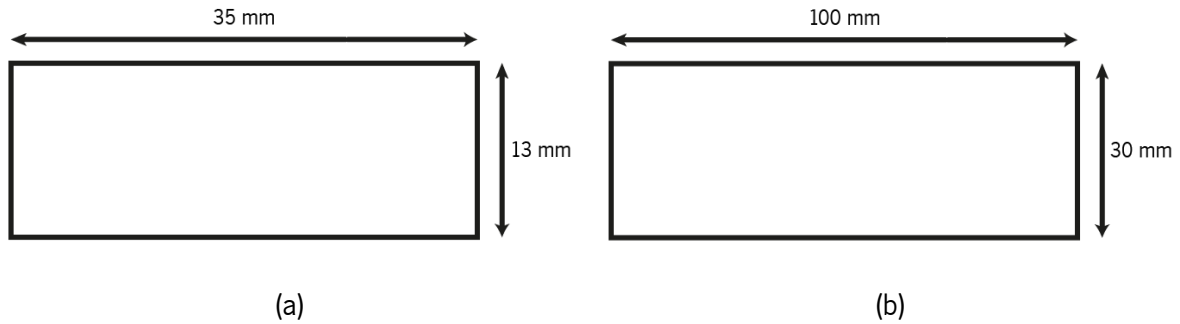


Figura 2.7 - Geometria dos provetes utilizados para ensaios de corte simples com as dimensões (a) utilizadas nos ensaios da UA e (b) utilizadas nos ensaios da ULiege. Ambos possuem uma espessura de 1 mm.

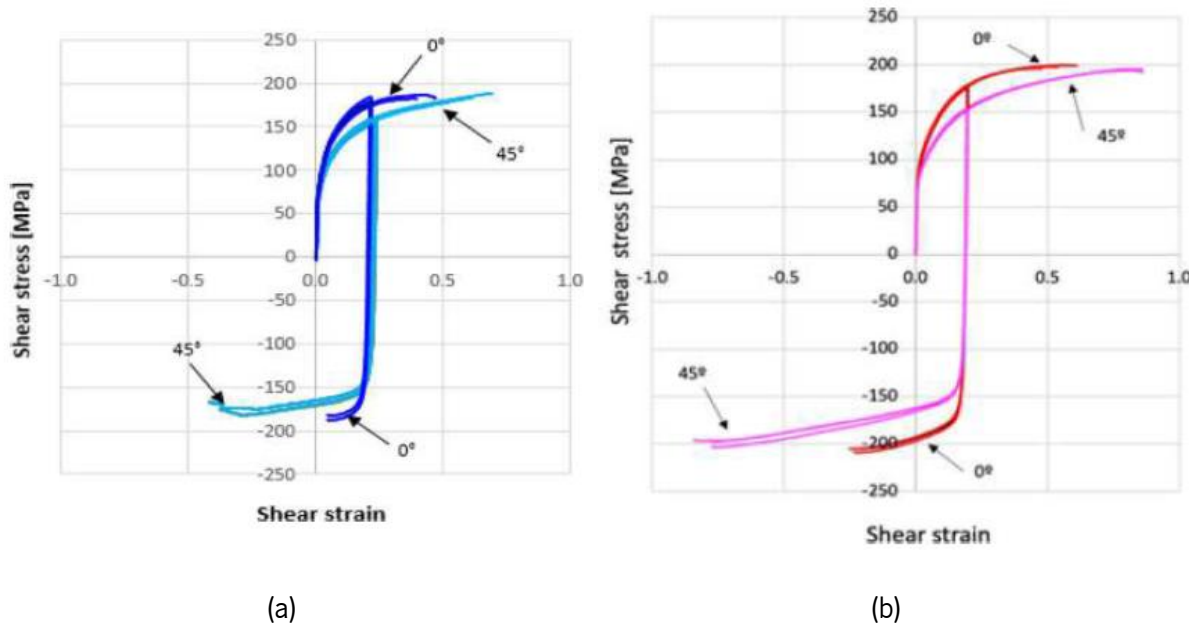


Figura 2.8 - Curvas de tensão de corte obtidas utilizando os dados (a) da ULiege e (b) da UA - retirado de (Habraken et al., 2022)

O módulo de Young reportado no *benchmark* é de 70000 MPa e o coeficiente de Poisson considerado é de 0,33, sendo estes valores usuais para as ligas de alumínio dentro da série 6000.

Para determinar qual a lei de endurecimento mais apropriada a utilizar no presente caso foram determinados os parâmetros para ambas as leis e, posteriormente, foram criadas as curvas de forma a comparar com os resultados experimentais.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Tabela 2.5 - Parâmetros utilizados para a definição da curvas das Leis de Swift e Voce segundo a REEF - retirados de (Habraken et al., 2022)

Lei de Swift	
C	498,8
ε_0	0,0089
n	0,285
Lei de Voce	
Y_{sat}	326,8
Y_0	137,4
C_y	12,0

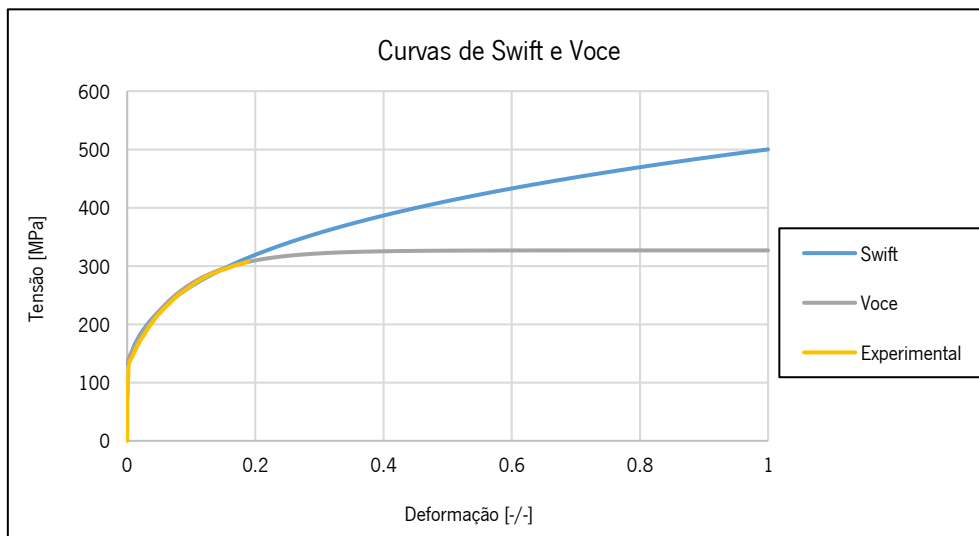


Figura 2.9 - Comparação entre as curvas utilizando as leis de Swift e Voce com os dados experimentais obtidos na direção RD utilizando para a lei de Swift a expressão $Y = C(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n$ e para a lei de Voce a expressão $Y = Y_0 + (Y_{sat} - Y_0) \cdot [1 - e^{(-C_y \cdot \bar{\varepsilon}^p)}]$

Como se pode verificar no gráfico presente na Figura 2.9, ambas as curvas parecem apropriadas para os dados experimentais disponíveis, observando-se uma sobreposição das curvas até ser atingida uma deformação de cerca de 18%. Não podendo recorrer unicamente aos dados disponíveis dada a sua ambiguidade, a lei escolhida será a lei de Voce, sendo esta a mais utilizada para a descrição do comportamento mecânico das ligas de alumínio.

Após a recolha da informação experimental relativa ao material em estudo, recorreu-se à utilização do *software* *DD3Mat*. Este permite que o utilizador insira os resultados dos ensaios experimentais, processando estes dados e fornecendo como *output* os valores que deverão ser introduzidos no ficheiro *DD3_mater0.dat*, auxiliando assim na correta caracterização do material, nomeadamente na identificação dos parâmetros de anisotropia. A identificação feita pelo *software* é baseada na minimização de uma função de erro, utilizando um *downhill simplex method*, que avalia a diferença entre os valores experimentais e os valores obtidos através das equações dos modelos constitutivos, da seguinte forma:

$$F(\mathbf{A}) = \sum_{\theta=0}^{90} \left[w_{\sigma_{\theta}^T} \left(\frac{\sigma_{\theta}^T(\mathbf{A})}{\sigma_{\theta}^T - 1} \right)^2 + w_{\sigma_{\theta}^C} \left(\frac{\sigma_{\theta}^C(\mathbf{A})}{\sigma_{\theta}^C - 1} \right)^2 + w_{r_{\theta}} \left(\frac{r_{\theta}(\mathbf{A})}{r_{\theta} - 1} \right)^2 \right] + w_{\sigma_b} \left(\frac{\sigma_b(\mathbf{A})}{\sigma_b - 1} \right)^2 + w_{r_b} \left(\frac{r_b(\mathbf{A})}{r_b - 1} \right)^2 \quad (2.1)$$

onde $\mathbf{A}$ representa o número de parâmetros associados ao modelo constitutivo escolhido; σ_{θ}^T , σ_{θ}^C e r_{θ} os valores experimentais da tensão de cedência em tensão, compressão e os coeficientes de anisotropia em tensão uniaxial, respetivamente, obtidos através de ensaios uniaxiais numa determinada orientação θ em relação à direção de laminagem; σ_b corresponde ao valor experimental da tensão de cedência obtido através de um ensaio de tração equibiaxial, r_b o valor do coeficiente de anisotropia obtido por meio de um teste de compressão; $\sigma_{\theta}^T(\mathbf{A})$, $\sigma_{\theta}^C(\mathbf{A})$, $r_{\theta}(\mathbf{A})$, $\sigma_b(\mathbf{A})$ e $r_b(\mathbf{A})$ são os valores correspondentes previstos com recurso ao modelo constitutivo utilizado. Os fatores de ponderação $w_{\sigma_{\theta}^T}$, $w_{\sigma_{\theta}^C}$, $w_{r_{\theta}}$, w_{σ_b} e w_{r_b} são utilizados para equilibrar a influência dos dados experimentais, sendo o processo de escolha destes manual e totalmente dependente da experiência e discernimento do utilizador (Barros et al., 2016).

De forma a introduzir a informação proveniente dos ensaios experimentais necessários, assim como as outras variáveis necessárias para a utilização da Equação (2.1), esta deverá ser introduzida num ficheiro denominado *expdata.dat*, representado parcialmente na Figura 2.10. Em primeiro lugar é definido o parâmetro *NSET*, que permite ao utilizador identificar o número de linhas de dados que deverão ser considerados nos cálculos. Seguidamente introduz-se a informação referente a cada um dos ensaios realizados, sendo que cada linha é referente aos dados retirados de um único ensaio, da seguinte forma: na coluna *EXPERIMENTAL DATA* o utilizador pode inserir qual a nomenclatura que pretende dar a cada linha de inserção de dados, podendo utilizar o mesmo nome se mais que um dado for retirado do mesmo ensaio; na coluna *Angle* deverá ser introduzido o ângulo do provete testado em relação à direção de laminagem; na coluna *Test* é registado o tipo de ensaio realizado, sendo os valores utilizados explicados na Tabela 2.6; na coluna *value* é inserido o resultado proveniente do ensaio; na coluna *weight* deverá ser colocado o fator de ponderação atribuído a cada um dos ensaios e, finalmente, na coluna *EPEQU* é atribuído o valor da deformação plástica equivalente. Excecionalmente para os ensaios de tração biaxiais a coluna *Angle* é representativa de $\frac{\sigma_Y}{\sigma_X}$ e a coluna *value* de σ_X .

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

```

22***** < DD3MAT V1.x > File 'dd3mat.dat' 24.02.2003 *****
**** File to input experimental data to constitute model identification ****
-----
EXPERIMENTAL DATA | NSET 7 | | | | TREND 0 |
| Angle | Test | value | (+/-) | weight | EPEQU |
E1 | 0.0 | 1 | 0.525 | | 0.05 | 0 |
E2 | 15.0 | 1 | 0.359 | | 0.05 | 0 |
E3 | 30.0 | 1 | 0.303 | | 0.05 | 0 |
E4 | 45.0 | 1 | 0.248 | | 0.05 | 0 |
E5 | 60.0 | 1 | 0.297 | | 0.05 | 0 |
E6 | 75.0 | 1 | 0.387 | | 0.05 | 0 |
E7 | 90.0 | 1 | 0.429 | | 0.05 | 0 |

```

Figura 2.10 - Excerto do ficheiro expdata.dat, utilizado para a inserção dos dados necessários para a caracterização da anisotropia do material

Tabela 2.6 - Valor a inserir na coluna *Test* do ficheiro *expdata.dat* consoante o tipo de ensaio realizado

Valor "Test"	Dado a considerar
1	Coeficiente de anisotropia em tração uniaxial
2	Ensaio de tração equibiaxial
3	Tensão de cedência em tração uniaxial
7	Ensaio de tração biaxial

Na tabela abaixo é apresentada uma síntese de toda a informação experimental retirada dos ensaios representados anteriormente, conforme deve ser introduzida no *software* DD3Mat, sendo esta utilizada para a caracterização da liga de alumínio.

Tabela 2.7 - Síntese de todos os dados retirados dos ensaios experimentais realizados no *benchmark*

Ensaio	Angle	Test	Value
E1	0	1	0,525
E2	15	1	0,359
E3	30	1	0,303
E4	45	1	0,248
E5	60	1	0,297
E6	75	1	0,387
E7	90	1	0,429
E1	0	3	129,87
E2	15	3	125,06
E3	30	3	117,40
E4	45	3	112,58
E5	60	3	119,35
E6	75	3	123,12
E7	90	3	120,26
E8	0	2	123,36
E9	0,255	7	32,793
E10	0,501	7	64,615
E11	1,339	7	131,189
E12	2,000	7	134,126
E13	3,983	7	130,699
E14	0,753	7	98,881

3. MODELAÇÃO CONSTITUTIVA

No presente capítulo são tecidas considerações relativamente à modelação constitutiva de materiais elastoplásticos. A informação nele presente baseia-se fundamentalmente em dois documentos do mesmo autor, Alves, J.L., denominados por “Elastoplasticidade – Modelação Constitutiva” (2022) e “Seminário de Agregação – *Isotropy Matters*” (2017).

A modelação do comportamento plástico dos materiais é de extrema importância quando analisamos os processos de conformação metálica. Para obtermos esta modelação são necessários três componentes essenciais: critério de cedência, lei de encruamento e lei de escoamento associada. Com estes é possível determinar a superfície de plasticidade inicial e a sua evolução. Abaixo encontra-se uma breve descrição de cada um destes componentes:

- Critério de cedência: modelo que define uma superfície representativa do limite entre o domínio elástico e plástico de um determinado material no espaço das tensões.
- Lei de encruamento: lei que permite compreender a evolução da superfície inicial com o decorrer da deformação plástica. Esta evolução pode ser uma expansão, contração, translação, ...
- Lei de escoamento associada: permite a associação entre os valores das deformações e das tensões.

3.1. CRITÉRIOS DE PLASTICIDADE

Como foi mencionado anteriormente, um critério de plasticidade (ou critério de cedência) é um modelo que permite definir uma superfície contínua representativa do limite entre o domínio elástico e plástico de um determinado material no espaço das tensões. Esta superfície corresponde a todos os estados de tensão para os quais ocorre o princípio da deformação plástica (Alves 2022).

Os critérios de plasticidade devem obedecer a algumas restrições relativamente à sua representação matemática das superfícies, entre as quais:

- Ser independente da pressão hidrostática, sendo isto verdade para materiais metálicos com baixos índices de porosidades.
- A superfície deve ser convexa e não devem existir pontos singulares, garantindo uma relação única entre o estado de tensão e a velocidade de deformação.
- Estar ligado a uma lei de plasticidade associada, sendo adotada para potencial plástico a superfície de plasticidade definida no espaço das tensões, e é definido que o tensor velocidade de deformação plástica deve ser sempre ortogonal à superfície de plasticidade.

De uma forma geral, o estado de tensão num determinado instante é definido através de uma matriz, o tensor de tensões. Este é descrito abaixo através da Equação (3.1(3.1)).

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

A pressão hidrostática possui um valor igual para as três tensões principais, tendo um valor nulo para as tensões de corte. Desta forma, esta constitui uma matriz diagonal onde os valores apresentados para o componente hidrostático são uma média dos valores da tensão principal de cada eixo. Assim, representando a pressão hidrostática por σ_m , sabe-se que:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (3.2)$$

Como foi mencionado anteriormente, a pressão hidrostática não tem qualquer implicação no cálculo da deformação plástica, sendo possível subtrair a matriz hidrostática ao tensor das tensões, obtendo o tensor das tensões desviador, σ' , representado na Equação (3.3).

$$\sigma' = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} - \sigma_m & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} - \sigma_m & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} - \sigma_m \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Recentemente têm sido propostos vários critérios de plasticidade que visam descrever o mais fielmente possível o comportamento plástico dos materiais, podendo ser classificados como isotrópicos ou anisotrópicos. Nesta dissertação será dada especial atenção aos modelos constitutivos apropriados para a utilização em materiais dúcteis.

3.1.1. CRITÉRIOS ISOTRÓPICOS

Um objeto diz-se isotrópico quando demonstra propriedades que possuem valores iguais, independentemente da direção em que esta foi medida (Merriam-Webster, 2024b).

3.1.1.1. CRITÉRIO DE TRESCA

Um dos primeiros critérios de plasticidade surge em 1864, apresentado por Henri Tresca. Este enuncia que a deformação plástica inicia quando a tensão de corte máxima alcança um valor crítico. A superfície gerada por este critério no espaço das tensões possui a geometria de um prisma hexagonal, tratando-se de um hexágono quando projetado no plano (σ_1, σ_2) e apresenta a configuração de um hexágono regular quando projetado no plano desviador π (Figura 3.4, página 22). A sua configuração torna difícil a implementação no método de elementos finitos, devido à existência de pontos singulares na superfície de plasticidade (Alves 2017).

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Matematicamente, o critério de Tresca pode ser definido pela Equação (3.4), onde σ_I representa a tensão principal de valor máximo, σ_{III} a tensão principal de valor mínimo e σ_y a tensão limite de elasticidade em tração uniaxial (Alves, 2022).

$$\sigma_y = \sigma_I - \sigma_{III} \quad (3.4)$$

Assim, podemos definir a superfície de plasticidade no plano (σ_1, σ_2) como o hexágono representado abaixo, na Figura 3.1.

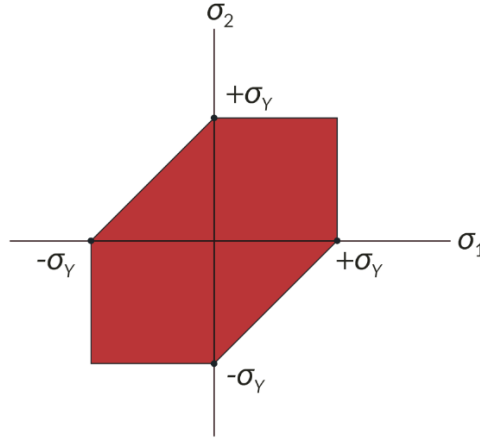


Figura 3.1 - Superfície de plasticidade obtida através do critério de Tresca

3.1.1.2. CRITÉRIO DE VON MISES

Depois do critério de Tresca surge em 1913 um dos critérios mais utilizados na modelação isotrópica, o critério de Von Mises. Este é um critério simples, de fácil implementação e que enuncia que a deformação inicia quando a energia de distorção máxima é igual à energia de distorção de cedência num ensaio de tração uniaxial.

Matematicamente pode ser descrito pela expressão presente na Equação (3.5), onde σ_y representa a tensão limite de elasticidade em tração uniaxial, σ_1, σ_2 e σ_3 representam as tensões principais e a segunda parcela desta igualdade é denominada por tensão equivalente de Von Mises.

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3.5)$$

Este critério pode ser também definido pela Equação (3.7)(3.6), sendo J_2 o segundo invariante do tensor desviador σ' e $\bar{\sigma}$ a tensão equivalente de Von Mises.

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + \sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 \quad (3.6)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3J_2} \quad (3.7)$$

A superfície gerada por este critério no espaço das tensões possui a geometria de um cilindro, tratando-se de uma elipse quando projetado no plano (σ_1, σ_2) e apresenta a configuração de um círculo quando projetado no plano desviador π (Figura 3.4, página 22). No plano (σ_1, σ_2) a superfície elíptica do critério Von Mises envolve todo o hexágono do critério de Tresca, demonstrando assim que o segundo se trata de um critério mais conservador.

Abaixo, representado na Figura 3.2, surge um exemplo de uma superfície de plasticidade obtida através do critério de Von Mises.

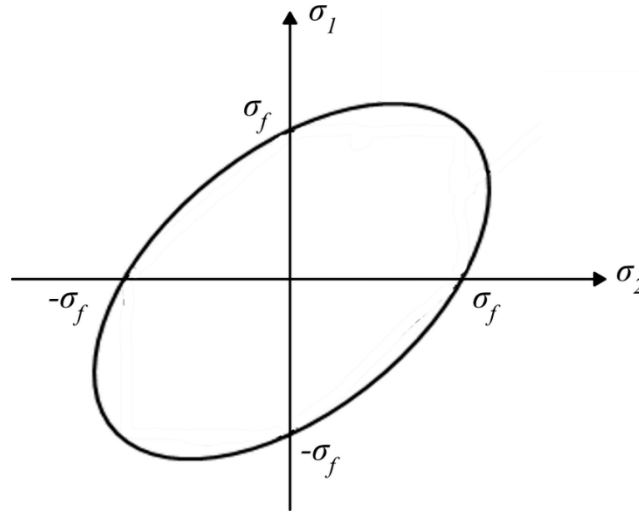


Figura 3.2 - Superfície de plasticidade obtida através do critério de Von Mises – adaptado de (Prabowo et al., 2022)

3.1.1.3. CRITÉRIO DE DRUCKER

Em 1949 é proposto um novo critério por Drucker, critério este que sugere uma superfície de plasticidade intermédia entre os critérios de Tresca e Von Mises, como pode ser verificado na Figura 3.3. Matematicamente, é descrito pela Equação (3.10), onde J_2 e J_3 são o segundo e terceiro invariantes do tensor desviador σ' e c trata-se de uma constante do material (Alves 2022).

$$k^2 = 27 \left(\frac{\sigma_y}{3} \right)^6 \quad (3.8)$$

$$J_3 = \frac{2}{27} I_1^3 - \frac{1}{3} I_1 I_2 + I_3 \quad (3.9)$$

$$k^2 = J_2^3 - c J_3^2 \quad (3.10)$$

Na Equação (3.9) são utilizados o primeiro, segundo e terceiro invariantes do tensor das tensões σ_{ij} representadas por I_1, I_2 e I_3 , respetivamente. Estas são dadas pelas seguintes expressões:

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (3.11)$$

$$I_2 = \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{11}\sigma_{33} + \sigma_{22}\sigma_{33} - \sigma_{12}^2 - \sigma_{23}^2 - \sigma_{31}^2 \quad (3.12)$$

$$I_3 = \sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33} + 2\sigma_{12}\sigma_{23}\sigma_{31} - \sigma_{12}^2\sigma_{33} - \sigma_{23}^2\sigma_{11} - \sigma_{31}^2\sigma_{22} \quad (3.13)$$

A constante c necessita de possuir valores tais que $-\frac{27}{8} \leq c \leq 2,25$ para ser possível garantir a convexidade da superfície de plasticidade. Este parâmetro pode ser expresso em função da razão entre a tensão em corte puro e a tensão de cedência no caso da tração uniaxial, como é possível verificar na Equação abaixo, onde temos que $\sigma_1 = \sigma_T$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

$$c = \frac{27}{4} \left[1 - \left(\frac{\tau_y \sqrt{3}}{\sigma_T} \right)^6 \right] \quad (3.14)$$

Assim, é possível deduzir que:

- Com valores de $c < 0$ a superfície de Drucker fica fora da curva de Von Mises e $\sigma_T < \sqrt{3}\tau_y$;
- Com valores de $c > 0$ a superfície de Drucker fica dentro da curva de Von Mises e $\sigma_T > \sqrt{3}\tau_y$;
- Para $c = 0$ é obtida a curva representativa do critério de Von Mises

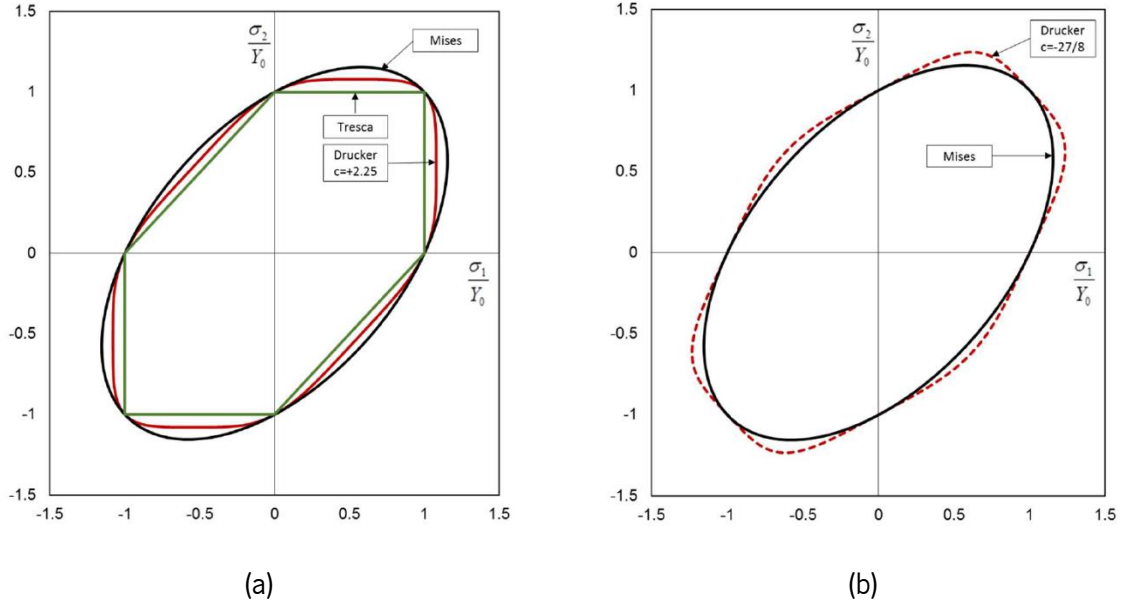


Figura 3.3 - Superfície de plasticidade obtida através do critério de Drucker com: (a) $c = +2,25$ (linha vermelha), Von Mises (linha preta) e Tresca (linha verde); (b) $c = -\frac{27}{8}$ (linha tracejada vermelha) e Von Mises (linha preta) – retirado de (Alves, 2017)

3.1.1.4. CRITÉRIO DE HOSFORD

William Hosford propõe em 1972 um critério de cedência que surge como uma evolução do critério de cedência de Von Mises, podendo ser descrito através da seguinte expressão:

$$A\bar{\sigma}^m = |\sigma_1 - \sigma_2|^m + |\sigma_1 - \sigma_3|^m + |\sigma_2 - \sigma_3|^m \quad (3.15)$$

sendo σ_1 , σ_2 e σ_3 as tensões principais do tensor das tensões, A um fator de escala da tensão e $\bar{\sigma}$ a tensão equivalente calculada de acordo com Hosford.

Hosford demonstra através da análise de limites que este critério se equipara ao critério de Tresca quando $m \rightarrow +\infty$. Para o intervalo $2 < m < 4$, o critério encontra-se fora da superfície de Von Mises e a curva limitante mais externa ocorre quando $m = 2,767$, ou seja, muito próximo do caso de Mises. Também é demonstrável que para $m = 6$, o critério de Hosford assemelha-se a um caso particular do critério de Drucker, com $c = 1,08$. Este critério torna-se também equivalente ao critério de Von Mises quando temos $A = 2$. (Alves, 2017)

3.1.1.5. CRITÉRIO GENERALIZADO DE KARAFILLIS E BOYCE

Em 1993, Karafillis e Boyce relatam a existência de fronteiras superiores e inferiores para as superfícies de plasticidade isotrópicas de qualquer material que possua uma tensão de limite de elasticidade conhecida. A fronteira inferior é coincidente com a superfície de Tresca e a fronteira superior representa uma superfície baseada na semissoma dos dois maiores diâmetros dos círculos de Mohr (Alves 2017).

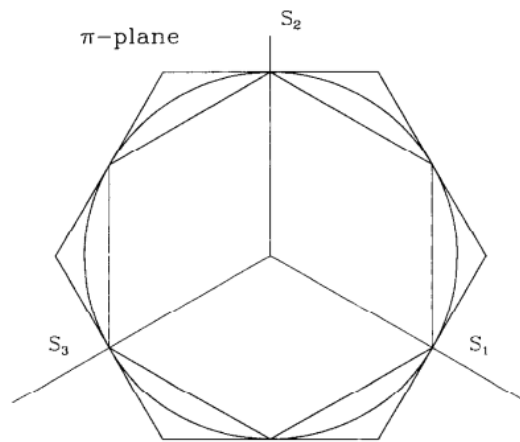


Figura 3.4 - Representação do critério de Von Mises e fronteiras superior e inferior no plano π - retirado de (Karafillis & Boyce, 1993)

Na figura acima estão representados a superfície de plasticidade do critério de Von Mises e respetivos limites superiores e inferiores no plano desviador π , plano perpendicular à linha da pressão hidrostática.

Quando as superfícies de plasticidade isotrópicas se encontram entre as superfícies do limite inferior e de Von Mises são matematicamente descritas pelo critério de Hosford:

$$\Phi_1(\sigma') = 2\sigma_y^{2k} = (\sigma_1 - \sigma_2)^{2k} + (\sigma_2 - \sigma_3)^{2k} + (\sigma_1 - \sigma_3)^{2k} \quad (3.16)$$

sendo σ_1 , σ_2 e σ_3 as tensões principais do tensor das tensões desviador. A expressão trata-se de uma generalização do critério de Von Mises, sendo k um valor inteiro e positivo. Para $k = 1$ obtemos uma equivalência à proposta de Von Mises e para $k \rightarrow +\infty$ a expressão tende para a proposta de Tresca. No

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

intervalo de $1 < k < +\infty$, com k inteiro, são descritas todas as superfícies compreendidas entre as superfícies do limite inferior e de Von Mises.

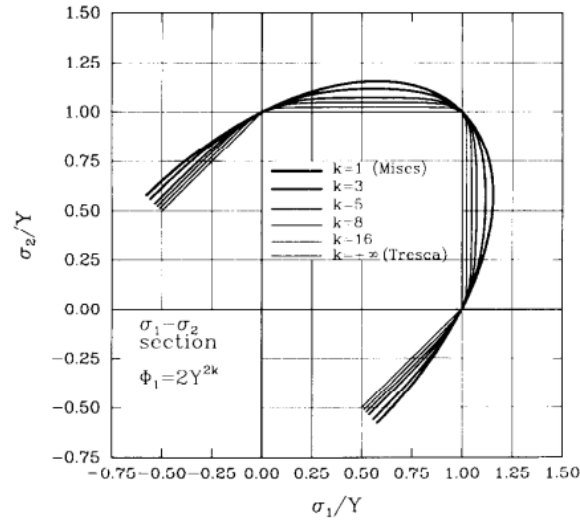


Figura 3.5 - Representação geométrica de diferentes superfícies de plasticidade isotrópica no espaço (σ_1, σ_2) , entre a fronteira inferior (Tresca) e Von Mises – retirado de (Karafillis & Boyce, 1993)

Quando as superfícies de plasticidade isotrópicas se encontram entre as superfícies de Von Mises e do limite superior são matematicamente descritas pela seguinte expressão:

$$\Phi_2(\sigma') = \frac{2^{2k} + 2}{3^{2k}} \sigma_y^{2k} = \sigma_1^{2k} + \sigma_2^{2k} + \sigma_3^{2k} \quad (3.17)$$

sendo σ_1 , σ_2 e σ_3 as tensões principais do tensor das tensões desviador e k um valor inteiro e positivo. Novamente, para $k = 1$ obtemos uma equivalência à proposta de Von Mises e para $k \rightarrow +\infty$ a expressão torna-se representativa da fronteira limite superior.

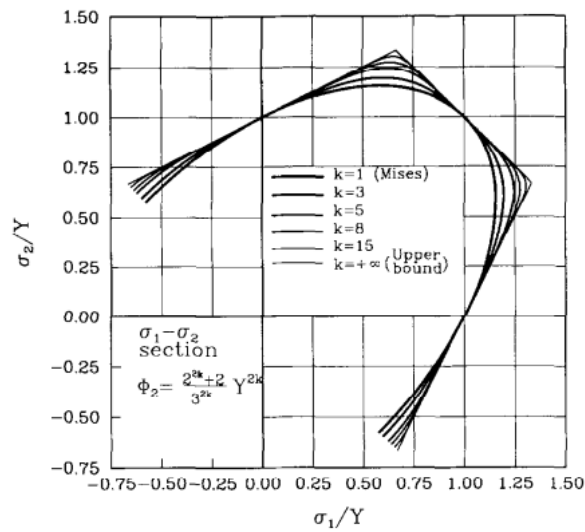


Figura 3.6 - Representação geométrica de diferentes superfícies de plasticidade isotrópica no espaço (σ_1, σ_2) , entre Von Mises e a fronteira superior – retirado de (Karafillis & Boyce, 1993)

Karafilis e Boyce formularam uma superfície de plasticidade genérica que é capaz de descrever todas as superfícies de plasticidade situadas entre os limites inferior e superior. Para este fim foi obtida uma expressão matemática generalizada através da combinação das Equações (3.16) e (3.17), resultando:

$$\Phi(\sigma') = 2\sigma_y^{2k} = (1 - c)\Phi_1(\sigma') + c \frac{3^{2k}}{2^{2k-1} + 1} \Phi_2(\sigma') \quad (3.18)$$

sendo c um parâmetro isotrópico tal que $c \in [0,1]$

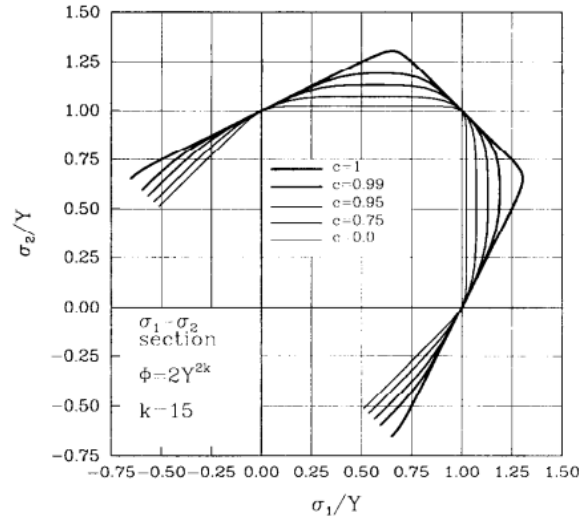


Figura 3.7 - Representação geométrica de diferentes superfícies de plasticidade isotrópica no espaço (σ_1, σ_2) , obtidas pelo critério de plasticidade isotrópico generalizado de Karafilis e Boyce, com $k=15$ e fazendo variar o parâmetro c entre 0 e 1 na equação (3.17) - retirado de (Karafilis & Boyce, 1993)

3.1.1.6. CRITÉRIO CPB06

Por fim, em 2006, é proposto por Cazacu e outros co-autores um novo critério de plasticidade direcionado a metais com estruturas cristalinas hexagonais compactas e fortes assimetrias de tração-compressão (José Luís Alves 2017). Este novo critério pode ser descrito matematicamente pela seguinte expressão:

$$\bar{\sigma} = B[(|\sigma'_1| - k|\sigma'_1|)^a + (|\sigma'_2| - k|\sigma'_2|)^a + (|\sigma'_3| - k|\sigma'_3|)^a]^{\frac{1}{a}} \quad (3.19)$$

na qual σ_1 , σ_2 e σ_3 representam as tensões principais do tensor desviador e B representa uma constante do material tal que $\bar{\sigma}$ é reduzido à tensão de cedência em tração uniaxial, σ_T .

$$k = \left[\frac{3^a}{2^a(1 - k)^a + 2(1 + k)^a} \right]^{\frac{1}{a}} \quad (3.20)$$

onde k é também um parâmetro do material que, na forma isotrópica, é o único parâmetro responsável por descrever a assimetria de tensão-compressão, podendo ser descrito através da razão entre as tensões de cedência em tração σ_T e compressão σ_C uniaxiais, sendo k válido para $k \in [-1,1]$, tal que:

$$\begin{cases} 0 < k \leq 1 & , & 1 < \frac{\sigma_T}{\sigma_C} \leq \sqrt{2} \\ k = 0 & , & \sigma_T = \sigma_C \\ -1 \leq k < 0 & , & \frac{\sqrt{2}}{2} \leq \frac{\sigma_T}{\sigma_C} < 1 \end{cases} \quad (3.21)$$

com

$$k = \frac{1 - f\left(\frac{\sigma_T}{\sigma_C}\right)}{1 + f\left(\frac{\sigma_T}{\sigma_C}\right)} \quad (3.22)$$

$$f(x) = \sqrt{\frac{2 - x^2}{2x^2 - 1}} \quad (3.23)$$

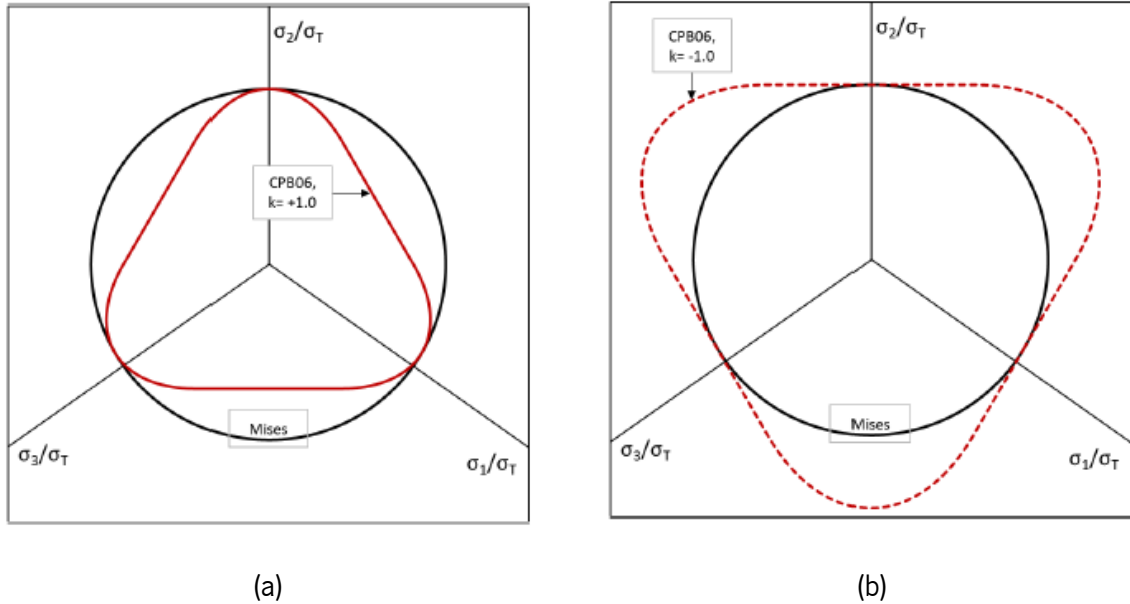


Figura 3.8 – Representação no plano desviador do critério CPB06 para: (a) $k = 1$; e (b) $k = -1$ em comparação com o critério de Von Mises - retirado de (Alves, 2017)

Na Figura 3.8 encontram-se representadas as superfícies de plasticidade dos critérios CPB06, a vermelho e Von Mises, a preto, no plano desviador normalizado ao corte. Em (a), temos uma superfície de CPB06 tal que $k = 1$, criando uma superfície que se encontra inteiramente dentro do círculo de Von Mises. Por outro lado, em (b), temos uma superfície de CPB06 tal que $k = -1$, criando uma superfície na qual é circunscrita a superfície de Von Mises. Deste modo, é possível deduzir que com $k = 1$ o critério CPB06 é mais conservador que Von Mises e, com $k = -1$, o oposto ocorre.

Devido à assimetria na tensão tração-compressão, o critério com $k = -1$ possui maior tensão de cedência uniaxial à compressão que em uniaxial à tração, sendo que o contrário se verifica quando se tem $k = 1$.

3.1.2. CRITÉRIOS ANISOTRÓPICOS

Um objeto diz-se anisotrópico quando demonstra propriedades que possuem valores diferentes, dependendo da direção em que esta foi medida (Merriam-Webster, 2024a).

Vários critérios de plasticidade anisotrópicos foram propostos por vários autores, destacando-se Hill (1948, 1979, 1990 e 1993), Bassani (1977), Budiansky (1984), Barlat *et al.* (1989, 1991, 1994, 1997, 2000), Karafillis e Boyce (1993), Vegter *et al.* (1998), Banabic *et al.* (2000) e Cazacu e Barlat (2001). Dos mencionados, apenas Karafillis e Boyce (1993) e Vegter *et al.* (1998) não respeitam as regras mencionadas no subcapítulo 3.1, restringindo-se à modelação do comportamento de materiais anisotrópicos de comportamento ortotrópico (materiais que possuem três planos de simetria de propriedades mutuamente ortogonais em cada ponto material) (Alves, 2022).

Abaixo encontram-se breves explicações dos critérios mais relevantes para a presente dissertação.

3.1.2.1. CRITÉRIO HILL'48

O critério de Hill'48 é dos critérios mais populares no campo da simulação computacional de processos de conformação, particularmente em processos que utilizam chapas metálicas cujo coeficiente de anisotropia é superior a 1 (aços, por exemplo). Este critério trata-se de uma generalização do critério quadrático isotrópico de Von Mises para materiais anisotrópicos ortotrópicos (Alves, 2022). Para a descrição deste critério são utilizados seis parâmetros de anisotropia (F , G , H , L , M e N), cuja descrição necessita da realização de três ensaios de tração uniaxial a 0° , 45° e 90° da direção de laminagem. Estes podem ser calculados através das seguintes expressões:

$$G = \frac{1}{r_0 + 1} \quad (3.24)$$

$$H = r_0 \times G \quad (3.25)$$

$$F = \frac{H}{r_{90}} \quad (3.26)$$

$$M = L = 1,5 \quad (3.27)$$

$$N = 0,5 \times \frac{(r_0 + r_{90}) \times (2r_{45} + 1)}{r_{90} \times (r_0 + 1)} \quad (3.28)$$

No referencial Oxyz, este critério pode ser descrito matematicamente pela seguinte expressão:

$$\sigma_y^2 = F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{xz}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 \quad (3.29)$$

3.1.2.2. CRITÉRIO YLD91

Os critérios de plasticidade propostos por Barlat *et al.* são válidos apenas para o estado plano de tensão, excetuando apenas o critério Yld91. Este trata-se de uma extensão do critério de Hosford para materiais que apresentem apenas anisotropia ortotrópica. (Alves, 2022)

O critério Yld91 propõe a utilização de uma transformação linear $\mathbf{L}$ do tensor das tensões $\boldsymbol{\sigma}$, sendo descrito matematicamente através das expressões:

$$\mathbf{s} = \mathbf{L} : (\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}) \quad (3.30)$$

$$2\sigma_y^a = |s_1 - s_2|^a + |s_2 - s_3|^a + |s_1 - s_3|^a \quad (3.31)$$

onde $\mathbf{L}$ representa um tensor de quarta ordem, simétrico e desviador, $\mathbf{X}$ representa o tensor das tensões inversas, s_1 , s_2 e s_3 representam as tensões principais do tensor $\mathbf{s}$, σ_y a tensão de cedência em tração uniaxial. A constante a pode adquirir qualquer valor real tal que $1 < a < +\infty$, dependendo da anisotropia e da estrutura cristalina do material, sendo que Hosford 1972 propõe os valores de $a = 6$ e $a = 8$ para materiais com estruturas cristalinas CCC e CFC, respetivamente.

Para a descrição deste critério são utilizados seis parâmetros de anisotropia: c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 e c_6 .

3.1.2.3. CRITÉRIO DE KARAFILLIS E BOYCE

O critério de Karafillis e Boyce adota a metodologia proposta em Barlat *et al.* (1991), alargando-a a materiais de comportamentos não exclusivamente ortotrópicos. Neste caso, o estado de tensão desviador $\mathbf{s}$, obtido através de uma transformação linear $\mathbf{L}$ do tensor das tensões $\boldsymbol{\sigma}$ ou $\boldsymbol{\sigma}'$, é designado por “Estado Plástico Isotrópico Equivalente” e determinado pelas seguintes expressões:

$$\mathbf{s} = \mathbf{L} : \boldsymbol{\sigma} \quad (3.32)$$

$$\mathbf{s} = \mathbf{L} : \boldsymbol{\sigma}' \quad (3.33)$$

ou, tendo em consideração o tensor das tensões efetivo, $\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}$:

$$\mathbf{s} = \mathbf{L} : (\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}) \quad (3.34)$$

$$\mathbf{s} = \mathbf{L} : (\boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{X}) \quad (3.35)$$

Este critério utiliza mais um parâmetro de anisotropia que o critério Yld91, o parâmetro c , totalizando assim sete parâmetros, sendo estes: c , c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 e c_6 . Posteriormente, em 1997,

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Barlat afirma que o parâmetro c pouco acrescenta à caracterização da anisotropia do material, devido ao facto de este se tratar de um parâmetro exclusivamente isotrópico (Alves 2022).

3.1.2.4. CRITÉRIO CB2001

Cazacu e Barlat formulam em 2001 duas extensões do critério de plasticidade isotrópico de Drucker (1949), expresso em função do segundo e terceiro invariantes do tensor desviador das tensões, J_2 e J_3 , respetivamente.

A primeira formulação propõe a introdução da anisotropia do material no critério isotrópico de Drucker, através da utilização de uma transformação linear $\mathbf{L}$, inicialmente proposta por Barlat (1991) e Karafillis e Boyce (1993). (Alves, 2022)

$$\mathbf{s} = \mathbf{L} : (\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}) \quad (3.36)$$

$$\mathbf{s} = \mathbf{L} : (\boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{X}) \quad (3.37)$$

Pode-se calcular o segundo e terceiro invariantes do tensor das tensões linearmente transformado $\mathbf{s}$ através das Equações (3.38) e (3.39), respetivamente.

$$J_2^s = \text{tr } \mathbf{s}^2 / 2 \quad (3.38)$$

$$J_3^s = \text{tr } \mathbf{s}^3 / 3 \quad (3.39)$$

Utilizando estes valores na Equação (3.10) tem-se que:

$$k^2 = (J_2^s)^3 - c(J_3^s)^2 \quad (3.40)$$

Similarmente ao que é estipulado no capítulo 3.1.1.3, de forma a garantir a convergência do critério, c deve assumir valores tais que $-\frac{27}{8} \leq c \leq 2,25$.

A segunda formulação é designada por “Generalização do critério de Drucker à ortotropia”, para a qual foram desenvolvidas expressões generalizadas para o segundo e terceiro invariantes do tensor das tensões J_2^0 e J_3^0 , respetivamente. Estes são polinómios homogéneos de 2º e 3º graus das tensões, independentes das componentes hidrostáticas do tensor das tensões e invariantes em relação a qualquer transformação que envolva os planos de ortotropia. (Alves, 2022)

J_2^0 e J_3^0 são dados pelas seguintes expressões:

$$J_2^0 = \frac{a_1}{6} (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \frac{a_2}{6} (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + \frac{a_3}{6} (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + a_4 \sigma_{xy}^2 + a_5 \sigma_{xz}^2 + a_6 \sigma_{yz}^2 \quad (3.41)$$

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

$$\begin{aligned}
J_3^0 = & \frac{1}{27}(b_1 + b_2)\sigma_{xx}^3 + \frac{1}{27}(b_3 + b_4)\sigma_{yy}^3 + \frac{1}{27}[2(b_1 + b_4) - b_2 - b_3]\sigma_{zz}^3 \\
& - \frac{1}{9}(b_1\sigma_{yy} + b_2\sigma_{zz})\sigma_{xx}^2 - \frac{1}{9}(b_3\sigma_{zz} + b_4\sigma_{yy})\sigma_{yy}^2 \\
& - \frac{1}{9}[(b_1 - b_2 + b_4)\sigma_{xx} + (b_1 - b_3 + b_4)\sigma_{yy}]\sigma_{zz}^2 \\
& + \frac{2}{9}(b_1 + b_4)\sigma_{xx}\sigma_{yy}\sigma_{zz} - \frac{\sigma_{xz}^2}{3}[2b_9\sigma_{yy} - b_8\sigma_{zz} - (2b_9 - b_8)\sigma_{xx}] \\
& - \frac{\sigma_{xy}^2}{3}[2b_{10}\sigma_{zz} - b_5\sigma_{yy} - (2b_{10} - b_5)\sigma_{xx}] \\
& - \frac{\sigma_{yz}^2}{3}[(b_6 + b_7)\sigma_{xx} - b_6\sigma_{yy} - b_7\sigma_{zz}] + 2b_{11}\sigma_{xy}\sigma_{yz}\sigma_{xz}
\end{aligned} \tag{3.42}$$

A generalização à anisotropia ortotrópica é obtida quando introduzidos os invariantes no critério de Drucker, obtendo-se:

$$k^2 = (J_2^0)^3 - c(J_3^0)^2 \tag{3.43}$$

Este critério de plasticidade contempla a utilização de dezoito parâmetros de anisotropia ($a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11}$ e c) para estados de tensão triaxiais e onze parâmetros de anisotropia para estados planos de tensão. No caso de materiais com comportamentos isotrópicos atribui-se o valor de 1 a todos os parâmetros a_x e b_x , determinando-se assim que $J_2^0 = J_2$ e $J_3^0 = J_3$ (Alves, 2022).

No caso de processos de conformação de chapa deve-se considerar que esta está sujeita a um estado plano de tensão, visto que, face à dificuldade em quantificar grandezas na direção da espessura, estas são reduzidas ao caso isotrópico. Assim, dos dezoito parâmetros de anisotropia do processo, sete passam a ter um valor unitário, sobrando onze para caracterizar o material anisotropicamente, podendo estes ser determinados através de resultados experimentais de tensões limite de elasticidade em tração uniaxial e de coeficientes de anisotropia em, no mínimo, cinco orientações distintas em relação à direção de laminagem. Podem também ser utilizados ensaios de tração biaxial.

3.1.2.5. EXTENSÃO DO CRITÉRIO CPB06 PARA INCLUSÃO DA ANISOTROPIA

De forma a adaptar o critério isotrópico ao comportamento anisotrópico dos materiais, foi realizada uma transformação que permite modelar a resposta do material em diferentes direções. Esta é obtida através da introdução de um tensor transformado Σ , que se trata de uma transformação linear do tensor desviador S , definido por:

$$\Sigma = C[S] \tag{3.44}$$

onde $\mathbf{C}$ é um tensor de quarta ordem que contém os coeficientes de anisotropia do presente critério. Este deve satisfazer duas condições: (i) satisfazer as simetrias maior e menor e (ii) ser invariante em relação a grupo de simetria ortotrópico. Para uma chapa metálica, $\mathbf{C}$ pode ser representado como:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & & & \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

sendo C_x ($x = 11, 12, 13, 22, 23, 33, 44, 55, 66$) os valores dos nove coeficientes de anisotropia do modelo CPB06 (Cazacu et al., 2006).

3.2. LEIS DE ENCRUAMENTO

Com o decorrer da deformação plástica a superfície de plasticidade inicial vai evoluir, podendo esta evolução tratar-se de uma expansão, contração, translação ou distorção. Esta evolução é ditada através de uma lei de encruamento.

No caso da simulação de processos de conformação de chapa supõe-se uma simplificação onde ocorre uma expansão isotrópica da superfície de plasticidade (encruamento isotrópico) e, eventualmente, uma deslocação em função do trabalho plástico (encruamento cinemático) (Alves, 2022).

Na Figura 3.9 é possível verificar em (a) o caso da evolução consoante um encruamento isotrópico, uma expansão igual em todas as direções onde o centro para ambas as superfícies de plasticidade é o mesmo e em (b) a evolução da superfícies consoante um encruamento cinemático, onde ocorre uma translação da superfície no espaço das tensões.

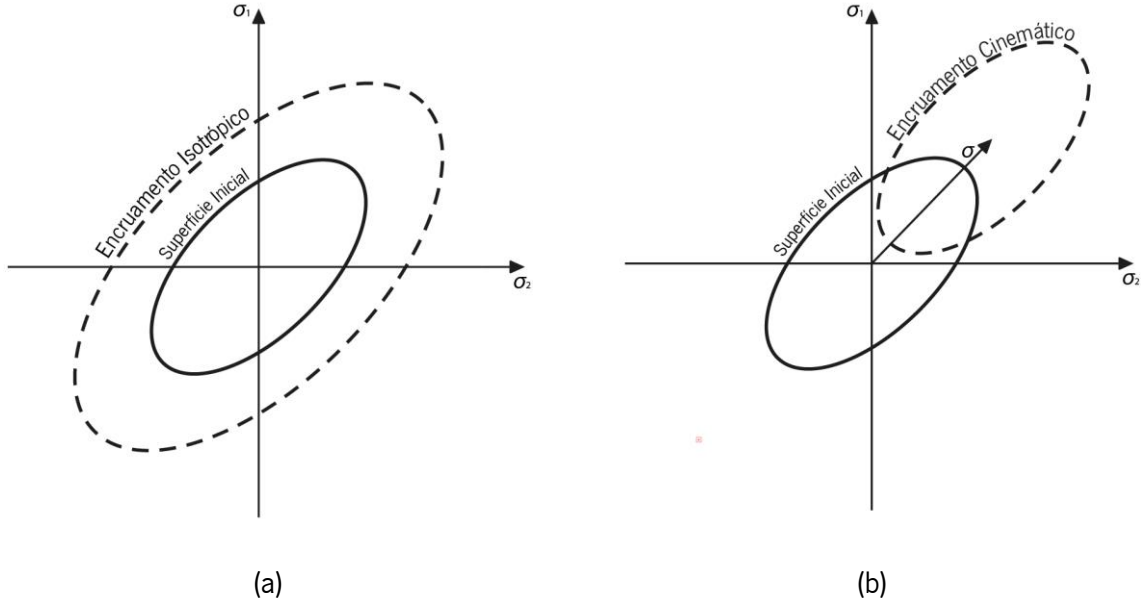


Figura 3.9 – Superfície inicial de plasticidade (elipses a cheio) com subsequente encruamento (a) isotrópico e (b) cinemático (elipses a traço interrompido)

De forma a retratar o fenómeno do encruamento foram criadas várias leis para auxiliar na descrição dos comportamentos mencionados anteriormente. No *software* DD3Imp apenas foram implementadas duas leis: Lei de Swift e Lei de Voce.

A lei de Swift, descrita pela Equação (3.46), é apropriada para retratar o comportamento de materiais que exibam encruamento isotrópico sem saturação.

$$Y = C(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n \quad (3.46)$$

Esta lei é normalmente utilizada para a caracterização de aços, visto que estes não apresentam saturação na tensão de escoamento. Nesta lei Y representa a tensão de escoamento (evolução da tensão limite de elasticidade), $\bar{\varepsilon}^p$ a deformação plástica equivalente e ε_0 e n são constantes do material que necessitam de ser determinadas experimentalmente (Alves, 2022). ε_0 pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_0 = \sqrt[n]{\left(\frac{Y_0}{K}\right)} \quad (3.47)$$

onde K e n são dois parâmetros constitutivos da Lei de Swift e Y_0 se trata da tensão limite de elasticidade inicial em tração uniaxial.

A lei de Voce, descrita pela Equação (3.48), é apropriada para retratar o comportamento de materiais que exibam encruamento isotrópico com saturação.

$$Y = Y_0 + (Y_{sat} - Y_0) \cdot [1 - e^{(-C_Y \cdot \bar{\varepsilon}^p)}] \quad (3.48)$$

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

onde Y e Y_0 são a tensão de escoamento e a tensão limite de elasticidade inicial em tração uniaxial, respetivamente, $\bar{\varepsilon}^p$ a deformação plástica equivalente e Y_{sat} e C_Y constantes do material que necessitam de ser determinadas experimentalmente.

3.3. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS CONSTITUTIVOS

Em engenharia, muitos materiais exibem anisotropia, significando que as suas propriedades mecânicas variam dependendo da direção em que são medidas. Desta forma, a correta identificação e quantificação dos parâmetros anisotrópicos são fundamentais, tanto para compreender a melhor forma de empregar o material em questão como para possibilitar a correta realização de simulações numéricas, tornando estas o mais similar possível ao que se verifica experimentalmente.

O foco do presente capítulo trata da identificação dos parâmetros anisotrópicos da liga estudada no decorrer da presente dissertação, para vários modelos fenomenológicos. Esses parâmetros fornecem informações valiosas sobre como o material responde a tensões, deformações e outras forças aplicadas. Os valores obtidos baseiam-se nos dados experimentais já apresentados no capítulo 2.2, tendo como maior foco o ajuste dos valores referentes aos fatores de ponderação presentes na Equação (2.1).

Na presente dissertação foram realizados dois tipos de caracterizações distintas, sendo estas denominadas “caracterização real” e “caracterização virtual”. Ambas as caracterizações são sustentadas apenas na utilização de ensaios de tração uniaxiais, sendo que a caracterização real contempla todos os ensaios disponíveis no *benchmark* (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°), enquanto a caracterização virtual utiliza apenas os valores experimentais das direções 0°, 45° e 90°, sendo os restantes obtidos através da extração de determinados pontos das curvas do modelo Hill48. Os valores para os coeficientes de anisotropia virtuais são obtidos através da curva de Hill48 cujo cálculo é realizado utilizando r_0 , r_{45} , r_{90} e σ_0 ; os valores para σ virtuais são obtidos através da curva de Hill48 cujo cálculo é realizado utilizando σ_0 , σ_{45} , σ_{90} e r_0 . Os dados obtidos através deste método são apresentados na Tabela 3.1, sendo apresentadas na Figura 3.10 as curvas que permitiram esta identificação.

Tabela 3.1 – Valores virtuais obtidos para coeficientes de anisotropia e tensão utilizados nas caracterizações virtuais

Ângulo em relação a RD (°)	Coefficiente de anisotropia	Tensão
0	0,525	129,87
15	0,456	125,36
30	0,320	117,23
45	0,248	112,58
60	0,289	113,45
75	0,383	117,72
90	0,429	120,26

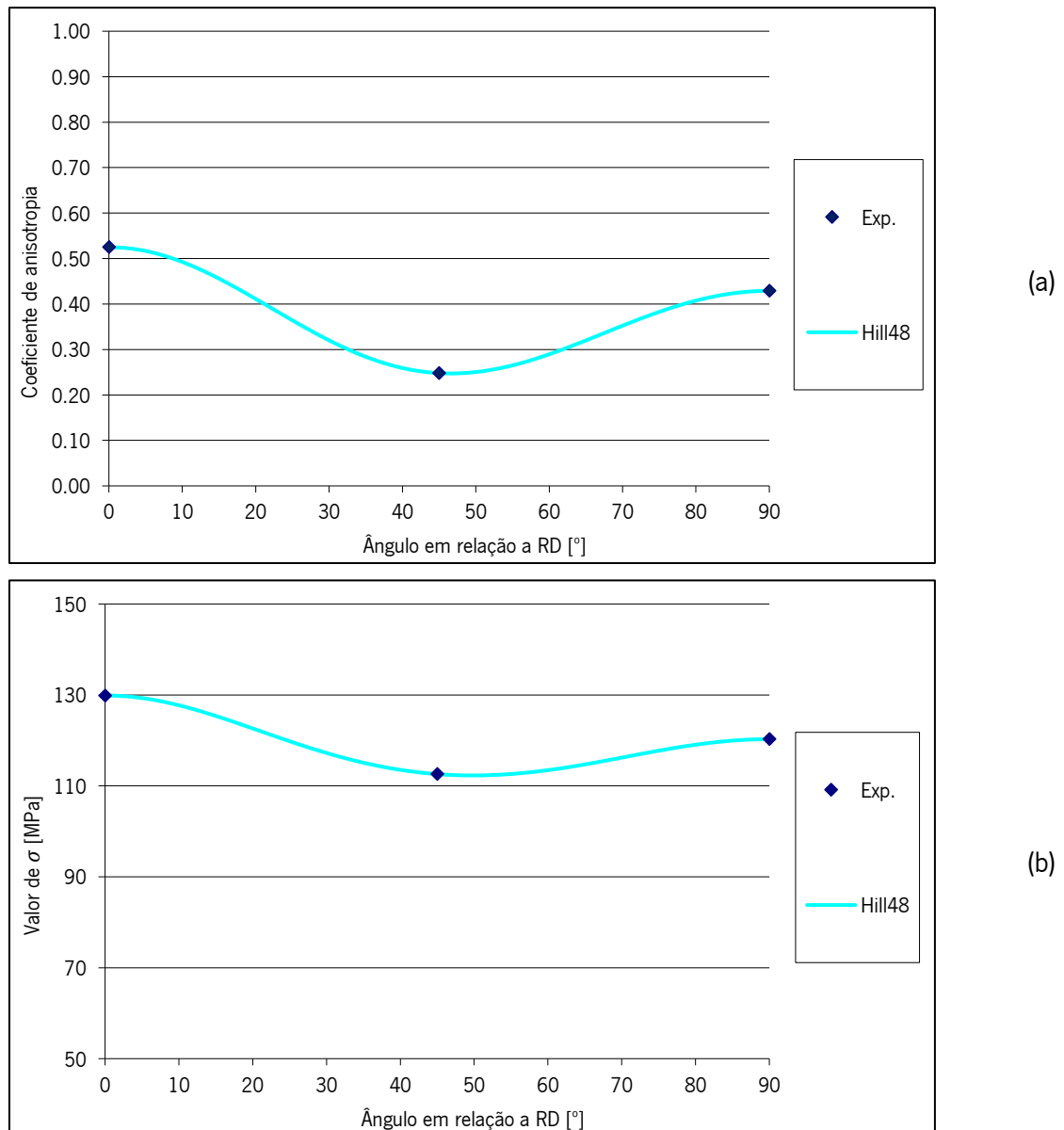


Figura 3.10 – Curvas utilizadas para a obtenção dos valores virtuais utilizados nas caracterizações virtuais de (a) coeficientes de anisotropia e (b) tensões

Para o estudo descrito neste capítulo foram selecionados três critérios anisotrópicos: Hill48, CB2001 e CPB06. A caracterização destes foi realizada com recurso às equações expostas no capítulo 3.1.2 e ao *software* DD3Mat e, para avaliar o desempenho de cada caracterização, foram utilizadas como critério de avaliação as curvas relativas aos coeficientes de anisotropia, tensões e as superfícies de plasticidade obtidas.

3.3.1. HILL48

Inicialmente, de forma a possibilitar a comparação entre os métodos descritos no capítulo 3.3 e a abordagem mais convencional de caracterização na indústria, identificaram-se os parâmetros de

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutadura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo anisotropia para o modelo Hill48. A identificação foi realizada com base nas Equações (3.24), (3.25), (3.26) e (3.28), originando as curvas demonstradas na Figura 3.11.

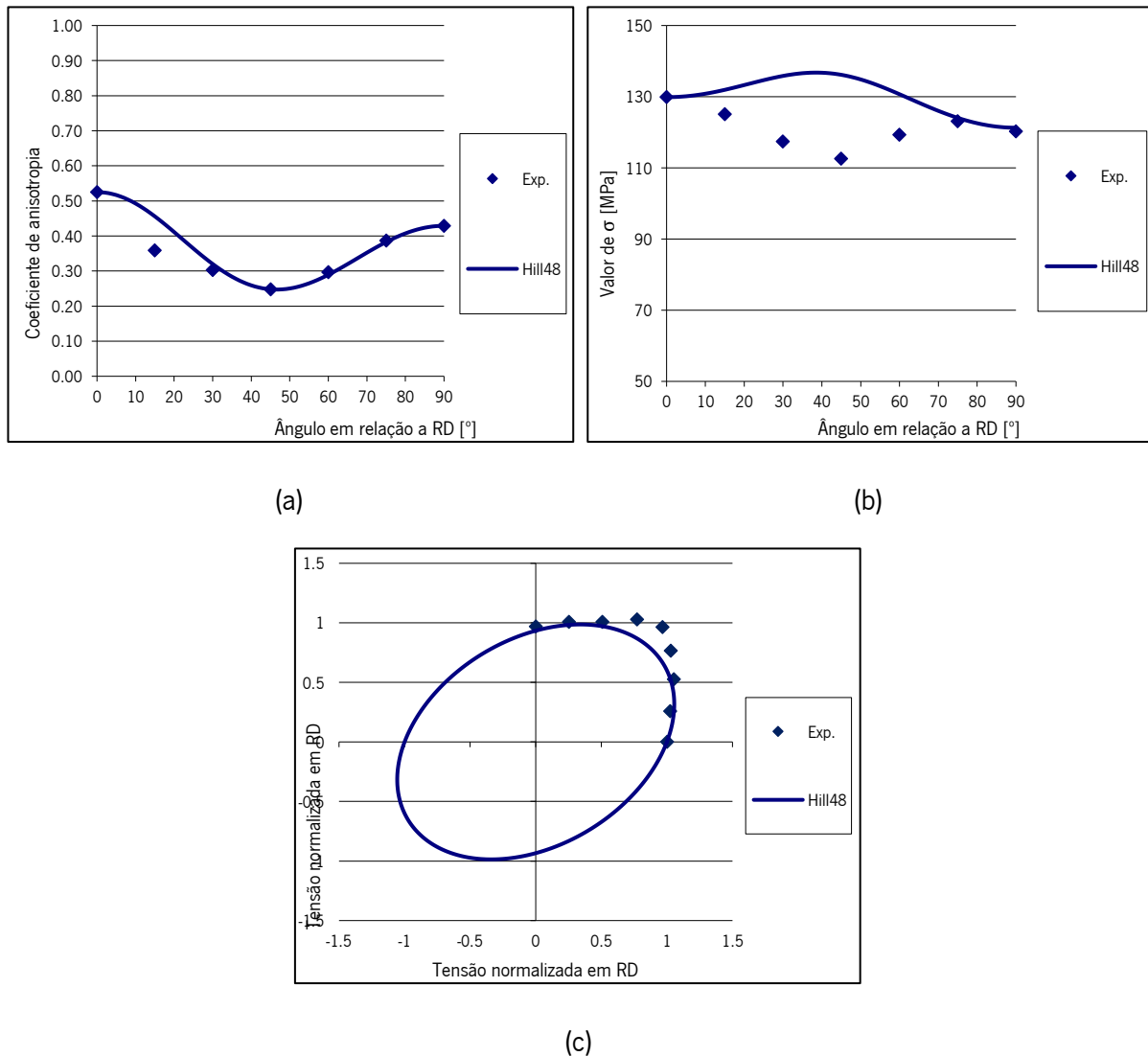


Figura 3.11 – Caracterização utilizando o modelo Hill48

Como evidenciado na figura acima, o modelo Hill48 permite uma boa aproximação aos valores experimentais dos coeficientes de anisotropia, excetuando no valor de r_{15} . Contrariamente, apenas se demonstra apropriado na descrição dos valores de σ_0 , σ_{75} e σ_{90} , provando-se desajustado para os restantes. Os coeficientes de anisotropia obtidos encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Coeficientes de anisotropia do modelo Hill48

F	G	H	M	N	L
0.802476	0.655738	0.344262	1,500000	1.090744	1,500000

3.3.2. CB2001

A Figura 3.12 demonstra a evolução das curvas de r e tensão face ao ângulo em relação a RD, assim como a superfície de plasticidade obtida quando todos os fatores de ponderação mencionados na Equação (2.1) têm o valor de 1 para o modelo CB2001, utilizando os valores experimentais reais.

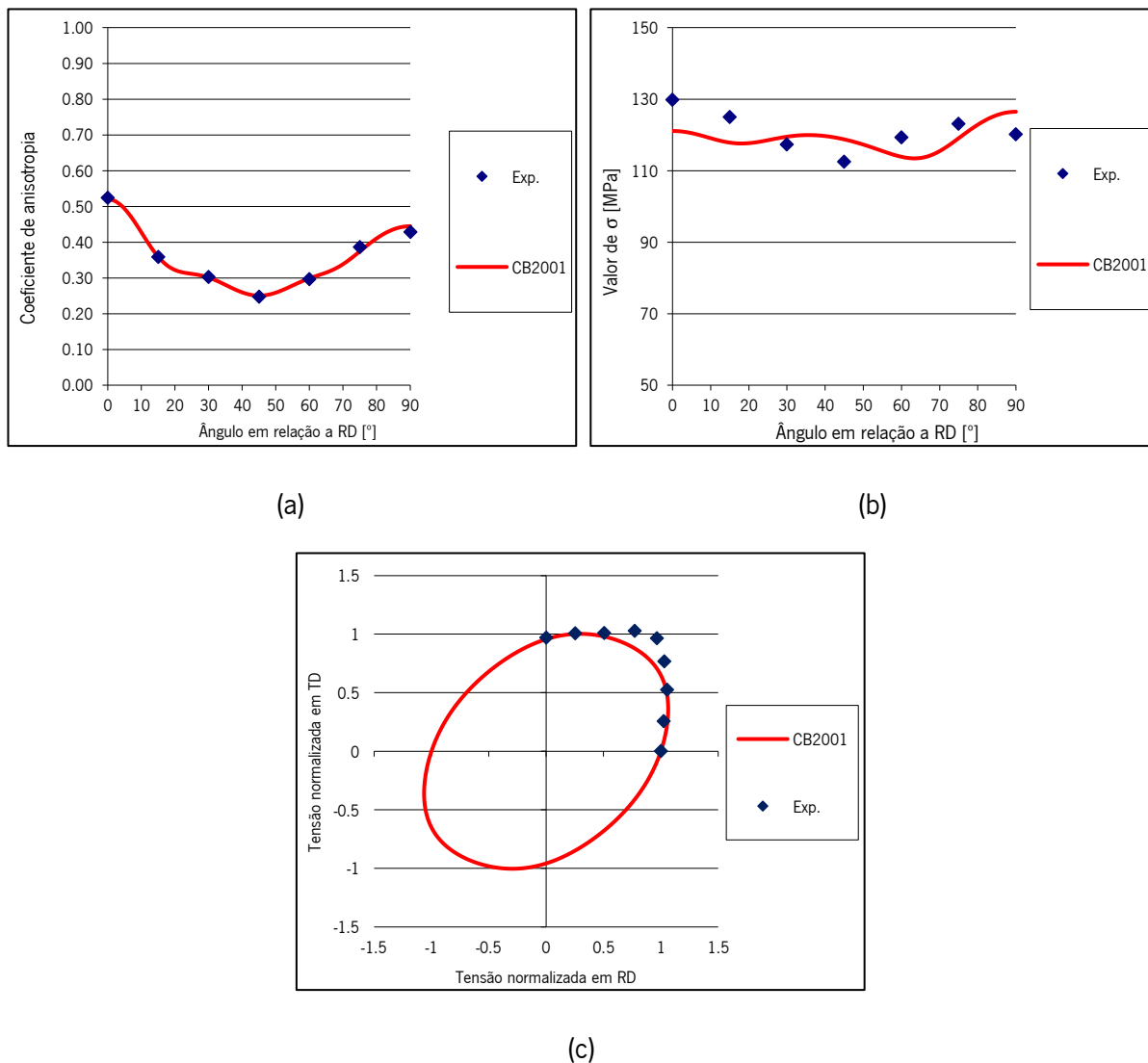


Figura 3.12 – Caracterização real utilizando o modelo CB2001 quando todos os fatores de ponderação têm o valor unitário

Tabela 3.3 - Valores dos fatores de ponderação utilizados na caracterização real para o modelo CB2001

w_{r_0}	$w_{r_{45}}$	$w_{r_{60}}$	$w_{r_{75}}$	$w_{r_{90}}$	$w_{\sigma_{45}^T}$	$w_{\sigma_{60}^T}$	$w_{\sigma_{75}^T}$	$w_{\sigma_{90}^T}$
20	5	3	3	3	12,5	5	10	15

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

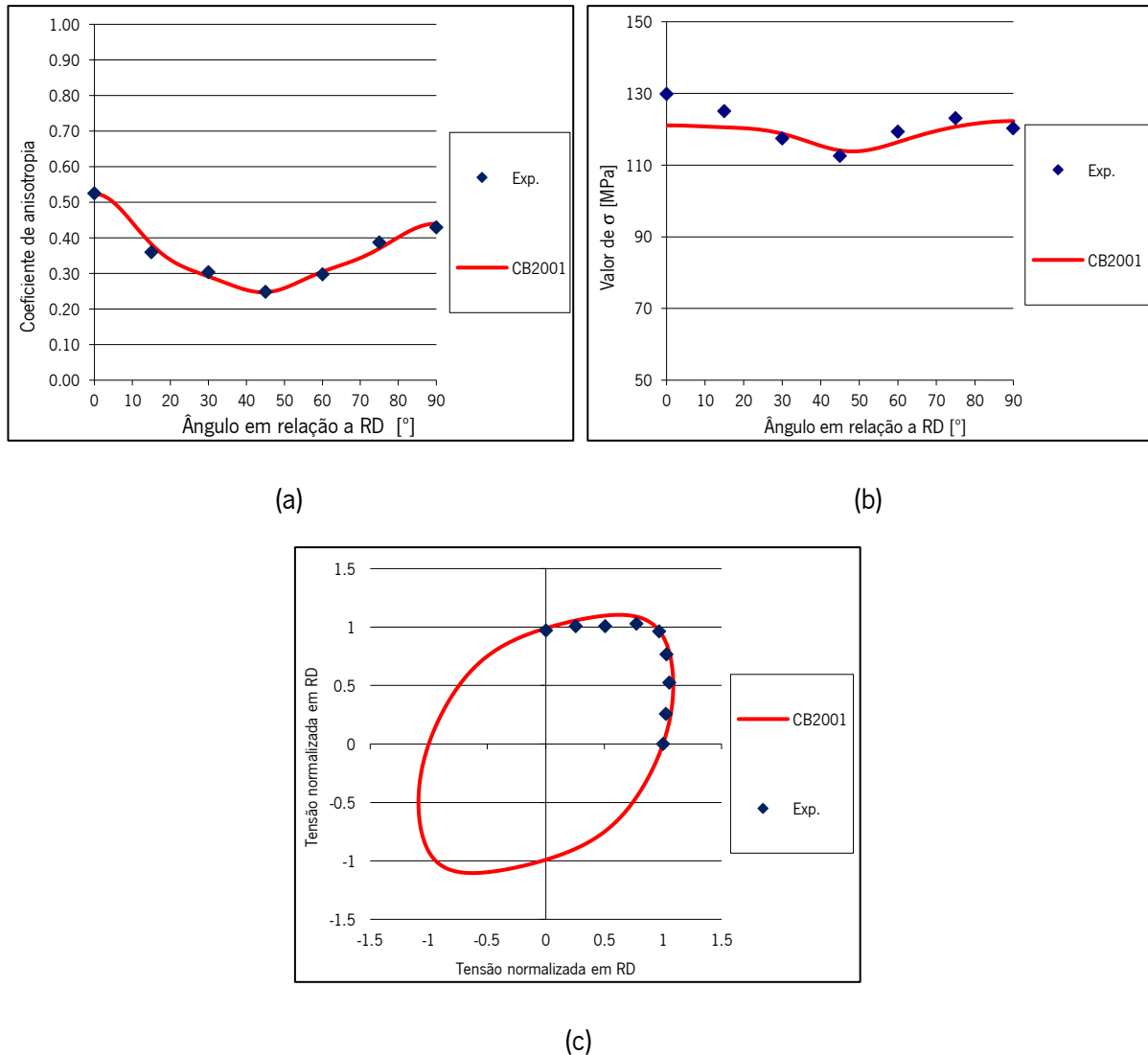


Figura 3.13 - Caracterização real utilizando o modelo CB2001 após ajuste dos fatores de ponderação

Verificando a Figura 3.13, pode-se compreender que a curva relativa aos coeficiente de anisotropia mantém-se ajustada, ainda que se possa considerar que seja menos apropriada nas direções de 15° e 75°. Contrariamente, tanto a curva relativa à previsão das tensões como a superfície de plasticidade mostram-se mais ajustadas face aos resultados apresentados na Figura 3.12. Na tabela abaixo são expostos os coeficientes de anisotropia cujo valor é diferente de 1 obtidos através da caracterização real. Os restantes coeficientes a_5 , a_6 e b_n ($n = 6, 7, 8, 9, 11$) possuem o valor de 1 devido a tratar-se de uma chapa metálica.

Tabela 3.4 - Coeficientes de anisotropia do modelo CB2001 obtidos através da caracterização real

a_1	a_2	a_3	a_4	c	
1,902195	0,038599	0,634704	0,377015	-5,019546	
b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_{10}
-0,333241	4,933184	6,549117	-0,180470	2,872190	2,990972

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Para a caracterização virtual seguiu-se o mesmo processo, iniciando pela utilização de todos os fator de ponderação com o valor unitário e, seguidamente, foram realizados os ajustes considerados necessários. Os resultados obtidos por ambos os métodos são expostos na Figura 3.14 e Figura 3.15.

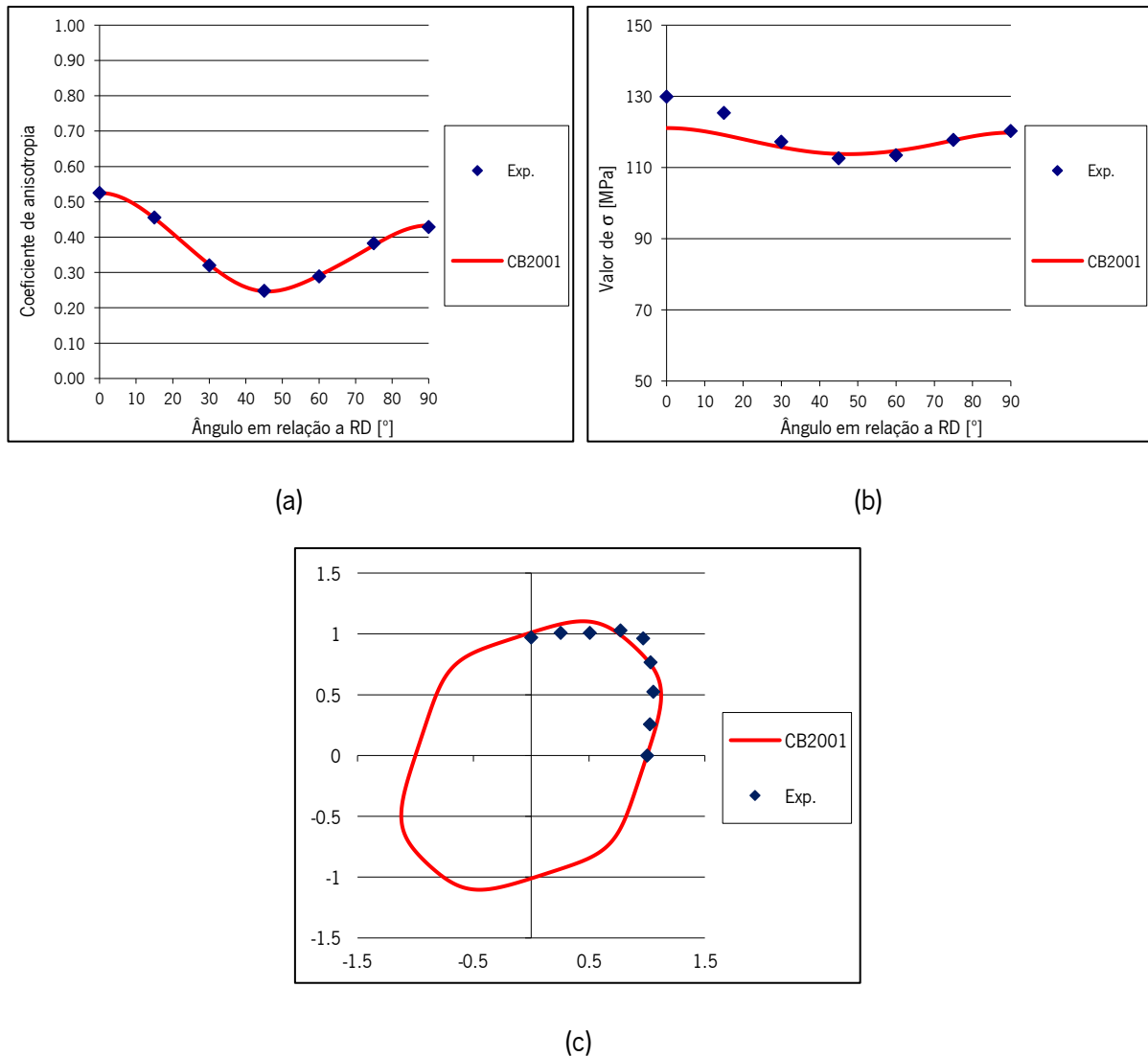


Figura 3.14 - Caracterização virtual utilizando o modelo CB2001 quando todos os fatores de ponderação têm o valor unitário

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutadura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

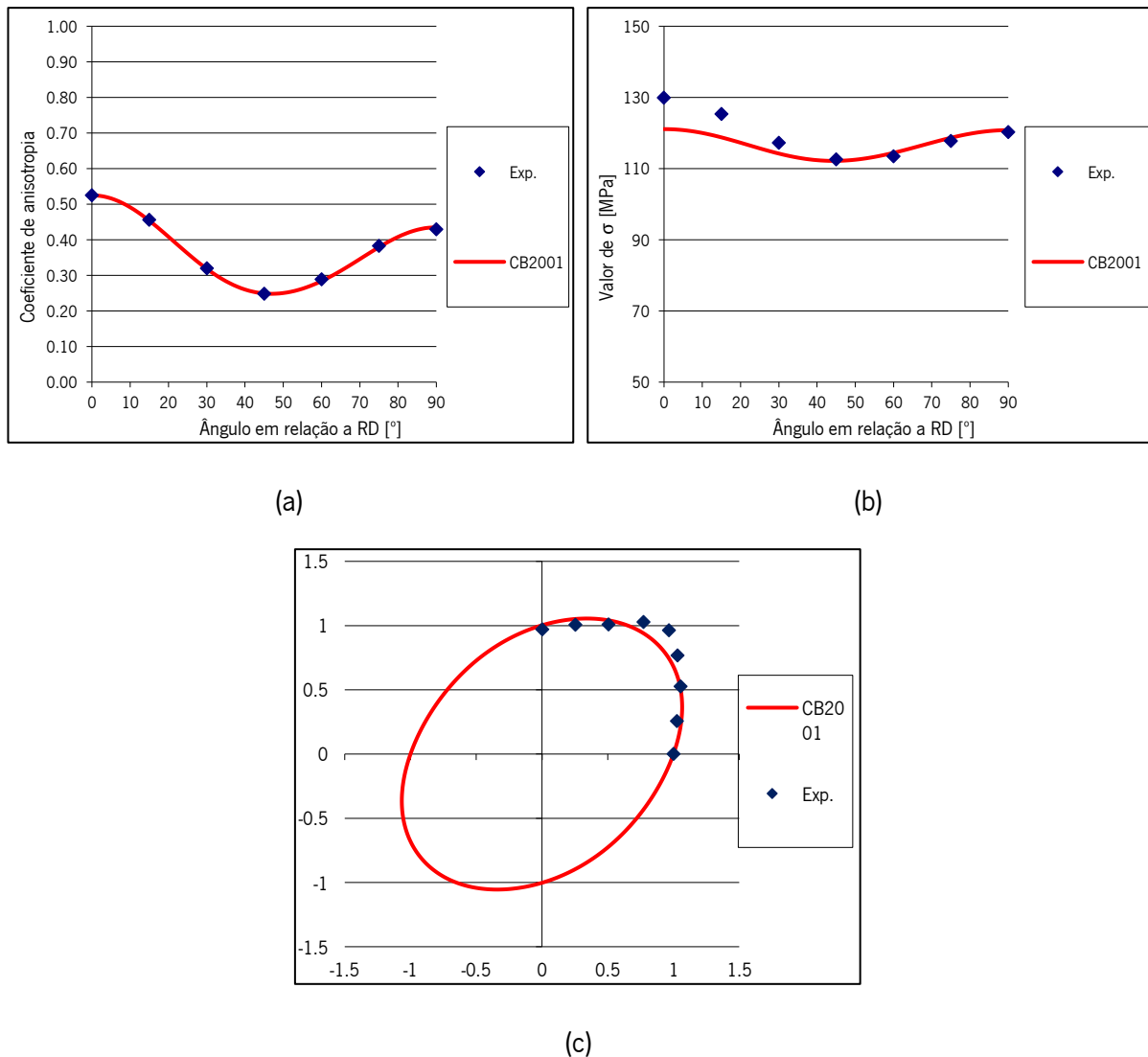


Figura 3.15 - Caracterização virtual utilizando o modelo CB2001 após ajuste dos fatores de ponderação

No que toca à caracterização virtual, devido à sua natureza, apenas foram alterados os fatores de ponderação correspondentes às direções de 0° , 45° e 90° , visto que as restantes apresentam um elevado grau de incerteza. Através da análise das figuras acima é possível verificar que o ajuste feito aos fatores de ponderação em pouco alterou as curvas referentes aos coeficiente de anisotropia e de σ , provando-se mais eficaz na aproximação da superfície de plasticidade ao esperado, especialmente para pontos onde $\sigma_{TD} > \sigma_{RD}$. A Tabela 3.5 e Tabela 3.6 apresentam os valores dos fatores de ponderação utilizados e os coeficientes de anisotropia do modelo CB2001, respetivamente.

Tabela 3.5 - Valores dos fatores de ponderação utilizados na caracterização virtual para o modelo CB2001

w_{r_0}	$w_{r_{45}}$	$w_{\sigma_{45}^T}$	$w_{\sigma_{90}^T}$
20	5	10	15

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Tabela 3.6 - Coeficientes de anisotropia do modelo CB2001 obtidos através da caracterização virtual

a_1	a_2	a_3	a_4	c	
3,455404	7,505273	7,117943	3,658104	-6,000000	
b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_{10}
-5,329130	-6,000000	-6,000000	2,813602	-2,636412	-3,261393

3.3.3. CPB06

Similarmente ao que foi feito para o critério anterior, iniciou-se o estudo utilizando todos os fatores de ponderação com o valor de 1, seguindo-se a alteração dos mesmos mediante o necessário. Para a utilização deste critério foi estipulada a utilização de $k = 0$ de forma a representar uma simetria na tração-compressão, dada a ausência da realização de ensaios experimentais de compressão.

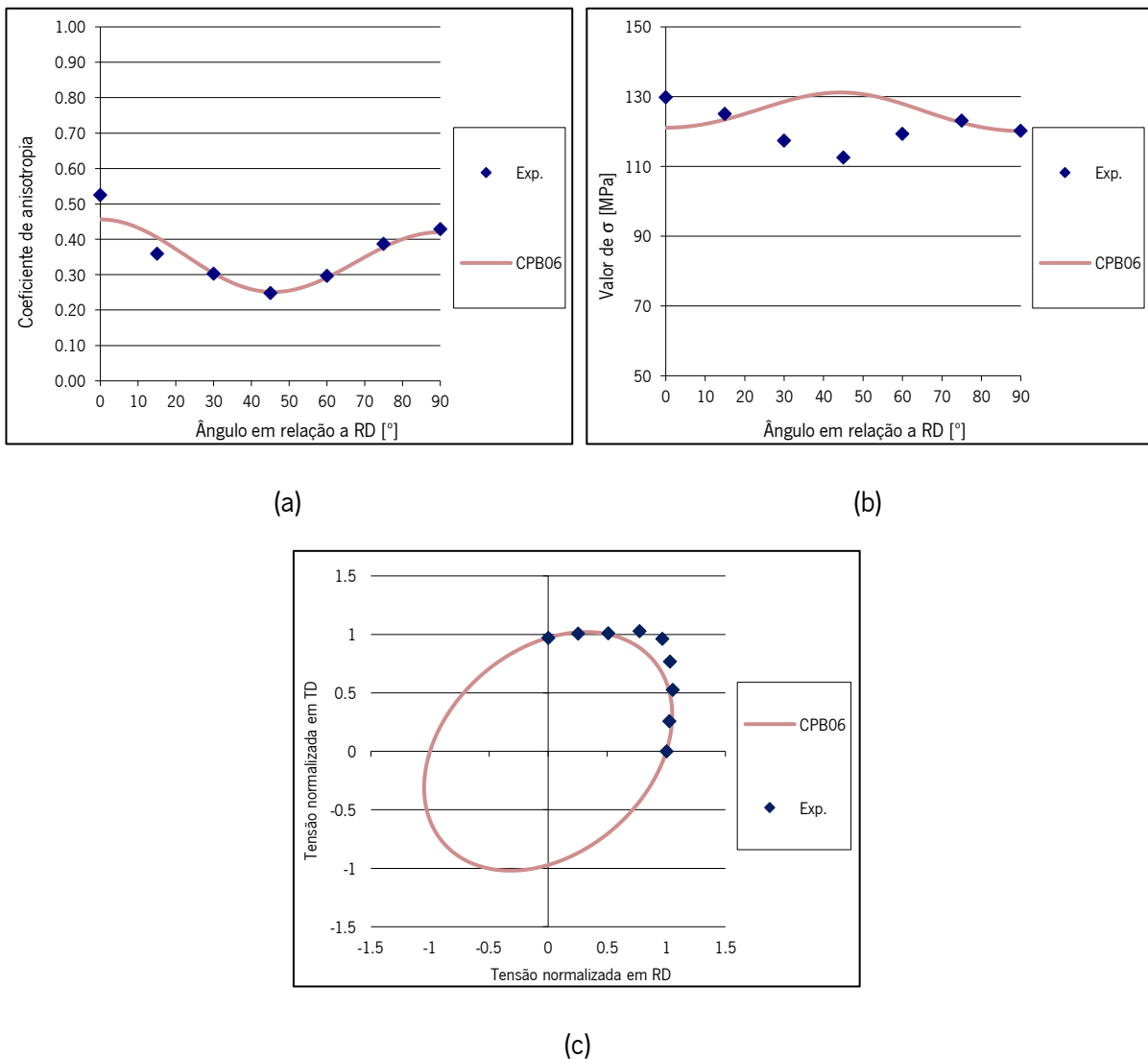


Figura 3.16 - Caracterização real utilizando o modelo CPB06 quando todos os fatores de ponderação têm o valor de 1

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutadura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

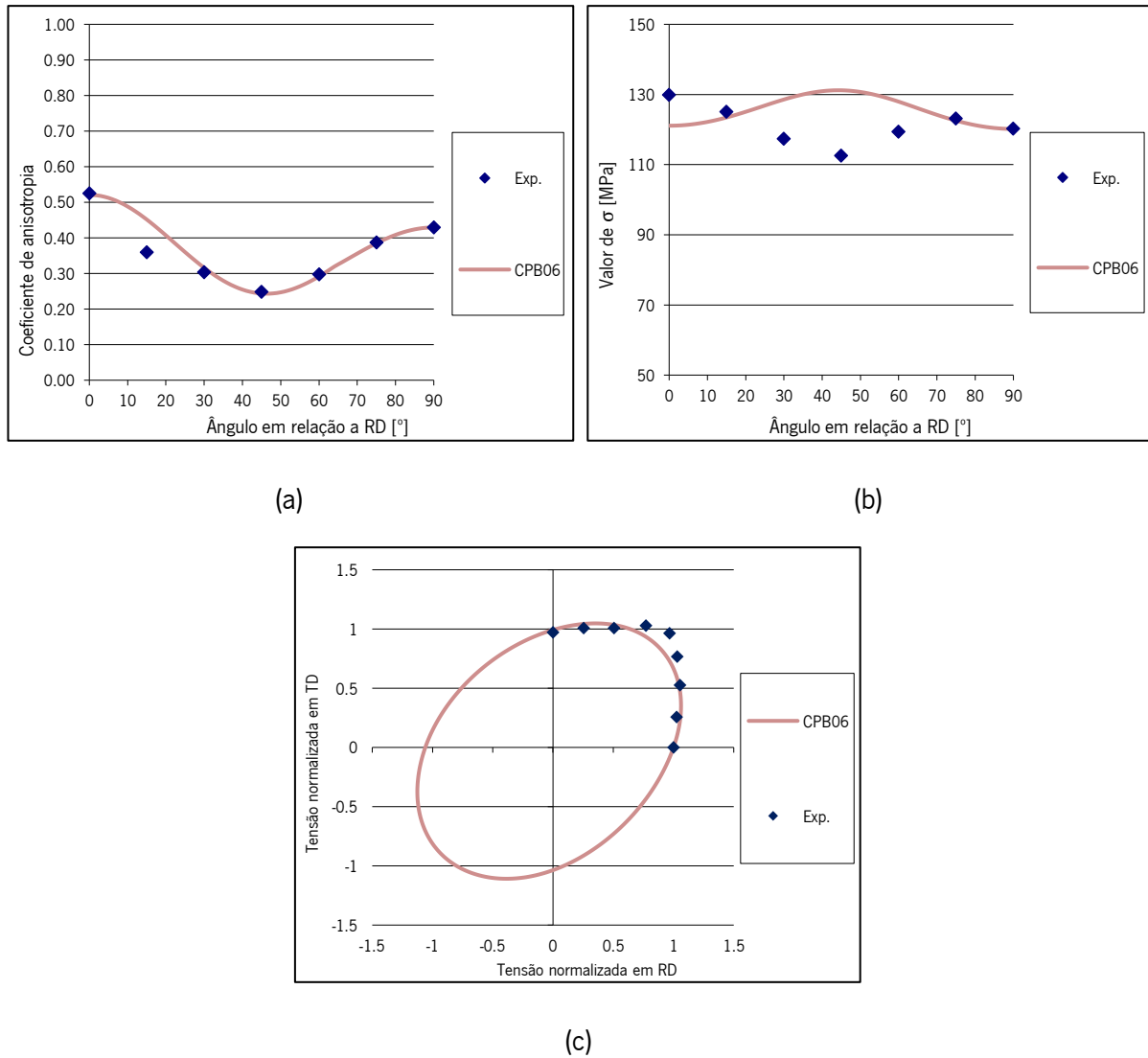


Figura 3.17 - Caracterização real utilizando o modelo CPB06 após ajuste dos fatores de ponderação

Com base na comparação das curvas incluídas na Figura 3.16 e Figura 3.17, é possível observar que a alteração dos fatores de ponderação resultou, na sua generalidade, em mudanças subtis para cada uma das curvas. A alteração de maior relevância é a aproximação da curva do coeficientes de anisotropia na imediação do ponto referente a r_0 . Torna-se claro que a previsão do modelo CPB06 para os valores de σ em ambos os casos é incorreta, sendo que a curva descrita por este apenas se demonstra aproximada em σ_{15} , σ_{75} e σ_{90} . Abaixo encontram-se os valores dos fatores de ponderação utilizados, assim como os coeficientes de anisotropia obtidos para a caracterização real do modelo CPB06.

Tabela 3.7 - Valores dos fatores de ponderação utilizados na caracterização real para o modelo CPB06

w_{r_0}	$w_{r_{30}}$	$w_{r_{45}}$	$w_{r_{60}}$	$w_{r_{90}}$	$w_{\sigma_{90}^T}$
60	9	12	3	45	250

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Tabela 3.8 - Coeficientes de anisotropia do modelo CPB06 obtidos através da caracterização real

C_{11}	C_{22}	C_{33}	C_{44}	C_{55}
1,000000	1,050366	-1,359829	-2,000000	-2,000000
C_{66}	C_{23}	C_{13}	C_{12}	k
1,004927	-0,830096	0,000000	0,037590	0,000000

Novamente, seguindo o mesmo método empregue no modelo CB2001, procedeu-se com a realização da caracterização virtual, começando com todos os fatores de ponderação a 1 e posteriormente ajustando os valores, obtendo os resultados expostos na Figura 3.18 e Figura 3.19.

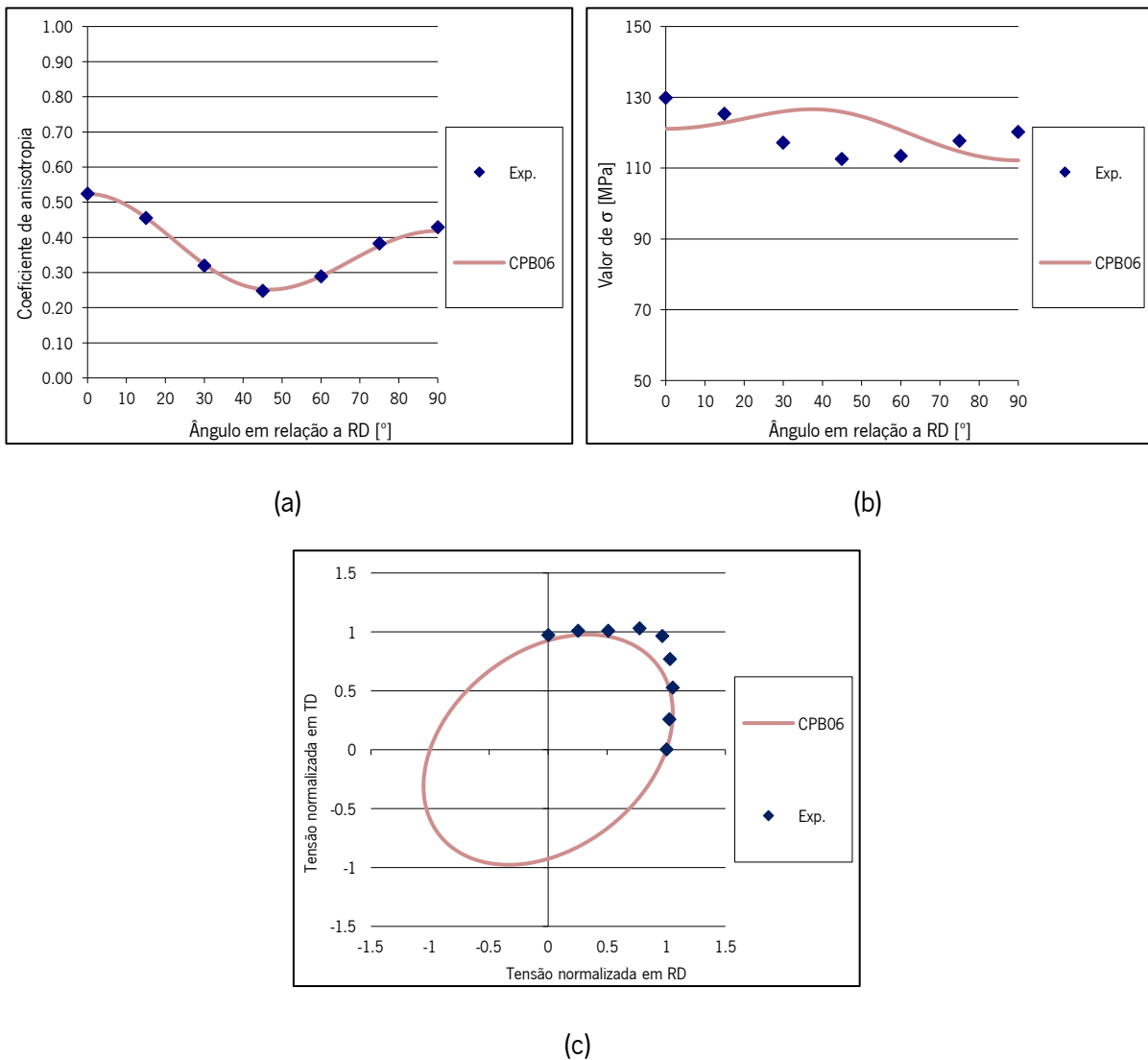


Figura 3.18 - Caracterização virtual utilizando o modelo CPB06 quando todos os fatores de ponderação têm o valor de 1

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutadura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

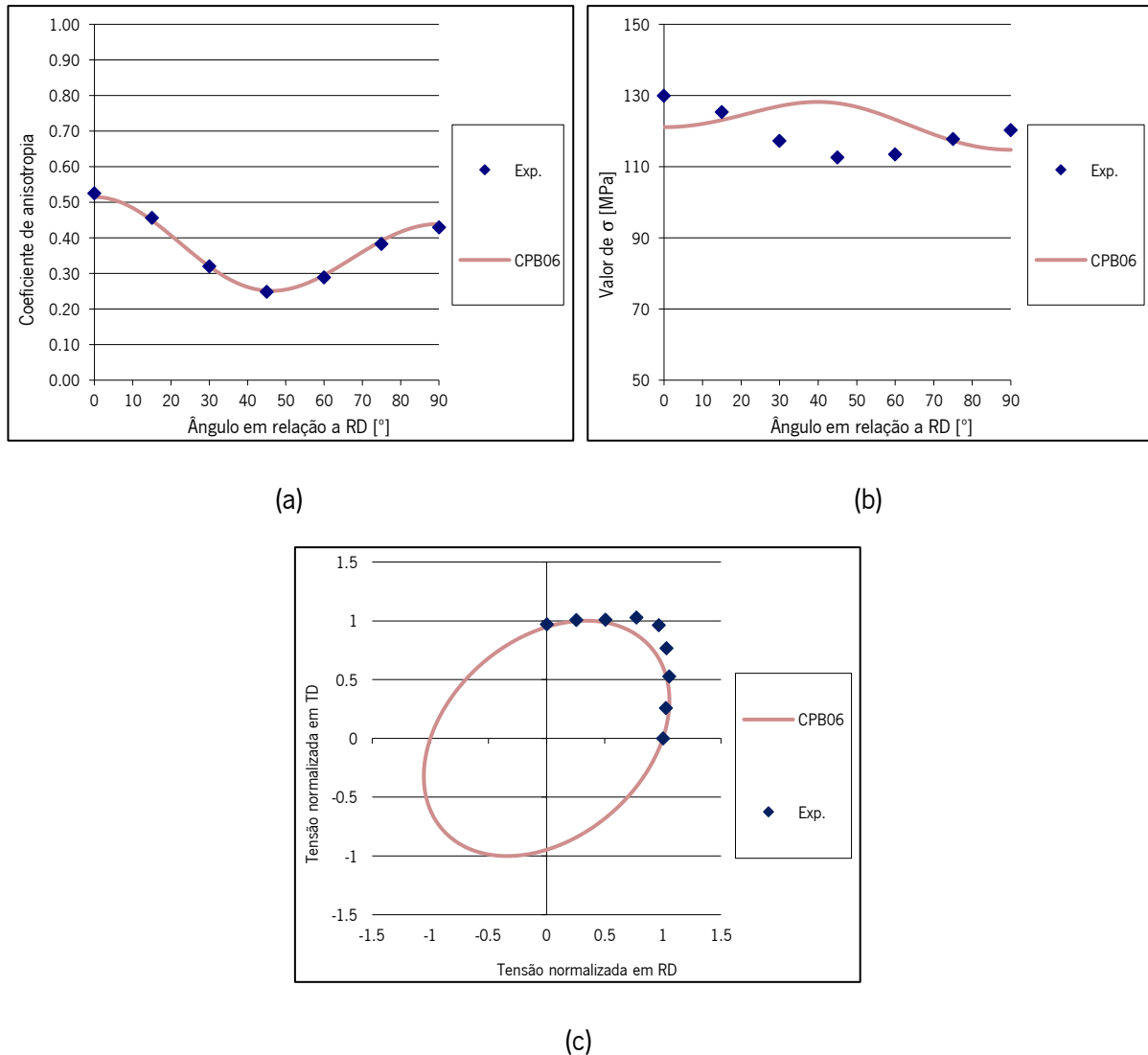


Figura 3.19 - Caracterização virtual utilizando o modelo CPB06 após ajuste dos fatores de ponderação

À semelhança do que acontece na caracterização real, também na caracterização virtual as mudanças causadas pelas alterações dos fatores de ponderação demonstram-se subtis. Mais uma vez é demonstrada a falta de capacidade do critério CPB06 de corretamente prever os valores de σ , sendo que apenas após a alteração dos fatores se verifica a correta previsão de um dos valores, no caso σ_{75} . Na superfície de plasticidade é possível alcançar uma melhor aproximação aos valores pretendidos, com destaque para os valores onde $\sigma_{TD} > \sigma_{RD}$. A previsão dos coeficientes de anisotropia prova-se satisfatória em ambas as instâncias. Nas tabelas abaixo são expostos os valores dos fatores de ponderação utilizados, assim como os coeficientes de anisotropia obtidos para a caracterização virtual do modelo CPB06, respetivamente.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Tabela 3.9 - Valores dos fatores de ponderação utilizados na caracterização virtual para o modelo CPB06

w_{r_0}	$w_{r_{90}}$	$w_{\sigma_{90}^T}$
50	40	70

Tabela 3.10 - Coeficientes de anisotropia do modelo CPB06 obtidos através da caracterização virtual

C_{11}	C_{22}	C_{33}	C_{44}	C_{55}
1,000000	0,839637	-1,238628	-2,000000	-2,000000
C_{66}	C_{23}	C_{13}	C_{12}	k
-1,166543	-1,426095	0,000000	0,059403	0,000000

4. MODELO NUMÉRICO

No presente capítulo é detalhado o processo de criação da malha que permite a representação do esboço circular recorrendo ao *software* GiD e a um algoritmo de empilhamento, seguido de um estudo de convergência de malha de forma a conhecer qual a malha mais apropriada para o desenvolvimento do trabalho. Similarmente, é também reportada a conceção das malhas referentes às ferramentas, recorrendo ao mesmo *software*, utilizando o punção como exemplo. Por fim, é explicada a utilização dos ficheiros do *solver* DD3Imp, tanto para ficheiros de *input* como para ficheiros de *output*.

4.1. ESBOÇO

O esboço considerado no processo exposto pelo *benchmark* é um esboço de geometria circular, possuindo um diâmetro de 107,5 mm e 1 mm de espessura. Sendo circular, foram tidas considerações sobre a axissimetria do processo, sendo apenas modelado $\frac{1}{4}$ do esboço. O material a partir do qual este concebido é uma liga de alumínio AA6061-T4.

De forma a definir a geometria do esboço foi utilizado o *software* GiD. Foram desenhadas 5 linhas utilizando os comandos “Line” e “Arc”, de forma a definir a geometria inicial. A configuração desta geometria é representada pela Figura 4.1, onde podemos observar a existência de 2 arcos, o primeiro com um raio de 24 mm e o segundo com um raio de 53,75 mm. O primeiro arco foi criado com o intuito de criar uma divisão entre as secções do esboço, separando a região onde existirão distorções mínimas da restante, distorções estas que serão baixas devido à região se encontrar apenas sob a ação da parte plana do punção. Desta forma, a malha gerada será mais grosseira quando $r < 24$ mm e mais refinada quando $24 < r < 53,75$ mm. Após a criação das linhas necessárias, são concebidas as superfícies – *NURBS surfaces* – a partir das quais será gerada a malha.

Posteriormente, ainda no mesmo ficheiro, foi feita a criação do *stopper*. Esta foi realizado utilizando os comandos mencionados anteriormente, criando um anel à volta do esboço com um raio mínimo de 57 mm e um diâmetro máximo de 59,5 mm. Posteriormente foi criada uma superfície para fazer a atribuição da malha no *stopper*. O resultado destas operações é demonstrado na Figura 4.1.

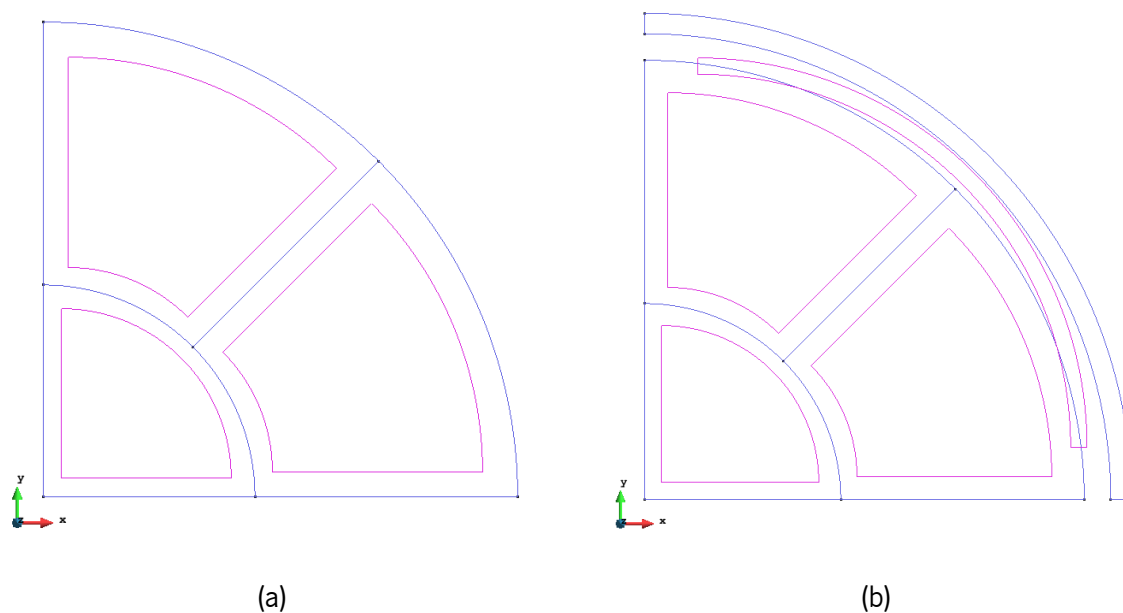


Figura 4.1 – Geometria dos esboços criados (a) sem a adição do *stopper* e (b) após a adição do *stopper*

A criação da malha foi feita inicialmente num ambiente 2D, posteriormente tratada com o auxílio de um algoritmo de empilhamento, que permite a conversão da malha 2D numa malha 3D. O tipo de elemento escolhido para a conversão foi o elemento Hex8, cuja constituição é demonstrada na Figura 4.2.

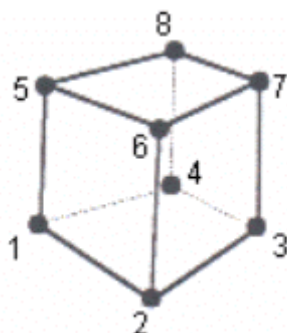


Figura 4.2 - Constituição de um elemento Hex8

De forma a compreender qual a melhor densidade de malha para utilizar neste estudo foi realizado um estudo de convergência de malha. Assim, foram criadas nove malhas com diferentes números de elementos de forma a compreender qual o número mínimo de elementos que dariam resultados satisfatórios, ponderando precisão e os recursos computacionais necessários. É de salientar que a densidade apenas foi aumentada nas secções que irão constituir a parede e o raio de concordância do embutido final, iniciando o refinamento quando $r > 24$ mm.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Tabela 4.1 - Discretização das malhas utilizadas

Malha	Elementos	Nós	Espessura (nº de elementos)
Malha 1	2370	3816	2
Malha 2	7864	12180	2
Malha 3	11810	18162	2
Malha 4	14190	21762	2
Malha 5	16638	25464	2
Malha 6	19402	29640	2
Malha 7	22186	33849	2
Malha 8	25316	38574	2
Malha 9	35798	54384	2

Como critério de comparação entre as malhas descritas acima na Tabela 4.1 foram avaliadas a espessura do embutido, assim como a altura final obtida pelo processo.

O primeiro parâmetro a ser estudado foi a evolução da espessura do embutido. Através da análise dos gráficos presentes na Figura 4.3, é possível compreender que o refinamento da malha não apresenta grande influência no que diz respeito à espessura do embutido. Isto pode ser validado pelo facto de as curvas relativas aos diferentes graus de refinamento apenas mostrarem diferença significativa nos pontos que se inserem na base do embutido. Esta diferença pode ser considerada desprezável uma vez que a secção da base é a única que se mantém inalterada em todas as malhas, sendo o refinamento mais valioso nas fases seguintes do raio de concordância (“Curva”) e da parede do embutido. Mantendo-se a secção da base igual é possível refinar a malha nas diferentes secções de maior importância enquanto se mitiga o tempo e esforço de computação necessários para as malhas mais densas.

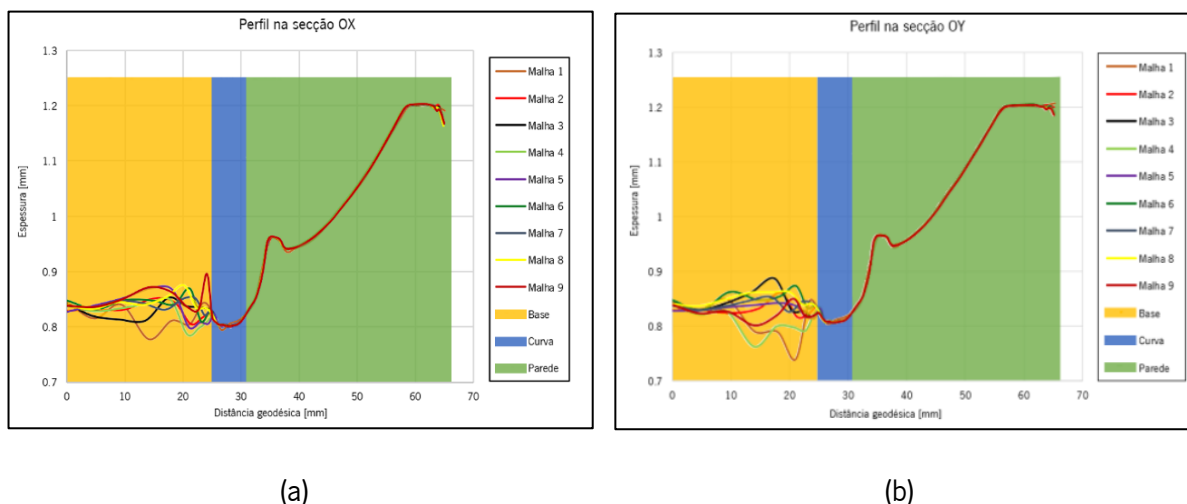


Figura 4.3 – Evolução da espessura do embutido ao longo de um (a) perfil na secção OX e (b) perfil na secção OY nas diversas malhas estudadas

Em seguida, procedeu-se com a análise da altura final do embutido. Analisando o gráfico presente na Figura 4.4 é possível compreender que apenas a Malha 1 apresenta uma disparidade suficiente para

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo ser distinguida das restantes malhas, observando-se uma sobreposição praticamente total entre todas as outras. Desta forma, é admissível inferir que pode ser utilizada a Malha 2 em detrimento das restantes, não se justificando a diferença de poder computacional necessário para a utilização de outras malhas.

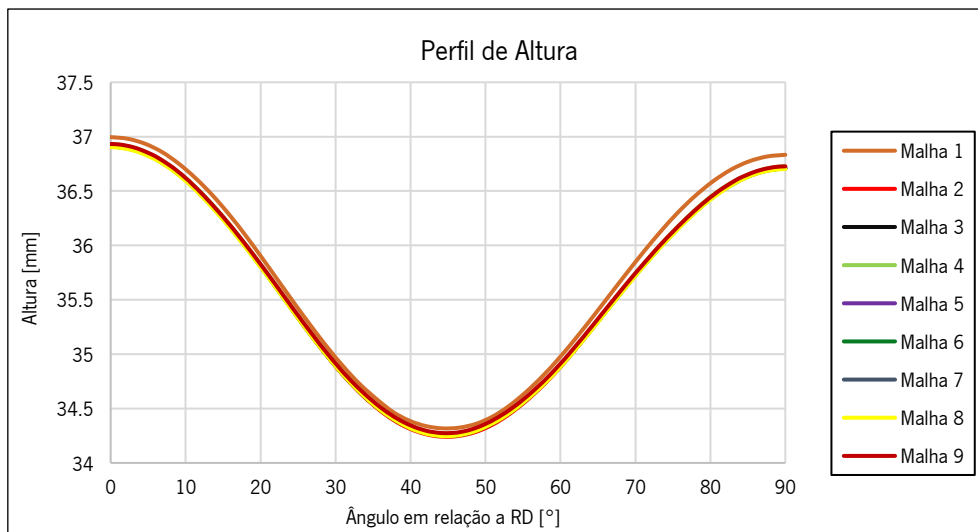


Figura 4.4 – Comparação do perfil de alturas obtido com as diversas malhas estudadas

abaixo é demonstrado o mesmo gráfico, tendo sido omitidas algumas das malhas para facilitar a percepção da similaridade entre a Malha 2 e as malhas mais refinadas.

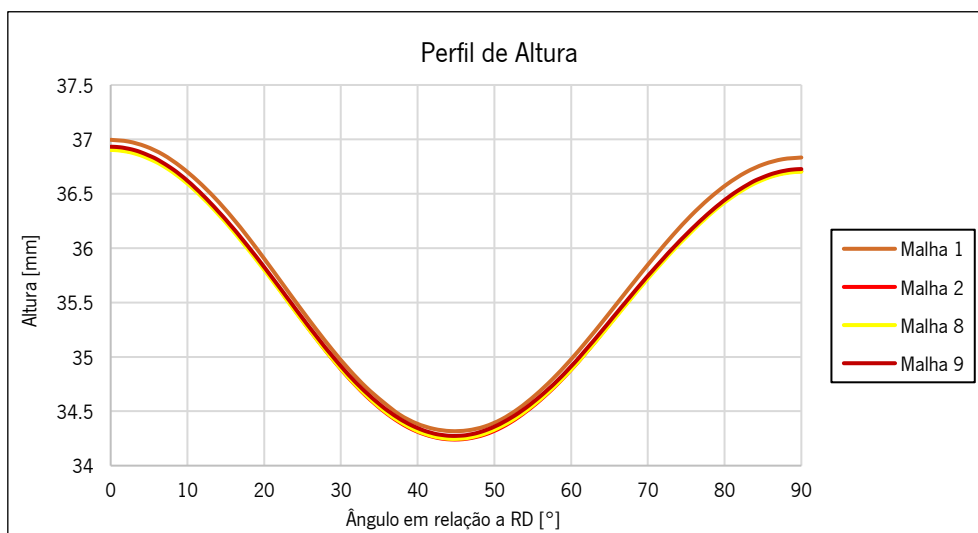


Figura 4.5 - Comparação do perfil de alturas obtido, com a omissão de algumas das malhas estudadas

4.2. FERRAMENTAS

De forma a criar as ferramentas necessárias ao processo de embutidura, similarmente ao que foi feito no esboço, o *software* utilizado foi o GiD.

No ambiente de pré-processamento a ferramenta é desenhada no plano ZX, garantindo o alinhamento com o esboço, mantendo-os perpendiculares.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Para uma melhor percepção do processo de criação de ferramentas, o exemplo utilizado abaixo reporta a criação da geometria do punção.

O primeiro passo contempla a criação das linhas que irão pertencer à geometria externa do punção. Recorreu-se assim à criação de linhas que unem os pontos pertencentes a esta geometria, iniciando no ponto (0,0,0), seguindo para o ponto (24,0,0) e assim sucessivamente. No final é utilizada a funcionalidade "Arc" para criar o raio de concordância presente na parte inferior do punção, com 5 mm de raio. Este passo é demonstrado na Figura 4.6.

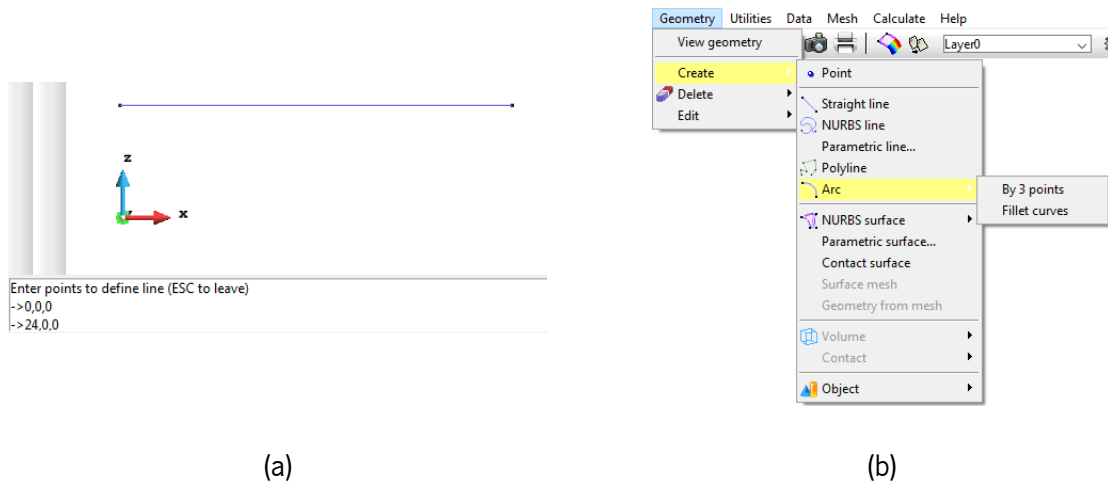


Figura 4.6 - (a) Criação da linhas de união entre os pontos (0,0,0) e (24,0,0); (b) Utilização da ferramenta "Arc" para a criação dos raios de concordância

De seguida, deve-se extrudir as linhas de forma a gerar as superfícies que permitirão a criação da malha. Esta malha será composta por elementos sem espessura, criando assim uma casca que representará o punção como uma superfície rígida. Para este fim recorre-se à ferramenta "Copy" no modo "Rotation", estabelecendo-se uma extrusão rotacional de 90°, criando assim ¼ da geometria total do punção. Deve ser ativada a funcionalidade "Do Extrude" na opção "Surfaces" para a criação das superfícies e o eixo de rotação deverá ser o eixo criado pelos pontos (0,0,0) e (0,0,1), eixo OZ. Desta forma, a ferramenta "Copy" deverá ser preenchida de acordo com o que é representado pela Figura 4.7.

Foram também depois prolongadas as linhas laterais, de forma a não existir interferência aquando do contacto com o esboço metálico.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

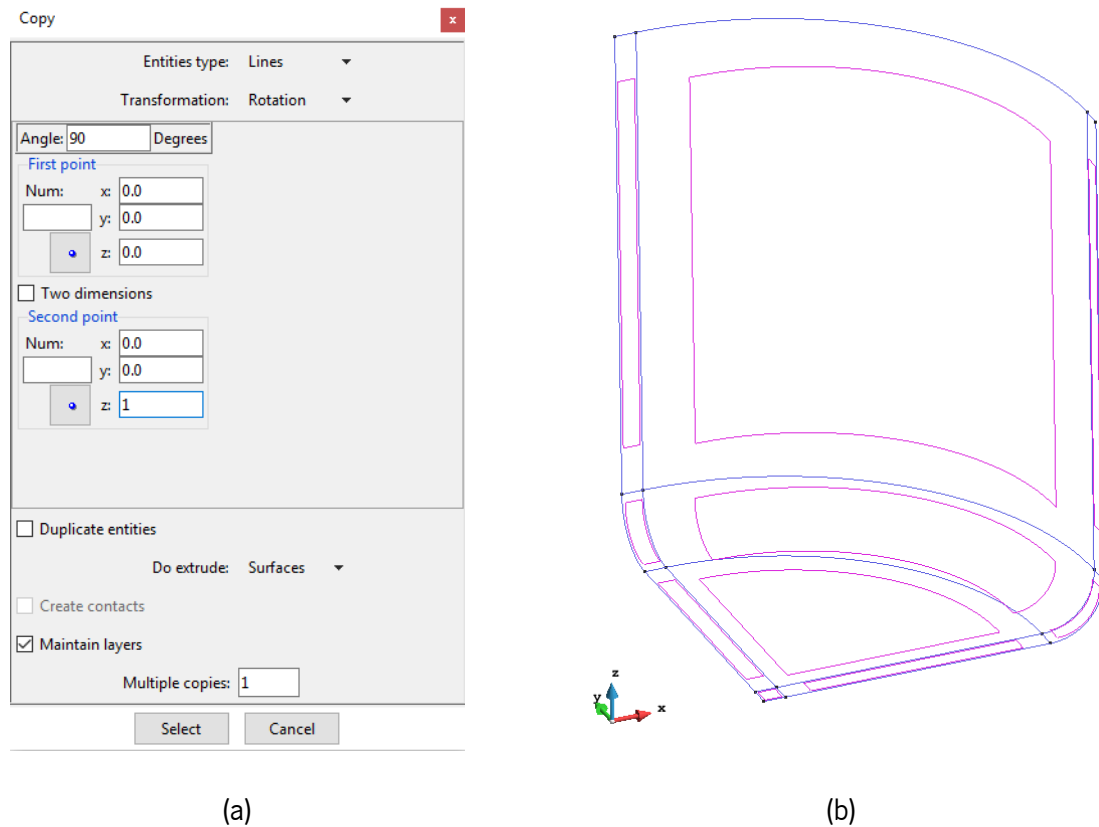


Figura 4.7 - (a) Preenchimento adequado da ferramenta "Copy" para a criação da ferramenta; (b) Geometria final do Punção

O passo seguinte contempla a correção da direção das normais das superfícies, de forma a garantir que todas estas se encontram na direção do contacto com a chapa, neste caso, todas apontando para fora do punção. Na Figura 4.8 podemos ver as normais das superfícies já representadas da forma apropriada.

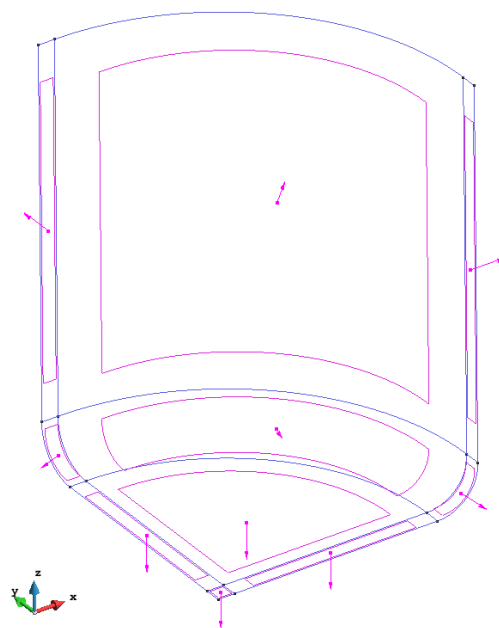


Figura 4.8 - Geometria do punção com as normais no sentido correto

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Por fim, deve-se proceder à criação da malha. A malha utilizada é uma malha estruturada e o número de elementos nas superfícies é definido através da divisão de cada linha num determinado número de secções. No exemplo representado abaixo podemos ver qual o número de divisões estipulado para cada linha e o resultado obtido.

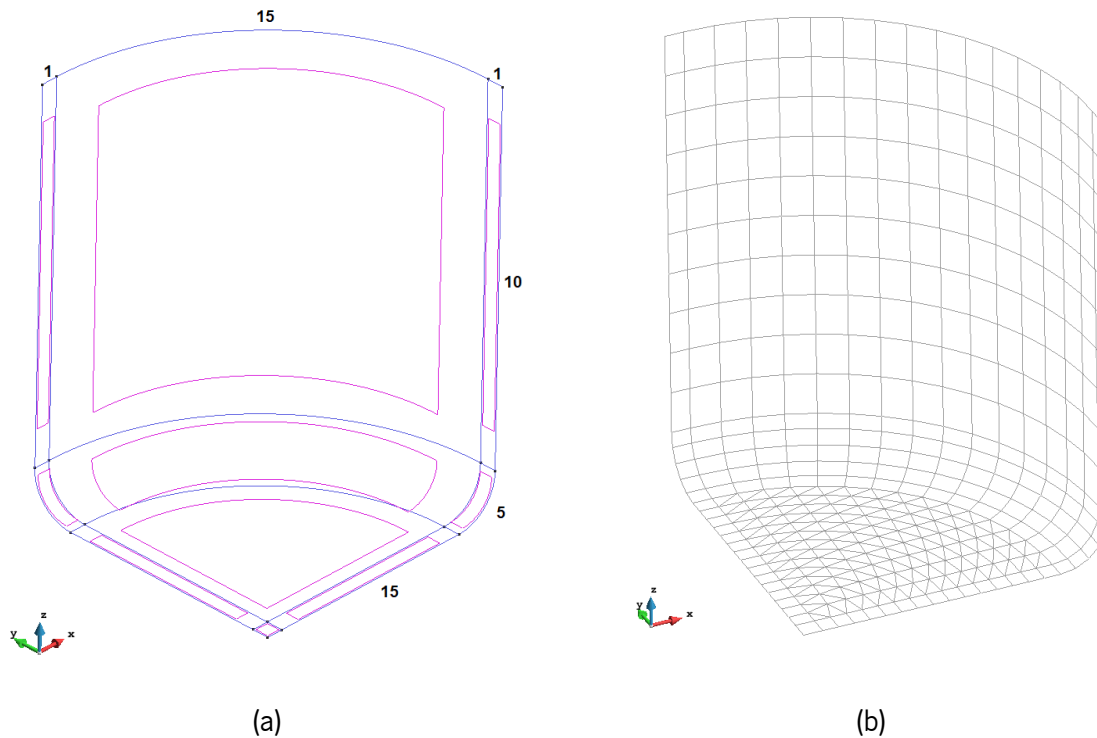


Figura 4.9 - (a) Identificação do número de divisões por linha; (b) Malha gerada para o punção

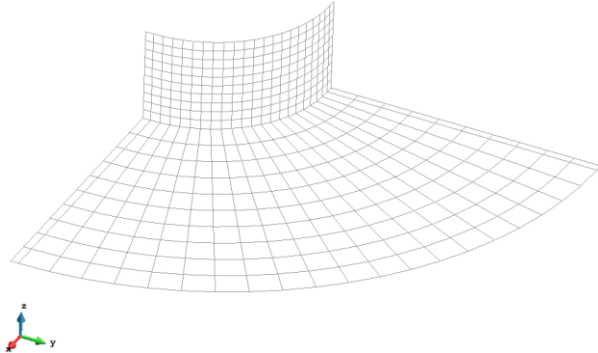
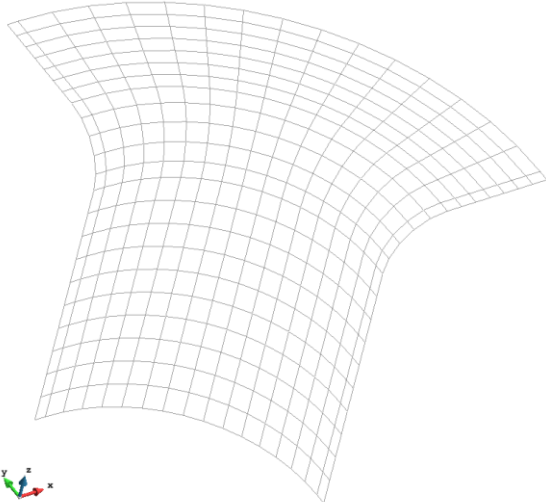
A malha obtida no final deste processo é uma malha composta por elementos quadriláteros Quad4 e elementos triangulares Tri3, com um total de 511 elementos, 225 Tri3 e 286 Quad4 e 439 nós. A utilização de elementos triangulares justifica-se pela existência de apenas 3 linhas na superfície da base do punção, o que torna impossível a criação de elementos quadriláteros.

Resta apenas exportar depois esta malha, criando um ficheiro de extensão ".msh" cujo nome a atribuir será "DD3_tool3" pois, como será explicado no capítulo 4.3, o punção é considerado a ferramenta número 3 no ficheiro *DD3_phase*.

Repetindo todo este processo para as restantes ferramentas, foram criadas as malhas representadas na Tabela 4.2.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Tabela 4.2 - Descrição das malhas do cerra-chapas e matriz

Ferramenta	Malha	Descrição da malha
Cerra-chapas		440 elementos Quad4 483 Nós
Matriz		374 elementos Quad4 414 Nós

No pós-processamento, utilizando os ficheiros *GID_ini.res* e *GID_ini.tool.msh*, é possível verificar o posicionamento de todas as ferramentas face ao esboço.

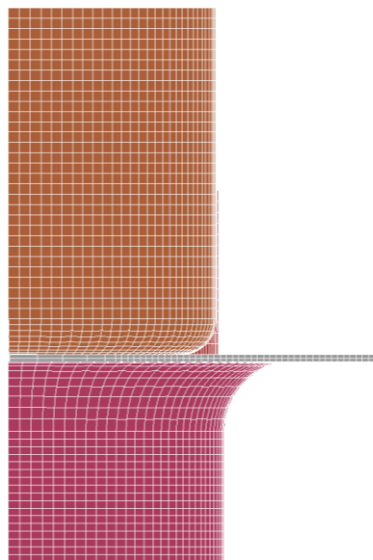


Figura 4.10 - Posicionamento final do conjunto de ferramentas (a laranja, vermelho e cor-de-rosa) e esboço (a cinzento) em pós-processamento

4.3. FICHEIROS DE INPUT DD3IMP

Após a criação dos ficheiros que permitem a discretização do esboço e a representação das ferramentas é necessário editar os ficheiros de *input* do *solver* DD3Imp.

Como referido anteriormente, é necessário um mínimo de cinco ficheiros de entrada (excetuando os ficheiros relativos ao esboço e às ferramentas) mencionados no subcapítulo 1.3, sendo preciso editar os parâmetros destes para definir corretamente o problema em estudo.

A geometria das ferramentas é dada pelos ficheiros *DD3_tool[X].msh*. Para o problema em estudo foram definidos os ficheiros *DD3_tool1.msh*, para a matriz, *DD3_tool2.msh*, para o cerra-chapas e *DD3_tool3.msh* para o punção. Como mencionado anteriormente, o *stopper* não possui um ficheiro *DD3_tool[X].msh* pois o mesmo é representado no ficheiro *DD3_mesh.msh*, ficheiro este que é utilizado para a discretização da malha do esboço.

No ficheiro *DD3_bcon.dat* é introduzida a informação referente às condições de fronteira do problema em estudo, neste caso sendo descritas através de equações do tipo $Ax + By + Cz = D$.

Na imagem abaixo são destacados os parâmetros alterados para a correta definição do problema. O primeiro parâmetro a ser alterado é o *NSC*, que permite ao utilizador identificar o número de condições de fronteira que pretende implementar, sendo no presente caso necessárias três condições (*NSC* = 3), cada uma descrita pela sua linha “P”:

- Linha P1: define a expressão tal que $1x + 0y + 0z = 0$, representando deste modo o plano Oyz;
- Linha P2: define a expressão tal que $0x + 1y + 0z = 0$, representando deste modo o plano Oxz;
- Linha P3: define a expressão tal que $0x + 0y + 1z = 0$, representando deste modo o plano Oxy;

Em cada uma destas linhas é necessário definir também o tipo de condição de fronteira que se pretende implementar, sendo isto realizado através da coluna *BCID*. Neste caso foi atribuído *ID* = 2 em todos os casos, de forma a estabelecer condições de simetria para cada um dos planos.

Adicionalmente foi também criada uma restrição referente à linha P3, sendo atribuído um valor de *NRES* = 1 para identificar o número de restrições aplicáveis a esta linha. Esta restrição tem como objetivo fixar um nó da superfície inferior do *stopper* pertencente ao raio de 59,5 mm, de forma a este não se poder movimentar, eliminando o movimento de corpo livre do *stopper* no eixo Oz enquanto não se verificar o contacto deste com as ferramentas.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

1010***** < DD3IMP 010.x > File "bcon.dat" 27.05.2018 *****									
***** MANDATORY file to input Boundary Conditions *****									
=====									
Boundary conditions	NSC=	3	ERR=	1.D-5		BCID			
Ax+By+Cz=D	A	B	C	D	COORD	ID	NRES		
P1	1	0	0	0	1	2	0		
P2	0	1	0	0	2	2	0		
P3	0	0	1	0	3	2	1		
Restrictions	COORD	COND	VALUE	ERR2					
P3R1	1	0	59.5	1.D-5					
=====									

Figura 4.11 - Excerto do ficheiro *DD3_bcon.dat* utilizado na definição do problema, destacando os parâmetros alterados

O ficheiro *DD3_contact.dat* é utilizado com a finalidade de definir os *sets* de contacto do processo, o coeficiente de penalidade, coeficiente de atrito, entre outros parâmetros. Novamente, a primeira alteração a fazer é a inserção do número de *sets* a utilizar, no caso sendo definido $NSET = 2$. À semelhança do ficheiro *DD3_bcon.dat*, a definição dos contactos é realizada através de equações do tipo $Ax + By + Cz = D$. Os dois *sets* de contacto utilizados são definidos da seguinte forma:

- *Set 1*: define a expressão tal que $0x + 0y + 1z = L$, definindo o contacto da parte inferior do esboço ($L = low$) com as ferramentas;
- *Set 2*: define a expressão tal que $0x + 0y + 1z = H$, definindo o contacto da parte superior do esboço ($H = high$) com as ferramentas;

O coeficiente de atrito e o coeficiente de penalidade são alterados também neste ficheiro, sendo identificados pelos parâmetros *MU* e *CPen*, respetivamente. Habitualmente o valor utilizado no campo *CPen* corresponde a 10% do módulo de elasticidade do material utilizado, sendo possível a adoção de outros valores. No decorrer deste trabalho é também explorada a utilização de vários coeficientes de atrito distintos, podendo no campo *MU* observar-se os valores de 0,01, 0,03, 0,07 e 0,11.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "contact.dat" 27.05.2018 *****
***** 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
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 0.07 7000.0

```

Figura 4.12 - Excerto do ficheiro *DD3_contact.dat* utilizado na definição do problema, destacando os parâmetros alterados

Na Figura 4.13 encontra-se um excerto do ficheiro *DD3_input.dat*, ficheiro este que é utilizado para definir os parâmetros numéricos da simulação, definindo *checkpoints*, número de iterações, tolerância máxima para convergência, entre outros. Alguns dos parâmetros mais importantes são:

- *NEND*: define o número máximo de incrementos que a simulação pode atingir;
- *TOLEQ*: define a tolerância das forças fora de equilíbrio que permite determinar a convergência da solução;
- *IEQMAX*: define o número máximo de iterações que cada incremento pode alcançar até ser obtida a convergência. O valor da convergência é determinado pelo parâmetro anterior.
- *iphOSS*: define em qual das fases do processo ocorre o retorno elástico do conformado. Neste caso é seleccionada a fase número 4, como será possível verificar seguidamente na explicação do ficheiro *DD3_phase.dat*.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

1010***** < DD3IMP 010.x > File "input.dat" 27.05.2018 *****						
***** MANDATORY file to start/restart a simulation *****						
Simulation and Output Data	NSTART 1	NEND 5000	NOUT 0	iGID 10	INC 51	DEV 0
Tolerances and residues	TOLEQ 0.01	TEQOUT 1.0E-01	RAPEQ 1.0E+09	TOLST 1.0E-08	CUNL 0.999	dampOSS 0.50
Maximum number of iterations	IRMXX 1	IEQMAX 50	NMAXST 25			
Max. Increments for each NST	DEMAX 0.0100	DWMAX 0.5000	DSNMAX 10.0	DSTMAX 3.0		
Rmin Strategy	RINF 0.0010	RSUP 5.000	DFNMAX 0.0	DFT1MAX 0.0	DFT2MAX 0.0	
Thermal Analysis Parameters	T_TOLEQ 1.0E-03	T_alfa 0.5	T_Diag 1	T_Transi 1	T0[°C] 25.0	
Input data, Cep	MEPopt 1	iphOSS 4				

Figura 4.13 - Excerto do ficheiro *DD3_input.dat* utilizado na definição do problema, destacando os parâmetros alterados

De forma a proceder à caracterização do material é introduzida a informação sobre o mesmo no ficheiro *DD3_mater0.dat*. Neste, o utilizador define qual o modelo constitutivo a ser considerado para a simulação, assim como a lei de encruamento e outras propriedades do material tais como o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade.

O parâmetro *EM* é representativo do módulo de elasticidade, definido em 70 GPa e *PR* corresponde ao coeficiente de Poisson, definido em 0,33, sendo ambos estes valores obtidos através do *benchmark* (Habraken et al., 2022). O campo *PlasLAW* permite definir qual a lei de encruamento a ser empregue, sendo o valor 5 representativo da lei de Voce, tendo sido acima concluído que esta seria a que melhor se adequa ao caso de estudo. Após o preenchimento do parâmetro *PlasLAW* é necessário definir as variáveis da lei que se pretende utilizar, sendo neste caso preenchidos os campos relativos à lei de Voce *Y0*, *CYe* *Ysat* cujos valores se encontram no capítulo 2.2. O valor do campo *YldCRIT* possibilita a escolha do modelo constitutivo, sendo no exemplo abaixo atribuído o valor de 1, indicativo do critério Hill48. No entanto, a imagem abaixo representa a simulação do modelo Von Mises, dada a atribuição do valor de 0,5 aos parâmetros F, G e H do modelo e o valor de 1,5 aos parâmetros L, M e N. Similarmente ao que é demonstrado na Figura 4.14, o ficheiro *DD3_mater0.dat* possui diferentes secções para a atribuição dos parâmetros dos vários modelos constitutivos considerados. A Tabela 5.1 e Tabela 6.1 indicam qual os valores de *PlasLAW* a utilizar para cada um dos modelos estudados.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

1010***** < DD3IMP 010.x > File "mater.dat" 27.05.2018 *****						
***** MANDATORY file to input constitutive parameters *****						
=====						
MATERIAL PARAMETERS	PlasLAW	YldCRIT	EM	PR		
	5	1	70000.0	0.33		

Voce Law	Yo	CY	Ysat	CX	Xsat	
No-Isot.Kin.Hard.	137.4	12	326.8			
=====						
YIELD CRITERION						
-Hill48	F	G	H	L	M	N
	0.500	0.500	0.500	1.5	1.5	1.5

Figura 4.14 - Excerto do ficheiro *DD3_mater0.dat* utilizado na definição do problema utilizando a lei de Voce e o modelo constitutivo de Von Mises, destacando os parâmetros alterados

Por fim, no ficheiro *DD3_phase.dat*, é feita a descrição do número de fases ou etapas do processo, do número de ferramentas a utilizar e do movimento das mesmas. Neste caso foram criadas quatro fases ($NPH = 4$) e são admitidas três ferramentas ($NbTOOL = 3$) dado que o *stopper* é modelado juntamente com o esboço, como mencionado anteriormente. Seguidamente é atribuído um número e nome a cada ferramenta, realizado qualquer ajuste que seja necessário à sua posição inicial e definido o *set* de contacto a que pertence, determinado no ficheiro *DD3_contact.dat*. Na Figura 4.15 é possível identificar que as ferramentas foram definidas como:

- Ferramenta 1: atribuída à matriz, denominada T1_Die, que é incorporada no *set* de contacto 1, estabelecendo o contacto com a parte inferior da chapa;
- Ferramenta 2: atribuída ao cerra-chapas, denominada T2_BHolder, que é incorporada no *set* de contacto 2, estabelecendo o contacto com a parte superior da chapa;
- Ferramenta 3: atribuída ao punção, denominada T3_Punch, que é incorporada no *set* de contacto 2, estabelecendo o contacto com a parte superior da chapa.

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 27.05.2018 *****						
***** MANDATORY file to input phase data *****						
=====						
	NPH=	4	NbTOOL=	3	NbBCID=	0
=====						
Initial Displacements (DIS0) and naming of tools						
-----iMAT-----						
0	X	Y	Z	<naming----->	BCID	SET

1	0	0	0	T1_Die	1	
2	0	0	0	T2_BHolder	2	-0.1 +5.0
3	0	0	-9	T3_punch	2	

Figura 4.15 - Excerto do ficheiro *DD3_phase.dat* utilizado na definição do problema, destacando os parâmetros alterados. Na presente figura é demonstrado apenas a secção do ficheiro referente ao cabeçalho.

De seguida inicia-se a preparação de cada uma das fases. Para este fim é necessário definir qual a ferramenta que coordena a troca de fase (*NOU*), as condições para validar a troca de fase (*JD*, *NTYP* e *NOPR*) e qual a ação que a ferramenta deverá realizar (*INDOUT*). Abaixo encontra-se um pequeno

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo excerto do ficheiro *DD3_phase.dat* que explica o funcionamento de cada um destes parâmetros, demonstrando apenas os valores relevantes para o presente caso de estudo.

```

NOUT - Number of the tool mastering the change of phase
JD   - Direction {1,2,3} to check the change of phase
NTYP - Type of test to validate the change of phase
      1 - Displacement
      2 - Imposed Force
      3 - Lost of Contact
NOPR - Test to validate the change of phase
      1 - <=
      2 - >=
INDOUT - index defining the "action" of the tool/BCID:
        0 - tool/BCID not activated
        1 - tool/BCID stopped (null displacement prescribed)
        2 - displacement prescribed to the tool/BCID
        -2 - displacement based on ROTATION (only BCIDs) DISTINT are degrees...
        3 - total force prescribed to the tool/BCID
      remark: this is the TOTAL force to be assigned to tool or all BCID,
              being the displacement to be assigned to each node with
              the same BCID precisely the same!!!

```

Figura 4.16 - Excerto do ficheiro *DD3_phase.dat* onde são esclarecidos os valores a utilizar referentes aos parâmetros *NOUT*, *JD*, *NTYP*, *NOPR* e *INDOUT*

Na primeira fase ($IPH = 1$) pretende-se que o cerra-chapas exerça uma força de 40 kN sobre o esboço, como mencionado no *benchmark* EXACT. Esta força é imposta de forma a permitir o correto escoamento do material enquanto simultaneamente mitiga o fenómeno de enrugamento da chapa. Para este fim, é atribuído o valor de 2 no parâmetro *INDOUT* referente ao eixo Z do cerra-chapas, impondo um pequeno deslocamento de 0,1 mm para garantir o correto contacto com o esboço enquanto simultaneamente é aplicada uma força de 10 kN no mesmo eixo, identificada na secção *EFFIMP* do ficheiro. Este valor dá-se devido ao facto de apenas ser simulado $\frac{1}{4}$ do processo, como mencionado acima. Nesta fase o punção encontra-se ainda desativado, comprovado pelo valor 0 em todos os eixos na secção *INDOUT*, e a matriz encontra-se ativa e imóvel, utilizando o valor 1 em todos os eixos na secção *INDOUT*.

IPH	DELT	NOUT	JD	NTYP	NOPR	Text[°C] TIME[sec]			
1	.001	2	3	2	2		0.001		
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
2	1	1	2	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	10000.0
3	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0

Figura 4.17 - Excerto do ficheiro *DD3_phase.dat*, referente à primeira fase do processo

Durante a segunda fase ($IPH = 2$) é realizado o movimento do punção, enquanto se mantém a força imposta no cerra-chapas. Desta forma, tendo-se já realizado o movimento do cerra-chapas e não sendo necessário um novo movimento, o valor do parâmetro *INDOUT* no eixo Z é alterado para 3

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo representando apenas a imposição da força. Naturalmente deve-se ativar o punção, utilizando valores diferentes de 0 nos diferentes eixos. No eixo Z é atribuído o valor *INDOUT* = 2, impondo assim o deslocamento no eixo Z ao punção, cuja distância é definida na secção *DISINT*.

IPH	DELT	NOUT	JD	NTYP	NOPR	Text[°C]	TIME[sec]
2	.01	3	3	1	1		54.0

iout	INDOUT(I)	DISINT(I)(f8.0)	EFFIMP(I)(f8.0)	Hcoef	Temp
1	1 1 1 1	0.0 0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0 0.0	0	0
2	1 1 1 3	0.0 0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 10000.0 0.0	0	0
3	1 1 2 2	0.0 0.0 -54.0 0.0	0.0 0.0 0.0 0.0	0	0

Figura 4.18 - Excerto do ficheiro DD3_phase.dat, referente à segunda fase do processo

Finalizado o movimento do punção é apenas necessário passar à desativação das ferramentas. No caso presente optou-se por uma desativação gradual, mantendo na terceira fase (*IPH* = 3) a força do cerra-chapas e desativando apenas o punção. Por fim, na fase quatro (*IPH* = 4) são desativadas todas as ferramentas, atribuindo-se o valor de 0 em todas as direcções de todas as ferramentas na secção *INDOUT*, dando-se por terminado o processo.

IPH	DELT	NOUT	JD	NTYP	NOPR	Text[°C]	TIME[sec]
3	.005	3	3	3	2		1.0

iout	INDOUT(I)	DISINT(I)(f8.0)	EFFIMP(I)(f8.0)	Hcoef	Temp
1	1 1 1 1	0.0 0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0 0.0	0	0
2	1 1 1 1	0.0 0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 10000.0 0.0	0	0
3	0 0 0 0	0.0 0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0 0.0	0	0

IPH	DELT	NOUT	JD	NTYP	NOPR	Text[°C]	TIME[sec]
4	.001	2	3	3	2		1.0

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 0.0	0	0
2	0 0 0 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 0.0	0	0

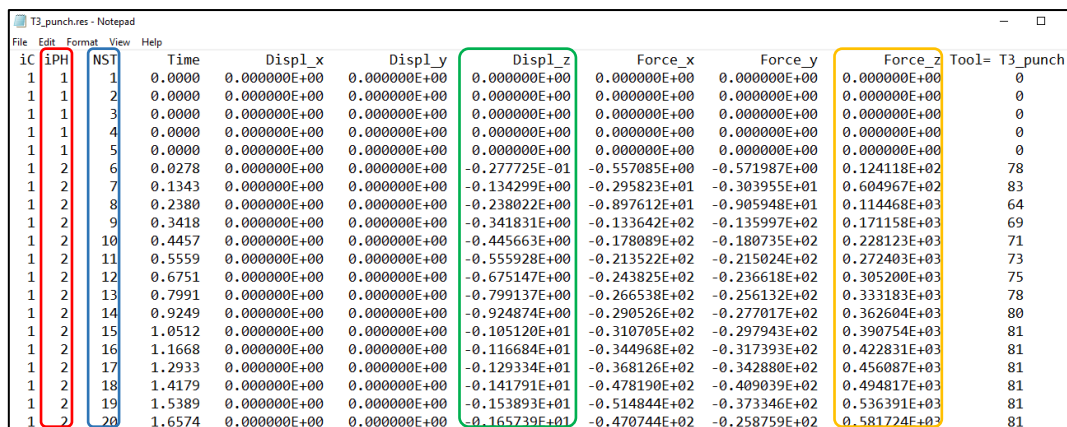
Figura 4.19 - Excerto do ficheiro DD3_phase.dat, referente à terceira e quarta fase do processo

4.4. FICHEIROS DE OUTPUT DD3IMP

No decorrer da simulação, o *solver* procede à criação de vários ficheiros de *output* que contêm informação relevante referente ao processo em estudo, mencionados na Tabela 1.2, onde são expostas as funções dos mesmos.

De forma a fazer a comparação da força do punção nas simulações numéricas com os valores experimentais é utilizado o ficheiro *T3_Punch.res*. Neste, é possível obter os valores referentes ao deslocamento e força do punção ao longo do eixo Z, permitindo assim a criação de gráficos de força-

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo deslocamento. Para este fim são utilizadas as colunas *Displ_Z* e *Force_Z*, sendo também conferidas as colunas *iPH* (indica o número da fase em que se encontra a simulação) e *NST* (indica o número do incremento).



iC	iPH	NST	Time	Displ_x	Displ_y	Displ_z	Force_x	Force_y	Force_z	Tool1= T3_punch
1	1	1	0.0000	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0
1	1	2	0.0000	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0
1	1	3	0.0000	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0
1	1	4	0.0000	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0
1	1	5	0.0000	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0
1	2	6	0.0278	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.277725E-01	-0.557085E+00	-0.571987E+00	0.124118E+02	78
1	2	7	0.1343	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.134299E+00	-0.295823E+01	-0.303955E+01	0.604967E+02	83
1	2	8	0.2380	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.238022E+00	-0.897612E+01	-0.905948E+01	0.114468E+03	64
1	2	9	0.3418	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.341831E+00	-0.133642E+02	-0.135997E+02	0.171158E+03	69
1	2	10	0.4457	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.445663E+00	-0.178089E+02	-0.180735E+02	0.228123E+03	71
1	2	11	0.5559	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.555928E+00	-0.213522E+02	-0.215024E+02	0.272403E+03	73
1	2	12	0.6751	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.675147E+00	-0.243825E+02	-0.236618E+02	0.305200E+03	75
1	2	13	0.7991	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.799137E+00	-0.266538E+02	-0.256132E+02	0.333183E+03	78
1	2	14	0.9249	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.924874E+00	-0.290526E+02	-0.277017E+02	0.362604E+03	80
1	2	15	1.0512	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.105120E+01	-0.310705E+02	-0.297943E+02	0.390754E+03	81
1	2	16	1.1668	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.116684E+01	-0.344968E+02	-0.317393E+02	0.422831E+03	81
1	2	17	1.2933	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.129334E+01	-0.368126E+02	-0.342880E+02	0.456087E+03	81
1	2	18	1.4179	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.141791E+01	-0.478190E+02	-0.409039E+02	0.494817E+03	81
1	2	19	1.5389	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.153893E+01	-0.514844E+02	-0.373346E+02	0.536391E+03	81
1	2	20	1.6574	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.165739E+01	-0.470744E+02	-0.258759E+02	0.581724E+03	81

Figura 4.20 - Excerto do ficheiro *T1_punch.res*, destacando as colunas mais importantes

Juntamente com os ficheiros de texto gerados pelo software é pode-se também utilizar alguns dos ficheiros de *output* do DD3Imp para fazer o controlo do processo. Através do módulo de pós-processamento do *software* GiD é possível recorrer a ficheiros como o *GiD_ini.res*, *GiD_p[X]end.res* ou *GiD_simu.res* para visualizar o progresso da simulação ao longo do tempo, como descrito na página 4. abaixo encontra-se um exemplo de um ficheiro *GiD_p2end.res*, ficheiro este que permite a visualização de todo o sistema no instante em que é finalizada a fase dois do processo.

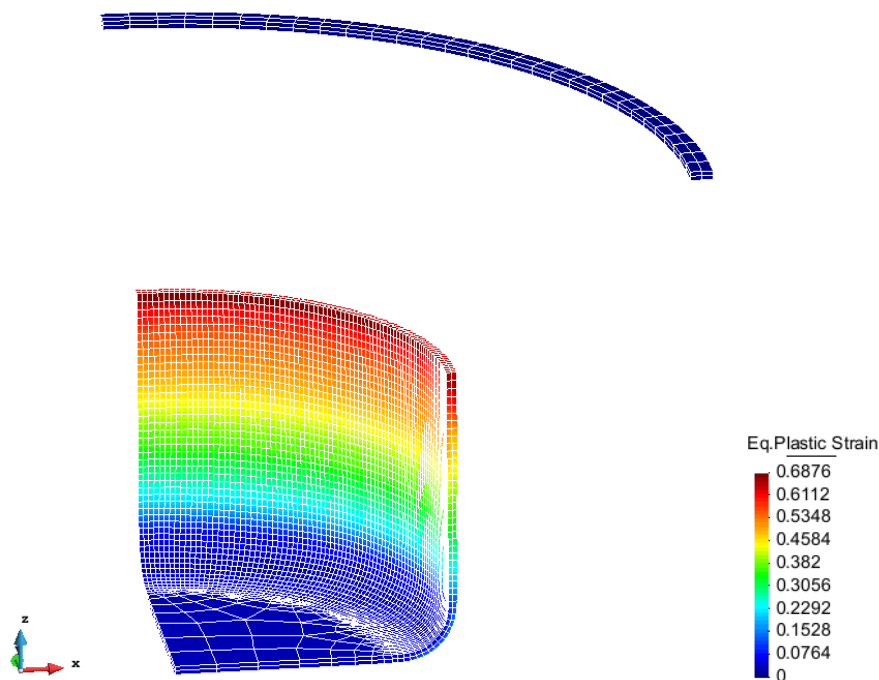


Figura 4.21 – Visualização do final da fase dois do processo no *software* GiD, utilizando o contorno de cores para avaliar a deformação plástica equivalente

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Por fim, o ficheiro *stat.res* fornece informação sobre o atual estado da simulação, contendo informação sobre a convergência dos incrementos, em que incremento se encontra, entre outros, sendo maioritariamente utilizado neste caso de estudo para avaliar o tempo que requer cada simulação, principalmente aquando da realização do estudo de convergência de malha.

5. RESULTADOS PARA MATERIAIS ISOTRÓPICOS

Como mencionado anteriormente, um material considera-se isotrópico quando a resposta para uma determinada solicitação é a mesma, independentemente da sua direção. Se a resposta a uma solicitação de tração ou de compressão uniaxial for sempre a mesma, independentemente da direção, então o material é considerado isotrópico. No entanto, a isotropia do material não implica simetria na resposta à tração uniaxial ou compressão uniaxial, apenas que, para um determinado tipo de solicitação, a resposta obtida é independente da direção da solicitação, podendo variar com a mudança do tipo de solicitação aplicada.

É exatamente isso que ocorre ao descrever o comportamento plástico de materiais isotrópicos com diferentes critérios de cedência isotrópicos, os quais, sendo sempre isotrópicos, descrevem de maneira distinta a resposta do material às solicitações, como tração ou compressão uniaxial, e corte puro, por exemplo. Assim, cada critério de cedência isotrópico irá modelar o material de forma única, mas sempre dentro do domínio isotrópico.

Ao focar no estudo da influência do comportamento isotrópico de um material elastoplástico foram realizadas simulações 3D, adequadas às características isotrópicas do material e à geometria a ser conformada.

Os critérios de cedência isotrópicos incluídos neste capítulo são:

- Tresca, 1894;
- Von Mises, 1913;
- Drucker, 1949:
 - No limite inferior de convexidade: $c = -3,375$;
 - No limite superior de convexidade: $c = +2,25$;
- CPB06, 2006:
 - No limite inferior de convexidade: $k = -1$;
 - No limite superior de convexidade: $k = +1$;

Para a realização das várias simulações apenas foi modificado o ficheiro DD3_mater0, alterando o parâmetro *YldCRIT* de forma a corresponder ao critério de plasticidade que se pretende utilizar. Os valores de *YldCRIT* utilizados para cada modelo constitutivo são descritos na tabela abaixo, sendo também necessário alterar outras variáveis tais como o valor de c e k para os critérios de Drucker e CPB06, respetivamente.

Tabela 5.1 - Valores do parâmetro *YldCRIT* do ficheiro *DD3_mater0* consoante o critério de cedência isotrópico a utilizar

Modelo Isotrópico	Valor YldCRIT
Tresca	0
Von Mises	1
Drucker	5
CPB06	6

5.1. SIMULAÇÕES UTILIZANDO MODELOS ISOTRÓPICOS

De forma a avaliar a influência da caracterização do material no processo de simulação, após a correta formulação do problema (modelação do esboço e das ferramentas, estudo de convergência de malha, edição dos ficheiros de entrada) foram realizadas várias simulações utilizando os vários modelos isotrópicos mencionados acima.

Foram selecionados como critérios de avaliação as curvas de força-deslocamento, a espessura do embutido e a altura final do mesmo.

O primeiro critério a ser avaliado foram as curvas força-deslocamento obtidas para cada um dos critérios isotrópicos. Através da análise da Figura 5.1 é possível verificar que os valores máximos de cada uma das curvas numéricas encontram-se desviados à esquerda quando comparados com a curva experimental, sendo assim possível compreender que a força máxima ocorre num momento anterior ao expectável quando o material é modelado como isotrópico. Dos modelos estudados, é também possível verificar que apenas no limite inferior do critério CPB06 é sobrestimado o valor máximo da força do punção. Partindo apenas do gráfico abaixo as curvas mais apropriadas aparentam ser a curva de Von Mises e de Drucker Inferior, sendo estas as mais próximas do valor da força máxima, mantendo-se também similar ao primeiro *plateau* da curva experimental no segundo pico.

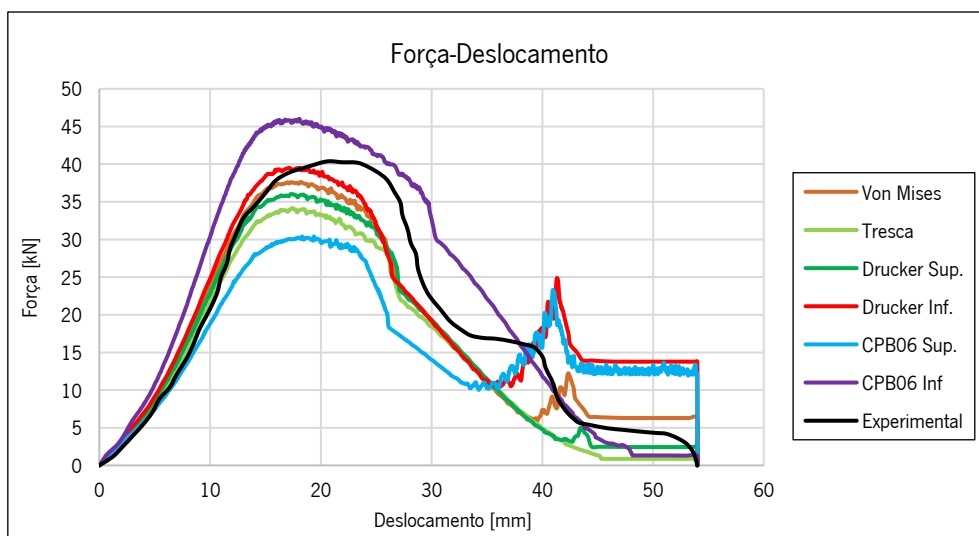


Figura 5.1 - Curvas força-deslocamento do punção obtidas para os vários modelos isotrópicos avaliados

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Seguidamente, foram avaliados os perfis de altura obtidos para cada um dos modelos. Dado que neste capítulo apenas são contemplados os modelos isotrópicos, foi calculada também a média da altura experimental obtendo assim um valor constante, tornando mais simples a comparação com os restantes resultados. A média foi calculada através da Equação (5.1), sendo atribuído um peso de 2 a todos os valores excetuando aos que se encontram nas extremidades, no caso 0° e 90°.

$$\bar{h} = \frac{Y(0^\circ) + 2Y(15^\circ) + 2Y(30^\circ) + 2Y(45^\circ) + 2Y(60^\circ) + 2Y(75^\circ) + Y(90^\circ)}{12} \quad (5.1)$$

Comparando os vários modelos com o valor obtido pelo cálculo da média verifica-se novamente que as duas instâncias mais similares são o critério de Von Mises e de Drucker com $c = -3,375$, estando o primeiro claramente mais próximo do valor médio de altura.

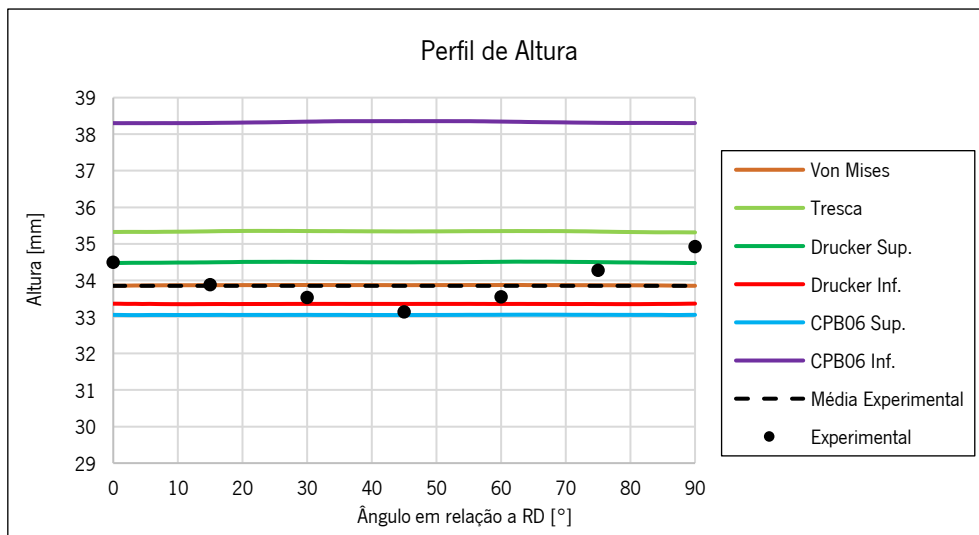


Figura 5.2 - Perfis de altura obtidos para os vários critérios de cedência isotrópicos testados

Finalmente, no que toca à espessura do embutido final, os valores obtidos numericamente foram comparados com o valor médio da espessura do embutido experimental, sendo estes adquiridos através da realização de cortes a diferentes alturas e posteriormente medida a espessura em função do ângulo relativo à direção de laminagem. Analisando a figura abaixo entende-se que os valores para a altura de 30 mm e, em algumas secções para a altura 25 mm, a espessura do embutido supera a folga prevista pelo *benchmark* de 20%, levantando algumas questões sobre o processo experimental.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

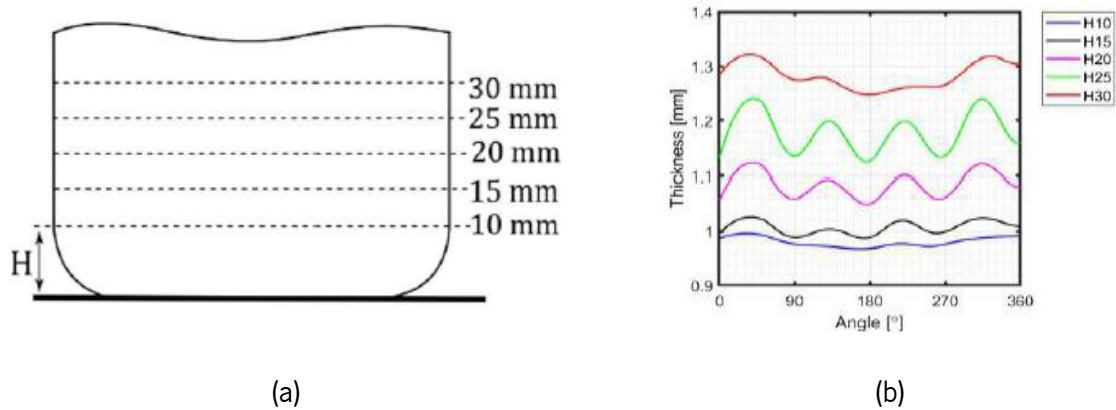


Figura 5.3 - (a) Alturas de referência para a medição de espessuras e (b) Evolução da espessura em função do ângulo da direção de laminação para diferentes alturas – retirado de (Habraken et al., 2022)

Como é possível compreender pela Figura 5.4 e Figura 5.5, o critério Von Mises volta a provar-se o mais adequado, dentro dos modelos isotrópicos, para estimar o comportamento do processo experimental, apenas verificando maior discrepância com os valores experimentais para as alturas de 25 e 30 mm. Os dados revelam também que, contrariamente ao que ocorre experimentalmente, a espessura do embutido nunca ultrapassa os 1,2 mm, providenciando uma possível justificação para a existência do fenómeno de *ironing* face ao que é exibido nos resultados experimentais.

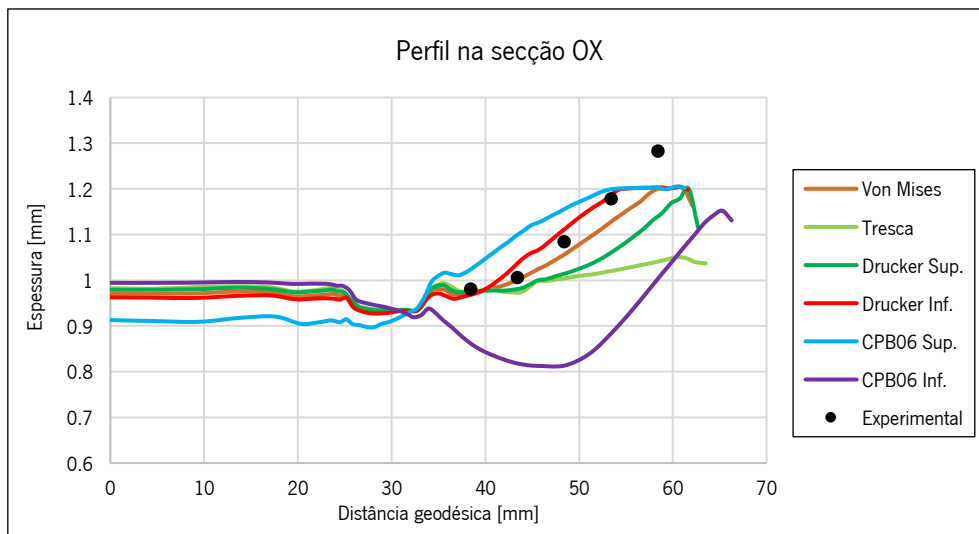


Figura 5.4 – Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os critérios isotrópicos testados quando considerado o perfil na secção OX

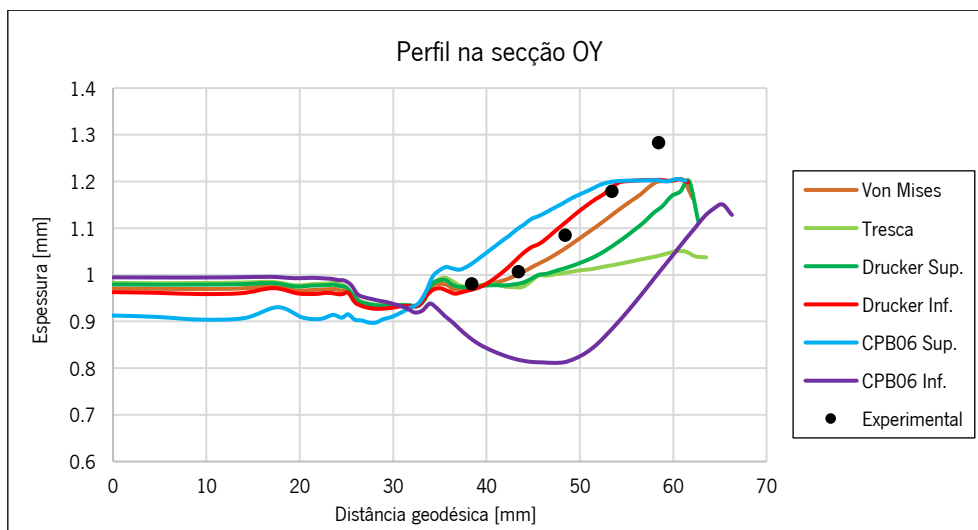


Figura 5.5 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os critérios isotrópicos testados quando considerado o perfil na secção OY

5.2. DISCUSSÃO SOBRE O COEFICIENTE DE ATRITO

Em processos de conformação de chapa metálica o estudo de diferentes coeficientes de atrito é essencial para a compreensão de como as interações superficiais afetam o produto final obtido, o desgaste da ferramenta e a qualidade do produto. O atrito desempenha um papel crucial na conformação do metal, uma vez que afeta as forças impostas, a conformabilidade e o acabamento superficial. Ao investigar vários coeficientes de atrito, é possível compreender de que forma este irá afetar cada métrica utilizada para avaliar o sucesso do processo, levando a uma maior eficiência e redução de defeitos. No decorrer do *benchmark* no qual se baseia este trabalho não é mencionado qual o valor do coeficiente de atrito que deve ser considerado, deixando ao critério das equipas participantes quais os valores a utilizar para reproduzir o processo experimental o mais fielmente possível. Apesar de na prática o coeficiente de atrito em processos de embutidura ser diferente consoante a zona estudada, no processo de simulação numérica é assumido um valor constante para todo o processo.

De forma a compreender a influência deste parâmetro e se de facto o valor arbitrado inicialmente de 0,07 seria o mais apropriado para a definição do problema, neste capítulo arbitraram-se mais dois valores a utilizar para o coeficiente de atrito: 0,03 e 0,11, utilizando assim um coeficiente de atrito superior e outro inferior ao valor proposto inicialmente. Novamente, foram utilizados como critério de comparação as curvas de força-deslocamento, a espessura e a altura finais do embutido. Tendo-se concluído acima que, entre os critérios isotrópicos, o critério de Von Mises aparenta ser o que melhor se ajusta ao problema em mãos, este foi selecionado para o estudo da influência do coeficiente de atrito.

A partir dos dados apresentados no gráfico presente na Figura 5.6 é possível observar que, com o aumento do coeficiente de atrito utilizado verifica-se também um aumento da força do punção de forma generalizada, sendo que o ensaio onde é utilizado o valor de $\mu = 0,11$ acaba por sobrestimar a força máxima experimental. No que toca ao segundo pico da força apenas o ensaio de $\mu = 0,03$ apresenta valores dispares dos restantes, estando naturalmente abaixo dos mesmos.

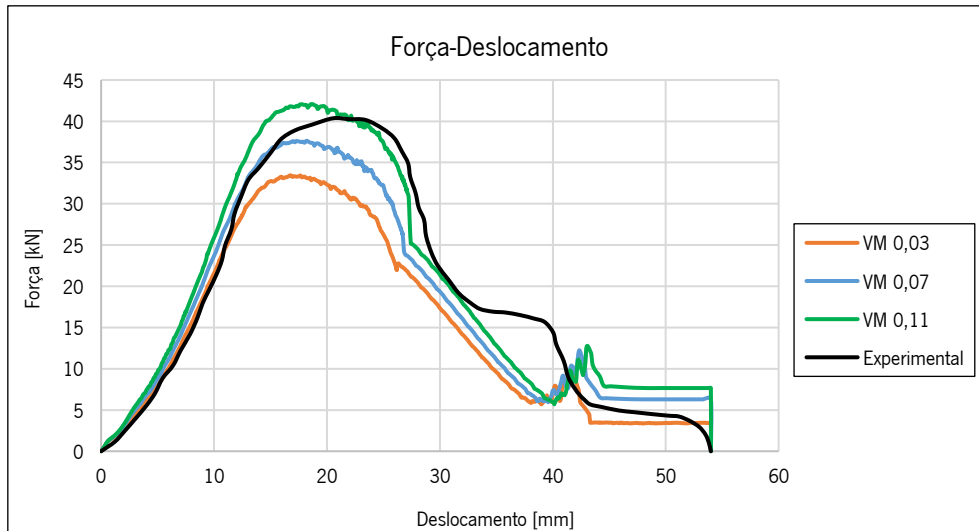


Figura 5.6 - Curvas força-deslocamento do punção obtidas para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo isotrópico de Von Mises

No que toca à análise da altura do embutido ocorre algo similar ao que se verifica nas curvas de força-deslocamento, sendo que com o aumento do coeficiente de atrito obtém-se também um aumento da altura final. Neste caso, é notável que o coeficiente de atrito com o valor de 0,07 é claramente o que melhor se ajusta aos dados experimentais, verificando-se uma diferença de cerca de 0,45 mm para cada um dos restantes valores.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

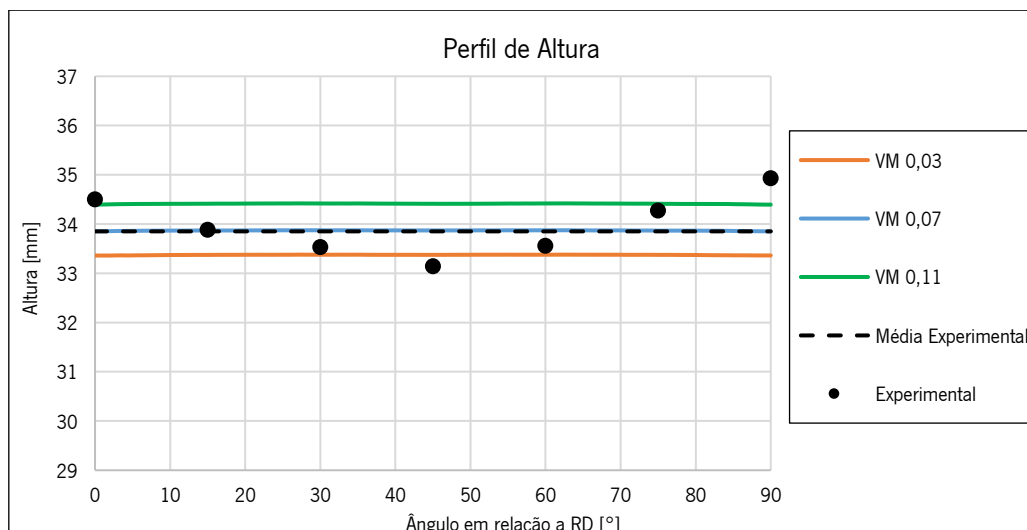


Figura 5.7 - Perfis de altura obtidos para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo isotrópico de Von Mises

No que diz respeito à espessura final do embutido, é possível inferir que não há sensibilidade suficiente para demonstrar diferenças significativas no que toca à alteração do coeficiente de atrito, principalmente em relação aos valores 0,03 e 0,07, mostrando-se ambos apropriados para a descrição do processo. Desta forma, considerando todos os aspetos avaliados, conclui-se que o valor de $\mu = 0,07$ aparenta ser o mais apropriado para o caso em estudo.

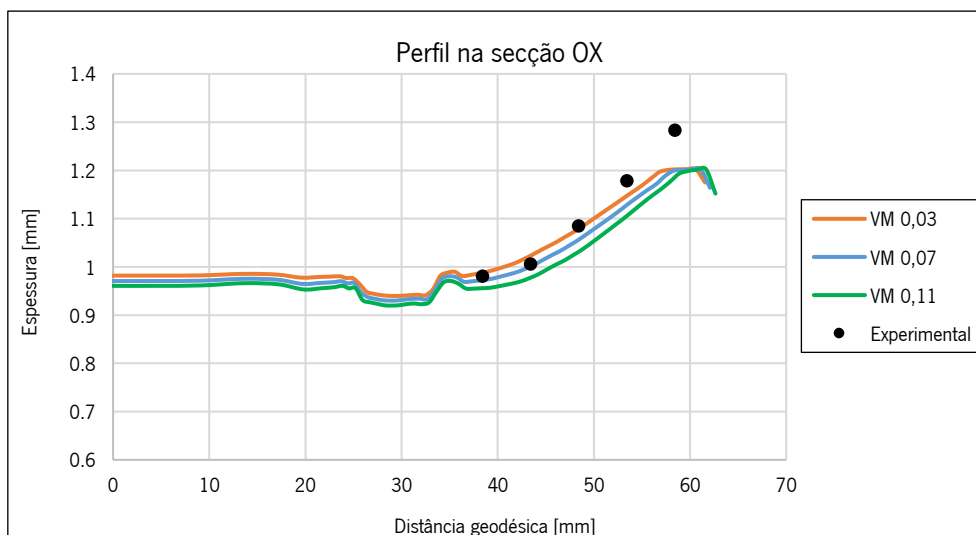


Figura 5.8 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo isotrópico de Von Mises, quando considerado o perfil na secção OX

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

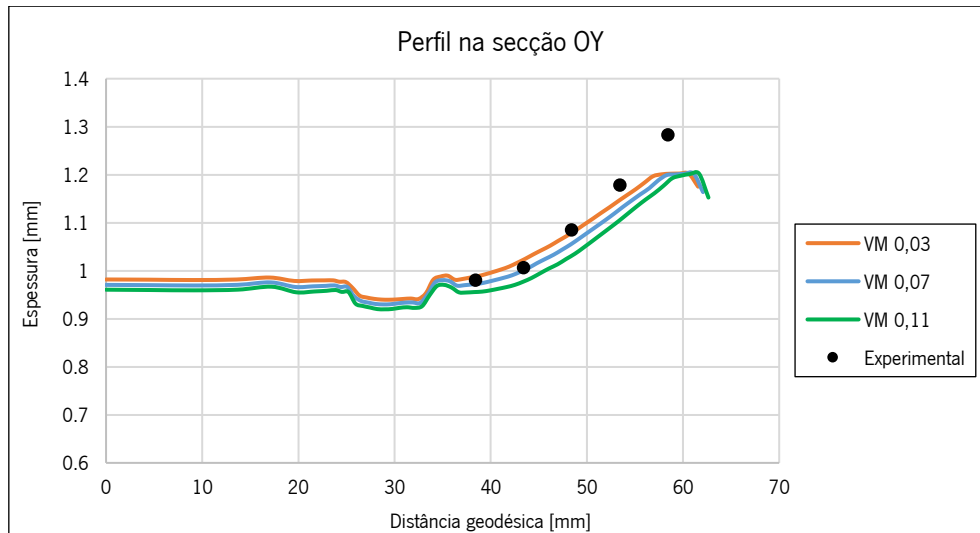


Figura 5.9 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo isotrópico de Von Mises, quando considerado o perfil na secção OY

6. RESULTADOS PARA MATERIAIS ANISOTRÓPICOS

Um material é considerado anisotrópico quando a resposta para uma determinada solicitação é distinta dependendo da direção onde esta é aplicada, como foi estabelecido no capítulo 3.1.2. Atendendo ao carácter ortotrópico da anisotropia, foi novamente utilizado apenas $\frac{1}{4}$ do provete, considerando-se como ponto de partida as informações utilizadas já anteriormente para as simulações utilizando modelos isotrópicos (definição do comportamento mecânico do material, discretização do esboço, modelação das ferramentas e edição dos ficheiros de entrada do solver), alterando apenas o ficheiro de entrada *DD3_mater0.dat* conforme o critério de cedência em utilização, modificando apenas o parâmetro *YldCRIT* e os parâmetros anisotrópicos de cada critério.

Os critérios de cedência anisotrópicos escolhidos para este estudo comparativo foram:

- Hill48, 1948;
- CB2001, 2001;
- CPB06, 2006.

Tabela 6.1 - Valores do parâmetro *YldCRIT* do ficheiro *DD3_mater0* consoante o critério de cedência anisotrópico a utilizar

Modelo Anisotrópico	Valor YldCRIT
Hill 48	1
CB2001	4
CPB06	6

6.1. SIMULAÇÕES UTILIZANDO MODELOS ANISOTRÓPICOS

À semelhança do que foi estabelecido para os modelos isotrópicos, também para os modelos anisotrópicos foram realizadas várias simulações utilizando como critérios de avaliação as curvas de força-deslocamento, a espessura do embutido e a altura final do mesmo. De forma a ter um resultado mais objetivo, foi também calculado o erro global de cada simulação, utilizando a equação presente no *benchmark*, descrita abaixo:

$$\epsilon_g = \left(\frac{n^{num.} - n^{exp.}}{n^{exp.}} \right)^2 + \left(\frac{h^{num.} - h^{exp.}}{h^{exp.}} \right)^2 + \left(\frac{a^{num.} - a^{exp.}}{a^{exp.}} \right)^2 \quad (6.1)$$

onde ϵ_g representa o erro global; n o número de orelhas presentes; h a altura média e a a amplitude do embutido final. Os sobrescritos *num.* e *exp.* indicam se o valor utilizado se refere aos dados numéricos ou experimentais, respetivamente.

Neste capítulo os resultados foram agrupados por critério de plasticidade, de forma a ser mais fácil de comparar as caracterizações reais com as caracterizações virtuais. O coeficiente de atrito utilizado nas simulações presentes nesta secção é de 0,03.

6.1.1. HILL48

Novamente, iniciou-se o estudo pela análise das curvas de força-deslocamento do punção. Conforme é demonstrado na Figura 6.1, pode-se observar que a força máxima do punção é subestimada, apresentando uma diferença de cerca de 5 kN, ocorrendo o pico numérico ligeiramente antes do pico experimental. O segundo pico da curva do modelo Hill48 mostra-se também desajustado, sendo que o seu valor é praticamente 30% superior ao primeiro *plateau* experimental.

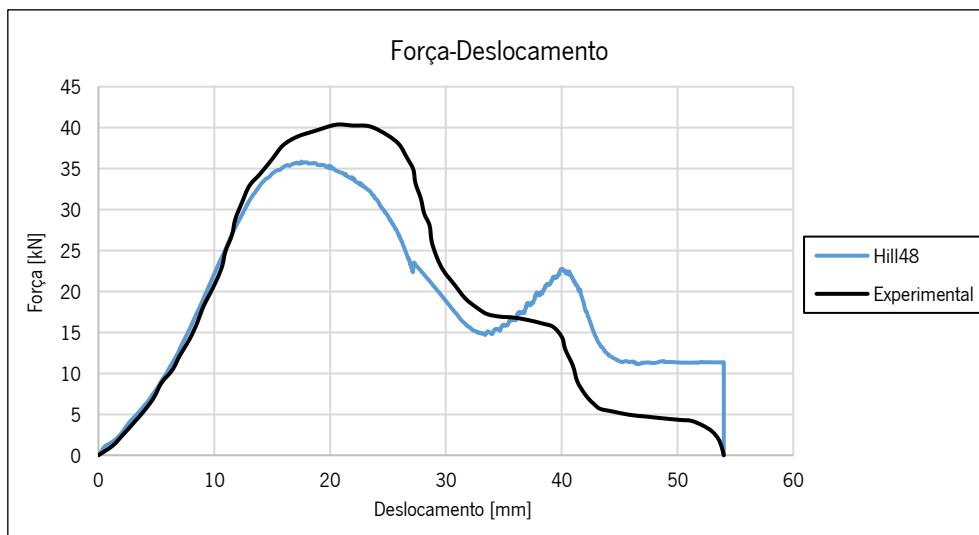


Figura 6.1 - Curvas de força-deslocamento experimental e obtida através do modelo Hill48

Seguidamente foi avaliado o perfil de alturas, onde através da Figura 6.2 pode-se compreender que o número de orelhas no embutido final é corretamente determinado, assim como as regiões de altura máxima e mínima. É possível compreender que os pontos de menor altura são subestimados, enquanto os de maior altura se demonstram apropriados (orelha causada perto dos 90°) ou sobrestimados (orelha causada perto dos 0°), implicando uma amplitude numérica superior à experimental.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

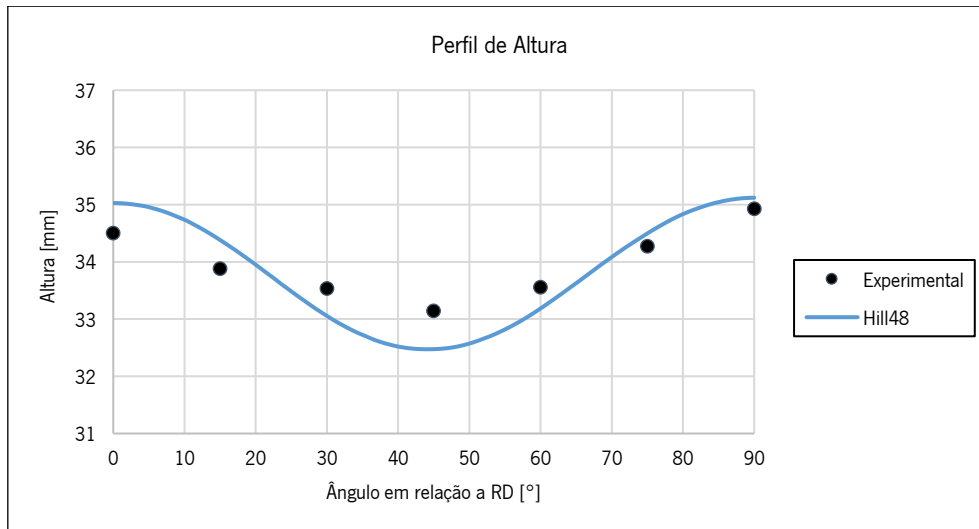


Figura 6.2 - Perfil de altura experimental e obtido através do modelo Hill48

Por fim, quanto à espessura pode-se dizer que esta foi subestimada ao longo do perfil OX e sobrestimada ao longo do perfil OY. Adicionalmente é possível observar que, à semelhança do que ocorre nos modelos isotrópicos, a espessura nunca ultrapassa os 1,2 mm impostos pela folga, causando a grande discrepância identificada no ponto onde $h = 30\text{mm}$.

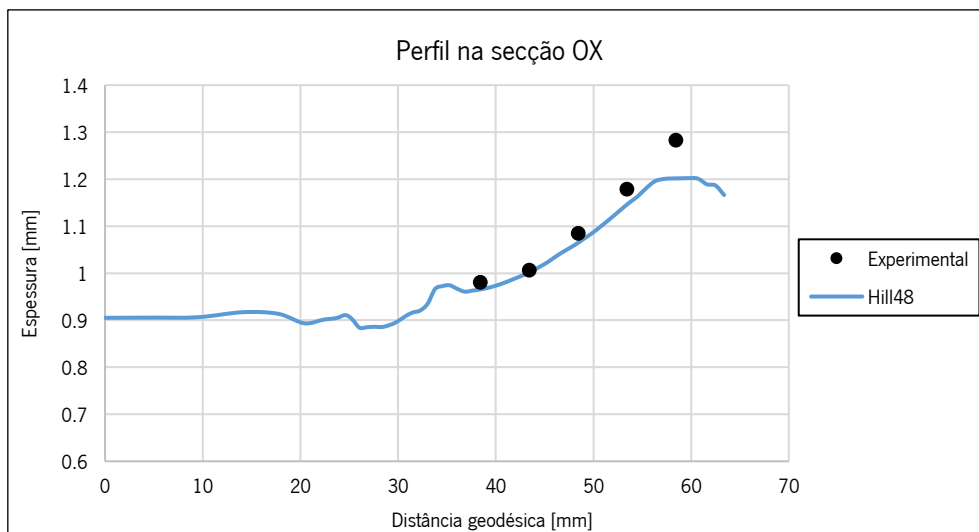


Figura 6.3 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para o critério Hill48 quando considerado o perfil na secção OX

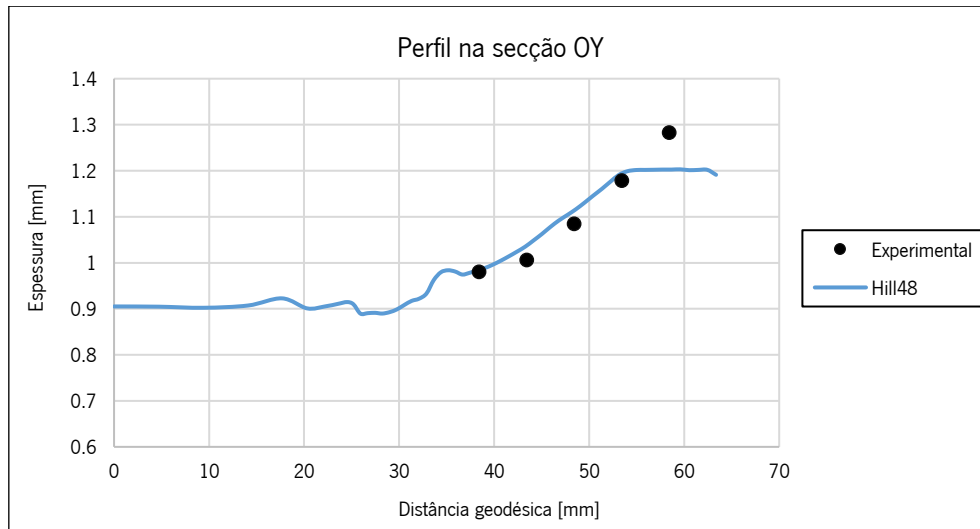


Figura 6.4 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para o critério Hill48 quando considerado o perfil na secção OY

Por fim, utilizando os dados na Tabela 6.2 para realizar o cálculo do erro global, estabelecido na Equação (6.1), obteve-se o resultado de $\epsilon_g = 0,0247$.

Tabela 6.2 - Dados utilizados para calcular o erro global para a utilização do modelo Hill48

Dados	Experimental	Hill48
n	4	4
h (mm)	34,10	33,77
a (mm)	2,29	2,65

6.1.2. CPB06

Para o modelo CPB06 foram consideradas as duas simulações realizadas, utilizando tanto a caracterização real (identificada como CPB06 Real) como a caracterização virtual (identificada como CPB06 Virtual). No que toca à força do punção verifica-se que esta é subestimada pelo modelo CPB06, tanto na caracterização real como na virtual. Comparando uma com a outra, vemos que os resultados são bastantes similares, obtendo-se uma força máxima do punção de 36,20 kN no método real e 35,84 no método virtual, sendo a diferença de apenas 0,36 kN. Também em ambos os casos, como no modelo Hill48, verifica-se que o segundo pico da força do punção é superior ao primeiro *plateau* do ensaio experimental.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

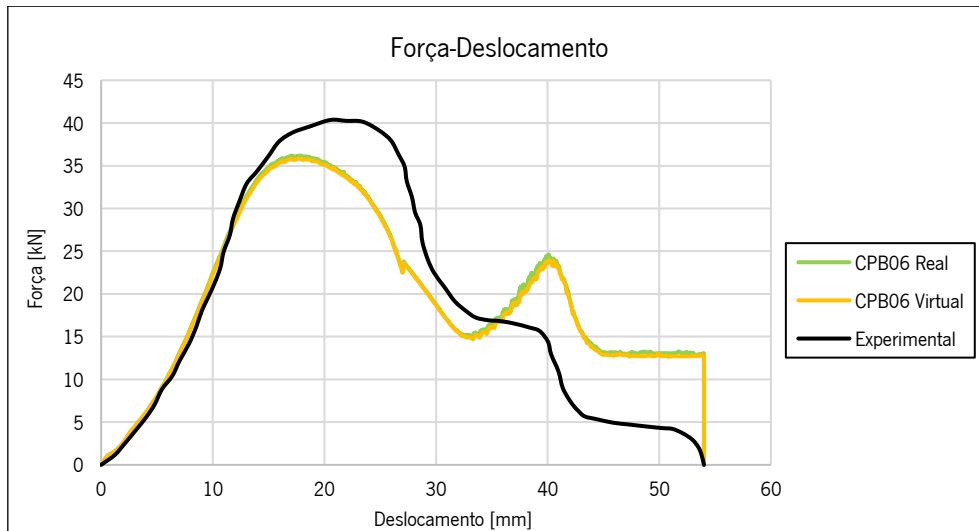


Figura 6.5 - Curvas de força-deslocamento experimental e obtidas através do modelo CPB06

Relativamente ao perfil de alturas, as previsões de ambas as caracterizações são novamente bastante similares, prevendo corretamente as alturas mais próximas da direção de 90°. O número de orelhas e os seus locais de ocorrência são também bem determinados, apesar de os topos das orelhas serem sobrestimados, ao contrário do que acontece com os pontos mais baixos.

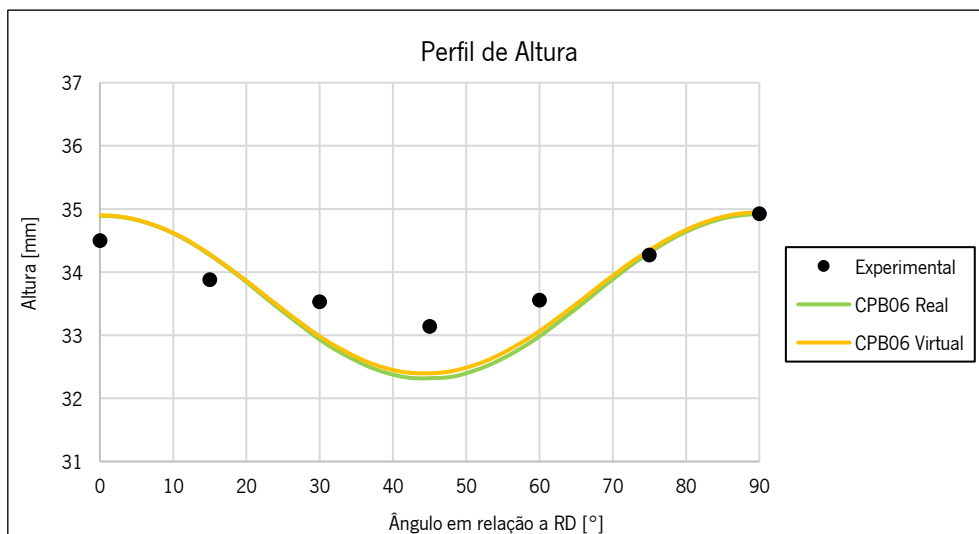


Figura 6.6 - Perfil de altura experimental e obtidos através do modelo CPB06

Avaliando as espessuras, é possível que compreender que, pelas razões explicadas acima, apenas a espessura referente à altura de 30 mm não é corretamente estimada. De realçar que, mais uma vez, ambas as caracterizações fornecem estimativas bastante similares.

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutadura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

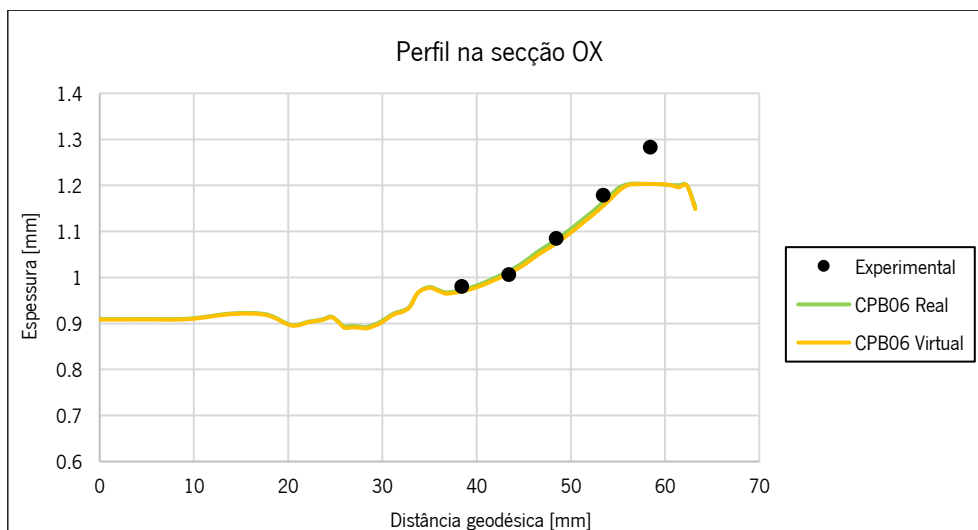


Figura 6.7 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para o critério CPB06 quando considerado o perfil na secção OX

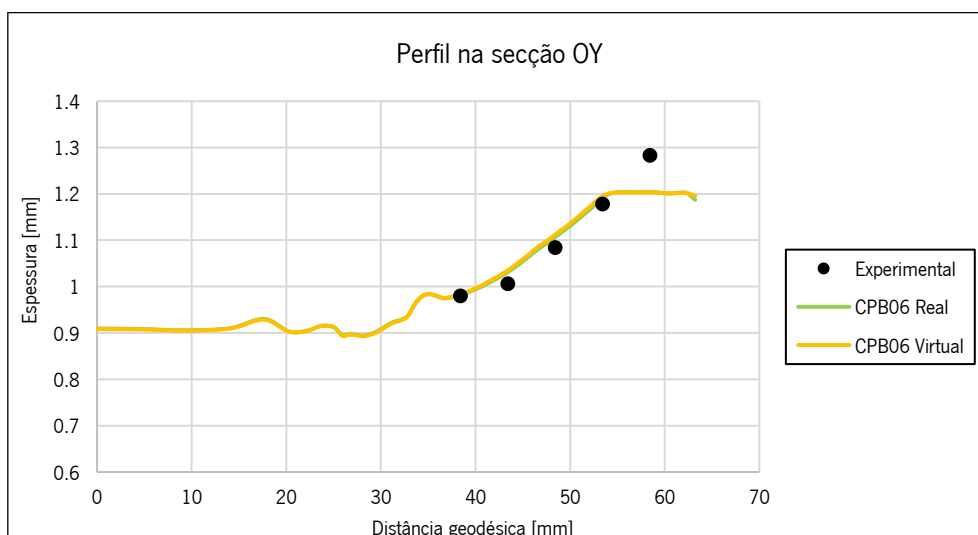


Figura 6.8 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para o critério CPB06 quando considerado o perfil na secção OY

Finalmente, a Tabela 6.2 apresenta os dados utilizados para realizar o cálculo do erro global da caracterização real e virtual do modelo CPB06, obtendo-se os resultados de $\epsilon_g = 0,0183$ e $\epsilon_g = 0,0130$, respetivamente. Estes valores indicam que, aparentemente, a caracterização virtual pode ser considerada mais apropriada para o ensaio em questão.

Tabela 6.3 - Dados utilizados para calcular o erro global para a utilização do modelo CPB06

Dados	Experimental	CPB06 Real	CPB06 Virtual
n	4	4	4
h (mm)	34,10	33,62	33,66
a (mm)	2,29	2,60	2,55

6.1.3. CB2001

Este subcapítulo apresenta uma série de simulações que, apesar de planeadas cuidadosamente, não produziram os resultados esperados. Utilizando as caracterizações expostas no capítulo 3.3.2 e os restantes parâmetros de simulação empregues nas restantes simulações, o esboço acaba por rasgar na zona do raio de concordância do embutido.

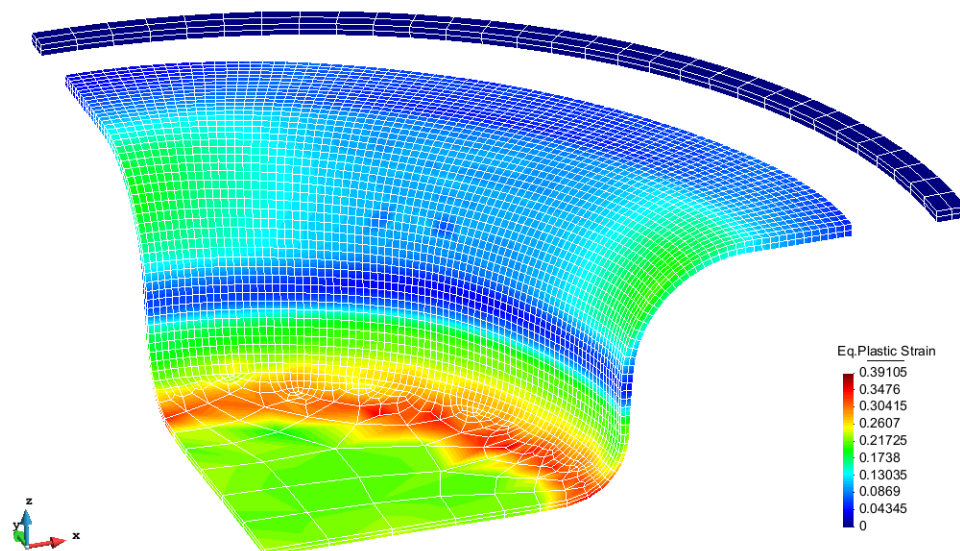


Figura 6.9 – Deformação plástica equivalente do esboço para o critério CB2001 no incremento de paragem da simulação, estando a vermelho a zona onde ocorre o rasgo

Inicialmente acreditou-se que o rasgo pudesse ter origem no deslizamento inadequado do esboço uma vez que, durante a simulação, observou-se que quando o esboço começava a rasgar, a secção localizada entre a matriz e o cerra-chapas deixava de deslizar. Sendo a força do cerra-chapas ditada pelo *benchmark*, restava alterar o coeficiente de atrito estabelecido inicialmente de forma a tentar mitigar este efeito. No entanto, alterar o coeficiente de atrito provou-se ineficaz, não tendo alcançado o efeito desejado.

Seguidamente considerou-se que o encruamento poderia ser a causa deste fenómeno visto que, como foi demonstrado no capítulo 2.2, dentro dos dados experimentais ambas as leis parecem ser apropriadas, divergindo num ponto já posterior à informação experimental disponível. Desta forma, foi também testada a utilização da lei de Swift com a curva obtida no capítulo acima mencionado. Novamente, esta alteração acabou por não produzir resultados diferentes, acabando por rasgar o esboço.

Dada a região onde ocorre o defeito, acreditou-se ainda que se pudesse de tratar de um problema com a estimativa da biaxialidade na caracterização feita, dado que em ambas as caracterizações apenas foi considerada a informação experimental referente a ensaios de tração uniaxial. Desta forma, utilizou-

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo se como *input* numa nova caracterização os valores de σ_b e r_b obtidos na caracterização realizada através do critério de Hill48. Mais uma vez, o problema persistiu.

Finalmente, de forma a tentar compreender se a causa do problema em questão eram as caracterizações ou os parâmetros de simulação utilizados, optou-se por realizar uma simulação utilizando a caracterização apresentada no artigo em estudo. De realçar que, ao contrário do que foi feito neste trabalho, a caracterização do modelo CB2001 da publicação mencionada aparenta juntar dois conjuntos de dados distintos, incorporando os valores de σ obtidos pela TUAT em 2018 e os valores r obtidos pela UA. Utilizando estes valores, foi possível obter um embutido completo, sem qualquer rotura, levando a que se fizesse uma análise comparativa entre a caracterização real do presente documento e a caracterização disponibilizada no *benchmark*.

Abaixo são expostos os coeficientes de anisotropia relatados no artigo, assim como uma comparação gráfica entre a caracterização real presente neste trabalho e a caracterização apresentada no *benchmark*, sendo “FPA” os resultados obtidos no presente documento e “ESAFORM” os resultados obtidos através da caracterização do artigo.

Tabela 6.4 - Coeficientes de anisotropia do modelo CB2001 – retirado de (Habracken et al., 2022)

a_1	a_2	a_3	a_4	c	
1,000	1,900	1,391	0,870	1,2	
b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_{10}
2,000	0,830	1,500	2,000	0,200	0,566

Novamente, os restantes coeficientes a_5 , a_6 e b_n ($n = 6, 7, 8, 9, 11$) possuem o valor de 1.

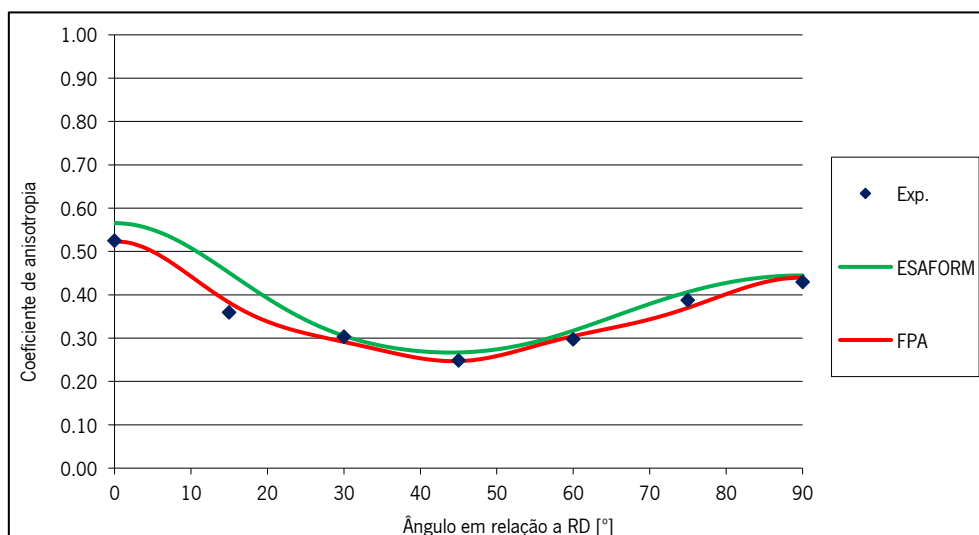


Figura 6.10 - Comparação das curvas dos coeficientes de anisotropia obtidas no presente documento (caracterização real) e no artigo estudado para o modelo CB2001

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutadura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

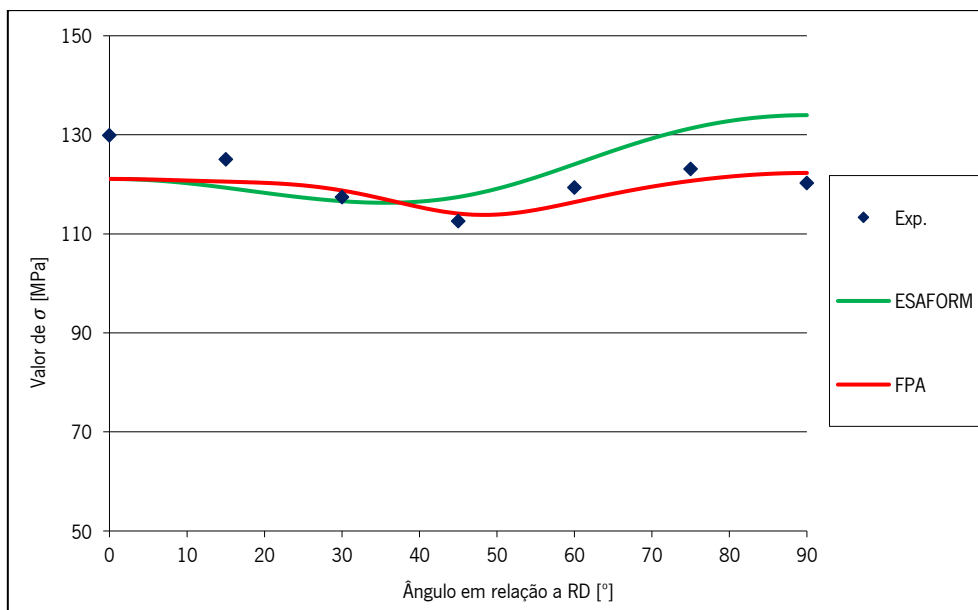


Figura 6.11 - Comparação das curvas do valor de σ obtidas no presente documento (caracterização real) e no artigo estudado para o modelo CB2001

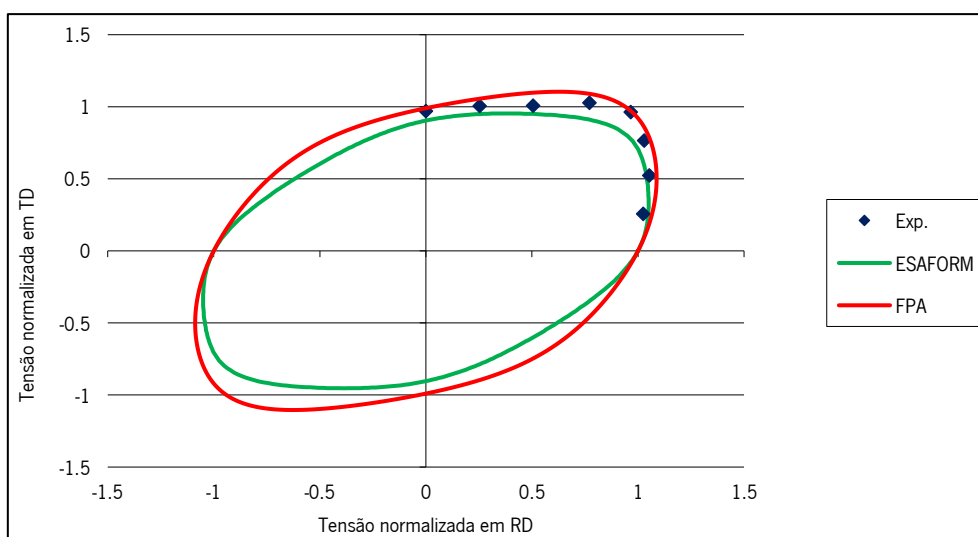


Figura 6.12 - Comparação das superfícies de plasticidade obtidas no presente documento (caracterização real) e no artigo estudado para o modelo CB2001

Observando a Figura 6.10, Figura 6.11 e Figura 6.12 é possível verificar que a caracterização realizada no presente trabalho se demonstra, em visão geral, mais apropriada que a caracterização indicada no artigo ESAFORM, apesar da rotura.

6.2. DISCUSSÃO SOBRE O COEFICIENTE DE ATRITO

Similarmente ao que foi realizado para os modelos isotrópicos, selecionaram-se três coeficientes de atrito adicionais de forma a compreender a influência deste parâmetro e se de facto o valor arbitrado inicialmente de 0,03 seria o mais apropriado para a definição do problema. Neste capítulo optou-se por

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

testar os mesmo valores utilizados acima, 0,07 e 0,11, assim como um coeficiente inferior a 0,03, no caso 0,01, sendo este o limiar da ordem de grandeza do valor estipulado inicialmente. Imediatamente descartou-se a utilização do valor $\mu = 0,11$ dado que este se mostrou excessivo, causando a rotura do esboço quando utilizado. Novamente, foram recorreu-se às curvas de força-deslocamento, e às espessuras e alturas finais como critério de comparação do embutido, sendo nesta secção a análise feita individualmente mediante o modelo de plasticidade utilizado. Cada curva é identificada pelo nome do modelo, seguido do coeficiente de atrito utilizado na simulação considerada.

6.2.1. HILL48

Iniciando pela análise das curvas de força-deslocamento, é possível verificar-se que, de forma generalizada, a força do punção aumenta com o aumento do coeficiente de atrito. De destacar que a força máxima é melhor estimada quando $\mu = 0,07$, apresentando uma diferença de apenas 0,03 kN para o valor experimental. Por sua vez, no ensaio que considera $\mu = 0,01$ é demonstrado um melhor ajuste a ambos os *plateaus* apresentados experimentalmente. Quanto aos segundos picos da força, demonstram um aumento mediante o aumento do coeficiente de atrito, como esperado, sendo que no ensaio $\mu = 0,07$ o seu valor é praticamente o dobro do primeiro *plateau* experimental.

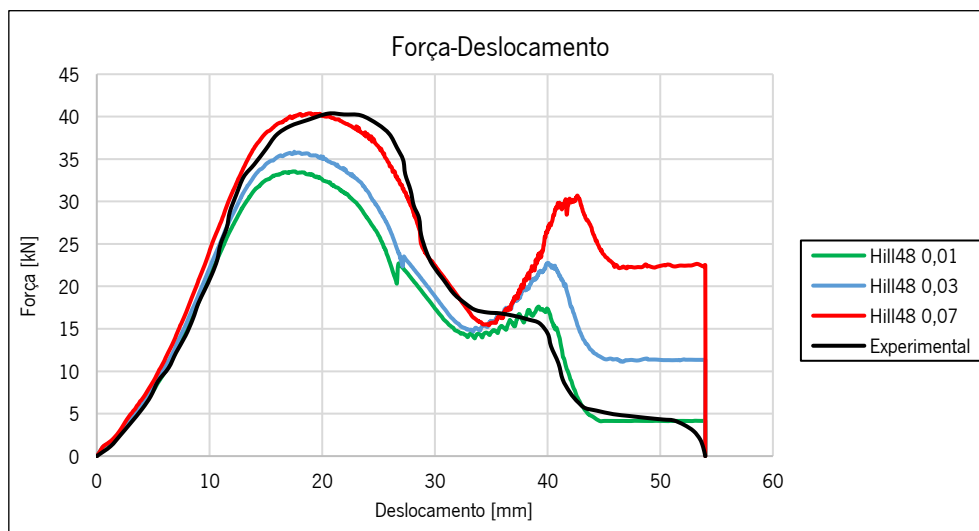


Figura 6.13 - Curvas força-deslocamento do punção obtidas para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico Hill48

No que toca à influência do coeficiente de atrito nos perfis de altura obtidos, à semelhança do que ocorre na força do punção, o aumento do coeficiente de atrito causa um aumento geral da altura do embutido final. Em todos os casos estudados o número de orelhas é corretamente previsto, assim como as regiões onde estas ocorrem. De forma geral, quando $\mu = 0,07$ é feita uma constante sobrestimação da altura, acontecendo o contrário quando $\mu = 0,01$. No caso de $\mu = 0,03$ são sobrestimados os valores

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo máximos da altura e sobrestimados os mínimos. De destacar o ensaio de menor atrito que, apesar de se mostrar distante nos pontos de menor altura, permite uma boa aproximação aos topos das orelhas.

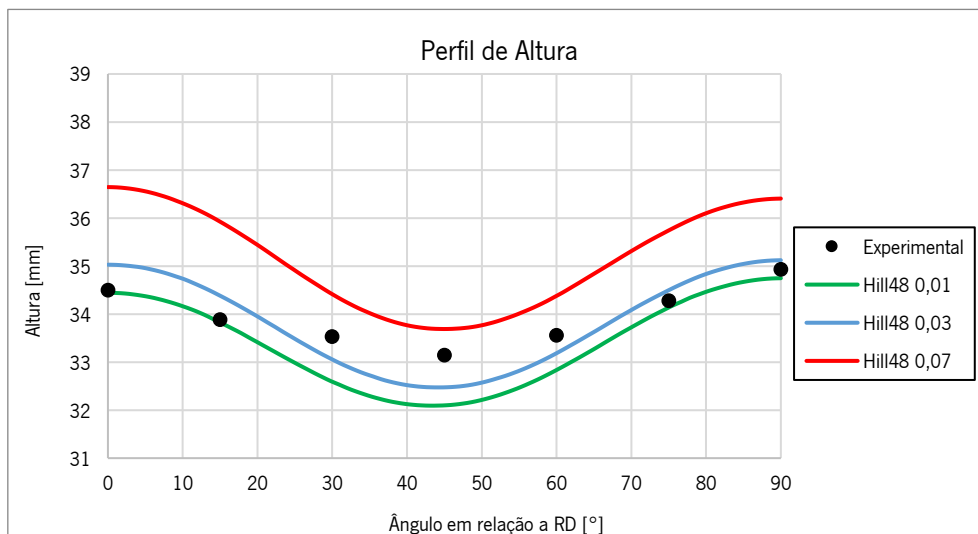


Figura 6.14 - Perfis de altura obtidos para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico Hill48

Por fim, é analisada a variação da espessura do embutido em função da distância geodésica ao longo dos perfis OX e OY. De modo geral, é possível verificar uma diminuição da espessura face ao aumento do coeficiente. A Figura 6.15 demonstra uma subestimação geral da espessura no perfil da secção OX na zona da parede do embutido para todos os valores de μ , sendo que no perfil de OY apenas se verifica o mesmo para o coeficiente 0,07. Comparando as curvas entre si, as curvas de 0,01 e 0,03 demonstram-se adequadas para a descrição do processo em estudo, estando ambas de modo geral próximas dos valores pretendidos enquanto a curva de 0,07 se demonstra mais distanciada globalmente.

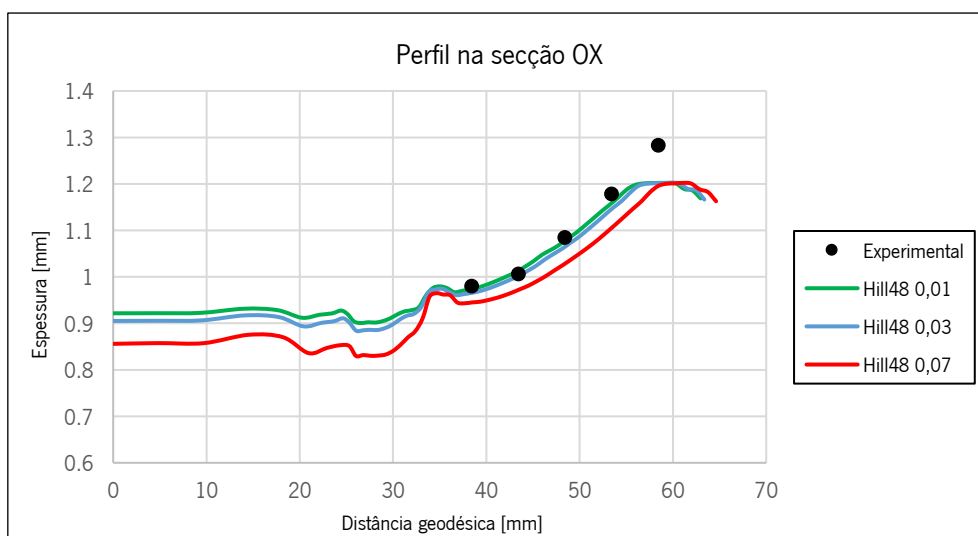


Figura 6.15 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico Hill48, quando considerado o perfil na secção OX

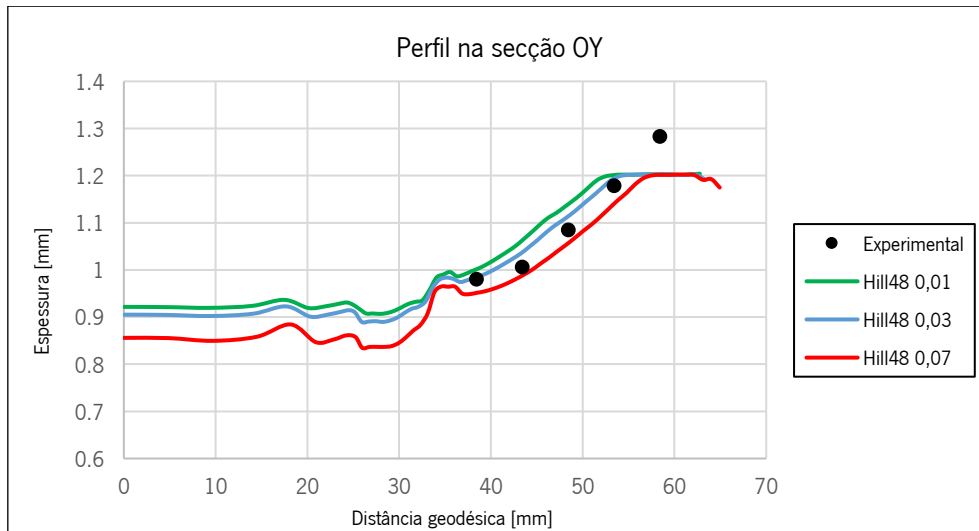


Figura 6.16 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico Hill48, quando considerado o perfil na secção OY

Por fim, utilizando os dados na Tabela 6.5 para realizar o cálculo do erro global para cada um dos coeficientes de atritos, determinado na Equação (6.1), estabeleceu-se que o coeficiente $\mu = 0,03$ é o que permite a criação de um embutido, de modo geral, mais aproximado ao obtido experimentalmente.

Tabela 6.5 - Dados utilizados para calcular o erro global dos diversos coeficientes de atrito utilizando o modelo Hill48 e respetivos resultados

Dados	Experimental	Hill 48 0,01	Hill 48 0,03	Hill48 0,07
n	4	4	4	4
h (mm)	34,10	33,34	33,77	35,10
a (mm)	2,29	2,65	2,65	2,95
ϵ_g	-	0,0257	0,0246	0,0851

6.2.2. CPB06

Em relação ao modelo CPB06 são demonstrados os resultados obtidos tanto pela caracterização real (curvas denominadas “CPB06 Real”) como pela caracterização virtual (curvas denominadas “CPB06 Virtual”), de modo a compreender a viabilidade de utilizar os valores virtuais face aos reais.

No caso das curvas de força-deslocamento, tal como é verificado no modelo Hill48, existe um aumento geral da força do punção com o crescimento do coeficiente de atrito. A influência do coeficiente de atrito acaba por ser similar à reportada no capítulo anterior, obtendo-se uma melhor estimativa da força máxima do punção quando $\mu = 0,07$, destacando a diferença de 0,16 kN da caracterização virtual face aos 0,55 kN reportados pela caracterização real. Também na avaliação dos *plateaus* é mantido o paralelismo ao modelo Hill48, conferindo-se a melhor aproximação por parte dos ensaios onde $\mu = 0,01$.

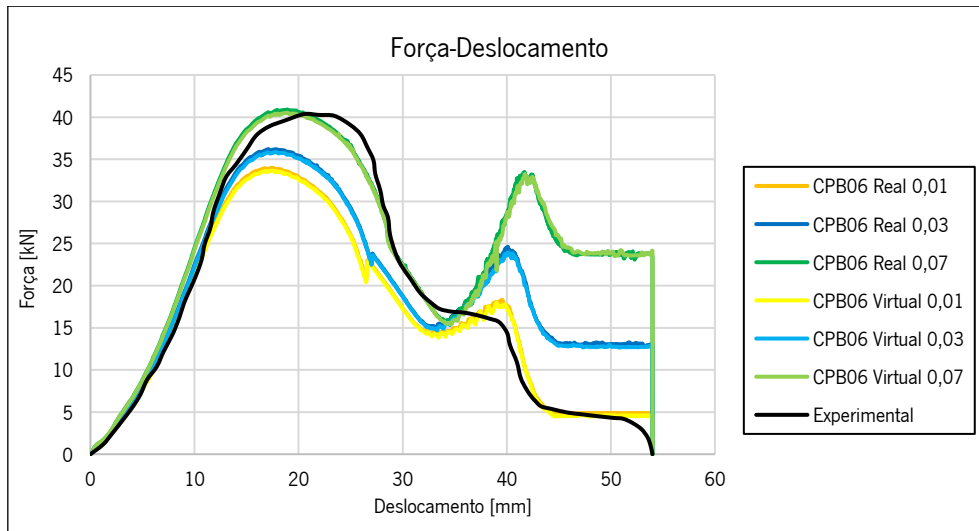


Figura 6.17 - Curvas força-deslocamento do punção obtidas para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico CPB06

Na análise dos perfis de altura é mantida a tendência apresentada anteriormente, verificando-se novamente que ambas as caracterizações permitem obter resultados bastante similares. Seguindo o que é demonstrado no capítulo anterior, também para o modelo CPB06 a altura aumenta com o aumento do coeficiente de atrito, como esperado. Tal como acontece no modelo Hill48, o valor de $\mu = 0,07$ admite uma sobrestimação da altura constante, contrariamente a $\mu = 0,01$. A maior distinção face à Figura 6.14 envolve a diferença de altura máxima entre ambas as orelhas expostas nos gráficos, tendo ambas praticamente a mesma altura quando recorremos ao modelo CPB06. Desta forma, o coeficiente $\mu = 0,03$ mostra-se mais adequado para a estimativa das orelhas próximas de 90° e 270° , enquanto $\mu = 0,01$ é mais semelhante às orelhas próximas de 0° e 180° . Apesar da constante sobrestimação, o ensaio relativo a $\mu = 0,07$ é o que se demonstra mais próximo de estimar corretamente a altura mínima.

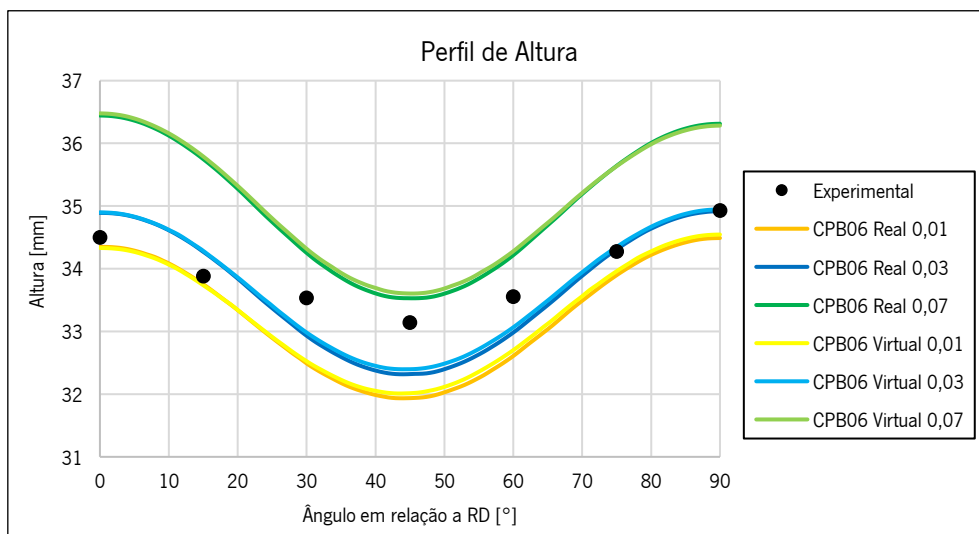


Figura 6.18 - Perfis de altura obtidos para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico CPB06

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Por fim, abordando a variação da espessura, verificamos mais uma vez que o aumento do coeficiente de atrito induz uma diminuição da espessura, considerando a totalidade dos dados obtidos. No caso do modelo CPB06, compreende-se que o caso $\mu = 0,03$ permite uma melhor aproximação global às espessuras obtidas experimentalmente. Como se conferiu nos anteriores métodos de avaliação, também nas espessuras se mantém uma proximidade entre as duas caracterizações, sendo as suas curvas praticamente indistinguíveis.

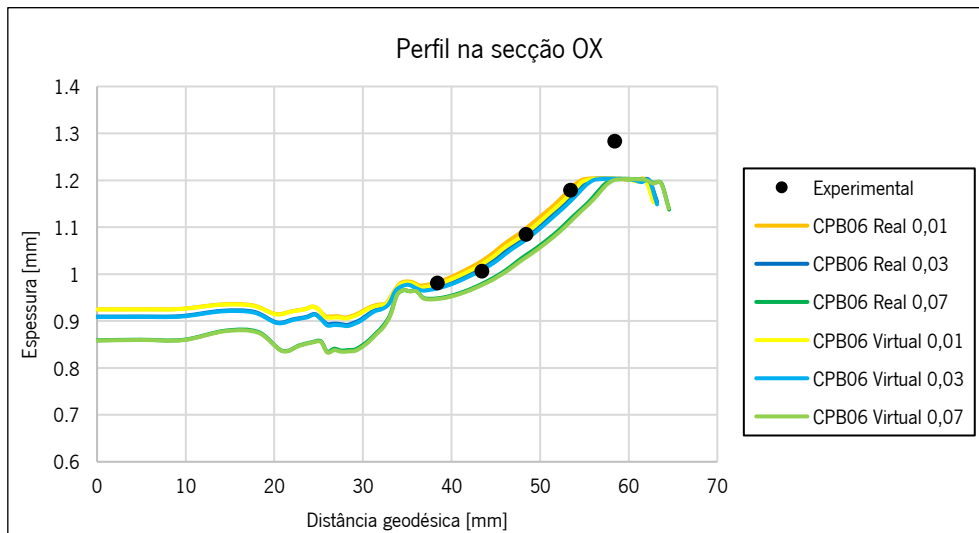


Figura 6.19 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico CPB06, quando considerado o perfil na secção OX

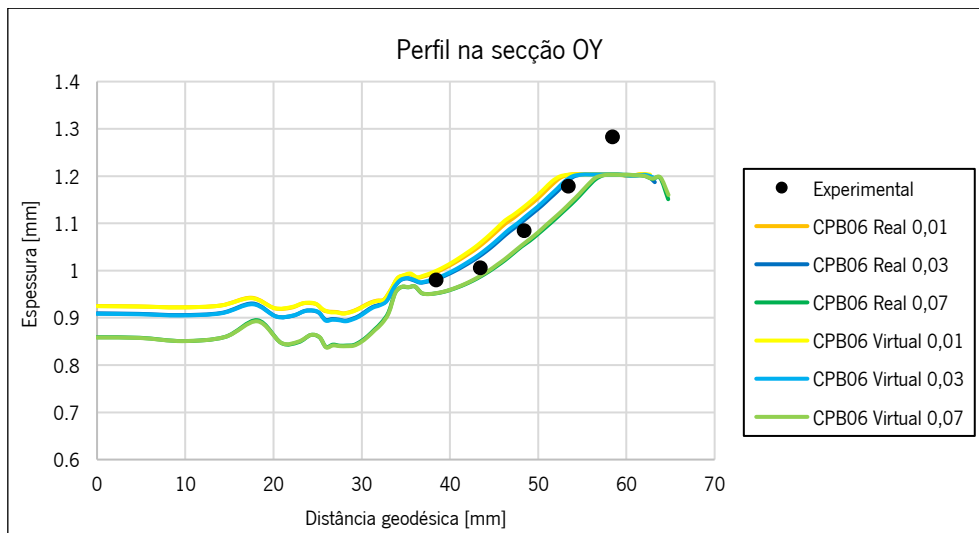


Figura 6.20 - Variação da espessura em função da distância geodésica do esboço para os vários coeficiente de atrito avaliados, utilizando o modelo anisotrópico CPB06, quando considerado o perfil na secção OY

Similarmente ao que já foi evidenciado no capítulo 6.1.2 para o valor de $\mu = 0,03$, também para os restantes coeficientes de atrito é demonstrada uma enorme proximidade dos resultados obtidos através de ambas as caracterizações, ao longo de todos os métodos de avaliação estabelecidos. Abaixo,

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo na Tabela 6.6 e Tabela 6.7, são reportados os resultados do erro global obtido para cada uma das caracterizações, real e virtual, respetivamente. De destacar que, quando comparados diretamente os valores para cada coeficiente de atrito, os valores de erro para a caracterização virtual se mantêm inferiores aos da caracterização real, indicando que a primeira permite, numa visão global, obter um produto final mais aproximado ao experimental. Em ambas as caracterizações do modelo CPB06, o valor de $\mu = 0,01$ demonstra-se o mais adequado, destacando a caracterização virtual, que permitiu o valor mínimo de erro global apresentado.

Tabela 6.6 - Dados utilizados para calcular o erro global para a utilização da caracterização real recorrendo ao modelo CPB06 e respetivos resultados

Dados	Experimental	CPB06 Real 0,01	CPB06 Real 0,03	CPB06 Real 0,07
n	4	4	4	4
h (mm)	34,10	33,19	33,62	34,95
a (mm)	2,29	2,56	2,60	2,91
ϵ_g	-	0,0142	0,0183	0,0750

Tabela 6.7 - Dados utilizados para calcular o erro global para a utilização da caracterização virtual recorrendo ao modelo CPB06 e respetivos resultados

Dados	Experimental	CPB06 Virtual 0,01	CPB06 Virtual 0,03	CPB06 Virtual 0,07
n	4	4	4	4
h (mm)	34,10	33,23	33,66	34,99
a (mm)	2,29	2,54	2,55	2,87
ϵ_g	-	0,0121	0,0130	0,0655

6.2.3. CB2001

Como mencionado no capítulo 6.1.3, foi impossível obter resultados satisfatórios utilizando as caracterizações realizadas na presente dissertação para o modelo CB2001, com o valor de $\mu = 0,03$. Desta forma, foi estudada a implementação dos restantes valores estudados para o coeficiente de atrito, demonstrando-se todos estes incapazes de alterar o produto final, sendo a rotura alcançada em todos os ensaios realizados.

Numa última tentativa de conseguir alcançar resultados satisfatórios, quando ainda se propunha que o problema residisse no incorreto deslizamento do esboço na região entre a matriz e o cerra-chapas, foi realizado um novo ensaio utilizando um valor de ordem de grandeza inferior à estudada no presente trabalho, recorrendo a $\mu = 0,007$. No entanto, também esta alteração se demonstrou ineficaz, terminando o processo com a rotura do esboço na zona do raio de concordância.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A simulação numérica demonstra atualmente ser uma ferramenta praticamente imprescindível para a previsão e controlo de processos de fabrico, permitindo a análise e ajuste de múltiplos parâmetros sem a necessidade de serem realizados vários ensaios experimentais, reduzindo custos e tempos cruciais para a rentabilidade destes mesmos processos. Como foi demonstrado ao longo desta dissertação, a correta definição das condições iniciais da simulação são de extrema relevância, dado que pequenas alterações podem afetar significativamente a geometria final obtida ou até inviabilizar o processo.

É claro através da análise dos vários resultados demonstrados que o critério de cedência utilizado, seja ele isotrópico ou anisotrópico, fornece resultados completamente distintos, desde a força máxima ao perfil das orelhas e à espessura dos embutidos finais, tanto em secções no perfil OX como OY.

Na comparação direta realizada graficamente aos modelos isotrópicos, compreende-se que quanto mais conservador é o critério de plasticidade, menor é a força máxima do punção estimada pelo mesmo. É interessante notar que, apesar de se tratar de um dos critérios mais antigos e ser por vezes considerado ultrapassado, o critério de Von Mises não só continua a ser um dos mais utilizados devido à sua fácil aplicação como, no presente estudo, demonstra ser dentro dos modelos isotrópicos o mais apropriado à descrição do processo em estudo.

No que toca aos modelos anisotrópicos é dada uma atenção especial ao processo de caracterização, especialmente na implementação de uma caracterização virtual, que visa diminuir os custos que advêm da realização de ensaios experimentais com a finalidade de caracterizar um material. De uma forma geral, para o material em estudo, verifica-se que as curvas de previsão dos coeficientes de anisotropia e as superfícies de plasticidade, tanto reais como virtuais, possuem uma aproximação maior que as previsões dos valores de σ , sendo este fenómeno realçado nas caracterizações dos modelos Hill48 e CPB06, onde apenas os valores de σ_{75} e σ_{90} são corretamente estimados. De realçar que, no critério CPB06, os resultados obtidos numericamente através da caracterização virtual provam-se sempre bastante aproximados dos valores da caracterização real, acabando até por revelar um erro global inferior aos resultados obtidos pela última. Foi também determinado que, por vezes, alcançar uma caracterização mais fiel aos resultados experimentais disponíveis pode levar a resultados menos desejosos no panorama do processo de embutidura, como se verificou com a caracterização através do modelo CB2001, tanto real como virtual.

Quanto ao coeficiente de atrito, o parâmetro de maior destaque quanto à possibilidade de ser ajustado pelo utilizador, observa-se que, de modo geral, o seu aumento contribui para o aumento da força máxima do punção, da altura do embutido final e para a diminuição da espessura, como seria de esperar. Para o modelo isotrópico de Von Mises, destacado por se demonstrar dentro dos isotrópicos como o mais competente em reproduzir o produto esperado, o coeficiente de 0,07 apresenta-se como o mais apropriado. Por sua vez, quando analisado o erro global obtido por cada um dos ensaios realizados recorrendo a modelos anisotrópicos, $\mu = 0,01$ obteve os melhores resultados quando utilizado o modelo CPB06.

Finalizando, esta dissertação comprova a importância de uma rigorosa e pertinente modelação constitutiva na simulação numérica de um processo de conformação, demonstrando que a mais pequena variação nos parâmetros de entrada pode pôr em causa a viabilidade do processo. Destaca-se também o facto de se comprovar que, para o modelo CB2001 na liga em estudo, nem sempre uma melhor aproximação da caracterização do material aos resultados experimentais conduz a um produto final mais ajustado. Para as ligas de alumínio AA6016-T4 é também viável, quando utilizado o modelo CPB06, basear a caracterização do material apenas em dados experimentais de três ensaios de tração uniaxial, complementados com quatro pontos virtuais derivados das curvas geradas pelo modelo Hill48. Este método de caracterização resulta num produto final que é altamente comparável ao obtido pela incorporação de ensaios de tração uniaxial em sete direcções distintas.

BIBLIOGRAFIA

- Alves, J. L. (2003). *Simulação Numérica do Processo de Estampagem de Chapas Metálicas - Modelação Mecânica e Métodos Numéricos*.
- Alves, J. L. (2017). *Seminário - Isotropy Matters*.
- Alves, J. L. (2022). *Elastoplasticidade Modelação Constitutiva*.
- Barros, P. D., Carvalho, P. D., Alves, J. L., Oliveira, M. C., & Menezes, L. F. (2016). DD3MAT - a code for yield criteria anisotropy parameters identification. *Journal of Physics: Conference Series*, 734, 032053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/734/3/032053>
- Cazacu, O., Plunkett, B., & Barlat, F. (2006). Orthotropic yield criterion for hexagonal closed packed metals. *International Journal of Plasticity*, 22(7), 1171–1194. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2005.06.001>
- Davis, J. R. (Ed.). (1999). *Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.caaa.9781627082990>
- Güner, Dr. A. (2016, Abril 5). *Material Matters: Sheet metal plasticity visualized (part 1 of 2)*. <https://formingworld.com/sheet-metal-plasticity-visualized-part-1-of-2/>
- Gürün, H., & Karaağaç, İ. (2015). The Experimental Investigation of Effects of Multiple Parameters on the Formability of the DC01 Sheet Metal. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 61(11), 651–662. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2015.2562>
- Habraken, A. M., Aksen, T. A., Alves, J. L., Amaral, R. L., Betaieb, E., Chandola, N., Corallo, L., Cruz, D. J., Duchêne, L., Engel, B., Esener, E., Firat, M., Frohn-Sörensen, P., Galán-López, J., Ghiabakloo, H., Kestens, L. A. I., Lian, J., Lingam, R., Liu, W., ... Vincze, G. (2022). Analysis of ESAFORM 2021 cup drawing *benchmark* of an Al alloy, critical factors for accuracy and efficiency of FE simulations. *International Journal of Material Forming*, 15(5). <https://doi.org/10.1007/s12289-022-01672-w>
- Jenny, M. P., & Kabecha, W. W. (2023). Advantages and Challenges of Implementing Lightweight Materials in Automobiles: A Review. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 13(9), 91–98. <https://doi.org/10.29322/IJSRP.13.09.2023.p14116>
- Karafillis, A. P., & Boyce, M. C. (1993). A general anisotropic yield criterion using bounds and a transformation weighting tensor. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 41(12), 1859–1886. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(93\)90073-0](https://doi.org/10.1016/0022-5096(93)90073-0)
- Merriam-Webster. (2024a). *Anisotropic Definition & Meaning*. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/anisotropic>

Análise do *benchmark* ESAFORM 2021, embutidura de um copo cilíndrico axi-simétrico: validação dos resultados numéricos vs experimentais, modelação constitutiva da liga de alumínio e parâmetros do processo

Merriam-Webster. (2024b). *Isotropic Definition & Meaning*. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/isotropic>

Prabowo, A. R., Ridwan, R., Tuswan, T., Sohn, J. M., Surojo, E., & Imaduddin, F. (2022). Effect of the selected parameters in idealizing material failures under tensile loads: *Benchmarks* for damage analysis on thin-walled structures. *Curved and Layered Structures*, 9(1), 258–285. <https://doi.org/10.1515/cls-2022-0021>

Totten, G., & D. Scott, M. (2003). *Handbook of Aluminum* (G. E. Totten & D. S. MacKenzie, Eds.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203912591>