



Potencial da utilização de ferramentas CAE no processo produtivo de cutelaria: apresentação de caso de estudo

Ricardo Manuel Malheiro da Silva

UMinho | 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ricardo Manuel Malheiro da Silva

**Potencial da utilização de ferramentas
CAE no processo produtivo de
cutelaria:
apresentação de caso de estudo**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Ricardo Manuel Malheiro da Silva

**Potencial da utilização de ferramentas CAE
no processo produtivo de cutelaria:
apresentação de caso de estudo**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Especialização em Manufatura Avançada

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Doutor José Luís Carvalho Martins Alves

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

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

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

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e namorada por todo o apoio ao longo desta jornada, ao meu irmão por me ter incentivado a ter entrado nesta aventura, aos meus amigos pela companhia, ao Alberto por toda a ajuda e companheirismo e a Deus.

Agradeço ao professor José Luís Alves por todo o suporte, atenção e disponibilidade e à Herdmar pelo desafio proposto.

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.

RESUMO

A Herdmar é uma empresa com mais de 100 anos de experiência na produção de artigos de cutelaria, com uma capacidade produtiva de 140 000 peças por dia. Produzir um talher como a colher de mesa é um processo que requer múltiplas etapas de fabrico, desde o tratamento das bobinas em que chega o material até à lavagem final do talher; mas produtos diferentes requerem etapas diferentes.

Atualmente, a empresa dispõe de alguns modelos de talheres que contêm um rameado cunhado em relevo negativo nas suas superfícies; produzir essa gama de produtos implica acrescentar uma etapa de cunhagem ao fabrico do produto. Apesar de acrescentar valor e personalização aos produtos, ter uma etapa extra implica custos extra, pelo que a Herdmar procura encontrar uma solução que consiga cunhar o rameado e estampar a colher num único par de ferramentas e etapa de conformação. O processo de fabrico da colher da gama Santamarta é, assim, o caso de estudo que estrutura a presente dissertação.

No atual processo de desenvolvimento de produto da empresa, a única maneira de conseguir implementar esta alteração seria recorrer ao método de tentativa-erro experimental, testando sucessivas ferramentas, até se conseguir atingir o objetivo final, método este reconhecidamente caro e longo.

A empresa Herdmar propôs o desafio de estudar a viabilidade de integrar, para o caso de estudo em análise, em um único par de ferramentas de conformação as etapas de cunhagem do rameado e estampagem da colher, aplicados ao caso de estudo “colher Santamarta”. A via escolhida e seguida consiste em procurar uma solução por via da experimentação numérica, de modo a não apenas convergir para uma solução viável e implementável, mas também demonstrar o potencial da utilização de ferramentas CAE no processo produtivo e de desenvolvimento de produto de cutelaria.

Para isto, será necessária uma análise detalhada do material e geometria da chapa, das etapas envolvidas do processo produtivo e o estudo e desenvolvimento das ferramentas de estampagem e cunhagem.

PALAVRAS-CHAVE

CUTELARIA, AISI 304; CAE; CUNHAGEM; ESTAMPAGEM

ABSTRACT

Herdmar is a company with over 100 years of experience in the production of cutlery items, with a production capacity of 140,000 pieces per day. Producing cutlery such as a table spoon is a process that requires multiple manufacturing steps, from the treatment of the coils in which the material arrives to the final washing of the cutlery, however, different products require different steps.

Currently, the company has some cutlery models that contain a minted rib in negative relief on their surfaces; producing this range of products involves adding a minting stage to the manufacture of the product. Despite adding value and customization to the products, having an extra step implies extra costs, so Herdmar seeks to find a solution that can mint the ribbed and stamp the spoon in a single pair of tools and forming step. The manufacturing process of the Santamarta range spoon is, therefore, the case study that structures this dissertation.

In the company's current product development process, the only way to implement this change would be to resort to the trial-and-error experimental method, testing successive tools, until reaching the final goal, a method that is admittedly expensive and lengthy.

The company Herdmar proposed the challenge of studying the feasibility of integrating, for the case study under analysis, in a single pair of forming tools the steps of minting the ribbed and stamping the spoon, applied to the case study "Santamarta spoon". The path chosen and followed consists of looking for a solution through numerical experimentation, in order not only to converge to a viable and implementable solution, but also to demonstrate the potential of using CAE tools in the production process and in the development of cutlery product.

For this, it will be necessary a detailed analysis of the material and geometry of the sheet, the steps involved in the production process and the study and development of stamping and minting tools.

KEYWORDS

CUTLERY; AISI 304; CAE; MINTING; STAMPING

ÍNDICE

Agradecimentos	ii
Resumo.....	iv
Abstract	v
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas.....	xii
Lista de Símbolos.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Herdmar.....	1
1.1.1. Produtos Herdmar.....	2
1.2. Motivação	5
1.3. Objetivos.....	6
2. Aços inoxidáveis	8
2.1. Introdução	8
2.2. Aços inoxidáveis austeníticos	10
2.2.1. Transformação da austenite em martensite.....	12
3. Simulação numérica e modelos constitutivos	18
3.1. Simulação numérica	18
3.2. Modelação constitutiva	19
3.2.1. Critérios de plasticidade.....	20
3.2.2. Leis de encruamento	22
4. Metodologia experimental	25
4.1. Etapas de fabrico	26
4.2. simulação numérica.....	36
4.2.1. Simulação da atual etapa de estampagem	37
4.2.2. Simulação da etapa de estampagem com ferramentas corrigidas.....	58

4.2.3. Microanálise da penetração do rameado	63
5. Resultados e conclusões	70
5.1. Penetração do rameado	70
5.2. Superfície superior da colher.....	72
5.3. Superfície inferior da colher	75
5.4. Conclusão final e trabalhos futuros.....	76
Anexos	78
Anexo A: Imagem do mater 3.....	78
Anexo B: Imagem da ferramenta em contacto com o material.....	78
Bibliografia	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Primeiro modelo estampado pela empresa HERDMAR (adaptado de Herdmar, n.d.)	1
Figura 2: Modelo Malmo (adaptado de Herdmar, n.d.)	2
Figura 3: Modelo Oslo (adaptado de Herdmar, n.d.)	3
Figura 4: Modelo NOHC (adaptado de Herdmar, n.d.)	4
Figura 5: Modelo Lizz (adaptado de Herdmar, n.d.)	4
Figura 6: Modelo Santamarta (adaptado de Herdmar, n.d.)	5
Figura 7: Caracterização e apresentação do modelo Santamarta (adaptado de <i>Herdmar</i> , n.d.)	7
Figura 8: Ilustração da influência do crómio nos aços, expostos durante 10 anos a uma atmosfera industrial (adaptado de Chiaverini, 1977)	8
Figura 9: Efeito da passivação (adaptado de <i>Processo de Passivação</i> , n.d.)	9
Figura 10: Aços inoxidáveis da série 300 (Carbó, 2008)	10
Figura 11: Diagrama de fases Fe-Cr (Adaptado de Bhadeshia & Honeycombe, 2006)	11
Figura 12: Efeito do carbono nos diagramas Fe-Cr. a) 0.05%C b) 0.4%C (Adaptado de Bhadeshia & Honeycombe, 2006)	12
Figura 13: fatores que influenciam a transformação da austenite em martensite	14
Figura 14: Influencia do Níquel nos aços Cr-Ni (Adaptado de Khatak & Raj, 2002)	14
Figura 15: Influencia da temperatura na transformação de fase(Adaptado de Nagy et al., 2004)	15
Figura 16: influência da temperatura na tensão real(Adaptado de Nagy et al., 2004)	15
Figura 17: Valores de dureza e fração magnéticas obtidos para cada condição do aço (Adaptado de Junior, 2016)	16
Figura 18: Gráfico de comparação da dureza para todas as condições do aço (Adaptado de Junior, 2016)	17
Figura 19: Gráfico de comparação da fração magnética para todas as condições do aço (Adaptado de Junior, 2016)	17
Figura 20: Representação dos eixos de ortotropia	21
Figura 21: Evolução isotrópica pura da tensão limite de elasticidade no plano representado (Bruno, 2007)	22

Figura 22: Evolução cinemática pura da tensão limite de elasticidade no plano representado (Bruno, 2007).....	23
Figura 23: Evolução isotrópica e cinemática da tensão limite de elasticidade no plano representado (Bruno, 2007).....	24
Figura 24: Ferramentas de estampagem da colher do modelo Santamarta	25
Figura 25: Colher do modelo Santamarta (Adaptado de <i>Herdmar</i> , n.d.)	26
Figura 26: Corte da folha da bobina.....	27
Figura 27: Corte automático	27
Figura 28: Laminagem	28
Figura 29: Sequência geométrica obtida.....	29
Figura 30: Representação da redução de espessura obtida	29
Figura 31: Gráfico de Tensão de Engenharia-Deformação de Engenharia, para as respectivas reduções de espessura (Adaptado de Milad et al., 2008)	30
Figura 32: Efeito da redução de espessura nas propriedades mecânicas do aço AISI 304 (Adaptado de Milad et al., 2008)	31
Figura 33: Representação da delimitação das zonas com materiais distintos	32
Figura 34: Tensão de cedência, tensão máxima e dureza respectiva a cada redução de espessura (Milad et al., 2008)	32
Figura 35: Pontos de leitura da dureza em HRC	33
Figura 36: Sequência de estampagem	35
Figura 37: Etapa de brunimento	36
Figura 38: Representação esquemática do estudo da simulação numérica	37
Figura 39: Ficheiros associados ao programa DD3IMP	38
Figura 40: Ficheiro DD3_bcon	39
Figura 41: Demonstração das condições de fronteira	39
Figura 42: Ficheiro DD3_contact.....	39
Figura 43: Ficheiro DD3_input.....	40
Figura 44: Representação do comportamento plástico para o mesmo material.....	41
Figura 45: DD3_mater1	41
Figura 46: DD3_mater2	41
Figura 47: Coeficientes e parâmetros de anisotropia do aço AISI 304 e AISI 316 L (Souto, 2011)	42

Figura 48: Aplicação dos parâmetros de anisotropia no ficheiro DD3_mater1 e DD3_mater2	43
Figura 49: Identificação dos parâmetros de anisotropia e de encruamento isotrópico para o aço AISI304 segundo o critério de Hill 48 (Souto, 2011).....	44
Figura 50: Aplicação dos parâmetros associado à lei de swift no ficheiro DD3_mater1.....	44
Figura 51: Aplicação dos parâmetros associado à lei de swift no ficheiro DD3_mater2.....	44
Figura 52: Sequência para a realização do esboço	45
Figura 53: Representação da redução de espessura do esboço	46
Figura 54: Demonstração da folga existente por falta de aperto	46
Figura 55: Demonstração da zona esmagada	47
Figura 56: Divisão do esboço.....	47
Figura 57: Demonstração do esboço final com as respetivas alterações	48
Figura 58: Demonstração do esboço final com os 2 materiais distintos	48
Figura 59: Desenho da colher fornecido pela empresa	48
Figura 60: Colher definida por pontos, linhas e superfícies.....	49
Figura 61: Seleção das superfícies e respetivos pontos e linhas que definirão a superfície da colher.....	49
Figura 62: Modelação da ferramenta inferior	49
Figura 63: Ferramenta representada por pontos, linhas, superfícies e volume.....	50
Figura 64: Seleção das superfícies e respetivos pontos e linhas que definirão a superfície dada ferramenta	50
Figura 65: Ferramenta inferior	51
Figura 66: Normais da ferramenta superior	51
Figura 67: Normais da ferramenta inferior	52
Figura 68: Demonstração das 4 ferramentas.....	52
Figura 69: Parte superior do ficheiro DD3_phase.....	53
Figura 70: Demonstração do problema e respetiva solução	54
Figura 71: Posicionamento das ferramentas e esboço na fase inicial	54
Figura 72: Parte inferior do ficheiro DD3_phase	55
Figura 73: Demonstração do problema e respetiva solução	56
Figura 74: Legenda dos parâmetros do ficheiro DD3_phase	56
Figura 75: Geometria final obtida	58

Figura 76: Resultado das forças de contacto existentes.....	58
Figura 77: Raio x	59
Figura 78: Alteração 1 da geometria das ferramentas	60
Figura 79: Alteração 2 da geometria das ferramentas	61
Figura 80: Alteração 3 da geometria das ferramentas	61
Figura 81: Alteração 4 da geometria das ferramentas	61
Figura 82: Alteração 5 da geometria das ferramentas	62
Figura 83: Alteração 6 da geometria das ferramentas	62
Figura 84: Alteração 7 da geometria das ferramentas	63
Figura 85: Demonstração da chapa e do rameado na fase inicial	64
Figura 86: Demonstração dos nós escolhidos.....	64
Figura 87: Gráfico de pressão-deslocamento do nó 66290 para o mater1	65
Figura 88: Gráfico pressão-deslocamento do nó 62618 para o mater1	65
Figura 89: Gráfico pressão-deslocamento do nó 69284 para o mater1	66
Figura 90: Gráfico pressão-deslocamento do nó 66290 para o mater2	66
Figura 91: Gráfico pressão-deslocamento do nó 62618 para o mater2	67
Figura 92: Gráfico pressão-deslocamento do nó 69284 para o mater2	67
Figura 93: Demonstração das posições da força em relação à normal da chapa na simulação do rameado e da colher, respetivamente.....	68
Figura 94: Demonstração da flexão existente.....	70
Figura 95: Pressão limite para o material 1	71
Figura 96: Pressão limite para o material 2	71
Figura 97- Demonstração da organização das variáveis para estudo do nó 46817	72
Figura 98- Informações do nó 46817 em contacto	73
Figura 99- Localização dos nós da superfície superior	73
Figura 100- Localização dos nós na superfície inferior	75
Figura 101: Colher final	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Aços utilizados pela HERDMAR.....	9
Tabela 2-Composição química do aço AISI 304 (Korb & ASM, 1980)	10
Tabela 3- Características das fases	13
Tabela 4- Posições e respectivas durezas HRC	33
Tabela 5- Posições e respectivas durezas HV	34
Tabela 6- Caracterização dos dois materiais a simular.....	34
Tabela 7- Resultado de todos os nós da superfície superior	74
Tabela 8- Resultado de todos os nós da superfície superior	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas, abreviaturas e acrónimos

AISI	Instituto Americano de Ferro e Aço;
CAD	Desenho assistido por computador;
CAE	Engenharia assistida por computador;
CAM	Manufatura assistida por computador;
CCC	Estrutura cúbica de corpo centrado;
CFC	Estrutura cúbica de face centrada;
DD3IMP	Contração de “Deep Drawing 3D IMPLICIT finite element code”;
DL	Direção de laminagem;
DN	Direção Normal à laminagem;
DT	Direção transversal à laminagem;
EPD	“Equal plastic deformation”;
FEM	Método dos elementos finitos;
HC	Estrutura hexagonal compacta;
Hill48	Critério de plasticidade de Hill 1948;
Ms	Temperatura em que a Martensite se forma espontaneamente;
GAP	Ausência de contacto
SLIP	Escorregamento
STICK	Fixo

Nomenclatura

Y	tensão limite de elasticidade em tração uniaxial;
e_f	espessura final;
e_i	espessura inicial;
$\bar{r}$	valor médio dos coeficientes de anisotropia;
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	tensões principais do tensor das tensões de Cauchy, σ' ;
$\bar{\sigma}$	tensão equivalente;
r_0, r_{45}, r_{90}	coeficiente de anisotropia a 0, 45 e 90 graus;
$\bar{\varepsilon}^p$	deformação plástica equivalente;
ε_e	deformação verdadeira da espessura;
ε_l	deformação verdadeira da largura;
γ	fase austenítica;
ε	fase martensítica com estrutura HC;
α'	fase martensítica com estrutura CCC;
$^{\circ}\text{F}$	escala de temperatura Fahrenheit;

Parâmetros constitutivos

F G H L M N	parâmetros de anisotropia do critério Hill ⁴⁸ ;
C, ε_0 , n	parâmetros da lei de Swift (encruamento isotrópico);
Y_{sat} , C_y , Y_0 ,	parâmetros da lei de Voce (encruamento isotrópico);

1. INTRODUÇÃO

1.1. HERDMAR

A Herdmar foi fundada em 1911 por Manoel Marques e sua esposa Maria Silva. Foi nas margens do Rio Ave, numa casa arrendada, que nasceu o primeiro espaço destinado à produção exclusiva de facas, auxiliada por um moinho movido pelas águas do rio (Herdmar, n.d.). Já em 1919, nas Caldas das Taipas, surge a primeira oficina de cutelaria. Foi aí, terra conhecida como “a capital da Cutelaria”, que através de processos industriais rudimentares e ferramentas limitadas, deram início à produção de facas com laminas de aço e cabo de madeira, garfos, colheres, tesouras e canivetes, vendidos com a marca 11 (ano da fundação da empresa) (Coelho, 2017).

Foi então em 1963, após a morte do fundador Manoel Marques em 1959, que Abel e José Marques, filhos e sucessores de Manoel, criaram e registaram a Marca HERDMAR (HERDeiros MARques) (Herdmar, n.d.).

A empresa foi evoluindo cada vez mais até que em 1968, a Herdmar, lança o primeiro modelo estampado, iniciando também a comercialização de modelos em cromoníquel (18/10). Em 1982 participam pela primeira vez em feiras nacionais e internacionais, iniciando nessa década regulares participações na CERAMEX (Lisboa), MACEF (Milão) e AMBIENTE (Frankfurt) (Herdmar, n.d.).

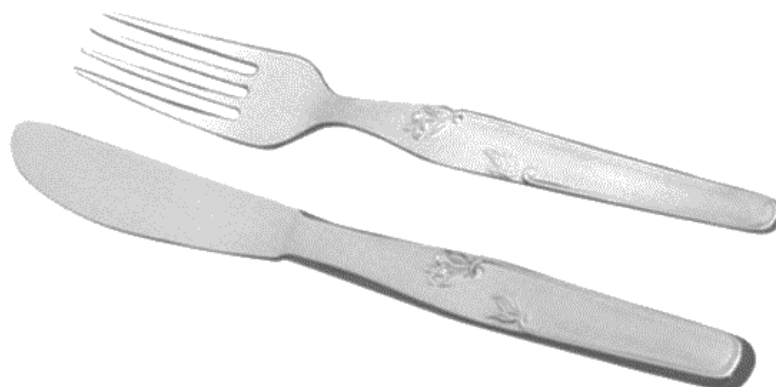


Figura 1: Primeiro modelo estampado pela empresa HERDMAR (adaptado de Herdmar, n.d.)

Em 2002, são inauguradas as novas instalações fabris, construídas de raiz, equipadas com as mais modernas tecnologias e um elevado índice de automatização que possibilitou uma eficiência dos processos de tal forma que a capacidade produtiva aumentou para 140000 peças por dia. Em 2011 foi celebrado o centenário da empresa e é nestas instalações, em Barco, que se encontram até à data (adaptado de Herdmar, n.d.).

1.1.1.PRODUTOS HERDMAR

A Herdmar é dos maiores produtores de cutelaria do mundo, presentes em 80 países, têm a promessa de “vestir as mesas” primando pela excelência, criatividade e inovação dos seus produtos, ou seja, propõem-se a criar peças que ultrapassem a sua óbvia utilidade funcional, tornando-se verdadeiros complementos de moda à mesa (Herdmar, n.d.). Quase todos os modelos da Herdmar se destacam pelo design, no entanto aqui apenas serão demonstrados os modelos premiados à exceção do modelo Santamarta.

Prémio iF Design Award e Nominee para o German Design Award- Modelo Malmö.

““De repente, uma simples torção, converte um talher convencional numa nova experiência de refeição...” A pura forma do conjunto Malmö resulta do processo criativo levado a cabo por um conceituado e promissor designer português. Este modelo, em aço inoxidável 18/10, caracteriza-se pelas suas linhas fluídas e pela sua sofisticação. Atribui a qualquer mesa um traço arrojado e moderno, adaptando-se facilmente a ambientes tanto formais como informais.” (Herdmar, n.d.).



Figura 2: Modelo Malmö (adaptado de Herdmar, n.d.)

Prémio de Best Decor Award- Modelo OSLO

“Um ícone da Herdmar, o design mais consensual da marca, que tem em cada traço o ADN de quem se dedica de corpo inteiro à arte da mesa e toda a sua envolvente.

A Intemporalidade do design Oslo, é o fator de maior realce na linha, que apresenta sob uma base de três milímetros, peças que têm uma ergonomia sublime e um equilíbrio excecional.

Criado nos anos 90 por Mário Marques, com inspiração nas linhas nórdicas que à época ditavam a tendência do tableware, esta coleção é sem sombra de dúvidas o modelo mais universal de toda a gama de produtos Herdmar.” (Herdmar, n.d.).



Figura 3: Modelo Oslo (adaptado de Herdmar, n.d.)

German Design-Modelo NOHC

“Processado numa silhueta elegante, com cabos de cortiça natural injetada, desenvolvido por um processo automático disruptivo e inovador, balanceado com o conhecimento dos antigos artesãos, o modelo NOHC apresenta um ar forte e simultaneamente suave, complementado pela nobreza e sofisticação de seus materiais.

Com um equilíbrio notável, um design ergonômico, proporciona, acima de tudo, uma experiência de sensações naturais e distintas que estimularão ainda mais o prazer de cada refeição.” (Herdmar, n.d.).



Figura 4: Modelo NOHC (adaptado de Herdmar, n.d.)

Gold Prize winner na primeira edição do European Product Design Award- Modelo Lizz

“Concebido com foco na intemporalidade, o modelo Lizz é o culminar de um processo de estudo das necessidades mais evidentes do paradigma atual do tableware, tendo como fonte de inspiração e base para a sua criação, a fluidez do modelo Oslo, o equilíbrio do modelo Atlanta e a simplicidade das linhas do modelo Carmil. Com um carácter robusto, destaca-se pela sua ergonomia e design sóbrio, vincado por simetrias entre as peças que se destacam pelo seu desenho sofisticado e plenamente adaptado à tendência mais contemporânea e transversal de todas - O bom gosto.” (Herdmar, n.d.).



Figura 5: Modelo Lizz (adaptado de Herdmar, n.d.)

Modelo Santamarta.

“Mais que um talher, um pedaço de história.

Reflexo do estilo Barroco que marcou a arquitetura portuguesa do século XVIII, o modelo Santamarta nasce de um processo de inspiração com base nas gravuras de granito existentes na fachada da icónica capela de Santa Maria Madalena, em Braga.

Com um padrão detalhadamente elaborado, a estampagem longitudinal em ambas as superfícies de cada peça, confere um carácter especial e único a cada item, que num estilo tendencialmente clássico, se sobressaem pela simultaneidade da sua robustez e delicadeza.”(Herdmar, n.d.)



Figura 6: Modelo Santamarta (adaptado de Herdmar, n.d.)

1.2. MOTIVAÇÃO

Atualmente na Herdmar, o conhecimento que permite prever operações transformativas advém da experiência dos funcionários, conhecimento esse que nunca foi transposto para o papel e muito menos para um software de simulação.

Introduzir a simulação numérica no processo de desenvolvimento de produto e no desenvolvimento e validação do processo produtivo é elevar o patamar de qualidade da produção. O processo de conformação de chapa é um processo muito importante para várias

áreas industriais, entre as quais a indústria de cutelaria. O peso económico que este representa para uma empresa é uma das razões da sua elevada importância, uma vez que, este requer maquinaria robusta, ferramentas com materiais resistentes e por vezes de vários ciclos de tentativa erro até que o processo esteja afinado.

As ferramentas CAE (Computer Aided Engineering), permitem ajudar no desenvolvimento de projetos por meio de análises estáticas, dinâmicas, térmicas, entre outras, com o objetivo de reduzir o tempo e custo de produção, bem como melhorar a qualidade final do produto.

1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principal objetivo, a demonstração do potencial em utilizar ferramentas CAE no desenvolvimento e na validação do processo produtivo de cutelaria. Para isso, será apresentado um caso de estudo que consiste em auxiliar e otimizar, recorrendo ao software de simulação DD3IMP, a alteração do processo de fabrico da colher do modelo Santamarta.

Atualmente, o fabrico deste modelo requer uma etapa para a cunhagem e outra para a estampagem. A etapa de cunhagem corresponde à gravação do rameado em relevo negativo e a estampagem é a que confere à chapa a forma volumétrica da colher. Assim, a meta deste trabalho será estudar a possibilidade de conferir à colher a forma volumétrica desejada com o rameado nas suas superfícies, em uma única etapa.

Para isto, será realizado um trabalho minucioso tanto ao nível da alteração geométrica das ferramentas de estampagem, como também ao nível da caracterização comportamental do material. Relativamente às alterações geométricas das ferramentas será necessário acompanhar e analisar as pressões de contacto existentes entre as mesmas e a chapa à medida que a ferramenta superior desce, para ser possível prever potenciais defeitos, e garantir que no momento do último aperto, a zona da ferramenta que terá o rameado, exerce uma pressão suficiente na chapa para que se consiga cunhar o rameado e no caso de existir escorregamento, que este não compromete a qualidade do desenho final.

A caracterização do material é das partes mais desenvolvidas ao longo desta dissertação. Como já foi referido, é sobre as ferramentas que serão efetuadas alterações geométricas, no entanto, essas alterações são em função dos resultados retirados da chapa, logo, se o material

caracterizado na chapa não corresponder a uma aproximação do material real, a solução final estará muito comprometida.

Dado que a chapa, ao longo do processo, é sujeita a muitas etapas de fabrico, é necessário estudar e analisar cuidadosamente as alterações impostas ao aço, para que na simulação numérica, a chapa seja caracterizada com o aço real, contemplando essas alterações, e não o aço genérico. É igualmente importante definir corretamente as leis e critérios que caracterizam o seu comportamento plástico, uma vez que no final, toda esta informação será convertida em parâmetros de entrada (inputs), que permitirão ao software fornecer os resultados mais próximos da realidade possível.

No final, após se conseguir realizar a reprodução numérica da etapa de estampagem e a de cunhagem, serão analisados e comparados os valores de pressão de contacto em ambas as simulações. O objetivo será garantir que na estampagem, as folgas entre as ferramentas e a chapa são inexistentes, principalmente na zona em que será cunhado o rameado, e que ao longo da conformação, nas zonas em que a ferramenta contacta a colher, não haja pressão de contacto suficiente para a ocorrência da penetração, sendo isto apenas desejado no momento do aperto final. Além destas pressões de contacto, será também analisado o escorregamento existente entre as ferramentas e a chapa, de forma a garantir que no momento em que há penetração do dente da ferramenta, este não é acompanhado de um escorregamento que danificará a qualidade do desenho.



Figura 7: Caracterização e apresentação do modelo Santamarta (adaptado de Herdmar, n.d.)

2. AÇOS INOXIDÁVEIS

2.1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável surgiu na Inglaterra, pelo investigador Brearley, quando realizava experiências em aços com 12%-14% de Crómio e observou que estes não reagiam aos ácidos de uma forma normal e que tinham uma resistência à corrosão muito melhor na condição endurecida do que na condição recozida. Foi então que Brearley, viu possibilidades comerciais deste material em talheres e deu ao aço não enferrujado o nome de Aço Inoxidável (Outokumpu, 2013)

Atualmente, considera-se um aço como sendo inoxidável, se a sua composição química for composta essencialmente por Ferro (Fe) e com uma percentagem mínima de 10.5% de Crómio (Cr). Existem outros elementos presentes na liga, no entanto, o crómio é o mais importante pois possibilita a formação de um filme protetor que separa o metal da atmosfera e confere a resistência contra a corrosão. Este fenómeno é chamado de passivação (Carbó, 2008)(Korb & ASM, 1980).

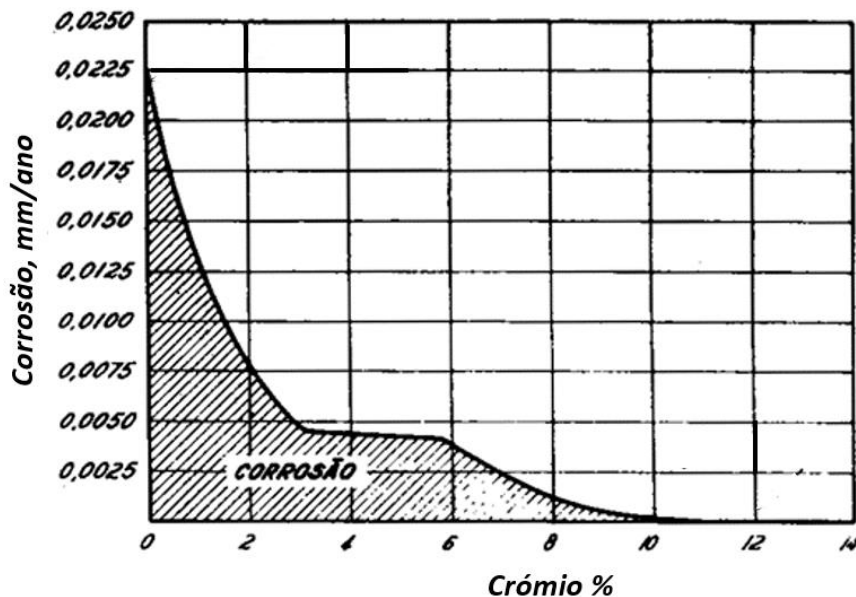


Figura 8: Ilustração da influência do crómio nos aços, expostos durante 10 anos a uma atmosfera industrial (adaptado de Chiaverini, 1977)

A passivação dá-se espontaneamente na presença de oxigénio e o grau de proteção da camada de óxido formada depende da sua qualidade, ou seja, da sua espessura, continuidade, coerência e aderência ao metal, características estas, que surgem em função de alguns fatores

como a composição química do aço e o ambiente a que o aço é exposto. Se as condições forem favoráveis para manter a passividade, os aços inoxidáveis apresentam taxas de corrosão extremamente baixas, caso as condições não permitam a restauração do filme passivo, então o aço irá corroer como aço carbono (Korb & ASM, 1980)(Chiaverini, 1977).

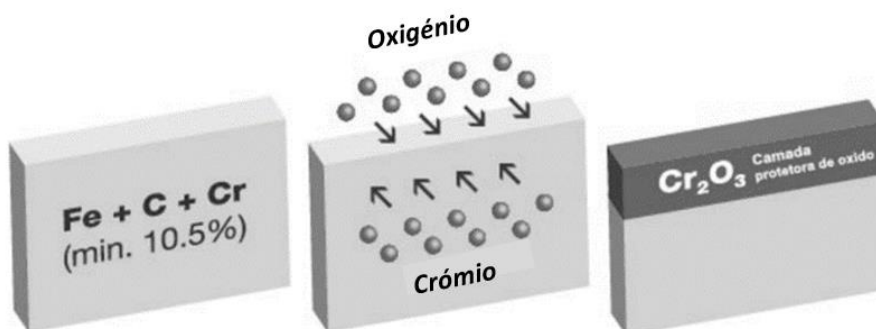


Figura 9: Efeito da passivação (adaptado de *Processo de Passivação*, n.d.)

As designações mais comuns para classificar os aços inoxidáveis são as do sistema American Iron Steel Institute (AISI). A maioria das classificações têm uma designação de três dígitos nas séries 200, 300 e 400, sendo as 200 e 300 respectivas aos aços inoxidáveis austeníticos e a série dos 400 aos aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos. No entanto, existem ainda outros grupos como o duplex e os endurecidos por precipitação. (Korb & ASM, 1980)

A Herdmar na sua produção utiliza aços inoxidáveis dos três principais grupos, o martensítico AISI 420, o ferrítico AISI 430 e o austenítico AISI 304. Uma vez que a colher do modelo Santamarta é produzida com o aço AISI 304, o grupo que será estudado mais aprofundadamente será o austenítico.

Tabela 1- Aços utilizados pela HERDMAR

AISI	Tipo
304	Austenítico
420	Martensítico
430	Ferrítico

2.2. AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis austeníticos, apresentam excelente resistência à corrosão, elevada tenacidade, ductilidade e soldabilidade. As boas propriedades mecânicas, combinadas com a facilidade de fabrico fazem com que estes, especialmente o AISI 304, sejam os mais utilizados dos aços inoxidáveis (Korb & ASM, 1980)(Chiaverini, 1977)(Pramanik & Basak, 2015).

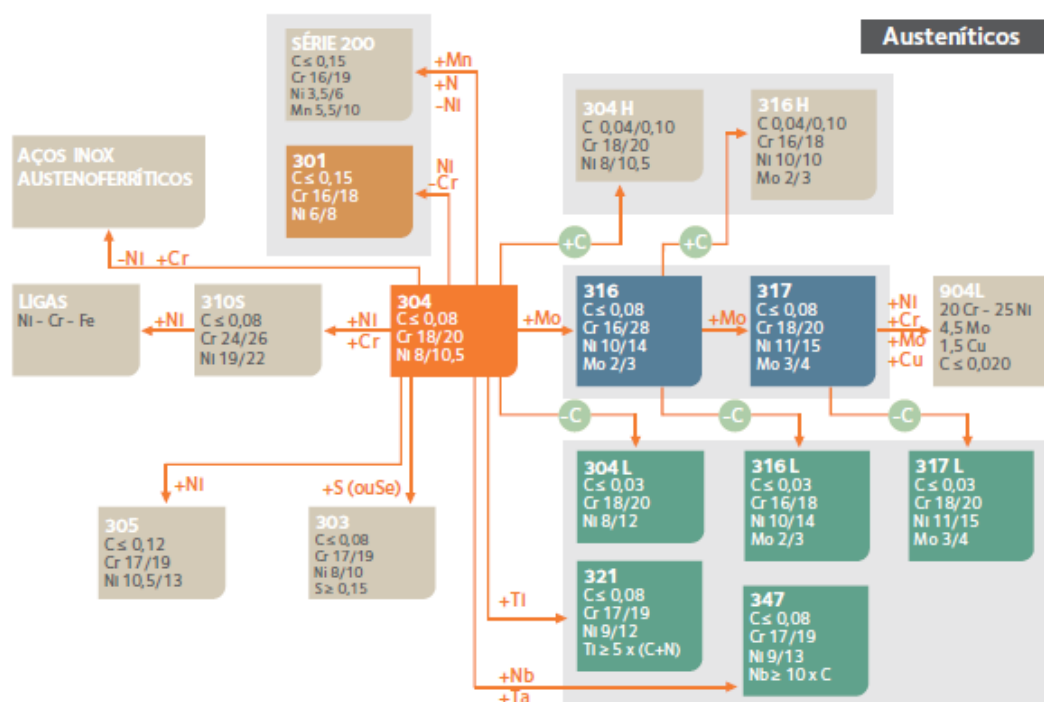


Figura 10: Aços inoxidáveis da série 300 (Carbó, 2008)

Na tabela seguinte é possível verificar quais os elementos que compõe o aço AISI 304.

Tabela 2-Composição química do aço AISI 304 (Korb & ASM, 1980)

AISI	Composição %								
304	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Outros
	0.08	2.00	0.045	0.03	1.00	18.00- 20.00	8.00- 10.50	...	...

A denominação deste grupo de aços, provem da capacidade de estes reterem a estrutura austenítica, cúbica de face centrada, estável ou metaestável à temperatura ambiente, que confere aos aços propriedades não magnéticas e não permitir que estes sejam endurecidos por tempera, mas sim por deformação.

A estabilidade das fases e propriedades mecânicas dependem dos elementos de liga que o compõe. Esses elementos de liga podem ser divididos em duas categorias:

Estabilizadores de austenite: carbono, nitrogênio, níquel e manganês;

Estabilizadores de ferrite: silício, cromo, molibdênio, nióbio e titânio (Korb & ASM, 1980).

Como já foi referido, o Cromo é um elemento fundamental na proteção contra a corrosão de um aço, no entanto, é um dos elementos que favorece a formação da ferrite. Na Figura 11, observa-se que assim que se ultrapassa o valor de 13% de Cromo, a fase que se forma é a ferrite. Se para um aço ser considerado inoxidável é necessário ter um valor superior a 10.5% de Cromo, então, a fase austenítica ficaria restringida entre os 10,5% e os 12% de Cromo, ou seja, limitada ao nível da proteção contra a corrosão.

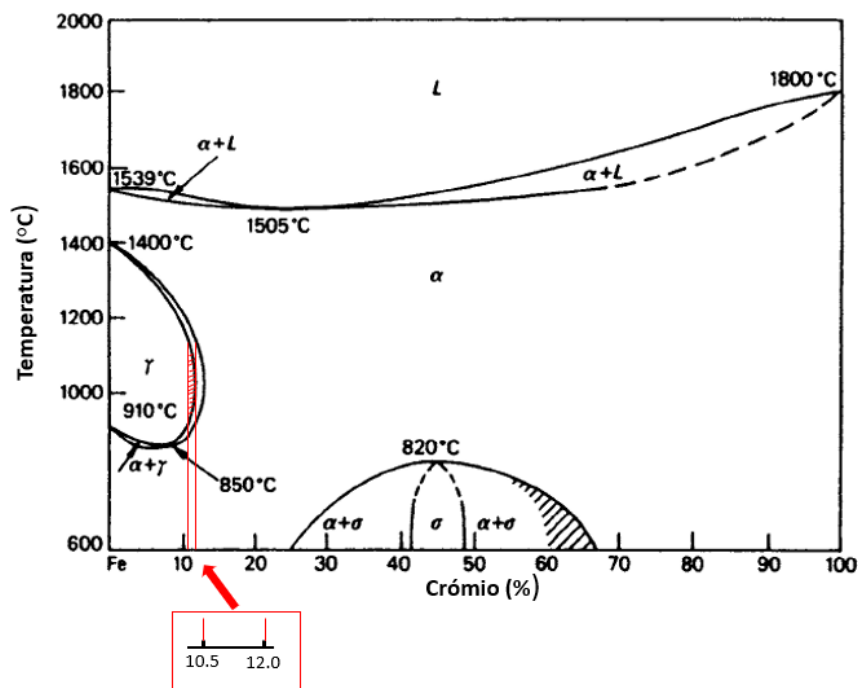


Figura 11: Diagrama de fases Fe-Cr (Adaptado de Bhadeshia & Honeycombe, 2006)

O Carbono, por outro lado, é um elemento austenitizante, ou seja, promove a expansão do campo austenítico mesmo para teores de cromo mais elevados. Segundo a Figura 12, pode-se verificar que a diferença entre ter 0,05%C e 0,4%C corresponde à possibilidade de conseguir um aço completamente austenítico com percentagem máxima de cromo de 13% e 18%, respetivamente. (Bhadeshia & Honeycombe, 2006)

Contudo, este é um elemento que ocupa uma percentagem muito reduzida na composição química de um aço inoxidável, uma vez que o carbono, em determinadas

circunstâncias, tem o efeito de formar carbonetos, como por exemplo o carboneto de cromo, que fragiliza a eficácia do combate à corrosão. (Carbó, 2008)

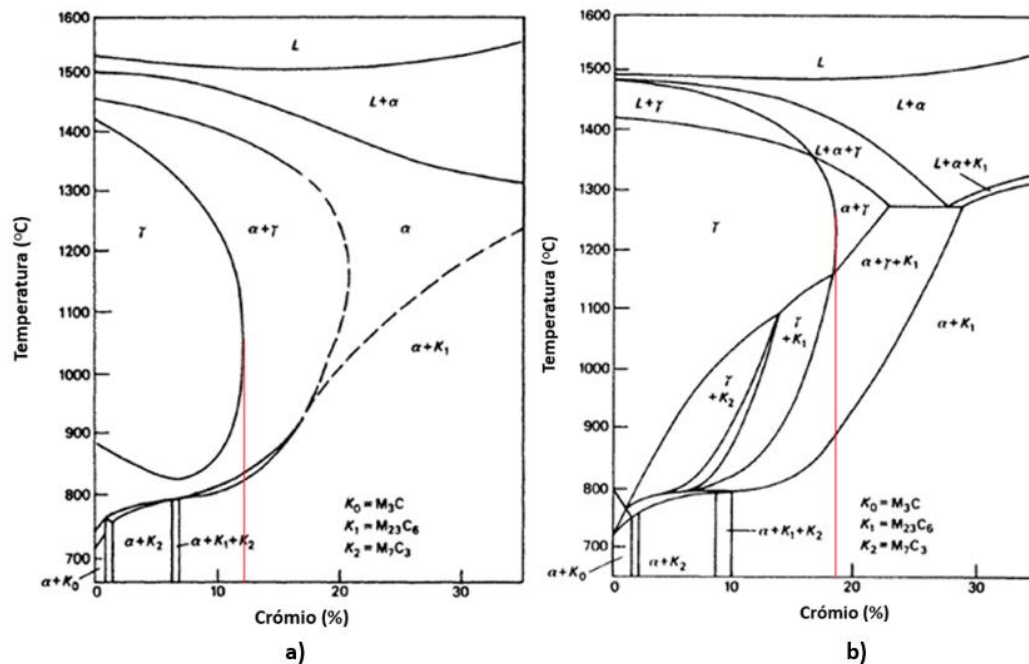


Figura 12: Efeito do carbono nos diagramas Fe-Cr. a) 0.05%C b) 0.4%C (Adaptado de Bhadeshia & Honeycombe, 2006)

Então, para ser possível estabilizar a estrutura austenítica em aços de baixo carbono, é adicionado níquel que, em determinadas quantidades, faz com que o campo γ seja expandido. (Bhadeshia & Honeycombe, 2006).

2.2.1. TRANSFORMAÇÃO DA AUSTENITE EM MARTENSITE

Assim que se dá a transformação de fase, há uma alteração das propriedades mecânicas do material, que por sua vez podem alterar o comportamento plástico do mesmo. Posto isto, torna-se importante abordar e compreender que tipo de transformações podem ocorrer e que fatores as influenciam.

A presença de austenite metaestável foi reconhecida como uma das mais importantes propriedades da microestrutura que permite o equilíbrio ideal entre a resistência e a ductilidade nos aços inoxidáveis austeníticos. O termo metaestável serve para enfatizar que a austenite não se encontra num estado de equilíbrio, podendo ser transformada em martensite quando submetida a um arrefecimento abaixo da temperatura M_s (Martensite Start- temperatura à qual a martensite se transforma espontaneamente) ou por deformação. (Li et al., 2021)

Então, pode se considerar a austenite estável quando a Ms está abaixo da temperatura ambiente. (Bhadeshia & Honeycombe, 2006)

Uma equação foi desenvolvida para se estimar a temperatura Ms com base na composição química dos elementos de liga (Davis, 1994).

$$Ms (^{\circ}F) = 75(14.6 - Cr) + 110(8.9 - Ni) + 60(1.33 - Mn) + 50(0.47 - Si) + 3000[0.068 - (C + N)] \quad (2.1)$$

No entanto, no caso da transformação induzida por deformação, esta pode ocorrer a temperaturas superiores à temperatura ambiente. Este tipo de transformação é uma característica única dos aços inoxidáveis austeníticos e pode dar origem a dois tipos de martensite: a martensite α' com uma estrutura cubica de corpo centrado e a martensite ϵ de estrutura hexagonal compacta, que apresentam as seguintes propriedades magnéticas. (Milad et al., 2008)

Tabela 3- Características das fases

Fase	Austenite γ	Martensite ϵ	Martensite α'
Estrutura	Cubica face centrada (CFC)	Hexagonal compacta (HC)	Cubica corpo centrado (CCC)
Propriedade Magnética	Paramagnética	Paramagnética	Ferromagnética

Mangonon e Thomas, após uma análise detalhada das transformações da martensite no aço inoxidável 18/8 (AISI 304), estabeleceram que a sequência de transformação é $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$. (MANGONON & THOMAS G, 1970)

A transformação da austenite para essas fases martensíticas promove alterações significativas nas propriedades mecânicas do material como a dureza, ductilidade e suscetibilidade magnética. A quantidade de austenite transformada depende de vários fatores, entre os quais, a composição química, a temperatura, o tipo de deformação e o grau de deformação (Pramanik & Basak, 2015). De seguida serão analisados esses fatores, de forma a se compreender melhor de que forma influenciam a transformação.

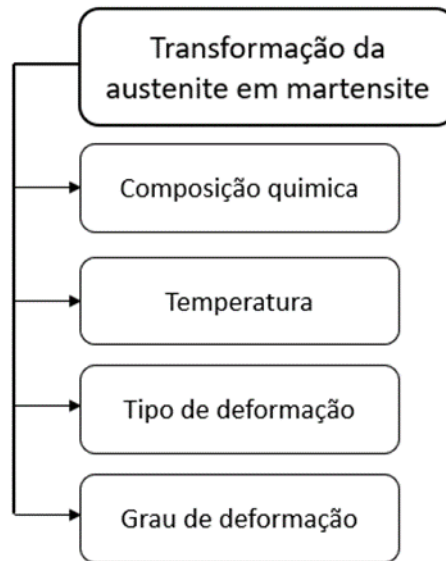


Figura 13: fatores que influenciam a transformação da austenite em martensite

2.2.1.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Como já foi referido anteriormente, a composição química do aço é um fator muito importante para a estabilização da austenite, nomeadamente com a presença de elementos de liga austenitizantes como o Níquel. Na Figura 14, verifica-se que para as ligas com menor quantidade de Níquel, as propriedades mecânicas sofrem alterações mais significativas, como a diminuição da ductilidade. Portanto, quanto maior for a percentagem de Níquel presente no aço, mais estável ele será, que por sua vez dificultará a transformação austenítica, e assim, as propriedades mecânicas terão menores alterações.

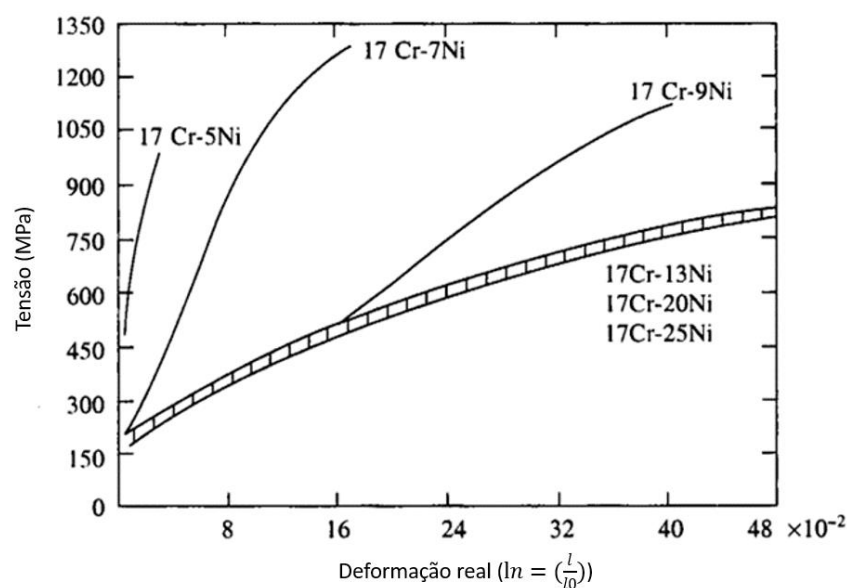


Figura 14: Influência do Níquel nos aços Cr-Ni (Adaptado de Khatak & Raj, 2002)

2.2.1.2. TEMPERATURA

A temperatura é igualmente um fator importante na quantidade de martensite transformada. Analisando a próxima figura, percebe-se que à medida que a temperatura de transformação desce, a quantidade de austenite também diminui, uma vez que esta se está a transformar em martensite.

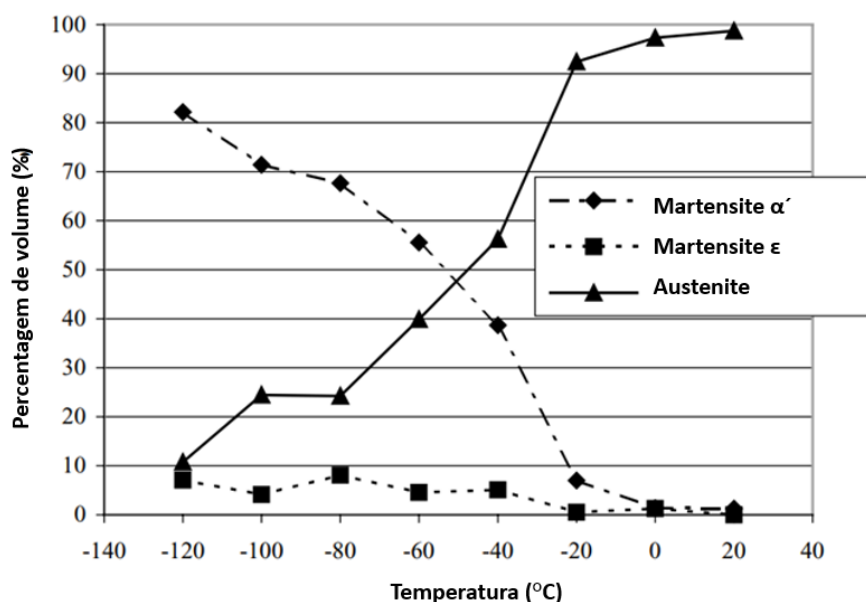


Figura 15: Influencia da temperatura na transformação de fase(Adaptado de Nagy et al., 2004)

Uma vez mais, pelo facto de haver esta alteração da microestrutura, as propriedades mecânicas do aço serão afetadas. Como é espectável, os valores de tensão tendem a aumentar para temperaturas inferiores, uma vez que, à medida que a temperatura diminui, a austenite vai-se transformando em martensite

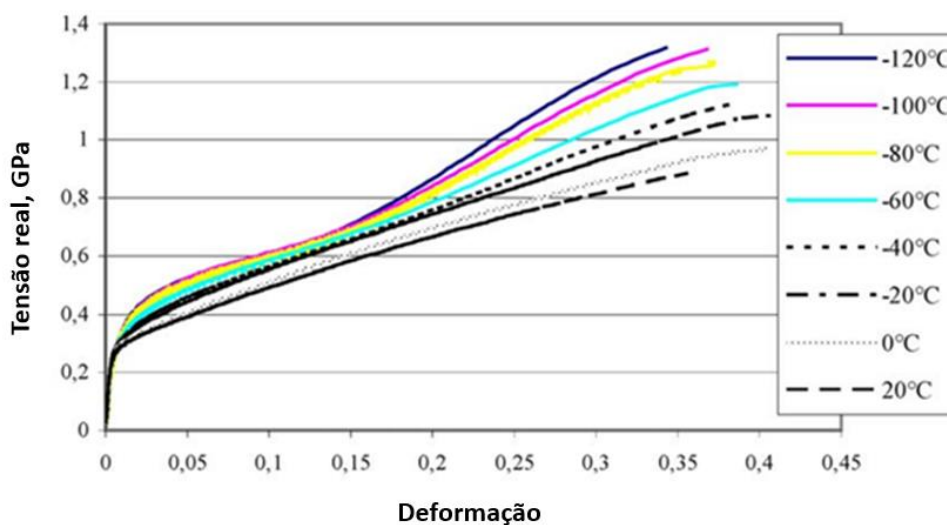


Figura 16: influência da temperatura na tensão real(Adaptado de Nagy et al., 2004)

2.2.1.3. TIPO E GRAU DE DEFORMAÇÃO

Outro fator importante é o tipo e o grau de deformação que é imposto ao aço, ou seja, que tipo de processo é utilizado para o deformar e que redução de espessura lhe é imposta. (Junior, 2016) realizou um estudo para o aço AISI 304, de forma a perceber a influencia dos processos de laminagem, compressão e limagem, nas propriedades magnéticas e na dureza resultante.

AISI 304				
Condição	Dureza média (HV)	Desvio padrão	Fração magnética em volume (%)	Desvio padrão
Como recebido	213	4,4	0,4	0,3
Solubilizado	159	4,1	3,4	1,1
Limado	-	-	30,6	2,0
Comprimido (60%)	409	19,6	13,5	1,2
Laminado (12%)	320	12,5	1,1	0,3
Laminado (31%)	412	15,4	5,3	0,6
Laminado (50%)	447	22,7	11,7	0,4
Laminado (70%)	512	10,6	23,8	1,2
Laminado (80%)	535	6,9	28,5	1,4
Laminado (90%)	540	14,6	32,9	0,8

Figura 17: Valores de dureza e fração magnéticas obtidos para cada condição do aço (Adaptado de Junior, 2016)

No que diz respeito à influência do processo utilizado, em comparação com o comprimido a 60% com o laminado a 50% rapara-se que apesar da redução de espessura, para a laminagem, ser menor, a dureza obtida é superior. Pela a análise destes resultados pode-se concluir que processos de deformação diferentes, resultam em propriedades diferentes.

Relativamente ao grau de deformação, como esperado, à medida que aumentamos o grau de deformação, as propriedades como dureza e suscetibilidade magnética também aumentam.

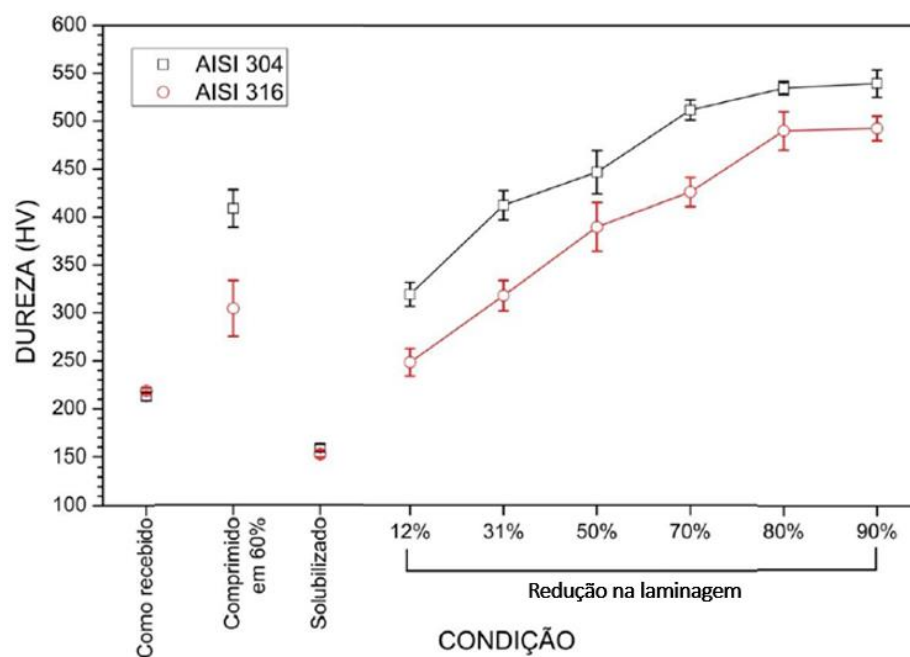


Figura 18: Gráfico de comparação da dureza para todas as condições do aço (Adaptado de Junior, 2016)

A razão do aumento de dureza é devido ao aumento da dificuldade de movimento das discordâncias, pois a sua densidade aumenta com a deformação (Khatak & Raj, 2002). Já a fração volumétrica, aumenta devido ao aumento da transformação da austenite em martensite α' , fase com propriedades ferromagnéticas.

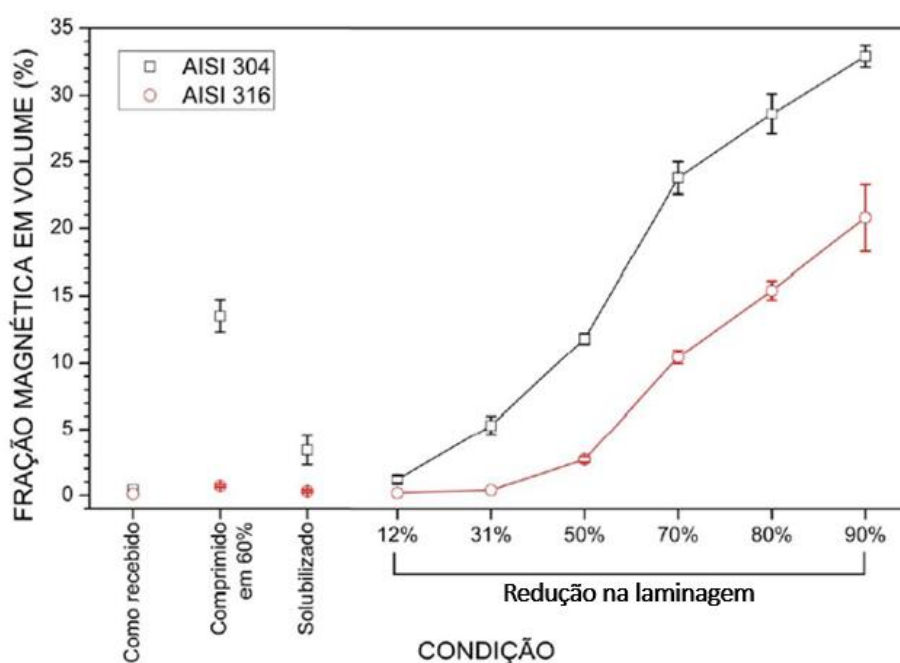


Figura 19: Gráfico de comparação da fração magnética para todas as condições do aço (Adaptado de Junior, 2016)

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA E MODELOS CONSTITUTIVOS

3.1. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação dos processos de conformação de chapa por elementos finitos é um desafio absolutamente multidisciplinar (Alves, 2003). Para que a simulação numérica seja a mais próxima do processo real, é necessário conhecer as propriedades mecânicas e o comportamento plástico do material a conformar, o processo a simular, entre outros.

No âmbito industrial, é uma mais valia a aplicação destas ferramentas CAE no processo produtivo. (Tekkaya, 2000) resumiu em três grupos principais, os objetivos industriais da utilização da simulação numérica da conformação:

1. Redução de tempo:

- Verificação atempada do fabrico dos conformados;
- Redução dos períodos de desenvolvimento;
- Redução do número de tentativa-erro;
- Resposta rápida a possíveis alterações.

2. Redução de custos:

- Produtos mais baratos;
- Redução de custos das ferramentas de conformação;
- Redução do tamanho das prensas;
- Aumento da fiabilidade.

3. Aumento da qualidade do produto:

- Seleção ótima do material da peça de trabalho;
- Produção de peças mais complexas;
- Acumulação de conhecimento para novos materiais,
- Otimização.

Referiu ainda, que para a implementação da simulação na produção, é necessário que esta preencha certos requisitos, como:

- Ser capaz de modelar vários processos e operações de conformação em simultâneo, se necessário;
- Ser de fácil utilização e estar disponível nos gabinetes de desenvolvimento de projeto;

- Ter uma interface de CAD-FEM-CAD/CAM de forma a se conseguir transferir e alterar facilmente os modelos;
- Ter eficiência temporal de simulação;
- Apresentar resultados como a evolução das deformações e espessuras, indicadores de defeitos, quantificação de retorno elástico, solicitações mecânicas de conformação, entre outros;
- Ter a possibilidade de alterar características dos materiais como a anisotropia;
- Apresentar resultados com rigor e exatidão.

3.2. MODELAÇÃO CONSTITUTIVA

A simulação numérica, é uma solução aos métodos caros e demorados usados no projeto convencional. O Método dos Elementos Finitos é bastante bem-sucedido para simular processos de conformação de metais, porém, a precisão depende da lei constitutiva escolhida e da correta identificação dos parâmetros do material (Habraken, 2004).

A modelação do comportamento plástico é assim dos fatores mais importantes na simulação de processos de conformação. Quanto melhor for a reprodutividade do comportamento plástico, mais precisos e fiáveis serão os resultados obtidos.

Segundo (Alves, 2003), existem 2 modelos para descrever o comportamento plástico de materiais policristalinos: os que se baseiam na textura cristalográfica e os designados fenomenológicos. Os primeiros requerem conhecimentos profundos sobre o comportamento dos cristais e da sua textura (domínio microscópico), o que torna a descrição do comportamento mecânico do material muito complexa, implicando tempos de calculo inaceitáveis quando usados com o método de elementos finitos. Os segundos, descrevem o comportamento plástico de um material de um ponto de vista macroscópico, assumindo-se que este é corretamente descrito por uma superfície de plasticidade, que evolui com a deformação plástica. Mesmo com as suas limitações, este modelo, quando associado à análise por elementos finitos, é numericamente mais eficiente do que o modelo de textura.

De seguida, serão apresentados os critérios de plasticidade e as leis de encruamento que caracterizam o comportamento fenomenológico. Estes tópicos serão muito importantes, uma vez que, no momento da caracterização dos materiais a simular, estes terão de se reger pela lei e critério que melhor se adequa a cada um deles.

3.2.1. CRITÉRIOS DE PLASTICIDADE

Um critério de plasticidade pode ser entendido como um modelo que define uma superfície de plasticidade, ou seja, uma função que separa, no espaço das tensões, as combinações de tensões que resultam em comportamento elástico das que resultam em comportamento no domínio plástico. Devem garantir algumas condições como ser independente da pressão hidrostática, convexos e ligados a plasticidade associada. (Alves, 2003)(Souto, 2011)

Tendo em conta a vasta gama de materiais com mecanismos de deformação diferentes, é necessário mais do que um critério de plasticidade. No decorrer das últimas décadas, surgiram muitos critérios diferentes com o propósito de descrever o comportamento plástico de materiais isotrópicos e anisotrópicos.

3.2.1.1. CRITÉRIOS DE PLASTICIDADE ISOTRÓPICOS

Um material isotrópico é aquele que apresenta as mesmas propriedades em todas as direções. Os critérios de plasticidade isotrópicos mais relevantes foram inicialmente propostos por: Tresca 1864, Von Mises 1963, Drucker 1949, Hershey 1954 e Hosford 1972.

O critério de Von Mises destaca-se por ser o mais utilizado em problemas de plasticidade isotrópica na comunidade científica. Não depende da pressão hidrostática, uma vez que a deformação plástica ocorre a volume constante não provoca cedência, ao contrário das tensões corte (Branco, 2011).

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2Y^2 \quad (3.1)$$

3.2.1.2. CRITÉRIOS DE PLASTICIDADE ANISOTRÓPICOS

A anisotropia caracteriza a heterogeneidade das propriedades em função da direção da solicitação e resulta, geralmente, da história de deformação imposta pelos processos tecnológicos de produção. As chapas metálicas obtidas por laminagem apresentam um comportamento ortotrópico, ou seja, possuem três planos de simetria entre si.

Os critérios anisotrópicos foram propostos por: Hill (1948, 1979, 1990 e 1993), Bassani (1977), Budiansky (1984), Barlat et al. (1989, 1991, 1994, 1997 e 2000), Karafillis & Boyce (1993), Vegter et al. (1998), Banabic et al. (2000) e Cazacu & Barlat (2001).

Há exceção dos critérios propostos por Karafillis & Boyce (1993), Vegter et al. (1998), todos os outros se restringem à modelação de materiais anisotrópicos de comportamento

ortotrópico. O sistema de eixos de ortotropia utilizado na definição dos critérios define-se a partir da direção de laminagem (direção ox, designada por DL), transversal (direção oy, perpendicular a ox no plano da chapa, designada por DT) e normal (direção oz, perpendicular ao plano da chapa, designada por DN). (Alves, 2003)(Bruno, 2007)

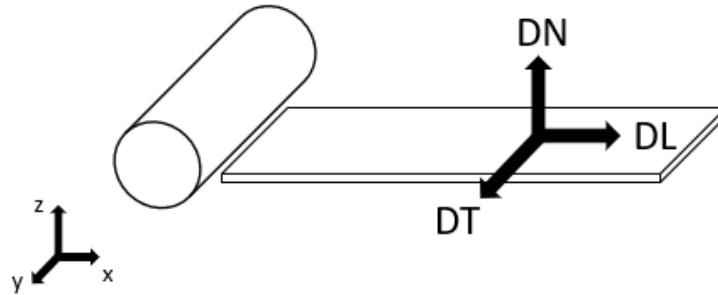


Figura 20: Representação dos eixos de ortotropia

O critério de plasticidade Hill48 é o critério de plasticidade fenomenológico mais vulgarmente associado à descrição de materiais ortotrópicos. Este critério resulta da adaptação do critério isotrópico de Von Mises para anisotrópico, com a seguinte formulação:

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{xz}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = Y^2; \quad (3.2)$$

F, G, H, L, M e N, são os parâmetros de anisotropia de Hill48. Podem ser determinados a partir de 3 ensaios de tração uniaxial respetivamente a 0°, 45° e 90° de DL e das seguintes expressões:

$$F = \frac{H}{r_{90}}; \quad (3.3)$$

$$G = \frac{1}{r_0 + 1}; \quad (3.4)$$

$$H = r_0 \times G \quad (3.5)$$

$$L = M = 1.5 \quad (3.6)$$

$$N = \frac{1}{2} \times \frac{(r_0 + r_{90}) \times (2r_{45} + 1)}{r_{90} \times (r_0 + 1)}; \quad (3.7)$$

L e M foram igualados a 1.5, uma vez que para se determinar esses dois parâmetros é necessário a realização de ensaios experimentais de corte em espessura, o que é verdadeiramente difícil, logo realiza-se a aproximação desses parâmetros aos valores isotrópicos.

Quando F, G e H assumem o valor de 0.5 e L, M e N assumem o de 1.5, este critério reduz-se ao critério isotrópico de Von Mises.(Bruno, 2007)(Alves, 2003)

O critério anisotrópico de Hill (1948) é o que traduz melhor o comportamento de materiais metálicos que apresentem um valor de anisotropia normal $\bar{r}$ superior a 1, como por exemplo a maioria dos aços.(Souto, 2011)

3.2.2. LEIS DE ENCRUAMENTO

Após abordados os critérios que definem as superfícies de plasticidade inicial, serão agora tratadas as leis que regem a sua evolução. A alteração da forma da superfície limite de elasticidade tem duas componentes: a componente isotrópica, que corresponde à expansão da superfície e a componente cinemática, que se relaciona com o movimento do centro da superfície.

3.2.2.1. LEIS DE ENCRUAMENTO ISOTRÓPICO

Como já foi referido, um encruamento isotrópico dá-se segundo uma expansão da superfície, como se pode confirmar na imagem, mantendo-se concêntrica com a superfície inicial.

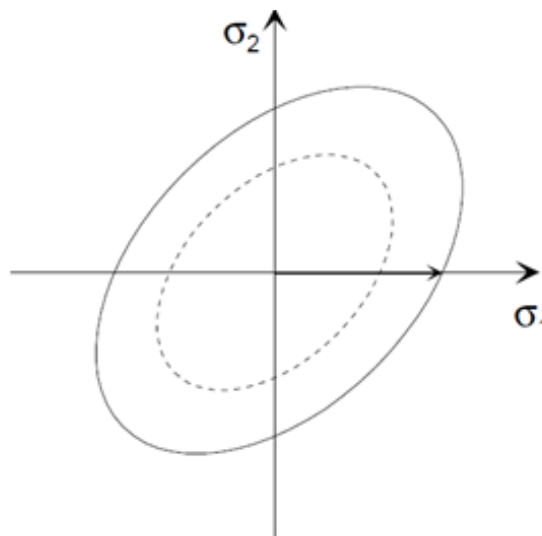


Figura 21: Evolução isotrópica pura da tensão limite de elasticidade no plano representado (Bruno, 2007)

Foram propostas várias leis para o encruamento isotrópico, entre as quais, Ludwick (1909), Prager (1938), Hollomon (1944), Swift (1947), Voce (1948) e Chaboche (1977). Porém, das leis enunciadas anteriormente, Voce e Swift foram as que mais se destacaram.

$$Y = Y_0 + (Y_{sat} - Y_0) \times [1 - \exp(-C_Y \bar{\epsilon}^p)] \quad (3.8)$$

Em que Y_0 é a tensão limite de elasticidade, Y_{sat} e C_Y são parâmetros do material, ε_p é a deformação plástica equivalente. A lei de Voce, é a mais usada para descrever a componente isotrópica da deformação de materiais com saturação de tensão, como os alumínio.

$$Y = C(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n ; \quad (3.9)$$

C: amplitude da tensão ε_0

ε_0 : constantes do material

$\bar{\varepsilon}^p$: a deformação plástica efetiva

n: coeficiente de encruamento do material

Por outro lado, esta lei é a mais indicada para descrever a componente isotrópica que não apresentam saturação de tensão, como por exemplo, a generalidade dos aços. (Bruno, 2007)(Alves, 2003).

3.2.2.2. LEIS DE ENCRUAMENTO CINEMÁTICO

Estas leis modelam o afastamento do centro da superfície plástica em relação ao centro do sistema de eixos de tensão. Na Figura 22, pode-se verificar um encruamento com evolução cinemática pura, em que apenas há a deslocação do centro, enquanto que na Figura 23 se verifica que para além da deslocação do centro, também houve uma expansão da superfície.

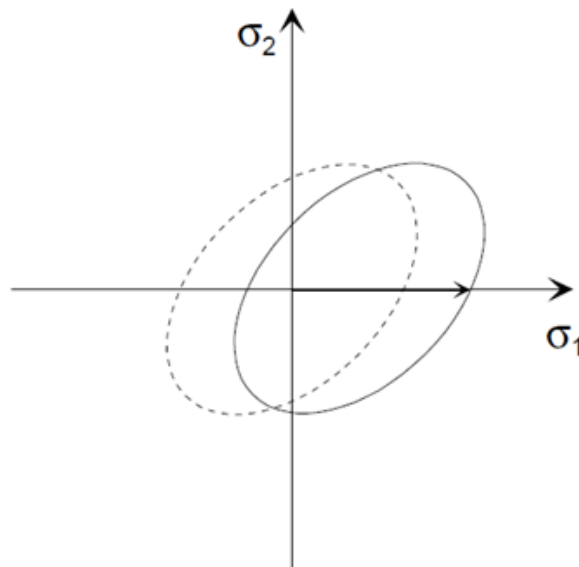


Figura 22: Evolução cinemática pura da tensão limite de elasticidade no plano representado (Bruno, 2007)

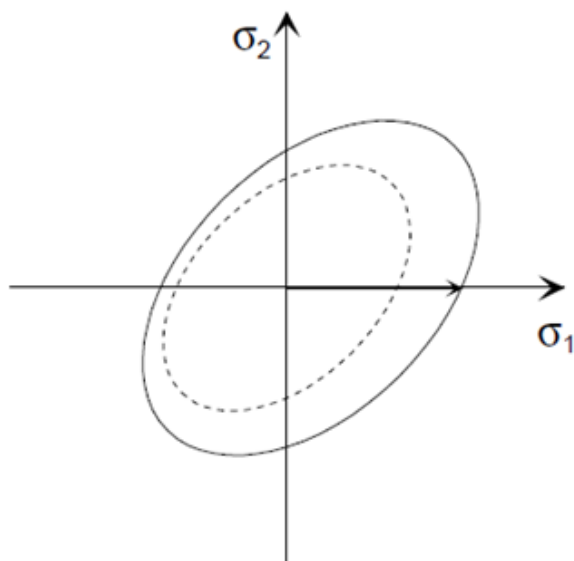


Figura 23: Evolução isotrópica e cinemática da tensão limite de elasticidade no plano representado (Bruno, 2007)

As principais leis de encruamento cinemático foram propostas por Prager (1955), Ziegler (1959), Lemaitre e Chaboche (1985) e mais recentemente, Geng e Wagoner (2000) e Chun et al.(2002) (Alves, 2003)(Bruno, 2007).

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A melhor forma de se conseguir demonstrar as potencialidades que há em utilizar as ferramentas CAE no desenvolvimento do produto ou do processo produtivo de uma empresa, é poder realizar um caso de estudo que simule um processo atual ou uma melhoria do mesmo e comparar os resultados obtidos numericamente com os que se obtém na realidade.

A Herdmar, dentro da sua vasta gama de produtos, possui alguns que apresentam um desenho gravado nas suas superfícies ao qual chamam rameado. Atualmente, para conseguir obter esses produtos, a empresa recorre uma etapa de cunhagem e outra de estampagem, em que na cunhagem há a gravação do rameado nas duas superfícies da chapa, utilizando a ferramenta da esquerda da Figura 24, e posteriormente, é estampada a forma volumétrica da colher com recurso às ferramentas representadas à direita.



Figura 24: Ferramentas de estampagem da colher do modelo Santamarta

Para uma empresa, quanto maior for o número de etapas de fabrico a aplicar ao seu produto, maior será o custo de produção. Estes custos provêm principalmente do preço das ferramentas de estampagem e aumento do tempo de produção.

O custo das ferramentas, com as elevadas cadências de produção, é certo que se vai “distribuindo” por cada produto, no entanto, é espectável que as ferramentas tenham

desgaste e precisem de ser corrigidas ou até mesmo substituídas. Outro fator importante a considerar, particularmente em empresas que trabalham em função do conhecimento e experiência adquirida pelas equipas de trabalho na produção de ferramentas, é que para fabricar uma ferramenta para um novo modelo com uma geometria ou material diferente, a experiência pode não ser suficiente para evitar uma quantidade de ferramentas desperdiçadas no método de tentativa erro.

Assim, com este caso experimental será demonstrado o potencial da simulação numérica no auxílio do processo produtivo, que neste caso de estudo, consiste em eliminar uma etapa de forma a que se consiga estampar e cunhar de uma só vez a colher do modelo Santamarta, semelhante à que é obtida pelas duas etapas da seguinte figura.



Figura 25: Colher do modelo Santamarta (Adaptado de *Herdmar*, n.d.)

A solução final deste desafio depende de variáveis como o material da chapa, a forma como esta se deforma plasticamente, as forças das ferramentas, o contacto que se gera entre as ferramentas e as chapas e de que forma este evolui. Assim, para que se consiga obter o resultado esperado no menor período tempo e sem os custos associados ao método de tentativa - erro, vai-se recorrer ao programa DD3IMP para se estudar e analisar com rigor os fenómenos envolvidos no processo de conformação, com a finalidade de ser possível retirar conclusões importantes para uma possível fabricação da ferramenta.

4.1. ETAPAS DE FABRICO

Para ser possível fazer alterações ou melhorias é fundamental, primeiramente, conhecer e compreender muito bem a atualidade da situação. No caso da produção da colher, só depois de haver um certo nível de conhecimento mais profundo de como tudo acontece no processo

produtivo atual é que surgem condições de se efetuar alterações conscientes que possam efetivamente acrescentar valor ao processo.

De seguida, serão apresentadas as etapas de fabrico necessárias para a produção da colher do modelo Santamarta. Entre todas, as etapas de laminagem, cunhagem do rameado e a estampagem final, são as que apresentam uma análise mais detalhada tendo em conta a sua importância para a reprodução do processo por simulação numérica.

O aço AISI 304 é recebido e armazenado na empresa em grandes boninas de chapa, onde posteriormente é cortado em tiras de forma a ser mais fácil de se manusear e rentabilizar. Estas tiras de chapa que se obtêm, são novamente enroladas em bobinas até ao momento de serem necessárias.



Figura 26: Corte da folha da bobina

A primeira etapa de conformação de chapa corresponde ao corte. As tiras provenientes da etapa anterior são cortadas, de forma a se obter a geometria que será o ponto de partida para a conceção da colher.



Figura 27: Corte automático

A etapa que se segue é a laminagem. Como já foi referido anteriormente, esta é uma das etapas mais importantes para a modelação comportamental do material.

A laminagem é um processo de conformação que consiste, essencialmente, na passagem de um corpo sólido, como por exemplo a chapa, entre cilindros que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários. Como a espessura inicial da chapa é maior que a distância entre as superfícies laterais dos cilindros, sofre uma deformação plástica na passagem pelos cilindros que resulta na redução de espessura, no aumento do comprimento e da largura. Para se conseguir atingir a espessura final desejada, devem ser efetuadas passagens sucessivas entre os cilindros, diminuindo progressivamente a sua distância. (Bresciani Filho et al., 2011)

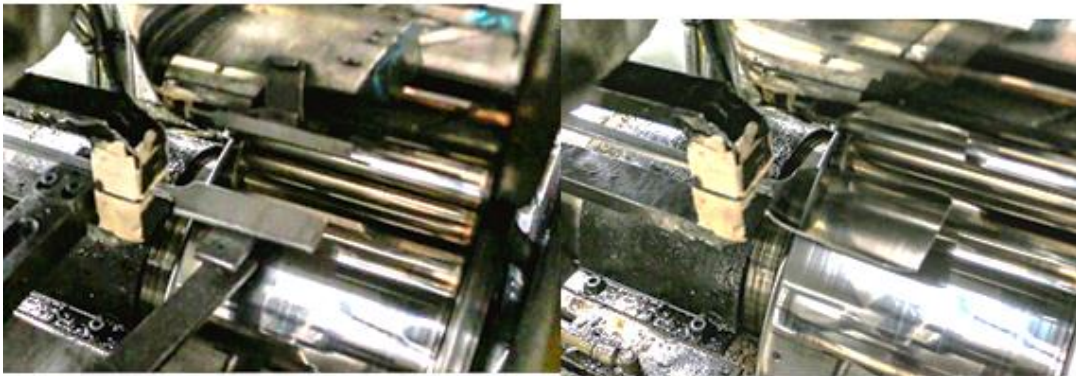


Figura 28: Laminagem

Após a aplicação da laminagem, o excesso de material resultante da redução de espessura, é removido, com recurso a ferramentas de corte, obtendo o formato final desejado. A figura 29 ilustra a sequência de formatos analisado até agora.



Figura 29: Sequência geométrica obtida

Para a colher do modelo Santamarta, a máxima redução de espessura registada na chapa, inicialmente com 3 mm, foi de aproximadamente 43.3%, uma vez que a espessura mínima lida foi de 1.7 mm.

$$r = \left[\frac{(e_i - e_f)}{e_i} \right] \times 100, \quad (4.1)$$

$$r = \left[\frac{(3 - 1.7)}{3} \right] \times 100,$$

$$r = 43.3 \%$$



Figura 30: Representação da redução de espessura obtida

(Milad et al., 2008) realizou uma experiência muito interessante sobre a influência da laminagem no comportamento mecânico do aço AISI 304. O processo foi realizado à temperatura ambiente, em placas de 175mm x 60mm x 8mm, obtendo dez percentagens de redução de espessura (5%, 10%, 15%,..., 50%). Foram preparados e tracionados 3 provetes de cada percentagem obtida.

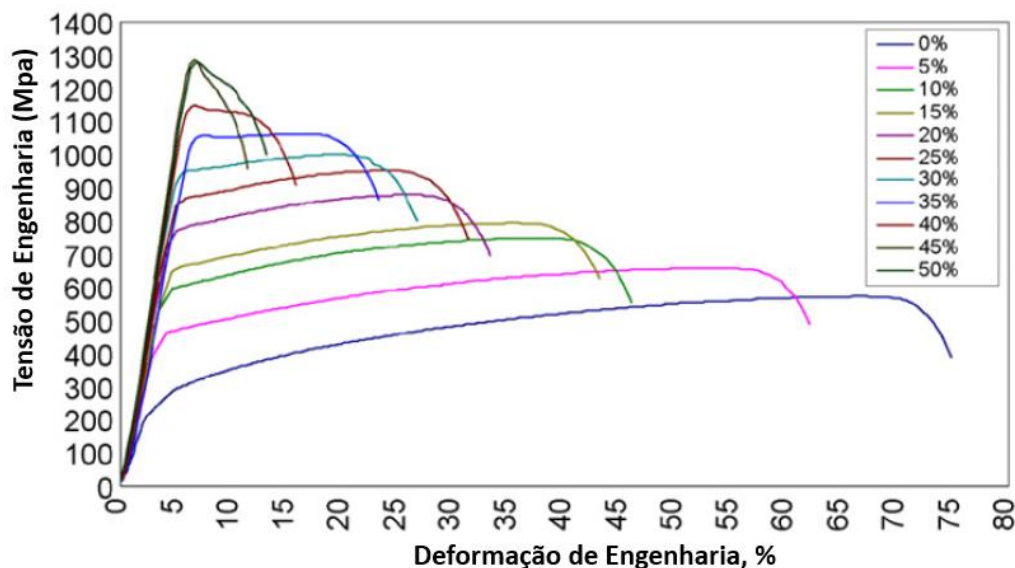


Figura 31: Gráfico de Tensão de Engenharia-Deformação de Engenharia, para as respetivas reduções de espessura (Adaptado de Milad et al., 2008)

A Figura 31 demonstra claramente que a laminagem tem um papel preponderante nas propriedades mecânicas do aço. Como já era de prever, com o aumento da deformação (redução de espessura), os valores da tensão de cedência e tensão de rotura sobem, enquanto os valores de ductilidade descem. O gráfico da Figura 32, diz-nos ainda que o aumento da tensão de cedência e tensão máxima aumentam continuamente até aos 45% de redução a frio, no entanto, após esse valor as tensões mantêm-se praticamente constantes. Demonstra também, que a diferença entre o valor da tensão de cedência e da tensão máxima diminui à medida que aumenta a percentagem de deformação, de tal forma que, para 45% as tensões estão praticamente com o mesmo valor. Relativamente à ductilidade, esta vai diminuindo até ao valor 45% e depois sofre um ligeiro aumento.

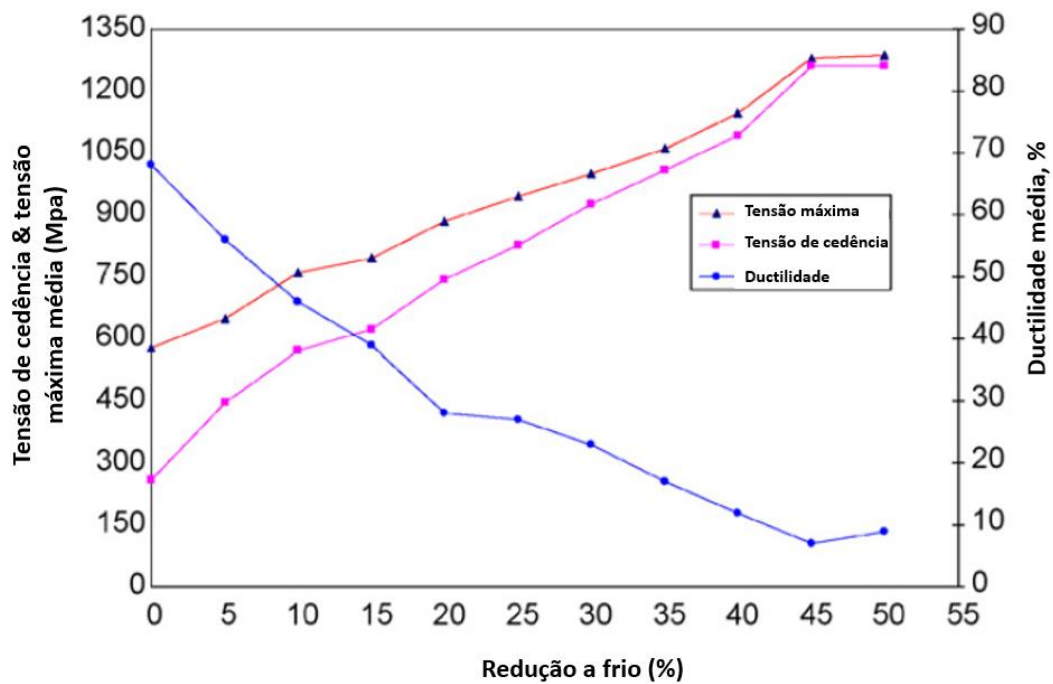


Figura 32: Efeito da redução de espessura nas propriedades mecânicas do aço AISI 304 (Adaptado de Milad et al., 2008)

Apesar de não se ter realizado nenhum teste de tração à chapa de 3mm utilizada pela HERDMAR, o aço é o mesmo, logo deve-se olhar para estes valores apresentados por Milad e perceber que a zona da colher que sofreu laminagem possui propriedades mecânicas diferentes da zona que não sofreu. Assim sendo, para que a simulação numérica se aproxime da realidade com maior rigor, é necessário caracterizar a chapa com dois materiais diferentes



Figura 33: Representação da delimitação das zonas com materiais distintos

A tensão de cedência para os dois materiais pode ser definida em função deste estudo de Milad, em que para o material 1, com 0% de deformação, apresenta uma tensão de cedência de 258 MPa, enquanto que para material 2, com 43.3% de deformação, através de uma interpolação dos valores, se obtém 1200 MPa de tensão de cedência, aproximadamente.

Table 2 – Variation of average yield and tensile strengths and Vickers hardness with % cold rolling for 304SS					
% Cold rolling	Yield strength, σ_y (MPa)	Tensile strength, σ_t (MPa)	Vickers hardness, HV	σ_y/σ_t	σ_t/HV
0	258	579	188	0.44	3.08
5	447	649	208	0.69	3.12
10	570	758	251	0.75	3.02
15	622	794	278	0.78	2.86
20	743	884	305	0.84	2.90
25	827	945	330	0.87	2.86
30	926	1000	336	0.93	2.98
35	1009	1058	350	0.95	3.02
40	1093	1147	385	0.95	2.98
45	1261	1279	407	0.98	3.14
50	1260	1285	419	0.98	3.07

Figura 34: Tensão de cedência, tensão máxima e dureza respetiva a cada redução de espessura (Milad et al., 2008)

Ainda nesta tabela, podemos verificar que para cada grau de deformação, é apresentado a dureza obtida.

Nos laboratórios da Universidade do Minho, foi realizado um ensaio de dureza Rockwell C, na chapa da Figura 35, de forma a se saber qual a dureza obtida na mesma após a laminagem. Os resultados obtidos foram os seguintes.

Tabela 4- Posições e respectivas durezas HRC

Posição	Dureza (HRC)
1	40.5
2	40.5
3	40.5
4	39
5	40.5
6	40.5
7	11
8	10
9	10



Figura 35: Pontos de leitura da dureza em HRC

Para que se possam comparar estes valores com os de Milad, recorreu-se à tabela de comparação de dureza (Metals, 2018) para os converter para valores aproximados de dureza em Vickers.

Tabela 5- Posições e respectivas durezas HV

Posição	Dureza (HV)
1	400
2	400
3	400
4	385
5	400
6	400
7	200
8	198
9	198

Uma vez mais, realizando uma interpolação dos valores apresentados na Figura 34, para uma redução de 43.3% a dureza obtida é de 400 Vickers. Dado que os resultados de dureza obtidos experimentalmente são iguais aos de Milad, utilizar-se-ão também os seus valores da tensão de cedência.

Tabela 6- Caracterização dos dois materiais a simular

Material	Tensão de cedência (MPa)	Dureza (HV)
Material 1	258	188
Material 2	1200	400

Como se pode comprovar, a laminagem é uma etapa de elevada importância, principalmente tendo em conta as alterações que impõe, quer geometricamente, quer ao nível das propriedades do material, que terão de ser contempladas no momento de caracterizar o material, de forma a se poder ter uma simulação o mais real possível.

A seguir a estas etapas, é realizada uma lavagem intermédia, de forma a retirar os sedimentos existentes. Assim que esta finalize, são realizadas as etapas de cunhagem e estampagem: em primeiro lugar a cunhagem do rameado e depois a estampagem que confere à chapa a forma volumétrica da colher. A sequência das transformações referidas, podem ser observadas na seguinte figura.



Figura 36: Sequência de estampagem

A cunhagem do rameado, nestas condições, é um processo relativamente simples, uma vez que a chapa e as ferramentas são planas, necessitando apenas de se garantir um correto posicionamento da chapa e correto controlo de profundidade de penetração. A estampagem, por outro lado, já apresenta um grau de dificuldade maior, porque para além de ser necessário garantir o mesmo que na etapa anterior, a chapa ao ser deformada é mais instável e a concepção das ferramentas é mais exigente devido à maior complexidade da geometria. Estas duas etapas de fabrico têm uma importância elevada para este caso de estudo, dado que terão de sofrer uma fusão.

Estando terminadas estas etapas, as seguintes são o brunimento dos bordos, ou seja, retirar as rebarbas resultantes dos processos anteriores, polimento total da peça e lavagem final. Por fim, são realizados o controlo de qualidade e o empacotamento.

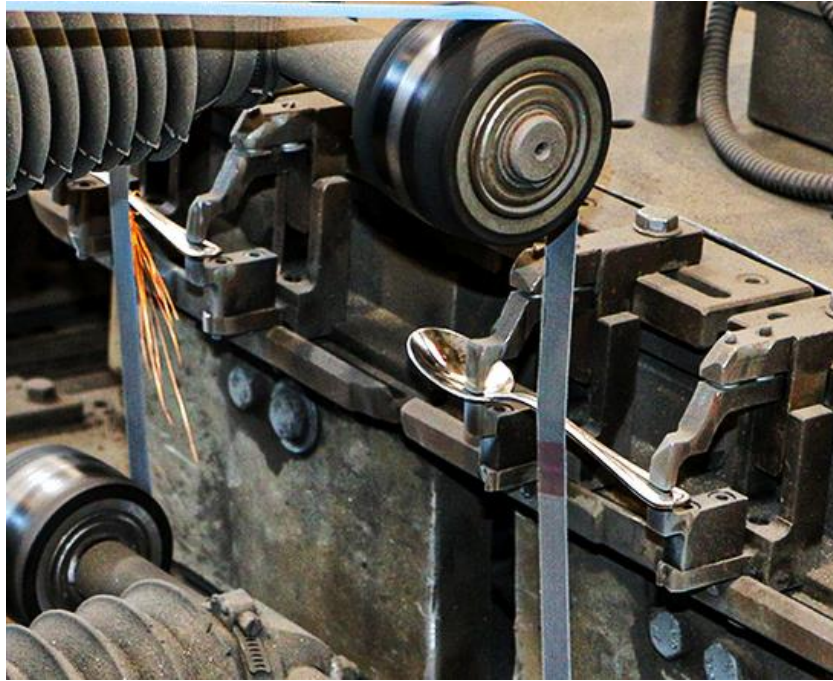


Figura 37: Etapa de brunimento

4.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Uma vez apresentadas as etapas de fabrico responsáveis pela produção da colher do modelo Santamarta, serão agora introduzidas as etapas de preparação da simulação numérica.

Como já foi referido, o objetivo final deste caso de estudo é demonstrar as potencialidades das ferramentas CAE no processo produtivo, mais concretamente, no auxílio ao desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem, capaz de conformar a colher e cunhar o rameado ao mesmo tempo. Para isto, será necessário dividir o estudo em 5 fases principais:

- 1- Conseguir simular a atual etapa de estampagem;
- 2- Corrigir as geometrias das ferramentas em função dos resultados obtidos;
- 3- Efetuar uma microanálise de simulação numérica da penetração do rameado;
- 4- Relacionar os dados obtidos da penetração do rameado com a conformação da colher
- 5- Validar a ferramenta

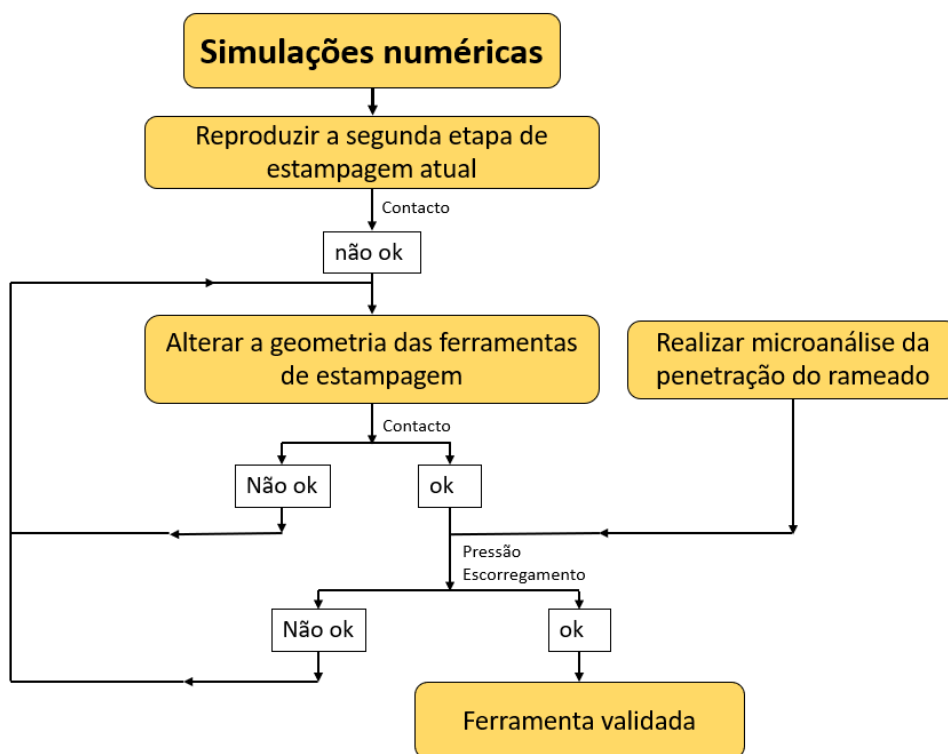


Figura 38: Representação esquemática do estudo da simulação numérica

4.2.1. SIMULAÇÃO DA ATUAL ETAPA DE ESTAMPAGEM

O ponto de partida deste caso de estudo será reproduzir numericamente a etapa de estampagem, conforme se executa atualmente na empresa. Esta fase inicial é fundamental, uma vez que, é nesta fase que todo o processo será ajustado, como o posicionamento e deslocamentos das ferramentas, a colocação e fixação do esboço, entre outros.

De seguida, serão apresentados os ficheiros e processos necessários para a realização da simulação. O programa DD3IMP, é composto pelo executável e, no mínimo, por mais 9 ficheiros, dependendo do número de ferramentas e materiais utilizados.

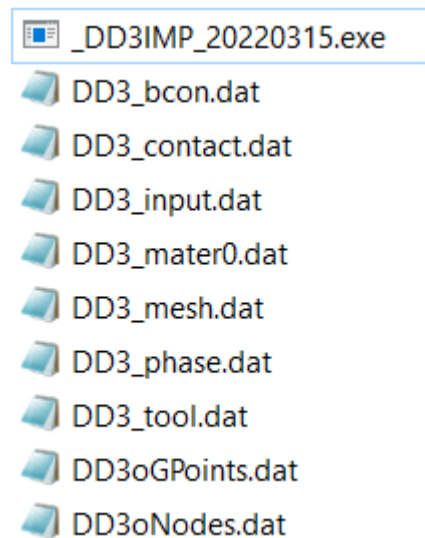


Figura 39: Ficheiros associados ao programa DD3IMP

Estes ficheiros são os responsáveis pela realização da simulação de acordo com aquilo que é desejado, ou seja, cada um deles tem uma função específica que deve ser alterada e ajustada segundo as necessidades de cada simulação.

4.2.1.1. DD3_BCON

O primeiro ficheiro, designado de DD3_bcon (boundary conditions), corresponde às condições de fronteira que queremos impor ao nosso esboço (chapa neste caso).

De forma a simplificarmos o problema, a simulação será realizada com apenas metade do esboço da colher. Esta condição está imposta no ficheiro em P1, onde se define o plano de simetria $Y=0$ ($B=1$ e $D=0$), coordenada 2 e se impõe a condição de simetria, $ID=2$.

Após algumas tentativas, concluiu-se também que é necessário restringir e estabilizar o esboço no eixo dos x , uma vez que, do ponto de vista numérico se não restringirmos o deslocamento nessa direção, há uma forte probabilidade de este se movimentar assim que as ferramentas entram em contacto e isso implica dificuldades acrescidas para a simulação. Surgiu então a condição de que no eixo x ($A=1$), em H (que representa os nós de coordenada mais elevada em x), coordenada 1 se impõe uma condição de simetria, $ID=2$, que neste caso, apenas serve para restringir os nós.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "bcon.dat" 01.07.2009 *****
***** MANDATORY file to input Boundary Conditions *****

=====
Boundary conditions/ NSC= 2 ERR= 1.D-2 BCID
Ax+By+Cz=D / A B C D COORD ID NRES
P1 / 0 1 0 0 2 2 0
P2 / 1 0 0 H 1 2 0
Restrictions / COORD COND VALUE ERR2
P2R1 / . . . 1.D-2
=====
OSS One Step / NRES= 1
Springback / x y z COORD Xinit
N1 / 0.0 0.0 0.0 3 1
N2 / . . . .
=====
BCIDs defined at nodes (if NSC= B) (reads: NodeNum BCIDx BCIDy BCIDz)
x
=====

```

Figura 40: Ficheiro DD3_bcon

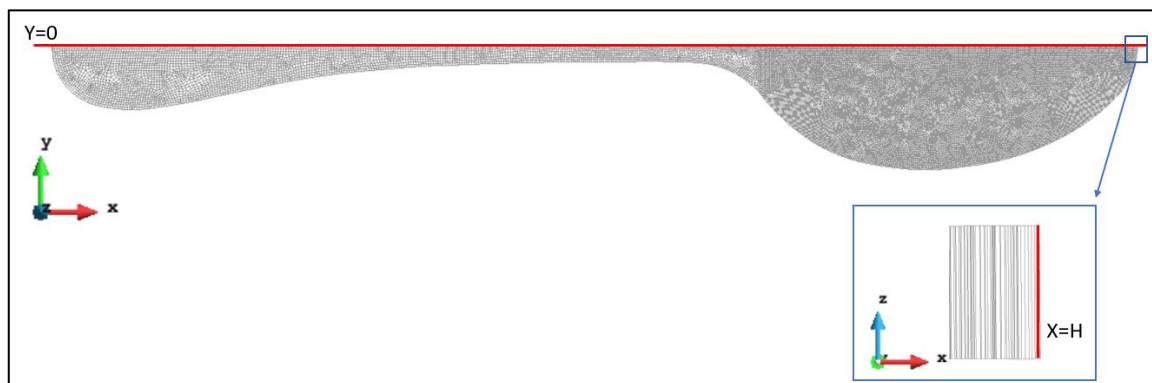


Figura 41: Demonstração das condições de fronteira

4.2.1.2. DD3_CONTACT

De seguida, temos o DD3_contact. Aqui é onde se define o contacto das ferramentas com o esboço. Como neste caso há duas ferramentas, o normal seria definir 2 contactos, um “set” para a parte de cima do esboço e um segundo “set” para a parte de baixo. No entanto, para facilitar e evitar possíveis problemas, definiu-se que todo o esboço estaria suscetível de contacto, resultando em um único “set”.

```

1010***** < DD3IMP 010.x > File "contact.dat" 01.07.2009 *****
***** MANDATORY file to input contact sets *****

=====
CONTACT SETS /
ISET Ax+By+Cz=D X/ NSET 1
1 P/ A B C D
0 0 0 0
=====

```

Figura 42: Ficheiro DD3_contact

4.2.1.3. DD3_INPUT

No ficheiro DD3_input, os parâmetros apresentados são mais direcionados para o controlo do executável no âmbito de iterações e incrementos máximos necessários, qual a fase que queremos que seja realizado o retorno elástico, entre outros.

1010*****	< DD3IMP 010.x > File "input.dat" 23.03.2021						*****
*****	MANDATORY file to start/restart a simulation						*****
=====+=====							
Simulation and Output Data		NSTART	NEND	NOUT	iGID	INC	DEV
		1	125000	0	2	51	0
-----+-----							
Tolerances and residues		TOLEQ	TEQOUT	RAPEQ	TOLST	CUNL	dampOSS
		0.01	0.1	1.0E+09	1.0E-08	0.999	0.50
-----+-----							
Maximum number of iterations		IRMXX	IEQMAX	NMAXST			
		1	150	25			
-----+-----							
Max. Increments for each NST		DEMAX	DWMAX	DSNMAX	DSTMAX		
		0.0100	0.5000	9.0	3.0		
-----+-----							
Rmin Strategy		RINF	RSUP	DFNMAX	DFT1MAX	DFT2MAX	
		0.0010	5.000	0.0	0.0	0.0	
-----+-----							
Thermal Analysis Parameters		T_TOLEQ	T_alfa	T_Diag	T_Transi	T0[°C]	
		1.0E-03	0.5	1	1	25.0	
-----+-----							
Input data, Cep		MEPopt	iphOSS				
		3	3				
=====+=====							

Figura 43: Ficheiro DD3_input

4.2.1.4. DD3_MATER

No ficheiro DD3_mater, são introduzidos parâmetros relativos ao material.

Na simulação numérica, para que os resultados finais sejam os mais precisos, é fundamental caracterizar bem o material, ou seja, os parâmetros de entrada como as propriedades mecânicas, coeficientes de anisotropia, coeficiente de Poisson e outros, devem estar de acordo com o material escolhido, caso contrário, não será possível prever corretamente como o verdadeiro material se comporta plasticamente e se ao longo da sua conformação surgem determinadas falhas, próprias da estampagem, como o material enrugar ou rasgar.

Como já foi referido anteriormente, este esboço será caracterizado com dois materiais, ou seja, DD3_mater1 e DD3_mater2. Relativamente aos parâmetros que serão introduzidos para caracterizar estes dois materiais, a única diferença será a tensão de cedência, uma vez que se trata do mesmo aço, o comportamento plástico será igual para ambos.

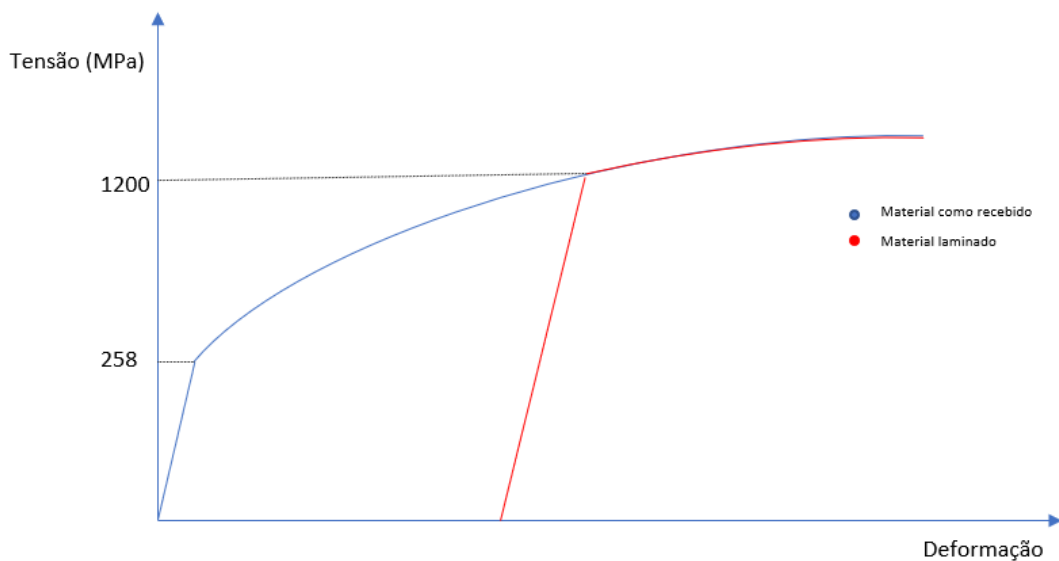


Figura 44: Representação do comportamento plástico para o mesmo material

Relativamente aos parâmetros assinalados a vermelho das seguintes figuras, os valores da tensão de cedência para os dois materiais foram escolhidos com base no artigo de Milad, enquanto que o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do material foram retirados do Matweb (*Matweb*, n.d.). Os parâmetros CC e NA, serão abordados mais à frente.

1010***** < DD3IMP 010.x > File "mater.dat" 23.03.2021 *****						
***** MANDATORY file to input constitutive parameters *****						
=====						
MATERIAL PARAMETERS/	PLasLAW	YLdCRIT		EM	PR	
/	1	1		193000.0	0.29	
=====						
Swift Law	Yo	CC	AN		AX	alfa
Isot.Kinem.Hard.	258	1240	0.5		0.0	-
=====						

Figura 45: DD3_mater1

1010***** < DD3IMP 010.x > File "mater.dat" 23.03.2021 *****						
***** MANDATORY file to input constitutive parameters *****						
=====						
MATERIAL PARAMETERS/	PLasLAW	YLdCRIT		EM	PR	
/	1	1		193000.0	0.29	
=====						
Swift Law	Yo	CC	AN		AX	alfa
Isot.Kinem.Hard.	1200	1240	0.5		0.0	-
=====						

Figura 46: DD3_mater2

Os parâmetros assinalados a azul, são os que dizem respeito à escolha da lei de encruamento e critério de plasticidade. Uma vez que ambos estão preenchidos com o número

1, significa que de todas as suas opções disponíveis, a escolha mais acertada para definir este material são as primeiras opções, como se demonstra na Figura 48 e Figura 50.

No processo de laminagem, a microestrutura do aço deforma-se, levando a que se originem grãos mais longos na direção da laminagem que provocam uma heterogeneidade nas propriedades da chapa originando um material anisotrópico (Boff et al., n.d.). Após algumas pesquisas de estudos realizados com o aço AISI 304, conclui-se que se trata de um aço anisotrópico de $\bar{r}$ superior a 1 e considerando o que foi referido anteriormente, quando um aço apresenta um valor de r médio superior a 1, pode-se assumir que o critério de Hill48 é o mais adequado para definir a superfície de plasticidade deste material.

Dos vários encontrados, os valores de (Souto, 2011) foram os escolhidos para demonstrar e definir os coeficientes de anisotropia. O coeficiente de anisotropia plástica, r , é definido como o quociente entre a deformação verdadeira da largura pela deformação verdadeira da espessura do provete ensaiado (Velho, 2020).

$$r = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_e}; \quad (4.2)$$

	R_0	R_{45}	R_{90}	$\bar{R}$	ΔR
AISI 304	0.90	1.28	0.86	1.01	-0.40
AISI 316L	0.75	1.17	0.91	0.94	-0.34

Figura 47: Coeficientes e parâmetros de anisotropia do aço AISI 304 e AISI 316 L (Souto, 2011)

Assim já é possível calcular os seguintes parâmetros de anisotropia:

$$G = \frac{1}{r_0 + 1};$$

$$G = \frac{1}{0,9 + 1};$$

$$G = 0,5$$

$$H = r_0 \times G$$

$$H = 0,9 \times 0,5$$

$$H = 0,5$$

$$F = \frac{H}{r_{90}};$$

$$F = \frac{0,5}{0,86};$$

$$F = 0,6$$

$$L = M = 1,5$$

$$N = \frac{1}{2} \times \frac{(r_0 + r_{90}) \times (2r_{45} + 1)}{r_{90} \times (r_0 + 1)}$$

$$N = \frac{1}{2} \times \frac{(0,9 + 0,86) \times ((2 \times 1,28) + 1)}{0,86 \times (0,9 + 1)}$$

$$N = 1,9$$

Assim que todos os parâmetros estiverem calculados, já se pode preencher o ficheiro com os valores corretos para o critério que pretendemos utilizar.

YIELD CRITERION	F	G	H	L	M	N
-Hill48	0.6	0.5	0.5	1.5	1.5	1.9
-Yld91 (Barlat)	m					
	2					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
-K&B 1993	k	c				
	2	0.0				
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
-CB2001 (c)	c/alfa	m				
-CB2004 (?)	0.0	-				
-CAZ18 (alfa)	a1	a2	a3	a4	a5	a6
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	b1	b2	b3	b4	b5	b6
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	b7	b8	b9	b10	b11	
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
-Drucker+~L	c					
	0.0					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
-CPB06	a	k0		k00	Ck	
	2	0.0		-	-	
	C11	C22	C33	C44	C55	C66
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	C23	C13	C12			
	0.0	0.0	0.0			
-CPB06_ex2	a	k0_1	k0_2			
	2	0.0	0.0			
	C11_1	C22_1	C33_1	C44_1	C55_1	C66_1
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	C23_1	C13_1	C12_1			
	0.0	0.0	0.0			
	C11_2	C22_2	C33_2	C44_2	C55_2	C66_2
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	C23_2	C13_2	C12_2			
	0.0	0.0	0.0			

Figura 48: Aplicação dos parâmetros de anisotropia no ficheiro DD3_mater1 e DD3_mater2

Relativamente às leis de encruamento, a lei escolhida foi a lei de Swift, uma vez que é a mais indicada para descrever a componente isotrópica de materiais que não apresentam saturação de tensão, como é o caso dos aços.

(Souto, 2011), apresenta também os valores dos parâmetros CC (K) e AN (n).

Swift	
Parâmetros	Iniciais
R_0	0.90
R_{45}	1.28
R_{90}	0.86
Y_0 (MPa)	280
K (MPa)	1240
n	0.50

Figura 49: Identificação dos parâmetros de anisotropia e de encruamento isotrópico para o aço AISI304 segundo o critério de Hill 48 (Souto, 2011)

Swift Law	/	Yo	CC	AN	/	AX/	alfa
Isot.Kinem.Hard.	/	258	1240	0.5	/	0.0/	-
Voce Law	/	Yo	CY	Ysat	m/	CX	Xsat
No-Isot.Kin.Hard.	/				0.0/	0.0	0.0
Microstructural Model	/	Yo	CR	Ysat	/	CP	
	/				/		
	/	CX	Ssat	/	CS -Xor-	CSD	CSL
	/			/			
	/	X0	f	/	n	nP	r
	/			/			

Figura 50: Aplicação dos parâmetros associado à lei de Swift no ficheiro DD3_mater1

Swift Law	/	Yo	CC	AN	/	AX/	alfa
Isot.Kinem.Hard.	/	1200	1240	0.5	/	0.0/	-
Voce Law	/	Yo	CY	Ysat	m/	CX	Xsat
No-Isot.Kin.Hard.	/				0.0/	0.0	0.0
Microstructural Model	/	Yo	CR	Ysat	/	CP	
	/				/		
	/	CX	Ssat	/	CS -Xor-	CSD	CSL
	/			/			
	/	X0	f	/	n	nP	r
	/			/			

Figura 51: Aplicação dos parâmetros associado à lei de Swift no ficheiro DD3_mater2

No que diz respeito aos materiais da colher, pode afirmar-se que estes estão caracterizados, no entanto, no decorrer das simulações, surgiu a necessidade de se acrescentar mais um material. Da forma como o problema estava definido, a chapa apresentava uma condição de simetria em H, o valor mais alto no eixo dos x, que o impedia de descer ligeiramente assim que as ferramentas entrassem em contacto. Então, acrescentou-

se uma porção pequena de material nessa zona, ver anexo A, com um material de tensão de cedência muito baixa, para que este se deformasse facilmente e permitisse alguma liberdade de o esboço se mover.

4.2.1.5. DD3_MESH

Este ficheiro, DD3_mesh, é o que permite definir a geometria do esboço.

Recorrendo aos desenhos da colher, fornecidos pela empresa, foi-se trabalhando o esboço de forma a se conseguir a geometria pretendida. Inicialmente, dividiu-se o modelo a meio, uma vez que a simulação terá um plano simetria. Este é um trabalho que é mais facilmente realizado em softwares CAD, no entanto, depois disto, é necessário importar o ficheiro para o software GID, de forma a se poder gerar uma malha no mesmo. Assim que o esboço 2D tiver a malha gerada, recorrendo ao ficheiro *bi2tri*, é possível converter o esboço para uma malha 3D com a espessura que quisermos.

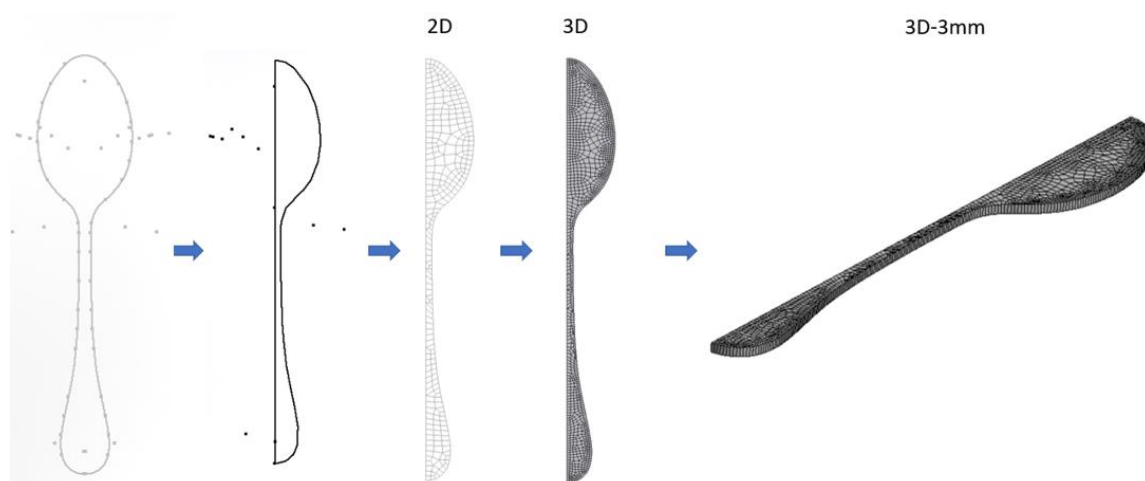


Figura 52: Sequência para a realização do esboço

Na figura a cima é possível ver a sequência de operações realizadas nos esboços até se obter o esboço com 3mm de espessura, antes de entrar na etapa de laminagem.

Uma vez que a simulação é referente à etapa de estampagem, a chapa quando se encontra nesta operação, já não apresenta uma espessura homogénea como é demonstrada na figura a cima, uma vez que, anteriormente passa pela laminagem que reduz a sua espessura para um mínimo de 1.7mm. Para se fazer essa alteração no esboço, bastou copiar os dados do ficheiro DD3_mesh e recorrendo ao Excel, gerou-se uma função que altera o posicionamento dos nós, de forma a que seja possível obter-se a geometria pretendida.



Figura 53: Representação da redução de espessura do esboço

Idealmente, este seria o esboço ótimo para realizar a simulação, no entanto surgiu a necessidade de se efetuar duas alterações no mesmo. A primeira alteração foi impor uma inclinação de 0.41 graus na chapa, de forma a que esta estivesse apoiada em ambas as extremidades da ferramenta de baixo, caso contrário, dificultava imenso a simulação, dado que havia muitas dificuldades e instabilidades ao nível dos contactos da ferramenta com a chapa. A segunda alteração deve-se ao facto de as ferramentas, superior e inferior, na zona da colher, serem geometricamente iguais. Como será observado posteriormente, as ferramentas foram obtidas a partir da superfície inferior da colher e isto implica que ao se colocar ambas as ferramentas a uma determinada distância, por exemplo 3 mm, esta diferença mantém-se constante a toda a superfície, o que não é favorável de todo, uma vez que, se a chapa apresenta uma cota de 3 mm numa extremidade e 1.7 mm na outra, logo, ou se mantém uma diferença entre ferramentas de 3 mm e a parte da frente fica muito folgada e sem aperto, como se pode verificar na Figura 54, ou se impõe uma diferença de 1.7 mm e a parte de trás fica esmagada.

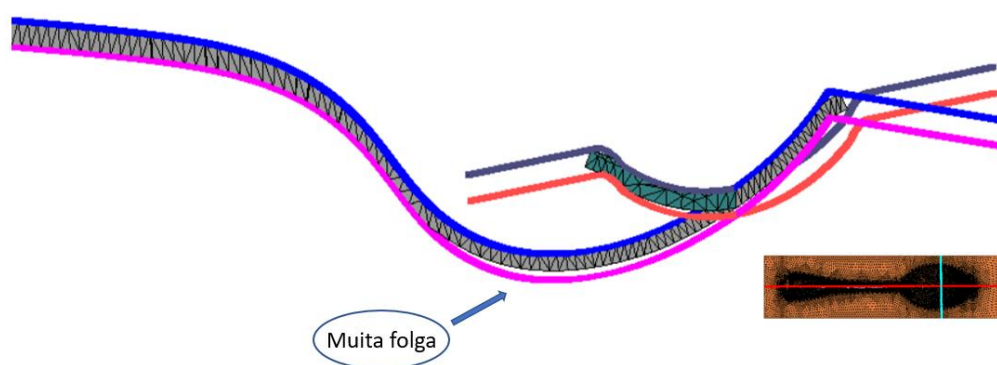


Figura 54: Demonstração da folga existente por falta de aperto

Após se observar com mais detalhe um exemplar da colher do modelo em estudo, reparou-se que existe um esmagamento da colher na zona de transição da pega para a concha da colher, como ilustra a Figura 55. Como a zona da pega, é praticamente plana, isso faz com que seja a zona menos interessante do ponto de vista dos resultados, uma vez que não é uma

zona crítica para se estudar. Posto isto, do ponto de vista da eliminação do problema do esmagamento excessivo na zona da pega, definiu-se o esboço com uma espessura máxima de 2.4 mm e mínima de 1.7mm. Isto porque, assim que se der a conformação da chapa por simulação, a zona de transição com 2.4 mm será esmagada até um valor de 2.0 mm aproximadamente, ou seja, equivalente à redução que se verifica na zona de transição do modelo.



Figura 55: Demonstração da zona esmagada

Desta forma, uma vez que a zona da pega não é a zona menos crítica do ponto de vista de cunhagem do rameado, as simulações focar-se-ão apenas na zona da concha e na transição da mesma para a pega. Em suma, o esboço estará dividido em 3 partes, das quais apenas a número 2 e 3 será avaliada e considerada, tal como se representa na figura a seguir.

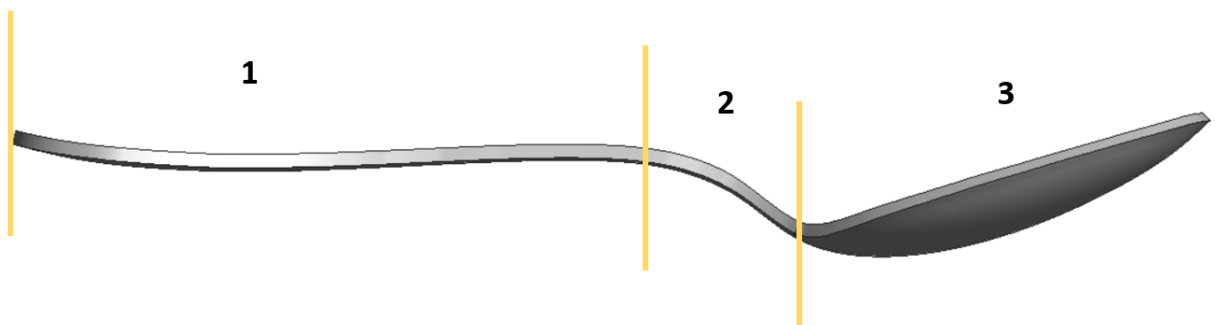


Figura 56: Divisão do esboço

Assim, tendo em conta as duas alterações mencionadas, o resultado final do esboço da colher corresponde a uma chapa de dois materiais distintos, DD3_mater1 a verde e DD3_mater2 a amarelo, com cotas de 2.4 e 1.7 em cada extremidade e com uma inclinação de 0.41 graus. Agora, basta exportar o ficheiro para GID mesh e tem-se o DD3_mesh pronto.



Figura 57: Demonstração do esboço final com as respetivas alterações



Figura 58: Demonstração do esboço final com os 2 materiais distintos

4.2.1.6. DD3_TOOL

O ficheiro que se segue ao DD3_mesh, na Figura 39, é o DD3_phase, no entanto, essa sequência foi alterada de forma a se conseguir uma explicação mais organizada.

Assim, passa-se à definição do ficheiro DD3_tool que é muito idêntica à do DD3_mesh. Uma das diferenças destaca-se já na fase inicial, em que, ao invés do anterior, este começa já no software GID.

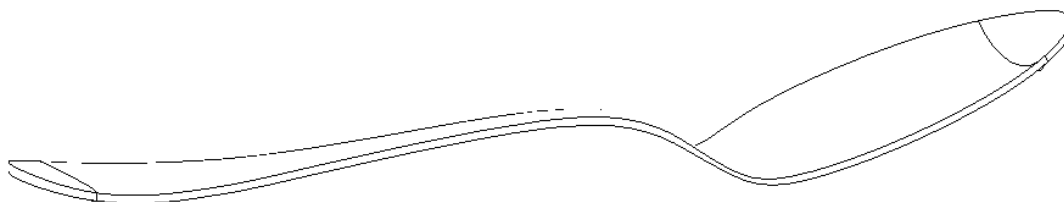


Figura 59: Desenho da colher fornecido pela empresa

Esta colher acima ilustrada é a colher que a empresa forneceu como sendo o modelo 3D da colher Santamarta. O que se pretende deste modelo, é gerar uma das suas superfícies, para posteriormente se desenvolver o modelo de ferramenta, garantindo que esta apresenta a geometria da colher.

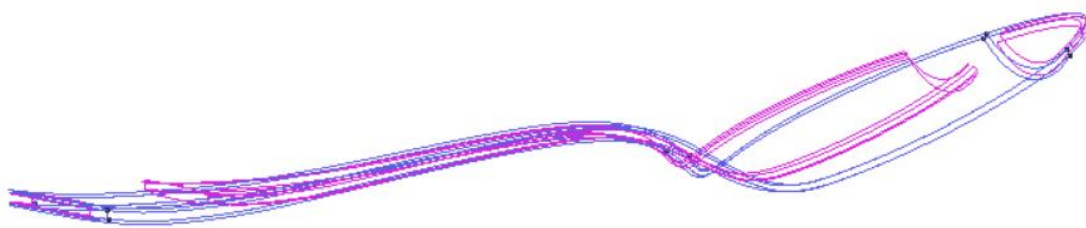


Figura 60: Colher definida por pontos, linhas e superfícies

Assim que o ficheiro estiver importado, este surge composto por pontos, linhas e superfícies, como se ilustra na Figura 60. Agora, é necessário remover o que é dispensável, deixando apenas o essencial para a definição da superfície.

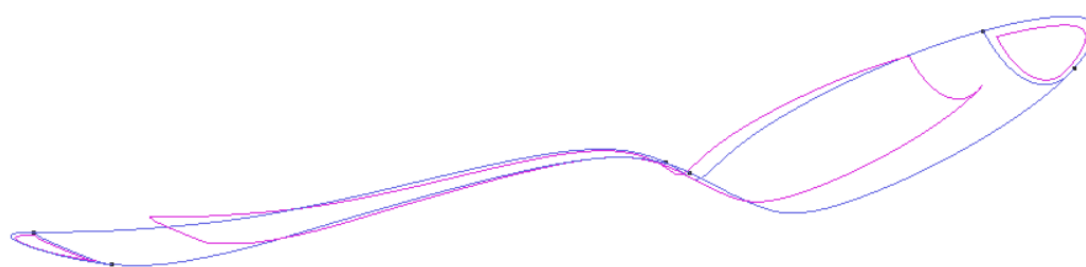


Figura 61: Seleção das superfícies e respetivos pontos e linhas que definirão a superfície da colher

Agora que já se tem a superfície, é necessário importar a mesma novamente para o formato “ipt” de forma a que se consiga modelar as ferramentas a partir dessa superfície. A Figura 62 ilustra a ferramenta inferior.

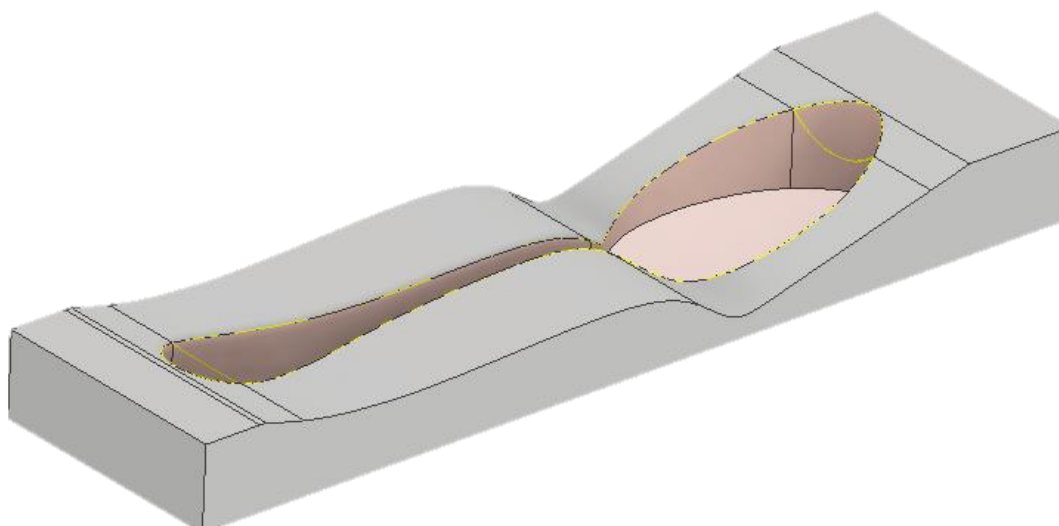


Figura 62: Modelação da ferramenta inferior

Assim que se tiver a ferramenta concluída, é necessário converter a mesma para “igs” e importar novamente para o GID.

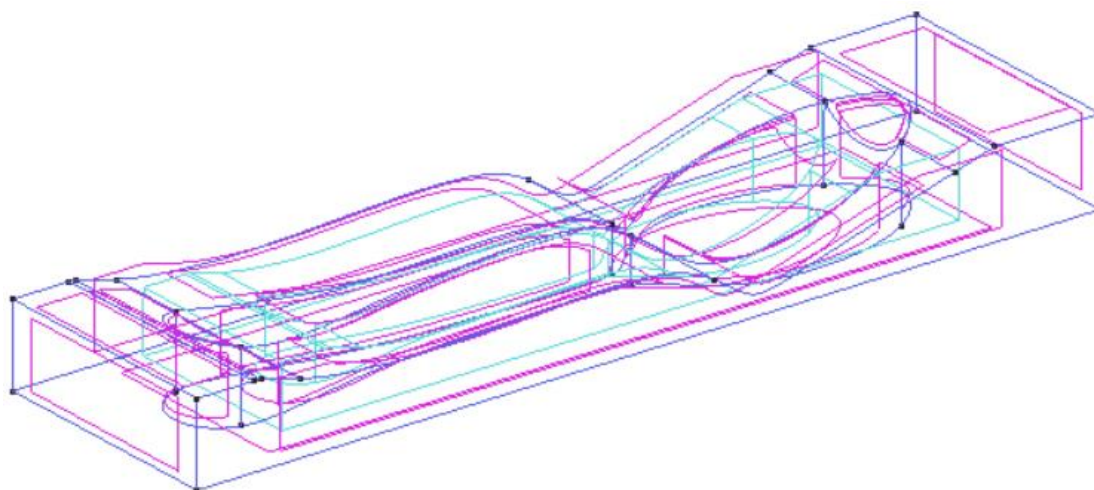


Figura 63: Ferramenta representada por pontos, linhas, superfícies e volume.

Uma vez mais, é necessário remover tudo o que não é útil, de forma a que se obtenha novamente a superfície pretendida, que neste caso, é a superfície da ferramenta.

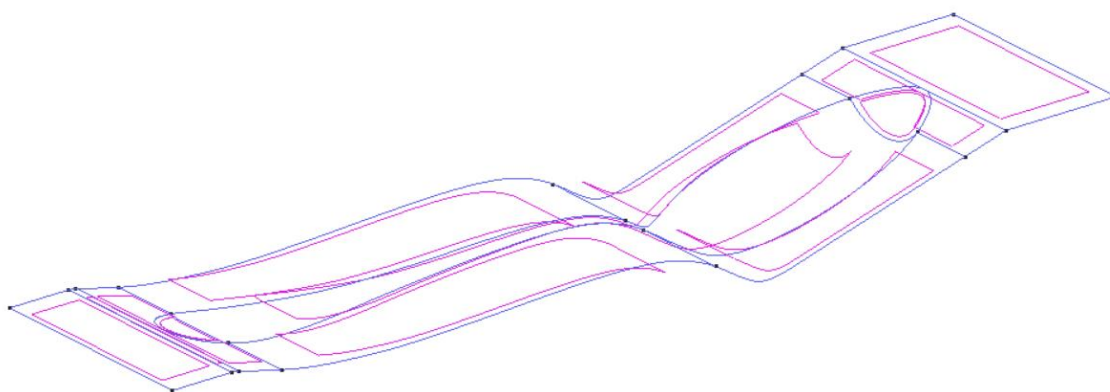


Figura 64: Seleção das superfícies e respetivos pontos e linhas que definirão a superfície da ferramenta

Finalizada esta etapa, passa-se agora para a etapa de geração da malha de elementos finitos desta superfície. O resultado obtido é o seguinte.

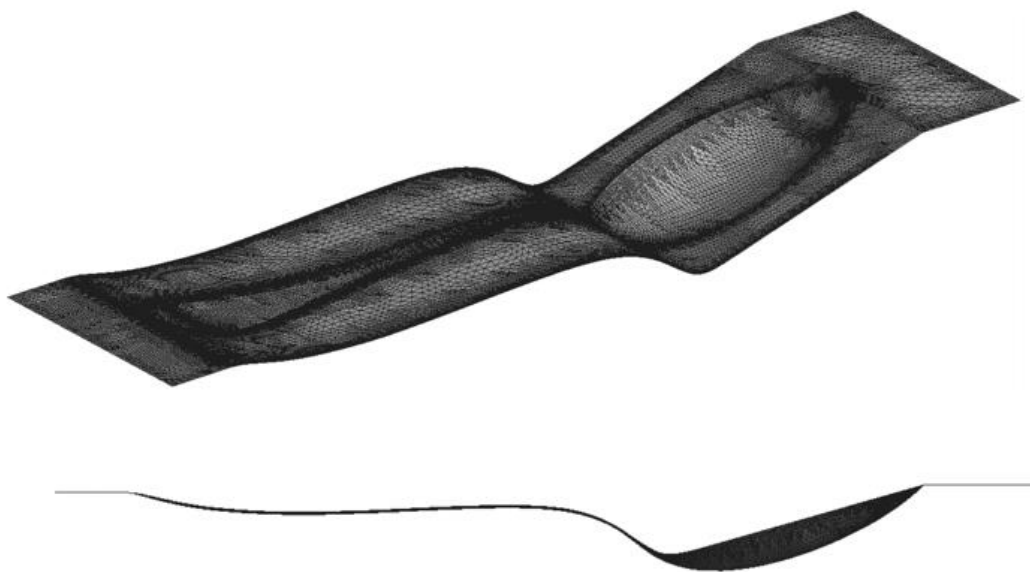


Figura 65: Ferramenta inferior

A última etapa para validar esta ferramenta, prende-se com a verificação das normais da mesma. Para que a ferramenta, numericamente, seja capaz de desempenhar a função pretendida, as suas normais têm que estar voltadas para o lado que vai estar em contacto com o esboço, ou seja, no caso na ferramenta superior, as normais têm que estar voltadas para baixo, e na inferior o contrário. Para já, nesta fase inicial de replicar o processo atual, este pormenor é o que vai diferenciar uma ferramenta da outra.

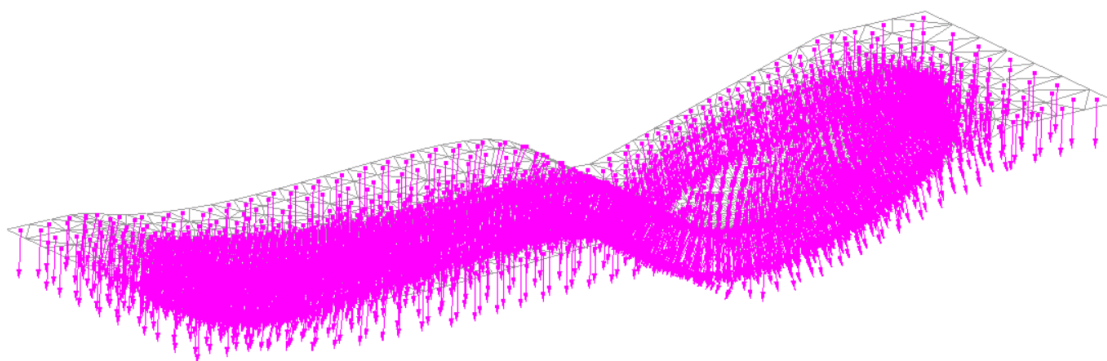


Figura 66: Normais da ferramenta superior

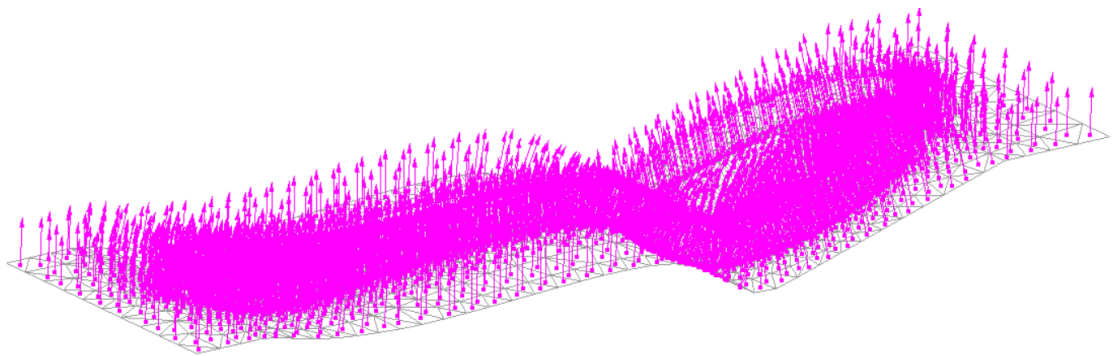


Figura 67: Normais da ferramenta inferior

Por fim, basta exportar cada uma das ferramentas para GID mesh e assim obter os ficheiros DD3_tool1 e o DD3_tool2.

Podia-se afirmar que a definição deste ficheiro sobre as ferramentas estava completa, no entanto, ao longo das tentativas de reproduzir o processo, surgiu um problema (Figura 73) que obrigou à realização de uma divisão em cada ferramenta, ou seja, tanto na ferramenta superior, como na inferior, a zona da ferramenta correspondente à superfície da colher teve que ser dividida do restante. Desta forma, de duas ferramentas passou-se a quatro.

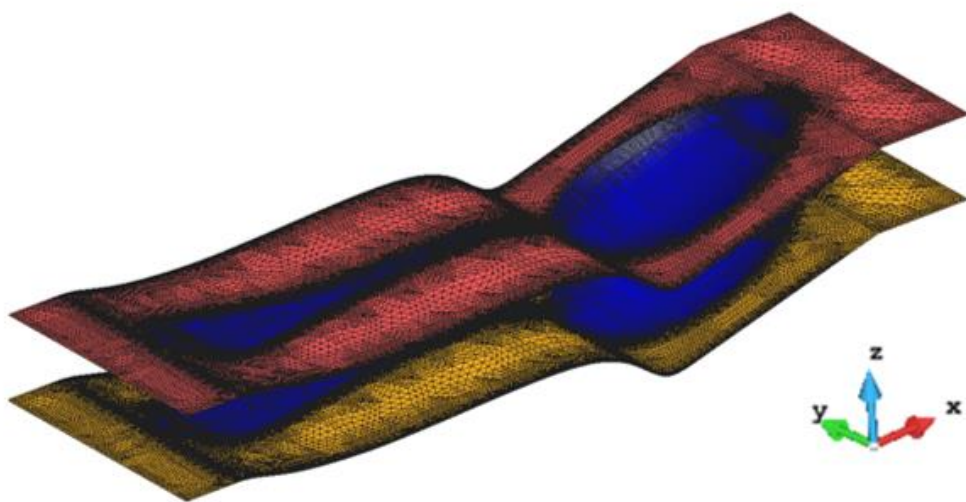


Figura 68: Ilustração das 4 ferramentas

4.2.1.7. DD3_PHASE

Uma vez que já se tem as ferramentas e a chapa, agora falta posicionar e comandar as mesmas. DD3_phase, é o ficheiro responsável pelo posicionamento das ferramentas e define qual o papel que estas devem desempenhar, ou seja, se é pretendido que estas se desloquem

ao longo de uma determinada distância, atinjam uma determinada força ou pressão, em que direção é que se pretende que se desloquem ou exerçam a força, entre outras.

Para este caso, como já foi referido, o conjunto é composto por 4 ferramentas, sendo que a ferramenta superior corresponde à DD3_tool1 e D33_tool3, enquanto que a inferior corresponde à DD3_tool2 e DD3_tool4.

```

1400***** < DD3IMP 011.x > File "phase.dat" 04.02.2014 *****
***** MANDATORY file to input phase data *****
NPH= 3 NbTOOL= 4 NbBCID= 0
=====
/Initial Displacements (DIS0) and naming of tools
-----iMAT-----
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 0 | X Y Z | <naming> | BCID | SET | lim- | lim+ |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 | 146.0 0.5 18.2 | T1_tool1 | 1 | 1 | | |
| 2 | 146.0 0.0 -6.2 | T2_tool2 | 1 | 1 | | |
| 3 | 146.0 0.5 18.2 | T3_tool3 | 1 | 1 | | |
| 4 | 146.0 0.0 -6.2 | T4_tool4 | 1 | 1 | | |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

```

Figura 69: Parte superior do ficheiro DD3_phase

A figura a cima, demonstra a primeira parte do ficheiro DD3_phase que foi dividida por cores de forma a que a sua compreensão seja mais fácil.

A vermelho, em cima, tem-se o número de ferramentas que vão ser utilizadas, em baixo está a sua respetiva denominação.

A cor verde corresponde à zona em que se define o posicionamento de cada uma das ferramentas. Em x todas as ferramentas se encontram à mesma distância, em z ambas as ferramentas estão separadas de forma a que o esboço fique entre eles, em y as ferramentas superiores surgem deslocadas ligeiramente para simular uma concha menor, que é o que acontece na realidade, caso contrário, seriam duas superfícies iguais e não conseguiriam obter profundidade suficiente para conformar a colher, uma vez que o contacto se inicia primeiro na parte lateral superior da concha, e esmagava o material nessa zona.

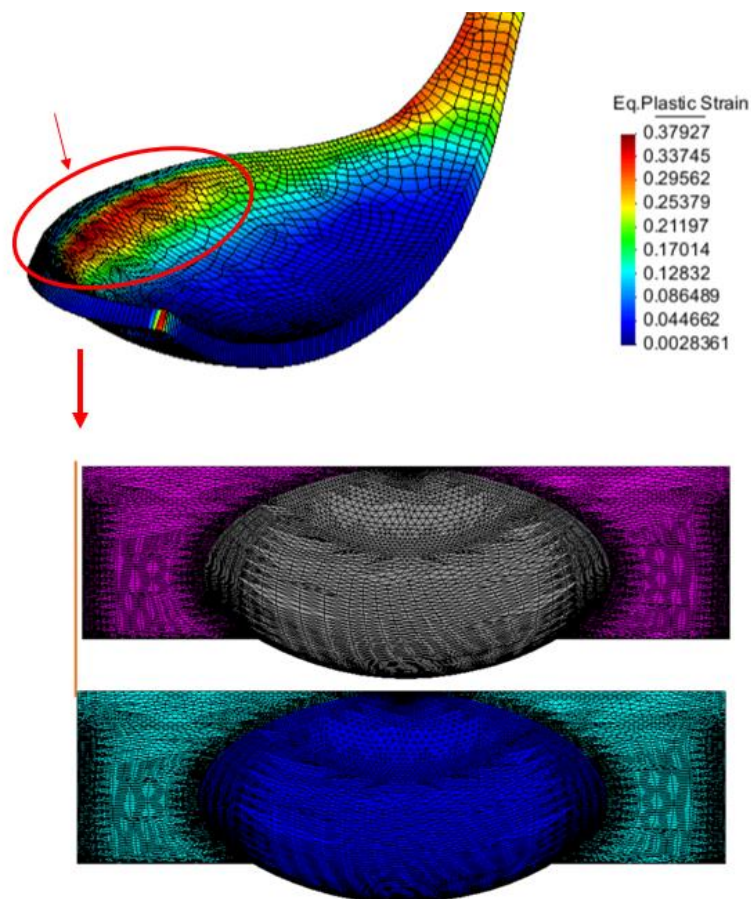


Figura 70: Representação do problema e respetiva solução

Assim, na fase inicial desta simulação as ferramentas e o esboço posicionam-se como representado na Figura 71.

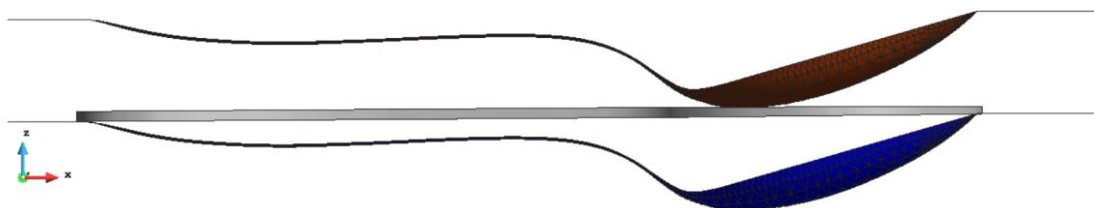


Figura 71: Posicionamento das ferramentas e esboço na fase inicial

Ainda referente à Figura 69, a amarelo tem-se o contacto que cada ferramenta tem com o esboço. Todos eles apresentam SET 1, uma vez que no ficheiro DD3_contact só definimos um contacto.

A azul tem-se o número de fases que vão ser necessárias para descrever o processo. Esta é a parte que será explicada de seguida.

IPH/	DELT	NOUT	JD	NTYP	NOPR	Text[°C]	TIME[sec]		
1/	.01	1	3	1	1		21.0		
iout/	INDOUT(I)	DISINT(I)(f8.0)			EFFIMP(I)(f8.0)			Hcoef	Temp
1	1 1 2	0.0	0.0	-21.0	0.0	0.0	0.0	0	0
2	1 1 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
3	1 1 2	0.0	0.0	-21.0	0.0	0.0	0.0	0	0
4	1 1 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
IPH/	DELT	NOUT	JD	NTYP	NOPR	Text[°C]	TIME[sec]		
2/	.01	1	3	1	1		21.9		
iout/	INDOUT(I)	DISINT(I)(f8.0)			EFFIMP(I)(f8.0)			Hcoef	Temp
1	1 1 2	0.0	0.0	-21.9	0.0	0.0	0.0	0	0
2	1 1 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
3	1 1 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
4	1 1 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
IPH/	DELT	NOUT	JD	NTYP	NOPR	Text[°C]	TIME[sec]		
3/	.01	2	1	1	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
2	0 0 0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
3	0 0 0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
4	0 0 0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0

Figura 72: Parte inferior do ficheiro DD3_phase

Uma vez mais, por cores, vai-se explicar qual a função de cada parte do ficheiro.

A vermelho, mantém-se a correspondência ao número de ferramentas utilizadas.

A azul escuro, é a zona que define o número de cada fase. Inicialmente, estava previsto serem apenas 2 fases, no entanto, devido ao problema ilustrado na Figura 70 surgiu a necessidade de acrescentar mais uma fase. Esta fase extra é a segunda e consiste em prolongar o deslocamento da ferramenta DD3_tool1, de forma a conseguir conformar a zona da concha sem que ocorra o esmagamento lateral do esboço como ilustrado na Figura 73. A terceira fase retrata o final do processo, onde as ferramentas perdem o contacto com o esboço.

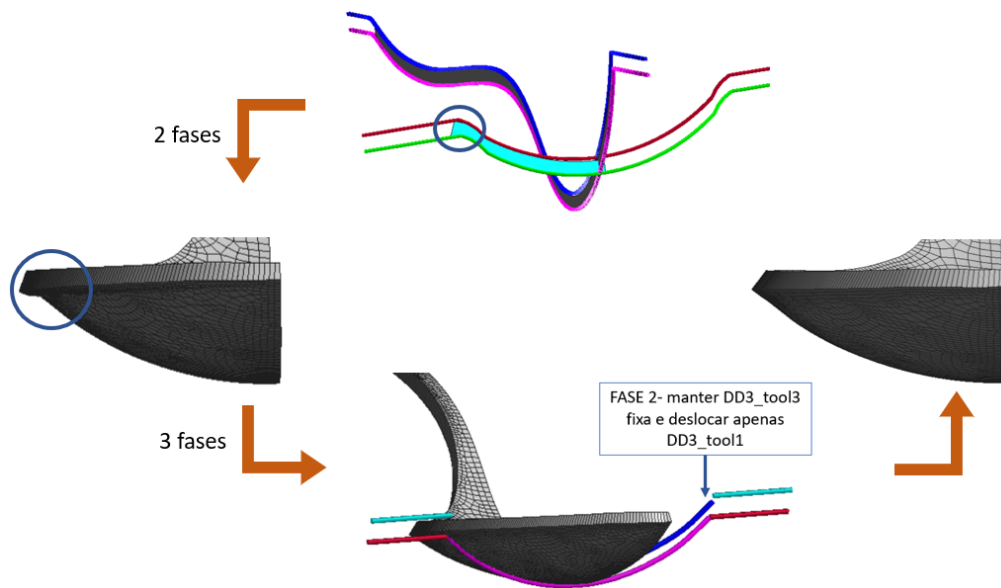


Figura 73: Demonstração do problema e respetiva solução

A azul claro e a verde, são as zonas em que se definem a ação, o tipo de teste e como é que este se valida para se mudar de fase. Uma vez que estas duas partes apresentam muitos termos e todos eles com elevada importância, a figura seguinte apresenta a explicação de cada um deles.

```

BCID - BCID as identified in input file DD3_bcon.dat
SET - Contact set in agreement with DD3_contact.dat
NOUT - Number of the tool/BCID 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
5 - Pressure
6 - Imposed Temperature
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) DISTINCT 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!!!
4 - tool is controled by a NOT constant force
5 - The tool is simply a pressure *** defined at EFFIMP ***
6 - Prescribed Thermal CONVECTION *** defined at EFFIMP(1) ***
7 - Prescribed Thermal FLUX *** defined at EFFIMP(1) ***
8 - Prescribed TEMPERATURE *** defined at DISINT(1) ***
9 - Prescribed Internal HEAT generation *** defined at EFFIMP(1) *** W/mm3
    for the material defined with iMAT=BCID
10 - status GLU and tool stopped
20 - status GLU and tool is moving

```

Figura 74: Legenda dos parâmetros do ficheiro DD3_phase

Na zona amarela, é onde se indica qual o valor que se quer impor à ação escolhida na zona verde, que neste caso, na fase 1 é um deslocamento no eixo z de 21 mm negativos e na fase dois dá-se o prolongamento do deslocamento só da ferramenta DD3_tool1.

4.2.1.8. DD3oGPOINTS E DD3oNODES

Por fim, surgem os ficheiros DD3oGPoints e DD3oNodes que proporcionam a possibilidade de se obter um registo detalhado de um ou mais nós e elementos. Basta escrever dentro do ficheiro qual o número do nó ou do elemento que se quer obter a informação e no final tem-se um registo ao longo do tempo da simulação. O ficheiro DD3oNodes é o que terá maior importância uma vez que serão escolhidos vários nós de posições distintas da chapa da colher, de forma a ser possível ter a informações como a sua posição, a área do nó, forças de contacto, vetor normal, o seu estado (GAP, SLIP, STICK), e no caso de estar em slip, a quantificação do mesmo.

4.2.1.9. VALIDAÇÃO DA ETAPA DE ESTAMPAGEM

Após estarem todos os ficheiros devidamente preenchidos e ajustados, falta verificar a solução que resultou da simulação. Os critérios de validação para a reprodução numérica da atual etapa de estampagem foram: ter uma geometria isenta de defeitos como os que já foram demonstrados e ter deformações compatíveis com a realidade para garantir que a espessura final é a correta. É através do programa GID que se consegue analisar e validar estes critérios, uma vez que, é possível obter a forma geométrica final do conformado e os valores da deformação plástica equivalente. Assim, após muitas tentativas e alterações, como os resultados obtidos estavam dentro do que era esperado, esta etapa ficou terminada.

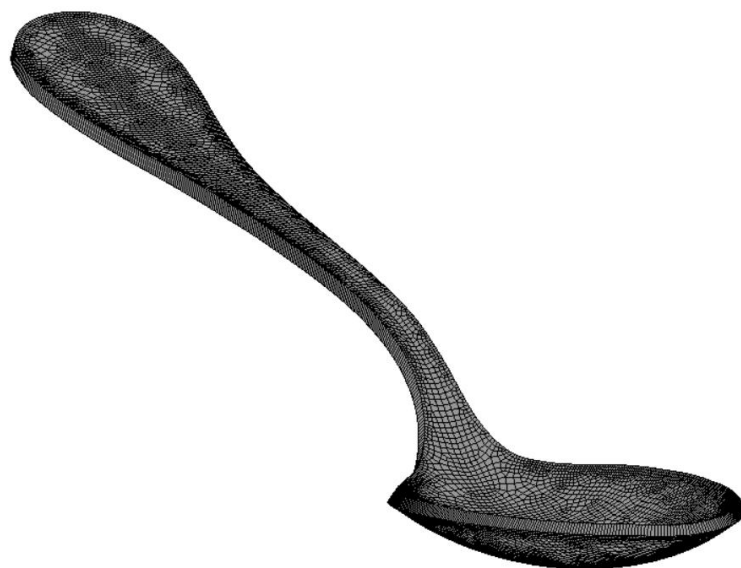


Figura 75: Geometria final obtida

4.2.2. SIMULAÇÃO DA ETAPA DE ESTAMPAGEM COM FERRAMENTAS CORRIGIDAS

Além da deformação plástica, há também um parâmetro muito interessante de se analisar tendo em conta o processo que se está a simular, isto é, o Contactforces, que representa as forças de contacto existentes na chapa num determinado momento. Ao analisar os valores deste parâmetro na simulação validada anteriormente, constata-se que na zona da concha não há praticamente contacto nenhum entre das ferramentas e a chapa na fase final da estampagem.

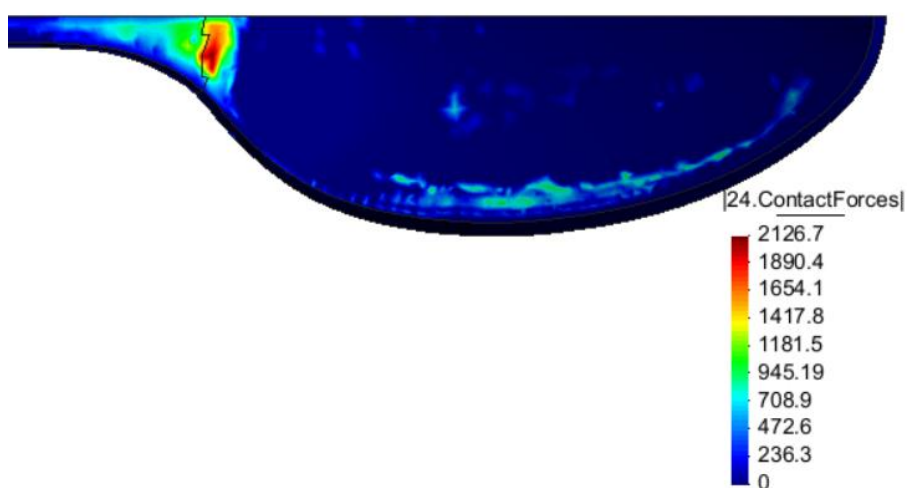


Figura 76: Resultado das forças de contacto existentes

Com estes resultados a validação das ferramentas foi posta em causa, dado que parece impossível haver uma estampagem sem haver contacto ou até mesmo com um contacto residual. Porém, a verdade é que após uma visita à empresa, um dos funcionários demonstrou, recorrendo a uma técnica à qual denominou de “raio x”, que este resultado poderá estar de acordo com a realidade. Essa técnica consistiu em colocar uma folha de papel sobre a chapa que estava destinada a ser conformada e se no final permanecessem vestígios de papel na colher, significava que houve contacto entre a ferramenta e a chapa no momento do aperto final, caso contrário, não ficava nenhum papel retido na colher. Como se pode observar na Figura 77, não surge papel retido na zona da concha da colher, o que vem comprovar que na verdade o resultado obtido é a realidade do processo e não uma falha da simulação numérica.



Figura 77: Raio x

Tendo em conta que a meta deste trabalho é estudar a possibilidade do rameado ser gravado, na mesma etapa em que se dá a estampagem da forma da colher, é necessário garantir que esta ausência de contacto que há entre as ferramentas e o esboço é corrigida, caso contrário, o produto final apresentará zonas com rameado uma vez que houve contacto suficiente para isso e outras zonas em que o rameado não chega a ser gravado.

Esta nova simulação está facilitada no que diz respeito à definição do problema e caracterização dos materiais, uma vez que esta informação não será alterada da simulação anterior. O que será necessário corrigir são as geometrias das ferramentas e o curso máximo que estas necessitarão de percorrer. Posto isto, todos os ficheiros anunciados e demonstrados para a simulação anterior, permanecerão intactos, à exceção dos DD3_tool e do DD3_phase. O esboço permaneceu geometricamente igual, no entanto, para se ter resultados mais precisos, sofreu de um refinamento de malha.

Como o ficheiro DD3_tool possui as coordenadas de cada nó da ferramenta, as alterações consistiram em copiar essas coordenadas para o Excel, efetuar as correções necessárias, ou seja, deslocar esses nós de acordo com a forma final que se desejava obter na concha, copiar novamente as novas coordenadas para o ficheiro e correr a simulação. Como é de prever, até que se acertasse com a correção ideal, levou algum tempo e algumas tentativas-erro. Esta é a grande vantagem da simulação: fazer, corrigir e refazer, as vezes que forem necessárias sem que isso implique custos de fabricação de ferramentas, custos de reparações de ferramentas e tempo útil de produtividade retirado a funcionários.

De seguida, serão apresentadas as imagens de cada uma das tentativas, destacando que em cada uma delas, há um aumento gradual da área de contacto existente entre as ferramentas e o esboço, resultado das correções geométricas e do deslocamento da DD3_tool1.

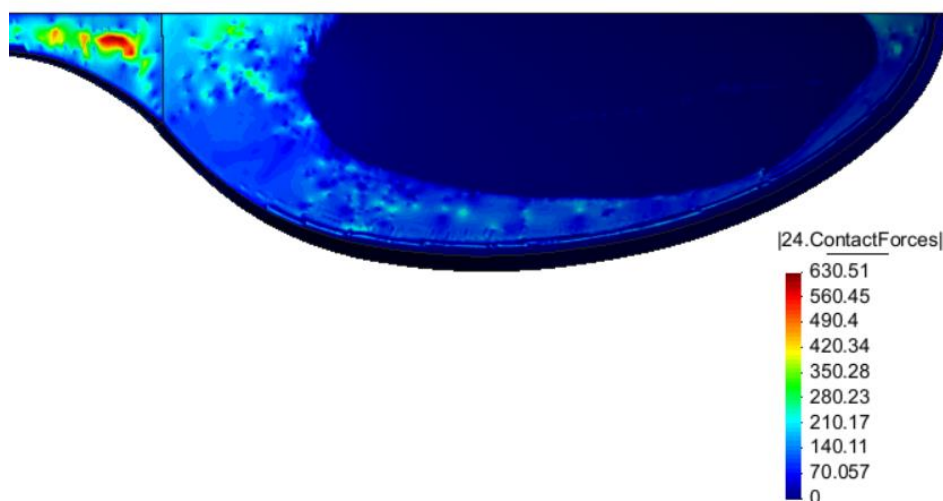


Figura 78: Alteração 1 da geometria das ferramentas

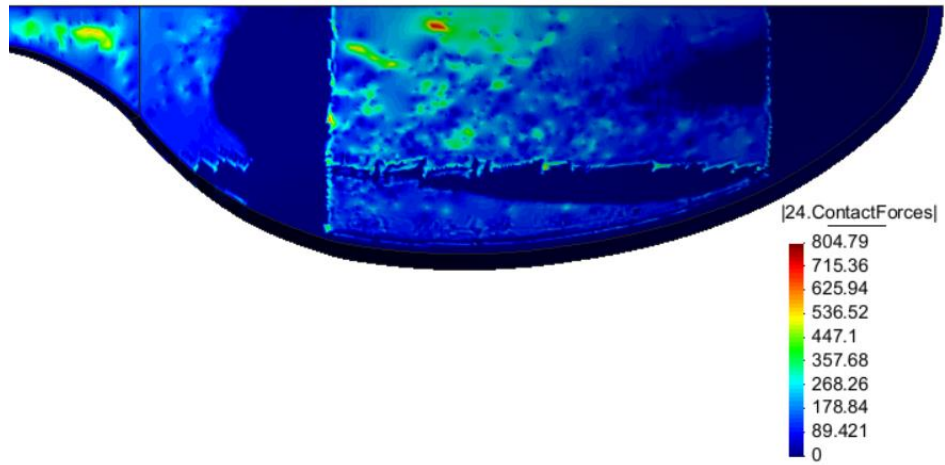


Figura 79: Alteração 2 da geometria das ferramentas

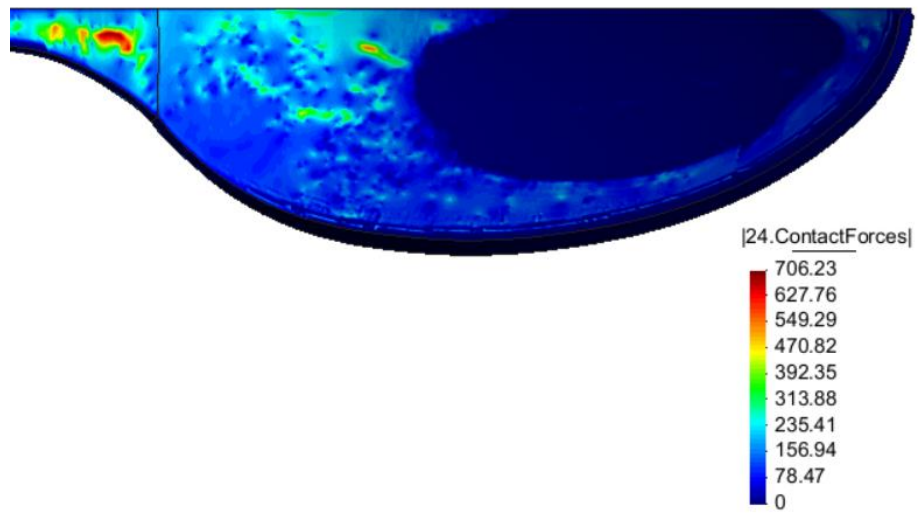


Figura 80: Alteração 3 da geometria das ferramentas

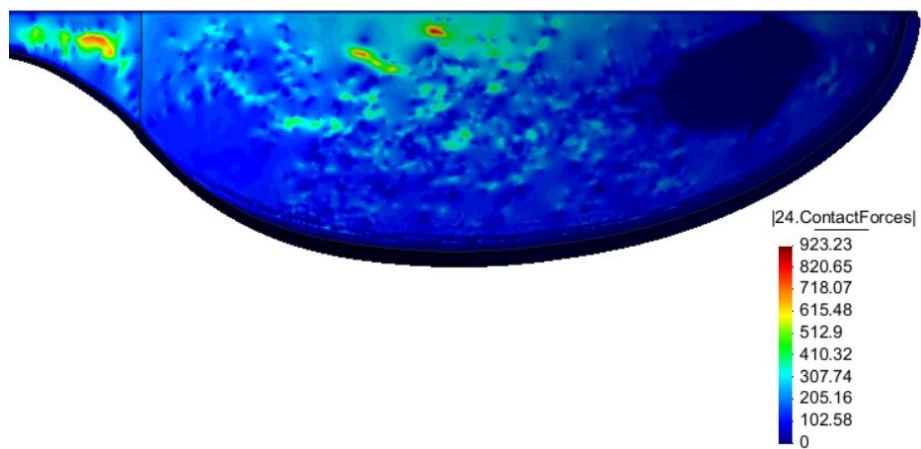


Figura 81: Alteração 4 da geometria das ferramentas

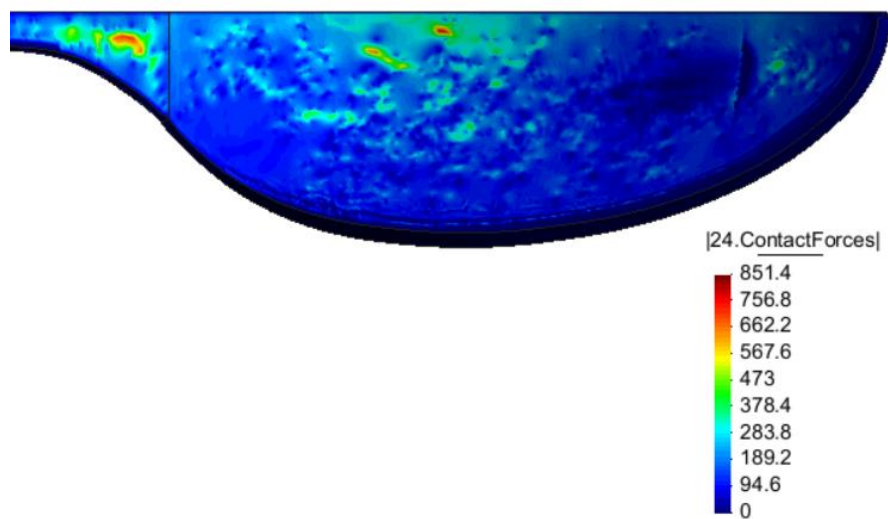


Figura 82: Alteração 5 da geometria das ferramentas

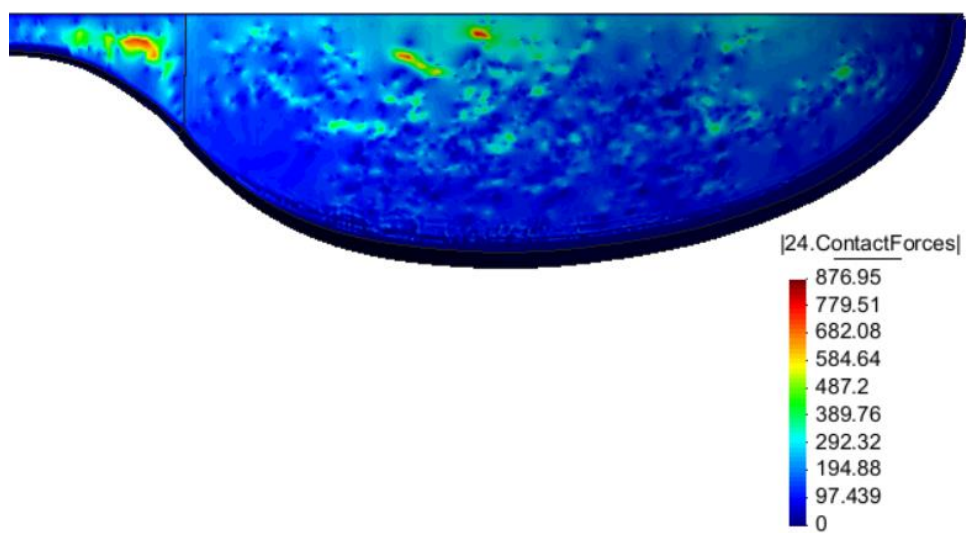


Figura 83: Alteração 6 da geometria das ferramentas

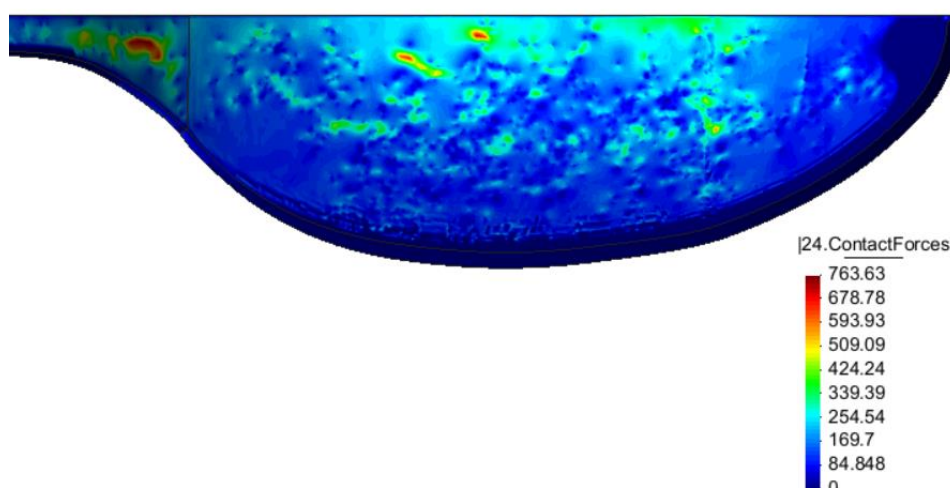


Figura 84: Alteração 7 da geometria das ferramentas

Apesar de ser uma análise pouco precisa em termos de forças, este parâmetro é suficiente para garantir que na zona da chapa que se requer contacto com as ferramentas, efetivamente o contacto existe.

4.2.3. MICROANÁLISE DA PENETRAÇÃO DO RAMEADO

Como já foi possível observar na Figura 24, as ferramentas que gravam o rameado nas superfícies da chapa, conseguem-no com recurso ao relevo existente nas mesmas, que penetra a chapa e acaba por deixar cravado o desenho da superfície. Esse relevo apresenta variadas formas, variadas espessuras e uma altura indefinida, uma vez que são valores compreendidos na décima do milímetro e de difícil leitura, nem a empresa conseguiu precisar este valor.

Do ponto de vista numérico, realizar simulações do rameado a uma escala macro, não é a melhor abordagem do problema, dado que se trata de uma simulação de elevada precisão, com grande detalhe, grande refinamento e não é um computador banal que consegue desempenhar este trabalho.

Para contornar esta situação e seguir com a resolução deste problema, é necessário realizar dois estudos diferentes, em que o primeiro consiste em realizar uma microanálise da penetração do rameado.

A primeira fase deste estudo consiste em definir e desenhar um relevo que retrate os da ferramenta, com a altura arbitrada e uma espessura que represente aproximadamente a média das espessuras e simular a sua penetração total na chapa do material 1 e do 2. Na figura

que se segue, exibe-se o rameado com as cotas mais importantes, 0.1 mm de altura, e 0.5mm de largura. O comprimento não é aqui ilustrado, uma vez que esta será uma simulação em EPD, independente do eixo y, de forma a reduzir ainda mais a exigência computacional e tempos de cálculo da simulação.

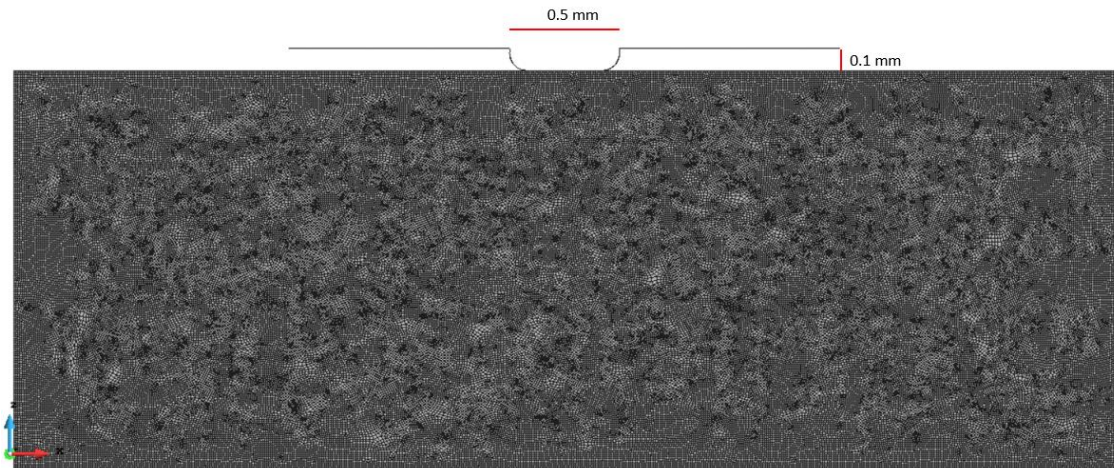


Figura 85: Ilustração da chapa e do rameado na fase inicial

De seguida, foram escolhidos 3 nós da chapa. Estes nós, são os nós que vão facultar toda a informação relativamente à penetração do rameado na chapa, como a força aplicada, se o nó está fixo à ferramenta ou se está em escorregamento, a quantificação desse escorregamento e a área que esse nó está a representar. Posto isto, é importante que estes estejam colocados em pontos estratégicos, como um no centro (A), à esquerda (B) e à direita (C), para que no final da simulação se possam obter valores de diferentes zonas e compará-los.

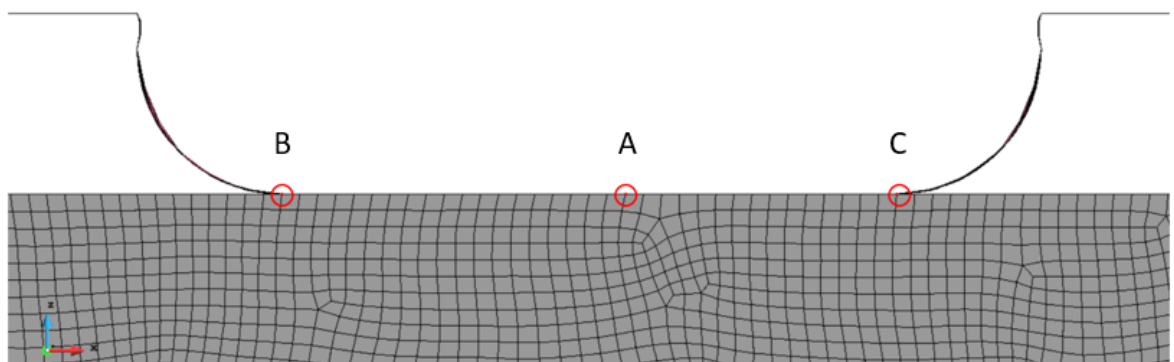


Figura 86: Demonstração dos nós escolhidos

As informações mais importantes para esta simulação é a área correspondente ao nó e a força que este regista ao longo da penetração dos 0.1 mm. Assim, é possível obter uma

relação da pressão em função da penetração, tanto para o material 1 como para o 2, que vai ser importante para definir quais os valores críticos de pressão que podem existir ao longo da estampagem da colher.

Nas figuras seguintes estão demonstrados os gráficos da pressão em função do deslocamento de cada nó para cada material.

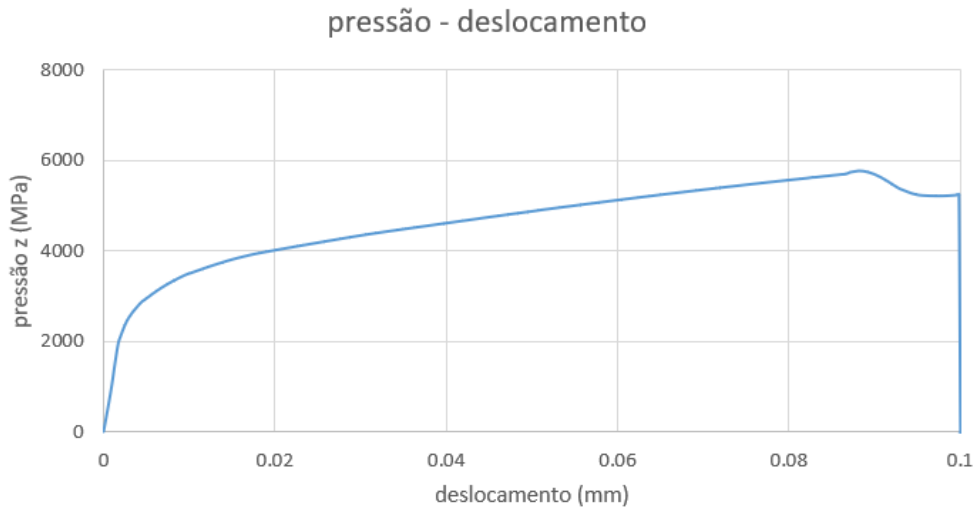


Figura 87: Gráfico de pressão-deslocamento do nó A para o mater1

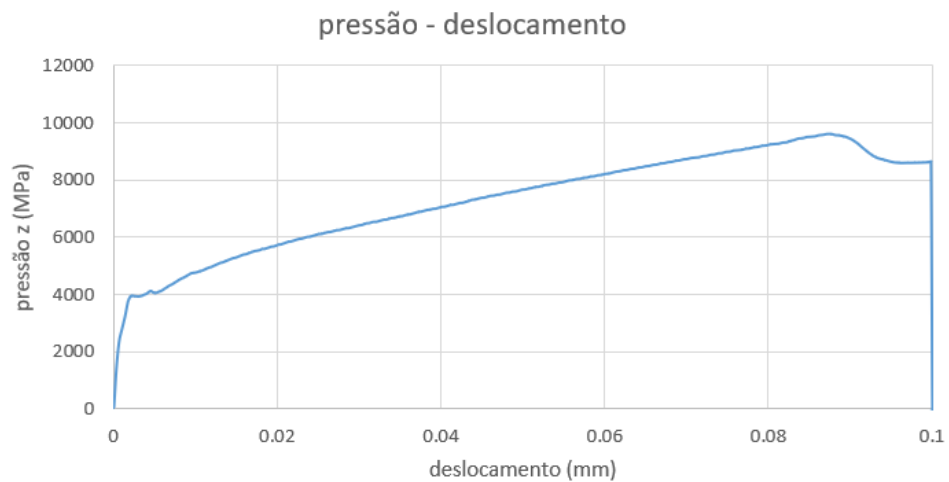


Figura 88: Gráfico pressão-deslocamento do nó B para o mater1

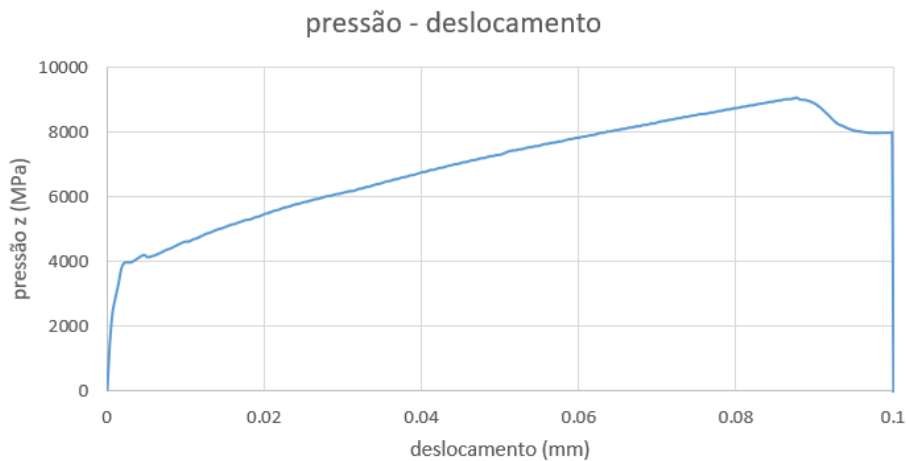


Figura 89: Gráfico pressão-deslocamento do nó C para o mater1

Após a observação destes gráficos, é importante evidenciar alguns fenómenos presentes nos mesmos. Relativamente aos nós das laterais, B e C, é perceptível uma semelhança entre os dois e que a resistência ao escoamento do material 1 é maior até uma penetração aproximada de 0.005mm, que corresponde a 4000 MPa, depois o declive desce e mantém-se constante até os 0.9 mm. Por outro lado, no nó central os valores de pressão para a mesma penetração são inferiores aos registados nas laterais, onde os 4000 MPa, correspondem a uma penetração de 0.02mm.

A razão pela qual os valores em 0.9 mm apresentarem uma descida acentuada, deve-se ao facto do material escoar para junto da ferramenta à medida que a penetração decorre e assim que esta já se encontra a 0.9mm de profundidade, as suas laterais também contactam com o material e isso diminui pressão nas zonas dos nós, é possível ver a imagem no Anexo B.

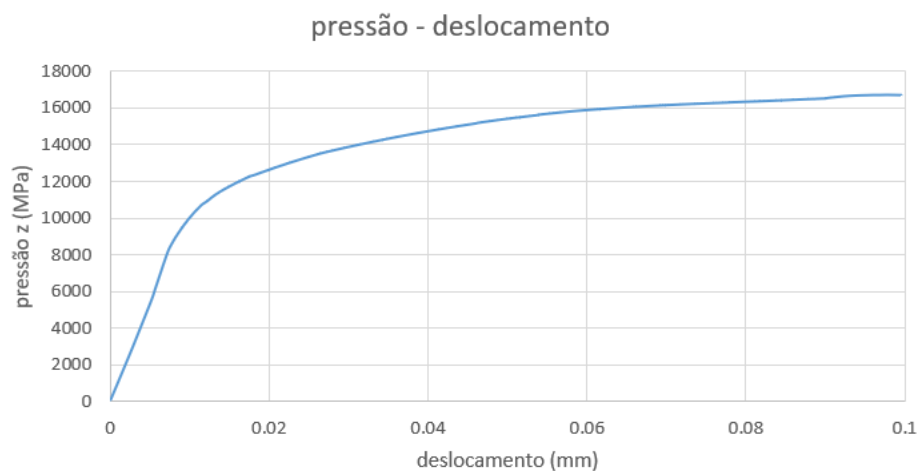


Figura 90: Gráfico pressão-deslocamento do nó A para o mater2

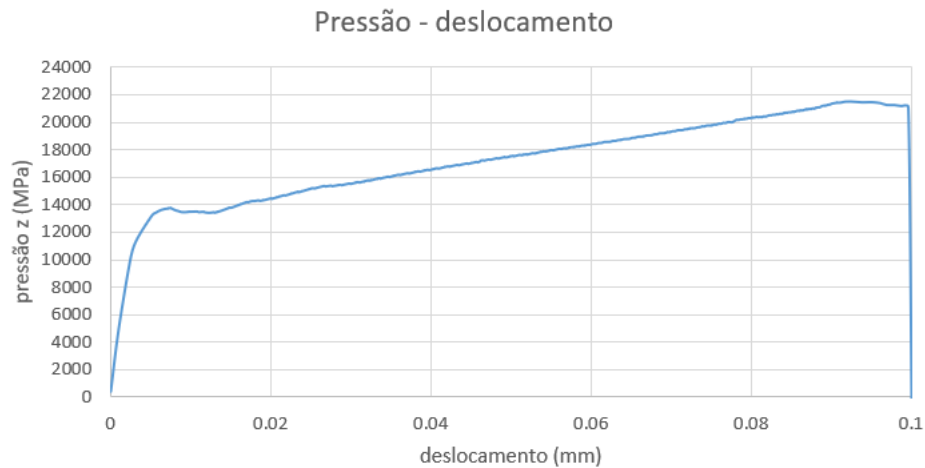


Figura 91: Gráfico pressão-deslocamento do nó B para o mater2

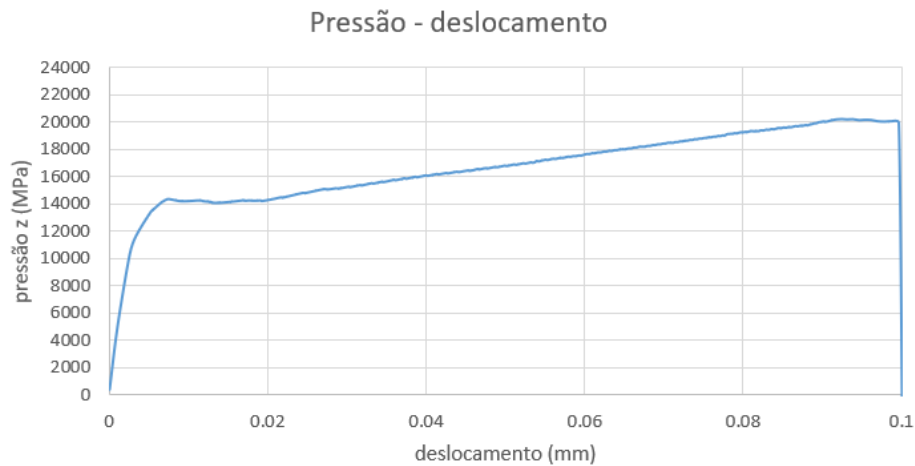


Figura 92: Gráfico pressão-deslocamento do nó C para o mater2

Observando agora os resultados obtidos no material 2, percebe-se rapidamente que estamos na presença de um material muito mais duro. Desta vez, a maior resistência ao escoamento nos nós laterais é sentida perto dos 0.006 mm com 14000 MPa de pressão correspondente, enquanto que na zona central, a penetração de 0.02mm equivale a 13000 MPa.

Depois da ilustração de todos os gráficos, dá-se por terminada a primeira fase deste estudo, dado que os seus resultados serão comentados mais detalhadamente no próximo capítulo.

A segunda fase, tem a mesma base que a primeira, ou seja, escolher os nós a analisar, correr a simulação e tratar os dados obtidos. No entanto, a diferença é que esta segunda fase

se destina à estampagem da colher, logo, os nós escolhidos terão que estar situados ao longo da chapa nas zonas onde o rameado será gravado.

Quando se simula a penetração do rameado, a superfície da chapa é perpendicular à direção do movimento de penetração, ou seja, a força de penetração está alinhada com normal à superfície, imagem à esquerda da Figura 93. Por outro lado, na estampagem da colher isto já não se verifica, dada a geometria da colher não é possível ter todas as superfícies na mesma direção do movimento das ferramentas. Posto isto, é necessário decompor a força de forma a que se obtenha uma componente alinhada com a normal da superfície e uma outra tangencial à mesma.



Figura 93: Demonstração das posições da força em relação à normal da chapa na simulação do rameado e da colher, respetivamente

A componente da força normal ao plano é importante na medida em que é essa força que se deve comparar com os valores obtidos pela simulação da penetração do rameado. Assim, a componente normal calcula-se projetando a força resultante, $\vec{F}$, na direção da normal. (Dimitrovová, 2016).

$$Fn = \{F\}^T \times \{n\}; \quad (4.3)$$

$$Fn = [(n_x \times F_x) + (n_y \times F_y) + (n_z \times F_z)]; \quad (4.4)$$

F representa o vetor da força de contacto e n o vetor normal ao plano da chapa. Estes dados, a área associada ao nó, o estado em que o nó se encontra e o seu escorregamento, é tudo informação que está disponível para cada nó escolhido no final da simulação. Assim, após se calcular Fn , calcula-se a pressão a que esse nó está sujeito ao longo da estampagem e compara-se esse valor com os valores obtidos na simulação do rameado. Desta forma, é possível perceber se os valores de pressão registada na colher são suficientes para permitir a penetração no material e, para os casos em que essa pressão é ultrapassada, quanto

escorregamento é que se gera a partir desse momento. O escorregamento será quantificado como soma das normas dos valores de Slip existentes para valores de pressão que se considerem críticos.

$$e = \sum \sqrt{Slip_x^2 + Slip_y^2 + Slip_z^2}; \quad (4.5)$$

5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.1. PENETRAÇÃO DO RAMEADO

Anteriormente foram exibidos e discutidos os resultados referentes aos gráficos relativos à penetração do rameado, no entanto, agora é necessário definir os valores críticos e relacionar com os resultados obtidos da estampagem da colher.

Numa primeira análise, há que referir que tanto para o material 1 como para o material 2, os nós centrais são os que apresentam menores valores de pressão de penetração em comparação com os das extremidades. Na minha opinião, esta tendência deve-se ao facto de existir uma ligeira flexão do material na zona central, como se demonstra na Figura 94. Claro que esta é uma representação exagerada, até porque a zona central nunca deixa de estar em contacto com a ferramenta, porém, a pressão exercida é inferior.

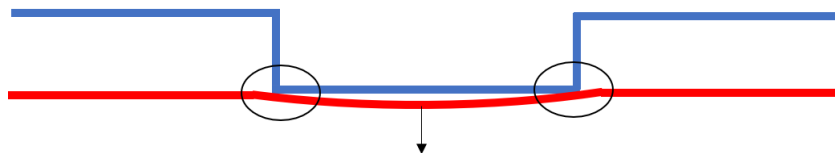


Figura 94: Demonstração da flexão existente

Apesar de achar que os valores das extremidades representam as verdadeiras pressões necessárias à existência da penetração, por uma questão de segurança e prevenção, serão utilizados os valores do centro como referência para descobrir os valores críticos

Ao longo da conformação da colher, é provável que haja momentos em que a chapa escorrega sobre a ferramenta a uma pressão suficientemente elevada para a marcar, no entanto, se for uma penetração de valores muito reduzidos, quase invisíveis a olho nu, pode-se desconsiderar. Assim sendo, dado que a penetração é de 0,1 mm, foi definido que só a partir de uma penetração de 0,02mm (20%), é que se considerava valores de risco.

Nas próximas figuras, é possível verificar que a pressão correspondente ao valor limite de penetração, para os nós centrais do material 1 é 4000 MPa e do material 2 é 13000 MPa

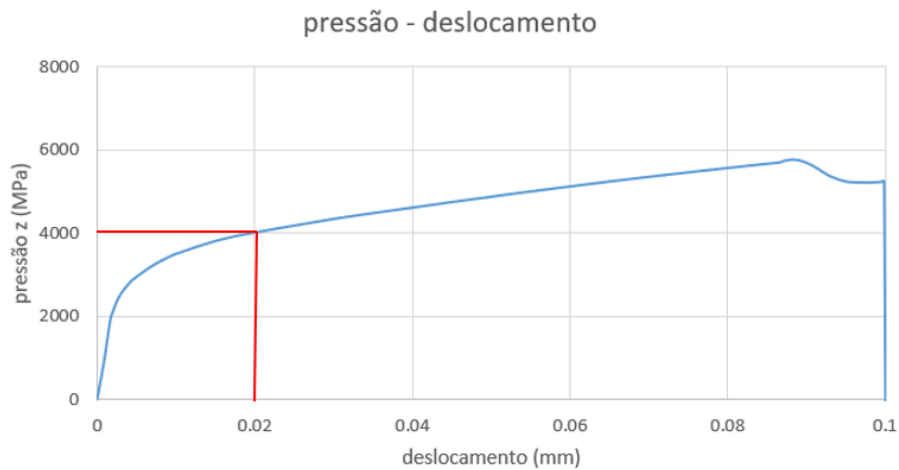


Figura 95: Pressão limite para o material 1

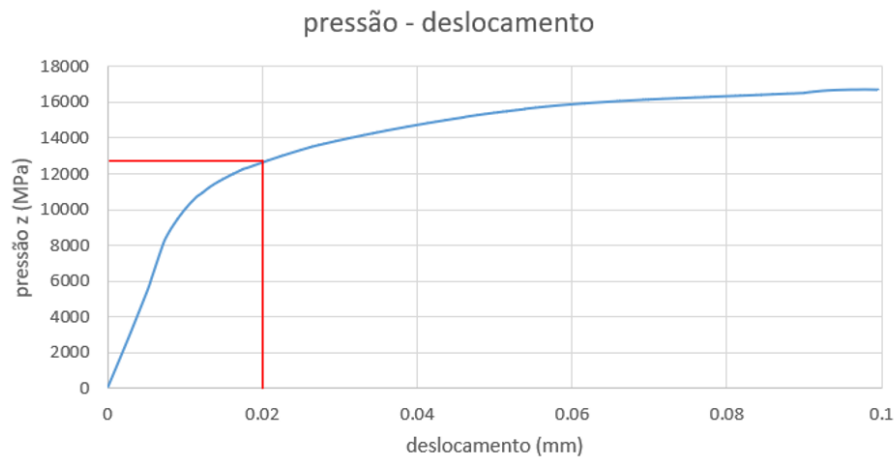


Figura 96: Pressão limite para o material 2

Agora que já são conhecidos os valores de pressão limite, resta saber qual a liberdade admissível para um nó escorregar na ferramenta sobre condições de pressão superiores à limite. Desta vez, o termo de comparação para obter o valor limite de escorregamento será a largura do rameado. Dado que, de uma forma generalizada, a média das larguras é compreendida entre os 0,5mm, o limite será haver um escorregamento de 0,1mm (20%)

Posto isto, para cada simulação, é necessário analisar todos os nós escolhidos na colher, efetuar os cálculos anteriormente mencionados e avaliar se os resultados estão ou não de acordo com o pretendido, no caso de não estar, ajusta-se as ferramentas e repete-se o processo até se conseguir obter a melhor simulação.

5.2. SUPERFÍCIE SUPERIOR DA COLHER

Para se obter o histórico da estampagem nas zonas onde será cunhado o rameado, foram escolhidos 41 nós da superfície superior da colher e 37 da superfície inferior. As informações que se obtém no ficheiro de cada nó são copiadas e tratadas de forma a que fique disponível apenas o conteúdo necessário, representadas a verde claro, e acrescenta-se os cálculos já anteriormente mencionados, a verde escuro.

Tendo em conta a quantidade de nós que temos presente neste estudo, será realizado o procedimento de análise do nó 46817, nó localizado em zona de material 2, que serve como demonstração do trabalho realizado em todos os outros nós.

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
iC	iPH	NST	Time	Node	Status	slipX	slipY	slipZ	Normal VecX	Normal VecY	Normal VecZ	Contact_ Area	Contact_ Force_x	Contact_ Force_y	Contact_ Force_z	Fn	Fn/A	e	Σe
1	1	1	0.042	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01192	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	2	0.252	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01192	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	3	0.692	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01192	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	4	1.13	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01192	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	5	1.174	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01192	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	6	1.216	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01192	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	7	2.047	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01192	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	8	2.484	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01192	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	9	2.922	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01192	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	10	3.183	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01191	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	11	3.449	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01191	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	12	3.726	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01191	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	13	3.971	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01191	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	14	4.417	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01191	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	15	4.567	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01191	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	16	4.708	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01191	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	17	4.843	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.0119	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	18	4.973	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.0119	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	19	5.102	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.0119	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	20	5.228	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.0119	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	21	5.349	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.0119	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	22	5.464	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.0119	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	23	5.585	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.0119	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	24	5.704	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.0119	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		
1	1	25	5.821	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.0119	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!		

Figura 97- Demonstração da organização das variáveis para estudo do nó 46817

Os dados que estão visíveis na figura a cima, correspondem ao momento que a ferramenta ainda não entrou em contacto com o nó (GAP) e daí os cálculos não apresentarem nenhum resultado numérico. Na figura que se segue, tem-se os resultados do mesmo nó, porém no momento de contacto.

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	2	250	22.23	46817	SLIP	-1.26E-04	2.50E-04	-1.85E-04	0.54826	-0.301	-0.7803	0.01126	-27.53	18.66232	32.0328	-45.705	-4059.059		
1	2	251	22.23	46817	SLIP	1.29E-05	2.97E-04	-1.06E-04	0.54826	-0.301	-0.7803	0.01126	-27.6567	22.29883	37.3859	-51.0458	-4533.371		
1	2	252	22.23	46817	SLIP	-3.46E-04	5.34E-04	-4.49E-04	0.54826	-0.301	-0.7803	0.01126	-50.7841	33.13165	57.7959	-82.9112	-7363.341		
1	2	253	22.23	46817	SLIP	-3.29E-03	-8.67E-03	1.03E-03	0.54831	-0.301	-0.7803	0.01124	-54.2583	14.95989	69.8562	-88.7607	-7896.857		
1	2	254	22.23	46817	SLIP	-1.25E-04	-9.47E-04	2.77E-04	0.5483	-0.301	-0.7803	0.01125	-47.5814	13.92856	70.4136	-85.224	-7575.462		
1	2	255	22.24	46817	SLIP	-3.11E-05	-4.79E-05	-3.42E-06	0.5483	-0.301	-0.7803	0.01125	-62.5711	18.54594	93.0893	-112.526	-10002.31		
1	2	256	22.25	46817	SLIP	-6.44E-04	-4.30E-05	-4.36E-04	0.5483	-0.301	-0.7803	0.01123	-111.764	49.2996	117.132	-167.509	-14916.2	1.68E-04	
1	2	257	22.26	46817	STICK	0	0	0	0.5483	-0.301	-0.7803	0.01123	-114.481	50.39646	139.909	-187.102	-16660.9		
1	2	258	22.28	46817	STICK	0	0	0	0.5483	-0.301	-0.7803	0.01123	-118.219	63.42654	154.272	-204.278	-18190.35		
1	2	259	22.28	46817	STICK	0	0	0	0.5483	-0.301	-0.7803	0.01123	-118.087	64.70617	157.382	-207.017	-18434.28		
1	2	260	22.28	46817	STICK	0	0	0	0.5483	-0.301	-0.7803	0.01123	-118.691	66.00521	157.23	-207.621	-18488.04		
1	2	261	22.28	46817	STICK	0	0	0	0.5483	-0.301	-0.7803	0.01124	-103.807	58.55014	178.149	-213.542	-18998.39		
1	2	262	22.3	46817	SLIP	1.29E-04	-2.95E-05	1.02E-04	0.5483	-0.301	-0.7803	0.01124	-119.666	62.51845	228.846	-262.992	-23397.88	1.68E-04	
1	2	263	22.31	46817	SLIP	4.88E-04	-6.06E-04	5.77E-04	0.5483	-0.301	-0.7803	0.0113	-142.974	65.92785	263.773	-304.051	-26907.18	9.69E-04	
1	2	264	22.32	46817	SLIP	2.88E-03	-3.34E-03	3.31E-03	0.54828	-0.301	-0.7803	0.0114	-141.023	57.61902	250.995	-290.506	-25483.02	5.51E-03	
1	2	265	22.32	46817	SLIP	3.67E-03	-4.92E-03	4.48E-03	0.54826	-0.301	-0.7802	0.01144	-126.062	48.98374	221.772	-256.895	-22455.87	7.60E-03	
1	2	266	22.32	46817	SLIP	1.67E-03	-2.30E-03	2.06E-03	0.54824	-0.301	-0.7802	0.01144	-101.514	53.80246	198.192	-226.487	-19797.86	3.51E-03	
1	2	267	22.32	46817	SLIP	1.06E-03	-1.09E-03	1.17E-03	0.54824	-0.301	-0.7802	0.01145	-113.259	40.40433	198.414	-229.063	-20005.49	1.92E-03	
1	2	268	22.33	46817	SLIP	1.01E-03	-1.23E-03	1.19E-03	0.54823	-0.301	-0.7802	0.01147	-115.596	55.56304	217.438	-249.751	-21774.3	1.99E-03	
1	2	269	22.34	46817	SLIP	5.75E-04	-6.65E-04	6.61E-04	0.54823	-0.301	-0.7801	0.01148	-152.805	63.46779	272.664	-315.617	-27492.74	1.10E-03	
1	2	270	22.36	46817	SLIP	3.54E-03	-4.05E-03	4.06E-03	0.54821	-0.302	-0.7801	0.01155	-171.621	56.32889	293.892	-340.332	-29465.95	6.74E-03	
1	2	271	22.36	46817	SLIP	5.53E-03	-7.21E-03	6.68E-03	0.54818	-0.302	-0.78	0.0116	-152.772	74.45318	289.336	-331.9	-28612.08	1.13E-02	
1	2	272	22.37	46817	SLIP	8.66E-03	-1.15E-02	1.05E-02	0.54812	-0.302	-0.7798	0.01167	-137.344	61.70011	250.65	-289.402	-24798.83	1.78E-02	
1	3	273	22.37	46817	GAP	-	-	-	-	-	-	0.01174	0	0	0	#VALOR!	#VALOR!	5.86E-02	
1	3	274	22.37	46817	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	110.217	#VALOR!	#VALOR!		

Figura 98- Informações do nó 46817 em contacto

Na Figura 98, os valores que estão com sombreado colorido, são os que estão a cima do valor limite de pressão, no entanto, o que distingue a cor vermelha da castanha é que a vermelha corresponde a um nó em escorregamento e a castanha a um nó fixo. Como é possível verificar nas colunas H, I e J, para os estados de STICK o escorregamento é 0, no entanto, quando se está na presença de SLIP, o escorregamento existe e deve ser quantificado. Assim que todo o escorregamento estiver calculado, deve-se somar todos os que se encontrem sem interrupções, de forma a se saber o seu escorregamento total.

O escorregamento total para este nó é de 0,058, inferior ao valor crítico estipulado, logo, a zona deste nó encontra-se validada. Na Figura 99 é possível ver a localização de cada nó e na Tabela 7 o escorregamento total de cada um deles.

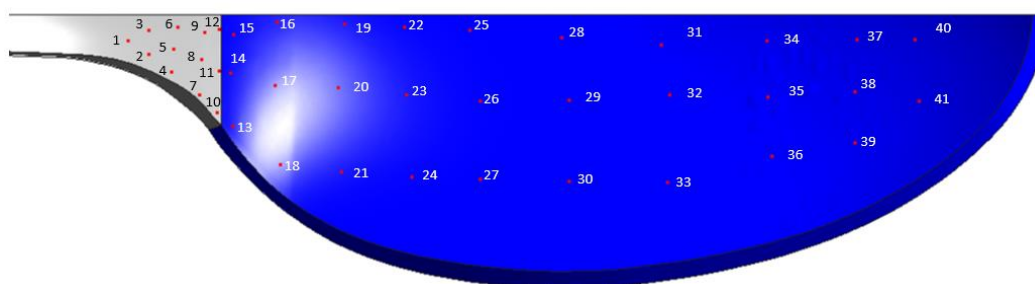


Figura 99- Localização dos nós da superfície superior

Tabela 7- Resultado de todos os nós da superfície superior

Nº	Nó	Σe	Validação	Nº	Nó	Σe	Validação	Nº	Nó	Σe	Validação
1	28154	0.051		15	28743	0.043		29	36940	0	
2	28212	-		16	29410	0.021		30	37305	0.019	
3	28219	0.104		17	29429	0.055		31	39528	0	
4	28297	0.057		18	29629	-		32	39868	0	
5	28303	0.188		19	30802	0		33	40270	0.045	
6	28323	0.107		20	30703	0		34	42815	0	
7	28441	0.011		21	31001	-		35	42983	0	
8	28452	0.185		22	32212	0		36	43383	0.011	
9	28464	0.088		23	32334	0		37	45176	0.003	
10	28591	0.135		24	32769	0.034		38	45263	0	
11	28586	0.133		25	33976	0		39	45538	0.068	
12	28570	0.055		26	34350	0		40	46574	0	
13	28782	-		27	34633	0.018		41	46817	0.059	
14	28724	-		28	36594	0					

A tabela 7 demonstra por cores, a qualidade com que o rameado será gravado, onde o verde significa que o nó apresenta um valor de escorregamento inferior ao valor crítico, ou seja, nesta zona o rameado será gravado perfeitamente. A amarelo e a vermelho tem-se as zonas em que o escorregamento ultrapassou o valor crítico, sendo que a amarelo de forma ligeira e a vermelho de uma forma mais acentuada, e significa que provavelmente haverá alguma imperfeição na gravação. O azul representa que o nó não chegou a obter esse valor limite, ainda que por pouco, porém, há uma forte probabilidade de não haver pressão suficiente para gravar essa zona.

Realizando agora uma análise por zonas, já desde início que se esperava que a zona de transição fosse a mais problemática pela sua inclinação e por estar muito perto da zona de divisão de materiais. As primeiras simulações, nessa zona, apresentavam valores de escorregamento compreendidos entre os 0.4 mm e os 0.6 mm, muito longe da meta pretendida, no entanto, com as alterações efetuadas nas ferramentas, foi possível minimizar esse problema até se obter um escorregamento máximo de 0.188 mm. Uma outra zona que poderá apresentar alguns problemas, desta vez pelas razões opostas, é a zona onde começa o material 2 dada a sua baixa pressão, no entanto, há que referir que na realidade há uma transição de propriedades mecânicas entre materiais muito menos acentuada que a aqui representada, logo, é expectável que para esta zona a pressão limite não sejam os 13000 MPa, mas sim um valor mais baixo e assim, de azul já se passava a obter verde. A zona mais lateral

correspondente aos nós 13, 18 e 21 da Figura 99, também apresenta valores de pressão baixos e que pode resultar na ausência de rameado. Por fim, as restantes zonas, que representam a maioria, apresentam bons valores de pressão e na maioria deles num estado STICK.

5.3. SUPERFÍCIE INFERIOR DA COLHER

Os resultados obtidos na superfície inferior da colher foram mais satisfatórios dado que não apresenta nenhum nó com escorregamento superior ao limite. Por outro lado, apesar do número de nós a cor azul ser apenas mais um, há outros em que o valor da pressão limite foi ultrapassada por muito pouco, como é o caso do nó 3986, 4083 e 5182, que pode não ser suficiente para gravar o rameado nitidamente. Uma vez mais, a zona mais lateral da colher é a que apresenta menores valores de pressão, sendo estes comprometedores quanto à gravação do rameado, porém, tudo o resto apresenta condições para gravar o rameado na perfeição.

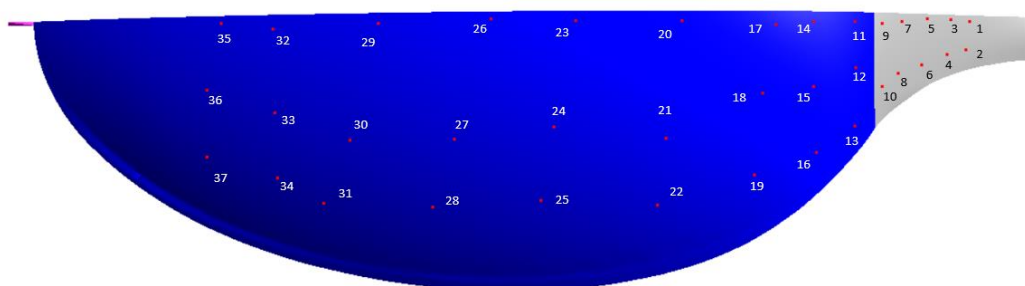


Figura 100- Localização dos nós na superfície inferior

Tabela 8- Resultado de todos os nós da superfície superior

Nº	Nó	Σe	Validação	Nº	Nó	Σe	Validação	Nº	Nó	Σe	Validação
1	3921	0.013		15	5182	0		29	16143	0	
2	3930	-		16	5207	-		30	17342	0	
3	3976	0.015		17	5794	0		31	18709	0	
4	3986	0.015		18	6083	0		32	19343	0	
5	4059	0.052		19	6432	-		33	19479	0	
6	4083	0.016		20	7787	0		34	19808	0.038	
7	4183	0.044		21	8366	0		35	20674	0	
8	4208	0.105		22	8855	-		36	21150	0	
9	4293	0.023		23	10486	0		37	21466	0.045	
10	4309	0.083		24	11304	0					
11	4584	0		25	12086	0					
12	4590	-		26	12891	0					
13	4641	-		27	14236	0					
14	5157	0.006		28	15269	0.035					

5.4. CONCLUSÃO FINAL E TRABALHOS FUTUROS

O resultado final idealizado seria obter ambas as tabelas apenas preenchidas com a cor verde, no entanto, isso não se verificou e mesmo que essa situação se verificasse, na prática, ao produzir estas mesmas ferramentas, a probabilidade de o processo ficar perfeito na primeira tentativa era baixa.

As conclusões a retirar deste estudo é que efetivamente a maioria das zonas correspondentes aos nós escolhidos estão em perfeitas condições de cunhar o rameado, no entanto, há zonas que podem comprometer essa qualidade final. Na superfície superior, a zona mais crítica é a zona do material 1, onde se gera algum escorregamento crítico. A zona que corresponde ao início do material 2 e que apresenta alguns nós a cor azul, na realidade pode não comprometer a qualidade final do rameado, uma vez que, como já foi referido, na realidade a transição das propriedades mecânicas acompanha a transição da redução de espessura, logo, nessa zona a pressão mínima para haver penetração deve ser inferior aos 13000 MPa. Isto aplica-se igualmente à superfície inferior, que além desses nós azuis na zona de início do material 2, a gravação apresenta ser perfeita.

Desta forma, relativamente aos resultados obtidos para este caso de estudo, considero que esta geometria de ferramenta está capaz de realizar a conformação do modelo Santamarta em uma única etapa, no entanto, com a consciência de que a primeira colher conformada não fique perfeita, até porque a complexidade do problema é elevada e há sempre variáveis que se alteram da simulação para a realidade, mas a distância até se obter essa perfeição é muito mais curta do que no caso de usar o método de tentativa-erro.

Em relação ao potencial da utilização das ferramentas CAE no processo produtivo, foi evidente que estas são uma mais valia no desenvolvimento do processo produtivo, auxiliando de uma forma rápida e viável na validação da geometria das ferramentas e do processo em si, promovendo rápidas alterações e com isso aumentando a velocidade e eficiência da industrialização da empresa.

De salientar que para chegar até estes resultados e a este nível de desenvolvimento das ferramentas, foram precisas 23 alterações sem custos de fabricação associados, enquanto que para fabricar um único par de ferramentas como estas, segundo o diretor de produção da empresa, são precisos 10 mil euros.

Posto isto, a minha opinião é de que este trabalho é uma boa demonstração das vantagens que há em utilizar ferramentas CAE no processo produtivo, uma vez que, em vez de fazerem e refazerem ferramentas ao longo de um ano, mensagem que me foi passada no momento de explicação do tema, se iniciarem o processo de fabricação da ferramenta a partir deste ponto, provavelmente consigam reduzir em larga escala o tempo necessário para terem a ferramenta pronta e também economizar alguns milhares de euros.

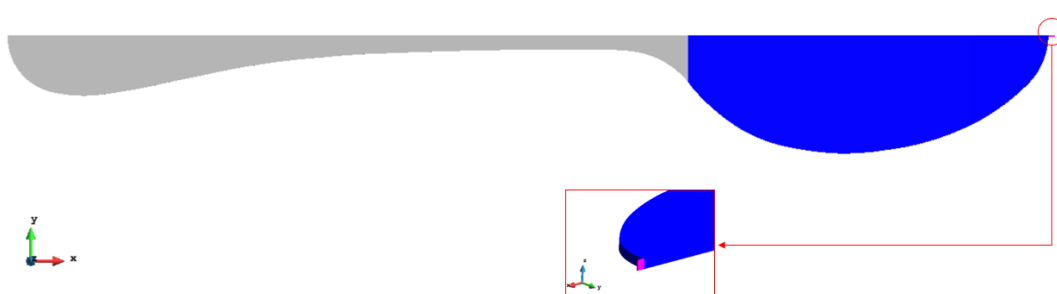


Figura 101: Colher final

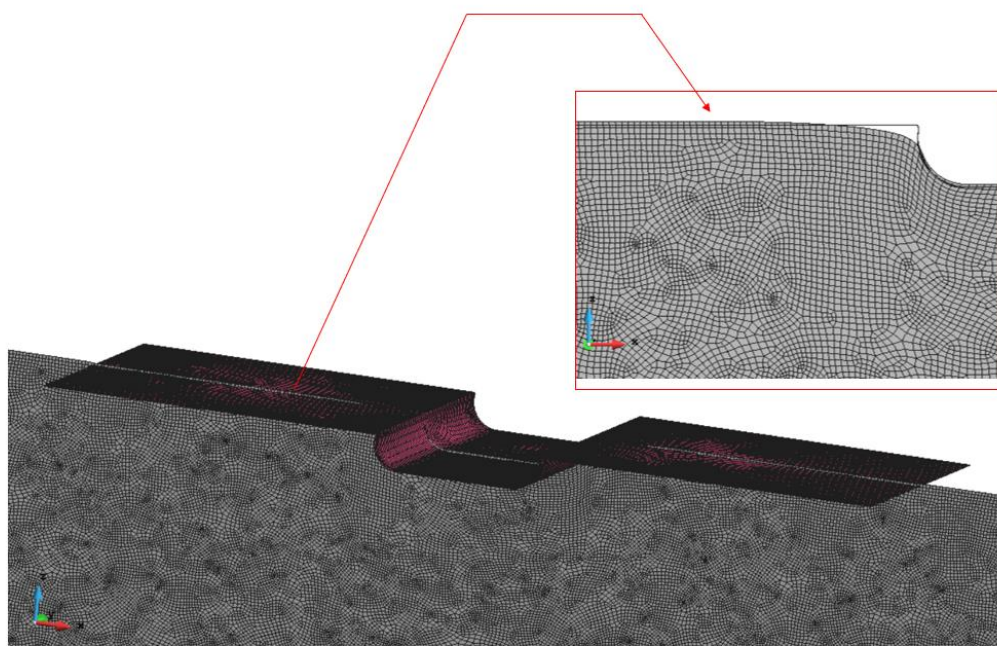
Os trabalhos futuros a se realizar neste caso de estudo será repetição do processo, no entanto com as dimensões reais da chapa, ou seja, 3 mm de espessura inicial e ajustar a ferramenta à mesma. Após esta alteração, na minha opinião, a ferramenta está pronta para ser fabricada e aí haverá mais trabalho a ser realizado, uma vez que esta vai precisar de ser ajustada e melhorada.

ANEXOS

ANEXO A: IMAGEM DO MATER 3



ANEXO B: IMAGEM DA FERRAMENTA EM CONTACTO COM O MATERIAL



BIBLIOGRAFIA

- Alves, J. L. de C. M. (2003). *Simulação Numérica do Processo de Estampagem de Chapas Metálicas - Modelação Mecânica e Métodos Numéricos*.
- Bhadeshia, H., & Honeycombe, R. (2006). *Steels Microstructure and Properties*.
- Boff, Ravanini, & Schaeffe. (n.d.). *ANÁLISE DA CONFORMABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 E*.
- Branco, C. (2011). *Mecânica dos Materiais*.
- Bresciani Filho, E., Da Silva, I. B., Batalha, G. F., & Button, S. T. (2011). Conformação Plástica dos Metais. In *Metalurgia Mecânica*.
- Bruno, C. (2007). *Descrição do Comportamento Plástico*. Faculdade de Ciencias e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Carbó, H. (2008). *Aços Inoxidáveis : aplicações e especificações*.
- Chiaverini, V. (1977). *Aços e ferros fundidos*.
http://www.academia.edu/download/46812222/Resumo_-_Chiaverini.pdf
- Davis, J. (1994). *ASM, Specialty Handbook Stainless Steels*.
- Dimitrovová, Z. (2016). *Sebenta da disciplina MMC*.
- Habraken, A. M. (2004). Modelling the plastic anisotropy of metals. *Archives of Computational Methods in Engineering*. <https://doi.org/10.1007/BF02736210>
- herdmar. (n.d.). Retrieved March 16, 2022, from <https://www.herdmar.com/pt/pt/>
- Junior, J. M. G. (2016). *Transformação Martensítica induzida por deformação em aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316 deformados por diferentes processos*.
- Khatak, H. S., & Raj, B. (2002). Corrosion of Austenitic Stainless Steels. In *Corrosion of Austenitic Stainless Steels*. <https://doi.org/10.1533/9780857094018>
- Korb, L., & ASM. (1980). ASM Metals Handbook: Volume 13. In *ASM International* (Vol. 13).
- Li, Y., Martín, D. S., Wang, J., Wang, C., & Xu, W. (2021). A review of the thermal stability of metastable austenite in steels: Martensite formation. *Journal of Materials Science and Technology*, 91, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.03.020>
- MANGONON, P., & THOMAS G. (1970). Martensite Phases in 304 Stainless Steel. *Met Trans*, 1(6), 1577–1586. <https://doi.org/10.1007/bf02642003>
- matweb. (n.d.). <https://www.matweb.com/>

- Metals, A. (2018). Tabela de comparação de dureza. *Tabela de Conversão*, 2, 1.
- Milad, M., Zreiba, N., Elhalouani, F., & Baradai, C. (2008). The effect of cold work on structure and properties of AISI 304 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 203(1–3), 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.080>
- Nagy, E., Mertinger, V., Tranta, F., & Sólyom, J. (2004). Deformation induced martensitic transformation in stainless steels. *Materials Science and Engineering A*, 378(1-2 SPEC. ISS.), 308–313. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.11.074>
- Outokumpu. (2013). *Handbook of Stainless Steel*. <http://www.outokumpu.com/sitecollectiondocuments/outokumpu-stainless-steel-handbook.pdf>
- Pramanik, A., & Basak, A. (2015). *Stainless steel microstructure, mechanical properties and methods of application*.
- Processo de passivação*. (n.d.). https://www.walter.com/pt_BR/surfox/processo-de-passivacao
- Souto, N. M. (2011). *Caracterização do Comportamento Mecânico de Aços de Alto Desempenho*.
- Tekkaya, A. E. (2000). State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00413-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00413-1)
- Velho, T. (2020). *Estampabilidade de aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos*.