

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

VINÍCIUS EDUARDO CASTILHOS

**PROJETO DO FERRAMENTAL PARA O EMBUTIMENTO PROFUNDO EM
MÚLTIPLOS ESTÁGIOS DE UM BALDE CÔNICO**

CAXIAS DO SUL

2023

VINÍCIUS EDUARDO CASTILHOS

**PROJETO DO FERRAMENTAL PARA O EMBUTIMENTO PROFUNDO EM
MÚLTIPLOS ESTÁGIOS DE UM BALDE CÔNICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para a conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos de fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels

CAXIAS DO SUL

2023

VINÍCIUS EDUARDO CASTILHOS

**PROJETO DO FERRAMENTAL PARA O EMBUTIMENTO PROFUNDO EM
MÚLTIPLOS ESTÁGIOS DE UM BALDE CÔNICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para a conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos de fabricação.

Aprovado em 26/06/2023

Banca examinadora

Prof. Dr. Eng. Alexandre Fassini Michels

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Eng. Alexandre Vieceli

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier

Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Dentro dos processos de embutimento profundo, a conformação de peças cônicas a partir de chapas metálicas, devido à complexidade do processo, é frequentemente realizada por tentativa e erro, o que resulta em retrabalhos e custos. Uma maneira de reduzir esses inconvenientes é através da simulação prévia do processo, utilizando um software que possa analisar as não linearidades presentes no processo como: contato entre superfícies, plasticidade e grandes deslocamentos. Neste trabalho foi realizado um estudo de simulação, via MEF, do processo de fabricação de um componente cônico, o balde para garrafas, por meio do embutimento profundo. O objetivo foi desenvolver um novo projeto do ferramental que minimizasse as perdas durante a fabricação. A simulação foi executada a partir das informações das propriedades mecânicas do material (aço inoxidável 304) obtidas por meio de ensaios de tração. Os resultados obtidos para as propriedades plásticas do material mostraram concordância com a literatura, com diferenças inferiores aos 5%. Utilizando o software Abaqus CAE, foram simuladas as etapas necessárias para o processo de fabricação e identificado as áreas críticas onde ocorreram rupturas ou formação de rugas durante a simulação. Com base nos resultados, foi estabelecido que são necessárias quatro operações de embutimento profundo e duas etapas de recozimento para obter a geometria final desejada do componente. A partir destes dados, as ferramentas conformadoras necessárias para a nova abordagem de produção foram modeladas.

Palavras-chave: Embutimento profundo, peças cônicas, análise não linear, MEF, Abaqus.

ABSTRACT

Within deep drawing processes, the production of conical parts from sheet metal often involves a trial-and-error approach due to the process complexity. This approach results in rework and increased costs. To mitigate these challenges, one effective approach is to conduct preliminary simulations of the process using software capable of analyzing process non-linearities such as surface contact, plasticity, and large displacements. In this work, a simulation study was carried out, through FEM, of the manufacturing process of a conical component, the bucket for bottles, through deep drawing. The objective was to develop a new tooling design that minimized losses during manufacturing. The simulation was performed using information on the mechanical properties of the material (304 stainless steel) obtained through tensile tests. The results obtained for the plastic properties of the material showed agreement with the literature, with differences below 5%. Using Abaqus CAE software, the necessary steps for the manufacturing process were simulated and critical areas prone to rupture or wrinkling during the simulation were identified. Based on these results, it was determined that four deep drawing operations and two annealing steps were necessary to achieve the desired final component geometry. Subsequently, the forming tools required for the new production approach were modeled using this information.

Keywords: Deep drawing, conical parts, nonlinear analysis, FEM, Abaqus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Balde para garrafas	16
Figura 2- Tensões envolvidas no processo de embutimento profundo	20
Figura 3- Variação de espessura em um copo estampado	21
Figura 4- Determinação da geratriz de uma peça cilíndrica.....	22
Figura 5- Dimensões de uma peça cônica sem flange e com flange	23
Figura 6- Formação de uma peça cônica por embutimento profundo.....	25
Figura 7- Transformação do blanque em um corpo estampado	26
Figura 8- Processos para obtenção de corpos cônicos.....	27
Figura 9- Representação de uma ferramenta de estampo	30
Figura 10- Furos de saída de ar	31
Figura 11- Prensa hidráulica.....	35
Figura 12- Diagramas de tensão- deformação convencional.....	36
Figura 13- Comparação entre a curva convencional e a verdadeira.....	36
Figura 14- Tipos de elementos	39
Figura 15- Fluxograma de trabalho	41
Figura 16- Detalhamento do produto e vista isométrica.....	42
Figura 17- Dimensões do corpo de prova utilizados nos ensaios.....	44
Figura 18- Execução do ensaio de tração	45
Figura 19- Parâmetros geométricos da ferramenta.....	46
Figura 20- Discretização do disco	48
Figura 21- Corpos de prova antes e após o ensaio de tração.....	54
Figura 22- Curva de escoamento para cada inclinação	55
Figura 23- Falhas na simulação	57
Figura 24- Recozimento por indução	58
Figura 25- Tensões máximas principais nas direções x e y.....	59
Figura 26- Simulação dos estágios de embutimento	60
Figura 27- Geometria do punção	61
Figura 28- Estágios de embutimento	62
Figura 29- Prensa hidráulica Mahnke 315 Ton	63
Figura 30- Ferramenta da primeira operação	64
Figura 31- Ferramenta da segunda e terceira operações.....	65
Figura 32- Ferramenta da quarta operação	66

Figura 33- Dimensões principais das ferramentas.....	67
------------------------------------------------------	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Vantagens e limitações do embutimento profundo.....	19
Quadro 2- Composição química do aço inox 304.....	42
Quadro 3- Comparação entre o método implícito e o explícito.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Relações de estampagem admissíveis para variados materiais	25
Tabela 2- Propriedades mecânicas do aço inox 304.....	43
Tabela 3- Quantidades e utilização dos corpos de prova	44
Tabela 4- Diâmetros e relações de estampagem recalculados.....	52
Tabela 5- Dimensionamento das alturas dos cilindros escalonados.....	53
Tabela 6- Parâmetros geométricos da ferramenta	53
Tabela 7- Propriedades mecânicas do material	54
Tabela 8- Comparativo de valores da constante de tensão verdadeira e índice de encruamento	56
Tabela 9- Dimensionamentos encontrados na simulação.....	61
Tabela 10- Dimensões principais das ferramentas	66
Tabela 11- Dados de tensão e deformação	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> - Instituto Americano de Ferro e Aço
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Projeto Auxiliado por Computador
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> - Engenharia Auxiliada por Computador
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> - Organização Internacional para Padronização
MEF	Método dos elementos finitos
NBR	Norma Brasileira
S.A.	Sociedade Anônima
SAE	Society of Automotive Engineers - Sociedade dos Engenheiros Automotivos

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Diâmetro da geratriz [mm]
d_p	Diâmetro do punção [mm]
h	Altura do produto [mm]
r_p	Raio do produto [mm]
d_a	Diâmetro maior do cone [mm]
d_b	Diâmetro menor do cone [mm]
s	Comprimento da parede lateral do cone [mm]
d_f	Diâmetro do flange [mm]
β	Relação de estampagem
β_{adm}	Relação de estampagem admissível
e	Espessura [mm]
a	Distância radial [mm]
d_i	Diâmetro dos escalonados [mm]
h_i	Altura das partes cilíndricas [mm]
H	Altura do cone [mm]
c_i	Altura do chanfro [mm]
H_i	Altura de embutimento [mm]
d_{mi}	Diâmetro médio dos escalonados [mm]
Σ	Somatório
p_i	Profundidade de embutimento [mm]
r_{cm}	Raio do canto da matriz [mm]
r_{cp}	Raio do canto do punção [mm]
w	Folga entre punção e matriz [mm]
k_m	Coefficiente de folga do material
σ_r	Limite de resistência [N/mm ²]
σ_e	Limite de elasticidade [N/mm ²]
r	Índice de anisotropia
Δl	Alongamento [mm]
n	Coefficiente de encruamento
k_f	Tensão verdadeira [N/mm ²]
φ	Deformação verdadeira

F	Força [N]
A_i	Área instantânea [mm ²]
σ	Tensão convencional [N/mm ²]
ε	Deformação relativa [%]
l_0	Comprimento inicial [mm]
l_i	Comprimento instantâneo [mm]
A_0	Área inicial da secção transversal do corpo de prova [mm ²]
C_m	Constante da tensão verdadeira do material
k_i^e	Matriz de rigidez individual
k	Matriz de rigidez da estrutura
U	Vetor dos deslocamentos
R	Vetor das forças
E	Módulo de elasticidade [GPa]
η	Tensão triaxial
φ_e	Deformação verdadeira no início do escoamento
φ_c	Deformação verdadeira corrigida para o Abaqus
b_0	Largura inicial do comprimento paralelo de um corpo de prova plano
L_c	Comprimento paralelo
L_0	Comprimento de medida inicial
L_t	Comprimento total do corpo de prova
C_f	Cabeças de fixação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	Objetivo geral.....	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	ESTAMPAGEM.....	18
2.2	EMBUTIMENTO PROFUNDO	18
2.2.1	Determinação da geratriz e relação de estampagem	21
2.2.2	Embutimento profundo de corpos cônicos	25
2.2.2.1	Determinação das operações de uma peça cônica	28
2.3	FERRAMENTA DE EMBUTIMENTO PROFUNDO.....	30
2.3.1	Parâmetros geométricos da ferramenta	32
2.4	PRENSAS.....	34
2.5	DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO E CURVA DE ESCOAMENTO	35
2.6	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	37
3	METODOLOGIA E MATERIAIS	41
3.1	OBJETO DE ESTUDO	42
3.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	43
3.3	CÁLCULOS ANALÍTICOS	45
3.4	SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	46
3.5	PROJETO DA FERRAMENTA	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO	52
4.2	ENSAIOS DE TRAÇÃO E PROPRIEDADES DO MATERIAL	53
4.3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	56
4.4	MODELAMENTOS E PROJETOS	62

5	CONCLUSÃO.....	69
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS SUTUROS	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
	APÊNDICE A- DIAGRAMAS TENSÃO- DEFORMAÇÃO.....	76
	APÊNDICE B- TABELA DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES PELA EQUAÇÃO DA CURVA DE ESCOAMENTO	79
	APÊNDICE C- FERRAMENTAS DE EMBUTIMENTO DO 1º ESTÁGIO	81
	APÊNDICE D- FERRAMENTAS DE EMBUTIMENTO DOS ESTÁGIOS 2 E 3	83
	APÊNDICE E- FERRAMENTA DE CALIBRAÇÃO	85
	ANEXO A- TABELA DO RAIOS DE CANTO DO PUNÇÃO EM FUNÇÃO DA ESPESURA	87
	ANEXO B- CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	88
	ANEXO C- PRESSÃO NOMINAL DO PRENSA CHAPA DE ACORDO COM O MATERIAL	89
	ANEXO D- RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO	90

1 INTRODUÇÃO

Os processos de estampagem apresentam uma notável importância econômica. Dados do Instituto Aço Brasil (2020) mostram que a produção de aços no Brasil passou de 5,4 milhões de toneladas no ano de 1970 para mais de 32 milhões de toneladas em 2019. Já Schaeffer (2004) afirma que de toda a produção siderúrgica nacional, aproximadamente 15%, é destinada à fabricação de chapas metálicas, que em sua grande maioria é empregada na manufatura de componentes por meio da estampagem.

Os processos de estampagem podem ser separados em algumas subdivisões, dentre as quais podem-se citar o corte, a dobra e o embutimento profundo, também chamado de estampagem profunda ou repuxo. Segundo Atul S e Babu (2018) a estampagem profunda é um processo muito comum nas indústrias aeroespaciais, automobilísticas e na fabricação de utensílios de cozinha. Sendo, normalmente, destinada à fabricação de corpos axissimétricos com significativa profundidade de conformação, destaca-se por ser o mais rápido dentre os diversos processos praticados na produção destes componentes.

Dos diversos formatos que os corpos axissimétricos podem assumir, a conformação de peças cônicas ganha destaque, sendo descrita por Gorji et al. (2011) como um campo difícil e complexo dentro dos processos de conformação de chapas metálicas, e complementa afirmando que a obtenção de peças cônicas é consideravelmente mais difícil do que de corpos cilíndricos. Por fim, explica que corpos cônicos são normalmente formados através da estampagem profunda, dividida em vários estágios.

Para se realizar o embutimento profundo é necessária uma ferramenta constituída essencialmente por um punção, uma matriz e um prensa-chapa. Schaeffer (2004) define os punções afirmando que os mesmos possuem a geometria interna do componente a ser produzido, enquanto que as matrizes possuem a geometria de um anel com o canto interno arredondado. Já Morgado (2013) explica que o prensa-chapa controla o escoamento da chapa durante a operação de estampagem, uma vez que aplica pressão sobre ela, criando o atrito necessário para contrariar o referido escoamento.

1.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A empresa Brinox Metalúrgica S.A. é uma das empresas do Grupo Brinox, e que tem sua fundação datada do ano de 1988. Sendo um dos maiores fabricantes de utilidades domésticas do país, o Grupo Brinox conta ainda com as marcas Coza, Haus Concept, Ceramic

Life e Rasco. Tendo sua matriz localizada no polo industrial da cidade de Caxias do Sul, possui também unidades nas cidades de Linhares, no Espírito Santo e na capital de São Paulo.

A empresa tem sua área de atuação voltada principalmente à fabricação de itens relacionados a utilidades domésticas, com produtos destinados a todos os ambientes da casa, como cozinha, lavanderia, banheiro e decoração. Além disso, atende também o mercado corporativo, como hotéis, bares e restaurantes. De acordo com o site da Brinox (2022), a empresa possui em seu portfólio mais de três mil produtos, que incluem desde painéis e talheres, a lixeiras e utilidades em geral. São itens de aço inox, alumínio, aço cromado, silicone, entre outros materiais.

Seus produtos são comercializados tanto no mercado nacional quanto internacional. No Brasil, está presente em todos os estados. Além disso, são exportados para países da América do Sul, América Central, América do Norte, África e Oriente Médio.

1.2 JUSTIFICATIVA

O mercado de utilidades domésticas é um segmento abrangente e que possui grande concorrência. Devido a isso, a empresa Brinox busca pela contínua melhoria nos seus processos produtivos, além de garantir a qualidade de seus produtos, a fim de assegurar a satisfação de seus clientes.

Dos variados processos produtivos que a empresa possui, pode-se afirmar que a conformação de chapas é de suma importância. Por meio da conformação, é dada a forma e a dimensão desejada aos produtos, sejam eles de aço inox ou de alumínio, através das operações de corte, dobra e embutimento profundo.

Dentro do catálogo de produtos, destaca-se o balde para garrafas, cuja função é armazenar garrafas em gelo, conforme pode ser visto na Figura 1. Este componente tem chamado a atenção devido ao alto volume de falhas na sua fabricação. Desta forma torna-se urgente uma solução técnica que minimize tais falhas ao longo de sua produção.

Diante do cenário apresentado, verificou-se a necessidade de um estudo, que avalie os estágios de conformação do componente, levando em consideração a simulação do processo produtivo e as propriedades do material conformado. Será realizado o dimensionamento dos diversos estágios de conformação do componente de forma analítica. Posteriormente, os valores calculados serão confrontados com os resultados da simulação do processo de estampagem, fazendo uso do software Abaqus CAE.

Figura 1- Balde para garrafas



Fonte: Adaptado de Brinox Shop (2022).

Portanto, esse trabalho objetiva o desenvolvimento detalhado do projeto das ferramentas de conformação, que permita minimizar as perdas produtivas e otimizar o processo produtivo deste item.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver o projeto do ferramental que será utilizado na fabricação de um componente em formato cônico através do processo de embutimento profundo.

1.3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos abaixo associados deverão ser realizados:

- efetuar levantamento bibliográfico referente ao processo de estampagem profunda de

corpos cônicos;

- determinar as propriedades mecânicas do material (alongamento, limite de escoamento e limite de resistência) por meio de ensaios de tração;
- gerar a curva tensão- deformação real para encontrar o encruamento e a constante da tensão verdadeira;
- calcular de forma analítica os estágios do processo;
- simular, via Método dos Elementos Finitos (MEF), o processo de embutimento profundo;
- comparar os resultados obtidos na simulação com os cálculos analíticos;
- projetar os conjuntos das ferramentas de conformação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são revisados conceitos, com base na literatura, sobre a estampagem e o embutimento profundo, destacando principalmente o processo para componentes cônicos. São também abordados os temas referentes às propriedades dos materiais, às não linearidades do processo, às máquinas e ferramentas usadas no embutimento, bem como à simulação via MEF do processo de estampagem.

2.1 ESTAMPAGEM

Mesmo sendo um processo bastante antigo e com um histórico milenar, Schaeffer (2006) ressalta que a estampagem requer uma cuidadosa observação dos parâmetros técnicos para que peças de boa qualidade sejam obtidas.

Por definição, estampagem é um processo de conformação mecânica, que através de um conjunto de operações transforma chapas planas em peças com contornos e formas pré-definidas, geralmente o produto final. Essas operações são executadas fazendo uso de uma prensa (mecânica ou hidráulica) e uma ferramenta, que juntas aplicarão de forma sequencial as operações previamente definidas, de modo a dar a forma final à peça (MORGADO, 2013).

Um aspecto importante dos processos de estampagem é que a matéria-prima assume a forma desejada por deformação plástica, a partir da aplicação de força externa sobre o metal. Entretanto, seu volume e sua massa permanecem sempre inalterados (SANTOS; QUADROS, 2018). Já a matéria-prima usada nestes processos caracteriza-se por ser de espessura fina, como chapas, perfis e tubos de paredes delgadas, sendo que a maior parte dos produtos estampados são feitos de chapas de aço (SCHAEFFER, 2004).

Provenza (1986), por sua vez, divide a estampagem em três processos distintos, sendo eles o corte, a dobra e o embutimento profundo. Por outro lado, ressalta que são poucos os casos em que o ciclo de estampagem se resume apenas a uma operação fundamental, ou seja, geralmente tem-se a combinação de dois ou mais desses processos para obtenção de um único componente.

2.2 EMBUTIMENTO PROFUNDO

Segundo Singh e Agnihotri (2015), o embutimento profundo permite a fabricação de produtos leves, de alta resistência e resistentes à corrosão. Já Schaeffer (2004) destaca a

possibilidade de fabricação de peças com excelente relação entre tamanho e peso ou tamanho e consumo de matéria prima. Por conta disso, o embutimento é um dos processos mais usados para a fabricação de peças tridimensionais a partir de chapas. O processo de embutimento profundo apresenta ainda outras vantagens e algumas limitações, listadas no Quadro 1.

Quadro 1- Vantagens e limitações do embutimento profundo

Vantagens	Limitações
Bom aproveitamento da matéria	O ferramental e os equipamentos possuem custo muito elevado
Rapidez na execução	Exige grandes produções para justificar o processo economicamente
Mantém as propriedades mecânicas do material	
Possibilidade de grande precisão e tolerância dimensional	

Fonte: Adaptado de Santos e Quadros (2018).

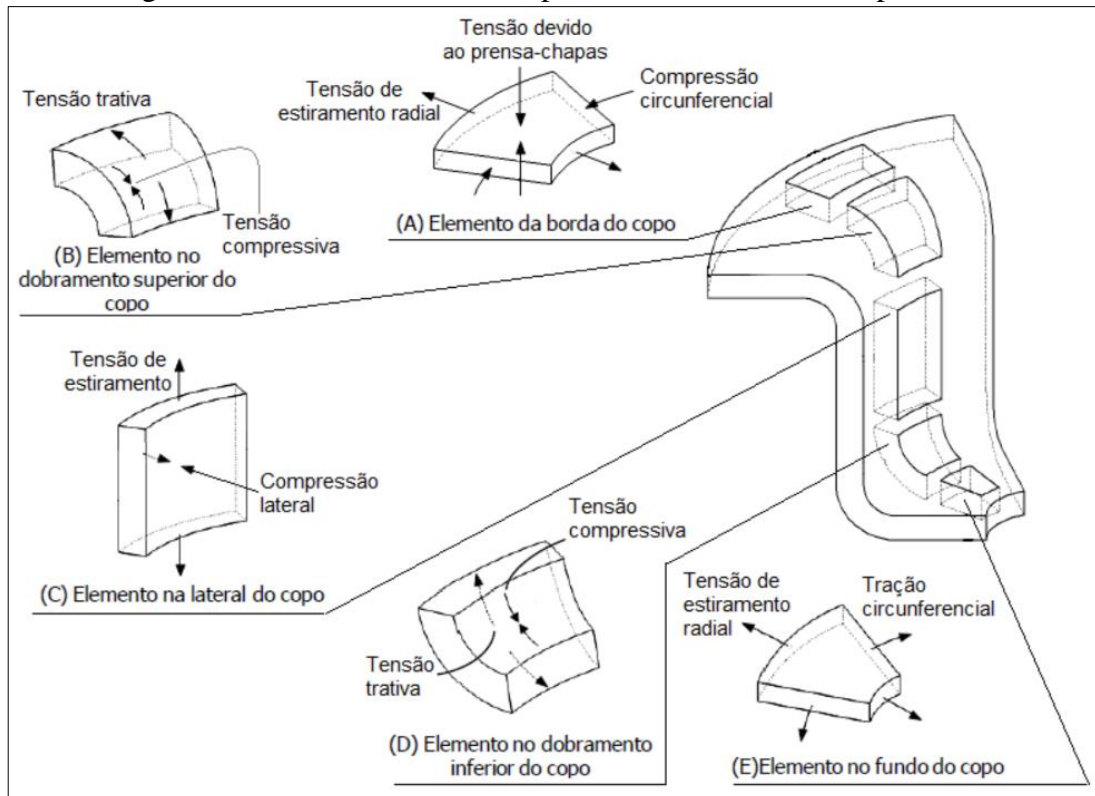
Segundo Daleffe (2008), embutimento profundo é uma operação de estampagem na qual uma chapa, inicialmente plana, é transformada em um corpo oco sem que haja aparecimento de rugas e trincas. Este processo se caracteriza por apresentar, simultaneamente em distintas regiões da peça, deformações oriundas de tensões trativas e compressivas.

Marcondes (2008) define o processo de embutimento profundo como sendo a deformação da chapa, que é empurrada pelo punção de forma a passar por dentro da matriz, enquanto o prensa-chapa pressiona a geratriz. Daleffe (2008) complementa ao citar que o prensa-chapa deve ser regulado de modo a permitir uma alimentação constante e controlada do material. Blala et al. (2020) reforçam importância do prensa-chapa, afirmando que baixas pressões do prensa-chapa faz com que o enrugamento seja o modo de falha primário, enquanto que altas pressões podem causar rasgos, mostrando o quanto o processo é dependente do mesmo.

A estampagem inicia-se com o contato entre o punção e a chapa. Neste ponto, o regime elástico ainda está presente. Com o avanço progressivo do punção, ocorre o aumento das solicitações na região da aba, até que o regime plástico seja alcançado, conforme ilustrado na Figura 2 (RODRIGUES; MARTINS, 2005). Nesse contato ocorre um processo de estiramento biaxial no qual o fundo da peça é deformado (Fig. 2 E) (SCHAEFFER, 2004).

Com a redução do diâmetro da geratriz até o diâmetro do punção, o metal passará por esforços compressivos na direção da circunferência e esforços trativos radiais (Fig. 2 A). À medida que o material é empurrado para o interior da matriz, devido ao esforço trativo na lateral do copo, ele é dobrado e em seguida endireitado (Fig. 2 B). Em função do estiramento uniforme, ocorre a homogeneização da espessura da parede (Fig. 2 C) (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

Figura 2- Tensões envolvidas no processo de embutimento profundo

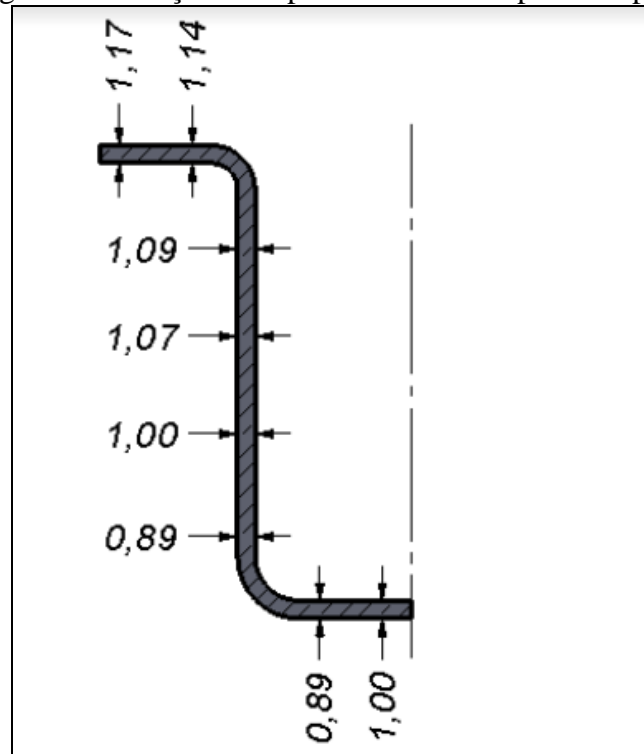


Fonte: Adaptado de Garcia, Spim e Santos (2000).

Schaeffer (2004) ressalta que na região próxima ao raio do fundo do copo (Fig. 2 D), podem ocorrer rupturas ao longo de todo o processo. Isso ocorre em função de um enfraquecimento que esta região sofre devido às tensões trativas, e consequentemente redução de espessura do material nos esforços iniciais.

Bastos (2009) explica que podem ocorrer variações de espessura relacionadas aos diferentes modos de deformação. A Figura 3 mostra uma representação das variações de espessura em uma peça de espessura inicial de 1,0 milímetro (mm). Conforme pode ser visto, ocorre um afinamento na região próxima ao raio localizado no fundo do copo, conforme citado por Schaeffer. Por outro lado, na região do flange ocorreu o oposto, uma vez que sua espessura aumentou em relação ao original. Este aumento de espessura é ocasionado devido às tensões compressivas presentes na região do flange (Fig. 2 A), que quando em excesso causam as rugas.

Figura 3- Variação de espessura em um copo estampado



Fonte: Adaptado de Hosford e Caddell (2007) apud Bastos (2009).

O acabamento na borda de produtos fabricados a partir do embutimento é feito através da operação de refile (MARCONDES, 2008). Este acabamento se faz necessário devido às irregularidades que surgem na borda da peça. Essas irregularidades, também conhecidas como orelhamento, são resultado da anisotropia das chapas. A anisotropia é um fenômeno no qual o escoamento do metal ocorre de forma diferente nos sentidos da largura e da espessura. Esse fenômeno é geralmente causado pelo alongamento dos grãos do metal em direção ao sentido de laminação. (SCHAEFFER, 2004).

2.2.1 Determinação da geratriz e relação de estampagem

De acordo com Singh e Agnihotri (2015), os fatores que afetam o processo de embutimento profundo podem ser categorizados em três classes, sendo eles os parâmetros de processo, geométricos e da máquina.

Dentro dos parâmetros geométricos, um problema de fundamental importância no estudo de peças estampadas por embutimento profundo é a determinação das dimensões do disco. Esta determinação, quando feita corretamente, proporciona melhor qualidade do produto e menor sucata. Os cálculos para sua determinação são sempre aproximados, e baseiam-se na equivalência das superfícies ou na igualdade dos volumes. (MARCONDES, 2008). Portanto,

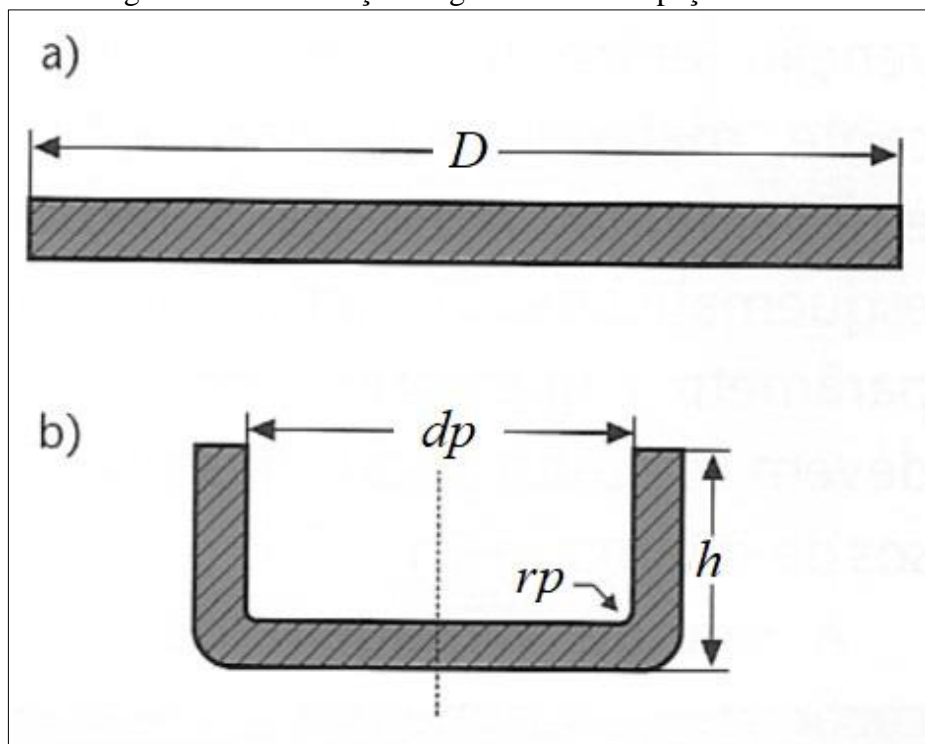
é preciso observar que o valor calculado pode apresentar pequenas diferenças em relação ao resultado prático. Isso ocorre devido ao estiramento sofrido pelo material, tornando necessária a realização de testes práticos para validar os resultados (BRITO, 2005 apud DREHER, 2016). Schaeffer (2004) destaca que, por ser um processo de fabricação em série, mesmo com pequenas economias na peça única podem representar grandes economias observando a fabricação de um lote inteiro.

A forma mais simples de determinação de uma geratriz é a de um corpo cilíndrico e sem flange. Usando o processo de equivalência das superfícies o diâmetro da geratriz (D) pode ser obtido através da equação 1, dada por Rossi (1979), sendo d_p o diâmetro do punção e h a altura do produto.

$$D = \sqrt{d_p^2 + 4 * d_p * h} \quad (1)$$

A Figura 4, apresentada na sequência, exemplifica as dimensões do disco (a) e do copo (b), conforme definido na equação 1. Vale observar que nesse caso, o raio do produto (r_p) é pequeno, o que possibilita que o mesmo seja omitido do cálculo. Caso o raio apresente um tamanho significativo, sua área deve ser considerada no cálculo das equivalências de superfície.

Figura 4- Determinação da geratriz de uma peça cilíndrica



Fonte: Adaptado de Schaeffer (2006).

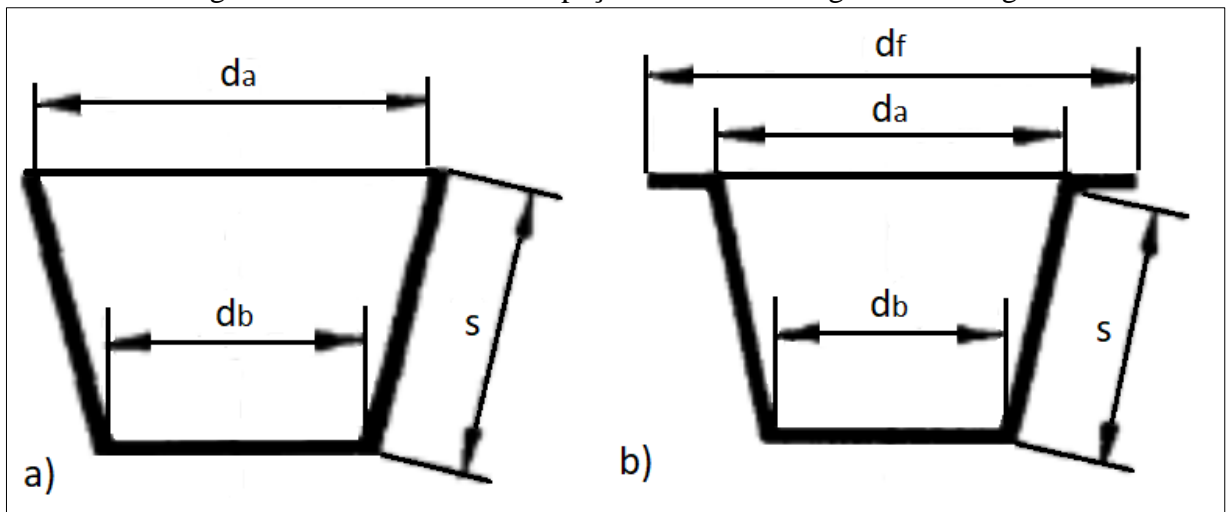
Para peças cônicas, o diâmetro da geratriz pode ser calculado a partir da equação 2. Para tal, deve-se conhecer o diâmetro maior do cone (d_a), o diâmetro menor do cone (d_b) e o comprimento da parede lateral do cone (s). Em caso de um componente cônico com flange, a equação 3 deve ser usada na determinação da geratriz. Neste tipo de componente, o diâmetro do flange (d_f), deve ser considerado no cálculo (MARCONDES, 2008).

$$D = \sqrt{d_a^2 + 2 * s * (d_a + d_b)} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{d_a^2 + 2 * s * (d_a + d_b) + d_f - d_b} \quad (3)$$

Um detalhe importante sobre os diâmetros, para os cálculos de determinação da geratriz, é que se deve sempre considerar o diâmetro do punção. Portanto, caso a medida seja retirada do próprio componente, deve-se usar os diâmetros internos nos cálculos, conforme apresentado na Figura 5. Já o comprimento da parede pode ser calculado a partir de uma relação trigonométrica entre a altura do produto e a diferença entre os diâmetros do cone. Softwares de modelagem CAD também podem ser usados na obtenção desta medida. A Figura 5 ilustra onde estão dispostas tais medidas no cone.

Figura 5- Dimensões de uma peça cônica sem flange e com flange



Fonte: Adaptado de Marcondes (2008).

O valor do disco calculado é sempre arredondado para o número inteiro mais próximo. É também recomendado em muitos casos deixar um percentual (entre 3 a 5%) de sobremetal

no blanque, para a posterior usinagem de acabamento e ajuste de altura que é feita na borda (BENZAZZI JUNIOR; CAVERSAN, 2010).

Quando o disco é finalmente estampado, ocorre a passagem do diâmetro da geratriz para o diâmetro do punção. Segundo Schaeffer (2006), essa passagem deve ser realizada dentro de certos limites. Esta análise é feita a partir da relação de estampagem (β). Sendo D o diâmetro da geratriz e d_p o diâmetro do punção, a relação de estampagem é definida pela equação 4.

$$\beta = \frac{D}{d_p} \quad (4)$$

A relação de estampagem admissível (β_{adm}) indica a redução máxima ao qual a geratriz pode ser submetida. Para o primeiro estágio, a equação 5 fornece o β_{adm} para materiais de boa estampabilidade, como aços inoxidáveis, alumínio e ligas de latão, enquanto que a equação 6 é utilizada para aços de menor estampabilidade, como aços com alto teor de carbono e ligas de cobre e alumínio com maior dureza Brinell. Sendo e a espessura do material, as equações 5 e 6 para o cálculo do β_{adm} seguem descritas abaixo (SCHAEFFER, 2006).

$$\beta_{adm} = 2,15 - \frac{d_p}{1000e} \quad (5)$$

$$\beta_{adm} = 2,0 - \frac{1,1 d_p}{1000 e} \quad (6)$$

Caso o valor encontrado para β seja maior que o valor de β_{adm} , significa que o processo não pode ser executado em uma única operação. Nestes casos, são demandadas duas ou mais etapas de estampagem, para evitar alongamentos excessivos, rasgos e fortes encruamentos que levariam à rejeição do produto, devendo assim ser realizado o embutimento de forma gradativa (PROVENZA, 1987).

Quando são demandadas operações adicionais, pode-se adotar $\beta= 1,3$ para o segundo estágio e $\beta= 1,2$ para o terceiro estágio, bem como para os demais estágios que possam vir a ser necessários (SCHAEFFER, 2004). A determinação de β_{adm} também pode ser feita a partir dos valores pré-definidos apresentados na Tabela 1. Nela, estão descritos os valores do primeiro estágio e dos posteriores para diferentes materiais.

Tabela 1- Relações de estampagem admissíveis para variados materiais

Material	β_{adm} (estágio 1)	β_{adm} (estágios posteriores)
Aço para estampagem	1,54 - 1,67	1,25
Aço para estampagem profunda	1,67 - 1,82	1,25 - 1,33
Aço para carroceria automóvel	1,72 - 1,92	1,25 - 1,33
Aço inoxidável	1,82 - 2,0	1,18 - 1,25
Folha de flandres	1,82 - 2,0	1,25 - 1,33
Cobre	1,67 - 1,82	1,18
Latão	1,82 - 2,0	1,25 - 1,33
Zinco	1,43 - 1,54	1,11 - 1,18
Alumínio	1,67 - 1,89	1,25
Duralumínio	1,67 - 1,82	1,11
Níquel	1,54 - 1,68	1,25

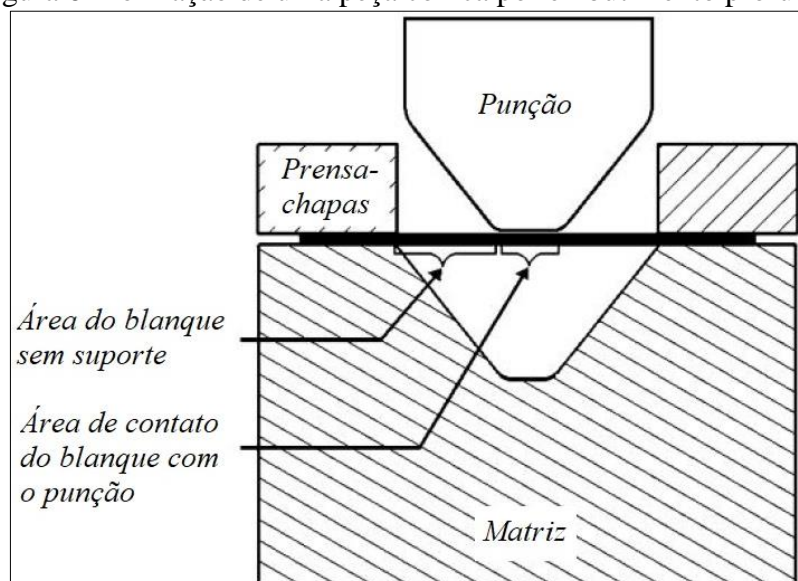
Fonte: Adaptado de Rodrigues e Martins (2005).

2.2.2 Embutimento profundo de corpos cônicos

O embutimento profundo cônico apresenta algumas particularidades que o diferenciam da maioria dos processos de estampagem profunda para peças de formatos não cônico. Por exemplo, quando comparado a corpos cilíndricos, a fabricação de peças cônicas tende a ser mais difícil e a exigir mais estágios até a obtenção do formato final.

Existem dois grandes fatores que tornam este processo particularmente difícil. O primeiro deles é a baixa área de contato entre a ponta do punção e o blank nos estágios iniciais de deformação, conforme pode ser observado na Figura 6. Por conta disso, altas tensões são aplicadas nesta pequena área, o que pode causar a ruptura da geratriz (GORJI et al., 2011).

Figura 6- Formação de uma peça cônica por embutimento profundo



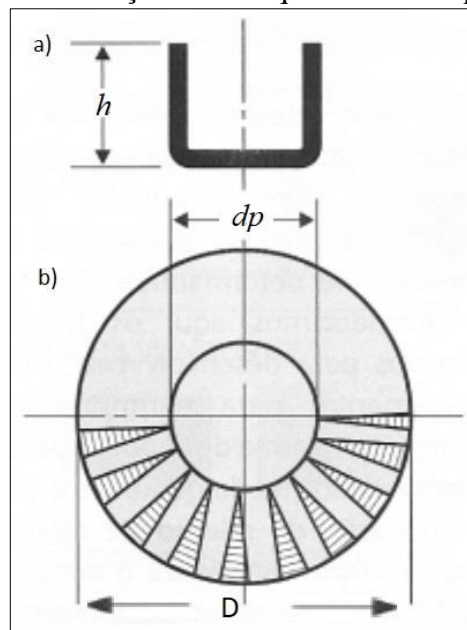
Fonte: Adaptado de Gorji et al. (2011).

Há ainda o segundo fator descrito por Gorji et al. (2011), que também traz dificuldades ao processo. Ao formar corpos cônicos, a maior parte da superfície da chapa fica livre. Da ponta do punção, onde fica o menor diâmetro, até a parte final do cone, onde encontra-se o maior diâmetro, não existe o contato mútuo entre o punção, a chapa e a matriz. Por encontrar-se livre, ocorre o enrugamento da parede da chapa.

O enrugamento tem sido um dos principais modos de falha limitantes nos processos de chapas metálicas. Trata-se de um tipo de flambagem da chapa metálica, ocasionado por tensões compressivas em excesso. O enrugamento do flange e o enrugamento da parede são duas das principais categorias de flambagem que podem ocorrer no processo. Ambos são basicamente os mesmos, e são originados das tensões circunferenciais de compressão (SHAFAT; ABBASI; KETABCHI, 2011).

A Figura 7, disposta a seguir, ajuda a entender melhor esse fenômeno do enrugamento. Conforme pode ser visto na mesma, ao se reduzir o diâmetro original da geratriz (Fig. 7 b) para o diâmetro do punção (Fig. 7 a), ocorre uma redução no comprimento da circunferência e, conseqüentemente, uma redução na área superficial. Esta redução aparece representada na imagem através dos triângulos que aparecem em 7 b. Esses triângulos ilustram o gradiente das variações de área entre os diâmetros externo e interno. Como o volume permanece inalterado, ocorre a compressão circunferencial, descrita anteriormente. Quando a chapa não suporta a compressão do processo, acontece o surgimento das rugas. Este fenômeno de compressão é também responsável pelos casos de aumento da espessura do flange.

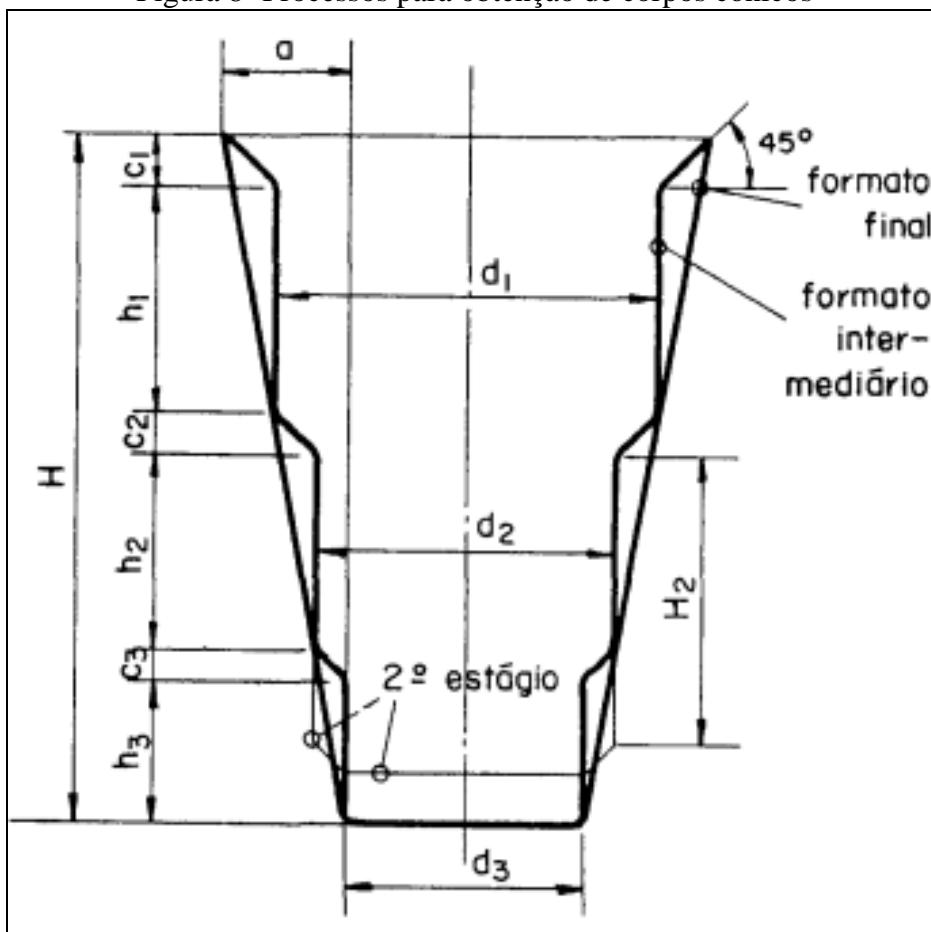
Figura 7- Transformação do blanque em um corpo estampado



Fonte: Adaptado de Schaeffer (2006).

Para fugir desses inconvenientes, uma forma é se produzir estes componentes cônicos em etapas. Marcondes (2008, p. 204) explica esse sistema de estampagem dizendo que “a conformação cônica é obtida com uma última operação de estampagem que segue uma série de repuxos cilíndricos escalonados”. Ikumapayi et al. (2022) também cita esse sistema, explicando que corpos cônicos não podem ser estampados em linha reta, sendo feitos na forma de copos escalonados para então ser achatados e esticados até o tamanho desejado. Uma representação esquemática destes processos pode ser observada a seguir, na Figura 8.

Figura 8- Processos para obtenção de corpos cônicos



Fonte: Adaptado de Marcondes (2008).

No exemplo acima, a peça final é o contorno cônico externo. O contorno interno são os cilindros escalonados citados por Marcondes (2008). Cada um desses cilindros corresponde a uma operação de estampagem distinta. Gradativamente, vai se reduzindo o diâmetro do branco até se obter o menor diâmetro do cone, bem como se atingir a altura final da peça. Essas estampagens cilíndricas servem para impedir o surgimento de rugas, pois no embutimento cilíndrico a peça não fica livre igual ao cônico. Além disso, o escalonamento reduz as tensões aplicadas inicialmente à geratriz, reduzindo as chances de rompimento no fundo da peça.

É recomendado que o cilindro escalonado apresente um perfil com suas medidas menores que o cone. Isto serve para que no momento da calibração, se efetue a distensão da chapa, fazendo desaparecer as marcas do escalonamento (PROVENZA, 1987).

2.2.2.1 Determinação das operações de uma peça cônica

O embutimento de um corpo cônico, que é efetuado em etapas, fabricado conforme a Figura 8, requer um dimensionamento minucioso de cada um dos estágios. Provenza (1987) detalha o passo a passo que deve ser seguido para se determinar analiticamente todos os dimensionamentos de cada etapa.

Inicialmente, conforme definido anteriormente, deve-se calcular o diâmetro da geratriz, conforme a equação 2, assim como sua relação de estampagem admissível, de acordo com a equação 5 ou através da Tabela 1. Na sequência deve ser calculada a distância radial (a) entre o diâmetro maior (d_a) e o diâmetro menor (d_b) do cone, conforme mostrado na Figura 8. A distância radial pode ser calculada pela equação 7.

$$a = \frac{d_a - d_b}{2} \quad (7)$$

Os diâmetros escalonados (d_i), são obtidos fazendo-se uso da relação de estampagem admissível de cada estágio. Para o primeiro diâmetro (d_i com $i=1$) usa-se o diâmetro da geratriz (D) e a relação de estampagem do primeiro estágio (β_{adm}), conforme a equação 8. Para os diâmetros dos demais estágios ($d_2, d_3\dots$), utiliza-se o diâmetro do punção da operação anterior (d_{i-1}) e o β_{adm} dos estágios posteriores, conforme a equação 9.

$$d_1 = \frac{D}{\beta_{adm}} \quad (8)$$

$$d_i = \frac{d_{i-1}}{\beta_{adm}} \quad (9)$$

Este processo deve ser repetido o número de vezes que for necessário até que o valor de d_i seja igual ao valor do d_b .

Na sequência, já de posse dos diâmetros, deve-se calcular a altura das partes cilíndricas

(h_i) do embutimento em cascata, a partir da utilização da equação 10.

$$h_i = \frac{H - c_i}{a} - c_i \quad (10)$$

Sendo H a altura do cone e c_i a altura do chanfro, observáveis na Figura 8. A altura dos chanfros pode ser obtida através das relações trigonométricas ou com o auxílio de um software de modelagem, sendo indicada para esses chanfros, por Provenza (1987), um ângulo de 45° em relação à horizontal.

O passo seguinte trata de calcular as alturas do embutimento (H_i), que são as alturas da parte cilíndrica formada em cada uma das operações. A altura do embutimento difere-se da altura das partes cilíndricas, uma vez que H_i não necessariamente refere-se à altura final das partes cilíndricas do escalonado (h_i), pois ao executar a próxima operação e formar o H_{i+1} , consumirá parte do material do escalonado anterior, diminuindo assim a altura de H_i , e assim formando o h_i . Apenas na última operação H_n será equivalente a h_n , sendo n o subíndice da última operação. Nos cálculos das alturas de embutimento, os raios de concordância não são considerados. Com d_i sendo o diâmetro dos cilindros escalonados, e d_{mi} o diâmetro médio entre dois cilindros escalonados consecutivos, a altura do embutimento pode ser encontrada pela equação 11.

$$H_i = \frac{D^2 + d_{i+1}^2 + \sum_{i=1}^n (5,64 * d_{mi} + 4 * d_i * h_i)}{4 * d_i} \quad (11)$$

Por fim, deve-se calcular a profundidade de embutimento (p_i). A profundidade de embutimento nada mais é do que a altura que o corpo possui ao final de cada operação, e pode ser encontrada a partir da equação 12.

$$p_i = \sum_{i=1}^n H_i + h_i + c_i \quad (12)$$

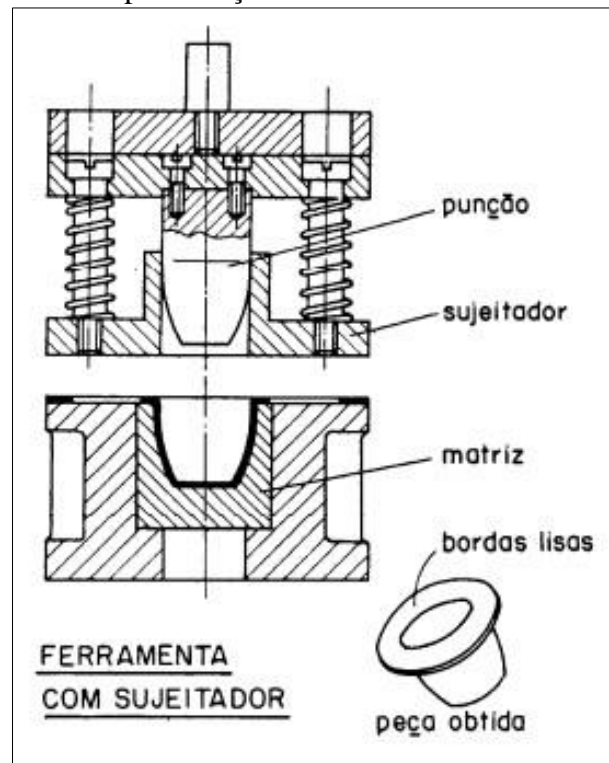
Sendo H_i e h_i as alturas das partes cilíndricas e c_i a altura dos chanfros. Neste somatório, apenas as partes ainda presentes no escalonado devem ser consideradas, ou seja, os H_i que já tenham sido transformados em h_i devem ficar de fora. No último estágio, a altura de p_n deve ser igual a altura final do cone.

2.3 FERRAMENTA DE EMBUTIMENTO PROFUNDO

Segundo Benazzi Junior e Caversan, (2010) nos primeiros trabalhos com chapas, as ferramentas eram fabricadas em oficinas sem intervenção de qualquer assistência técnica. A concepção de todo o processo era baseado na prática adquirida e no empirismo. Atualmente, boa parte das empresas possui uma engenharia para estudos de ferramentaria.

A fabricação de peças embutidas se dá a partir de uma ferramenta rígida. Daleffe (2008) explica que as ferramentas que dão a forma desejada à chapa são chamadas de estampos, constituídos por um punção, uma matriz e um prensa-chapa (sujeitador), que é usado para evitar o aparecimento de rugas ao longo do processo. Um exemplo de uma típica ferramenta de embutimento pode ser vista a seguir, na Figura 9.

Figura 9– Representação de uma ferramenta de estampo



Fonte: Adaptado de Marcondes (2008).

Outras formas construtivas de ferramentas podem ser projetadas, conforme necessidade, maquinário ou sua classificação. Uma das formas como Provenza (1986) classifica as ferramentas é quanto a sua função (furar, cortar, calibrar, embutir). Outra classificação dada é pelo número de operações, separando as ferramentas em três grupos distintos, listados a seguir:

- simples: executa uma única operação;
- combinada: executa duas ou mais operações simultâneas;

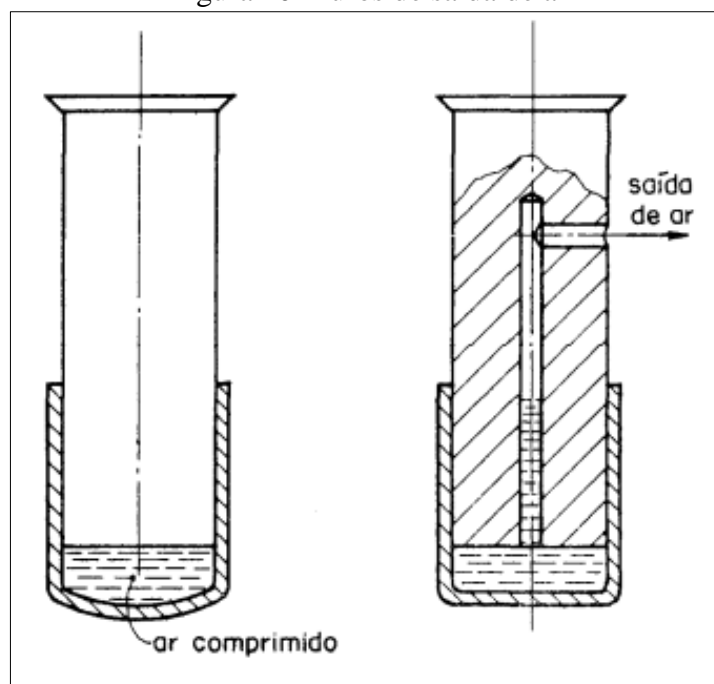
- progressivas: operações sequenciais que se sucedem com o avanço da fita.

Os estampos são compostos por elementos comuns a todos os tipos de ferramentas (base inferior, base superior, colunas de guia, parafusos de fixação e outros) e por elementos específicos, responsáveis pelo formato da peça (matriz e punções) (BENAZZI JUNIOR; CAVERSAN, 2010). Para Marcondes (2008), a eficiência de uma ferramenta vai depender de um bom projeto, a correta escolha dos materiais para cada componente empregado em sua confecção, da qualidade de acabamento e dos tratamentos dados aos mesmos.

As partes ativas da ferramenta devem ser feitas de aço ferramenta temperado para ter uma boa resistência contra o desgaste que é causado pelo atrito durante o processo. As partes da ferramenta que possuem contato com a chapa devem ser retificadas e polidas (SCHAEFFER, 2004).

Outro elemento típico de ferramentas de embutimento é o conjunto de extratores. Os extratores têm a função de retirar o produto de dentro da matriz e/ou punções (BENAZZI JUNIOR; CAVERSAN, 2010). Além dos extratores, a ferramenta também deve possuir furos para entrada e saída de ar. Durante a estampagem, a chapa adere ao punção, aprisionando certa quantidade de ar, que pode dificultar na finalização da operação. A extração também pode ser dificultada, uma vez que pode ocorrer a formação de vácuo (MARCONDES, 2008). A Figura 10 apresenta um exemplo com furo e outro sem o furo de saída de ar. Nota-se como no primeiro caso, o ar comprimido pelo processo causa o abaulamento do fundo.

Figura 10- Furos de saída de ar



Fonte: Adaptado de Marcondes (2008).

2.3.1 Parâmetros geométricos da ferramenta

Dois parâmetros geométricos que devem sempre ser analisados nos projetos de ferramentas de embutimento são os raios do canto da matriz e do punção. No que se refere à matriz, Provenza (1987) explica que se o raio da matriz for muito pequeno, a chapa pode se romper devido ao estiramento excessivo sofrido na quina de entrada. No entanto, raios muito grandes favorecem a formação de rugas. Por sua vez, Rodrigues e Martins (2005) afirmam que quanto menor for o raio do canto, maior será o limite de estampagem, aumentando também a redução da espessura das paredes, o desgaste da ferramenta e a força de estampagem. O canto do punção é outro ponto crítico para o processo, sendo uma região com forte tendência ao rompimento da chapa devido à alta concentração de tensões trativas. Quanto menor for esse arredondamento, menor será a área de contato entre a chapa e o punção, dificultando a distribuição da carga exercida no material e causando grandes deformações na região, sem distribuí-las para as regiões próximas (CHEMIN FILHO, 2004 apud SCOPEL, 2014).

Um terceiro fator que deve ser analisado é a folga entre punção e matriz. Ela deve permitir o escoamento uniforme do material, sem a formação de rugas ou a diminuição de espessura (MARCONDES, 2008). Secco, Amaral Filho e Oliveira (2002) explicam que um valor adequado de folga evita o excesso de atrito, que pode provocar rachaduras e marcas na peça estampada. Já Rodrigues e Martins (2005) afirmam que folgas muito pequenas podem causar a trefilação do material, resultando no afinamento da parede do produto e até mesmo na ruptura da chapa. Além disso, observa-se um aumento do esforço e desgaste precoce dos elementos ativos devido à pouca folga. Por outro lado, se a folga for muito grande, favorece o surgimento de rugas, uma vez que uma parte maior do disco não estará sob a ação do prensa-chapa. Se a folga não estiver distribuída adequadamente, pode ocasionar variações na altura do produto.

Para se calcular o raio do canto da matriz (r_{cm}), o cálculo do raio do canto do punção (r_{cp}) e a folga (w), Schaeffer (2006) fornece as equações 13, 14, 15 e 16 a seguir. Onde r_{cm1} é o raio da matriz para a primeira operação, r_{cmi} é o raio matriz para as operações seguintes, e é a espessura do blanque, D é o diâmetro da geratriz, d_1 é o diâmetro do punção para a primeira operação (d_i para $i=1$) e d_i é o diâmetro do punção para as operações subsequentes. Ainda segundo Schaeffer (2006), para as operações seguintes pode-se usar o mesmo valor calculado para r_{cp} na primeira operação.

$$r_{cm1} = 0,6\sqrt{(D - d_1)} e \quad (13)$$

$$r_{cmi} = 0,8\sqrt{(d_i - d_{i-1})} e \quad (14)$$

$$r_{cp} = (5 \text{ a } 6) e \quad (15)$$

$$w = e \sqrt{\frac{D}{d_1}} \quad (16)$$

Provenza (1987) traz as equações 17, 18, 19 e 20 para os cálculos desses mesmos parâmetros. Por outro lado, Rodrigues e Martins (2005) fornecem as equações 21, 22 e 23 para o cálculo do raio do canto da matriz e da folga entre punção e matriz. Onde k_m é um coeficiente de folga que depende do material e que vale 0,07 para aços, 0,02 para alumínio e 0,04 para outros materiais não ferrosos.

$$r_{cm1} = 0,8\sqrt{(d_i - d_{i-1})} e \quad (17)$$

$$r_{cmn} \leq \frac{d_i - d_{i-1}}{2} \quad (18)$$

$$r_{cp} = r_{cm} - e \quad (19)$$

$$w = 1,2e \text{ (para aços)} \quad (20)$$

$$r_{cm1} = (6 \text{ a } 10) e \quad (21)$$

$$r_{cmn} = (6 \text{ a } 8) e \quad (22)$$

$$w = e + k_m * \sqrt{10e} \quad (23)$$

Rodrigues e Martins (2005) também abordam o raio mínimo e máximo do canto do punção para diferentes intervalos de espessura. Por exemplo, para espessuras entre 0,53 mm e 0,69 mm o raio do canto do punção deve ser de no mínimo 4,7 mm e no máximo 7,1 mm. A

tabela completa, com todos os valores indicados por eles para os raios de canto do punção podem ser vistos no Anexo A.

Rodrigues e Martins (2005) também afirmam que, na primeira fase da estampagem, o raio do canto do punção deve ser sempre inferior ao raio de canto da matriz. Tal colocação contradiz Schaeffer (2006), que afirma que o raio do punção nunca pode ser menor que o raio da matriz, para evitar um encravamento do punção no material.

2.4 PRENSAS

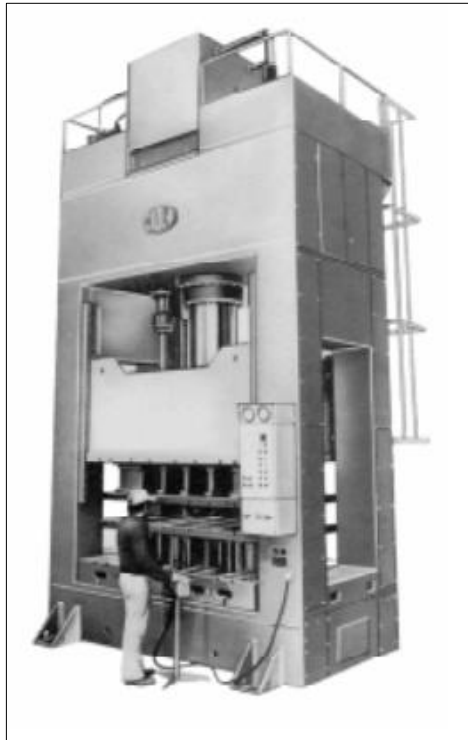
As máquinas que são utilizadas na conformação de chapas recebem o nome de prensas. Benazzi Junior e Caversan, (2010) dividem as prensas em duas grandes categorias, sendo elas as prensas hidráulicas e as prensas mecânicas. As prensas mecânicas subdividem-se ainda pelo seu comando, que podem ser de fricção, excêntricas, virabrequim, entre outros. Além disso, essas máquinas podem ser classificadas de acordo com o número de movimentos que possui.

No que diz respeito aos movimentos que as prensas são capazes de executar, elas podem ser classificadas como sendo de simples, duplo ou triplo efeito (ou ação). Uma prensa que executa apenas um movimento recebe o nome de prensa de simples efeito. Já uma prensa que efetua dois movimentos denomina-se prensa de duplo efeito. Se a mesma executar três movimentos caracteriza-se como uma prensa de triplo efeito. Esses movimentos podem ser executados pela prensa a partir de variados mecanismos, como por exemplo o seu martelo, uma almofada (mesa móvel) entre outros.

A escolha da prensa para executar uma determinada operação, depende de uma série de fatores, que devem ser conhecidos sobre as prensas de que se dispõe. A força necessária, o curso necessário, as dimensões da ferramenta e a velocidade de operação são alguns dos quesitos que devem ser avaliados (BENAZZI JUNIOR; CAVERSAN, 2010).

Para o processo de embutimento profundo, a mais indicada costuma ser a prensa hidráulica, como a apresentada na Figura 11. A vantagem da prensa hidráulica é que a mesma possibilita altas pressões, além de possuir grande curso, o que permite grandes profundidades de estampagem. Outro fator favorável é o fato de permitir a regulação da pressão do óleo, permitindo usar apenas a força necessária do prensa-chapa e de modo controlado, prevenindo a formação de rugas (SECCO; AMARAL FILHO; OLIVEIRA, 2002).

Figura 11- Prensa hidráulica



Fonte: Adaptado de Secco, Amaral Filho e Oliveira (2002).

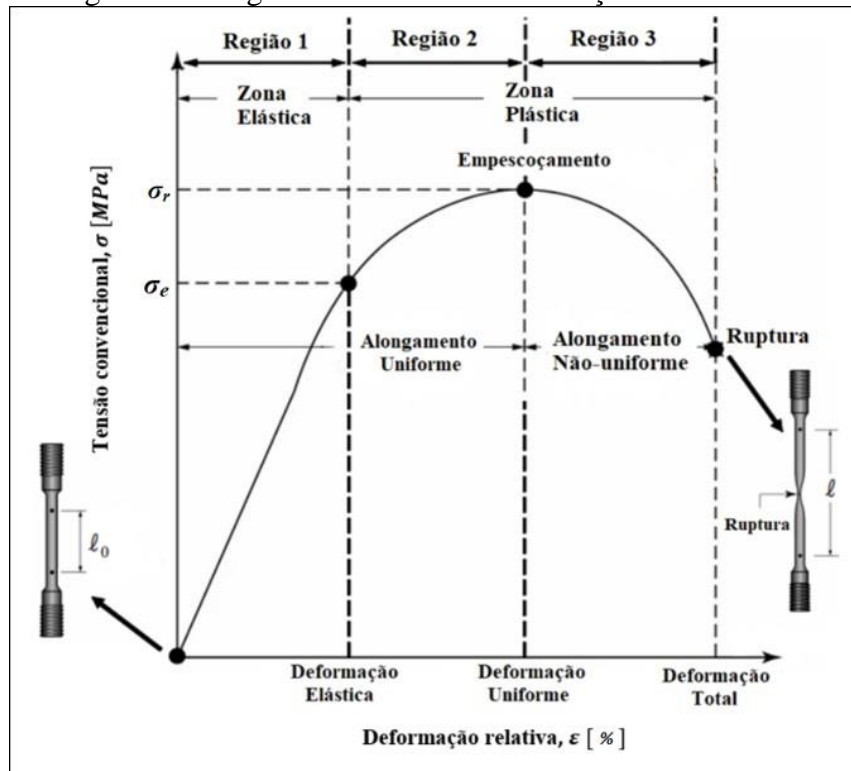
Como a estampagem profunda é um trabalho pesado e que ao mesmo tempo exige rigores de tolerância, as prensas hidráulicas utilizadas para essa função devem ser robustas, com grande rigidez, bom guiamento e movimentos executados com precisão. Além disso, em seu circuito hidráulico deve ter regulagem para ajuste de velocidade na alta pressão, favorecendo os diversos tipos de embutimento (PROVENZA, 1986).

2.5 DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO E CURVA DE ESCOAMENTO

Segundo Schaeffer (2004), o ensaio de tração é a forma mais usada para se determinar as propriedades mecânicas de chapas. Com ele pode-se determinar o limite de resistência (σ_r), o limite de escoamento (σ_e), o índice de anisotropia (r), o alongamento (Δl) e o grau de encruamento (n).

Chiaverini (1986) explica que no ensaio, a amostra recebe uma carga trativa crescente, de forma a sofrer uma deformação progressiva de aumento de comprimento. A partir da relação gerada entre a tensão aplicada e a deformação percentual resultante é gerado o diagrama “tensão- deformação”, com a deformação presente no eixo das abscissas e a tensão no eixo das ordenadas. A Figura 12, vista abaixo, apresenta um exemplo de um diagrama tensão-deformação convencional.

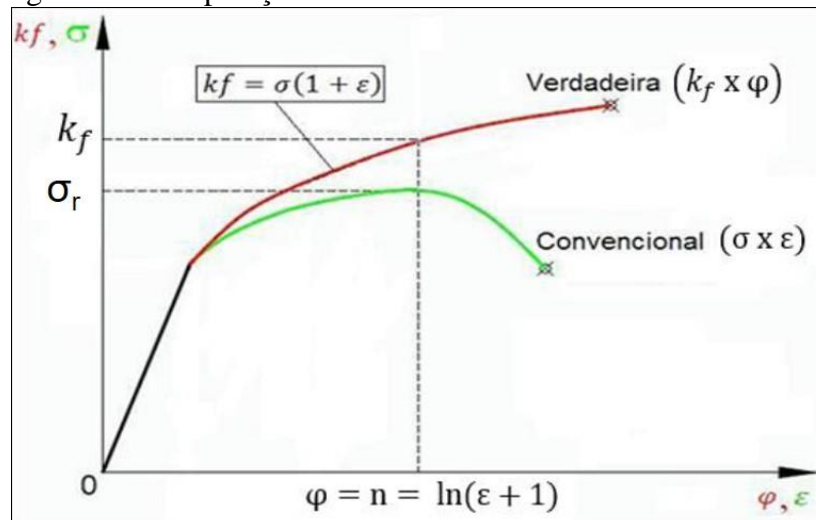
Figura 12- Diagramas de tensão- deformação convencional



Fonte: Adaptado de Rocha et al. (2022).

O diagrama tensão-deformação convencional, no entanto, não apresenta com precisão o comportamento real das tensões e deformações plásticas, uma vez que essas propriedades são aferidas, baseadas nas dimensões originais do corpo de prova, as quais se alteram ao longo de todo ensaio. Para tal, a curva de escoamento (curva verdadeira) relaciona a tensão verdadeira (k_f) e a deformação verdadeira (φ). Um comparativo entre a curva convencional e a verdadeira é apresentado abaixo, na Figura 13 (ROCHA et al., 2022).

Figura 13- Comparação entre a curva convencional e a verdadeira



Fonte: Adaptado de Rocha et al. (2022).

Ainda de acordo com Rocha et al. (2022), a tensão verdadeira é dada em função da força aplicada (F) sobre a área instantânea da seção transversal do corpo de provas (A_i), podendo ser reescrita em função da tensão convencional (σ) e da deformação relativa (ε), conforme apresentado abaixo na equação 24.

$$kf = \frac{F}{A_i} = \sigma * (\varepsilon + 1) \quad (24)$$

Já a deformação verdadeira é expressa, até a formação do pescoço, em função do comprimento inicial (l_0) e do comprimento instantâneo (l_i), podendo-se apresentar também em função da deformação relativa, conforme equação 25. Após a formação do pescoço, a equação 26, que correlaciona a área inicial (A_0) e a área instantânea.

$$\varphi = \ln(l_i/l_0) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (25)$$

$$\varphi = \ln(A_0/A_i) \quad (26)$$

A curva de escoamento pode ser traçada a partir de uma relação potencial, conhecida como Lei de Ludwik-Hollomon conforme informada pela da equação 27, descrita por Schaeffer (2004).

$$kf = C_m * \varphi^n \quad (27)$$

Onde C_m é a constante da tensão verdadeira do material para quando o φ vale 1, e n o coeficiente de encruamento.

Para se descobrir o valor de n pode-se utilizar a própria curva de escoamento de chapas, porém traçando essa curva em um diagrama com escala logarítmica nos eixos. Ao fazer isso, normalmente obtém-se uma reta, sendo n a tangente do ângulo formado entre a curva e o eixo horizontal.

2.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

De acordo com Gilat e Subramaniam (2008), métodos numéricos são técnicas matemáticas para resolver problemas difíceis ou que não podem ser resolvidos analiticamente.

Uma solução numérica é um valor aproximado para a solução, mas que pode ser muito preciso. Esse processo pode ser dividido em passos, sendo eles, sequencialmente, a declaração do problema, formulação da solução, programação da solução numérica e interpretação da solução.

No campo do embutimento profundo, um método de simulação numérica muito utilizado é o Método dos Elementos Finitos. Sarema, Matope e Sterzing (2021) apontam o MEF como um método viável para se reduzir os custos de métodos experimentais, que normalmente se dão por tentativa e erro. Com o método, os efeitos dos parâmetros na conformação são encontrados por simulação numérica e a experimentação pode ser feita para validar os resultados das simulações antes de se implementar os parâmetros otimizados. Além disso, a simulação no software ajuda a melhorar a qualidade do produto e a reduzir os defeitos das peças produzidas por estampagem. Simões (2012) destaca a importância do método, por ajudar a prever fenômenos como o rompimento, empenamento, rugas e retorno elástico que podem ocorrer durante o processo.

Blala et al. (2020) realizaram um estudo onde experimentaram diversos parâmetros e seus efeitos no embutimento profundo hidromecânico de um corpo cilíndrico feito de um material compósito de alumínio com fibras de vidro. Com o objetivo de encontrar as condições que fornecessem uma boa qualidade de conformação com maior profundidade, fizeram o uso de simulações numéricas e compararam com os testes práticos. Na conclusão de seu trabalho, afirmaram que os resultados das simulações numéricas apresentaram boa concordância com os resultados experimentais.


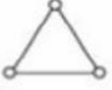


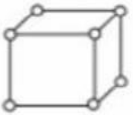
Gorji et al. (2011) também fizeram uso da simulação numérica e posterior experimentação prática. Em seu estudo, realizam o embutimento profundo hidrodinâmico de corpos cônico-cilíndricos de cobre puro, também buscando os parâmetros ideais para otimizar o processo. Ao final do trabalho, citam que pelo MEF obteve resultados concordantes com os experimentos, e apresentam ainda a configuração encontrada que gerou um aumento na taxa de estampagem e produz a peça desejada adequadamente.

Segundo Rodrigues e Martins (2005), o método dos elementos finitos consiste na discretização da peça, ou seja, divide a peça em um conjunto de partes de tamanhos muito pequenos, chamados de elementos. Após essa divisão, são aplicadas as equações de derivadas parciais que descrevem o comportamento macroscópico do material. Duarte (2007) vai além, e afirma que esses elementos que formam a estrutura apresentam pontos que os interconectam, chamados de nós, e que esses nós formam uma malha que compõe a superfície ou volume. Todos os elementos individualmente formados devem ficar dispostos de forma que haja uma continuidade de deslocamentos e de tensões ao longo da interface desses elementos. As tensões

internas e as cargas aplicadas de uns devem estar em equilíbrio com as dos outros e as condições de contorno devem ser satisfeitas.

Conforme Sirtoli (2013), existem famílias de elementos, que se distinguem umas das outras pelos tipos de geometria e pelo comportamento a ser representado. Essas famílias de elementos podem ser utilizadas na modelagem de uma grande variedade de peças e componentes. Os elementos podem ser bidimensionais, assumindo formas de um quadrilátero, triângulo, entre outros, ou tridimensionais contínuos, assumindo, entre outras formas, hexaedros ou tetraedros. Esses elementos ligam-se entre si a partir de qualquer uma de suas faces, formando distintas geometrias, submetidas aos mais variados tipos de cargas e carregamentos. Exemplos de elementos podem ser vistos a seguir, na Figura 14.

Figura 14- Tipos de elementos

Elemento	Nome
	Elemento linear 1D
	Elemento triangular 2D
	Elemento retangular 2D
	Elemento tetraédrico 3D
	Elemento hexaédrico 3D

Fonte: Adaptado de Kim e Sankar (2011).

De acordo com Duarte (2007), o MEF permite uma abordagem bi ou tridimensional, de acordo com a necessidade do nó em possuir 2 ou 3 graus de liberdade. Isto dependerá da dimensionalidade do problema ou pela simetria de cada análise. Outra consideração feita tem relação com os processos de estampagem. Nas interações que envolvem a matriz e o punção, ambos têm sua deformação negligenciada, ou seja, são considerados não deformáveis. Isto é aceitável levando em conta que suas deformações são muito pequenas em comparação com as deformações sofridas pela chapa.

No MEF aplicado a corpos sólidos, o cálculo das soluções é encontrado através do somatório das matrizes de rigidez individuais (k_i^e), pelo método da rigidez direta. Com isso, a matriz de rigidez da estrutura (k) é encontrada pela equação 28, vista abaixo (BATHE, 1996).

$$k = \sum_i k_i^e \quad (28)$$

De acordo com Bathe (1996), existem condições de contorno que restringem e atuam em cada um dos pontos nodais. Essas condições de contorno são usadas para se encontrar a solução dos deslocamentos. Elas então são aplicadas para se obter a matriz da rigidez. Com a matriz da rigidez e o deslocamento, é possível encontrar as forças nos nós, de acordo com a equação 29.

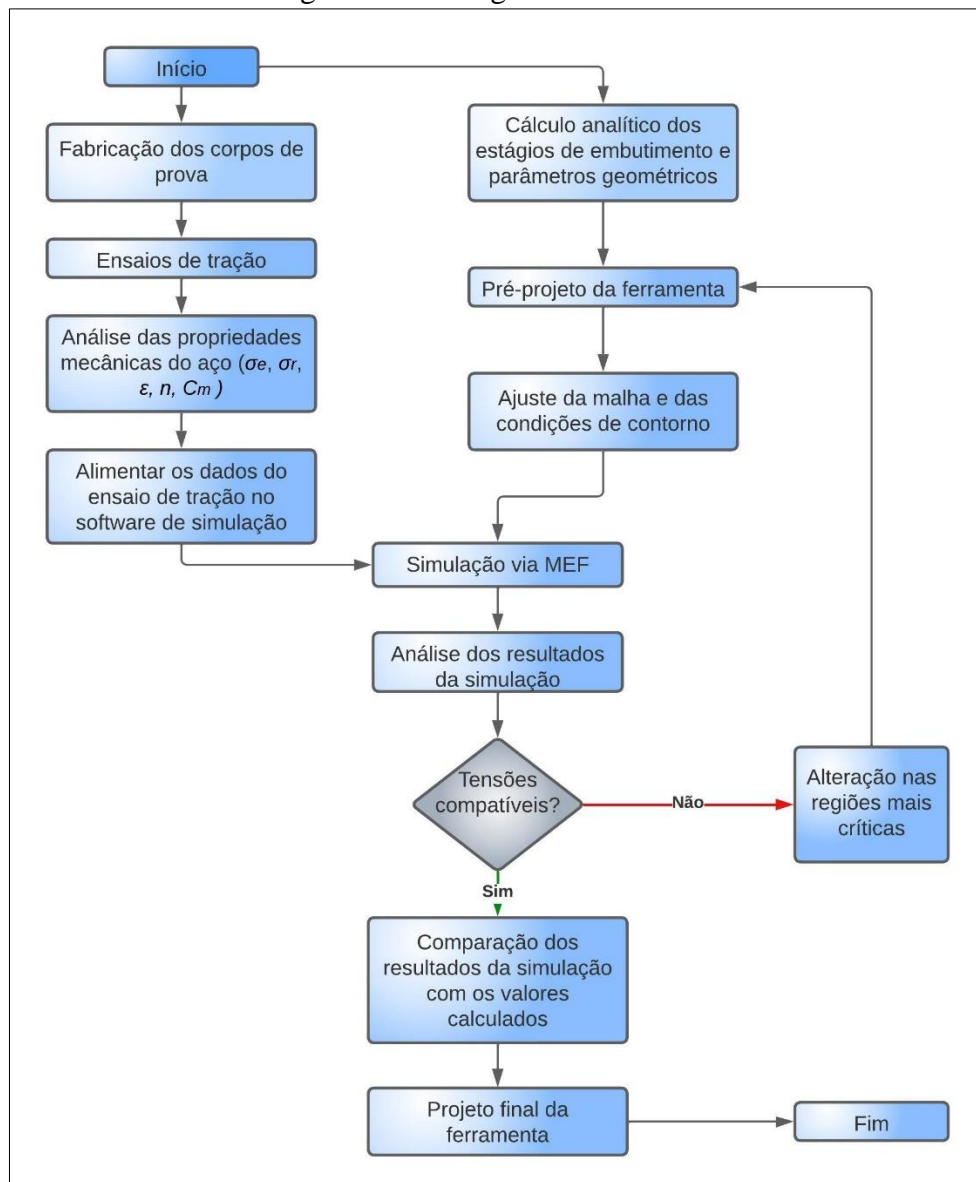
$$[k]\{U\} = \{R\} \quad (29)$$

Sendo U o vetor dos deslocamentos e R o vetor das forças.

3 METODOLOGIA E MATERIAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver o projeto das ferramentas necessárias para se produzir, por meio do embutimento profundo, o componente balde para garrafas. Para tal, foi necessária a realização de ensaios de tração para descobrir as propriedades da matéria prima utilizada. Foram também calculadas, de forma analítica, as dimensões geométricas dos estágios de embutimento, tanto do produto quanto do ferramental. Pelo método dos elementos finitos foram avaliadas as diversas variáveis do projeto e por fim é apresentado o referido projeto, como um todo. O desenvolvimento deste processo tomou como base o fluxograma da Figura 15, apresentado abaixo.

Figura 15- Fluxograma de trabalho

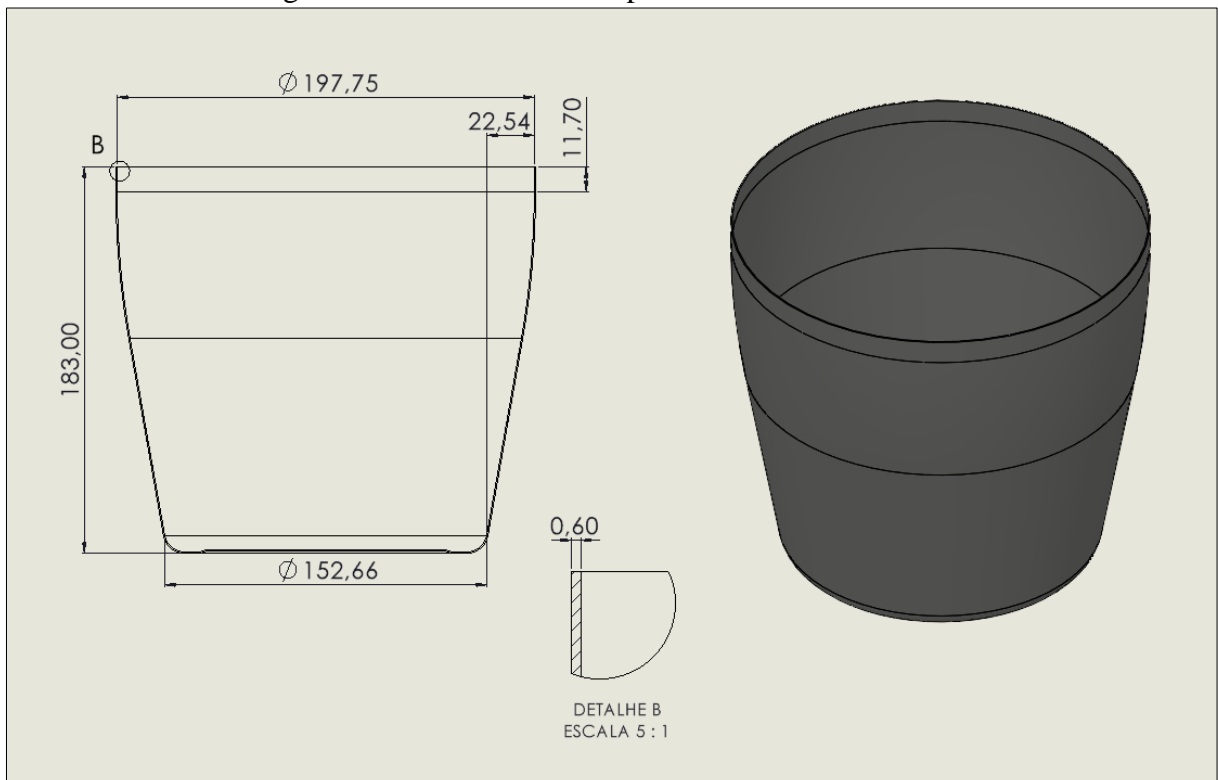


Fonte: O autor (2023).

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O balde para garrafas, que é produzido e comercializado pela empresa Brinox S.A., é feito de aço inoxidável AISI 304 e possui espessura de 0,6 mm. As principais dimensões do produto, como sua altura e diâmetros, estão dispostas a seguir, na Figura 16. As cotas apresentadas na figura encontram-se em milímetros.

Figura 16- Detalhamento do produto e vista isométrica



Fonte: O autor (2023).

A matéria-prima utilizada para a fabricação deste produto é fornecida pela empresa Aperam South America. A empresa informa em seu catálogo técnico a composição química do aço inox 304, com o percentual em peso, conforme pode ser visto abaixo, no Quadro 2. Os valores apresentados no quadro são os valores máximos de cada elemento que devem estar presentes, salvo onde uma faixa de valores é indicada.

Quadro 2- Composição química do aço inox 304

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N
Percentual	0,07	2,00	0,75	0,045	0,015	17,50 a 19,50	8,00 a 10,50	0,10

Fonte: Adaptado de Aperam South America (2022).

A Aperam South America (2022) apresenta ainda outras propriedades do aço inox 304. A empresa destaca como características importantes do inox 304, a sua excelente capacidade de conformação e suas ótimas propriedades mecânicas. Valores típicos para algumas dessas propriedades mecânicas informadas pela empresa podem ser vistas a seguir, na Tabela 2.

Tabela 2- Propriedades mecânicas do aço inox 304

Propriedade	Valor
Limite de escoamento (MPa)	280
Limite de resistência (MPa)	600
Alongamento 50 mm (%)	58

Fonte: Adaptado de Aperam South America (2022).

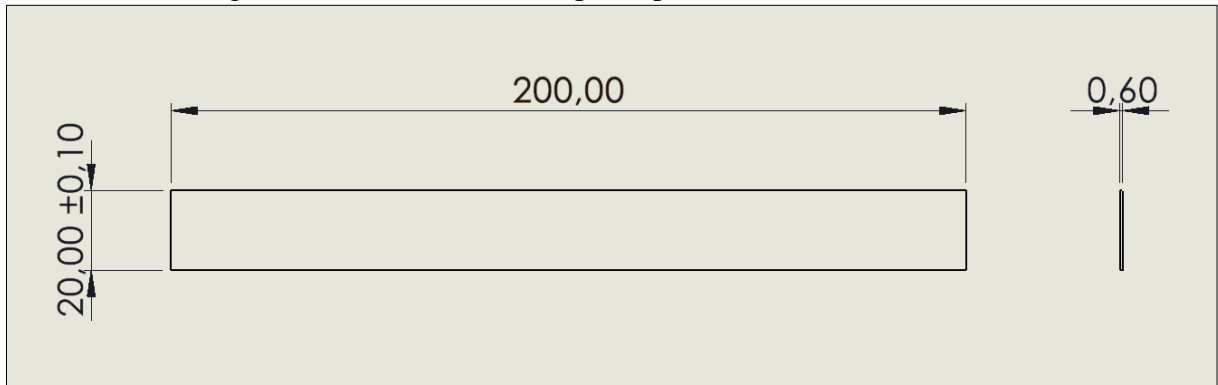
3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Como as propriedades do material informadas em catálogo pelo fornecedor não são suficientes para se avaliar o comportamento do material quando estampado, fez-se necessário determinar outras propriedades desse material. Para determinar as propriedades mecânicas do material, tais como o limite de escoamento, o limite de resistência, o alongamento e o coeficiente de encruamento, foi realizado um ensaio de tração. Além disso, os valores de tensão-deformação convencional, gerados no teste, foram usados para se encontrar os valores de tensão-deformação verdadeiras e serviram como um dado de entrada na simulação via software CAE.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de tração foram feitos com as dimensões de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6892-1 (2013). Esta norma estabelece os critérios para os testes de tração em materiais metálicos, e dentre as especificações presentes na norma, as dimensões dos corpos de prova para os ensaios encontram-se descritos na mesma (ver Anexo B). O formato do corpo de prova produzido é do tipo 2 (largura de 20 mm), retangular e sem rebaixo central. A Figura 17, vista na sequência, ilustra as dimensões para o corpo de prova que foram usados nos testes.

As amostras fabricadas foram cortadas em uma guilhotina, com um sobremetal de aproximadamente 1 mm para a posterior remoção da camada afetada pelo corte. Depois, ambas as laterais cisalhadas foram retificadas, e por fim foi dado o acabamento com uma lixa d'água de grão 2.000, onde se quebrou os cantos para se eliminar qualquer possível rebarba, que poderiam servir como concentradores de tensões e afetar no resultado final do teste.

Figura 17- Dimensões do corpo de prova utilizados nos ensaios



Fonte: O autor (2023).

Para o teste, foram produzidos corpos de prova para diferentes inclinações em relação ao sentido de laminação. Estas direções de corpos de prova servem para comparar as propriedades do material nestes diferentes sentidos, e então se encontrar o valor médio das propriedades.

Os ângulos dos corpos de prova utilizados nos ensaios foram -45° , 0° , 45° e 90° . No total foram feitas 4 amostras para cada uma das direções citadas anteriormente, somando um total de 16 peças para serem ensaiadas. O planejamento experimental de como os corpos de prova foram utilizados no ensaio encontra-se descrito na Tabela 3.

Tabela 3- Quantidades e utilização dos corpos de prova

Direção de laminação	Corpos de prova para teste de tração até a ruptura	Corpos de prova para o teste com o extensômetro	Total de corpos de prova para cada sentido de laminação
-45°	2	2	4
0°	2	2	4
45°	2	2	4
90°	2	2	4
Quantidade total de corpos de prova			16

Fonte: O autor (2023).

Os ensaios de tração foram realizados na Universidade de Caxias do Sul (UCS), no Laboratório de Ensaio Mecânicos. A máquina usada nos testes foi uma EMIC Modelo DL 20000, com capacidade de 20 toneladas. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 6673: 1981 a uma velocidade constante de 10,0 mm / min e com a temperatura de $23,5^\circ\text{C}$. A

Figura 18, apresentada abaixo, mostra o corpo de provas durante o ensaio com o uso de extensômetro.

Figura 18- Execução do ensaio de tração



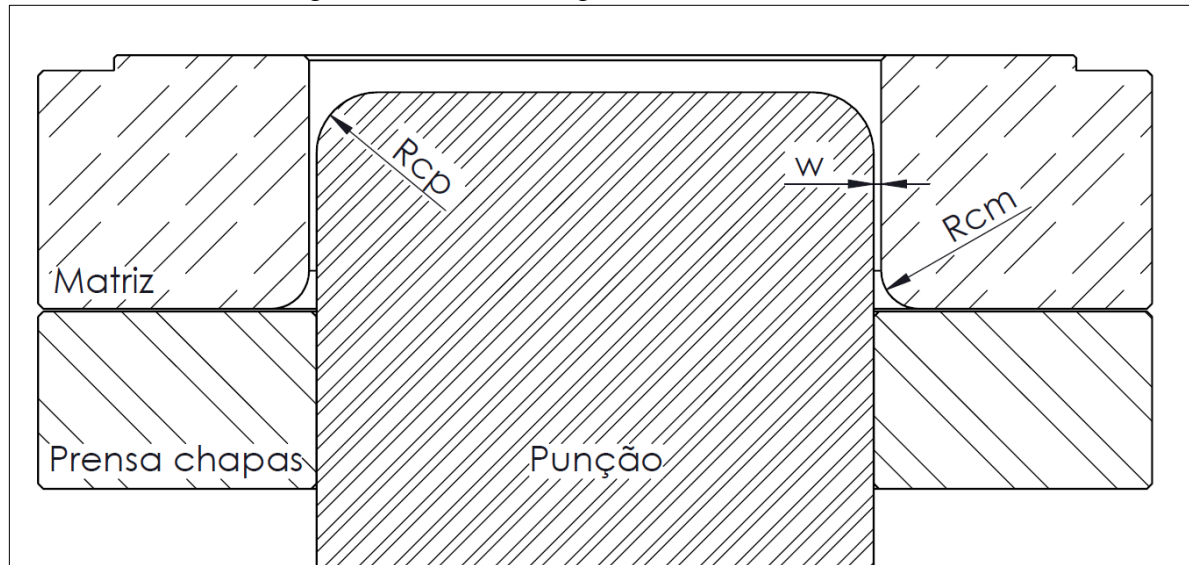
Fonte: O Autor (2023).

3.3 CÁLCULOS ANALÍTICOS

Com base nos conceitos e equações revisados no Capítulo 2 deste trabalho, foi feito o desenvolvimento analítico dos estágios de embutimento para o produto estudado neste trabalho. Dentre os valores que foram calculados incluem-se o dimensionamento dos diversos estágios do embutimento profundo, tais como as relações de estampagem, os diâmetros dos escalonados, a distância radial, as alturas das partes cilíndricas, as alturas dos embutimento, as profundidades de embutimento e alturas dos chanfros.

Além dos cálculos referentes às questões do produto, também foram calculadas a folga entre matriz e punção, o raio de entrada da matriz e o raio da ponta do punção. Esses parâmetros geométricos da ferramenta citados aparecem esquematicamente representados a seguir, na Figura 19.

Figura 19- Parâmetros geométricos da ferramenta



Fonte: O autor (2023).

3.4 SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A simulação numérica via método dos elementos finitos contempla essencialmente três etapas, sendo eles a etapa de pré-processamento, o processamento e o pós-processamento. A simulação foi realizada no software Abaqus CAE 2021 Learning Edition, da empresa Simulia, pertencente ao grupo Dassault Systemes S.A.

Na etapa de pré-processamento, de acordo com Duarte (2007), quatro blocos de informações devem ser informados, sendo eles a geometria, condições de contorno, carregamentos e resultados requeridos. Os tipos de carregamentos e as condições de contorno afetam na escolha dos elementos que formam a malha, e para se obter bons resultados uma boa escolha dos elementos que compõem a malha é fundamental.

Como método de integração foi escolhido o explícito. A escolha desse método se deu por conta da redução de tempo gasto no processamento quando comparado ao método implícito. Este ganho em processamento acontece devido a sua forma de solução, onde faz pequenos incrementos de tempo sem a resolução de um sistema acoplado de equações em cada incremento. Ou seja, o sistema calcula apenas o estado seguinte ao atual. Este é um método eficiente, por exemplo, para aplicações dinâmicas na qual estejam envolvidas não linearidades decorrentes da plasticidade do material (SIRTOLI, 2013). O método implícito, por outro lado, por não fazer simplificações e utilizar mais dos recursos computacionais, gera uma solução mais completa e natural do problema, e por isso demanda de mais tempo (ROSSI, 2007). Uma comparação entre ambos os métodos aparece descrita no Quadro 3.

Quadro 3- Comparação entre o método implícito e o explícito

Característica	Implícito	Explícito
Biblioteca de elementos	Extensa biblioteca de elementos	Apenas elementos aplicáveis a simulações explícitas
Procedimento de análise	Análise linear em geral	Todo tipo de análise linear e não linear
Modelos de materiais	Modelos em geral	Além dos modelos gerais, possíveis análises em modelos de falhas em materiais
Formulação de contato	Robusta capacidade de resolver problemas de contato	Robusta capacidade de resolver qualquer problema de contato
Técnica de solução	Baseada em uma matriz de rigidez incondicionalmente estável	Baseada em uma solução explícita de integração, é condicionalmente estável
Recursos computacionais	Em grandes simulações, o uso de memória pode ser alto	O uso de memória é tipicamente bem menor

Fonte: Adaptado de Sirtoli (2013).

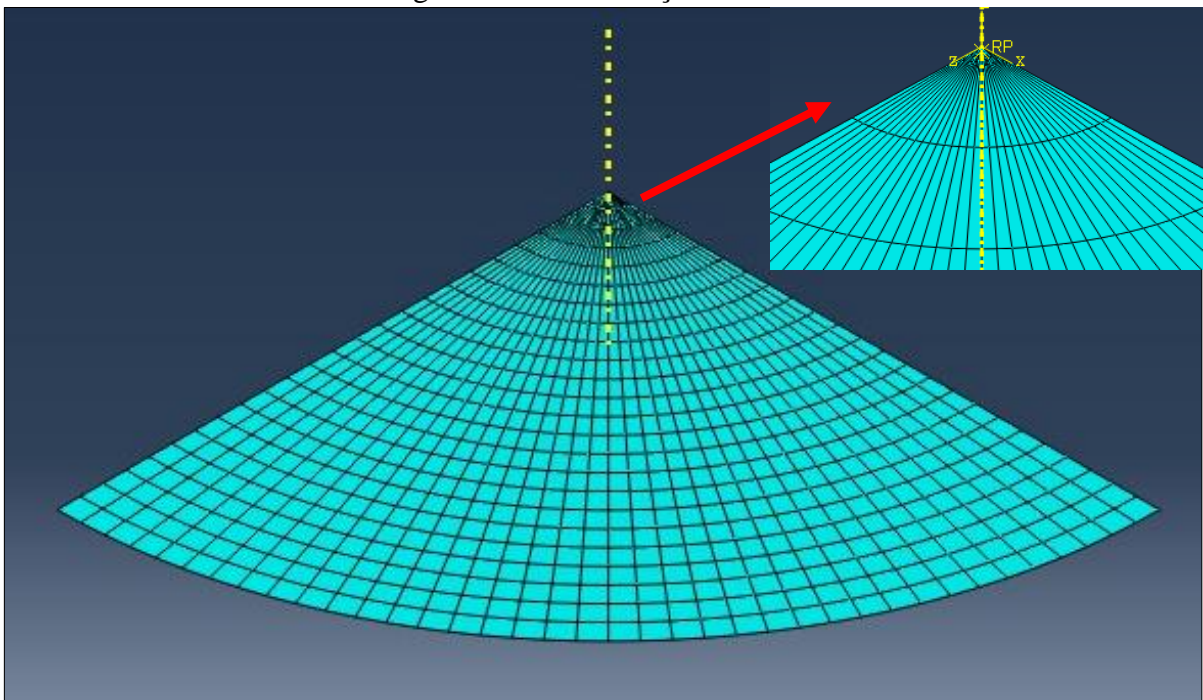
Para o primeiro estágio, o modelo geométrico foi construído com os recursos de modelagem do próprio software Abaqus CAE e utilizado como dado de entrada da parte geométrica. Nesta etapa, foi feito o pré-projeto, onde apenas as partes ativas da ferramenta (punção, matriz e prensa-chapa) foram inicialmente modeladas de forma simplificada. Esta primeira modelagem tomou como base os dimensionamentos encontrados a partir dos cálculos analíticos e foram sendo ajustados iterativamente de acordo com os resultados da simulação. Estas partes da ferramenta foram modeladas como sendo analiticamente rígidas.

Ainda no modelo geométrico, a geratriz foi modelada na forma de um quarto de chapa. Essa escolha foi possível pois o conjunto modelado possui geometria, carregamentos e condições de contorno axissimétricas. Além disso, na simulação, o material foi considerado isotrópico, o que permite que apenas uma parte da chapa seja simulada, pois o seu comportamento é o mesmo em todas as direções. Outra vantagem de não se usar a chapa inteira é o ganho no tempo de processamento, uma vez que a peça simulada torna-se menor. Além disso, por sua área diminuir consideravelmente, possibilita um maior refinamento da malha, pois a versão para estudantes do software limita o número de nós por simulação ao máximo de 1.000. Como o objeto de análise da simulação é a chapa, a mesma foi definida como

deformável, ao contrário das partes da ferramenta que são rígidas, e o seu modo de construção foi por *shell* (casca). Essa escolha construtiva também foi feita com o objetivo de aumentar o refino da malha, uma vez que elementos bidimensionais possuem menos nós que elementos tridimensionais.

O tipo de elemento escolhido para a chapa foi o S4R com tamanho aproximado de 8 mm. Segundo as definições do Manual do Abaqus (2023) esse elemento é uma casca duplamente curvada de quatro nós e integração reduzida. As demais peças, por serem construídas como analiticamente rígidas, não precisam ser discretizadas. A Figura 20, vista abaixo, apresenta a chapa na forma discretizada.

Figura 20- Discretização do disco



Fonte: O autor (2023).

Ainda no pré-processamento nas condições de contato *surface-to-surface*, foi definido um coeficiente de atrito de 0,08. Esse valor foi arbitrado com base nos estudos de Ju L. (2015 apud ATUL S; BABU, 2018), onde fez diversas simulações sobre acabamentos superficiais, lubrificação e seus efeitos. No estudo, chegou-se a esse valor de atrito considerando o uso de lubrificante por filme seco. Por fim afirmou ainda que esse tipo de lubrificante apresenta melhor lubrificação do que lubrificantes úmidos, com coeficiente de atrito de 0,12.

As propriedades mecânicas do material utilizadas na simulação, como o módulo de elasticidade (E) e o comportamento plástico, foram as encontradas nos testes de tração. A

densidade usada para o material foi de $8 \cdot 10^{-9}$ Ton/mm³, o módulo de elasticidade utilizado foi a média dos valores encontrados de E nos testes de tração, enquanto que o coeficiente de poisson foi definido como 0,3. Já o comportamento plástico do material foi definido por meio dos valores médios de Cm e n . Foram estabelecidos alguns valores de deformação verdadeira de 0 até a ruptura e fazendo uso da equação da Lei de Ludwik-Hollomon, foram encontradas as respectivas tensões verdadeiras para esses pontos. O Apêndice B apresenta uma tabela resumindo os valores declarados para o software, apresentando as equações utilizadas e a variação da tensão verdadeira empregada.

Nos carregamentos, foi calculada a força necessária no prensa-chapa. Esta força foi feita com base na recomendação de Rodrigues e Martins (2005), onde afirma que para aços inoxidáveis austeníticos, a pressão nominal exercida pelo prensa-chapa deve ser de 6,9 N/mm² (ver Anexo C). Ainda nos carregamentos, as condições de contorno foram indicadas. A matriz foi mantida fixa enquanto que o punção e o prensa-chapa foi permitida apenas movimentação no eixo y (vertical).

Para os demais estágios, o procedimento segue praticamente toda a mesma metodologia do primeiro estágio. O que muda nesses estágios posteriores é que a chapa não é modelada, e sim importada em seu estado deformado da simulação (*job*) anterior.

Como critério de falha para as tensões foi utilizado o recurso *Ductile Damage*, no qual o software simula o comportamento do material após a estrição, desde a tensão máxima até a sua ruptura. Bornancin (2023) explica que para se utilizar o referido recurso, são necessários informar ao software a deformação do início da estrição, a deformação na ruptura e um valor intermediário entre ambos. Além disso, os valores das tensões triaxiais (η), calculados a partir da equação 30, também devem ser atribuídos.

$$\eta = \frac{1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{1/\sqrt{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2]} \quad (30)$$

Caso o material rompa na simulação, alterações devem ser feitas e uma nova simulação deve ser executada. Apenas com a validação de uma operação, a próxima pode ser iniciada.

Após serem informados os dados de entrada e escolhida a malha inicia-se o processamento, que é a parte do cálculo propriamente dito, e é executado pelo software de simulação. Na resolução numérica, o software avalia as propriedades não lineares presentes em um embutimento profundo, considerando a presença de três não linearidades, conforme citado

por Boff (2019), que são a plasticidade, a geometria e o contato entre superfícies.

O estágio final da simulação é o pós-processamento, e nele são informados os dados de saída, ou seja, os resultados da análise feita pelo software. Com base nos dados fornecidos pelo software, foram feitas as averiguações necessárias dos resultados. Nos casos de falha, voltou-se ao estágio de pré-processamentos, avaliou-se o que podia ser mudado para melhorar o processo (geometria, carregamentos...) e executou-se uma nova simulação. Este processo iterativo foi repetido diversas vezes, até a validação do processo. Quando a simulação validava uma etapa, iniciava-se a etapa seguinte e assim sucessivamente até a validação de todas as etapas.

3.5 PROJETO DA FERRAMENTA

Após a validação do processo na simulação, foi feito o projeto final do ferramental necessário para se produzir o produto. Esta etapa foi desenvolvida com o uso do software de modelagem tridimensional CAD SolidWorks Professional 2021 SP2.0, também pertencente à empresa Simulia.

O ponto inicial do projeto fez uso do dimensionamento de punções, matrizes e prensa-chapa modelados no pré-projeto e utilizados nas simulações. Tais componentes ainda passaram por um refinamento, como por exemplo adicionar furos de rosca para parafusos, que são necessários para a montagem da ferramenta, mas que na fase da simulação não são necessários, sendo deixados de fora como uma forma de simplificação.

Além das peças modeladas no pré-projeto, os demais componentes da ferramenta também foram construídos virtualmente nesta etapa. Alguns dos demais componentes essenciais para a ferramenta e que foram modelados são: as bases inferior e superior e o sistema de guiamento do movimento (colunas e buchas). A escolha da classificação ao qual a ferramenta pertence (simples, combinada, progressiva), conforme definido por Provenza (1986), influenciou diretamente no projeto desses componentes. Por isso, fez-se necessário uma escolha criteriosa quanto ao tipo de ferramenta, pois essa escolha pode gerar ganhos tanto a nível de processo quanto de ferramenta.

Outra consideração que foi levada em conta no projeto é quanto a máquina que será destinada para o uso das ferramentas. Informações como as dimensões da mesa, forma de fixação da ferramenta, curso do martelo e altura mínima e máxima de ferramenta, na qual a máquina comporta, devem ser conhecidos. Se a ferramenta for dimensionada e exceder tais parâmetros, poderá gerar grandes retrabalhos na tentativa de adaptar a ferramenta para se

adequar aos requisitos suportados pela máquina. Em casos extremos poderá inclusive impossibilitar seu uso, por falta de equipamentos que comportem a ferramenta.

Outras questões expostas no Capítulo 2, como a forma de extração da peça, tanto da matriz quanto do punção, citados por Benazzi Junior e Caversan (2010) e os furos para entrada e saída de ar, comentados por Marcondes (2008), também foram contemplados no projeto. Foram ainda definidos os materiais de cada componente da ferramenta, de acordo com critérios de aço para ferramentas e matrizes de trabalho a frio, com o objetivo de prolongar a vida útil da mesma. A ferramenta também está dimensionada de forma que seja suficientemente rígida e resistente para suportar os esforços envolvidos no processo de embutimento profundo, para assim evitar-se o desgaste prematuro ou quebras de componentes.

Foi ainda observada a forma como cada componente será usinado e como será a montagem/ desmontagem da ferramenta. Tais considerações são importantes para simplificar o trabalho de ferramentaria/ matrizaria, tanto na montagem inicial da ferramenta, quanto em uma posterior manutenção, reduzindo o tempo e custos de mão de obra. A ferramenta também deve proporcionar um fácil manuseio, transporte e *setup*, com o objetivo de diminuir as perdas de produtividade por dificuldades para colocá-la trabalhar.

Uma última questão que foi levada em consideração é a economia. Evitar-se desperdícios de matéria prima e dimensionamentos exagerados diminui o custo de investimento inicial, reduz o tempo de retorno do investimento e torna o projeto economicamente mais viável.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados na forma de imagens, tabelas e gráficos os resultados encontrados nos cálculos analíticos, no ensaio de tração e na simulação do processo pelo software Abaqus CAE. Os resultados encontrados foram comparados às referências bibliográficas, bem como discutido sobre os resultados da simulação.

4.1 DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO

Conforme a equação 2 do Capítulo 2 determinou-se o diâmetro da geratriz. O valor calculado foi de 390 mm, valor que foi utilizado no restante dos dimensionamentos. O diâmetro calculado ficou muito próximo aos 395 mm, diâmetro atual utilizado na fabricação deste produto. Na sequência foi calculada a distância radial entre os diâmetros do cone, conforme equação 7, e obteve-se o valor de 22,55 mm.

O valor da relação de estampagem admissível calculada para o primeiro estágio foi 1,82, ficando de acordo com os valores apresentados para o aço inox na Tabela 1. Com base nas relações de estampagem admissíveis, ficou estabelecido que para se atingir o diâmetro final da peça são necessárias 3 operações de embutimento profundo. Com isso, foram calculados os diâmetros dos cilindros escalonados, conforme as equações 8 e 9. Os dados calculados para os diâmetros dos escalonados e para as relações de estampagem aparecem explicitados na Tabela 4.

Tabela 4- Diâmetros e relações de estampagem recalculados

	Diâmetros (mm)	β
D	390	-
d_1	215	1,81
d_2	180	1,19
d_3	152,66	1,18

Fonte: O autor (2023).

Seguindo com as recomendações de Provenza (1987), conforme expressas no Capítulo 2, o passo seguinte para o dimensionamento do embutimento em etapas de componentes cônicos são as alturas das partes cilíndricas. Sequencialmente, deve-se dimensionar também as alturas de embutimento, as alturas dos chanfros e as profundidades de embutimento. A Tabela

5, apresentada a seguir, mostra os valores calculados para todas essas variáveis em cada um dos estágios de embutimento.

Tabela 5- Dimensionamento das alturas dos cilindros escalonados

Estágio	h_i (mm)	H_i (mm)	c_i (mm)	p_i (mm)
1	0	116,53	17,5	134,03
2	62,93	147,95	8,88	170,50
3	96,93	96,93	13,67	182,40

Fonte: O autor (2023).

Na sequência, os parâmetros geométricos da ferramenta foram determinados. Para esses parâmetros foram feitos os cálculos de três formas diferentes, seguindo a metodologia indicada por cada um dos autores citados no Capítulo 2.3.1. Esses valores calculados constam na Tabela 6.

Tabela 6- Parâmetros geométricos da ferramenta

Parâmetro	R_{cm1} (mm)	R_{cm2} (mm)	R_{cm3} (mm)	R_{cp} (mm)	w (mm)
Schaeffer (2006)	6,1	3,1	3,8	3,0 a 3,6	0,85
Rodrigues e Martins (2005)	3,6 a 6,0	3,6 a 4,8	3,6 a 4,8	4,7 a 7,1	0,77
Provenza (1987)	8,2	17,5	13,7	7,6	0,72

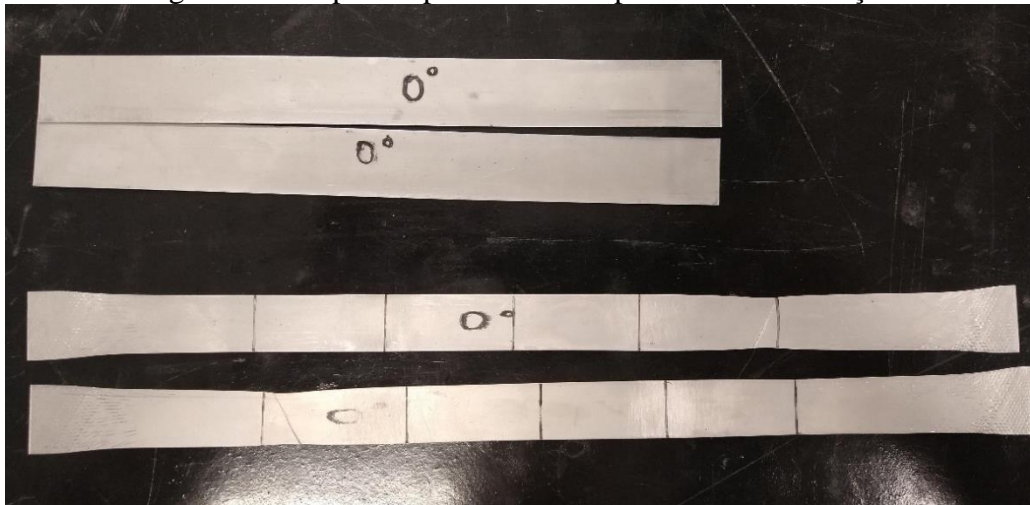
Fonte: O autor (2023).

Para a primeira simulação, o modelamento de punção e matriz foram construídos com os parâmetros geométricos descritos anteriormente, seguindo os cálculos apresentados por Schaeffer (2006).

4.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO E PROPRIEDADES DO MATERIAL

A forma utilizada para determinar as propriedades mecânicas do material foi através da realização de ensaios de tração. A Figura 21 mostra um comparativo entre os corpos de prova antes e após os testes.

Figura 21- Corpos de prova antes e após o ensaio de tração



Fonte: O autor (2023).

Conforme apresentado no Anexo D, foram determinadas as propriedades mecânicas para cada uma das inclinações em relação ao sentido de laminação do material. Os valores encontrados para o alongamento, limite de escoamento, limite de resistência e módulo de elasticidade encontram-se dispostos abaixo, na Tabela 7.

Tabela 7- Propriedades mecânicas do material

Direção de laminação	Alongamento (%)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
-45°	63,3	268	639	181724
0°	53,0	284	693	182741
45°	63,0	268	645	174675
90°	68,5	266	652	175728
Média	61,95	271,5	657,3	178717

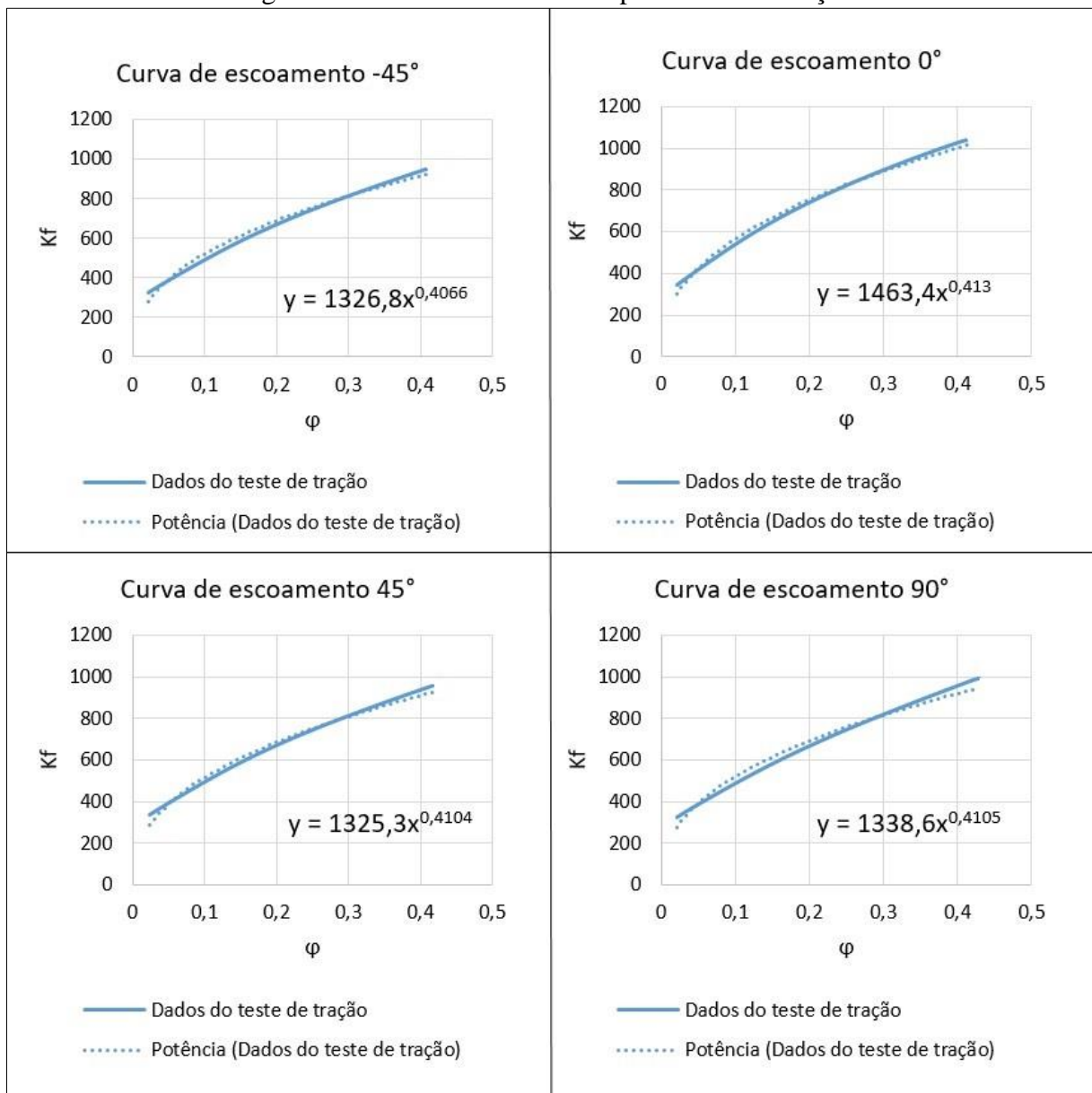
Fonte: O autor (2023).

A média dos dados encontrados para o alongamento e para o limite de resistência ficaram acima dos valores típicos indicados em catálogo pelo fornecedor do material. Já com o limite de resistência ocorreu o oposto, ficando abaixo ao informado pela empresa. No entanto, em nenhum caso a média dos valores encontrados excedeu a 10% de diferença em relação aos números apresentados em catálogo, o que é um indicativo de uma boa aproximação entre ambos.

Do ensaio de tração foi gerado também uma tabela informando as deformações, em milímetros, e as forças, em Newton, registradas ao longo de todo o teste. Com os valores das

forças foram descobertas as tensões convencionais correspondentes a cada uma das deformações. Com os pontos das tensões e deformações convencionais, foram calculados os valores das tensões e deformações verdadeiras, e plotado os diagramas de tensão- deformação com o auxílio de uma planilha eletrônica do software Excel 2013 (ver Apêndice A). Após isso, ainda com o uso do Excel, foram plotadas também as curvas de escoamento. Por fim, com o recurso de linha de tendência de potência, foram geradas as equações das linhas de tendência, sendo essas equações que descrevem o comportamento plástico do material. As curvas de escoamento geradas, com suas respectivas linhas de tendência e equações que a descrevem estão apresentadas abaixo, na Figura 22.

Figura 22- Curva de escoamento para cada inclinação



Fonte: O autor (2023).

As equações das linhas de tendência dadas pela planilha eletrônica são equivalentes à equação 27, apresentada no Capítulo 2. Sendo assim, y é a tensão verdadeira, x é a deformação verdadeira, o expoente de x é o coeficiente de encruamento n e a constante que aparece multiplicando x é a constante da tensão verdadeira do material C_m . Um comparativo entre os dados do autor para C_m e n descobertos a partir do ensaio de tração e os valores encontrados de forma semelhante por outros autores aparecem dispostos abaixo, na Tabela 8.

Tabela 8- Comparativo de valores da constante de tensão verdadeira e índice de encruamento

Fonte	Orientação	n	C_m
Dados de teste do autor	0°	0,41	1463,4
	45°	0,41	1326,1
	90°	0,41	1338,6
	Média	0,41	1376,0
Rocha et al. (2022)	0°	0,41	1464,1
	45°	0,39	1382,2
	90°	0,41	1449,7
	Média	0,40	1432,0
Toit e Steyn (2011)	0°	0,41	1481
	45°	0,42	1370
	90°	0,41	1395
	Média	0,41	1415,3

Fonte: O autor (2023).

Pelos dados apresentados, nota-se que o coeficiente de encruamento ficou próximo aos valores encontrados pelos outros autores. Rodrigues e Martins (2005) também afirma que para o aço inox 304 o valor do coeficiente de encruamento deve ficar entre 0,4 e 0,5. Já a constante da tensão verdadeira encontrada ficou ligeiramente abaixo dos valores dos demais autores. A diferença percentual, no entanto, não excede os 5%.

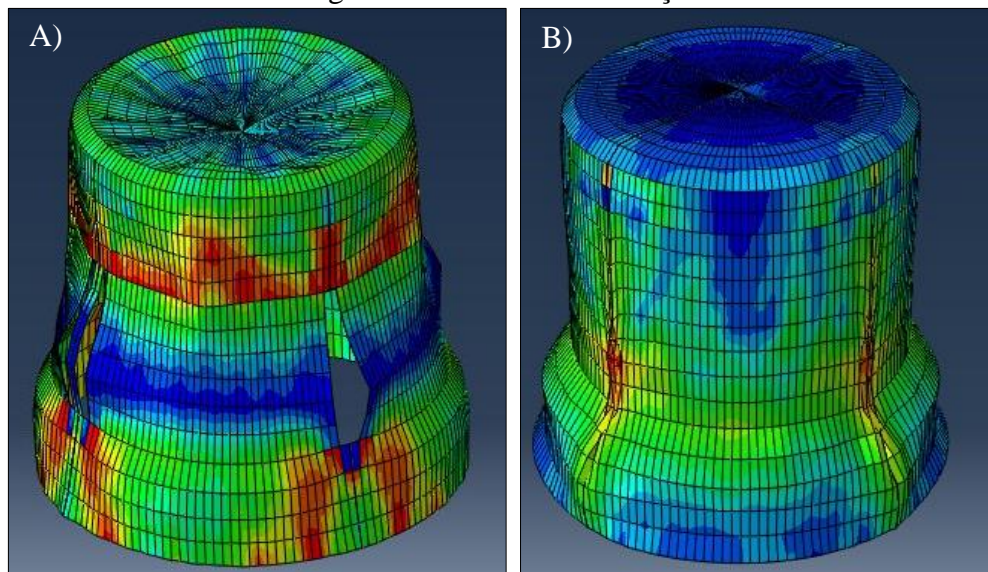
4.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Os primeiros resultados da simulação evidenciaram duas coisas. Uma delas é que a primeira redução de diâmetro não poderia ser até os 215 mm previstos inicialmente, sendo possível reduzir, neste primeiro estágio, até o diâmetro de 235 mm. Um fator que pode ser o

grande causador dessa redução abaixo do indicado pelos autores é a grande relação existente entre o diâmetro da geratriz e a sua espessura. O segundo ponto que a simulação evidenciou é que o ponto mais crítico, onde na maioria das vezes ocorreu a ruptura do material, é no raio do canto da matriz, e que o aumento do mesmo ajudou a diminuir essas tensões.

Outro ponto comum de falha durante a simulação foi durante a operação final de calibração, onde ao longo da distensão da peça também ocorria a ruptura. Isto pode ser explicado com a colocação de por Provenza (1987), onde afirma que para essas operações de embutimentos escalonados a redução do diâmetro deve ser menor que em embutimentos cilíndricos puros, pois pode sobrecarregar o material. Com isso, conclui-se que o material ficou sobrecarregado ao longo das reduções. Um exemplo de uma ruptura que ocorreu na simulação ao longo desta operação pode ser visto na Figura 23 A. Também ocorreram falhas pelo surgimento de rugas durante a simulação. A Figura 23 B apresenta um caso onde ocorreu o surgimento dessas rugas.

Figura 23- Falhas na simulação



Fonte: O autor (2023).

Uma solução encontrada para evitar-se o rompimento na simulação e mantendo-se as quatro operações de embutimento planejadas inicialmente foi considerar operações de recozimento entre as operações. Schaeffer (2004) explica que existem duas formas de recozimento, sendo um apenas para alívio de tensões e o outro para recristalização. No primeiro caso, não ocorre alteração na microestrutura, uma vez que ocorre a temperaturas mais baixas, servindo apenas para aliviar as tensões internas do material geradas pela deformação. Chiaverini (2005) explica que este recozimento costuma ser utilizado na estampagem profunda,

uma vez que a deformação a frio do processo gera muitas tensões. No entanto, ressalta que o aquecimento da peça deve ser controlado e dentro de certos parâmetros, a fim de que não se modifique a estrutura interna e nem se produzam alterações sensíveis de suas propriedades mecânicas. No segundo tipo de recozimento, ocorre o crescimento e surgimento de grãos novos, gerando uma microestrutura totalmente nova. Com isso, o encruamento é totalmente removido e as propriedades do material retornam ao original do aço, antes de qualquer deformação. Para a simulação foi considerado o primeiro caso, onde as propriedades do material serão novamente as iniciais, iguais ao encontrado no ensaio de tração do material, e com tensões internas do material adquiridas nas operações anteriores sendo zeradas. A geometria, no entanto, continua sendo importada da simulação anterior, ou seja, os alongamentos e deformações do material continuam presentes. Foram considerados dois recozimentos, o primeiro após a operação mais crítica, que é a primeira, e o segundo antes da operação de calibração.

Uma forma para se executar esse recozimento é a partir do aquecimento por indução. A indução promove um rápido aquecimento na peça, atingindo a temperatura necessária para o alívio de tensões em pouco tempo. Já o resfriamento da peça pode ser feito em temperatura ambiente, deixando a peça refrigerar ao natural em um ambiente não controlado. Dessa forma, o resfriamento da peça irá ocorrer de forma relativamente rápida, o que servirá para que não ocorra a recristalização ou significativas alterações na microestrutura. A Figura 24 apresenta um exemplo de um componente passando pela operação de recozimento descrita acima.

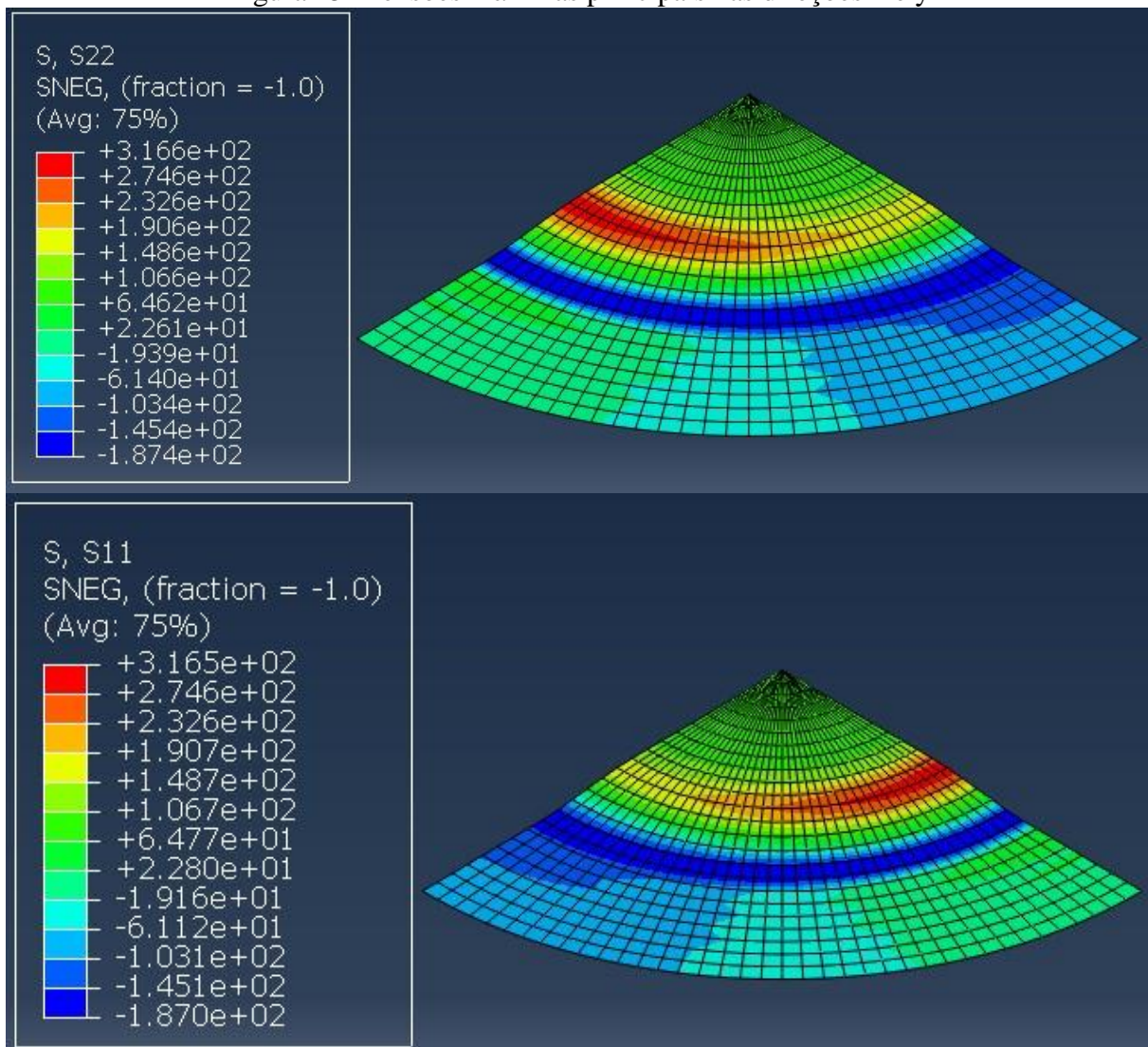
Figura 24- Recozimento por indução



Fonte: O autor (2023).

Para validar a utilização de um quarto de chapa e a simetria do processo, foi comparado a tensão máxima principal nas direções x e y no *step time* onde primeiramente o regime plástico está presente. Conforme pode ser visto na Figura 25, para o mesmo instante de tempo, as tensões máximas em ambas as direções apresentam valores muito próximos, com as diferenças de valores ficando apenas nas casas decimais. Isso indica que ao longo de toda uma circunferência da chapa, onde esteja a mesma distância radial do centro, a transição do regime elástico para o plástico ocorre praticamente no mesmo instante. Este é o demonstrativo da existência de axissimetria dos carregamentos e de geometria, nesses casos para a realização da simulação sem utilizar todo o diâmetro da chapa.

Figura 25- Tensões máximas principais nas direções x e y

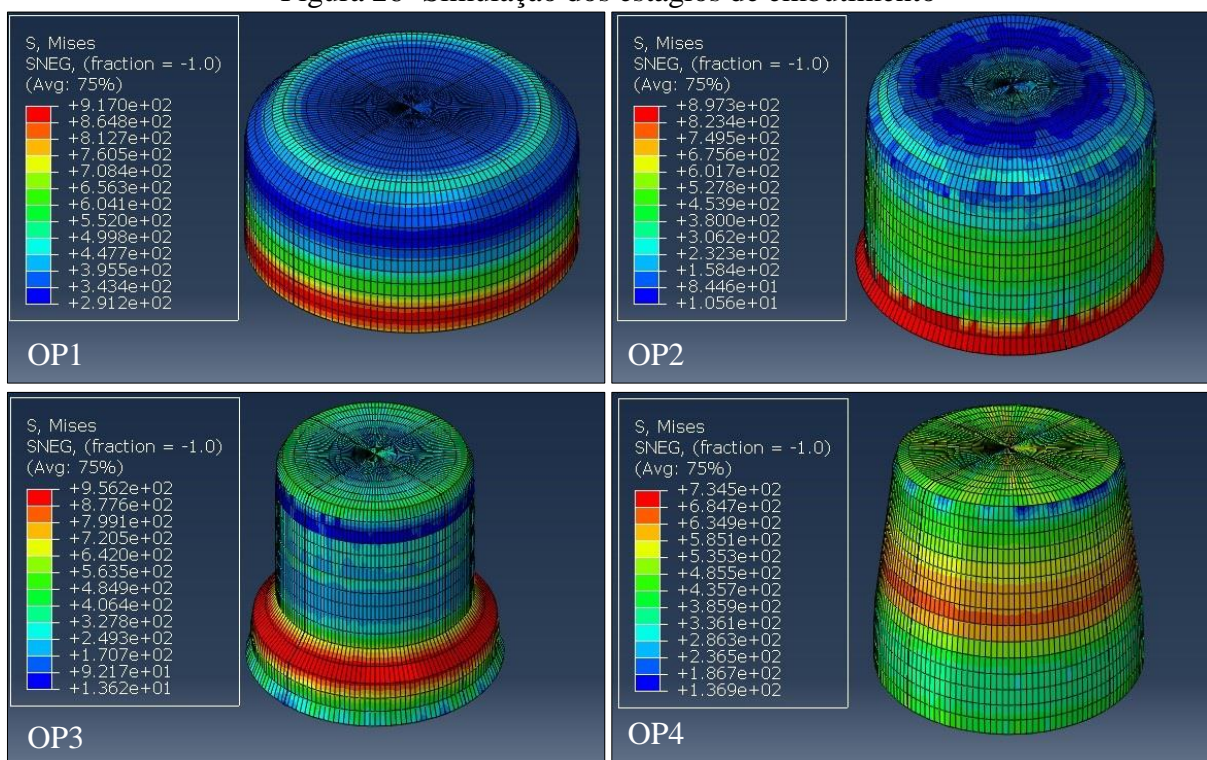


Fonte: O autor (2023).

Os resultados finais das quatro operações aparecem abaixo, na Figura 26. É possível se

observar como nas operações de embutimento profundo, a região com as maiores concentrações de tensão foram próximo e no próprio raio de entrada da matriz. A Figura 2 ajuda a explicar esses resultados, pois nestas regiões múltiplas tensões estão agindo, como a compressão circunferencial devido a redução de diâmetro, a tração radial, além de estar sofrendo pressão com a atuação do prensa-chapa. Além disso, a passagem do material pelo raio também gera grandes tensões, o que faz com que o material siga muito tensionado mesmo após já ter entrado na matriz.

Figura 26- Simulação dos estágios de embutimento



Fonte: O autor (2023).

Como ao longo da simulação foi feito um processo iterativo de alterações de parâmetros sempre que a simulação resultou em falha, os parâmetros geométricos e o dimensionamento dos estágios ficaram diferentes aos calculados inicialmente. Para essa simulação, o resultado final do dimensionamento dos estágios de embutimento, bem como dos parâmetros geométricos, aparecem descritos abaixo, na Tabela 9.

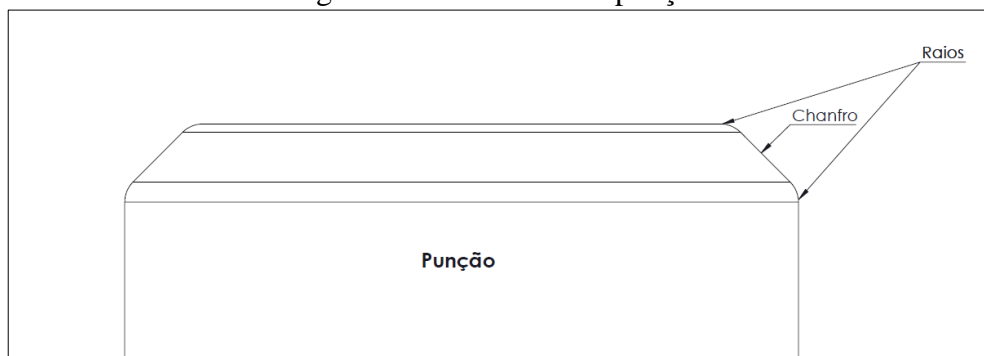
Tabela 9- Dimensionamentos encontrados na simulação

Parâmetro	Valor para cada estágio		
	1	2	3
D (mm)	390		
d_i (mm)	235	190	152,66
β_i	1,66	1,24	1,24
c_i (mm)	22,5	3,9	18,7
h_i (mm)	0	27,2	132,4
H_i (mm)	94,7	140,2	132,4
p_i (mm)	117,2	162,7	182,4
r_{cmi} (mm)	12	6	6
r_{cpi} (mm)	8	8	9,5
w (mm)	0,85	0,85	0,85

Fonte: O autor (2023).

Os dimensionamentos dos estágios de embutimento ficaram todos diferentes aos dos cálculos analíticos pois já no primeiro estágio houve mudanças, o que acarreta em alterações em todos os demais estágios. Nos parâmetros geométricos, o valor que mais destoa em relação ao calculado é do raio de entrada da matriz no primeiro estágio, em função da redução das tensões que o aumento do mesmo proporciona. O raio de canto do punção apresentou menor influência no processo. Isso muito provavelmente deve-se ao fato de que, com exceção da terceira operação, as demais possuem o punção com a ponta em formato de chanfro. Com isso, os raios ficam presentes apenas na transição dos chanfros conforme exemplificado na Figura 27. Como consequência desta geometria, o tamanho do chanfro possui maior influência do que os raios de concordância.

Figura 27- Geometria do punção



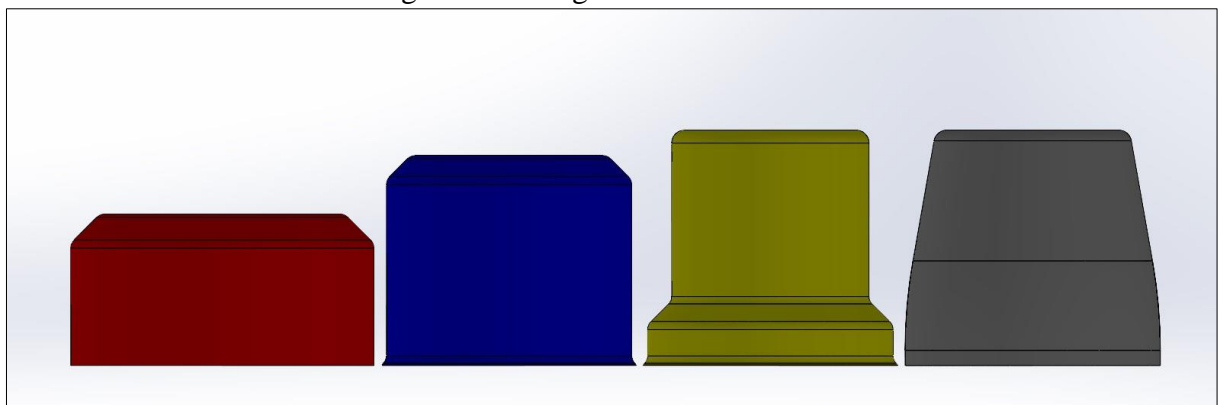
Fonte: O autor (2023).

Outras soluções também foram buscadas a fim de se eliminar estes tratamentos térmicos existentes entre as operações. Como exemplos de outras alternativas buscadas, foi simulado aumentar o número de operações de quatro para cinco e também testou-se reduzir a altura do produto, com conseqüente redução de tamanho de blanche. Entretanto, em nenhuma das tentativas acima descritas, foi possível atingir-se o resultado final proposto sem considerar um ou mais tratamento de recozimento entre algum dos estágios. Com isso, optou-se por apresentar como resultado final os resultados da simulação acima descritos, mantendo-se assim a geometria inicial proposta para o produto. Além disso, mantendo-se o número de operações de embutimento profundo em quatro, não se aumenta o custo de investimento inicial para se produzir a ferramenta.

4.4 MODELAMENTOS E PROJETOS

O início do projeto do ferramental começou a partir dos resultados da simulação. Para tal, foram considerados os dados da Tabela 9. Fazendo uso do software de modelagem 3D SolidWorks, foram modelados os estágios de embutimento do produto. A Figura 28, apresentada na sequência, mostra comparativamente cada etapa ao qual o produto passará até estar em seu formato final. Em vermelho está representado o primeiro estágio, sendo sucedido pelo segundo, em azul, e após pelo terceiro, em amarelo, com a geometria final do produto sendo representada em prata.

Figura 28- Estágios de embutimento



Fonte: O autor (2023).

A categoria ao qual cada ferramenta irá pertencer também influenciou no seu dimensionamento. A primeira operação será da categoria simples, assim como operação de calibragem. Já a segunda e a terceira operação pertencerão à mesma ferramenta, sendo da classe

combinada. Essa escolha foi feita por conta, principalmente, dos tratamentos térmicos existentes. Como entre a segunda e a terceira operação não existe nenhum tratamento térmico, elas podem pertencer à mesma ferramenta, para que a cada acionamento da prensa as duas operações sejam executadas em simultâneo. Já as demais operações necessitam ocorrer de forma isolada pois estas operações são precedidas ou sucedidas pelo tratamento térmico de recozimento.

A máquina escolhida para o uso dessa ferramenta é uma prensa hidráulica de duplo efeito, da marca Mahnke modelo 315.175.1600-1300, conforme na Figura 29. Esta prensa possui capacidade no martelo para até 3150 kN, com uma distância máxima entre mesa e martelo de 1.100 mm e um curso de 1.000 mm. Os pinos da almofada atingem uma altura de 450 mm, possuindo uma pressão de trabalho de 1750 kN, e o tamanho da mesa e do martelo comportam ferramentas com até 1.600 mm na largura e 1300 mm no comprimento.

Figura 29- Prensa hidráulica Mahnke 315 Ton



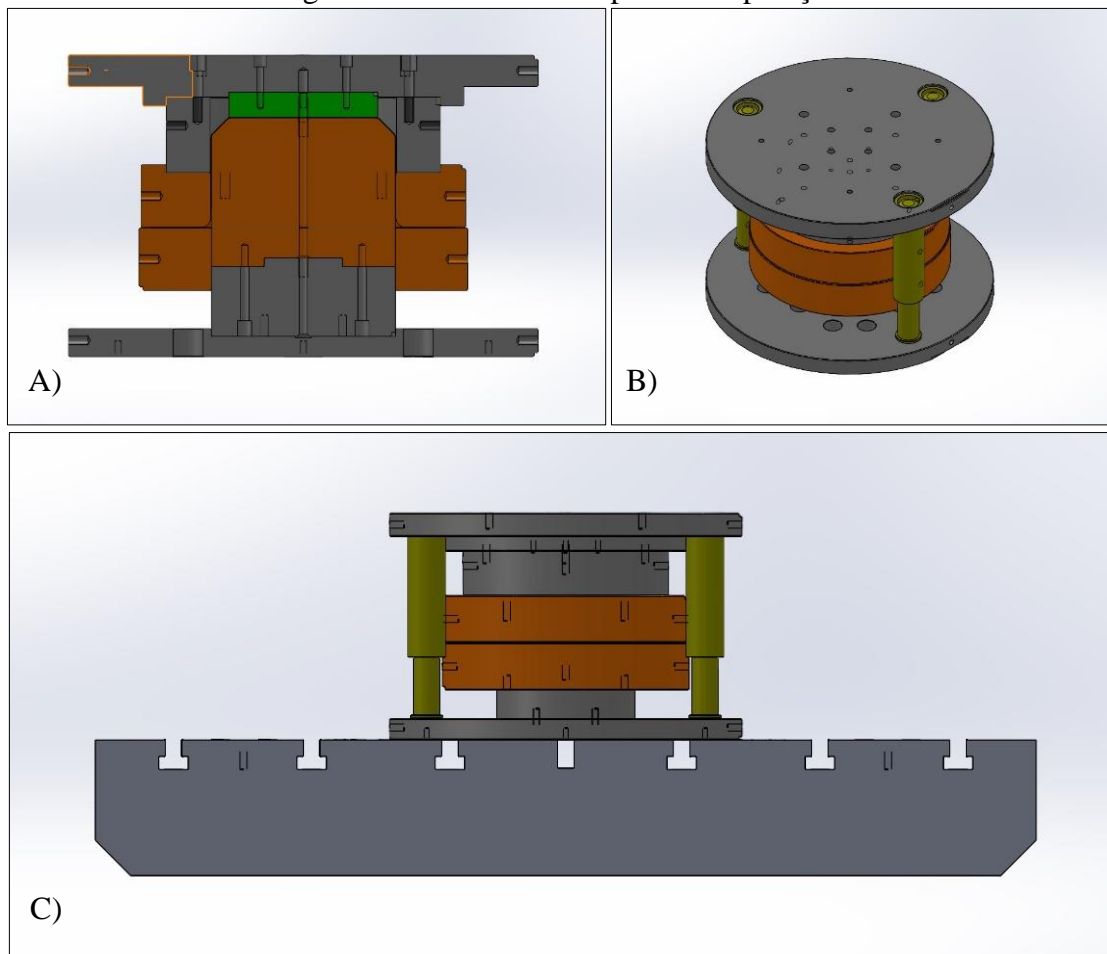
Fonte: O autor (2023).

O conceito escolhido para a ferramenta apresenta o punção preso na parte inferior e a matriz preso na parte móvel (superior), junto ao martelo (ver Apêndices C, D e E). Com isso, o prensa-chapa fica na parte de baixo, suspenso pelos pinos da almofada, que também proverão a força que o prensa-chapas necessita. A vantagem dessa configuração é que dispensa o uso de molas ou cilindros de nitrogênio. Além disso, a almofada possui regulagem de pressão, o que favorece no ajuste do processo para encontrar a pressão ideal, e ainda apresenta a mesma

pressão ao longo de todo o curso, ao contrário de molas, que aumentam sua força com o aumento da compressão, o que pode ser desfavorável para o processo. A fixação das ferramentas nesta prensa é feita com o uso de grampos, portanto a altura das bases, tanto superior, em contato com o martelo, quanto inferior, que vai sobre a mesa, terão suas espessuras definidas de acordo com a altura que os grampos da máquina atingem.

Para a primeira operação, o posicionamento do blanque é feito por pinos, que servem de batente e centram o disco na posição correta. A extração da peça do punção é executada pela subida do prensa-chapas, enquanto que a extração da matriz é garantida por uma mangueira de ar comprimido acoplada ao furo de entrada de ar da matriz, e é acionada ao final do processo de embutimento. A Fig. 30 A apresenta uma vista frontal em corte da ferramenta, já a Fig. 30 B mostra uma vista isométrica, enquanto que na Fig. 30 C é representado o posicionamento da ferramenta sobre a mesa da prensa. Mais informações sobre esta ferramenta são apresentadas no Apêndice C.

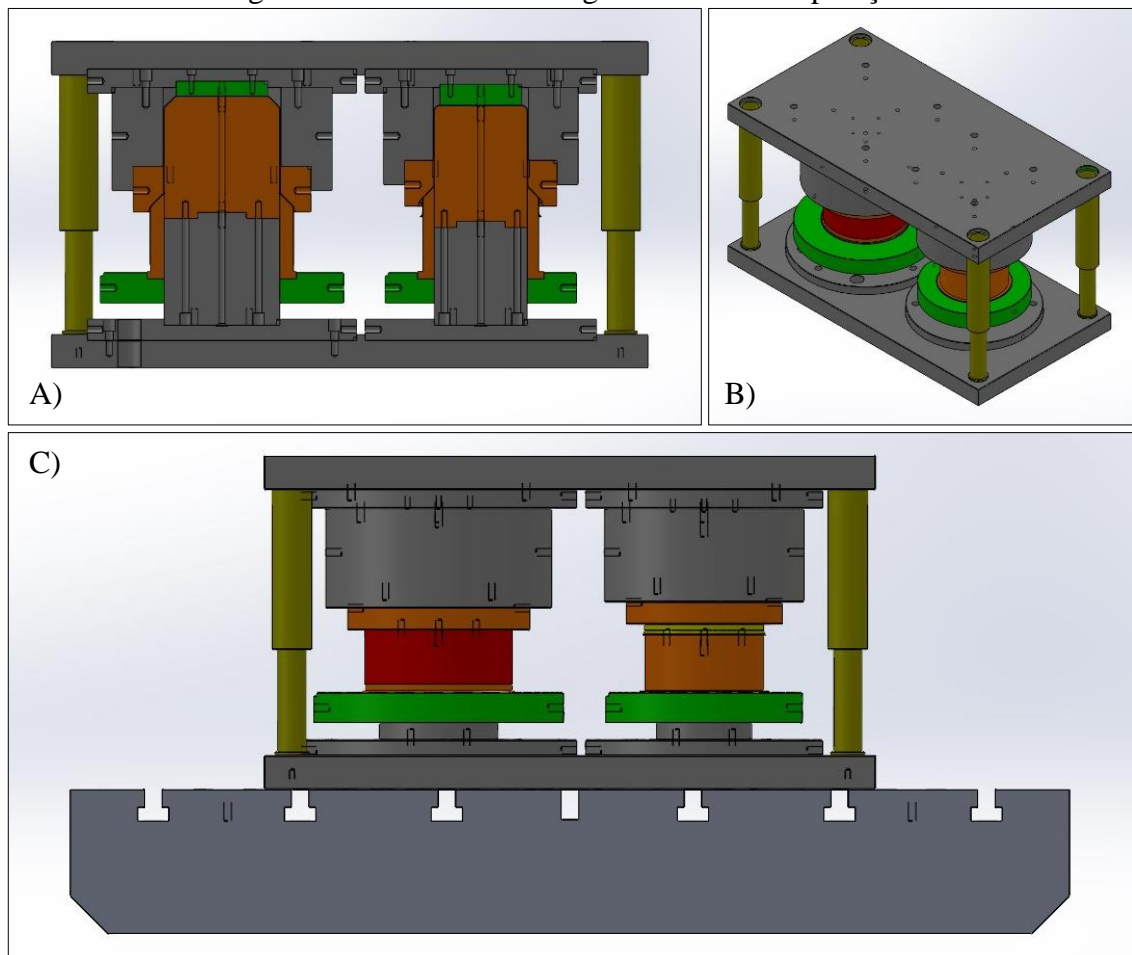
Figura 30- Ferramenta da primeira operação



Fonte: O autor (2023).

Na ferramenta combinada, que executa simultaneamente a segunda e a terceira operação, o prensa-chapa também possui a função de posicionador, pois o mesmo é usado para centralizar a peça em relação ao punção e à matriz. Em ambas as operações, assim como na ferramenta que executa a primeira operação, a extração da peça no punção é executada pelo prensa-chapa e na matriz ocorre via ar comprimido. O modelamento desta ferramenta combinada pode ser visto na Figura 31 em uma vista frontal em corte (A), uma isométrica (B) e uma vista frontal sobre a mesa da prensa. O Apêndice D fornece informações complementares dessa ferramenta.

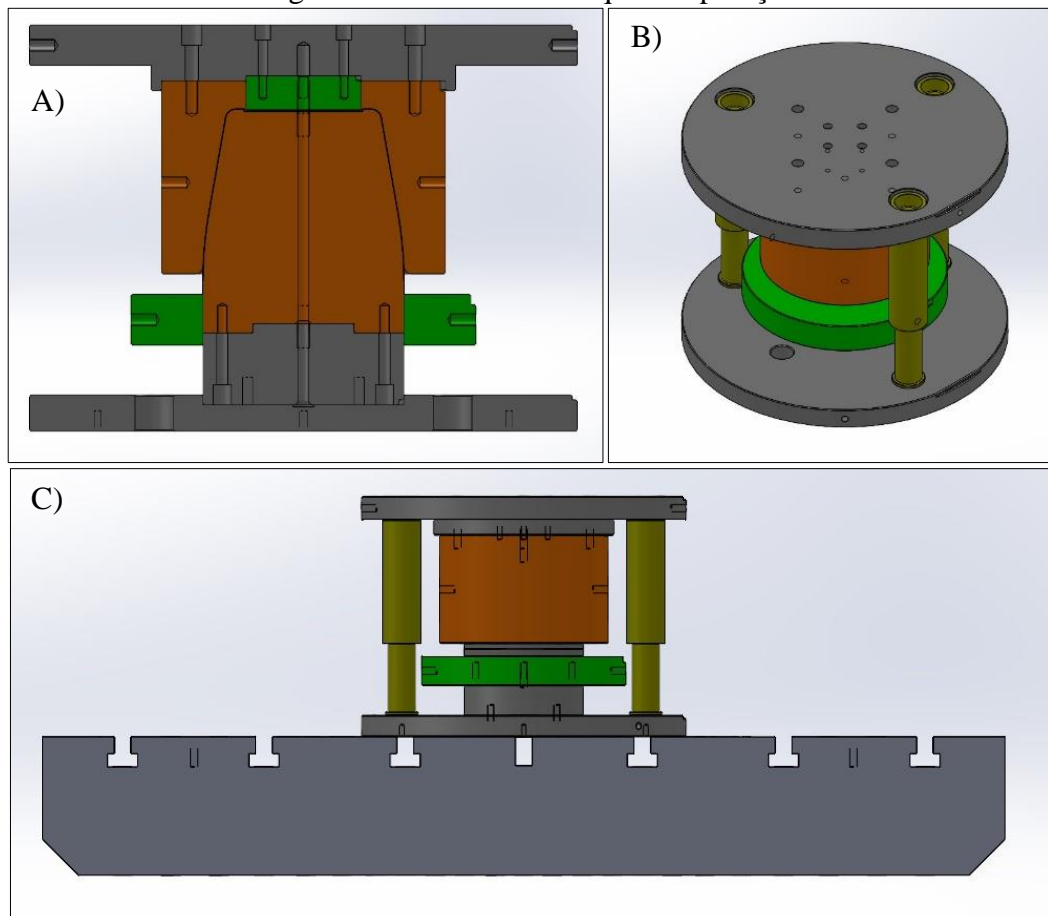
Figura 31- Ferramenta da segunda e terceira operações



Fonte: O autor (2023).

A ferramenta final que realiza a calibração da peça não possui prensa-chapa, e por essa razão foi adicionado um extrator acionado pela almofada. Já a extração da peça na matriz também será por ar comprimido. Nesta operação, o próprio punção centraliza a peça em relação a matriz. A Figura 32 apresenta as mesmas três vistas das ferramentas anteriores para a ferramenta de calibração, enquanto que o Apêndice E detalha um pouco mais sobre a mesma.

Figura 32- Ferramenta da quarta operação



Fonte: O autor (2023).

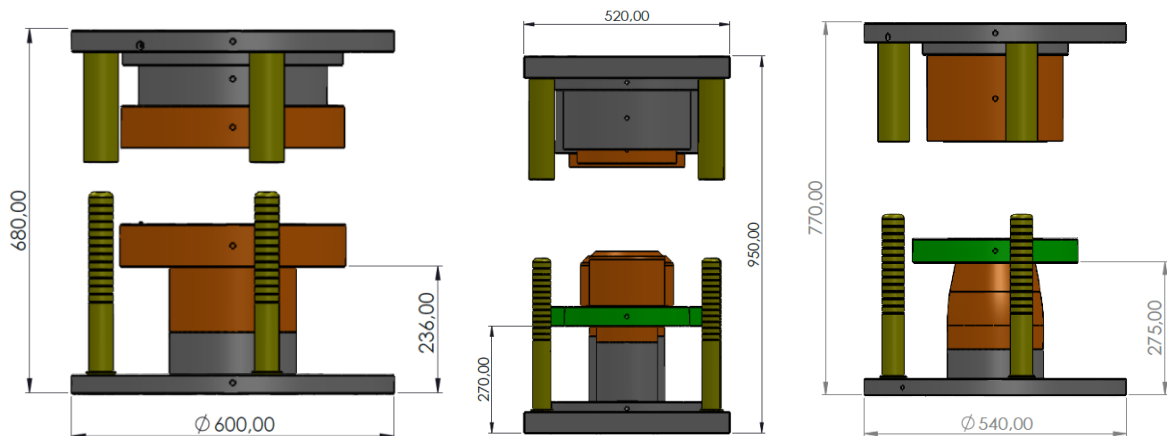
Algumas das principais dimensões das ferramentas modeladas são apresentados na Tabela 10. Conforme pode ser observado, todas as dimensões respeitaram os limites impostos pela máquina ao qual foram destinadas. Uma representação esquemática de algumas dessas dimensões também podem ser vistas na Figura 33 e nos Apêndices C, D e E.

Tabela 10- Dimensões principais das ferramentas

	Estágio 1 (mm)	Estágios 2 e 3 (mm)	Estágio 4 (mm)
Altura de ferramenta aberta	680	950	770
Altura de ferramenta fechada	385	535	400
Dimensões das bases	Ø600	980x520	Ø540
Altura dos pinos do prensa-chapa	236	270	275

Fonte: O autor (2023).

Figura 33- Dimensões principais das ferramentas



Fonte: O autor (2023).

As escolhas dos materiais dos componentes foram feitas de acordo com a função que o mesmo exerce na ferramenta e as solicitações que este componente estará sujeito durante o trabalho.

Para as partes ativas da ferramenta, que sofrerão os maiores esforços, sejam causados pelas forças de estampagem, seja pelo atrito, o material escolhido foi o D2, sendo ainda temperado e retificado. Segundo Chiaverini (2005), o D2 é um aço para trabalho a frio de alto carbono e alto cromo, com uma grande profundidade de endurecimento e boa resistência ao desgaste, podendo atingir durezas que vão de 58 a 64 HRC.

Já os componentes de guiamento o material será o aço SAE 8620 cementado, temperado e retificado. As colunas e buchas de guiamento estão em constante atrito devido a sua movimentação, além de trabalhar com folgas pequenas. Chiaverini (2005) define esse material como sendo um aço de baixo carbono e baixa liga, com dureza superficial elevada e boa ductilidade no núcleo. Essas características tornam favorável seu uso, pois evita-se o desgaste superficial e não as torna quebradiças.

Componentes que sofrerão com cargas consideráveis, mas não estarão sujeitas a grandes atritos, como a base do prensa-chapas e o estampo superior serão fabricados de SAE 4140 temperado e retificado. Esse aço, também de baixa liga, quando temperado, apresenta dureza acima de 50 HRC, o que o torna suficientemente resistente para aguentar as solicitações não tão extremas a que serão submetidos, sem apresentarem desgastes prematuros. Além disso, possui um valor de compra bem abaixo ao do aço D2.

Todos os demais componentes, como a base inferior e a superior, que não terão qualquer contato com a peça que está sendo estampada, o material será o SAE 1045. Esta escolha se justifica pois para esses componentes não são requeridos nenhum tipo de tratamento térmico,

pois as propriedades de um aço carbono já atendem. Além disso, tendem a ser mais baratos do que quando comparado aos aços ligados.

As ferramentas foram também modeladas contemplando os furos de entrada e saída de ar também nos punções. Nas peças cilíndricas foram adicionadas referências para facilitar no zeramento da peça na usinagem. Para o transporte das peças, furos para olhais estão dispostos em suas laterais.

5 CONCLUSÃO

Através da revisão bibliográfica adquiriu-se uma melhor compreensão do processo de embutimento profundo e do comportamento do material. Além disso, obteve-se o embasamento teórico necessário para a construção de um projeto de fabricação de componentes cônicos.

Com a realização dos ensaios de tração, foram obtidas as propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304, que é o material estudado neste trabalho. O material foi ensaiado em diversas inclinações em relação ao sentido de laminação, e a média dos valores encontrados para essas propriedades ficaram muito próximas aos valores indicados pelo fornecedor do material, apresentando diferenças abaixo dos 10%. Entre as propriedades encontradas tem-se a deformação percentual ($\varepsilon = 61,95\%$), o limite de escoamento ($\sigma_e = 271,5$ MPa) e o limite de resistência ($\sigma_r = 657,3$ MPa).

Com os dados do ensaio de tração, foi gerado o diagrama de tensão- deformação real, e utilizando o recurso de linha de tendência de potência, encontrou-se a equação que descreve o comportamento plástico do material. Desta equação, foi retirado o encruamento ($n = 0,41$) e a constante da tensão verdadeira ($C_m = 1376$), valores que se aproximam muito do que a literatura descreve para esse material.

Com o equacionamento obtido na revisão bibliográfica, foram dimensionados os estágios de embutimento do produto, desde o blanque até a obtenção da geometria final. Também foram calculados os parâmetros geométricos da ferramenta, como os raios de canto da matriz e do punção e a folga entre ambos. Esta última etapa foi realizada por três metodologias diferentes, cada uma indicada por um autor diferente.

Com os conceitos estudados e revisados anteriormente, passou-se para o processo de simulação utilizando o MEF com o software Abaqus CAE. Na simulação, não foi possível executar todas as operações de maneira sequencial, devido a dificuldades na convergência dos resultados, que resultavam em falhas. Para contornar esse problema, foi considerada a inclusão do processo de recozimento para alívio de tensões entre a primeira e a segunda operação, bem como entre o terceiro e o quarto estágio. Com isso, foi possível realizar todas as operações previstas até a obtenção do produto final.

Houve divergências entre os valores calculados analiticamente e os parâmetros resultantes da simulação. Na simulação, o primeiro estágio já apresentou alterações em relação ao calculado, o que afetou todos os estágios subsequentes. Em relação aos parâmetros geométricos, alguns ficaram próximos ou iguais aos valores calculados, como a folga, que ficou dentro do indicado por Schaeffer (2006), e o raio do canto do punção, que se aproximou do

valor calculado pela equação fornecida por Provenza (1987). A maior diferença ocorreu no raio do canto da matriz, que sofreu grandes alterações na simulação e não correspondeu aos valores calculados por nenhuma das metodologias pesquisadas neste trabalho.

Com os resultados da simulação, as ferramentas de embutimento para a fabricação deste produto foram modeladas usando o software CAD Solidworks. No total, foram necessárias três ferramentas, sendo duas simples (primeira e quarta operações) e uma combinada (segunda e terceira operações simultâneas). O dimensionamento levou em consideração a máquina em que devem ser utilizadas, a robustez necessária para suportar o processo, além de uma série de outras questões técnicas. O material de cada parte da ferramenta também foi escolhido para atender aos carregamentos e esforços envolvidos.

Por fim, pode-se concluir que o estudo realizado foi refinado o suficiente para validar o processo simulado. De forma geral, os resultados encontrados foram um pouco diferentes do esperado inicialmente, mas o comportamento observado é semelhante ao que a literatura indica, incluindo os problemas encontrados, que são citados como possíveis de acontecer no processo. Pode-se ainda concluir que o processo de simulação via MEF é muito útil para ajudar a prever o comportamento que o material irá apresentar no processo, evitando falhas de projeto e minimizando o tradicional procedimento de tentativa e erro.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros ou complementos para este trabalho, propõe-se:

- a) realizar o ensaio de tração no material já deformado e recozido para determinar suas propriedades mecânicas após tais processos;
- b) simular o processo discretizando a chapa com um maior refinamento da malha;
- c) simular o processo por outras metodologias como, por exemplo, utilizando o método implícito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS 6.11, **Abaqus/ CAE User's Manual**. Disponível em: <http://130.149.89.49:2080/v6.11/pdf_books/CAE.pdf>. Acesso em 28 de abril de 2023.

APERAM SOUTH AMERICA, **Aço inox especificações técnicas**. Disponível em: <<https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/Aperam%20-%20A%C3%A7o%20Inox%20-%20Especifica%C3%A7%C3%B5es%20T%C3%A9cnicas.pdf>>. Acesso em 20 de outubro de 2022.

APERAM SOUTH AMERICA, **Aço inoxidável: a solução perfeita para o desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <<https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/A-solu%C3%A7%C3%A3o-perfeita-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel.pdf>>. Acesso em 20 de outubro de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos- Ensaio de tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2013.

ATUL S, Takalkar; BABU, M C Lenin. A review on effect of thinning, wrinkling and spring-back on deep drawing process. **Journal Of Engineering Manufacture**. Chennai, p. 1-26. 5 nov. 2017.

BASTOS, Alexandre Lundgren. **Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação**. 2009. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2009.

BATHE, Klaus Jurgen. **Finite Elements Procedures**. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

BENAZZI JUNIOR, Ivar; CAVERSAN, Elpidio Gilson. **Tecnologia de estampagem**. Sorocaba: Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, 2010.

BLALA, Hamza et al. GLARE Hydro-Mechanical Deep Drawing Analysis Based on the Forming Depth. **Materials Science Forum**. Beijing, p. 75-84. 20 mar. 2020.

BOFF, Diego da Silva. **Simulação da matriz de estampagem profunda de um recipiente industrial utilizando aço EEP 19**. 2019. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019.

BORNANCIN, Roberto. **Curso Abaqus para iniciantes**. Disponível em: <https://cursoabaqusparainiciantes.club.hotmart.com/lesson/y4PG8KQyOx/analise-viga-two>. Acesso em: 18 fev. 2023.

BRINOX. Disponível em: <<https://www.brinox.com.br/a-brinox/>>. Acesso em: 03 set. 2022.

BRINOX SHOP. Disponível em: <<https://www.brinoxshop.com.br/>>. Acesso em: 03 set. 2022.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**: Características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**: estrutura e propriedades das ligas metálicas. 2. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1986. 1 v.

DALEFFE, Anderson. **Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro**. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DREHER, Felipe Miranda. **Avaliação da estampagem profunda de cubas em aço inox AISI 304**. 2016. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

DUARTE, Écio Naves. **Estudo analítico-numérico de freios de estampagem em chapas metálicas**. 2007. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 247 p.

GILAT, Amos; SUBRAMANIAM, Vish. **Métodos Numéricos para Engenheiros e Cientistas**: uma introdução com aplicações usando o matlab. Porto Alegre: Bookman, 2008.

GORJI, Abdolhamid et al. Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical–cylindrical cups. **Int J Adv Manuf Technol**. Londres, p. 915-927. mar. 2011.

IKUMAPAYI, Omolayo M. et al. A concise overview of deep drawing in the metal forming operation. **Materials Today: Proceedings**. Ado Ekiti, p. 3233-3238. 22 abr. 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **A Siderurgia em Números 2020**. Disponível em <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2020/04/Mini_anuario_2020_completo.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2022.

KIM, Nam-Ho; SANKAR, Bhavani. **Introdução à análise e ao projeto em elementos finitos**. 1. Ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2011.

MARCONDES, Paulo. **Projeto de ferramentas para conformação de chapas**. Curitiba: Demec/Ufpr, 2008. 254 p.

MORGADO, Diogo Filipe Neves. **Otimização do processo de projeto de uma ferramenta progressiva para a estampagem de componentes metálicos**. 2013. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

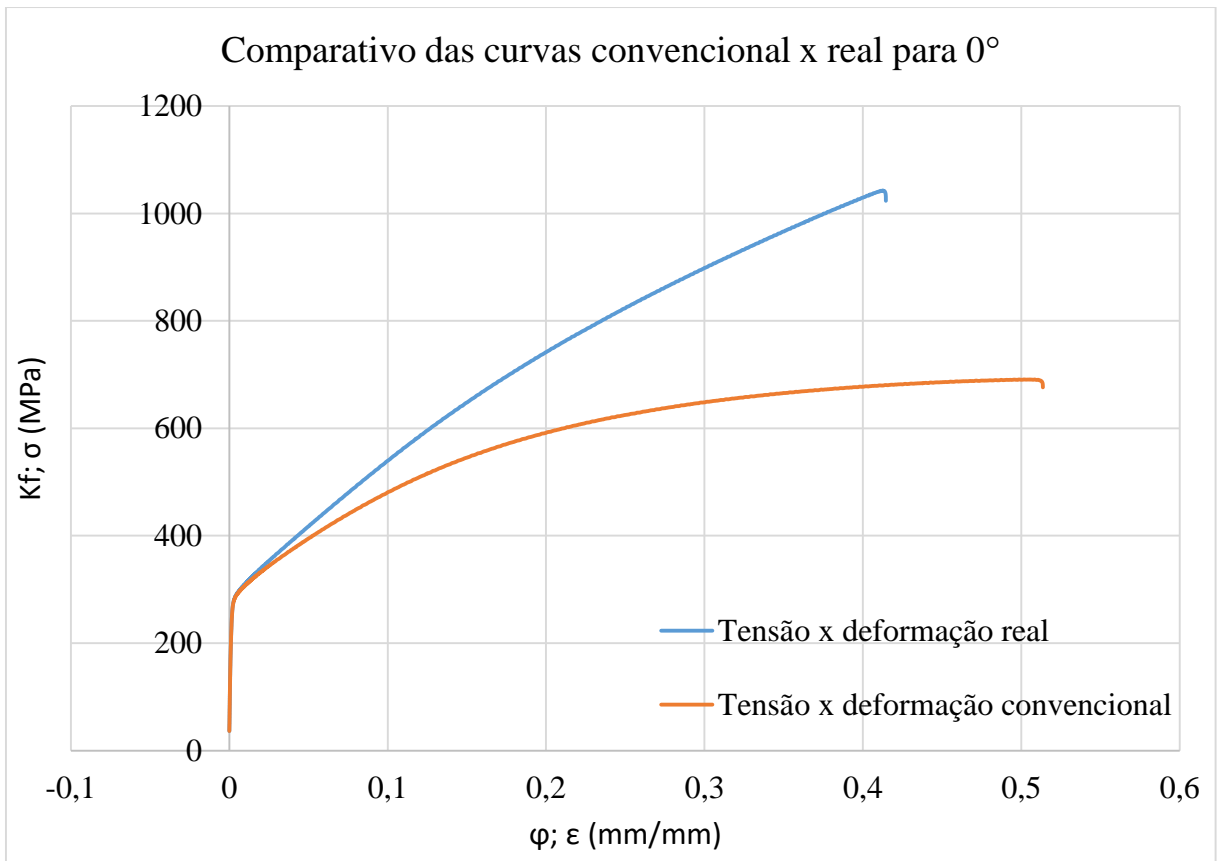
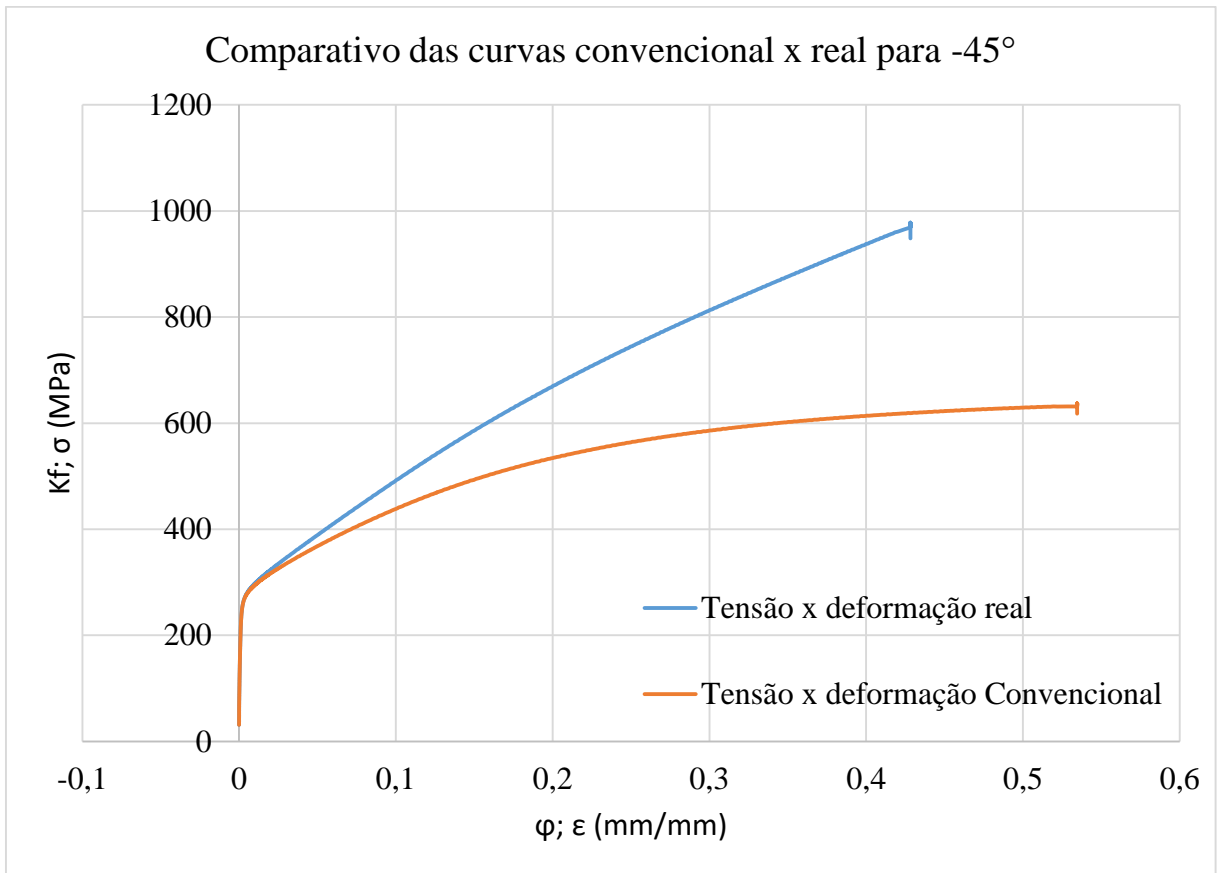
PROVENZA, Francesco. **Estampos I**. São Paulo: Pro-Tec, 1986.

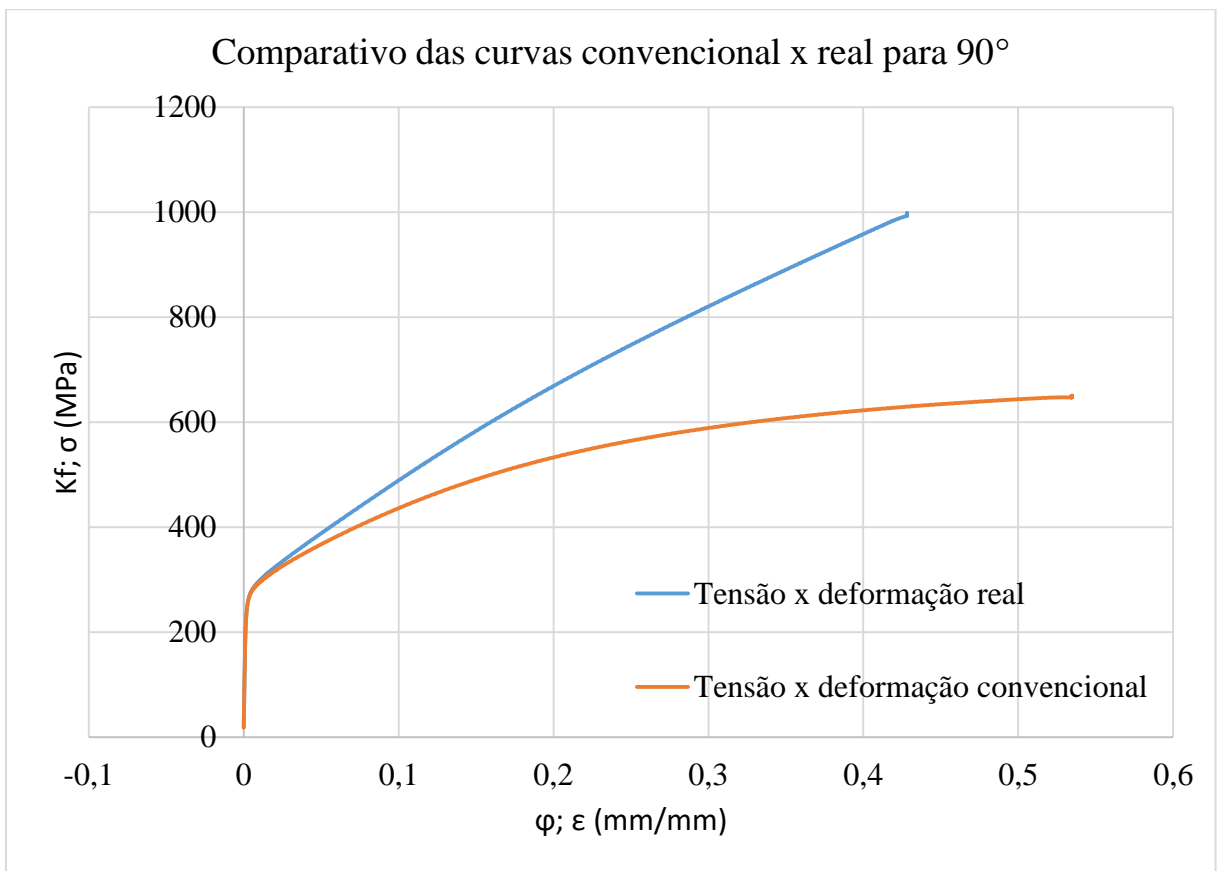
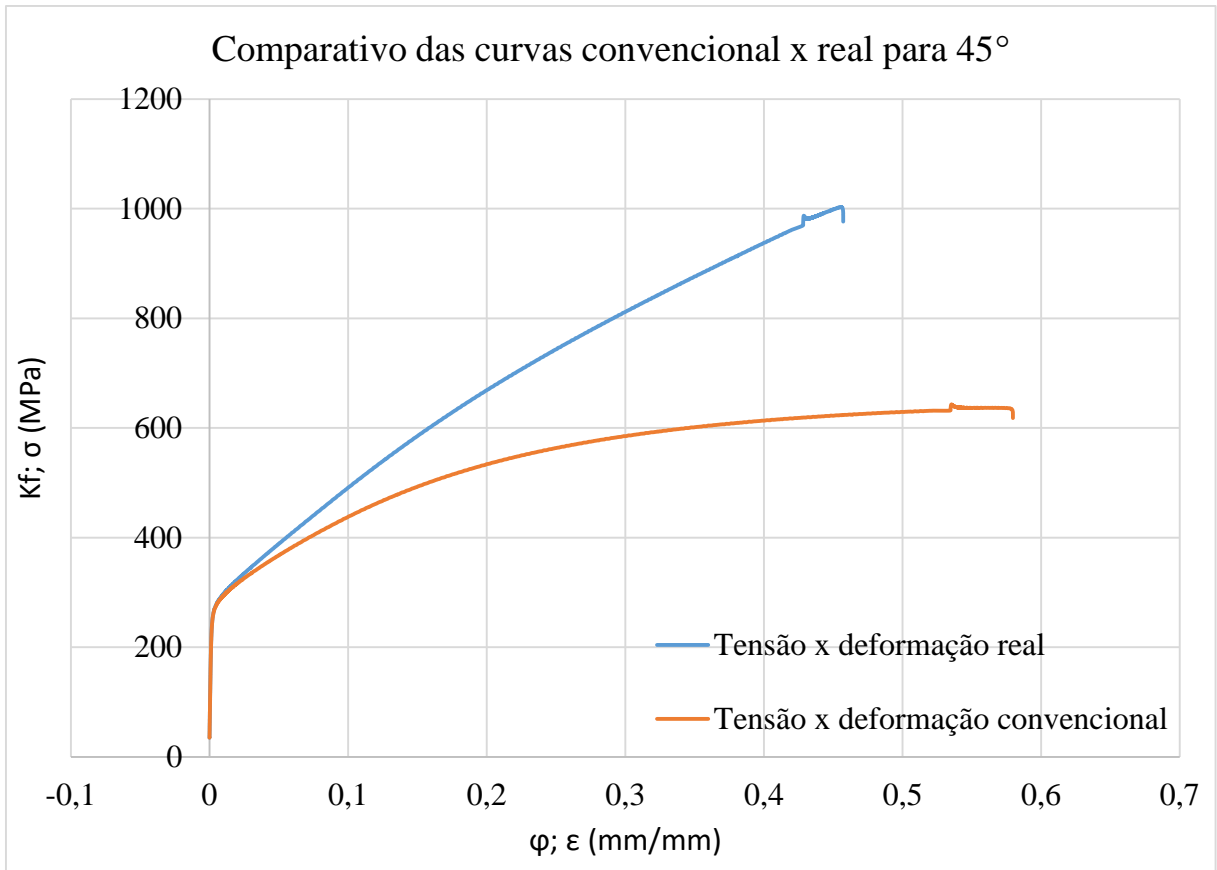
PROVENZA, Francesco. **Estampos III**. São Paulo: Pro-Tec, 1987.

- ROCHA, Rafael Pandolfo da et al. Caracterização dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 430 para aplicação em processos de estampagem profunda. **Brazilian Journal Of Development**. Porto Alegre, p. 51077-51101. jul. 2022.
- RODRIGUES, Jorge; MARTINS, Paulo. **Tecnologia mecânica: tecnologia da deformação plástica**. Lisboa: Escolar Editora, 2005.
- ROSSI, Gilvan Prada. **Estudo de correlação do comportamento de pontos de solda em corpos de prova pelo Método de Elementos Finitos**. 2007. 113p. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- ROSSI, Mario. **Stampaggio: a freddo delle lamiere**. Milano: Ulrico Hoepli Millano, 1979.
- SANTOS, Bruna Karine dos; QUADROS, Marcelo Luiz D. **Processo de conformação**. Porto Alegre: Grupo A, 2018. E-book. 9788595024878. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595024878/>>. Acesso em: 03 set. 2022.
- SAREMA, B.; MATOPE, S.; STERZING, A.. Steps in process parameter optimisation and control systems development for the deep-drawing process. **Saiee32 Proceedings**. Chemnitz, p. 366-374. 6 out. 2021.
- SCHAEFFER, Lírio. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 193 p.
- SCHAEFFER, Lírio. **Conformação mecânica**. 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 167 p.
- SCHAEFFER, Lírio. Fundamentos do projeto de ferramentas para o processo de estampagem. **Corte e Conformação**, Porto Alegre, n. 11, p. 31-36, 2006.
- SCOPEL, Tiago. **Avaliação da estampabilidade do alumínio (1100) no processo de estampagem profunda**. 2014. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.
- SECCO, Adriano Ruiz; AMARAL FILHO, Dario do; OLIVEIRA, Nelson Costa de. **Telecurso 2000 profissionalizante: Mecânica**. Processos de fabricação. Gol, 2002. 4 v.
- SHAFAT, Mohammad Amin; ABBASI, Mahmoud; KETABCHI, Mostafa. Investigation into wall wrinkling in deep drawing process of conical cups. **Journal Of Materials Processing Technology**. Teerão, p. 1783-1795. 06 jun. 2011.
- SIMÕES, Vasco Manuel Neto. **Analysis of the influence of process parameters in the deep drawing of a cylindrical cup**. 2012. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.
- SINGH, Chandra Pal; AGNIHOTRI, Geeta. Study of Deep Drawing Process Parameters: A Review. **International Journal Of Scientific And Research Publications**. Bhopal, p. 352-366. fev. 2015.

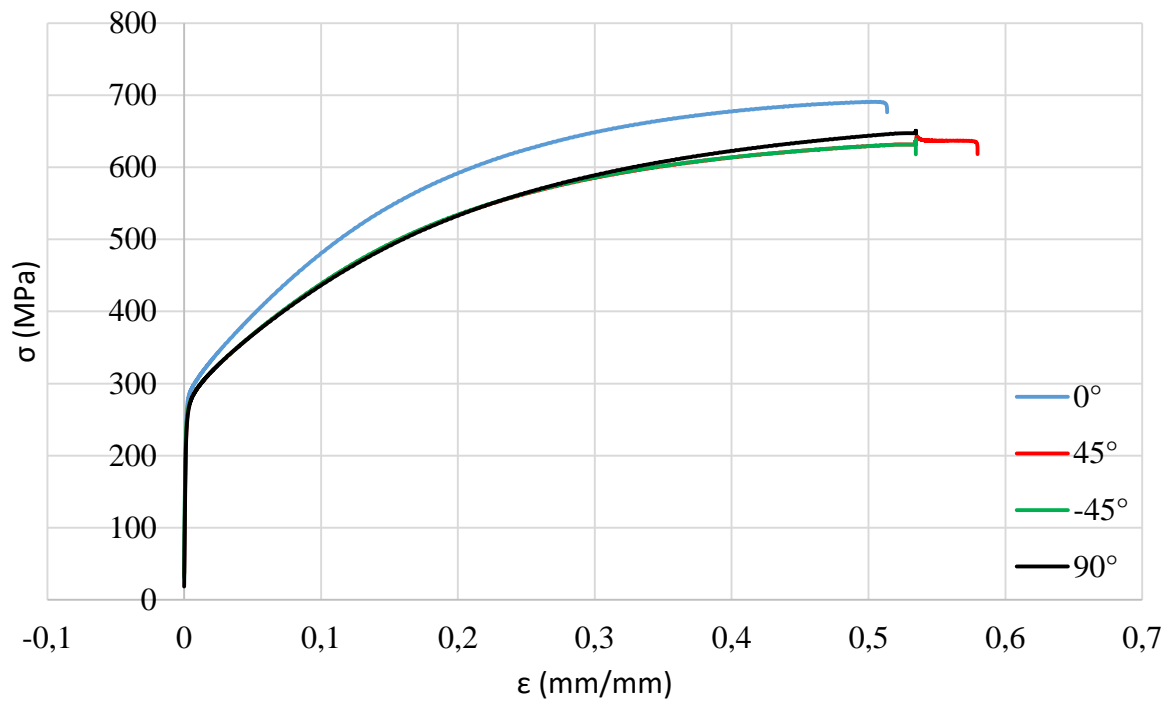
SIRTOLI, Samuel. **Projeto de matrizes de corte por cisalhamento transversal aplicado ao corte de perfis de aço**. 2013. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

TOIT, Madeleine du; STEYN, Herman G.. Comparing the formability of AISI 304 and AISI 202 stainless steel. **Journal Of Materials Engineering And Performance**. Pretoria, South Africa, v. 21, n. 7, p. 1491-1495. 14 jul. 2011.

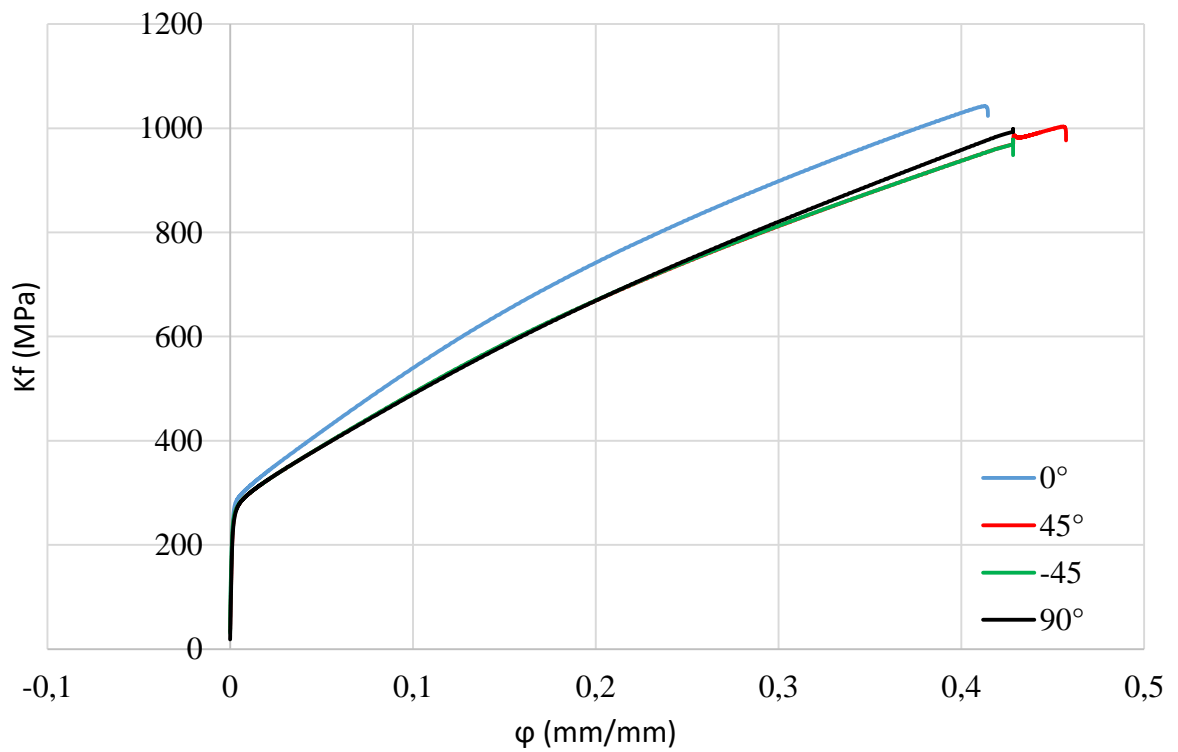
APÊNDICE A- DIAGRAMAS TENSÃO- DEFORMAÇÃO



Comparação dos diagramas tensão x deformação convencional



Comparação dos diagramas tensão x deformação real



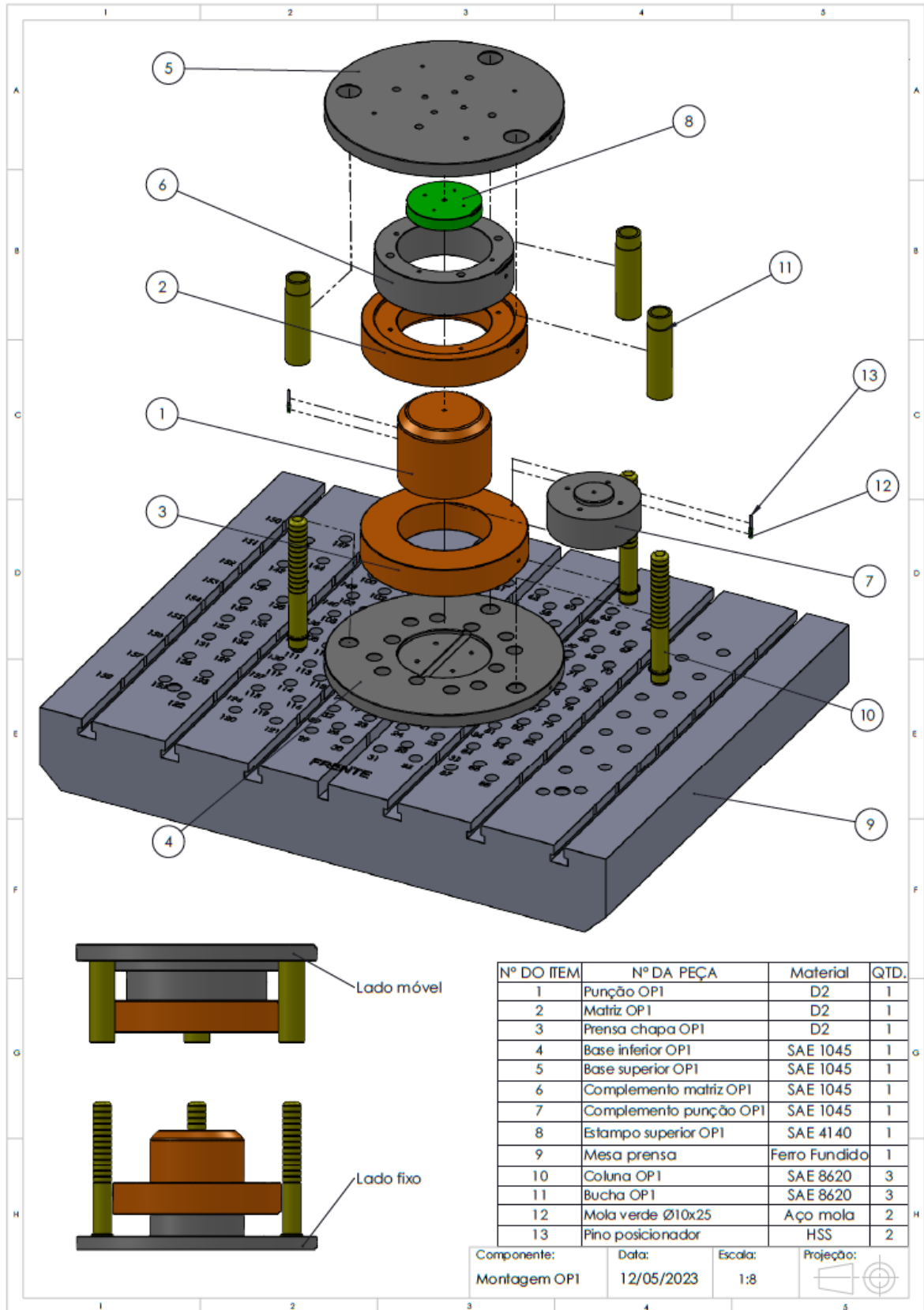
(Conclusão)

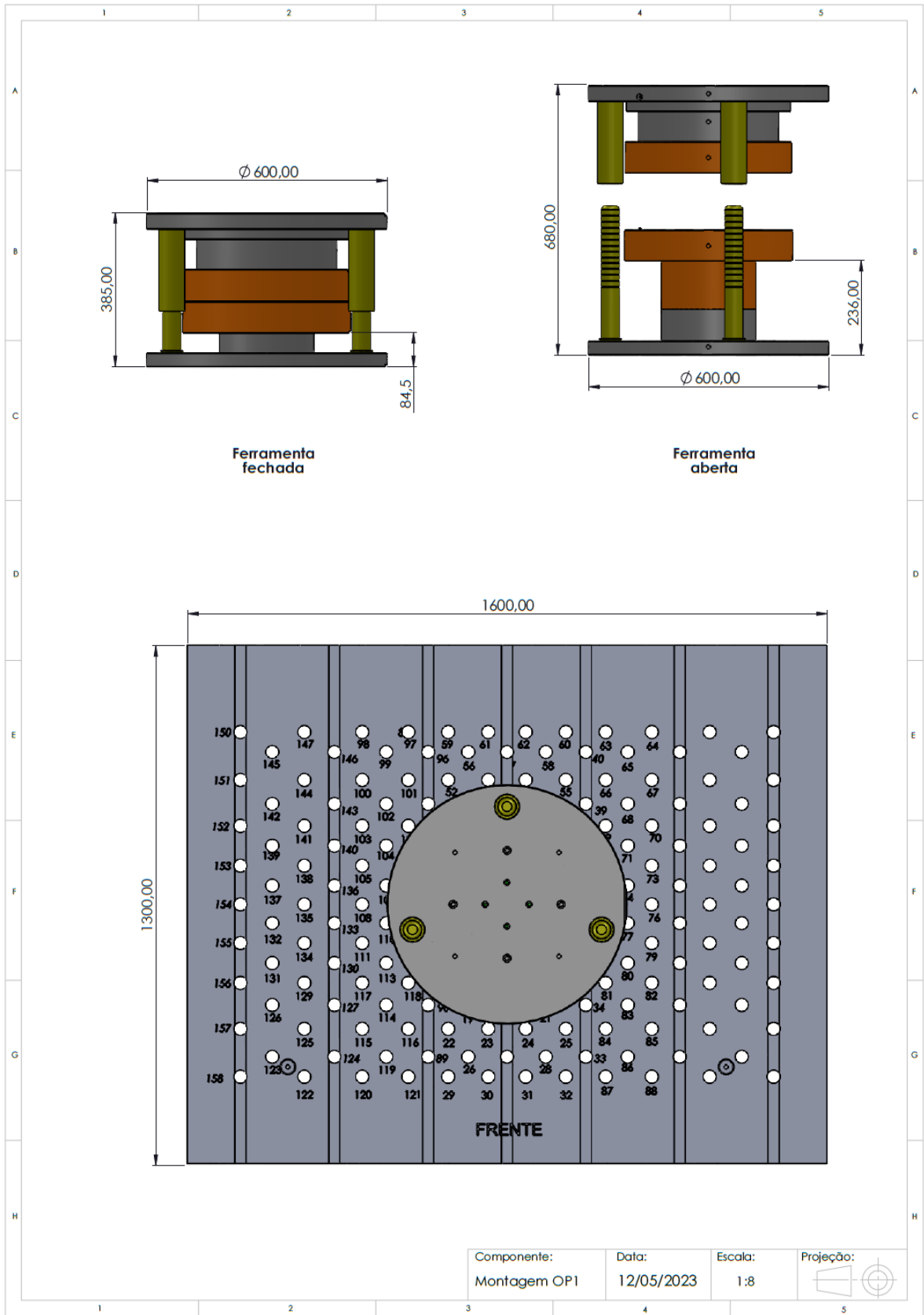
Dados com C_m e n médio				
C_m méd	1376,0	n méd	0,41	
ϵ [mm/mm] $\epsilon=e^{\varphi}-1$	σ [Mpa] $\sigma=kf/(\epsilon+1)$	φ com incrementos de 0,001	kf [Mpa] $kf=C_m*\varphi^n$	φ corrigido para o Abaqus $\varphi_c=\varphi-\varphi_e$
0,5746	632,12	0,454	995,33	0,434
0,5762	632,06	0,455	996,23	0,435
0,5778	631,99	0,456	997,13	0,436
0,5793	631,93	0,457	998,03	0,437
0,5809	631,86	0,458	998,92	0,438
0,5825	631,80	0,459	999,81	0,439
0,5841	631,73	0,46	1000,71	0,440
0,5857	631,66	0,461	1001,60	0,441
0,5872	631,59	0,462	1002,49	0,442
0,5888	631,52	0,463	1003,38	0,443
0,5904	631,45	0,464	1004,27	0,444
0,5920	631,37	0,465	1005,15	0,445
0,5936	631,30	0,466	1006,04	0,446
0,5952	631,22	0,467	1006,92	0,447
0,5968	631,14	0,468	1007,81	0,448
0,5984	631,06	0,469	1008,69	0,449
0,6000	630,99	0,47	1009,57	0,450
0,6016	630,90	0,471	1010,45	0,451
0,6032	630,82	0,472	1011,33	0,452
0,6048	630,74	0,473	1012,21	0,453
0,6064	630,65	0,474	1013,09	0,454
0,6080	630,57	0,475	1013,96	0,455
0,6096	630,48	0,476	1014,84	0,456
0,6112	630,39	0,477	1015,71	0,457
0,6128	630,31	0,478	1016,59	0,458
0,6145	630,22	0,479	1017,46	0,459
0,6161	630,12	0,48	1018,33	0,460
0,6177	630,03	0,481	1019,20	0,461
0,6193	629,94	0,482	1020,07	0,462
0,6209	629,84	0,483	1020,93	0,463

Onde:

 φ_e = Deformação verdadeira no início do escoamento φ_c = Deformação verdadeira corrigida para o Abaqus

APÊNDICE C- FERRAMENTAS DE EMBUTIMENTO DO 1º ESTÁGIO

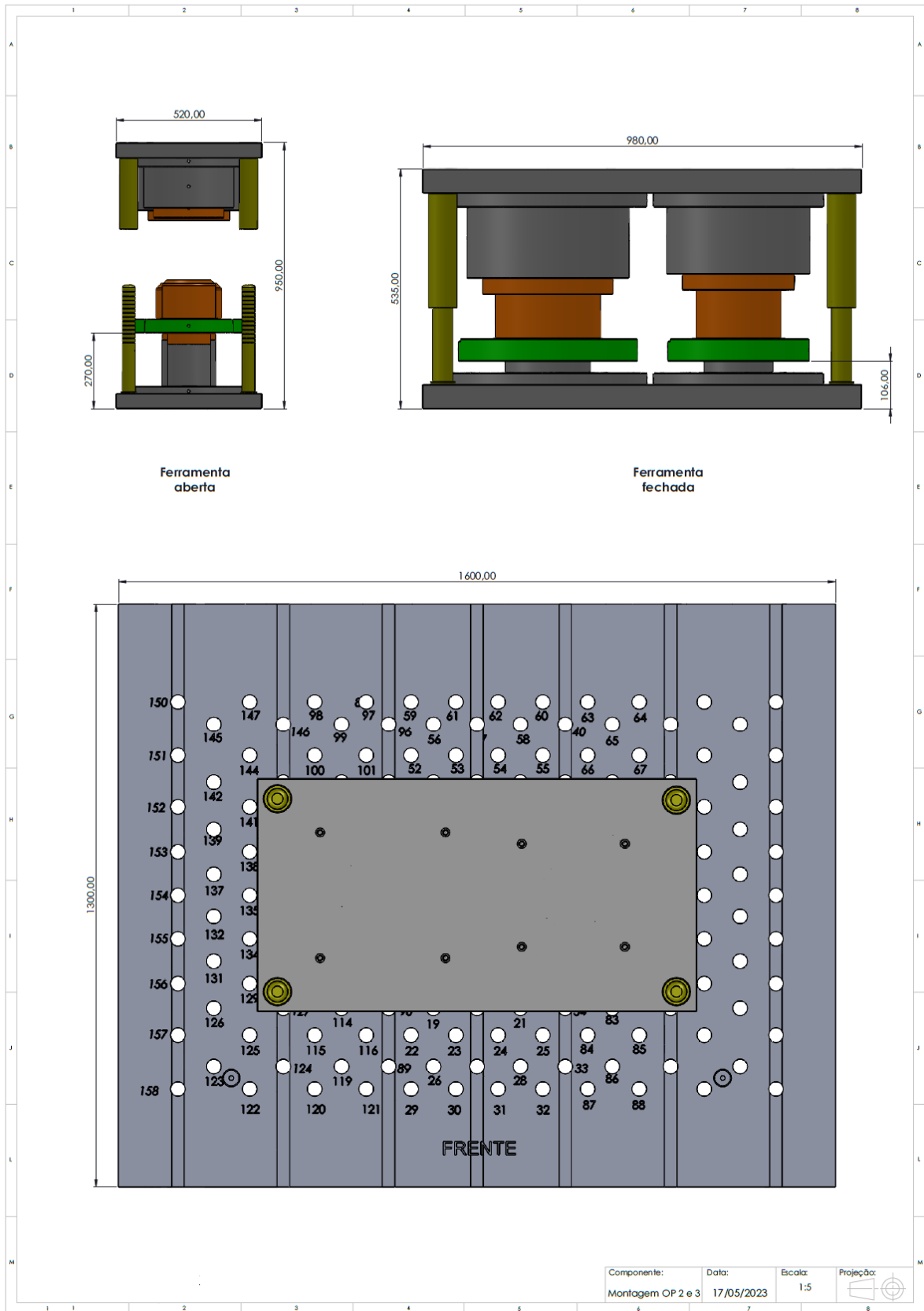




APÊNDICE D- FERRAMENTAS DE EMBUTIMENTO DOS ESTÁGIOS 2 E 3

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	Material	QTD.
1	Base inferior combinada	SAE 1045	1
2	Base superior combinada	SAE 1045	1
3	Coluna combinada	SAE 8620	4
4	Bucha combinada	SAE 8620	4
5	Punção OP2	D2	1
6	Frensa chapa OP2	D2	1
7	Base do prensa chapa OP2	SAE 4140	1
8	Matriz OP2	D2	1
9	Base inferior OP2	SAE 1045	1
10	Complemento matriz OP2	SAE 1045	1
11	Base superior OP2	SAE 1045	1
12	Estampo superior OP2	SAE 4140	1
13	Complemento punção OP2	SAE 1045	1
14	Mesa prensa+	Ferro Fundido	1
15	Punção OP3	D2	1
16	Frensa chapa OP3	D2	1
17	Base do prensa chapa OP3	SAE 4140	1
18	Matriz OP3	D2	1
19	Base inferior OP3	SAE 1045	1
20	Complemento matriz OP3	SAE 1045	1
21	Base superior OP3	SAE 1045	1
22	Estampo superior OP3	SAE 4140	1
23	Complemento punção OP3	SAE 1045	1

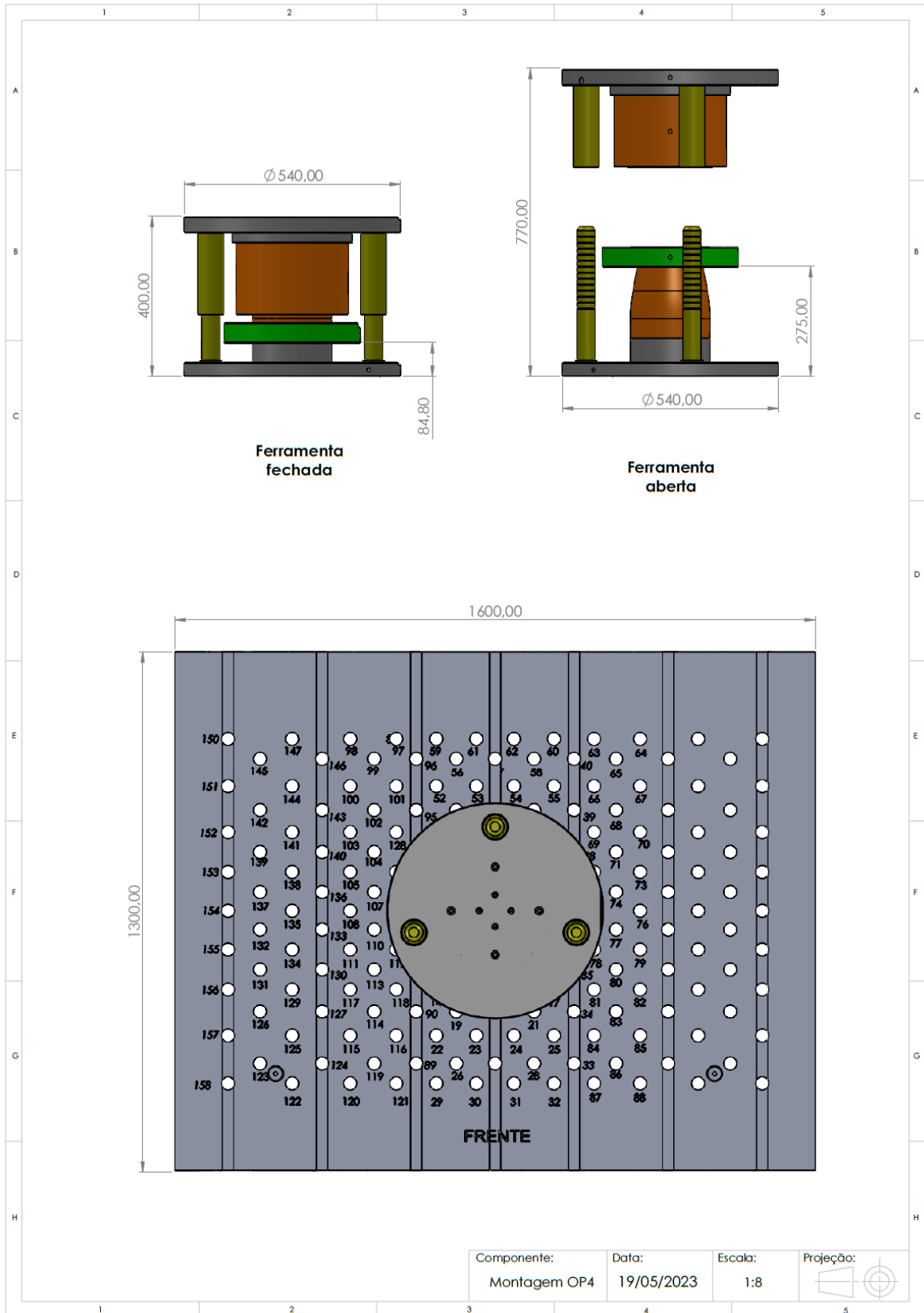
Componente: Montagem OP 2 e 3 Data: 17/05/2023 Folha: 18 Projeto:



APÊNDICE E- FERRAMENTA DE CALIBRAÇÃO

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	Material	QTD.
1	Punção OP4	D2	1
2	Extrator OP4	SAE 4140	1
3	Matriz OP4	D2	1
4	Base inferior OP4	SAE 1045	1
5	Base superior OP4	SAE 1045	1
6	Estampo superior OP4	SAE 4140	1
7	Complemento punção OP4	SAE 1045	1
8	Coluna OP4	SAE 8620	3
9	Bucha OP4	SAE 8620	3
10	Mesa prensa+	Ferro Fundido	1

Componente: Montagem OP4 Data: 19/05/2023 Escala: 1:8 Projeção:



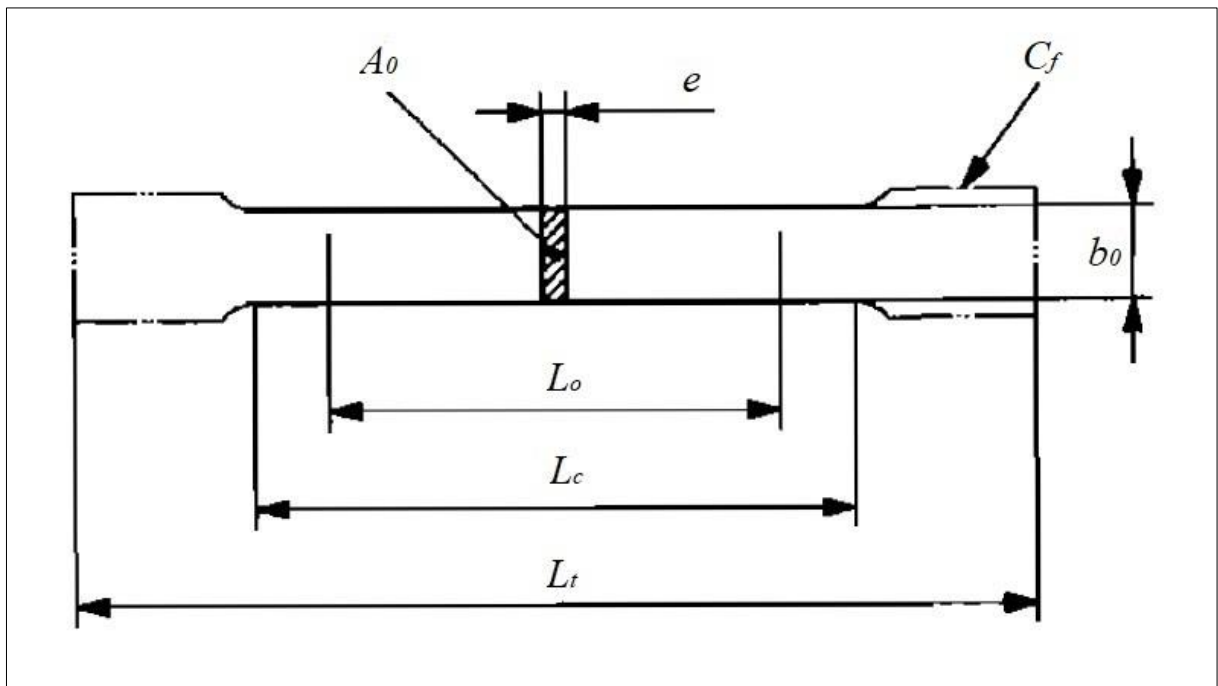
**ANEXO A- TABELA DO RAIOS DE CANTO DO PUNÇÃO EM FUNÇÃO DA
ESPESSURA**

Raio de canto do punção em função da espessura

Espessura da chapa (mm)	Raio mínimo (mm)	Raio máximo (mm)
0,38 a 0,46	4,0	6,4
0,53 a 0,69	4,7	7,1
0,79 a 1,17	4,7	7,9
1,2 a 1,6	6,4	9,5
2,0 a 2,4	7,9	11,1
2,8 a 3,2	8,7	11,9

Fonte: Adaptado de Rodrigues e Martins (2005).

ANEXO B- CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO



Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 6892-1 (2013).

Onde:

e = espessura inicial de um corpo de prova plano

b_0 = largura inicial do comprimento paralelo de um corpo de prova plano

L_c = comprimento paralelo (para corpos de prova com cabeça)

L_0 = comprimento de medida inicial

L_t = comprimento total do corpo de prova

A_0 = área da seção transversal do comprimento paralelo

C_f = cabeças de fixação

Dimensões dos corpos de prova

Tipo de corpo de prova	Largura b_0	Comprimento de medida inicial L_0	Comprimento paralelo L_c		Comprimento livre entre garras para corpo de prova de lados paralelos
			Mínimo	Recomendado	
1	$12,5 \pm 1$	50	57	75	87,5
2	20 ± 1	80	90	120	140
3	25 ± 1	50^a	60^a	-	Não definido

Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 6892-1 (2013).

**ANEXO C- PRESSÃO NOMINAL DO PRENSA-CHAPA DE ACORDO COM O
MATERIAL**

Material	Pressão do prensa-chapa (N/mm²)
Aço estampagem profunda	2,1 a 3,1
Aço baixo teor de carbono	3,4
Alumínio e ligas de alumínio	0,8 a 1,4
Ligas especiais de alumínio	3,4
Aço inoxidável	2,1 a 5,2
Aço inoxidável austenítico	6,9
Cobre	1,2 a 1,7
Latão	1,4 a 2,1

Fonte: Adaptado de Rodrigues e Martins (2005).

ANEXO D- RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

UCS - Laboratório de Ensaios Mecânicos

REGISTRO DE ENSAIO LAMEC - FE102 REVISÃO - 01 (DEZ/2016)

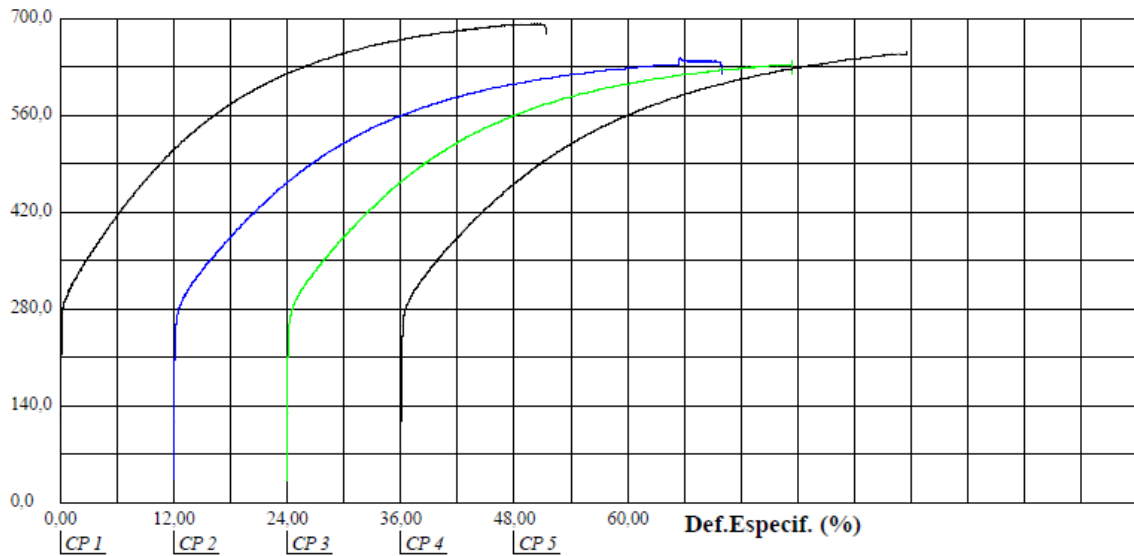
Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 26** Extensômetro: **Trd 2** Data: **20/03/2023** Hora: **19:47:04** Trabalho n° **4260**
 Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **RELATÓRIO - TRAÇÃO RETANGULAR E20T**
 Ident. Amostra: >>>>>Cliente: **MS ENF. MECÂNICA** Temp.(°C): **23,5** - Ident. n°: **01-45°** S.S.: - Folha: **00 de 00**

Corpo de Prova	Ident. n°:	Área (mm ²)	Tensão *Escoam. (MPa)	Tensão Max. (MPa)	Deform. Medida (%)	ModElast (MPa)
CP 1	01+00°	12,0	284	693	53,0	182741
CP 2	01+45°	12,0	268	645	63,0	174675
CP 3	01-45°	12,0	268	639	63,3	181724
CP 4	01-90°	12,0	266	652	68,5	175728

*Escoam. - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: **0,20 %**
 Método de ensaio segundo norma NBR: **6673,81**
 Velocidade de ensaio: **10,0 mm/min**
 Comp. Base->Extensômetro: **50,0 mm**
 Paquímetro utilizado P(): **7**

Tensão (MPa)



Observação:

IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE: 01 corpo de prova de aço inox 304, sentido de laminação 00°; aluno: Vinicius Castilhos; disciplina: TCC II; identificado por: 01-00° - 01+45° - 01-45° - 01-90° -

